



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique
Spécialité : Commande Electrique

Mémoire de Fin d'Etude

En vue d'obtention du diplôme Master en Electrotechnique

Option :

Commande Electrique.

Thème

**Commande par mode glissant d'un filtre actif
multi niveaux de type T**

Réalisé par :

M^{elle} LAMARI Nassima.

M^{elle} OUARIBI Dyhia.

Encadré par :

M^r HAMOUDI Farid

Année Universitaire : 2020/2021



Remerciements

Tout d'abord, on tient à remercier le bon DIEU le tout Puissant de nous avoir donné la force, la santé et le courage de mener à bien ce modeste travail, également on remercie infiniment nos chers parents pour leurs patiences et leurs sacrifices pour notre réussite.

Nous tenons ainsi à exprimer nos vifs remerciements et notre profonde gratitude à notre encadreur Monsieur HAMOUDI Farid pour ses conseils précieux, ses orientations et son aide qu'il nous a accordé pour mener ce travail à terme.

Nous remercions également l'ensemble du jury d'avoir accepté d'examiner ce travail.

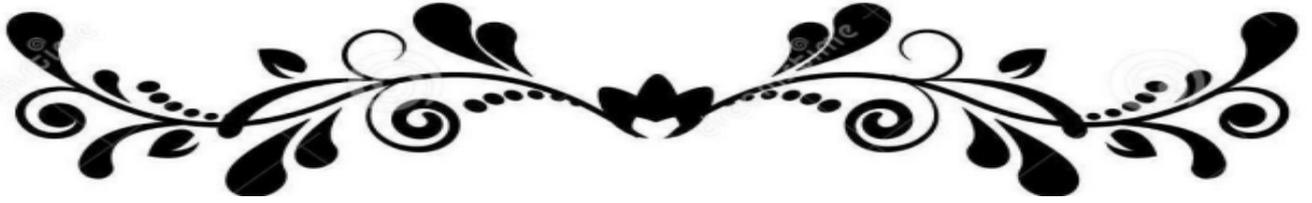
Nos remerciements les plus sincères vont à tous les professeurs du département Génie Electrique de l'université de Bejaïa qui ont été à notre disposition à tout moment pour la réussite et la réalisation de notre travail.

On tient à remercier tous ceux et celles qui ont contribué à finaliser ce modeste travail.

M^{lle} OUARJBI Dyhia.

M^{lle} LAMARI Nassima.





Dédicaces

Je dédie ce travail à :

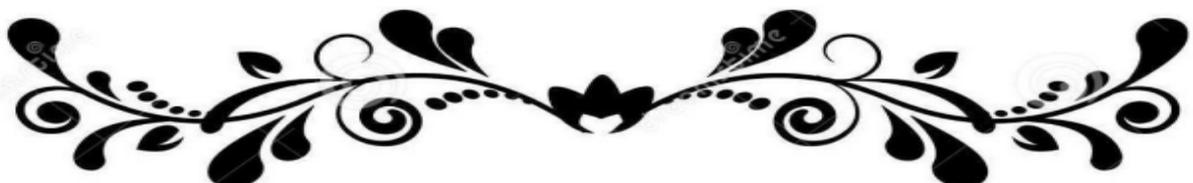
*Mes chers parents **Mahmoud** et **Hakima** qui ont tout fait pour ma réussite, par leurs amours, sacrifices et précieux conseils.*

*Mon cher frère **Massinissa** et mes chères sœurs **Tinhinane** et **Sonia** qui m'encouragent souvent. Et toute ma famille du petit au grand.*

*Mes amis principalement **Yamina**, **Nora**, **Lyna**, **Lyes**, **Dihia**, **Wahiba**, **Bilel**, **Mélissa**, **Sihem**, **Houda** et tout ceux qui m'ont aidé et encouragé pour réaliser ce travail.*

*Ma chère amie et collègue **Nassima** qui a été patiente avec moi durant notre travail.*

Dyhia





Dédicaces

Je dédie ce travail à :

*Mes chers parents **Ahmed** et **Nadira** qui ont tout fait pour ma réussite, par leurs amours, sacrifices et précieux conseils.*

