

Remerciement

Nous tenons bien à remercier toute personne qui a contribué de près ou de loin pour achever ce mémoire avec l'aide de Dieu.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadrant Mr. BELAROUCI Salim, maître de conférences B à l'école supérieure en sciences appliquées de Tlemcen pour bien vouloir nous encadrer, pour ses encouragements et ses conseils judicieux.

Nous adressons également nos sincères remerciements à notre Co-encadrant Mr. TAHOUR Ahmed, professeur à l'école supérieure en sciences appliquées de Tlemcen, qui a répondu à toutes nos questions et qui nous a beaucoup aidé pour mener à bien ce travail.

Nous remercions très chaleureusement les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'être rapporteur de notre mémoire.

Merci à tous nos enseignants qui ont veillé pour nous transmettre le jus de leurs années, et leur contribution majeure dans notre formation.

Table des matières

Introduction générale.....	2
Premier Chapitre : Les perturbations dans le réseau électrique.....	3
1.1 Introduction	4
1.2 Origines des perturbations dans le réseau électrique.....	4
1.2.1 Influences sur l'amplitude.....	4
1.2.1.1 Creux de tension et coupures.....	4
1.2.1.2 Fluctuation de tension.....	5
1.2.1.3 Surtension	5
1.2.2 Influence sur la fréquence	7
1.2.3 Influence sur l'équilibre du système triphasé	7
1.2.4 Les harmoniques et inter-harmoniques	8
1.2.4.1 Notion de charge linéaire et charge non linéaire	8
1.2.4.2 Démystification des harmoniques	10
1.2.4.3 Éléments d'identification des harmoniques.....	13
1.2.4.4 Harmoniques de tension	15
1.2.4.5 Quelques équipements pollueurs	15
1.2.4.6 Effets néfastes de la pollution harmonique.....	16
1.3 Les normes internationales	17
1.3.1 Protection contre les harmoniques	17
1.3.2 Protection contre les phénomènes perturbateurs.....	19
1.4 Conclusion.....	20
Deuxième Chapitre : Solutions de dépollution du réseau électrique.....	21
2.1 Introduction	22
2.2 La résonance	22
2.2.1 La résonance série.....	23
2.2.2 La résonance parallèle.....	23
2.3 Solutions de dépollution	24
2.3.1 Solutions traditionnelles.....	24
2.3.1.1 Agissement sur la conception	24
2.3.1.2 Filtrage Passifs.....	25

2.3.2	Solutions modernes (filtrage actif).....	27
2.3.2.1	Filtres Actifs	27
2.4	Conclusion	32
	Troisième Chapitre : Etude et commande d'un Filtre Actif Parallèle.....	33
3.1	Introduction	34
3.2	Modélisation et dimensionnement du système	34
3.2.1	La source et le réseau	34
3.2.2	La charge polluante.....	34
3.2.3	Le Filtre Actif Parallèle.....	35
3.2.3.1	L'onduleur de tension et sa commande	36
3.2.3.2	La Capacité de Stockage.....	38
3.2.3.3	Le filtre de sortie.....	39
3.2.3.4	Identification des courants harmoniques	40
3.2.3.5	Régulateur de la tension continue V_{dc}	42
3.2.3.6	Régulateur du courant.....	44
3.3	Résultats de Simulation	46
3.3.1	Redresseur à diodes.....	47
3.3.2	Variation brusque de la charge.....	51
3.3.3	Charge déséquilibrée.....	53
3.3.4	Redresseur à thyristors	54
3.3.5	Variation brusque de la tension continue de référence	57
3.3.6	Effet du régulateur de courant sur l'amélioration du THD	58
3.3.6.1	Cas de commande de l'onduleur par hystérésis.....	58
3.3.6.2	Cas de commande de l'onduleur par MLI	59
3.3.7	Compensation de l'énergie réactive	60
3.4	Conclusion	61
	Conclusion générale	62
	Annexe.....	64
	Références bibliographiques	67

Liste des Figures

Figure 1. 1 : Creux et coupure de tension.	5
Figure 1. 2 : Fluctuation de tension.....	5
Figure 1. 3 : Surtension transitoire.....	6
Figure 1. 4 : Surtension permanente.....	6
Figure 1. 5 : Variation de la fréquence.....	7
Figure 1. 6 : Déséquilibre de réseau.....	8
Figure 1. 7 : L'allure de la tension et du courant d'une charge linéaire.....	9
Figure 1. 8 : L'allure de la tension et du courant d'une charge non linéaire.	9
Figure 1. 9 : Décomposition harmonique d'un signal déformé.....	10
Figure 2. 1 : Variation de l'impédance inductive et capacitive en fonction de la fréquence...	22
Figure 2. 2 : Représentation du courant et l'impédance d'un circuit RLC série.....	23
Figure 2. 3 : Représentation du courant et l'impédance d'un circuit RLC parallèle.....	24
Figure 2. 4 : Filtre passif résonnant.....	25
Figure 2. 5 : Un ensemble de filtres résonnant agissant sur plusieurs harmoniques.....	26
Figure 2. 6 : Structure d'un filtre passif amorti.....	26
Figure 2. 7 : Filtre actif parallèle.....	28
Figure 2. 8 : Filtre actif série.....	28
Figure 2. 9 : Combinaison série parallèle des filtres actifs.	29
Figure 2. 10 : Filtre actif série avec filtres passifs parallèles.....	30
Figure 2. 11 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.	30
Figure 2. 12 : Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.	31
Figure 3. 1 : Schéma synoptique simplifié de la source d'un réseau électrique.	34
Figure 3. 2 :Schéma de la charge non linéaire ; pont redresseur à diode avec charge RL à la sortie.....	35
Figure 3. 3 : Schéma de la charge non linéaire, Pont redresseur à thyristor avec une charge RL à sa sortie.....	35
Figure 3. 4 : Structure générale du filtre actif parallèle.	36
Figure 3. 5 : Commande par hystérésis.....	37

Figure 3. 6 : Commande par MLI.	37
Figure 3.7 : Séparation des puissances avec un filtre passe haut ou un filtre passe bas.	42
Figure 3. 8 : Implantation de la méthode PQ sous Simulink.	42
Figure 3. 9 : Boucle de régulation de la tension continue.	43
Figure 3. 10 : Boucle de régulation de courant.	44
Figure 3. 11 : Implantation du filtre actif parallèle avec sa commande sous Simulink/Matlab.	45
Figure 3. 12 : Tension simple triphasée du réseau électrique.	46
Figure 3. 13 : Courant triphasé du réseau appelé par la charge polluante avant et après filtrage.	46
Figure 3. 14 : Courant distordu appelé par la charge polluante d'une seule phase, sa représentation spectrale et son THD.	47
Figure 3. 15 : Le courant d'une seule phase appelé par la charge après filtrage, sa représentation spectrale et son THD.	47
Figure 3. 16 : Le courant identifié par la méthode PQ en bleu et le courant injecté par l'onduleur en rouge.	48
Figure 3. 17 : La régulation de la tension continue V_{dc} aux bornes du condensateur de stockage à une référence de 800 V.	48
Figure 3. 18 : Courant distordu appelé par la charge polluante d'une seule phase, sa représentation spectrale et son THD.	49
Figure 3. 19 : Le courant d'une seule phase appelé par la charge après filtrage, sa représentation spectrale et son THD.	49
Figure 3. 20 : Le courant de référence identifié par la méthode PQ en bleu et le courant injecté par l'onduleur en rouge.	50
Figure 3. 21 : La régulation de la tension continue V_{dc} aux bornes du condensateur de stockage à une référence de 800 V.	50
Figure 3. 22 : Courant distordu absorbé lors de la variation d'une charge à un moment donné.	51
Figure 3. 23 : Courant filtré absorbé lors de la variation d'une charge à un moment donné.	51
Figure 3. 24 : Le courant identifié en bleu et le courant injecté par l'onduleur en rouge.	51
Figure 3. 25 : Régulation de la tension continue aux bornes du condensateur de stockage à 800 V lors d'une variation brusque de la charge.	52
Figure 3. 26 : Courant appelé par la charge déséquilibrée, son analyse spectrale et son THD.	52

Figure 3. 27 : Le courant appelé par la charge déséquilibrée filtré, avec analyse spectrale et THD.....	53
Figure 3. 28 : Représentation de la régulation de la tension continue aux bornes du condensateur de stockage en haut, le courant de référence en bleu, et le courant injecté par l'onduleur en rouge.	54
Figure 3. 29 : Courant distordu appelé par la charge à thyristors commandés à 10° avec sa représentation spectrale et son THD.	55
Figure 3. 30 : Courant filtré avec sa représentation spectrale et son THD.	55
Figure 3. 31 : Courant distordu appelé par la charge à thyristors commandés à 30° avec sa représentation spectrale et son THD.	56
Figure 3. 32 : Courant filtré avec sa représentation spectrale et son THD.	56
Figure 3. 33 : Variation de la tension de référence de 800V à 900V.	57
Figure 3. 34 : Variation de la tension de référence de 750V à 850V ensuite de 850V à 800V.	57
Figure 3. 35 : (a) représentation spectrale pour une largeur de bande d'hystérésis de 0,002.	58
Figure 3. 36 : (a') représentation spectrale pour une largeur de bande d'hystérésis de 0,002	58
Figure 3. 37 : (a) représentation spectrale pour une fréquence de porteuse de 1000 Hz.....	59
Figure 3. 38 : (a') représentation spectrale pour une fréquence de porteuse de 1000 Hz.....	59
Figure 3. 39 : (a) mesure des puissances avant filtrage.	60

Liste des Tableaux

Tableau 1. 1 : Exemples de représentations spectrales et temporels de différentes charges. .	12
Tableau 1. 2 : Exemple d'harmoniques homopolaires, inverses et directes.	13
Tableau 1. 3 : Les équipements utilisés dans chaque secteur d'utilisation.	15
Tableau 1. 4 : Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publiques basse tension (norme CEI 61000-2-2).	17
Tableau 1. 5 : Limites d'émissions de courants harmoniques des appareils BT de courant $\leq 16A$. (CEI 61000-3-2).	18
Tableau 1. 6 : Taux (en % de V1) des tensions harmoniques acceptables (CEI 61000-2-4)..	19

Liste des abréviations et sigles

a-b-c : Axedu repaire triphasé

A_{efficace} : Valeur efficace

$A_{\text{fondamental}}$: Valeur efficace du fondamental

A_{hn} : Valeur efficace d'un harmonique donné

A_{Max} : Valeur crête

BT : Basse tension

C_{dc} : Capacité de stockage de tension continue

CEI : Commission électrotechnique internationale

CEM: Compatibilité Électro-Magnétique

Cenelec: Comité européen de normalisation électrotechnique

D : Puissance déformante

EN: European Norm

FAP : Filtre Actif Parallèle

F_C : Facteur de crête

F_D : Facteur de déformation

f_{ond} : Fréquence des harmoniques générés par la commutation des transistors

f_r :Fréquence de résonance

GTO : Gate Turn-Off Thyristor

IEEE :Institute of Electrical and Electronics Engineers

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor

i_h : Courant harmonique

L_s : Inductance du réseau électrique

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion

MOSFET :Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

P: Puissance active

$p_{\alpha\beta}$: Puissance réelle instantanée

PI : Porportionnel et Integral

Q: Puissance réactive

$q_{\alpha\beta}$: Puissance imaginaire instantanée

R_s : Résistance du réseau électrique

S : Puissance apparente

S_{cc} : La puissance de court-circuit

S_{charge} : Puissance apparente de la charge

S_{filtre} : Puissance apparente du filtre

T : Transformée de Concordia

T^{-1} : Transformé inverse de Concordia

THD : Total Harmonic Distorsion

THD_F : Taux de distorsion harmonique (par rapoet à la valeur efficace du fondamental)

THD_G : Taux de distorsion harmonique (par rapport à la valeur efficace du signal d'origine)

U_h : Tensions harmoniques

V_{dc} : Tension continue

V_s : Tension simple du réseau électrique

W : Energie emmagasinée dans un condensateur

Z_C : Impédance capacitive

Z_L : Impédance inductive

Z_s : Impédance du réseau électrique

α - β -o : Axe du repère de concordia

τ_n : Taux d'harmonique individuel

φ : Déphasage entre courant et tension

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie électrique est distribuée sous la forme d'un système triphasé sinusoïdal permettant de fournir la puissance électrique nécessaire aux différents récepteurs électrotechniques. La conservation de cet aspect sinusoïdal d'origine est nécessaire voir indispensable aujourd'hui, dans le but de préserver les qualités de la puissance transmise aux utilisateurs. Lorsque la sinusoïde est déformée, des dysfonctionnements et des échauffements sont générés au niveau de l'appareillage et des équipements raccordés sur le même réseau d'alimentation, cette déformation est due à différentes perturbations provoquées essentiellement par des charges dites déformantes, ou encore appelées récepteurs non linéaires, en appelant des courants déformés plains d'harmoniques qui, en fonction de l'impédance du réseau ou leurs amplitudes, vont modifier l'allure sinusoïdale de la tension.

La machine asynchrone, les transformateurs, les convertisseurs électroniques de puissance ou encore l'électroniques des équipements informatiques sont des exemples de charges non linéaire (technologie des semi-conducteurs) et ont pas mal de contribution à la prolifération des perturbations électriques.

La qualité de l'énergie électrique distribuée est nuisé aussi par les phénomènes de creux et coupures de tensions, les surtensions, le déséquilibre du système triphasé ...etc., qui ont différentes causes et qui seront expliqués dans le premiers chapitre de ce mémoire.

La pollution harmonique du réseau électrique présente dans les installations est devenue un véritable casse-tête pour les utilisateurs et les producteurs d'électricité quel que soit leur secteur d'activité, industriel ou tertiaire [1].

Pour pallier à ces problèmes de perturbations, différentes solutions de filtrages (classiques et modernes) sont évoquées dans le deuxième chapitre avec leurs avantages et inconvénients.

Le troisième chapitre est dédié à la modélisation du filtre actif parallèle qui est la solution la plus palliative aux problèmes de pollution harmonique causée par les charges non linéaires, vu les avantages qu'il offre de compensation en temps réel grâce à l'identification des harmoniques. Nous verrons ensuite, les résultats de filtrage avec simulation sous Simulink de Matlab, ou différents essais seront effectués pour tester les performances du filtre actif parallèle.

Premier Chapitre :
Les Perturbations Dans le
Réseau Électrique

1.1. Introduction

Au long de son transport ensuite distribution, le signal électrique est sujet à beaucoup de perturbations à caractéristiques différentes qui influencent le bon fonctionnement des équipements terminaux aux points de raccordement. Elles sont à l'origine de variation d'amplitudes, de fréquences, de déséquilibre ou de déformation des formes d'ondes de courant ou de tension.

Ces perturbations sont classifiées selon la durée du phénomène en deux classes, « permanentes » tel que les harmoniques causées par les charges non linéaires, et « ponctuelles » ou « transitoires » tel que les creux et coupures de tensions ou autres, suite à un évènement ou un défaut. Ces deux catégories ne sont pas totalement indépendantes puisque les perturbations dites « transitoires » impactent parfois celles considérées comme « permanentes ».

Il y a aussi la classification selon le concept de Compatibilité Électro-Magnétique (CEM) : basses fréquences ($<9\text{kHz}$), ou hautes fréquences ($>9\text{kHz}$), ou encore selon le mode de transmission de ces phénomènes : perturbations conduites (transmission dans les câbles), ou perturbations rayonnées (transmission dans l'air). Mais de manière générale, en électrotechnique les perturbations sont de basses fréquences, avec une transmission conduite [1].

En effet, il est indispensable de comprendre le comportement et les sources de ces imperfections et définir leurs caractéristiques dans le but de trouver les solutions adéquates pour les supprimer, ce qui va être le sujet du présent chapitre.

1.2. Origines des perturbations dans le réseau électrique

Les perturbations affectent différentes caractéristiques de la tension du réseau électrique :

1.2.1. Influences sur l'amplitude

Il y a une plage de variation nominale de la tension du réseau fixée à $\pm 10\%$ de la tension nominale, conformément à la norme EN 50160 élaborée par le Cenelec (Comité européen de normalisation électrotechnique).

1.2.1.1. Creux de tension et coupures

On appelle creux de tension, toute chute brutale de l'amplitude de la tension au-delà du seuil inférieur de cette plage, c'est-à-dire entre 10% et 90% de la tension de référence. Le signal se rétablit après un laps de temps de 10ms à quelques secondes (figure 1.1) [2].

Les courts-circuits non-permanents sont la principale cause de creux de tension, ainsi que la mise en service d'un appareil appelant un fort courant de démarrage tel que les moteurs, ou la variation brusque de la charge, ou encore des phénomènes naturels aléatoires tel que la foudre, le contact avec la végétation ...etc.

On appelle coupure de tension, un creux d'une profondeur supérieure à 90% de la tension de référence. Elle est provoquée généralement par des manœuvres des automatismes liées aux réseaux de distributions (figure 1.1) [2].

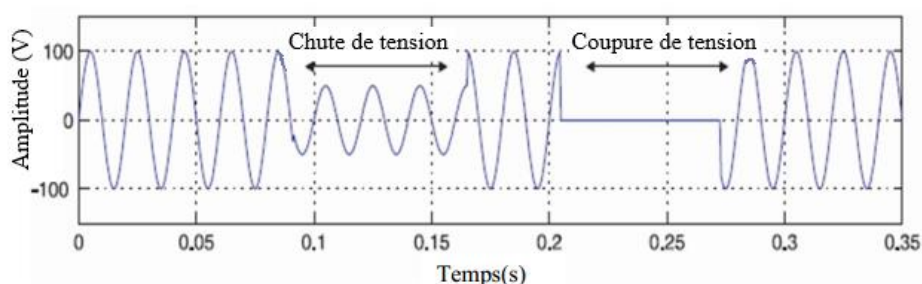


Figure 1. 1 : Creux et coupure de tension.

1.2.1.2. Fluctuation de tension

On appelle fluctuation de tension, toute diminution brusque de courtes durées (quelques millièmes de secondes) de la valeur efficace de la tension d'alimentation à des valeurs inférieure à 10% de la tension nominale (Figure 1.2) [2].

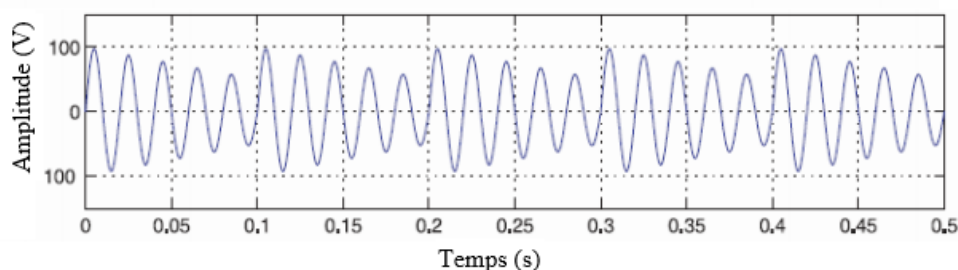


Figure 1. 2 : Fluctuation de tension.

Les variations lentes de tension sont causées par la variation lente des charges connectées au réseau. Ils ne présentent pratiquement pas d'inconvénients insupportables pour les appareils usuels tant qu'ils sont dans la plage de tolérance.

Les variations rapides de la tension (appelée flicker en anglais) sont causées soit par des perturbations électromagnétiques ou par des variations de puissance sur le réseau porteur de cette tension, comme par exemple la mise en service ou hors service des appareils dont la puissance absorbée varie de façon rapide.

L'effet flicker affecte évidemment certains appareils qui lui sont sensibles tel que le téléviseur, l'écran d'ordinateur, les tubes fluorescents ou toute source lumineuse présente sur le réseau sur lequel les sources du flicker sont connectés ou déconnectés.

1.2.1.3. Surtension

Selon la durée de leur cycle, on distingue deux types de surtension :

- Transitoire

On appelle surtension transitoire, tout dépassement brusque de l'amplitude de la tension fondamentale de fréquence de 50 Hz. C'est un phénomène bref (de durée de moins de 1s), d'une apparition aléatoire (Figure 1.3) [3].

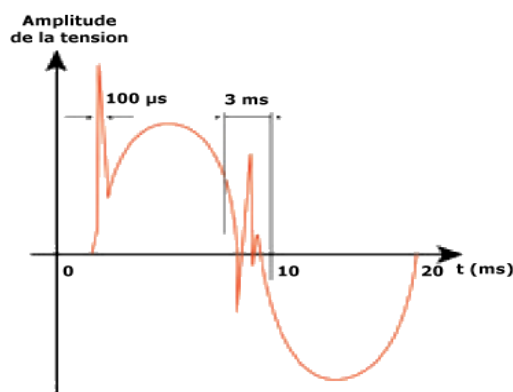


Figure 1. 3 : Surtension transitoire

- Permanente

On appelle surtension permanente, toute augmentation de la tension au-dessus de 10% de valeur nominale qui est maintenue pendant plusieurs cycles de façon permanente (Figure 1.4) [1][4].

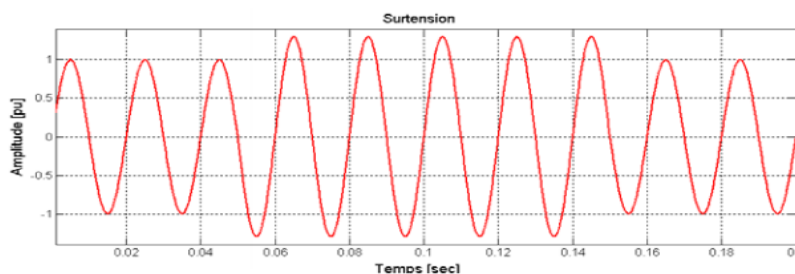


Figure 1. 4 : Surtension permanente.

Les surtensions causent la défaillance des équipements électriques bien que ceux-ci soient bien protégés, la destruction de l'équipement est provoquée lorsque le pic de tension atteint une valeur supérieure à celle supportée par l'appareil.

Les surtensions sont de trois natures :

- Les surtensions temporaires,
- Les surtensions de manœuvres,
- Les surtensions atmosphériques.

1.2.2. Influence sur la fréquence

La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation des générateurs utilisés pour la production de l'énergie électrique. Or, le déséquilibre entre l'offre et la demande entraîne des variations de cette vitesse, conduisant par conséquent à des variations de la fréquence : si la demande est supérieure à l'offre, la fréquence baisse, et vice versa (Figure 1.5) [2].

La fréquence du système électrique est donc un bon indicateur de l'équilibre entre la production et la consommation, Le point d'équilibre est de 50 Hz ou 60 Hz.

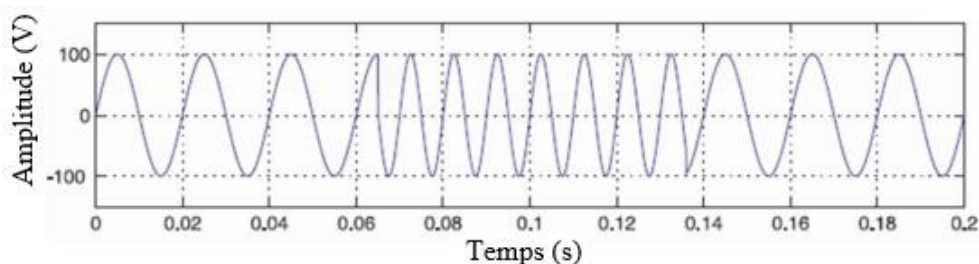


Figure 1. 5 : Variation de la fréquence.

La fréquence est mesurée et contrôlée en temps réel avec précision afin de la maintenir dans une zone acceptable $\pm 0,5$ Hz autour de 50 Hz ou 60Hz [5].

La fréquence d'un réseau doit être constante pour plusieurs raisons :

- Pour un bon fonctionnement des transformateurs et les moteurs alternatifs (machines à laver, outils, etc.),
- Pour certains systèmes électroniques où la fréquence est utilisée pour l'horloge.

Les variations de fréquence peuvent être causées par des évolutions continues de la consommation, l'arrêt d'une centrale de production ou par des courts circuits.

1.2.3. Influence sur l'équilibre du système triphasé

Lorsque des charges monophasées du système triphasé ne sont pas réparties uniformément sur le réseau, les courants absorbés sur les trois phases sont d'amplitude et/ou de phase différente [4]. Par conséquent, les trois tensions du système triphasé n'auront pas la même valeur efficace, et on parle dans ce cas d'un déséquilibre d'amplitude. Ou, le décalage entre les trois phases ne va pas être égale à 120° , on parle dans ce cas d'un déséquilibre de phase. Si l'un de ces deux types de déséquilibres apparaît, le système triphasé n'est plus équilibré (Figure 1.6) [3].