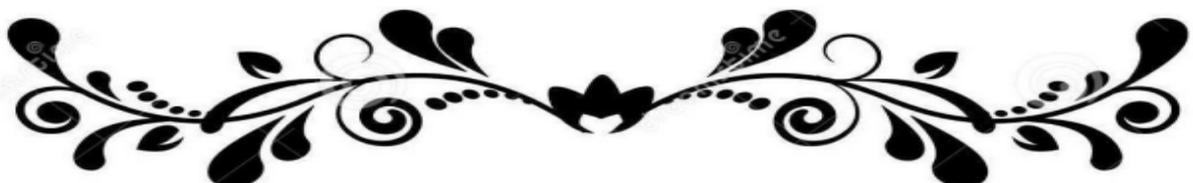
Mes chères sœurs qui m'encouragent souvent. Et toute ma famille du petit au grand.

*Ma belle famille : mon mari **Hakim**, ma belle-mère **Louiza** et mes beaux-frères et mes belles-sœurs.*

Tous mes amies et tout ceux qui m'ont aidé et encouragé pour réalisé ce travail.

*Ma chère amie et collègue **Dyfia** qui a été patiente avec moi durant notre travail.*

Nassima



Liste des symboles

Liste des symboles

h	Rang de l'harmonique.
S_h	Taux de distorsion harmonique.
$\cos\theta$	Déphasage.
θ	Déphasage entre le courant fondamental et la tension.
S	Puissance apparente.
P	Puissance active.
Q	Puissance réactive.
D	Puissance déformante.
FP	Facteur de puissance.
i_s	Courant de la source.
i_{ch}	Courant absorbé par la charge.
V_{inj}	Tension injectée par le FAS.
V_{dc}	Tension du bus continu.
V_{dc}^*	Tension de référence du bus continu.
C_{dc}	Condensateur de stockage.
T	Interrupteur.
L_c	Filtre de raccordement.
L_f	Inductance du filtre de sortie.
R_f	Résistance du filtre de sortie.
C_f	Capacité du filtre de sortie.
L_s	Inductance de la ligne.
R_s	Résistance de la ligne.
ε	Facteur d'amortissement.
ω_h	Pulsation de l'harmonique de rang h .

I_h	Harmonique de rang h.
$i_{réf}$	Courant de référence.
i_f	Courant injecté par le filtre.
v_α, v_β	Tensions dans le repère (α, β) .
i_α, i_β	Courant dans le repère (α, β) .
p, q et p_0	Puissance réelle, imaginaire et homopolaire.
\bar{p}, \bar{q} et \bar{p}_0	Puissances continues.
\tilde{p}, \tilde{q} et \tilde{p}_0	Puissances alternatives.
θ_d	Phase instantanée de la tension directe fondamentale.
$\hat{\theta}_d$	Angle de rotation instantanée.
$\hat{\omega}_d$	Pulsation estimée par le régulateur PI.
v_d	Angle de phase de la tension.
v_d, v_q	Projections des tensions instantanées sur les axes tournants d et q.
$\varepsilon_a, \varepsilon_b$ et ε_c	Signaux d'erreurs.
m	Indice de modulation.
r	Taux de modulation.
f_p	Signal de modulation triangulaire.
f_r	Signal de référence sinusoïdale.
K_i	Coefficient d'action intégrale.
K_p	Coefficient d'action proportionnel.

Liste des abréviations

Liste des abréviations

AC	Courant alternatif.
DC	Courant continu.
THD	Taux de Distorsion Harmonique.
FAP	Filtre Actif Parallèle.
FAS	Filtre Actif Série.
UPQC	Unified Power Quality Conditioner.
FP	Facteur de Puissance.
CEI	Commission Electrotechnique Internationale.
IGBT	Transistor bipolaire à grille isolée.
FPB	Filtre passe bas.
PLL	Boucle à verrouillage de phase.
PI	Correcteur Proportionnel Intégral.
MLI	Modulation de la largeur d'impulsion.
PWM	Pulse Width Modulation.
SVPWM	Space Vector Pulse Width Modulation.

Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1	Décomposition d'un signal périodique.....	2
Figure I.2	Structure d'un filtre actif parallèle.....	6
Figure I.3	Structure d'un filtre actif série FAS.....	7
Figure I.4	Structure d'un filtre hybride (parallèle série).....	7
Figure II.1	générale d'un filtre actif de type T.....	11
Figure II.2	Structure générale d'un onduleur trois niveaux de type T.....	14
Figure II.3	Etats de commutations possibles de l'onduleur trois niveaux de type T.....	15
Figure II.4	Schéma électrique du réseau triphasé.....	19
Figure II.5	Modèle de la charge non linéaire équilibrée.....	20
Figure II.6	Algorithme de la méthode des puissances instantanées pour l'extraction des courants harmoniques.....	21
Figure II.7	Schéma du filtre de puissance utilisé pour l'extraction des composantes fondamentales (p,q).....	23
Figure II.8	Schéma du principe d'une PLL classique.....	24
Figure II.9	Boucle de régulation de la pulsation angulaire.....	25
Figure II.10	Principe de la commande par MLI.....	26
Figure II.11	Signal de commutation de la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	27
Figure II.12	Boucle de régulation de la tension continue.....	28
Figure III.1	Boucle de régulation du courant.....	28
Figure III.2	Schéma de simulation.....	30
Figure III.3	Courants de source avant filtrage.....	31
Figure III.4	Analyse spectrale du courant de source (phase a).....	31
Figure III.5	Analyse spectrale du courant de source (phase b).....	32
Figure III.6	Analyse spectrale du courant de source (phase c).....	32
Figure III.7	Courants de référence injectés.....	33
Figure III.8	Tension V_{dc} du bus continu.....	34
Figure III.9	Courants de source après filtrage.....	34
Figure III.10	Analyse spectrale du courant de source (phase a).....	35
Figure III.11	Analyse spectrale du courant de source (phase b).....	35
Figure III.12	Analyse spectrale du courant de source (phase c).....	35
Figure IV.1	Système de réglage à structure variable avec changement de la structure par commutation.....	37
Figure IV.2	Structure du régulateur du super-twisting.....	39
Figure IV.3	Schéma de simulation.....	40
Figure IV.4	Courants de source avant filtrage.....	41
Figure IV.5	Analyse spectrale du courant de source (phase a).....	41
Figure IV.6	Analyse spectrale du courant de source (phase b).....	42
Figure IV.7	Analyse spectrale du courant de source (phase c).....	42
Figure IV.8	Courants de référence injectés.....	43

Figure IV.9	Tension V_{dc} du bus continu.....	44
Figure IV.10	Courants de source après filtrage.....	44
Figure IV.11	Analyse spectrale du courant de source (phase a).....	45
Figure IV.12	Analyse spectrale du courant de source (phase b).....	45
Figure IV.13	Analyse spectrale du courant de source (phase c).....	45

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau II.1	Tensions générées par l'onduleur.....	15
---------------------	---------------------------------------	----

Table des matières

Remerciements**Dédicaces****Liste des symboles****Liste des abréviations****Liste des figures****Liste des tableaux****Table des matières**

Introduction générale..... 1

Chapitre I

Solutions de dépollution harmonique par filtrage actif

I.1	Introduction.....	2
I.2	Perturbations dans les réseaux électriques.....	2
I.2.1	Perturbation électrique.....	2
I.2.2	Perturbation harmonique.....	2
I.2.3	Origine des harmoniques.....	3
I.2.4	Effets des harmoniques.....	3
I.2.5	Caractérisation des perturbations harmoniques.....	3
I.3	Solutions de dépollution harmonique.....	5
I.3.1	Méthodes classiques, les solutions traditionnelles.....	5
I.3.2	Mes méthodes modernes (Le filtrage actif).....	5
I.3.3	Filtrage actif.....	5
I.3.4	Filtrage hybride actifs et passifs.....	8
I.4	Principe et caractéristique.....	8
I.5	Avantage des filtres harmoniques.....	9
I.6	Conclusion.....	9