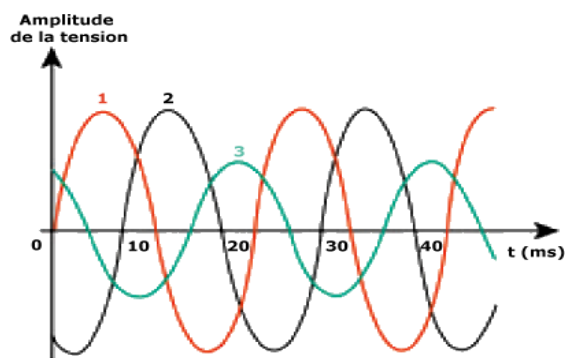


Figure 1. 6 : Déséquilibre de réseau.

Le déséquilibre de réseau peut entraîner un dysfonctionnement des appareils de basses tensions connectés. En effet, si la tension est très faible les appareils ne fonctionnent pas correctement, et si elle est très élevée les appareils peuvent être détruits [6].

1.2.4. Les harmoniques et inter-harmoniques

La démystification de la déformation du signal électrique nécessite la mise en évidence d'un aspect mathématique de la distorsion appelé « **harmoniques** », qu'on obtient à partir de la décomposition en série de Fourier du signal électrique périodique. Ce sont donc des composants sinusoïdaux d'une fréquence multiple de la composante fondamentale du signal de 50 Hz ou 60 Hz.

Dans le cas où la fréquence des harmoniques n'est pas multiple entier de la fréquence fondamentale, on parle d'**inter-harmoniques** (par exemples : 110Hz, 130Hz) [1]. Ces distorsions apparaissent comme des pertes électriques et des dysfonctionnements sur le réseau électrique. Elles sont provoquées par des variations aléatoires de la puissance absorbée [7].

1.2.4.1. Notion de charge linéaire et charge non linéaire

a) Charge linéaire

Avant l'apparition des technologies des semi-conducteurs, les charges utilisées étaient de type récepteur classique connu dans le domaine de distribution électrique, tel que les lampes à incandescences, les convecteurs électriques ou tout simplement des éléments purement résistifs qui, lorsqu'ils sont soumis à une tension d'alimentation sinusoïdale, absorbent un courant de même allure, il y a donc une proportionnalité entre courant et tension. On parle ainsi de **charge linéaire**, et la puissance absorbée est le simple produit de ces deux grandeurs.

Un élément capacitif ou inductif, est aussi considéré comme charge linéaire, la différence réside dans l'existence d'un décalage dans le temps entre le courant et la tension qu'on appelle le déphasage φ (Figure 1.7). En plus du produit du courant et tension, la puissance absorbée par le récepteur en monophasé considère un nouveau terme appelé **facteur de puissance** dû à la différence de phase constatée.

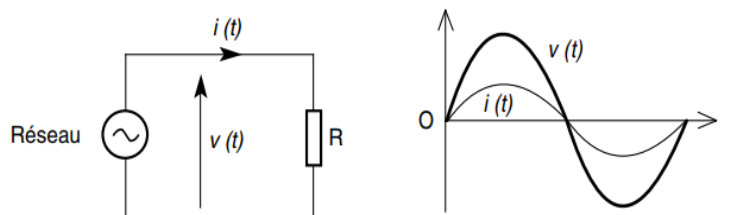


Figure 1.7 : Tension et courant d'une charge linéaire [1]

-Le facteur de puissance : est le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S . S étant la somme trigonométrique de la puissance active P et réactive Q et s'écrit :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Le facteur de puissance s'écrit donc :

$$F_p = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad 1.1$$

Pour un signal purement sinusoïdal (absence de distorsion), on peut utiliser le terme « $\cos \varphi$ » pour dire facteur de puissance.

Pour résumer, la notion de charge linéaire est valable pour :

- Un récepteur résistif, capacitif ou inductif.
- Un récepteur qui conserve la proportionnalité entre courant et tension.

b) Charge non linéaire

Avec l'apport de la technologie des semi-conducteurs à l'électronique, et le développement connu par les dispositifs de puissance, les charges alimentées par une tension sinusoïdale absorbent un courant qui est déformé, le courant et la tension ne sont donc plus proportionnels, on parle dans ce cas de **charge non linéaire** (figure 1.8).

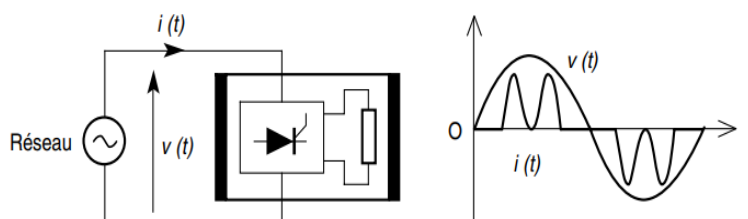


Figure 1.8: Tension et courant d'une charge non linéaire.[1]

La notion « $\cos \varphi$ » n'est plus valide pour un signal distordu, cette distorsion est traduite par un nouveau terme D représentant la puissance déformante qui est introduite dans l'expression du facteur de puissance comme suit, causant sa dégradation :

$$F_p = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad 1.2$$

On cite comme exemples d'éléments déformateurs de signaux électriques et producteurs d'harmoniques : Les variateurs de vitesses, les redresseurs dans le domaine industriel, les onduleurs de tension et les alimentations à découpage dans les ordinateurs.

1.2.4.2. Démystification des harmoniques

Lorsque les grandeurs électriques s'éloignent de l'allure sinusoïdale, ces derniers se trouvent donc composés d'un fondamental, et un nombre d'harmoniques, dont la somme est le signal distordu. Ainsi, la fréquence de chacun de ces harmoniques est un multiple entier 'n' du fondamental. Ce multiple entier 'n' est appelé « rang » de l'harmonique (Figure 1.9) [8].

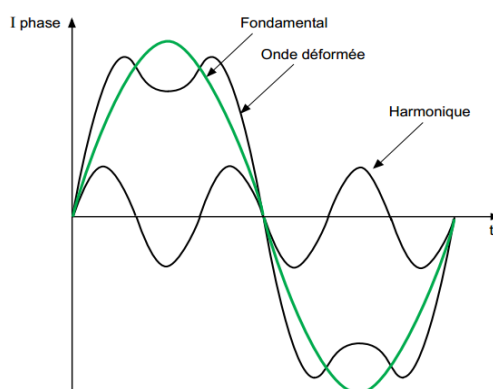


Figure 1. 9 : Décomposition harmonique d'un signal déformé.

Afin de quantifier la déformation du signal mesuré on utilise le développement mathématique en séries de Fourier, un moyen pratique et précis.

a) Développement en série de Fourier

D'après le théorème de Fourier, tout signal périodique de période T et de variable réelle t, peut s'écrire comme une somme infinie de sinusoïdes dont la fréquence est multiple de la fréquence fondamentale $\frac{1}{T}$. A ces termes purement sinusoïdaux peut se rajouter une éventuelle composante continue [9] :

$$S(t) = a_0 + \sum_0^{\infty} [a_n \cdot \cos(n\omega t) + b_n \cdot \sin(n\omega t)] \quad 1.3$$

Pour $n=1$, on parle du signal fondamental.

Avec:

- a_0 est la valeur moyenne du signal. Elle est souvent nulle en distribution puisque le signal distribué est alternatif symétrique :

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T S(t) dt \quad 1.4$$

- a_n et b_n sont dits les coefficients de Fourier, ils représentent les amplitudes des harmoniques de rang n (valeurs efficaces), et sont définis par :

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad \text{et} \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cdot \sin(n\omega t) dt \quad 1.5$$

Propriétés des séries de Fourier :

- Si $S(t)$ est **paire** → Les coefficients b_n sont nuls.
- Si $S(t)$ est **impaire** → Les coefficients a_n sont nuls.
- Si $S(t)$ présente une **symétrie de glissement**, $f\left(t + \frac{T}{2}\right) = -f(t)$ → Les a_n sont nuls.

Dans un réseau électrique le signal est symétrique, en tenant compte des propriétés de séries de Fourier ci-dessus, les harmoniques de rang paires sont donc nulles [10]. Par contre les harmoniques de rang impairs (3, 5, 7 ...) sont fréquemment rencontrés sur le réseau électrique.

Selon la norme internationale EN 50160, les harmoniques au-delà du rang 25 sont souvent négligeables, pour certaines charges.

b) L'analyse spectrale

Les signaux sont généralement présentés dans le domaine temporel, cette représentation nous fournit un certain type d'informations tel que l'amplitude, la valeur crête, La valeur moyenne...etc. [11]. Cependant, cette représentation ne permet pas de voir le contenu fréquentiel du signal, pour cela une autre approche est constatée dite représentation fréquentielle ou spectrale. C'est un outil sous forme d'histogramme qui représente l'importance des harmoniques par rapport au fondamental en fonction du rang ou de la fréquence, ce qui assure une bonne interprétation d'un signal tout en indiquant ses différentes caractéristiques que nous découvrirons dans ce qui suit.

Dans le tableau suivant (tableau 1.1), on effectue une analyse spectrale d'un signal d'abord, issu d'une charge linéaire et donc sans harmoniques, ensuite de signaux distordus issus des charges non linéaires décomposées en différentes composantes harmoniques :

Tableau 1. 1 : Exemples de représentations spectrales et temporels de différentes charges.

Type de charge	Courant absorbé	Spectre harmonique correspondant
Récepteur restif	<p>Selected signal: 2.5 cycles. FFT window (in red): 2 cycles</p>	<p>Fundamental (50Hz) = 4.4 , THD= 0.00%</p>
Gradateur monphasé	<p>Selected signal: 2.5 cycles. FFT window (in red): 1 cycles</p>	<p>Fundamental (50Hz) = 52.78 , THD= 65.35%</p>
Redresseur triphasé à thyristors	<p>Selected signal: 2.5 cycles. FFT window (in red): 1 cycles</p>	<p>Fundamental (50Hz) = 163.8 , THD= 30.75%</p>
Machine électrique		

Les charges non linéaires causent trois types de courants harmoniques qui, selon leur rang n , sont réparties de manière uniforme sur les trois phases, ils forment des systèmes triphasés homopolaires, directs ou indirects [4].

L'harmonique est dite **homopolaire**, lorsque son rang est de la forme $n=3k$ (k est un entier). Dans un système bien équilibré, la somme instantanée des courants fondamentaux des trois phases est nulle, ce qui n'est pas le cas pour les harmoniques de rang $3k$ car ils sont égaux à chaque instant, ils sont en phase les uns avec les autres. On les nomme aussi **séquence zéro**.

L'harmonique est dite **directe**, pour un rang de forme $n=3k+1$. L'harmonique de seconde phase présente un retard de $\frac{2\pi}{3}$ par rapport à la 1^{ère} phase, et celle de la troisième phase présente un retard de $\frac{4\pi}{3}$ par rapport à la 1^{ère} phase, ce qui annule leur somme instantanée. Ces harmoniques (tel que la septième) tournent avec la même séquence que la fondamentale. Ils sont appelés aussi **séquences positives**.

L'harmonique est dite **indirecte**, lorsque le rang s'écrit sous la forme $n=3k+2$. La somme instantanée de ces harmoniques est nulle, ils tournent dans une séquence opposée de la fondamentale (tel que la cinquième harmonique). Ils sont appelés aussi **séquence négative**.

Le tableau suivant (tableau 1.2) [12] prête concision et récapitulation aux différents types d'harmoniques les plus prédominants :

Tableau 1. 2 : Exemple d'harmoniques homopolaires, inverses et directes.

La fondamentale	A 0°	B 120°	C 240°	A-B-C
Harmonique de rang 3	A' $(3 \times 0^\circ)$ 0°	B' $(3 \times 120^\circ)$ 0°	C' $(3 \times 240^\circ)$ 0°	Pas de rotation
Harmonique de rang 5	A'' $(5 \times 0^\circ)$ 0°	B'' $(5 \times 120^\circ)$ -120°	C'' $(5 \times 240^\circ)$ -240°	C-B-A
Harmonique de rang 7	A''' $(7 \times 0^\circ)$ 0°	B''' $(7 \times 120^\circ)$ 120°	C''' $(7 \times 240^\circ)$ 240°	A-B-C

1.2.4.3. Éléments d'identification des harmoniques

L'allure du signal électrique est un critère indispensable pour une bonne analyse de la qualité de l'énergie électrique sur un réseau, et pour l'analyser soigneusement, en plus de la valeur efficace, autres indicateurs de qualité doivent être définis.

a) facteur de déformation

Quand on a introduit le facteur de puissance (F_p) ci-dessus, on avait deux cas :

- En absence de distorsion (sinusoïde pure), le " F_p " défini comme le " $\cos \varphi$ " où φ est le déphasage entre courant et tension qui sont proportionnels.
- En présence de distorsion, une nouvelle puissance déformante D apparaît directement proportionnelle à la présence d'harmonique, qui dégrade la valeur du " F_p ".

Le rapport entre le facteur de puissance de la charge non linéaire et celui de la charge linéaire est dit **Facteur de déformation** (F_D), tel que :

$$F_D = \frac{F_p}{\cos \varphi} \quad 1.9$$

"cos φ " Ici est le cosinus du déphasage entre les fondamentales de courant et de tension.

b) Facteur de crête

Le facteur de crête est le résultat du rapport entre une valeur crête " A_{MAX} " d'une onde et une valeur efficace de ce même signal. Pour un signal sinusoïdal, ce facteur est égal à $\sqrt{2}$.

$$F_c = \frac{A_{MAX}}{A_{efficace}} = \sqrt{2} \approx 1,41421 \quad 1.10$$

Lorsque le signal est déformé, le " F_c " atteint des valeurs supérieures ou inférieures à $\sqrt{2}$ et prouve ainsi la présence d'une charge non linéaire. C'est un bon indicateur qualitatif de déformation.

c) Taux d'harmoniques

Un signal distordu est composé d'harmoniques. Chaque harmonique de rang " n " possède une valeur efficace. On appelle **Taux d'harmonique individuel**, le rapport entre la valeur efficace d'un harmonique donné (A_{h_n}) et la valeur efficace du fondamental ($A_{fondamental}$) :

$$\tau_n = \frac{A_{h_n}}{A_{fondamental}} \quad 1.11$$

C'est un pourcentage qui reflète l'importance de l'harmonique considéré par rapport au signal non pollué.

On appelle **Taux d'harmonique global** ou **taux de distorsion harmonique**, le rapport entre la racine de la somme quadratique des valeurs efficaces des harmoniques de rang "2" jusqu'à " n " et la valeur efficace du fondamental :

$$THD_F = \frac{\sqrt{A_{h_2}^2 + A_{h_3}^2 + \dots + A_{h_n}^2}}{A_{fondamental}} \quad 1.12$$

"THD" Acronyme de « Total Harmonic Distorsion » en anglais, il représente la déformation globale d'un signal car il tient compte de l'ensemble des harmoniques considérés, il est directement proportionnel à la richesse du signal en harmoniques.

On définit aussi le taux d'harmonique par rapport à la valeur efficace du signal d'origine :

$$THD_G = \frac{\sqrt{A_{h_2}^2 + A_{h_3}^2 + \dots + A_{h_n}^2}}{A_{efficace}} \quad 1.13$$

Avec :

$$A_{efficace} = \sqrt{A_{fondamental}^2 + A_{h_2}^2 + A_{h_3}^2 + \dots + A_{h_n}^2} \quad 1.14$$

Pour un signal purement sinusoïdal, le THD est nul.

1.2.4.4. Harmoniques de tension

Quand les récepteurs pollueurs appellent des courants riches en harmoniques qui, en circulant dans des conducteurs et des équipements électriques, rencontrent des impédances, des tensions harmoniques sont engendrées tout en obéissant à la loi d'Ohm [1] :

$$U_h = Z \times i_h \quad 1.15$$

Les tensions harmoniques sont négligeables pour des charges de faible puissance puisque le courant appelé par ces dernières et les impédances rencontrées sont faibles. Par contre si les charges déformantes sont massivement présentes, les harmoniques se prolifèrent et s'accumulent, ce qui conduit à une pollution significative.

1.2.4.5. Quelques équipements pollueurs

Les courants harmoniques sont générés par différents types d'appareillage, le tableau ci-dessous (tableau 1.3) récapitule le type d'équipement employé selon le secteur d'utilisation [8] [13].

Tableau 1. 3 : Les équipements utilisés dans chaque secteur d'utilisation.

Le Secteur d'utilisation	Types d'équipements et matériels pollueurs	
Production, transport, ou distribution d'électricité	-Les alternateurs et les générateurs asynchrones. -Les transformateurs. -Les convertisseurs.	Détérioration de forme d'onde faible, due notamment aux : -Imperfections de construction. -La saturation du circuit magnétique du transformateur. -Choix de la distribution des enroulements et du nombre d'encoches par pôle pour les alternateurs [14].
Industrie	-Les convertisseurs d'électronique de puissance et outils de commande des machines (redresseurs, gradateurs, onduleurs, cyclo-convertisseurs). -Les postes à souder. -Les fours à arc...etc.	Sont les producteurs majeurs d'harmoniques.
Tertiaire	-Les climatiseurs. -Les redresseurs monophasés : Les ordinateurs et leurs périphériques, Les lampes à fluorescence etc.	La commutation des éléments semi-conducteurs.

Domestique	-Matériel électroménager. -Outillage de bricolage. -Climatisation. -Téléviseur. -Redresseurs des chargeurs etc.	Équipements à faible puissance, mais l'utilisation massive est perturbatrice.
------------	---	---

On constate que non seulement la commutation des composants semi-conducteurs génère des harmoniques, mais aussi le mode de fonctionnement de quelques charges tel que les moteurs et les transformateurs.

1.2.4.6. Effets néfastes de la pollution harmonique

Les perturbations causées par la pollution harmonique sont de plus en plus présentes dans les installations (effet joule, diminution de facteur de puissance, vieillissement prématuré etc.) menant à des pertes techniques et économiques qu'on voudrait éviter. Ces effets se manifestent de deux manières :

a) Les effets instantanés : ils sont instantanément visibles sur les équipements, dus aux phénomènes de résonances et de déformation de l'onde, et se présentent sous forme de :

- Vibrations et bruits acoustiques anormaux au niveau des moteurs et transformateurs.
- Augmentation des facteurs de crête causant le déclenchement intempestif des disjoncteurs qui assurent la protection des équipements.
- Diminution de la précision des appareils de mesure.
- Destruction du matériel tel que les condensateurs à cause de la résonance. (Plus le signal est chargé d'harmonique de rang et fréquences élevés, plus le courant consommé par le condensateur est important, les pertes qui en découlent l'échauffe et le détruit [15]).
- Dégradation du facteur de puissance, car les harmoniques ne contribuent pas au transfert de la puissance active.
- La dégradation de la qualité d'image projetée sur les écrans.

b) Les effets à long terme : leurs conséquences se manifestent au fur et à mesure après plusieurs expositions aux harmoniques, ils sont de nature thermique et affectent la durée de vie du matériel, ils se présentent sous forme de :

- Échauffement des conducteurs.
- Échauffement supplémentaire au niveau des transformateurs et les moteurs.
- Fatigue mécanique du matériel industriel.
- Vieillesse prématuré des équipements etc.

Des conséquences économiques découlent évidemment. En effet, afin de pallier aux problèmes techniques les équipements et les conducteurs doivent être surdimensionnés, et la production d'énergie doit augmenter pour subvenir aux besoins. En plus, la dégradation du rendement et la durée de vie des machines, nécessite des maintenances régulières, menant à des surcoûts économiques.

1.3. Les normes internationales

Afin de protéger les équipements électriques contre les perturbations vues précédemment et de limiter les pertes et les dégâts qui en découlent, des organismes mondiaux, tel que la CEI (Commission électrotechnique internationale), le Cenelec (Comité européen de normalisation électrotechnique) ou l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), ont élaboré des normes internationales qui doivent être respectées par les consommateurs, dans le but de minimiser la pollution du réseau électrique.

1.3.1. Protection contre les harmoniques

Les émissions des harmoniques par les équipements et les systèmes connectés au réseau sont limitées par la série des normes suivante :

- **La norme CEI 61000-2-2** : elle définit la limite du taux de distorsion individuel de tension pour chaque rang d'harmonique sur les réseaux publics basse tension (tableau 1.4) [16].

Tableau 1.4 : Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (norme CEI 61000-2-2).

Harmoniques impairs				Harmoniques pairs	
Non multiples de 3		Multiples de 3			
Rang h	Amplitude relative u_h	Rang h	Amplitude relative u_h	Rang h	Amplitude relative u_h
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6 ... 24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

- **La norme EN 50160** : le taux global de distorsion harmonique de la tension fournie (incluant tous les harmoniques jusqu'au rang 40) ne doit pas dépasser 8 % [17].

Pour le taux global de distorsion harmonique de courant, il n'existe pas une norme précise, mais avec l'expérience, les ingénieurs et les producteurs d'électricité l'ont limité à 10%.

- **La norme CEI 61000-3-2 :** Cette norme concerne les équipements domestiques, autrement dit, les équipements consommant un courant inférieur ou égale à 16A par phase. Elle fixe les limites des courants harmoniques injectés par ces appareils dans le réseau. Selon la fonction et la puissance consommée, cette norme traite les équipements électriques en quatre classes [18] :
 - Classe A : Appareil triphasé équilibré et tout autre appareil à l'exception de ceux qui sont indiqués dans l'une des classes suivantes (tableau 1.5).
 - Classe B : Outils portatifs, appareils de soudage à l'arc hors matériel professionnel.
 - Classe C : Appareil d'éclairage y compris des dispositifs variateurs de lumière.
 - Classe D : Appareil ayant un courant d'entrée à « forme d'onde spéciale » et dont la puissance active d'entrée, $P \leq 600$ W.

Tableau 1.5 : Limites d'émissions de courants harmoniques des appareils BT de courant ≤ 16 A. (CEI 61000-3-2).

Rang harmonique	Courant harmonique maximal autorisé (A) classe A
<i>Harmoniques impaires</i>	
3	2.3
5	1.14
7	0.77
9	0.40
11	0.33
13	0.21
$15 \leq n \leq 39$	$0.15 \times \frac{15}{n}$
<i>Harmoniques paires</i>	
2	1.08
4	0.43
6	0.3
$8 \leq n \leq 40$	$0.23 \times \frac{8}{n}$

- **La norme CEI 61000-3-4 :** les émissions de courants harmoniques dans les réseaux publics de distribution basse tension pour les matériels ayant un courant assigné supérieur à 16 A sont limités par cette norme [19].

- **La norme CEI 61000-2-4** : Cette norme est relative aux perturbations conduites dans le domaine de fréquence de 0 kHz à 9 kHz. Elle fournit les valeurs numériques des niveaux de compatibilité pour les réseaux de distribution d'énergie industriels et non publics, à des tensions nominales allant jusqu'à 35 kV et à la fréquence nominale de 50 Hz ou 60 Hz.

Les réseaux de distribution d'énergie sur les navires, aéronefs, plates-formes en mer et chemins de fer sont exclus (tableau 1.6) [20].

Tableau 1. 6 : Taux (en % de V1) des tensions harmoniques acceptables (CEI 61000-2-4).

Rang de l'harmonique	Classe 1 : Matériels et systèmes sensibles	Classe 2 : Réseaux industriels	Classe 3 : Réseaux industriels perturbés
2	2	2	3
3	3	5	6
4	1	1	1.5
5	3	6	8
6	0.5	0.5	1
7	3	5	7
8	0.5	0.5	1
9	1.5	1.5	2.5
10	0.5	0.5	1
11	3	3.5	5
Pair, > 10	0.2	0.2	1
13	3	3	4.5
15	0.3	0.3	2
17	2	2	4
19	1.5	1.5	4
21	0.2	0.2	1.75
Impaire, > 21 et = 3n	0.2	0.2	1
23	1.5	1.5	3.5
25	1.5	1.5	3.5
Impaire, > 21 et ≠ 3n	$0.2 + \frac{12.5}{n}$	$0.2 + \frac{12.5}{n}$	$5 \times \sqrt{\frac{11}{n}}$
THD	5%	8%	10%

1.3.2. Protection contre les phénomènes perturbateurs

- **La norme EN 50160** : L'objectif de cette norme est de limiter les phénomènes perturbateurs (creux de tension, fluctuation de tension, coupure...etc.), qui affectent les caractéristiques de la tension en termes de sa fréquence, son amplitude ainsi que sa forme d'onde [17]. Elle limite aussi le taux global de distorsion harmonique de la tension fournie comme a été vu précédemment.

1.4. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre que les caractéristiques du courant et de la tension d'alimentation (l'amplitude, la fréquence, le déphasage...etc.) ainsi que la forme d'onde de ces derniers, sont un critère important de la qualité de l'énergie fournie. Cependant, différentes perturbations, tel que les creux de tension et les fluctuations...etc., sont à l'origine de la détérioration de ces deux grandeurs. Aussi, le développement croissant des appareils électriques et l'implémentation des composants d'électronique de puissance rend ces équipements de plus en plus pollués en injectant des courants harmoniques rendant la forme du signal de courant absorbé déformée, ainsi que le signal de la tension si ces équipements présentent des impédances non négligeables.

On a constaté que l'énergie dégradée consommée par les autres charges reliées au même réseau, provoque plusieurs effets néfastes qui nuisent à leur bon fonctionnement et raccourcissent leur durée de vie ou conduisent même à leur destruction.

Des solutions envisageables seront présentées dans le chapitre suivant, afin de palier à ces problèmes de perturbations et afin de préserver en permanence une énergie d'une forme d'onde sinusoïdale.

Deuxième Chapitre : Solutions de dépollution du réseau électrique

2.2. Introduction

Dans le chapitre précédant nous avons évoqué les différentes perturbations qui peuvent atteindre un réseau électrique, leurs causes et leurs conséquences néfastes. Pour cela la mise en œuvre des solutions est très importante voir indispensable vu l'intérêt apporté à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique et l'efficacité énergétique. Ce deuxième chapitre dévoile les différents remèdes dépollueurs, classiques et modernes, on parle ainsi de filtrage. Mais avant tout il est important de faire signe qu'à l'échelle industrielle, là où pas mal de charges inductives et capacitatives sont présents, peuvent entrer en « résonance », un terme qui sera détaillé au début de ce chapitre, causant ainsi des surtensions et surintensités destructives. C'est avec ce même phénomène dit de résonance se base d'ailleurs le principe du filtrage passif d'harmoniques qui sera évoqué par la suite. Enfin, le filtrage actif, remède moderne et efficace, est mis en exergue vu qu'il représente le cœur de notre étude.

2.2. La résonance

L'impédance du réseau électrique dépend bien de la fréquence, en effet son comportement inductif est directement proportionnel à celle-ci car " $Z_L = L \cdot \omega = L \cdot 2\pi f$ ", sachant que les résistances pures sont négligeables. Par contre, si des condensateurs (de compensation d'énergie réactive par exemple) sont présents, leurs impédances sont inversement proportionnelles à la fréquence puisque " $Z_C = \frac{1}{C \cdot \omega} = \frac{1}{C \cdot 2\pi f}$ ". À une fréquence donnée (f_r), ces deux impédances sont égales, c'est la fréquence de résonance :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad 2.1$$

La figure 2.1 montre la variation de l'impédance capacitive et inductive en fonction de la fréquence, et la fréquence de résonance correspondant à l'intersection des deux courbes [21].

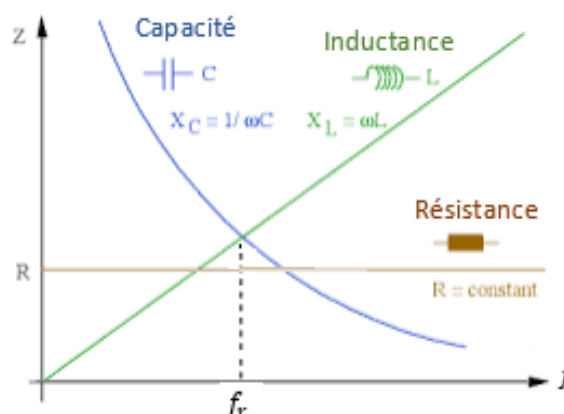


Figure 2. 1 : Variation de l'impédance inductive et capacitive en fonction de la fréquence.

On détermine soigneusement une valeur de capacité de compensation de facteur de puissance, afin d'obtenir une fréquence de résonance hors de la plage des fréquences d'harmoniques caractéristiques (3, 5, 7...etc.) et éviter ainsi les inconvénients destructifs de la résonance.

On distingue deux types de résonances selon l'analyse harmonique effectuée (en amont ou en aval du transformateur de distribution) [1] :

2.2.1. La résonance série

Elle est considérée au primaire du transformateur (coté HTA) :

$$Z = \frac{1 - LC\omega_f^2}{C\omega_r} \quad 1.2$$

A la résonance quand les impédances inductives et capacitives sont égales, on obtient : $LC\omega_r^2 = 1$, ce qui fait que " $Z_{globale} \rightarrow 0$ ". A une impédance aussi faible le courant est à sa valeur extrême (figure 2.2). C'est la « surintensité ».

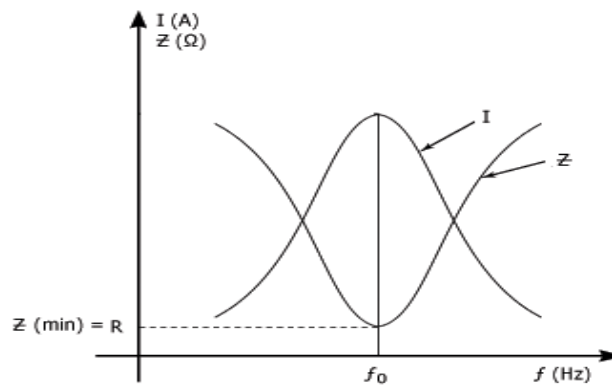


Figure 2. 2 : Représentation du courant et l'impédance d'un circuit RLC série.

2.2.2. La résonance parallèle

Elle est considérée en aval du transformateur de distribution, l'impédance capacitive se trouve en parallèle avec l'impédance inductive, ce qui donne une impédance globale de :

$$Z_{globale} = \frac{L\omega_r}{1 - LC\omega_f^2} \quad 2.3$$

A la résonance, " $Z_{globale} \rightarrow \infty$ ", à une impédance aussi importante, c'est la tension qui est à sa valeur extrême (figure 2.3). C'est la « surtension ».

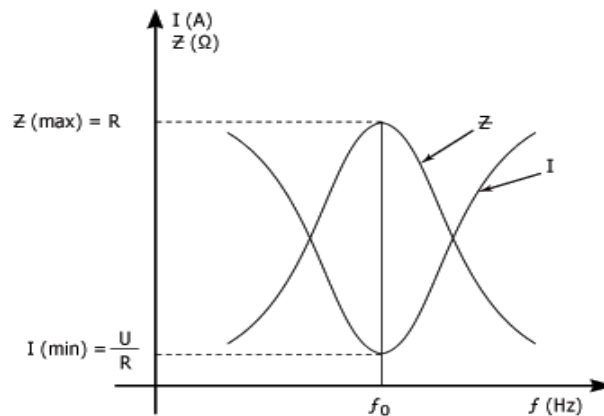


Figure 2. 3 : Représentation du courant et l'impédance d'un circuit RLC parallèle.

2.3. Solutions de dépollution

Vu le nombre de problèmes causés par la pollution harmonique, différentes stratégies sont évoquées afin de la combattre, on en distingue des solutions classiques à base d'éléments passifs, et des solutions modernes à base de compensateurs actifs, on parle alors de filtrage.

2.3.1. Solutions traditionnelles

À base de composants passifs (condensateurs, bobine, transformateurs etc.), ou en agissant sur la conception de l'installation même et la compensation des courants harmoniques, les solutions dites traditionnelles sont des techniques faciles et rapides pour des perturbations bien localisées.

2.3.1.1. Agissement sur la conception

-Structure de l'installation : consiste à séparer les sources alimentant les charges polluantes et les charges peu ou non polluantes, il faut surtout éviter de raccorder les charges les plus sensibles à proximité des récepteurs pollueurs.

-Surdimensionnement de l'installation électrique : consiste à surdimensionner les différents équipements ce qui leur permet de véhiculer un courant plus important, ils sont ainsi protégés des surcharges d'harmoniques.

-Rééquilibrage des courants du réseau électrique : La mal répartition des charges monophasées et biphasées conduit à un déséquilibre de courant dans le système électrique. La répartition égale de ces charges soigne ce déséquilibre.

-Augmentation de la puissance de court-circuit : Lorsque la puissance de court-circuit de la source augmente, son impédance diminue ce qui implique la diminution de la puissance harmonique globale. Il est donc préférable, de brancher les charges non linéaires le plus amont possible de la source (là où la S_{CC} est optimale).

-Compensation de la puissance réactive : C'est la méthode classique qui adopte les batteries de condensateurs afin de fournir une énergie réactive au réseau et compenser celle absorbée par les éléments inductifs, le facteur de qualité est ainsi amélioré.

-Utilisation du transformateur à couplage spécial : Certains couplages contribuent à la limitation des courants harmoniques. L'utilisation d'un transformateur d'isolement de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle-zigzag par exemple empêche la propagation des harmoniques de rang $3k$ [15], mais cela n'affecte pas les autres rangs d'harmoniques. Et la puissance de la source se trouve limitée.

-Utilisation des inductances anti-harmoniques : C'est la mise en œuvre d'une inductance en série avec la charge polluante ou les condensateurs de compensation afin de les protéger. Son impédance, qui augmente avec la fréquence, réduit les courants harmoniques de rangs élevés.

2.3.1.2. Filtrage Passifs

Le filtrage passif se repose sur le principe de la résonance. L'association en série d'un condensateur, une inductance et une résistance est dite filtre passif qui, en le branchant en parallèle avec le réseau, piège le courant harmonique à fréquence égale à sa fréquence de résonance et l'évacue.

On en distingue deux types :

2.3.1.2.1. Filtre résonnant

Il n'agit que sur un harmonique précis et bien localisé. Les valeurs d'inductance L et de capacité C mises en série (figure 2.4), sont calculées de telle façon à obtenir une fréquence de résonance qui est exactement égale à la fréquence d'harmonique qu'on souhaite éliminer. À la résonance le LC présente une impédance très faible par rapport à l'harmonique concerné selon la relation (2.2), mais une impédance assez importante par rapport au fondamental, ce qui assure l'orientation de l'harmonique vers le chemin qui lui est plus court (le filtre) [22], et non pas vers le reste du réseau. Il joue aussi un rôle de compensateur d'énergie réactive.

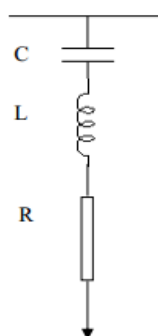


Figure 2. 4 : Filtre passif résonnant.

Quand on détecte plusieurs harmoniques significatifs, on branche un ensemble de filtres passifs résonnants en parallèle, chacun a une fréquence de résonnance correspondante à la fréquence d'harmonique à filtrer (figure 2.5) [1]. Par conséquent il faut autant de circuit résonnant que d'harmonique à supprimer [23].

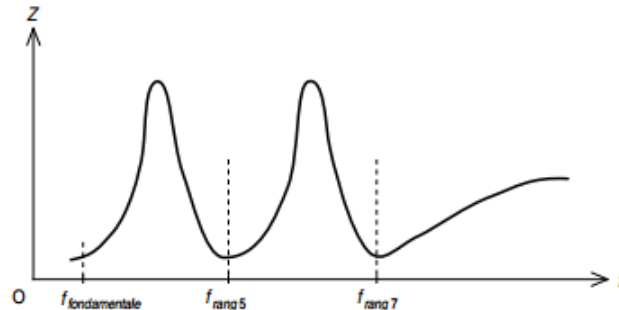


Figure 2. 5 : Un ensemble de filtres résonnant agissant sur plusieurs harmoniques.

2.3.1.2.2. Filtre amorti

C'est un filtre résonnant avec une résistance supplémentaire mise en parallèle avec l'inductance comme montré dans la figure 2.6, dont le rôle est dissipatif ou amortisseur de l'anti-résonance ($Z \ll \infty$). Le but de la mise en œuvre de ce filtre n'est pas la suppression totale, mais l'atténuation des harmoniques dans une plus large bande de fréquences et améliore ainsi le THD globale de l'installation.

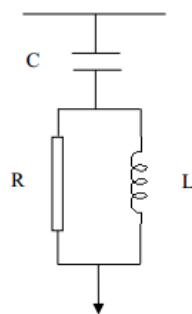


Figure 2. 6 : Structure d'un filtre passif amorti.

Les filtres amortis et résonnants peuvent être associés dans quelques applications industrielles pour une meilleure dépollution.

2.3.1.2.3. Inconvénients du filtrage passif

Ces solutions simples et répandues posent tout de même quelques désavantages :

- La conception du filtre nécessite une étude précise de l'installation concernée [23].
- Les performances du filtre dépendent du réseau, et la mesure pratique et précise des harmoniques.

- Lorsque les harmoniques de la charge sont très variables, il y a un risque d'apparition de fréquences non prises en compte lors du dimensionnement du filtre.
- Il y a un risque de résonance entre la capacité C du filtre et l'inductance de ligne ou d'autres éléments inductifs de l'installation.
- Le filtre passif ne s'adapte pas aux modifications apportées au réseau (restructuration, nouveaux clients ...etc.), et il risque de devenir perturbateur que dépollueur, ce qui oblige à lui remodifier les paramètres à chaque modification apportée.
- Pour le fondamental, le filtre a un comportement capacitif (source de puissance réactive) [23].

2.3.2. Solutions modernes (filtrage actif)

Vu les inconvénients des filtres passifs, leur inflexibilité au développement du réseau et les problèmes qui s'en suivent, de nouvelles solutions de filtrage ont été envisagées. En effet, avec le développement de la technologie, des nouveaux composants et de nouvelles techniques de commande ont permis de réaliser d'autres types de filtres, dits filtres actifs, qui, à la différence des filtres passifs fabriqués par des éléments R, L et C, sont constitués de composants d'électronique de puissance comme les thyristors GTO, les transistors IGBT ou les MOSFET.

2.3.2.1. Filtres Actifs de puissance

Les filtres actifs permettent de compenser en temps réel les perturbations en injectant, en série ou en parallèle, des courants ou des tensions harmoniques en opposition par rapport aux harmoniques existants dans le réseau électrique.

L'avantage des composants semi-conducteurs est la commutation des puissances élevées à des fréquences importantes [24], sachant que plus le nombre de commutation par période est élevé, plus on élimine des harmoniques de rangs supérieurs [25].

Selon le type d'harmoniques à éliminer, les filtres actifs sont connectés soit en série, en parallèle ou en combinaison des deux (série et parallèle).

Les filtres actifs sont flexibles et plus adaptatifs et ils ont une capacité de filtrage plus importante, néanmoins, leur coût élevé a limité leur implantation dans l'industrie [26].

2.3.2.1.1. Filtre actif parallèle (FAP) de puissance

Le filtre actif parallèle (appelé aussi compensateur shunt) est connecté en parallèle avec le réseau (figure 2.7), et se comporte le plus souvent comme un générateur de courants. Il génère en temps réel des courants harmoniques égaux à ceux générés par les charges non linéaires, mais en opposition de phase afin de préserver une forme sinusoïdale du courant de la source [27].

Il est constitué d'un onduleur de tension relié à une inductance à la sortie rendant ce dernier une source de courant.

Le filtre actif permet aussi d'améliorer le facteur de puissance en compensant l'énergie réactive, mais cela nécessite un dimensionnement plus important [28]. Il peut également se comporter comme un compensateur de tension harmonique, dans ce cas, il injecte un courant harmonique à travers l'impédance de la source de façon à créer à ses bornes une chute de tension harmonique qui permet de régler la tension harmonique aux bornes de la charge [22]. Il permet donc de maintenir sinusoïdale la tension au point de raccordement quelque soit le courant absorbé par la charge ou la qualité de la source de tension [23].

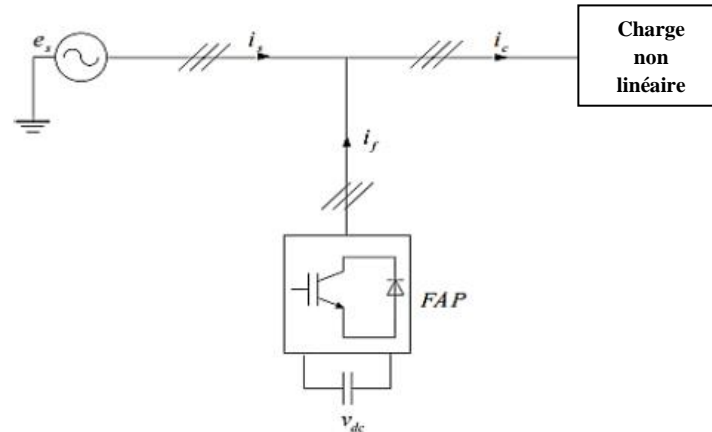


Figure 2. 7 : Filtre actif parallèle.

2.3.2.1.2. Filtre actif série (FAS) de puissance

La protection des charges contre les creux de tension, le déséquilibre et les tensions harmoniques peut se faire à l'aide d'un filtre actif relié en série avec le réseau électrique (figure 2.8). Ce filtre est considéré comme une source de tension puisqu'il génère des tensions harmoniques qui s'opposent aux tensions perturbatrices afin de les éliminer et de préserver une forme de tension parfaitement sinusoïdale. Cependant, les courants harmoniques ne sont pas compensés par ce type de filtre.

Le filtre actif série est relié au réseau grâce à un transformateur permettant d'empêcher les courants harmoniques de remonter vers le réseau et de protéger par conséquent les charges sensibles aux surtensions et les déséquilibres [28].

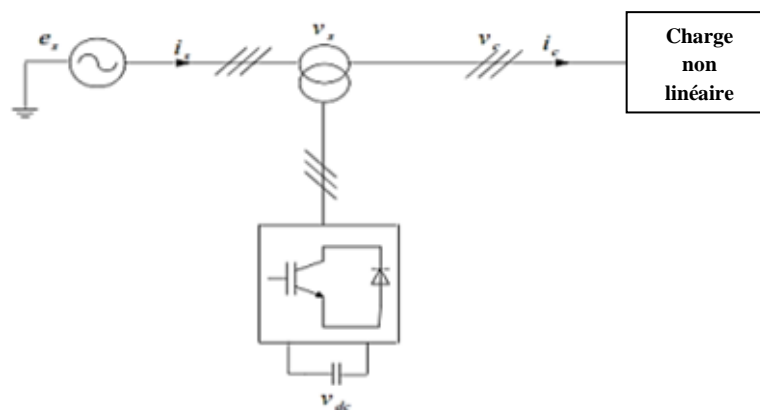


Figure 2. 8 : Filtre actif série.

Toutefois, la mise en œuvre de la topologie d'un filtre actif série présente quelques inconvénients (en cas de court-circuit de la charge, le filtre actif de puissance série devient la seule charge du réseau et risque d'être détruit. Ceci nécessite des protections supplémentaires [13]).

2.3.2.1.3. Combinaison série parallèle des filtres actifs

Afin de bénéficier des avantages des deux types de filtres, série et parallèle, l'idée est de les combiner et les relier tous les deux au réseau (figure 2.9). Cette topologie assure donc un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci [29]. Ce dispositif est évidemment plus puissant, cependant, son prix important et la complexité des commandes des nombreux interrupteurs limitent son utilisation [27].

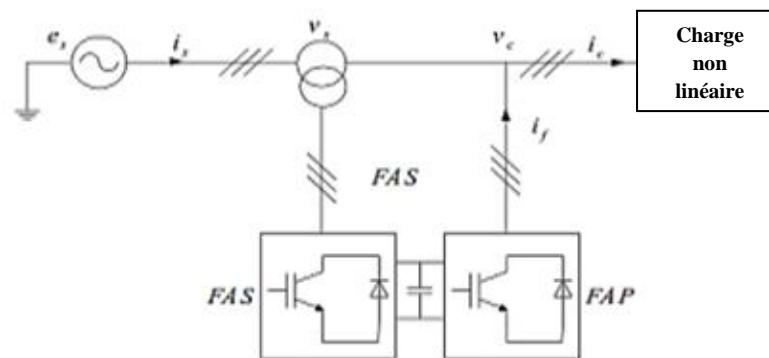


Figure 2. 9 : Combinaison série parallèle des filtres actifs.

2.3.2.2. Filtre hybride

Une autre combinaison intéressante, consiste à l'association d'un filtre passif avec un filtre actif, à mis en exergue autres avantages résultants de la combinaison des points forts de ces deux types de filtres. En effet, la puissance du convertisseur qui constitue le filtre actif est fortement réduite grâce aux éléments passifs puisque ces derniers permettent de supprimer la majorité des harmoniques propagées, alors que le filtre actif sert à garantir un filtrage efficace en fonction du développement des charges. Le dimensionnement des filtres actifs devient par ce fait réduit, et par conséquent, le rapport performance / coût est optimisé.

Selon le mode d'association des filtres passifs aux filtres actifs, le filtre hybride se décline en plusieurs configurations décrites ci-après [6].

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

2.3.2.2.1. Filtre actif série avec filtres passifs parallèles

Le filtre passif est utilisé dans ce cas pour l'élimination des harmoniques prédominantes (ceux qui sont proches du fondamentale), et le filtre actif renforce l'efficacité de ce dernier en agissant comme une résistance vis-à-vis des courants harmoniques et les oblige à circuler dans le filtre passif [6]. L'avantage de ce montage est la réduction des risques d'antirésonance entre les éléments du filtre passif et l'impédance du réseau [35]. Cette topologie est illustrée dans la figure 2.10.

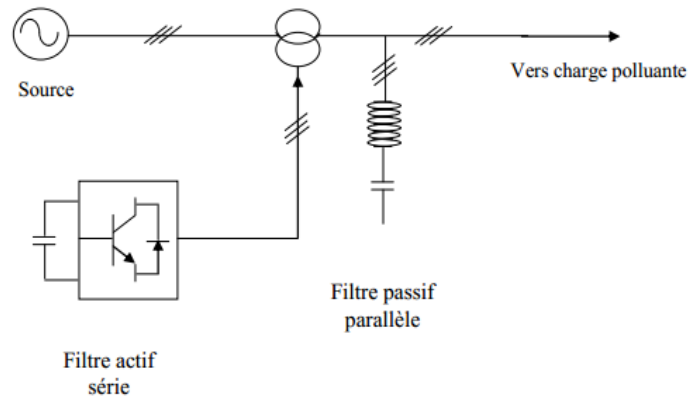


Figure 2. 10 : Filtre actif série avec filtres passifs parallèles.

2.3.2.2.2. Filtre actif parallèle avec filtres passifs parallèles

Dans le montage montré dans la figure 2.11, le filtre actif est connecté en parallèle avec le filtre passif. Les harmoniques de rang élevé sont traités par des filtres passifs dimensionnés à ces fréquences, alors que les courants basses fréquences sont compensés par le filtre actif [31].

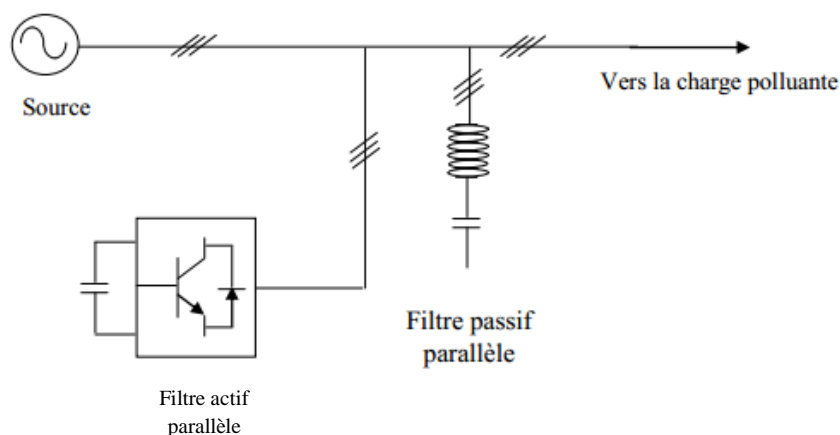


Figure 2. 11 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

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

Dans cette structure, le filtre actif est relié en série avec le filtre passif sans l'intermédiaire d'un transformateur, et les deux sont connectés en parallèle avec la charge, comme montré dans la figure 2.12. L'avantage de cette structure est que le filtre actif est protégé par le filtre passif contre un éventuel court-circuit de la charge. Aussi, le courant absorbé par le filtre actif est moins important à cause du filtre passif, ce qui fait que son dimensionnement est encore plus réduit.