Chapitre II

Modélisation d'un filtre actif trois niveaux de type T

II.1	Introduction.....	10
II.2	Etude de poste de travail.....	10
II.3	Etude de document.....	10
II.4	Etude des procédures.....	10
II.5	Filtre actif de type T.....	11
II.5.1	Principe de fonctionnement.....	11
II.5.2	Structure générale.....	11
II.6	Système de stockage d'énergie.....	12
II.7	Filtre de couplage (sortie).....	13
II.8	Structure et topologie de l'onduleur trois niveaux de type T.....	14
II.8.1	Structure générale.....	14
II.8.2	Topologie.....	15
II.8.3	États de commutations possibles de l'onduleur.....	15
II.9	Modélisation de l'onduleur.....	16
II.10	Modélisation du filtre actif.....	17

II.10.1 Modèle mathématique du filtre actif parallèle dans le repère triphasé (abc)...	17
II.10.1 Modèle du filtre actif dans le repère synchrone (de Park).....	18
II.10.2 Modèle du filtre actif dans le repère stationnaire.....	18
II.11 Modélisation du réseau électrique.....	19
II.12 Modélisation de la charge polluante.....	20
II.13 Algorithme d'indentification des courants harmoniques.....	21
II.14 Principe d'une PLL.....	24
II.15 Commande de l'onduleur.....	26
II.15.1 Commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI).....	26
II.16 Régulation de la tension continue.....	27
II.17 Conclusion.....	28

Chapitre III

Commande du filtre actif : Commande par régulateur linéaire de type proportionnel intégral

III.1 Introduction.....	29
III.2 Contrôle du courant du filtre par un régulateur PI.....	29
III.3 Simulation et interprétation des résultats.....	30
III.3.1 Simulation avant filtrage	31
III.3.2 Simulation après filtrage.....	32
III.4 Conclusion.....	36

Chapitre IV

Commande par mode glissant : Commande par régulateur non linéaire par mode glissant

IV.1 Introduction.....	37
IV.2 Principe de la commande par mode glissant.....	37
IV.3 Commande par mode glissant d'ordre supérieur.....	38
IV.4 Commande par mode glissant d'ordre deux.....	38
IV.4.1 Exemples de commandes par modes glissants d'ordre deux.....	38
IV.4.2 Choix du régulateur.....	39
IV.5 Simulation et interprétation des résultats.....	40
IV.5.1 Simulation avant filtrage.....	41
IV.5.2 Simulation après filtrage.....	42
IV.6 Conclusion.....	46
Conclusion générale.....	47

Bibliographie

Introduction générale

Introduction générale

Ces dernières années, une forte augmentation des charges non linéaires connectées au réseau électrique on était enregistrées tel que les ordinateurs, les télécopieurs, les lampes à décharge, les fours à arc, les chargeurs de batterie et les onduleurs. L'utilisation croissante de ces charges non linéaires, a des conséquences sur le système d'alimentation électrique, elles font appelles à un courant important, déformé, non sinusoïdale du réseau de distribution. Les courants harmoniques ont des effets négatifs sur la quasi-totalité des composantes du système électrique, en créant de nouvelles contraintes diélectriques, thermiques et/ou mécaniques [1].

Pour éviter le dysfonctionnement et la destruction de ses composantes, il faut bien comprendre l'origine des perturbations et de trouver les solutions adéquates pour les éliminer. Plusieurs solutions ont été proposées pour pallier les problèmes liés aux perturbations harmoniques, tel que les filtres passifs et les filtres actifs. Ces derniers sont à ce jour les solutions avancées de dépollution les plus adéquats tants au niveau de la production que de la distribution. Leur réponse est instantanée et ils s'adaptent automatiquement aux évolutions des perturbations introduites par les charges du réseau électrique [1].

L'objectif de ce mémoire est de montrer l'efficacité du filtrage actif de type T qui permet l'adaptation à la charge aux harmoniques nécessaires, donnant une performance quasi constante et indépendante du taux de charge.