Dans ce cas, le filtre actif améliore l'efficacité des filtres passifs en atténuant fortement les courants harmoniques. Néanmoins, son principal inconvénient est que les filtres passifs sont dimensionnés en fonction de la charge, une étude préalable est donc indispensable [31].

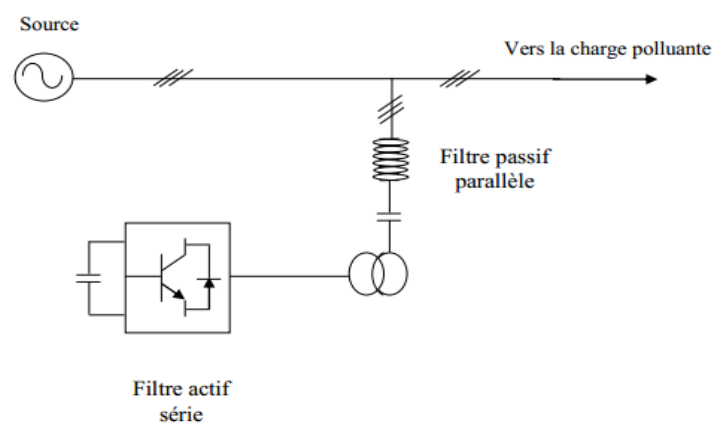


Figure 2. 12 : Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.

2.4. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre différentes méthodes et stratégies permettant de protéger les équipements électriques contre les perturbations provoquées par des phénomènes extérieures (foudre, manipulation du réseau...etc.) ou par le réseau lui-même (les harmoniques, creux de tension, surintensité...etc.). Les stratégies employées ont été améliorées puis perfectionnées au fur et à mesure que la technologie se développait, plus particulièrement la technologie des semi-conducteurs.

Au début du chapitre, des solutions dites traditionnelles ont été présentées. Ce sont des solutions consistant généralement à des manipulations effectuées sur la conception du réseau afin de diminuer les problèmes causés par les charges polluantes ou d'éliminer quelques harmoniques polluants en installant des bobines ou des transformateurs spéciaux.

La compensation des harmoniques de courant ou de tension est réalisée à l'aide des filtres passifs ou des filtres actifs ou par l'association des deux.

L'avantage des filtres actifs par rapport aux filtres passifs est qu'ils sont plus flexibles et plus puissants, autrement dit, ils peuvent s'adapter aux variations de la charge, contrairement aux filtres passifs qui sont conçus pour compenser des harmoniques d'une fréquence déterminée. Toutefois, comme il a été signalé dans ce chapitre, l'élimination de tous les harmoniques par un filtre actif nécessite un dimensionnement considérable de ce dernier conduisant à des coûts importants. Cependant, la combinaison de ces deux types de filtres, actifs et passifs, réduit considérablement le coût du filtre actif.

Troisième Chapitre :
Étude et Commande d'un
Filtre Actif Parallèle

3.1. Introduction

Après l'évocation des différentes solutions de dépollution dans le chapitre précédent, nous nous intéresserons dans celui-ci au filtre actif parallèle, sa modélisation et le dimensionnement de ses différents paramètres tout en passant par sa commande et la méthode d'identification des courants harmoniques dans le réseau. À la fin, et après l'établissement de notre modèle sous Simulink de Matlab, plusieurs essais y ont été apportés afin de prouver son bon fonctionnement et tester sa performance.

3.2. Modélisation et dimensionnement du système

Modéliser revient à établir un modèle de l'ensemble du système qui permet d'étudier le comportement du filtre actif parallèle avec le réseau électrique, Ce dispositif est raccordé à un réseau alimenté par une source qui fournit de l'énergie à une certaine charge.

3.2.1. La source et le réseau

Notre réseau est assimilable à une source de tension sinusoïdale triphasée équilibrée de (220/380 V, 50 Hz) d'une puissance nominale apparente de 400 KVA, en série avec une impédance Z_s . Les lignes électriques sont modélisées par une impédance représentée par une inductance L_s et une résistance R_s (figure 3.1) [31].

$$\begin{cases} e_1 = \sqrt{2} E \sin(\omega t) \\ e_2 = \sqrt{2} E \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_3 = \sqrt{2} E \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases}$$

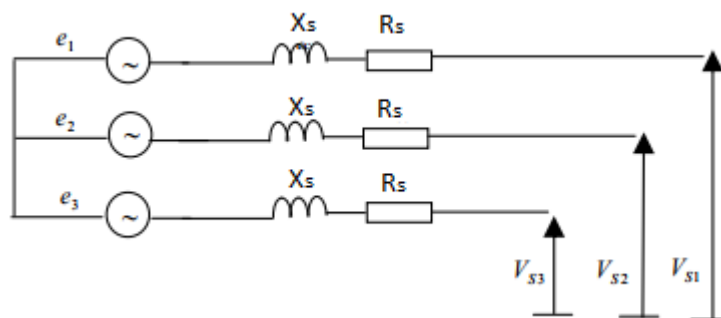


Figure 3. 1 : Schéma synoptique simplifié de la source d'un réseau électrique.

3.2.2. La charge polluante

Toute charge basée sur des éléments d'électronique de puissance est dite polluante, pour tester le filtre nous avons utilisé un pont redresseur triphasé qui génère des harmoniques de l'ordre $6k \pm 1$ [23][24]. Les figures suivantes (figure 3.2 et 3.3) montrent les schémas des deux ponts

redresseurs utilisés dans nos tests. La première est un pont redresseur à diodes non commandé et le deuxième est un pont redresseur à thyristors commandé.

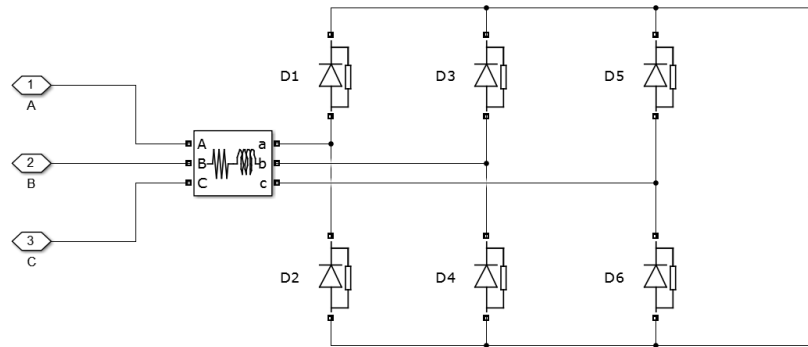


Figure 3. 2:Schéma de la charge non linéaire ; pont redresseur à diode avec charge RL à la sortie.

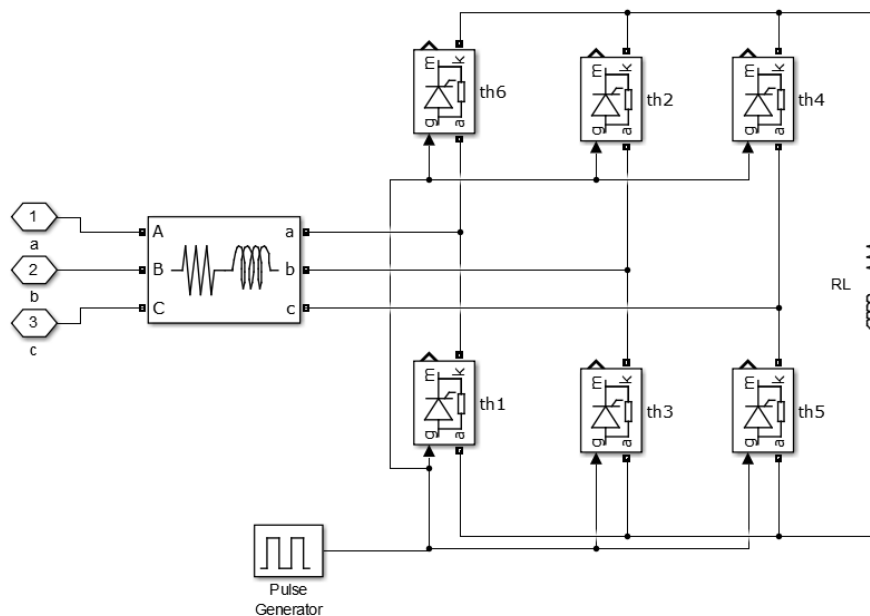


Figure 3. 3 : Schéma de la charge non linéaire, Pont redresseur à thyristor avec une charge RL à sa sortie.

La résistance et inductance internes des lignes ont été modélisées par une branche RL triphasée.

3.2.3. Le Filtre Actif Parallèle

La figure (3.4) représente la structure générale du filtre actif parallèle que nous modélisons sous Simulink. Puisque le filtre génère des courants, sa structure est donc basée sur la présence d'un onduleur de type tension, avec un filtre passif (bobine) à sa sortie pour donner des courants, et une alimentation en continu assurée par un condensateur, on parle alors de sa partie puissance. Pour que les courants injectés aient la possibilité de supprimer les harmoniques présentes sur le réseau à tout instant, ces derniers doivent être donc identifiés

afin d'en extraire des courants dits de références. Et pour pouvoir reproduire ces courants de référence, l'onduleur est commandé par différentes méthodes. Afin d'assurer une bonne reproduction de ces courants, une alimentation continue fixe à l'onduleur est prévue avec la présence d'un régulateur de tension de type PI. On parle donc de sa partie commande.

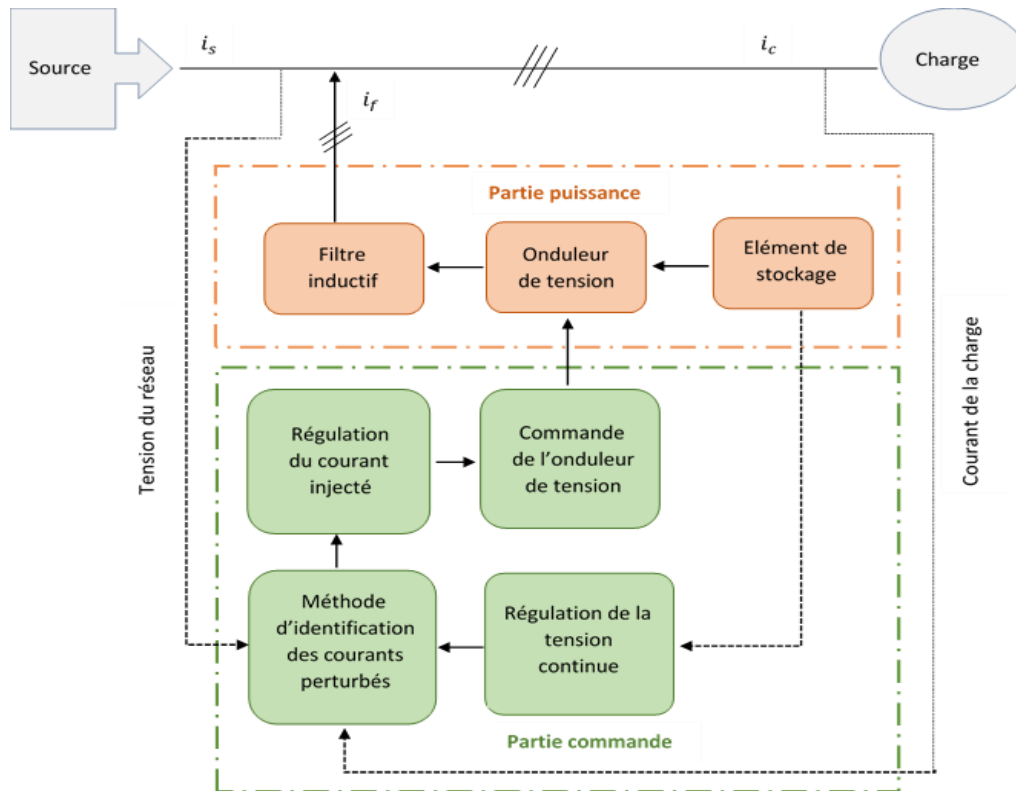


Figure 3. 4 : Structure générale du filtre actif parallèle.

3.2.3.1. L'onduleur de tension et sa commande

Pour une application dans un filtre actif parallèle, un onduleur de tension est plus commode qu'un onduleur de courant en raison de la simplicité de sa commande et son bon prix [32]. Notre onduleur à deux niveaux est d'une structure en pont triphasé constitué de six interrupteurs de type IGBT réversibles en courant (grâce à une diode en antiparallèle) qui sont commandés de façon complémentaire pour éviter le court-circuit [32].

La forme du signal de sortie de l'onduleur est assurée à travers les ordres de commande (fermeture / Ouverture) appliqués aux interrupteurs de puissance de manière à ce que le courant du filtre actif soit le plus proche possible à sa référence [13].

3.2.3.1.1. Commande de l'onduleur par hystérésis

Le principe de cette méthode est que le courant de référence sera entouré de deux seuils, un supérieur dit d'enclenchement et un inférieur dit de déclenchement, en formant ainsi un gabarit dit « bande d'hystérésis ». Si le courant commandé augmente et atteint le seuil supérieur de l'hystérésis, l'ordre de commutation change (l'enclenchement), et le courant

commandé se met à diminuer jusqu'à atteindre le seuil inférieur de l'hystérésis où les interrupteurs commutent encore (le déclenchement).

Le choix de la largeur de la bande d'hystérésis tient compte de la fréquence de commutation admissible par les interrupteurs, plus cette bande est petite plus la fréquence est grande et vis-versa. Le problème de cette commande est qu'elle présente une fréquence de commutation variable, mais elle est robuste et facile à implémenter [32][33].

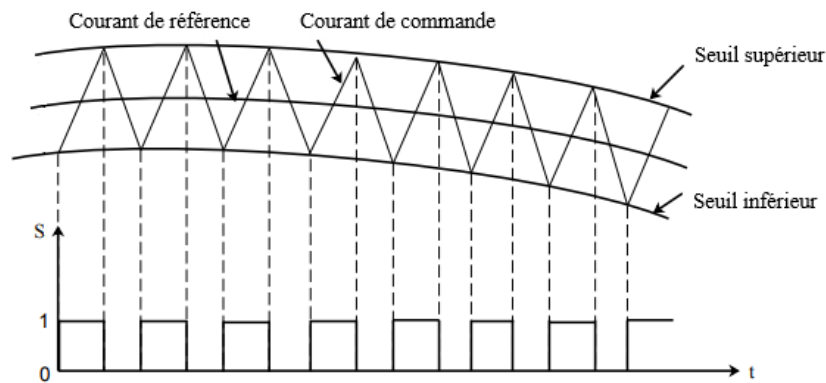


Figure 3. 5 : Commande par hystérésis.

Pour présenter l'hystérésis sous Simulink on utilise le bloc « relay » dont la sortie est 1 si le courant commandé atteint le seuil supérieur, 0 s'il atteint l'inférieur.

3.2.3.1.2. Commande de l'onduleur par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Le courant de référence est comparé à une porteuse triangulaire de fréquence élevée, et les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection de ces deux signaux.

Si la consigne est supérieure à la porteuse le signal de commande est à 1V, si la porteuse est supérieure à la consigne la commande est à 0V (figure 3.6).

Plus la fréquence de la porteuse est élevée, à condition qu'elle soit admissible par les interrupteurs, le signal MLI a plus de créneaux, et le signal de sortie est ainsi plus proche à sa référence.

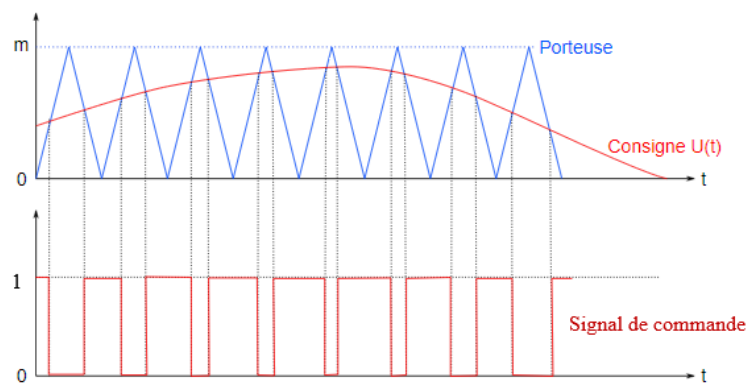


Figure 3. 6 : Commande par MLI.

3.2.3.2. La Capacité de Stockage

Pour les faibles et moyennes puissances il est plus efficace et moins couteux de stocker l'énergie du côté continue par l'intermédiaire d'un condensateur de capacité (C_{dc}) de tension (V_{dc}) [23][16]. Le condensateur a deux fonctionnalités principales, en régime transitoire, est un réservoir qui fournit l'énergie nécessaire, et en régime permanent, il assure à la tension un faible taux d'ondulation [23].

On choisit une valeur de (V_{dc}) importante pour avoir une bonne dynamique du filtre tout en respectant les contraintes des interrupteurs et de commandabilité de l'onduleur. Elle est généralement choisie au moins deux fois plus grande que le max de la tension simple du réseau [35].

Dans notre cas, la valeur efficace de la tension simple du réseau est $V_s = 220V$. Ce qui correspond à une tension maximale de $V_{s\ max} = 311V$.

On choisit une tension $V_{dc} = 2,5 \times V_{s\ max} \rightarrow V_{dc} = 2,5 \times 311 = 777,5V$.

On prend alors $V_{dc} = 800V$.

Le (C_{dc}) est choisie selon l'augmentation de la composante fondamentale du courant de la charge, l'énergie stockée dans le condensateur doit être libérée immédiatement pour compenser l'augmentation de la puissance consommée par la charge. [23]

Il y a plusieurs méthodes pour dimensionner la valeur de C_{dc} , dans notre étude nous avons utilisé une méthode qui se base sur l'utilisation du raisonnement du calcul du rapport des puissances apparentes [23] (voir Annexe) :

$$\frac{S_{filtre}}{S_{charge}} = \frac{\sqrt{Q_c^2 + D_c^2}}{\sqrt{P_c^2 + Q_c^2 + D_c^2}} = 0.2968 \quad 3.1$$

En choisissant la période de l'ondulation de la tension aux bornes du condensateur six fois inférieure à celle de la tension du réseau [36], et en fixant le taux d'ondulation de la tension continue à $\Delta V_{dc} = 2\%$, la relation est la suivante :

$$C_{dc} \geq \frac{2 \times 0,3036 P_c}{6 f_r (V_{dc\ max}^2 - V_{dc\ min}^2)} \quad 3.2$$

Tel que :

- f_r Est la fréquence fondamentale du réseau.
- P_c Est la puissance active absorbée par la charge.
- $0,3036 P_c = \sqrt{Q_c^2 + D_c^2}$ est la puissance apparente du filtre (calculé depuis 3.1)
- $V_{dc\ max} = V_{dc} + \frac{\Delta V_{dc}}{2}$
- $V_{dc\ min} = V_{dc} - \frac{\Delta V_{dc}}{2}$

En remplaçant dans l'équation 3.2 par les valeurs de notre modèle on trouve :

$$C_{dc} = \frac{2 \times 0,3036 \times 6318}{6 \times 50 \times (808^2 - 792^2)} = 499 \mu F$$

On prend alors : $C_{dc} = 500 \mu F$

3.2.3.3. Le filtre de sortie

L'onduleur de tension est connecté au réseau à l'aide d'un filtre du premier ordre, composé d'une inductance L_f . Cette inductance permet de faire fonctionner l'onduleur comme une source de courant, elle empêche aussi les composantes dues aux commutations des transistors de se propager sur le réseau électrique et d'améliorer par ce fait le THD du signal de sortie [37]. Une valeur relativement élevée de l'inductance L_f permet d'obtenir une bonne atténuation de ces harmoniques, elle affecte néanmoins sa dynamique [38].

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 [16].

À partir de la relation caractérisant le courant du filtre actif donnée ci-dessous (3.3), nous allons obtenir un modèle mathématique regroupant les caractéristiques citées ci-dessus pour le calcul de l'inductance L_f du filtre de sortie [23] :

$$L_f \frac{di_f}{dt} = -R_f i_f + V_{dc} - V_s \quad 3.3$$

En négligeant la résistance de ce filtre de couplage on obtient :

$$L_f \frac{di_f}{dt} = V_{dc} - V_s \quad \rightarrow \quad \frac{di_f}{dt} = \frac{V_{dc} - V_s}{L_f} \quad 3.4$$

La variation maximale du courant du filtre actif :

$$\left(\frac{di_f}{dt}\right)_{max} = \frac{V_{dc} - V_{s_{max}}}{L_f} \quad 3.5$$

Avec $V_{dc} = 2.5 V_{s_{max}}$

$$\frac{\Delta i_{f_{max}}}{\Delta T} = \frac{V_{dc} - \frac{V_{dc}}{2.5}}{L_f} = \frac{V_{dc} \left(1 - \frac{1}{2.5}\right)}{L_f} = \frac{1.5 V_{dc}}{2.5 L_f}$$

$$L_f = \frac{1.5 V_{dc}}{2.5 \Delta i_{f_{max}} \times f_{ond}} \quad 3.6$$

Avec :

- $\Delta i_{f_{max}} = 60\% i_{s_{max}}$.
- $V_{k_{max}} = V_{dc}$: La valeur maximale de la tension à la sortie de l'onduleur.
- V_{dc} : La tension continue aux bornes du condensateur de stockage.
- $V_{s_{max}}$: La valeur maximale de la tension simple du réseau.

- $\Delta T = \frac{1}{f_{ond}}$: La période de variation du courant harmonique de haute fréquence.

f_{ond} Est la fréquence des harmoniques générés par la commutation des IGBTs de l'onduleur. Une valeur très grande de cette fréquence diminue l'efficacité du filtre de sortie mais améliore sa dynamique.

En appliquant, et en choisissant une fréquence de $f_{ond} = 12698 \text{ Hz}$, on trouve $L_f = 7 \text{ mH}$:

$$L_f = \frac{1.5 \times 800}{2.5 \times 0.6 \times 9 \times 12698} = 7 \text{ mH}$$

3.2.3.4. Identification des courants harmoniques

Le principe d'extraction des courants de référence est basé sur la détection des harmoniques dans le domaine temporel, les stratégies de commande adoptées par les méthodes de ce domaine se distinguent selon la grandeur à détecter, dans notre cas c'est la détection des courants de la charge polluante. On utilise alors la méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées proposée par Akagi et al en 1983. Elle est rapide et précise, puisque seules des opérations algébriques sont nécessaires, et valide en régime transitoire comme en régime permanent. Elle est aussi appelée « méthode PQ », son avantage réside, non seulement dans la compensation en temps réel des courants harmoniques, mais aussi de l'énergie réactive, ce qui améliore le facteur de puissance dans le réseau en le rapprochant à l'unité [39].

Nous avons un réseau à trois fils équilibrés, afin de simplifier l'étude, on converti le système triphasé (a-b-c) en un système équivalent biphasé (α - β -o) à l'aide de la transformée de Concordia qui laisse la puissance invariante. Les axes α et β sont orthogonaux, le troisième est nul, il est considéré seulement dans le cas du système déséquilibré à quatre fils [40][41].

- **Calcul des courants de référence par la méthode PQ**

Avec : T, la transformée de Concordia :

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

Les tensions et les courants dans le système biphasé s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} v_o \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad ; \quad \begin{bmatrix} i_o \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad 3.7$$

Avec une puissance homopolaire nulle :

- La puissance réelle instantanée : $p = p_{\alpha\beta} = v_{\alpha} \cdot i_{\alpha} + v_{\beta} \cdot i_{\beta}$
- La puissance imaginaire instantanée totale : $q = q_{\alpha\beta} = v_{\alpha} \cdot i_{\beta} - v_{\beta} \cdot i_{\alpha}$

Les puissances réelle et imaginaire peuvent être écrites sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ -v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad 3.8$$

En présence d'harmoniques, les deux puissances instantanées, réelle (p) et imaginaire (q), contiennent une puissance continue, image de la puissance du fondamental, et une puissance alternative, liée à la somme des harmoniques :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad 3.9$$

Avec :

- \bar{p} : Puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant ou de tension.
- \bar{q} : Puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant ou de tension.
- \tilde{p} et \tilde{q} : Puissances alternatives liées à la somme des composantes harmoniques.