Ce mémoire comporte quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, on présentera des notions générales sur les harmoniques, leurs sources, leurs conséquences et les solutions classiques et modernes pour les compenser.
- Le deuxième chapitre sera consacré sur la modélisation du filtre actif de type T ainsi, la modélisation de l'onduleur trois niveaux.
- Le troisième chapitre illustrera la commande linéaire du filtre actif par un régulateur proportionnel intégral, et les résultats de simulation.
- Nous terminerons notre étude par la commande par mode glissant du filtre actif de type T ainsi que les résultats de simulation.

Chapitre I

*Solutions de dépollution harmonique par
filtrage actif*

I.1 Introduction

Avec l'augmentation de ces dernières années du nombre et de la puissance unitaire des charges non linéaires telles que les sources d'alimentations statiques et les entraînements électriques à vitesse variable dans les réseaux électriques, les harmoniques qu'ils génèrent deviennent de plus en plus préoccupantes, tant pour les distributeurs d'énergie que pour les consommateurs vus les effets nocifs et les coûts qu'ils engendrent. En conséquence, il est important que des solutions de dépollution harmoniques soient mises en œuvre. Parmi les solutions existantes : filtrage passif, filtrage actif [2].

I.2 Perturbations dans les réseaux électriques

I.2.1 Perturbation électrique

Pour un réseau électrique les tensions doivent être alternatives triphasées, caractérisées par les paramètres suivants : La fréquence, les amplitudes des tensions doivent être égales, une forme d'onde proche d'une sinusoïde, et les déphasages entre les phases égaux. En effet, la qualité de la tension se trouve affectée par des défauts qui se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant au moins un des quatre paramètres précédents [3].

I.2.2 Perturbation harmonique

Un harmonique est une composante sinusoïdale d'un signal périodique, de fréquence (f_{hi}) multiple de celle du signal fondamentale [4].

Le signal de rang (ordre) 1 est la composante fondamentale du signal périodique (50 Hz en Algérie). L'harmonique de rang 0 correspond à la composante directe du signal. Par ailleurs l'amplitude de chaque harmonique est inversement proportionnelle à son ordre. Donc, les premiers rangs harmoniques celles qui sont proche de la fondamentale tel que (3, 5 et 7) ont des amplitudes élevées, d'où la raison de les limiter selon les normes [3].

La figure suivante représente la décomposition d'un signal périodique.

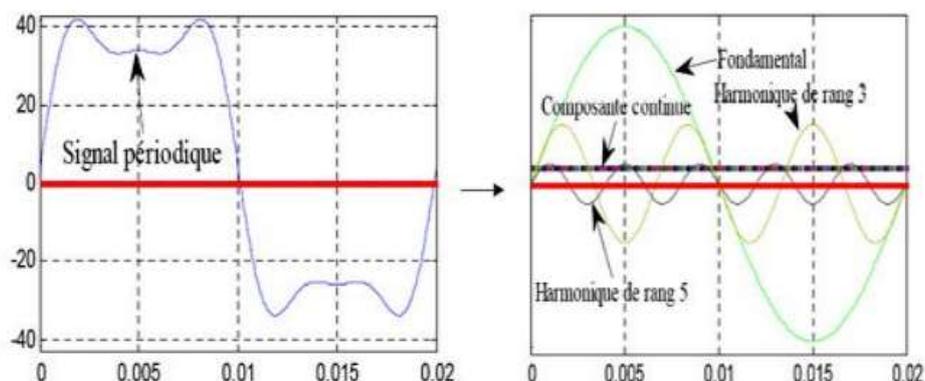


Figure I.1 : Décomposition d'un signal périodique.

Généralement le domaine fréquentiel correspondant à l'étude des harmoniques est entre le rang $h=2$ (100 Hz) et $h=50$ (2500 Hz). En effet les harmoniques de fréquences plus élevées sont fortement atténuées par l'effet de peau et par la présence des inductances de ligne. De plus, les appareils générateurs d'harmoniques ont, en grande majorité, un spectre d'émission inférieur à 2500 Hz. En outre, les interharmoniques existent entre les harmoniques [3].