D'après l'équation 3.8, on obtient les courants dans le repère (α, β) en fonction des puissances réelles et imaginaires instantanées p et q :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad 3.10$$

En posant $\Delta = v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2$, et en séparant les courants en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale, et la composante regroupant les harmoniques [24], la relation 3.10 devient :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant harmonique}} \quad 3.11$$

À partir de là, on peut déduire la relation qui donne les courants de référence, qui compensent à la fois les courants réactifs et les courants harmoniques, dans le repère (α, β) :

$$\begin{bmatrix} i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant harmonique}} \quad 3.12$$

On remarque que la composante fondamentale active présente dans 3.11 a été éliminée du calcul des courants de référence dans 3.12. Cela se fait par le placement d'un filtre d'ordre 2,

passé haut ou passé bas avec un soustracteur de type Butterworth [21], comme illustré dans la figure 3.7 suivantes :

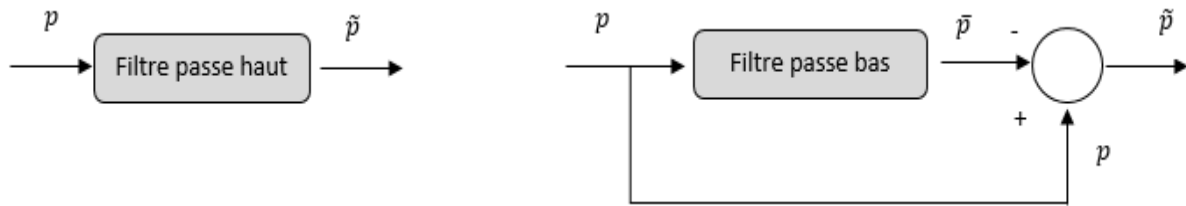


Figure 3.7 : Séparation des puissances avec un filtre passe haut ou un filtre passe bas.

Dans les basses fréquences, il est plus performant d'utiliser un filtre passe bas qu'un filtre passe haut. Plus l'ordre de ce filtre est important la dynamique est meilleure mais le temps de calculs est plus long et l'implantation est plus chère.

Enfin, la transformée inverse de Concordia (T^{-1}) permet de calculer les courants de référence dans le repère (a-b-c) :

$$\begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -1 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} \quad 3.13$$

La figure 3.8 suivante représente la modélisation de cette méthode sous Simulink de Matlab :

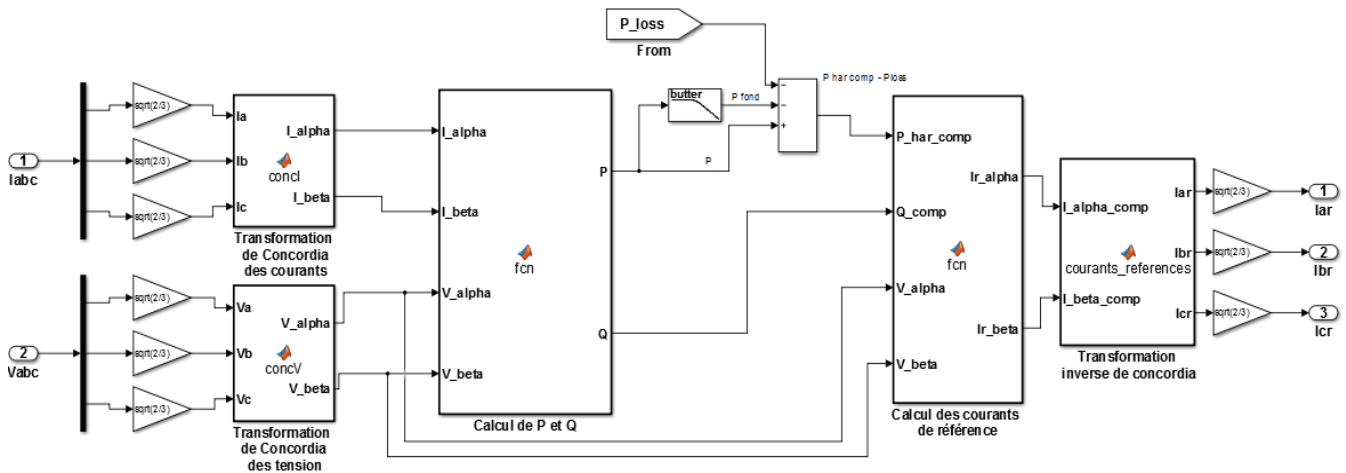


Figure 3. 8 : Implantation de la méthode PQ sous Simulink.

3.2.3.5. Régulateur de la tension continue V_{dc}

Si les conditions de la charge changent, la tension V_{dc} aux bornes du condensateur qui alimente l'onduleur s'éloigne de sa valeur de référence car le condensateur se trouve entrain de compenser la différence d'énergie, aussi à cause des pertes dans le filtre de sortie et les interrupteurs s'ils sont mal commandés, cette tension fluctue, ce qui dégrade les performances

du filtre, alors qu'elle doit être toujours positive et constante. C'est pourquoi un régulateur PI pour cette tension est nécessaire afin de satisfaire cette condition [34][23].

Le correcteur PI classique est composé d'un terme proportionnel et d'un autre intégral qui ajustent le gain et annulent l'erreur statique. Il est facile à implémenter et présente une bonne réponse dynamique si ses paramètres sont bien réglés [42].

En ce qui suit, la fonction de transfert du régulateur choisit et le calcul de ses paramètres :

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad 3.14$$

L'énergie emmagasinée dans un condensateur est :

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_{dc}^2 \quad 3.15$$

La puissance est ainsi :

$$P_c = \frac{dW}{dt} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \frac{dV_{dc}^2}{dt} \quad 3.16$$

La transformée de Laplace de l'équation précédente donne la relation entre la puissance absorbée par le condensateur et la tension à ses bornes :

$$P_c = \frac{1}{2} \cdot C \cdot s \cdot V_{dc}^2 \quad 3.17$$

En tenant compte de cette relation et la fonction de transfert du régulateur PI, la boucle de régulation de la tension continue est représentée dans la figure 3.9 :

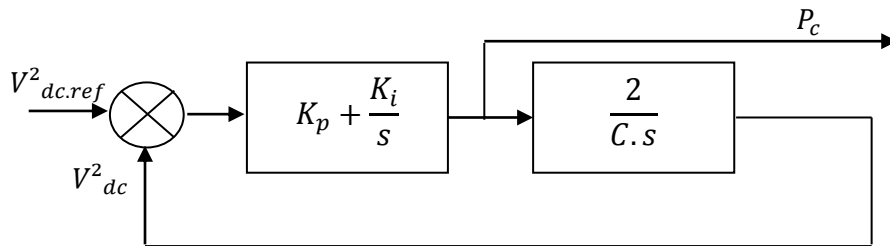


Figure 3.9 : Boucle de régulation de la tension continue.

La fonction de transfert de cette boucle de régulation est :

$$G(s)_{BF} = \frac{\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \times \frac{2}{C \cdot s}}{1 + \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \times \frac{2}{C \cdot s}} \quad \rightarrow \quad G(s)_{BF} = \frac{\frac{2K_i}{C} \times \left(\frac{K_p}{K_i} s + 1\right)}{s^2 + 2 \frac{K_p}{C} s + \frac{2K_i}{C}} \quad 3.18$$

En utilisant la méthode de placement de pôles :

$$(s - s_1)(s - s_2) = 0 \quad \rightarrow \quad s^2 - (s_1 + s_2)s + s_1s_2 = 0$$

En identifiant avec l'équation caractéristique, et avec $s_{1,2} = -\rho \pm j\rho$, on trouve :

$$\begin{cases} K_p = \frac{c}{2}(-s_1 - s_2) \\ K_i = \frac{c}{2}s_1s_2 \end{cases} \quad 3.19$$

$$\begin{cases} K_p = C\rho \\ K_i = C\rho^2 \end{cases} \quad 3.20$$

Après plusieurs essais, la valeur $\rho = 20$, a donné la meilleure régulation :

$$\begin{cases} K_p = 0.01 \\ K_i = 0.2 \end{cases}$$

3.2.3.6. Régulateur du courant

L'erreur entre le courant injecté au réseau et le courant de référence identifié qui est appliquée au bloc de commande de l'onduleur, est perturbée par les harmoniques causés par les variations aléatoires de la fréquence de commutation des interrupteurs (cas de la commande par hystérésis), ou par la haute fréquence de leurs commutations (cas de la commande MLI).

Afin de minimiser ses perturbations et améliorer ainsi la qualité du signal de sortie, un régulateur proportionnel avec un filtre passe bas ou un régulateur PI doit être placé avant le bloc de commande.

La boucle de régulation du courant peut être schématisée comme suit (figure 3.10) :

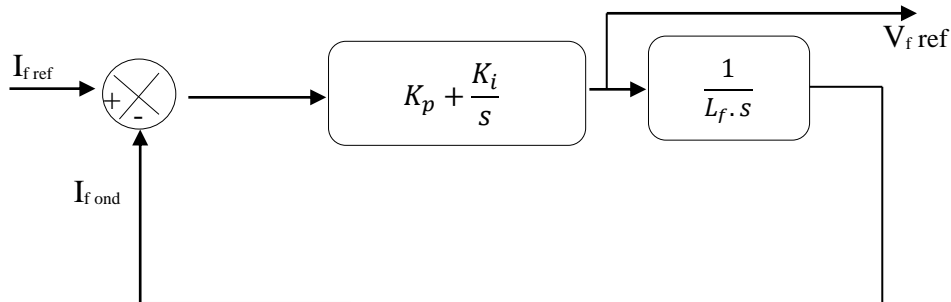


Figure 3. 10 : Boucle de régulation de courant.

La fonction de transfert de cette boucle de régulation s'écrit :

$$G(s)_{BF} = \frac{\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \times \frac{2}{L_f \cdot s}}{1 + \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \times \frac{2}{L_f \cdot s}} \quad \rightarrow \quad G(s)_{BF} = \frac{\frac{1}{L_f} \times (K_p \cdot s + K_i)}{s^2 + \frac{K_p}{L_f} s + \frac{K_i}{L_f}} \quad 3.21$$

Les paramètres K_i et K_p du régulateur PI se calculent d'après la méthode de l'optimum symétrique [43] :

$$K_i = \frac{\sqrt{10}}{\omega_{bp \max}} \quad 3.22$$

Avec $\omega_{bp \max}$: la bande passante maximale du régulateur de courant. Elle est calculée par :

$$\omega_{bp \max} = \frac{\omega_p}{\sqrt{10}} = \frac{2\pi \times f_p}{\sqrt{10}} \quad 3.23$$

- f_p : Est la fréquence de la porteuse (dans notre cas, $f_p = 10\text{KHz}$)

$$\omega_{bp \max} = \frac{2\pi \times 10000}{\sqrt{10}} = 19869.17 \text{ rad}$$

$$f_{bp \max} = \frac{19869.17}{2\pi} = 3162 \text{ Hz}$$

On prend alors $f_{bp} = 3000\text{Hz}$

Le gain proportionnel K_p est choisi pour avoir, dans la boucle de régulation du courant, un gain global unitaire à la fréquence de la bande passante choisie :

$$\frac{K_p}{L_f \cdot \omega_{bp}} = 1 \quad \rightarrow \quad K_p = L_f \times \omega_{bp} = L_f \times 2\pi \times f_{bp} \quad 3.24$$

Application numérique :

$$\begin{cases} K_p = 131,9 \\ K_i = 1.67 \times 10^{-4} \end{cases}$$

La figure 3.11, représente la structure générale avec ses différents blocks de commande et de régulation sous Simulink :

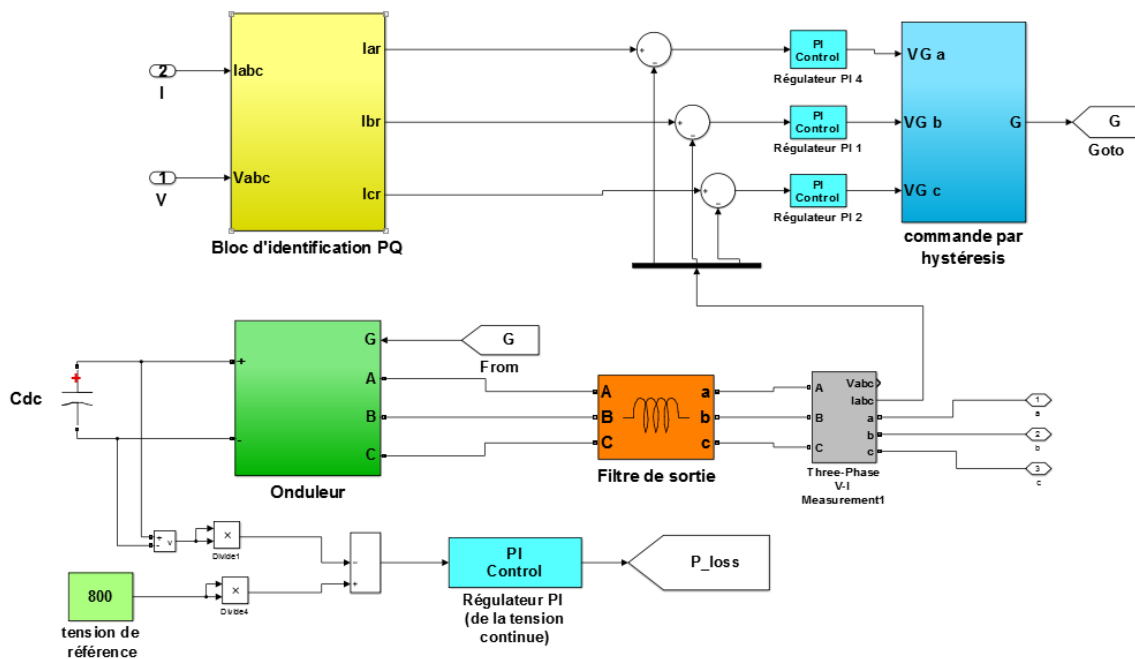


Figure 3. 11 : Implantation du filtre actif parallèle Direct avec sa commande sous Simulink/Matlab.

3.3. Résultats de Simulation

Les deux figures suivantes présentent la visualisation des trois phases de la tension du réseau qui n'été pas affectée par les harmoniques (figure 3.12) :

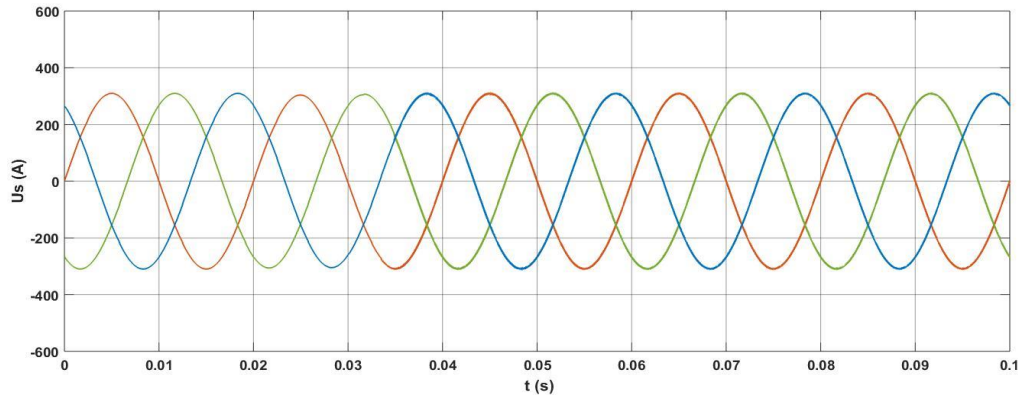


Figure 3. 12 : Tension simple triphasée du réseau électrique.

Et les trois phases du courant avant et après la mise en marche du filtre à l'instant 0.03s (figure 3.13) :

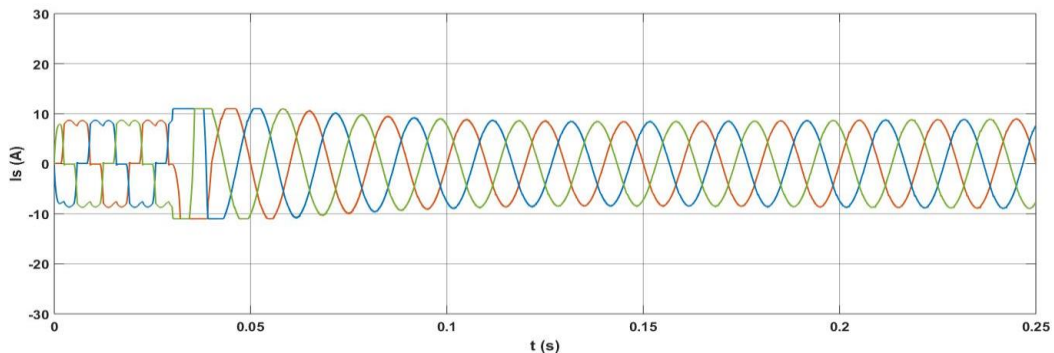


Figure 3. 13 : Courant triphasé du réseau appelé par la charge polluante avant et après filtrage.

3.3.1. Redresseur à diodes

Dans l'essai avec le redresseur à diodes nous allons tester deux cas, une fois avec une charge RL à la sortie du pont, et une fois avec une charge RC.

- Charges RL avec $R=60$ et $L=20\text{mH}$

Avant filtrage, la charge polluante génère des harmoniques qui déforment le courant, son allure devient telle qu'elle est présentée dans la figure 3.14, son analyse spectrale présente les différents rangs d'harmoniques qui sont la cause de cette distorsion, le taux de distorsion harmonique est donc élevé et au-dessus de la norme, 26,22%.

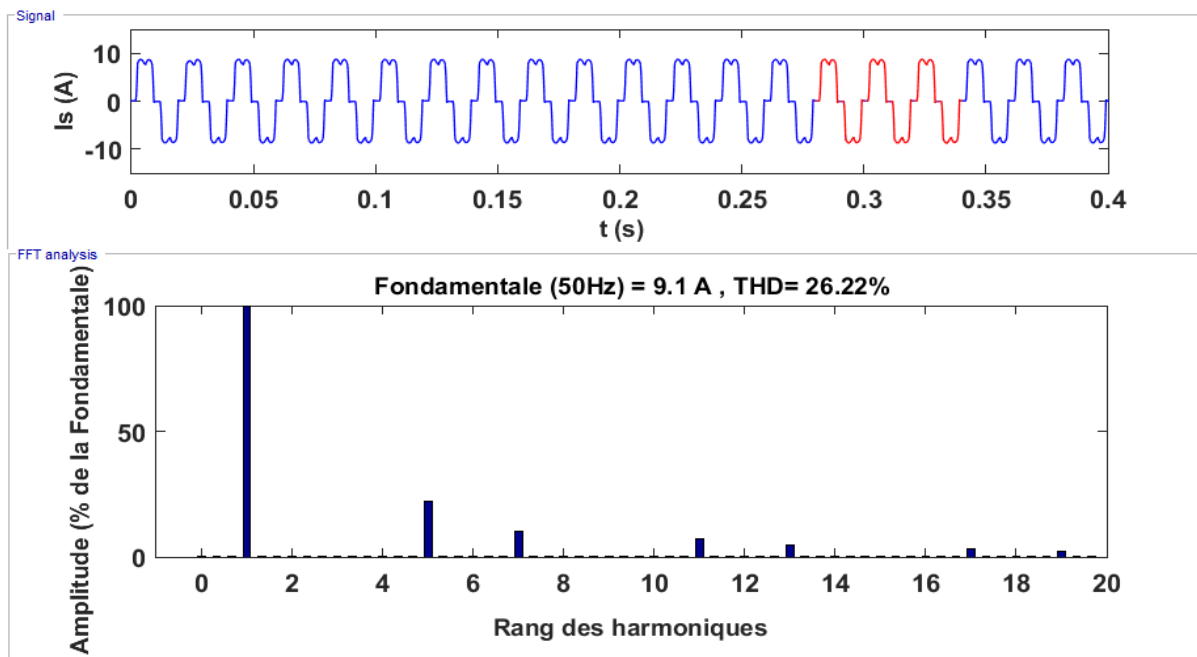


Figure 3. 14 : Courant distordu appelé par la charge polluante d'une seule phase, sa représentation spectrale et son THD.

La figure 3.15 représente l'allure d'une seule phase du courant de ligne après filtrage, on remarque qu'il est devenu sinusoïdal, le pourcentage des harmoniques par rapport à la fondamentale a trop baissé (presque nul), et le THD est beaucoup meilleur, 2,75%, et respecte la norme.

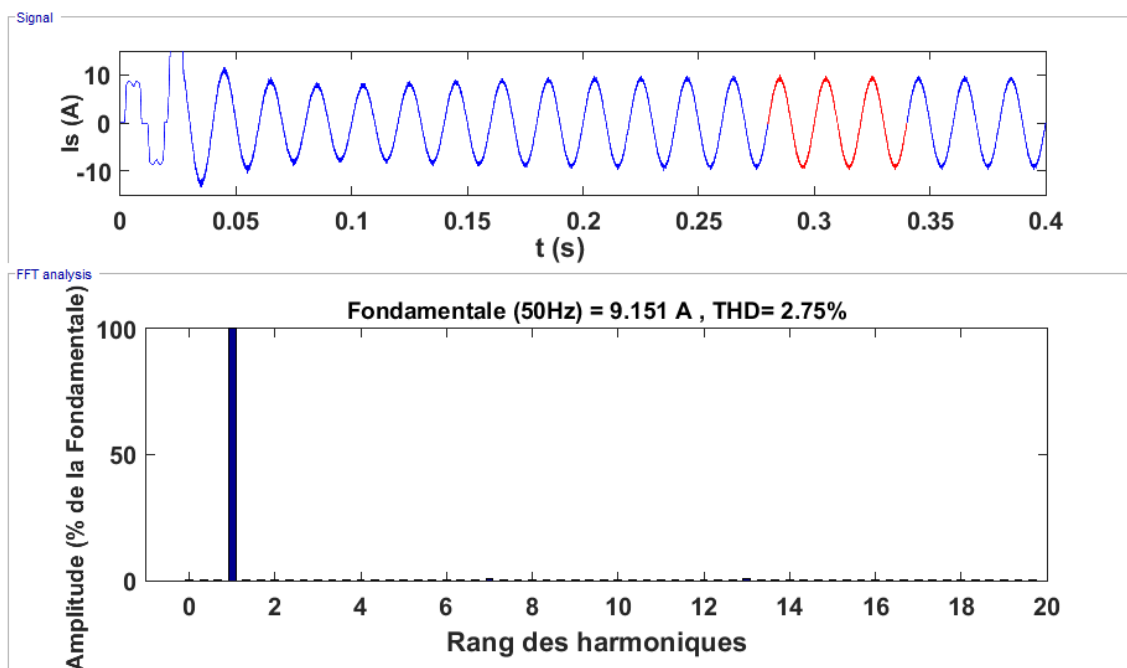


Figure 3. 15 : Le courant d'une seule phase appelé par la charge après filtrage, sa représentation spectrale et son THD.

Ce bon résultat est dû à la bonne identification des courants harmoniques, le bon calcul des courants de références, et leur bonne reproduction par l'onduleur de tension ce qui prouve à la fois l'efficacité de la méthode PQ et l'efficacité de la commande de l'onduleur. D'ailleurs la figure 3.16 compare entre le courant de référence et le courant reproduit par l'onduleur et on remarque qu'en régime permanent ils sont superposés.

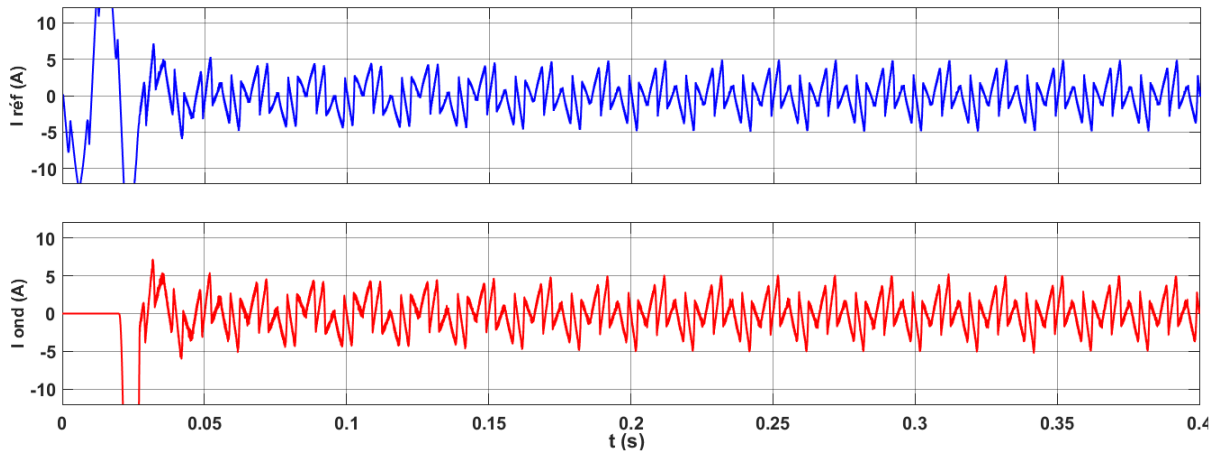


Figure 3.16 : Le courant identifié par la méthode PQ en bleu et le courant injecté par l'onduleur en rouge.

La figure 3.17 représente la tension aux bornes du condensateur, dès la mise en marche du filtre, par rapport à la tension de référence, on remarque qu'au régime permanent la V_{dc} suit la tension continue de référence avec une erreur statique qui tend vers 0 grâce à la régulation.

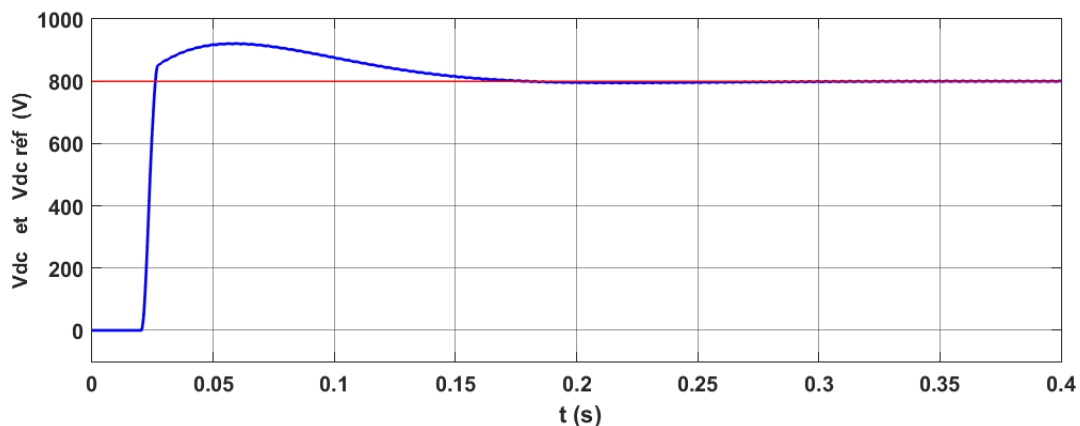


Figure 3.17 : La régulation de la tension continue V_{dc} aux bornes du condensateur de stockage à une référence de 800 V.

- Charges RC avec ($R=20\Omega$ et $C=100\mu F$)

Nous avons remplacé la charge RL par une charge RC pour essayer de filtrer une autre forme de courant présentée dans la figure 3.18 dont le THD est de 42,43%.

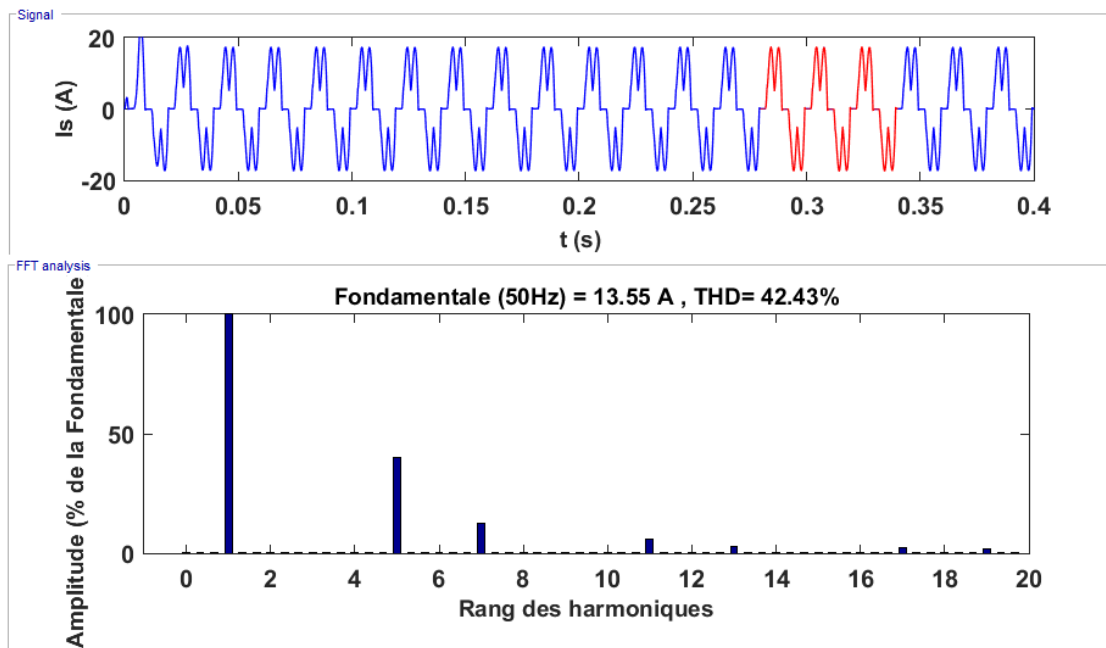


Figure 3. 18 : Courant distordu appelé par la charge polluante d'une seule phase, sa représentation spectrale et son THD.

Le résultat de filtrage est un courant sinusoïdal de 2,63% de THD présenté dans la figure 3.19.

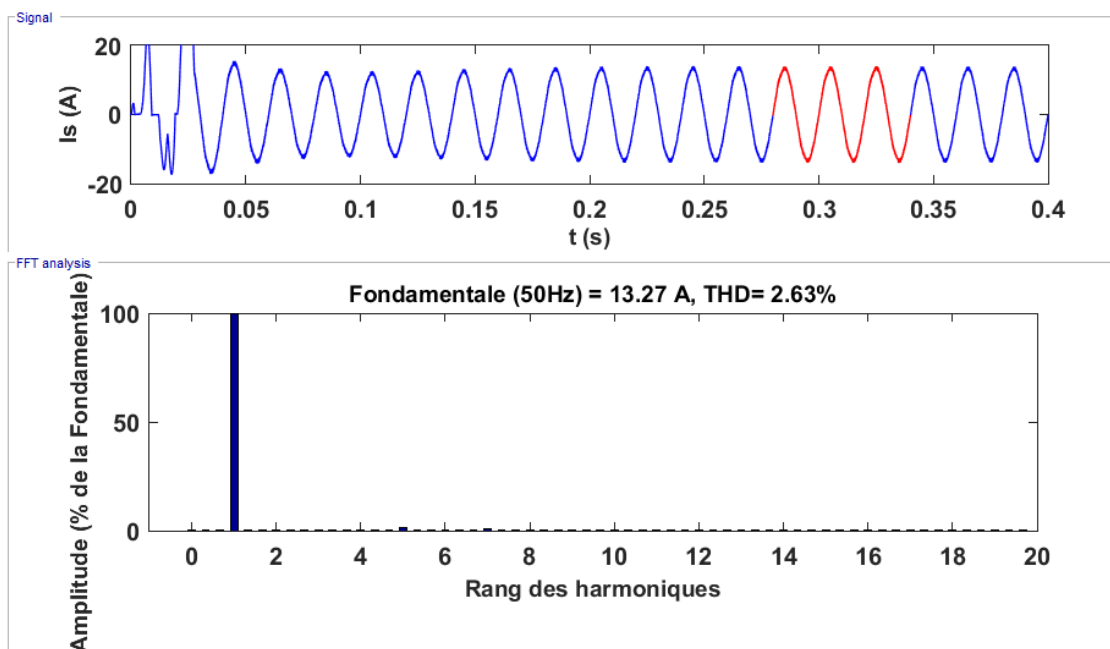


Figure 3. 19 : Le courant d'une seule phase appelé par la charge après filtrage, sa représentation spectrale et son THD.

La figure 3.20 montre que le courant injecté au réseau par l'onduleur suit exactement sa référence déterminée par la méthode d'identification des puissances instantanées.

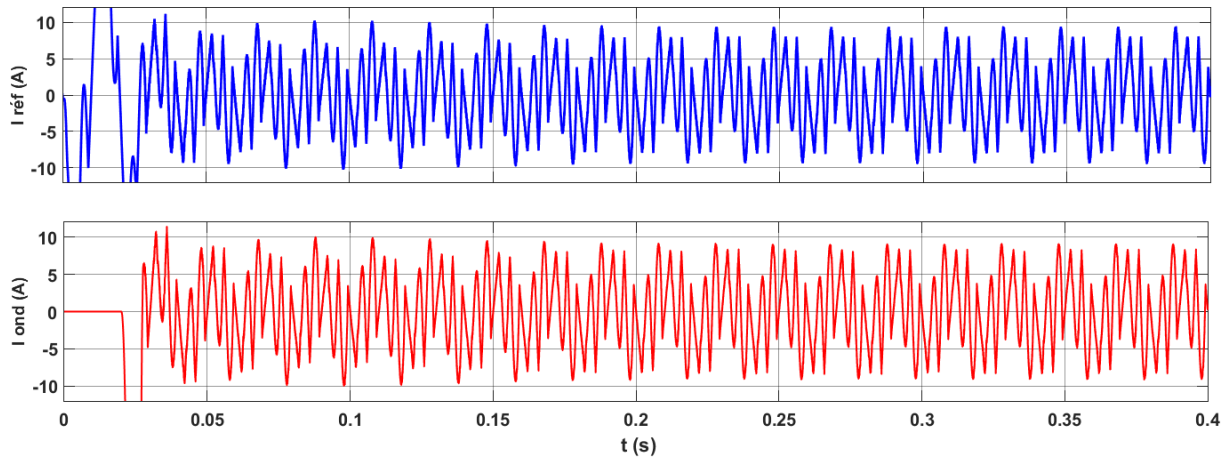


Figure 3. 20 : Le courant de référence identifié par la méthode PQ en bleu et le courant injecté par l'onduleur en rouge.

Le régulateur PI a réussi dans ce cas aussi de maintenir la V_{dc} autour de sa référence selon la figure 3.21.

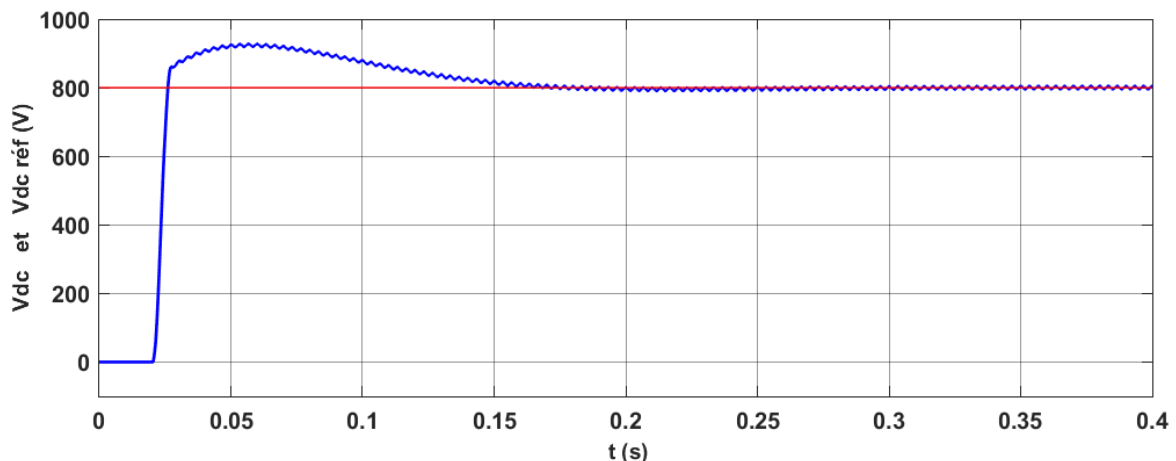


Figure 3. 21 : La régulation de la tension continue V_{dc} aux bornes du condensateur de stockage à une référence de 800 V.

3.3.2. Variation brusque de la charge ($R_1 = 60\Omega$, $L_1 = 20\text{mH}$, et $R_2 = 120\Omega$, $L_2 = 10\text{mH}$)

Il arrive parfois qu'une charge qui absorbe du courant d'un réseau augmente ou diminue selon le besoin, on test par cet essai l'adaptabilité du filtre si une charge varie brusquement. Dans la figure 3.22 et la figure 3.23 on voit le courant d'une seule phase avant et après filtrage respectivement. Lors de l'augmentation brusque de la charge à l'instant $t=0.02\text{s}$ on passe par un instant transitoire ensuite le signal se stabilise à sa nouvelle valeur.

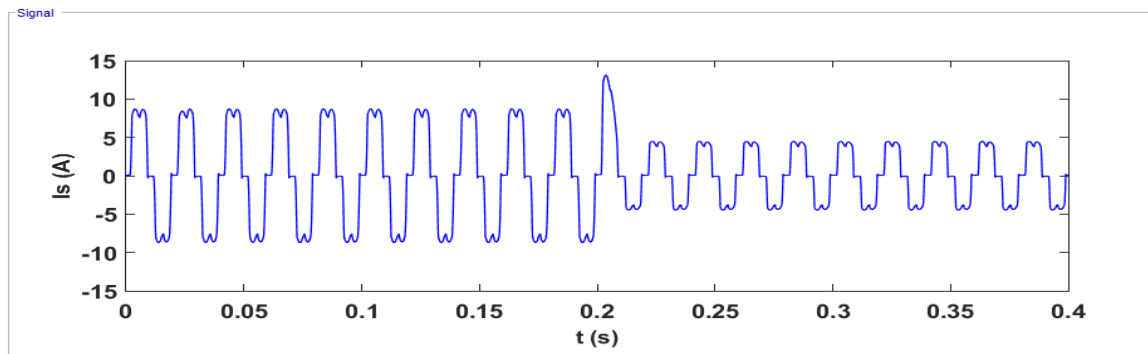


Figure 3.22 : Courant distordu absorbé lors de la variation d'une charge à un moment donné.

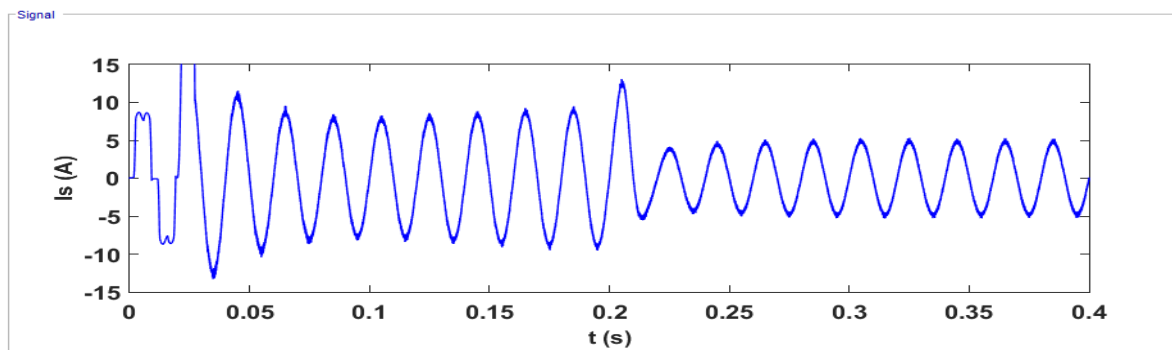


Figure 3.23 : Courant filtré absorbé lors de la variation d'une charge à un moment donné.

L'identification, le calcul des courants de référence et le courant reproduit par l'onduleur, s'adaptent à la variation de la charge selon la figure 3.24, c'est pourquoi la compensation est assez bonne.

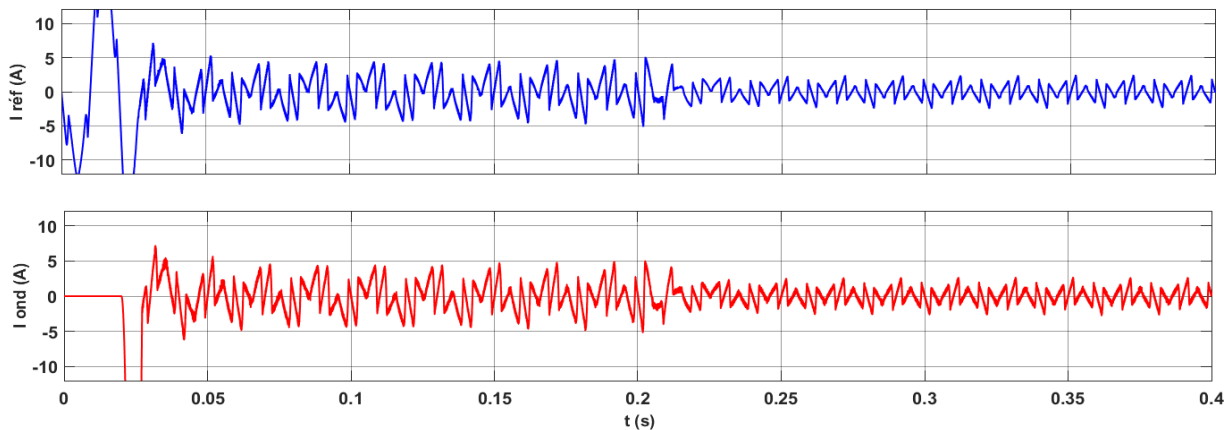


Figure 3.24 : Le courant identifié en bleu et le courant injecté par l'onduleur en rouge.

Dans la figure 3.25 suivante, on a varié brusquement la charge à l'instant $t=0.2s$, la V_{dc} passe par une petite phase transitoire ensuite elle suit parfaitement sa référence au régime permanent avec une erreur statique qui tend vers zéro. Quand la charge varie brusquement le condensateur de stockage se trouve entrain de compenser le besoin de cette charge ce qui

varie la tension à ses bornes. La présence du régulateur PI s'adapte bien avec ces variations et veille à ce que la V_{dc} reste autour de sa référence quel que soit la demande de la charge.

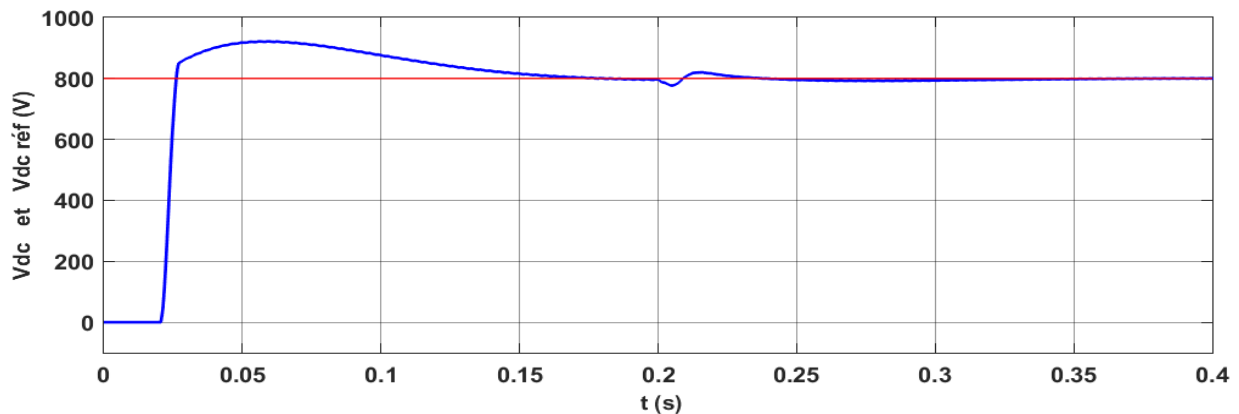


Figure 3. 25 : Régulation de la tension continue aux bornes du condensateur de stockage à 800 V lors d'une variation brusque de la charge.

3.3.3. Charge déséquilibrée

Afin d'identifier les courants harmoniques dans le réseau, la méthode dite PQ des puissances instantanées est la plus utilisée, on en connaît celle à quatre fils (qui considère le neutre) et celle à trois fils pour les charges équilibrées (absence du neutre). Dans le test suivant nous avons branché une charge déséquilibrée à un réseau triphasé dépollué par un filtre qui ne considère que les trois fils dans son identification des courants.

($L=0.1\text{mH}$ et $R_1 = 20\Omega$, $R_2 = 10\Omega$, $R_3 = 25\Omega$.)

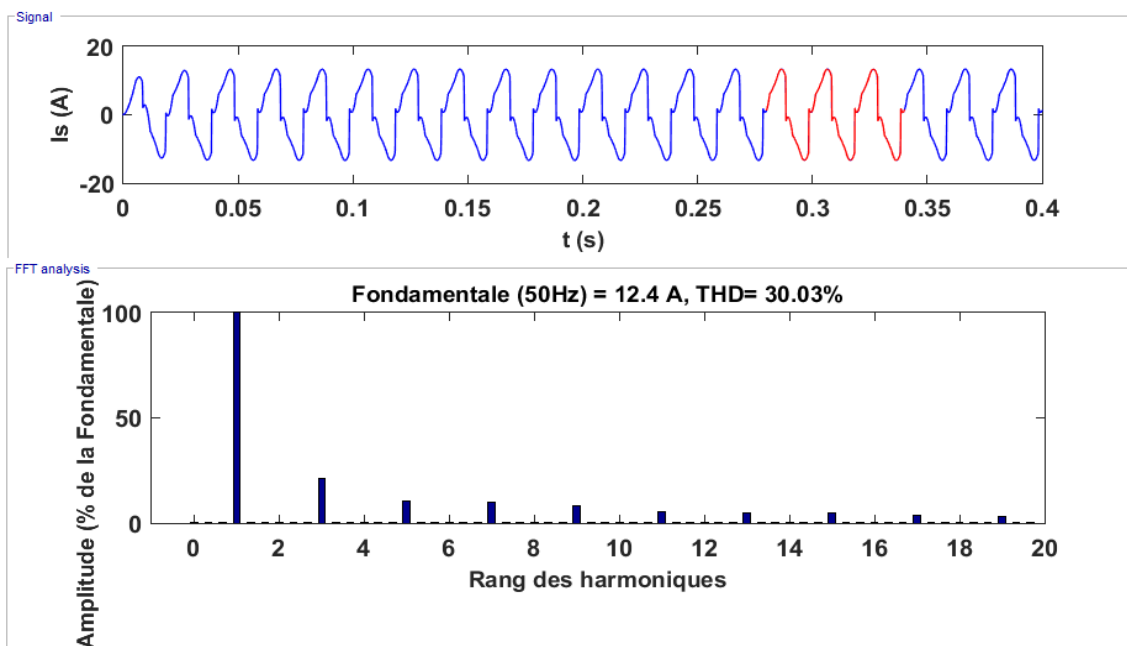


Figure 3. 26 : Courant appelé par la charge déséquilibrée, son analyse spectrale et son THD.

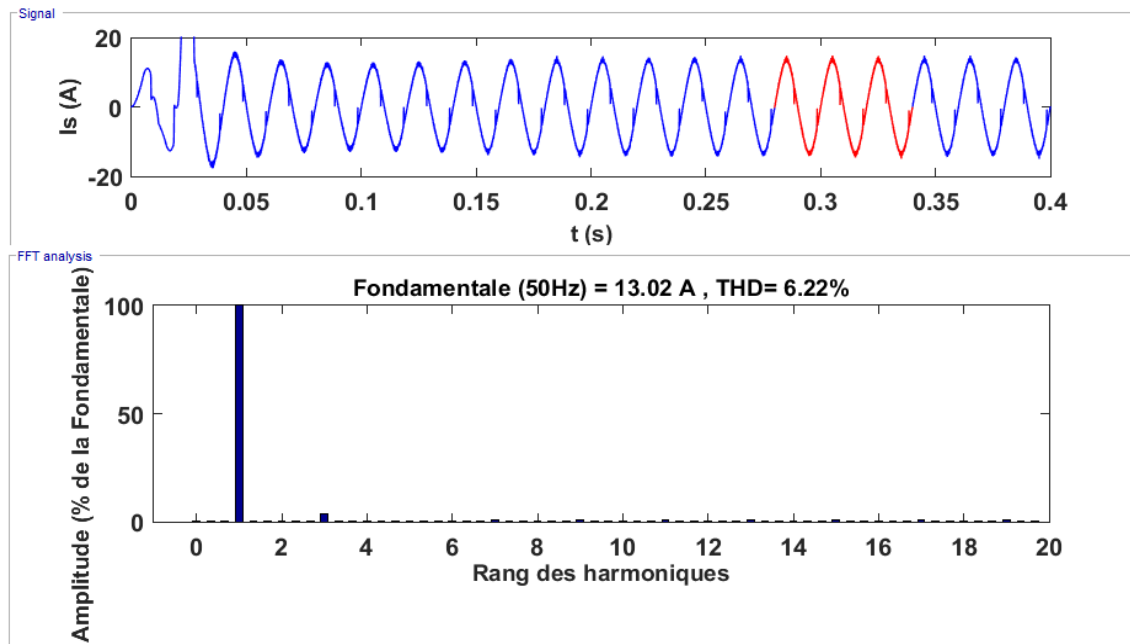


Figure 3.27 : Le courant appelé par la charge déséquilibrée filtré, avec analyse spectrale et THD.

Les figures 3.26 et 3.27 représentent le courant absorbé avant et après filtrage respectivement, il est loin d'être sinusoïdal avec un THD de 30,30% dans la première figure. Une fois le filtre en marche, le courant se rapproche à la sinusoïde avec un THD de 6,22% (figure 3.27). Certes, cette valeur de THD est relativement grande par rapport aux résultats des charges précédentes, mais il faut savoir que la charge déséquilibrée génère des harmoniques homopolaires qui, normalement, sont sensés circuler dans le neutre qui n'est pas pris en compte dans la méthode d'identification utilisée qui considère seulement les trois phases sans neutre. D'ailleurs on remarque dans l'analyse spectrale de la figure 3.27, que l'harmonique de rang trois persiste avec un certain pourcentage malgré le filtrage, par rapport aux cas de filtrage précédents de la charge équilibrée.

La figure 3.28 présente trois graphes, le premier est celui de la régulation de la V_{dc} : elle suit parfaitement sa référence de 800V. Le deuxième est le courant de référence obtenu à partir de la méthode d'identification, et le troisième et celui injecté au réseau par l'onduleur, on constate que l'onduleur est bien commandé car il reproduit bien son courant de référence.

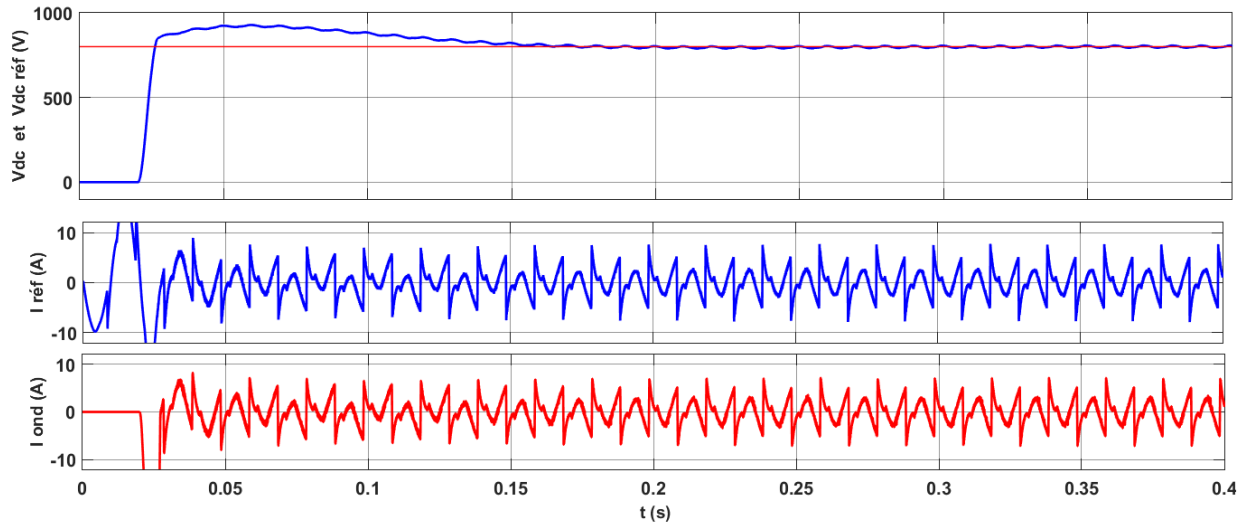


Figure 3. 28 : Représentation de la régulation de la tension continue aux bornes du condensateur de stockage en haut, le courant de référence en bleu, et le courant injecté par l'onduleur en rouge.

3.3.4. Redresseur à thyristors

Les six thyristors de la figure 3.3 sont commandés à un instant d'amorçage repéré par rapport au passage par zéro de la tension d'alimentation du pont avec un angle α dit angle d'amorçage. Chaque thyristor reçoit son impulsion de commande à un moment donné : les impulsions des trois phases sont décalées l'une de l'autre de 120° , et les impulsions des thyristors du même bras sont décalées l'une de l'autre de 180° , le bloc "pulse generator" de Simulink s'occupe de cette commande.

Dans les deux essais qui suivent nous allons tester l'adaptation du filtre actif à l'augmentation de l'angle d'amorçage des thyristors (10° et 30°).

- Essai à angle d'amorçage de 10° (avec $R=60\ \Omega$ et $L=20\text{mH}$)

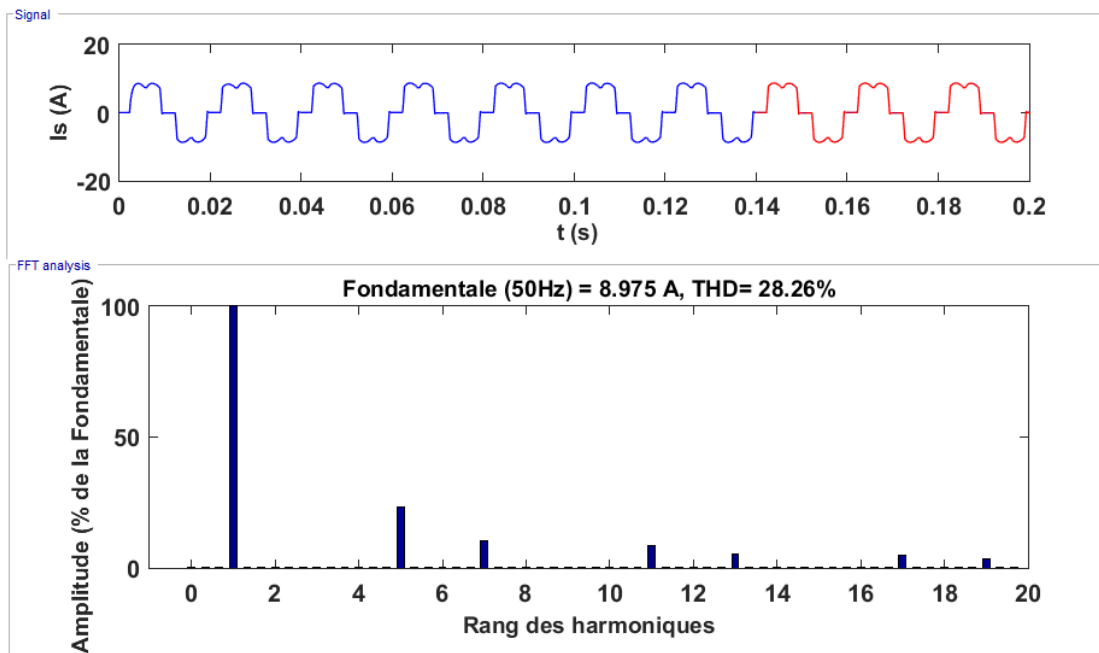


Figure 3.29 : Courant distordu appelé par la charge à thyristors commandés à 10° avec sa représentation spectrale et son THD.

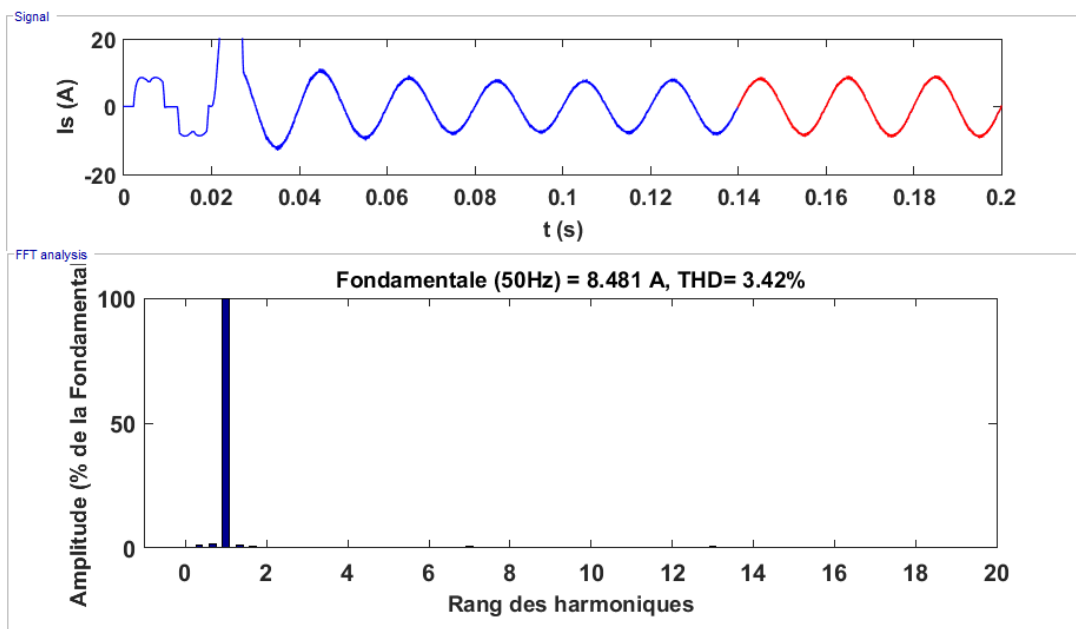


Figure 3.30 : Courant filtré avec sa représentation spectrale et son THD.

D'après les figures 3.29 et 3.30, le comportement du filtre quand la charge polluante est un pont à thyristor est le même que dans le cas du pont à diode, sauf que lorsque les thyristors

sont commandés avec un angle d'amorçage, l'allure du courant va changer encore plus et le taux de distorsion augmente. Plus l'angle d'amorçage augmente le signal est plus distordu.

- Essai à angle d'amorçage de 30° (avec $R=60\ \Omega$ et $L=20\text{mH}$)

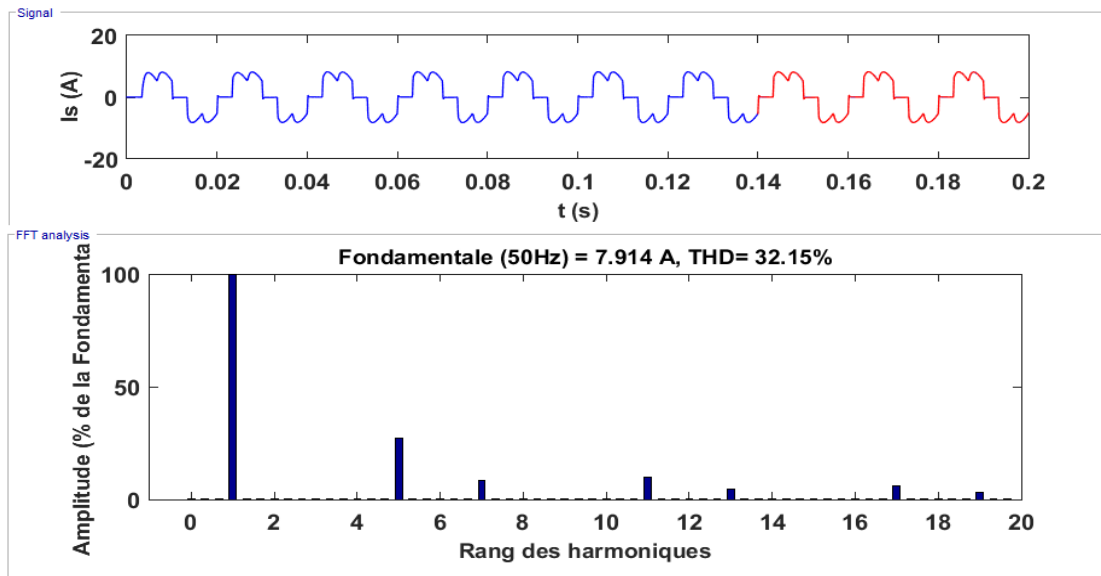


Figure 3.31 : Courant distordu appelé par la charge à thyristors commandés à 30° avec sa représentation spectrale et son THD.

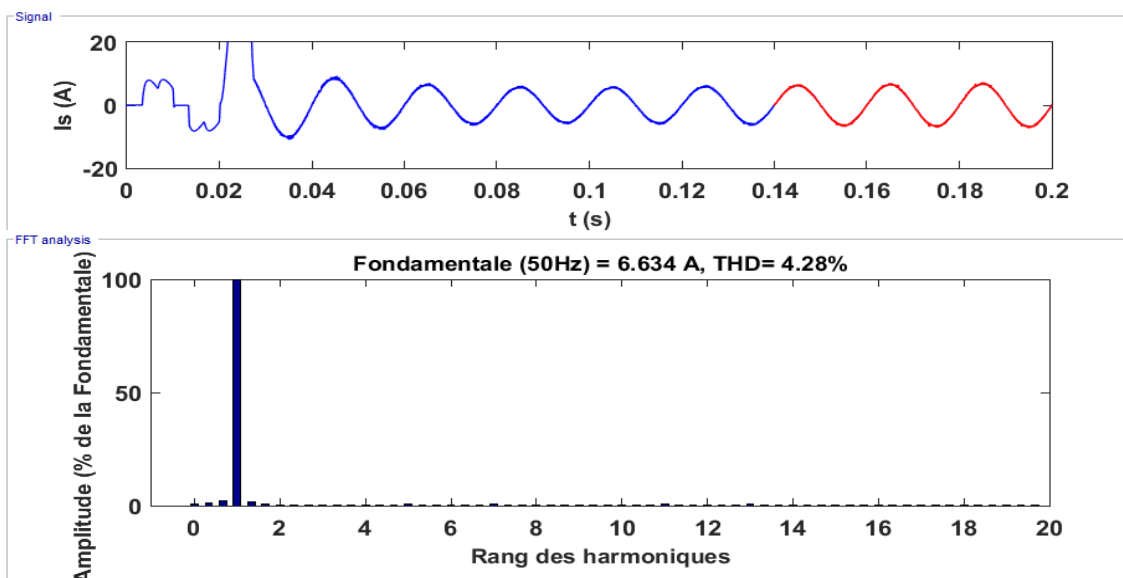


Figure 3.32 : Courant filtré avec sa représentation spectrale et son THD.

On remarque d'après la comparaison avec les figures 3.31 et 3.32 qu'à $\alpha=10^\circ$, le THD = 28,26% et il descend à 3,42% après filtrage. Mais à $\alpha=30^\circ$ le THD = 32,15% et il descend à 4.28% après filtrage. Le nouveau THD est toujours dans la norme.

3.3.5. Variation brusque de la tension continue de référence

Le régulateur de la tension continue V_{dc} est un élément très important dans la structure du filtre actif parallèle, il veille à ce que le condensateur reste toujours chargé et prêt à fournir la tension nécessaire à l'onduleur pour bien compenser les courants harmoniques, alors cette dernière doit rester constante.

On a vu dans les tests ci-dessus qu'il s'adapte bien avec la variation brusque de la charge, le test suivant dévoilera si le régulateur PI suit n'importe quelle tension de référence qu'on lui donne.

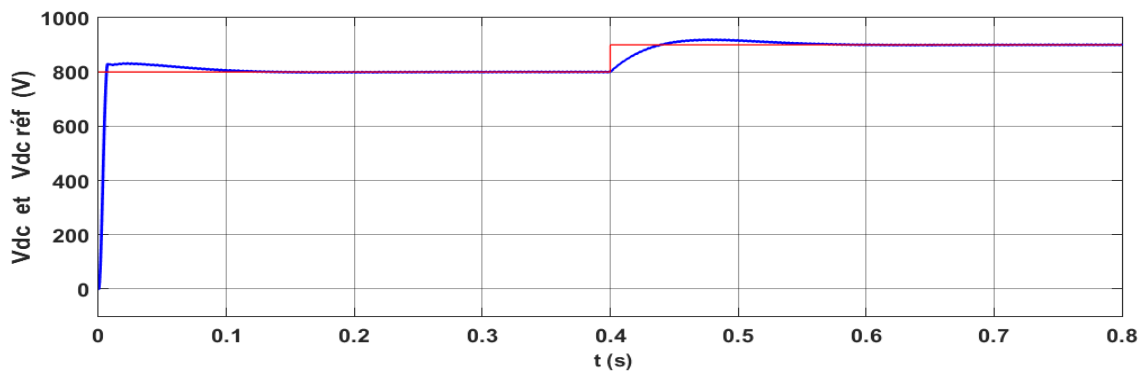


Figure 3. 33 : Variation de la tension de référence de 800V à 900V.

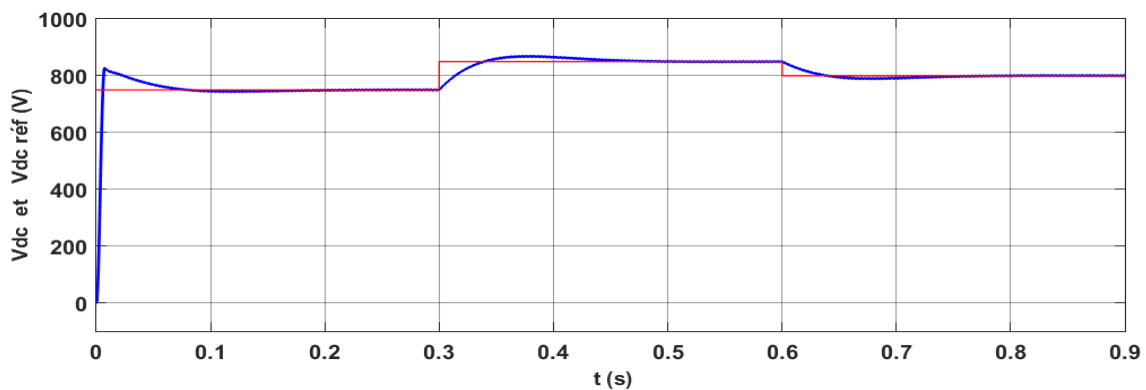


Figure 3. 34 : Variation de la tension de référence de 750V à 850V ensuite de 850V à 800V.

Dans la figure 3.33 on a augmenté la tension de référence de 800V à 900V à l'instant $t=0.4s$, la V_{dc} suit parfaitement sa référence au régime permanent. Dans la figure 3.34 nous avons varié deux fois la tension de référence : de 750V à 850V puis on revient à 800V. Ces deux tests ont prouvé la performance du régulateur et sa robustesse, puisqu'il régule quel que soit les variations extérieures (référence ou charge).

3.3.6. Effet du régulateur de courant sur l'amélioration du THD

3.3.6.1. Cas de commande de l'onduleur par hystérésis

Nous avons vu ci-dessus que plus la bande d'hystérésis est réduite plus la commande est précise et donc l'onduleur régénère bien le courant de référence. Dans les tests suivants nous ferons deux essais, avec et son régulateur de courant, où nous varierons la largeur de la bande d'hystérésis dans les deux cas et voir l'influence sur le THD du courant filtré.

A. Sans régulateur de courant

Le test est fait pour deux valeurs de largeur de bande d'hystérésis :

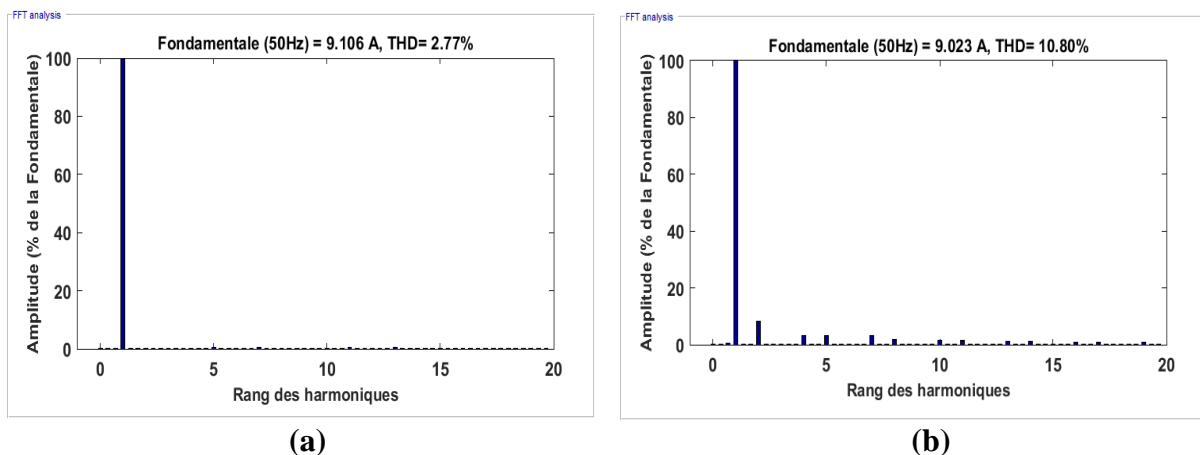


Figure 3.35 : (a) représentation spectrale pour une largeur de bande d'hystérésis de 0,002.
(b) représentation spectrale pour une largeur de bande d'hystérésis de 1.

B. Avec régulateur de courant

Le même test est fait pour les mêmes valeurs de largeur d'impulsion :

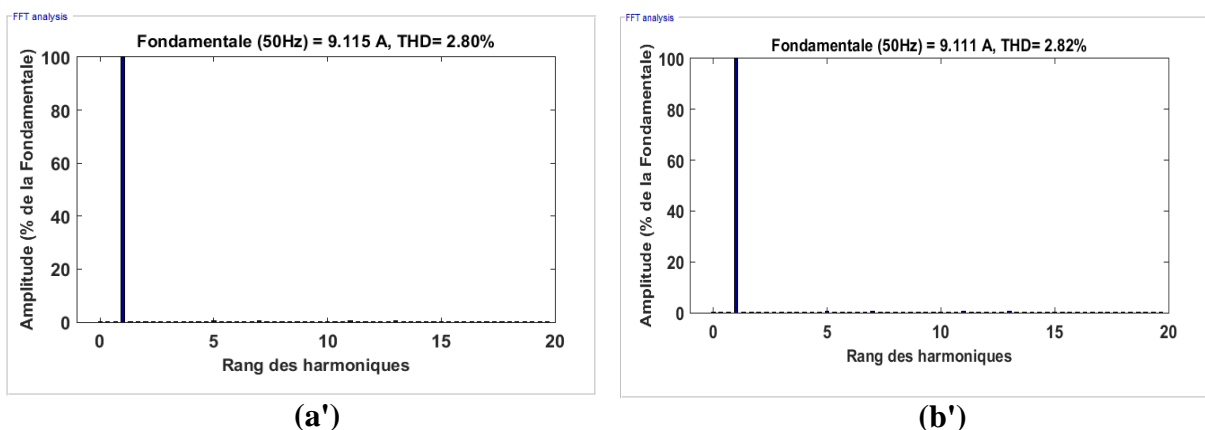


Figure 3.36 : (a') représentation spectrale pour une largeur de bande d'hystérésis de 0,002
(b') représentation spectrale pour une largeur de bande d'hystérésis de 1.

La figure 3.35 : absence du régulateur de courant avec la commande hystérésis, il est remarquable que plus la bande hystérésis est large le THD est mauvais, mais en ajoutant le

régulateur de courant dans la figure 3.36, le THD est dans la norme et le même pour les deux valeurs de largeur de bande hystérésis.

3.3.6.2. Cas de commande de l'onduleur par MLI

Dans la commande à MLI plus la fréquence de la porteuse est importante plus l'onduleur génère un courant qui suit mieux sa référence et donc une meilleure compensation et un meilleur THD. On refait les mêmes tests précédents avec la commande MLI.

A. Sans régulateur de courant

Le test est fait pour deux valeurs de fréquence de porteuse :

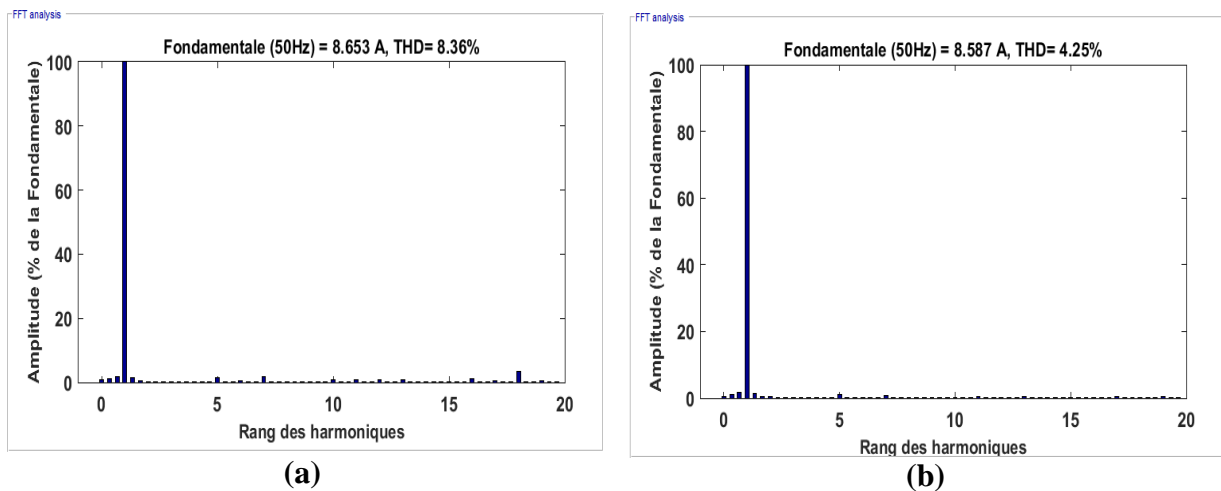


Figure 3. 37 : (a) représentation spectrale pour une fréquence de porteuse de 1000 Hz
(b) représentation spectrale pour une fréquence de porteuse de 12000 Hz

B. Avec régulateur de courant

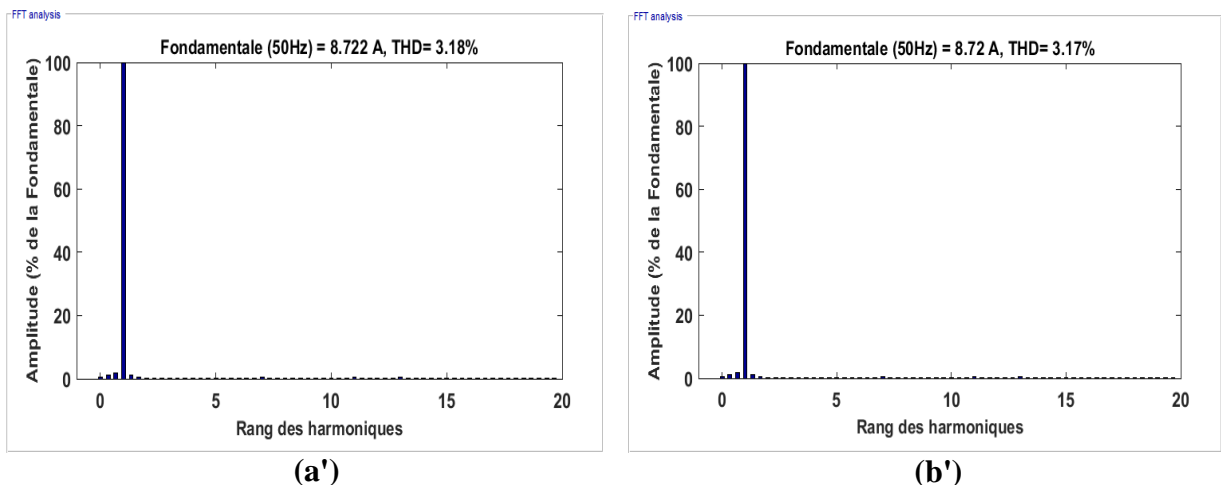


Figure 3. 38 : (a') représentation spectrale pour une fréquence de porteuse de 1000 Hz
(b') représentation spectrale pour une fréquence de porteuse de 12000 Hz

La figure 3.37 : régulateur de courant avec la commande MLI, il est clair que plus la fréquence de la porteuse est grande plus le THD est meilleur, mais en ajoutant un régulateur de courant dans la figure 3.38, Le THD est dans la norme et presque le même pour les deux fréquences.

Comme cité dans la partie modélisation, sans régulateur de courant, l'erreur entre les courants harmoniques de référence et le courant reproduit par l'onduleur, sera perturbée par des harmoniques causées par les variations aléatoires des fréquences de commutation des interrupteurs. En ajoutant le régulateur de courant, la commande est plus performante, et le THD s'améliore.

3.3.7. Compensation de l'énergie réactive

En plus de la compensation des courants harmoniques, le filtre actif parallèle que nous avons étudié compense aussi l'énergie réactive, en la prenant en compte dans le calcul des courants de référence. Si on enlève le terme de puissance réactive ($\bar{q} + \tilde{q}$) de l'équation 3.13 de la partie précédente, le filtre compensera seulement les courants harmoniques.

La figure 3.39 (a) est prise avant la mise en marche du filtre, la puissance réactive est élevée : 187,5VAR, et la figure 3.39 (b) est prise après la mise en marche du filtre, on remarque que la puissance réactive a baissé jusqu'à 3,904 VAR.

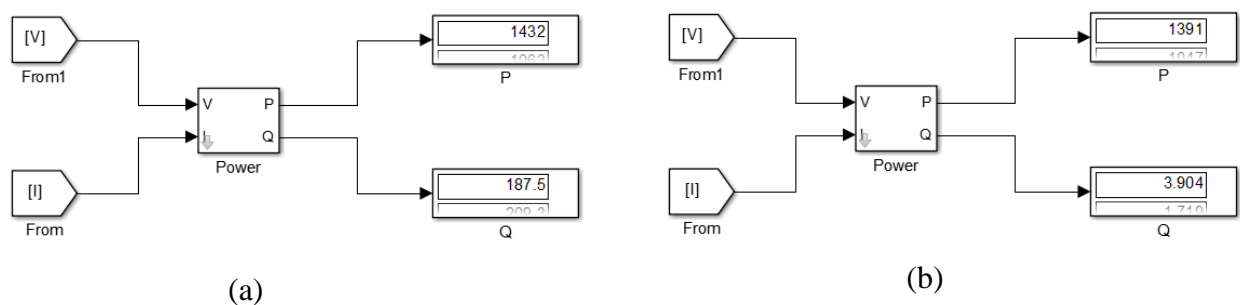


Figure 3. 39 : (a) mesure des puissances avant filtrage.
(b) mesure des puissances après filtrage.

3.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié le filtre actif parallèle et son principe de suppression des harmoniques en temps réel basé sur l'identification des courants perturbateurs avec la méthode des puissances instantanée. Nous avons modélisé et dimensionné les deux parties, puissance et commande, du filtre, et implanté le modèle sous Simulink de Matlab.

À partir des résultats de simulation obtenus ci-dessus, nous concluons que le filtre actif parallèle dépollue efficacement le réseau des harmoniques de courant générés par différentes charges non linéaires. Le filtre s'est adapté avec différentes charges et a réussi à diminuer le taux de distorsion harmoniques à des valeurs très acceptables. Il a montré une efficacité et stabilité vis-à-vis la variation brusque de la charge et une robustesse satisfaisante dans la régulation de la tension continue. Et malgré que le filtre étudié ne considère que les trois phases (réseau à trois files), il a réussi à diminuer le taux de distorsion causé par une charge déséquilibrée.

En ajoutant le régulateur du courant, le THD est encore meilleur car ce dernier réduit les perturbations causées par la commutation des interrupteurs. En plus de la dépollution harmonique, il a réussi aussi à compenser l'énergie réactive dans le réseau et rapprocher ainsi le facteur de puissance à l'unité.

Conclusion générale

Conclusion générale

De nos jours, l'électronique de puissance représente une part grandissante de la charge industrielle et domestique. Ses dispositifs injectent sur le réseau des courants harmoniques qui déforment l'allure sinusoïdale du courant au réseau et qui, multipliés par l'impédance du réseau, provoquent des tensions harmoniques dangereuses si la charge déformante est puissante, ce qui augmente les pertes et dégrade la qualité de l'énergie électrique. Cela nécessite alors l'apport de solutions palliatives à ces perturbations par la mise en œuvre des filtres passifs, actifs ou encore hybrides.

Le travail présenté dans ce mémoire est une contribution à l'étude d'un filtre actif parallèle et sa simulation sous le logiciel Simulink de Matlab. C'est un dépollueur dont le principe de fonctionnement est d'identifier les courants harmoniques du réseau ainsi que la puissance réactive, et reproduire leurs inverses à l'aide d'un onduleur, et les injecter au réseau par la suite afin d'éliminer les harmoniques parasites. Nous nous sommes intéressés dans le premier chapitre à la représentation des différentes perturbations qui peuvent atteindre une tension ou un courant dans un réseau électrique tout en abordant les différentes caractéristiques d'un signal et les normes internationales qui doivent être respectées. Le deuxième chapitre a été entièrement dédié à l'évocation des différentes solutions et principes de dépollution qui existent et qui sont en cours de développement. Le troisième chapitre a été consacré à l'étude du filtre actif parallèle avec ses différentes parties (puissance et commande) et le dimensionnement des différents composants en établissant par la suite une simulation et obtenir des résultats satisfaisants et comparé entre différents cas de dépollution.

Le but de compensation des courants harmoniques et de la puissance réactive en temps réel a été atteint, et avec le développement technologique et l'intégration de l'informatique et d'intelligence artificielle dans cette voie, les performances de filtrage et d'adaptation seront encore meilleures. Un tel pas encourage l'utilisation d'une électricité à la fois efficace et d'origine propre, et intégrer ainsi sans crainte de dégradation de la qualité d'énergie, les énergies renouvelables dans un réseau en bonnes conditions techniques, économiques et sécuritaires et favorisera ainsi la mise en œuvre du programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique adopté non seulement sur le territoire national mais aussi mondiale.

Annexe

Annexe

Pour le dimensionnement de la capacité du condensateur qui alimente le filtre, nous avons utilisé le raisonnement du calcul du rapport des puissances apparentes de la thèse de Mr. Mohammed MAGHROUI [23] :

Le rapport des puissances apparentes $\frac{S_{filtre}}{S_{charge}}$ du filtre actif parallèle par rapport à celle de la charge non linéaire est donné par la relation suivante :

$$\frac{S_{filtre}}{S_{charge}} = \frac{\sqrt{(3.V_s.I_h)^2 + (3.V_s.I_{fond} \cdot \sin(\alpha))^2}}{3.V_s.I_{ch}} = \frac{\sqrt{Q_{ch}^2 + D_{ch}^2}}{3.V_s.I_{ch}} \quad (A.1)$$

Cette dernière relation peut également s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{S_{filtre}}{S_{charge}} = \cos(\alpha) \cdot \sqrt{1 - \frac{9}{\pi^2} \cos^2(\alpha)} \quad (A.2)$$

Pour un angle d'amorçage $\alpha = 0$ c'est-à-dire le fonctionnement en redresseur a diode, on trouve :

$$\frac{S_{filtre}}{S_{charge}} = \sqrt{1 - \frac{9}{\pi^2}} = 0,2968 \quad (A.3)$$

- La puissance apparente de la charge est :

$$S_{charge} = \sqrt{P_{ch}^2 + Q_{ch}^2 + D_{ch}^2} \quad (A.4)$$

Avec P la puissance active, Q la réactive et D la déformante.

- La puissance apparente du filtre est :

$$S_{filtre} = \sqrt{Q_{ch}^2 + D_{ch}^2} \quad (A.5)$$

Car le filtre ne compense que la puissance réactive Q et celle des harmoniques D.

Donc à partir des équations (A.3), (A.4), (A.5) on obtient :

$$\sqrt{Q_{ch}^2 + D_{ch}^2} = 0.3036 P_{charge} \quad (A.6)$$

(A.6) représente la qualité de puissance que doit fournir l'onduleur. Le condensateur doit donc fournir une variation d'énergie supérieure ou égale à la variation d'énergie fournie par l'onduleur :

$$\Delta W \geq 0.3036 P_{charge} \Delta T \quad (A.7)$$

Avec la période des ondulations :

$$\Delta T = \frac{1}{6 \times f_{réseau}} = \frac{1}{6 \times 50}$$

L'expression de la variation d'énergie dans le condensateur est la suivante :

$$\begin{aligned}\Delta W &= W_{finale} - W_{initiale} \\ \Delta W &= \frac{1}{2} C_{dc} V_{dc\ max}^2 - \frac{1}{2} C_{dc} V_{dc\ min}^2\end{aligned}\quad (A.6)$$

D'après (A.5) et (A.6) :

$$C_{dc} \geq \frac{2 \times 0.3036 \times P_{charge}}{6 \times f_{réseau} \times (V_{dc\ max}^2 - V_{dc\ min}^2)}\quad (A.7)$$

Nous avons fixé l'ondulation à $\Delta V_{dc} = 2\% V_{dc}$ ce qui fait :

- $V_{dc\ max} = V_{dc} + \frac{\Delta V_{dc}}{2}$
- $V_{dc\ min} = V_{dc} - \frac{\Delta V_{dc}}{2}$

Pour l'application numérique, nous avons :

- $f_{réseau} = 50\ Hz$
- $P_{charge} = 3 \times V_{charge} \times I_{charge} \times \cos \varphi = 6318\ Watt$
- $V_{dc} = 800\ V$

$$C_{dc} = \frac{2 \times 0,3036 \times 6318}{6 \times 50 \times (808^2 - 792^2)} = 499\ \mu F$$

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Éric Félice, Philippe Révilla, « Qualité Des Réseaux Électriques Et Efficacité Énergétique », DUNOD, 2009.
- [2] Soumia Larabiet JumaShabani Amani, « Etude Et Simulation D'une Commande D'un Filtre Actif De Puissance Basé Sur Les Ondelettes », Mémoire de master, Université Abou BekrBelkaid de Tlemcen, 14-jui-2017.
- [3] <http://blog.formatis.pro/map607> « Formation, MAP607 », consulté le 23-02-2019.
- [4] VanyaIgnatova, « Méthodes D'analyse De La Qualité De L'énergie Électrique. Application Aux Creux De Tension Et À La Pollution Harmonique », thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, France, 20 Octobre 2006.
- [5] Khalid Ramzi, « Suivi De La Fréquence Du Réseau Électrique À L'aide D'une Carte Arduino », Thèse de Master, Université des frères Mentouri Constantine faculté des sciences de l'ingénieur département d'électrotechnique, 2015.
- [6] AllahoumRabie, « Contribution À L'étude Du Filtre Actif Parallèle De Puissance À Trois Niveaux », Magister en Électrotechnique, Université d'El-Oued Faculté des Sciences et Technologie Filière de génie électrique, 2012.
- [7] P. Ferracci, « La Qualité De L'énergie Électrique », Schneider Electric, cahier technique N°. 199, Octobre 2001.
- [8] C. Collombet J.M. Lupin J. Schonek, « Perturbations Harmoniques Dans Les Réseaux Pollués, Et Leur Traitement », Schneider Electric, cahier technique N° 152, Septembre 1999.
- [9] EricBettega, Jean Noël Fiorina, « Harmoniques : Convertisseurs Propres Et Compensateurs Actifs », Schneider Electric, cahier technique N°. 183, Janvier 2000.

[10] Chauvin Arnoux, « Dossier : puissance, Energie et Perturbation », Chemin Arnoux groupe. Paris, <https://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/D00TDD17.PDF>

[11] Jean-Philippe Muller, « Analyse Spectral », Juillet 2002.

[12] https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-10/harmonic-phase-sequences/?fbclid=IwAR0sn5PI4G0RQE7w9EVIMLS_cAKXRqSWrrv-0yfb-i8Z3vjyrvot4m9AnI/, consulté le 24-02-2019.

[13] CHELLI Zoubir, « Amélioration De La Qualité De L'énergie Électrique Par Un Filtre Actif D'harmonique », Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba, Année : 2015.

[14] Wilfried Frelin, « Impact De La Pollution Harmonique Sur Les Matériels De Réseau », Energie électrique, Université Paris Sud - Paris XI, 2009. Français.

[15] Schneider électrique, « Élimination Des Harmoniques Dans Les Installations », Edition : Septembre 2015.

[16] CEI 61000-2-2 Compatibilité électromagnétique (CEM) - Partie 2-2 : Environnement - Niveaux de compatibilité pour les perturbations conduites à basse fréquence et la transmission des signaux sur les réseaux publics d'alimentation basse tension. Deuxième édition 2002-03.

[17] EN 50160 Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution.

[18] CEI 61000-3-2 Compatibilité électromagnétique (CEM) –Partie 3-2: Limites – Limites pour les émissions de courant harmonique (Courant appelé par les appareils $\leq 16A$ par phase), deuxième édition 2000-08.

[19] CEI 61000-3-4 Compatibilité électromagnétique (CEM) - Partie 3-4 : Limites – Limitation des émissions de courants harmoniques dans les réseaux basse tension pour les matériels ayant un courant assigné supérieur à 16 A, première édition 1998-10.

[20] CEI 61000-2-4 : IEC 61000-2-4 Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 2-4 : Environnement – Niveaux de compatibilité dans les installations industrielles pour les perturbations conduites à basse fréquence. Deuxième édition 2002-06.

[21] <https://slideplayer.com/slide/6379568/>, consulté le 03-03-2019.

[22] Zellouma Laid, « Filtrage Actif Parallèle Des Harmoniques Du Courant Générés Par Un Pont Redresseur Triphasé Non Commandé », Mémoire de Magister, Université de Badji Mokhtar, Annaba, 2006.

[23] Magraoui Mohamed, « Validation De Techniques De Commande D'unfiltre Actif Parallèle », Mémoire pour l'obtention de lamaîtrise en génie électrique, École de Technologie SupérieureUniversité du Québec, Montréal, le 17 septembre 2007.

[24] AlaliMohamad AlaaEddin, « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension (Automatisation des systèmes de puissance électriques) », Thèse de Doctorat, École Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur, 2 Septembre 2002.

[25] MidouneNasreddine Et Hika El-Mehdi, « Étude Par Simulation Des Effets Des Harmoniques Et De La Puissance Réactive Sur Le Réseau Électrique », Mémoire de Master, UniversitéKasdiMerbah Ouargla, 31/05/2016.

[26] Amaia Lopez de Heredia Bermeo, « Commandes Avancées Des Systèmes Dédies A L'amélioration Dela Qualité De L'Energie : De La Basse Tension A La Montée Entension », Energie électrique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2006. Français. <tel-00162092>.

[27] Benyettou Lotfi Et Amroune Mourad, « Commande Et Diagnostic D'un Filtre Actif Parallèle », mémoire de Master, Universite Mohamed Boudiaf de M'sila, 2015/2016.

[28] M.El-Habrouk, M.K.Darwish and P.Mehta. « Active power filters: Areview », IEEEProceedings-Electric Power Applications, 2000, vol. 147, no 5.

[29] HideakiFujita, Member, IEEE, and HirofumiAkagi, «The Unified Power QualityConditioner: The Integration of Series- and Shunt-Active Filters », IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 13, NO. 2, MARCH 1998.

[30] Da Silva, Sa Oliveira, Donoso-Garcia, P., Cortizo, Porffrio C., et al. A line interactive UPS system implementation with series-parallel active power-line conditioning for three-

phase, four-wire systems. International journal of electrical power & energy systems, 2004, vol. 26, no 6, p. 399-411.

[31] Yousfi Abdelkader, « Amélioration De La Qualité D'énergie Électrique En Utilisant Un Onduleur De Tension À Cinq Niveaux », Mémoire de Magister, Université Hassiba Benbouali Chlef, 2008.

[32] Abdelfettah Boussaid, « Filtrage Actif Des Harmoniques Dans Les Réseaux Électriques. Contribution À L'amélioration De L'énergie Électrique », Thèse de Doctorat, Université Des Frères Mentouri - Constantine, 05-01-2017.

[33] Nicolas Patin, « Power Electronics Applied to Industrial Systems and Transports », Volume 2 : Power Converters and their Control, 2015.

[34] Omeiri Amar, « Simulation D'un Filtre Actif Parallèle De Puissance Pour La Compensation Des Harmoniques De Courant », Thèse de Doctorat, Université de Badj Mokhtar, Annaba, 2007.

[35] Elferd Hamza et Zegaar Mourad, « Fonctionnement En Mode Dégrade D'un Onduleur Multi Niveaux Application Au Filtre Actif Parallèle », Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2016 /2017.

[36] Ghadbane Ismail, « Commande d'un Filtre Actif Triphasé Parallèle Par Différents Régulateurs », Mémoire de Magistère, Université Mohamed Kheider - Biskra, 24 /02/2011.

[37] Benhabib Mohamed Choukri, « Contribution À L'étude Des Différentes Topologies Et Commandes Des Filtres Actifs Parallèles À Structure Tension : Modélisation, Simulation Et Validation Expérimentale De La Commande », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1/14/2004.

[38] Ion Etxeberria-Otadui. Sur les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique – Application à la qualité de l'énergie. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2003. Français. <tel-00382761>.

[39] Ould Abdeslam, D., Wira, P., Flieller, D., and Mercklé, J. « Une Nouvelle Approche Neuromimétique Pour L'identification Et La Compensation Des Harmoniques Dans Les Systèmes Électriques. » International Conference on Electrical Engineering and its Applications, Sidi Bel-Abbes, Algeria, 2006.

[40] João L. Afonso, M. J. Sepúlveda Freitas, and Júlio S. Martins, « p-q Theory Power Components Calculations », ISIE'2003 - IEEE International Symposium on Industrial Electronics Rio de Janeiro, Brasil, 9-11 Junho de 2003, ISBN: 0-7803-7912-8.

[41] Hirofumi Akagi, Edson Hirokazu Watanabe, Mauricio Aredes, « Instantaneous Power Theory And Applications To Power Conditioning », WILEY-INTERSCIENCE, 2007.

[42] Boucif Abdelmalek, « Filtrage actif d'un réseau Électrique », Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 04 Juin 2014.

[43] Antoine Hanna Nohra, « Commande De Filtres Actifs Parallèles Sur Un Réseau Fortement Perturbé », Thèse de Doctorat, Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Beyrouth (ESIB),
30 janvier 201

ملخص

تتعرض الشبكة الكهربائية للكثير من الاضطرابات، بما في ذلك التوافقيات، والتي تثير قلقاً متزايداً لمنتجي، موزعي ومستخدمي الطاقة الكهربائية، خاصة مع تزايد استخدام الحمولات غير الخطية.

هذا العمل يقدم دراسة لأحد حلول لمشاكل التوافقيات، المرشح فعال متوازي. يحدد هذا الجهاز التيارات المزعجة ويعوضها في الوقت الفعلي، وذلك بفضل خوارزمية لتحديد الاستطاعتين اللحظيتين الحقيقية والخيالية مانحة تياراً مرجعياً، لإنتاج هذا التيار نستعمل عاكساً كهربائياً نتحكم به باستخدام التخلفية وتسمى أيضاً الهستيرياس، أو بطريقة تعديل عرض النبضة، ويغذى عن طريق مكثفة التوتر بين طرفيها ثابت بفضل متحكم متناسب ومتكامل يضمن استمرارية التشغيل و جودة تعويض التوافقيات.

معدلات التشويه التوافقية المتحصل عليها قبل وبعد التشريح أثبتت كفاءة المرشح الفعال المتوازي.

Résumé

Le réseau électrique est sujet à de nombreuses perturbations, y compris les harmoniques qui présentent de plus en plus une véritable préoccupation aux producteurs, distributeurs et utilisateurs de l'énergie électrique, surtout avec l'accroissement de l'utilisation des charges non linéaires.

Ce travail est dédié à l'étude d'une des solutions palliatives aux problèmes des harmoniques, le filtre actif parallèle. Ce dispositif, identifie les courants perturbateurs et les compense en temps réel, grâce à un algorithme d'identification des puissances réelles et imaginaires instantanée donnant naissance à un courant de référence qui, pour le régénérer, on utilise un onduleur commandé par Hystérésis ou MLI, alimenté par un condensateur dont la tension à ses bornes est maintenue constante grâce à un régulateur PI, assurant ainsi la continuité d'alimentation et la qualité de compensation des courants harmoniques.

L'efficacité du filtre a été prouvée par les taux de distorsion harmonique obtenus avant et après filtrage.

Abstract

The electrical network is subject to many disruptions, including harmonics, which are increasingly of great concern to producers, distributors and users of electrical energy, especially with the increasing use of non-linear loads.

This work is dedicated to the study of one of the palliative solutions to the problems of harmonics, the Parallel Active Filter. This device identifies the disturbing currents and compensates them in real time, thanks to an algorithm of identification of the real and imaginary instantaneous power giving rise to a reference current, to regenerate this reference we use an inverter controlled by Hysteresis or PWM, and powered by a capacitor whose voltage is kept constant thanks to a PI controller, ensuring continuity of supply, and quality of compensation of harmonic currents.

The efficiency of the filter has been proven by the harmonic distortion rates obtained before and after filtering.