I.2.3 Origine des harmoniques

Les dispositifs suivants sont des sources harmoniques :

- Les convertisseurs statiques à base de composants d'électronique (diodes, transistors,...etc) sont des générateurs de courants harmoniques, qui en conséquence le facteur de puissance. Toutefois rappelons que les charges symétriques ne génèrent pas d'harmoniques de rang pair. Et le spectre des harmoniques est décroissant dont l'harmonique de rang 3 la prépondérante pour les charges monophasées peuvent atteindre 80% du fondamental.
- Les inductances saturées (cas des transformateurs à vide soumis à une surtension permanente) ont leurs impédances dépendantes de l'amplitude du courant qui les traverse et donc provoquent des déformations de ce courant.
- Les machines tournantes génèrent des harmoniques de rangs élevés et d'amplitudes négligeables [3].

I.2.4 Effets des harmoniques

Plusieurs effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités :

- Echauffement.
- Interférence avec les réseaux de télécommunication.
- Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques.
- Risque d'excitation de résonance.

I.2.5 Caractérisation des perturbations harmoniques

Un récepteur d'énergie électrique se comporte comme une charge polluante s'il absorbe des courants non sinusoïdaux ou/et déséquilibrés ou consomme de l'énergie réactive. Les perturbations harmoniques sont caractérisées par le taux de distorsion harmonique (THD) de la tension ou du courant, par rapport à leurs ondes fondamentales respectives. Et la consommation de l'énergie réactive est évaluée par le facteur de puissance $\cos\varphi$ [5].

- **Taux de distorsion harmonique**

Le taux de distorsion est un paramètre qui définit globalement la déformation de la grandeur alternative :

$$S_h = \frac{X_h}{X_1} \quad (\text{I.1})$$

Où

X_h : Composante harmonique de rang h ;

X_1 : Composante fondamentale.

- **Taux d'harmonique global de distorsion**

Le taux d'harmonique de distorsion global (THD) définit la déformation de la grandeur alternative :

$$THD(\%) = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} X_n^2}}{X_1} \quad (\text{I.2})$$

- **Facteur de puissance**

Le facteur de puissance $\cos\varphi$ est exprimé par le rapport de la puissance active (P) sur la puissance apparente (S). Les équipements électriques sont dimensionnés, généralement, pour les valeurs nominales de la tension et du courant. Un faible facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements [5].

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2+D^2}} = \cos\varphi_1 \cos\gamma \quad (\text{I.3})$$

Où

Q : représente la puissance réactive.

D : représente la puissance déformante.

φ : Déphasage entre la puissance active (P) et la puissance apparente (S) ;

φ_1 : Déphasage entre la puissance active (P) et la puissance apparente (S1) ;

γ : Déphasage entre la puissance apparente dans le cas d'un système linéaire et celle dans le cas d'un système non-linéaire [3].

- **Résonance**

Sur les réseaux, on rencontre deux types de résonances (résonance parallèle et résonance série). La présence de résonances entraîne des contraintes supplémentaires sur certains matériels, et notamment sur les condensateurs qui peuvent alors se détériorer rapidement. Certaines précautions doivent donc être prises lors de l'installation de ces matériels, de manière à ne pas amplifier les courants et les tensions harmoniques présents sur les réseaux [4].

I.3 Solutions de dépollution harmonique

On peut regrouper les solutions visant à réduire les perturbations harmoniques en deux groupes : les solutions classiques et les solutions modernes.

I.3.1 Méthodes classiques, les solutions traditionnelles

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens [6]. Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, résistance) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation [7].

Ce filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau [8]. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti [2].

I.3.2 Méthodes modernes (Le filtrage actif)

Les solutions traditionnelles de dépollution ne répondent plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger. Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs de puissance (Active Power Filters) sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques [9]. En effet, ces solutions peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur [2].

I.3.3 Filtrage actif

Le filtrage actif date du début des années 1970 et ces familles de filtres actifs parallèles et séries réalisés à base d'onduleurs contrôlés en modulation de largeur d'impulsion (MLI) datent de 1976 et sont la solution adaptée à la compensation des tensions [2].

Le but de ces filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal [3].

Nous citerons les configurations possibles des filtres actifs

- Le filtre actif parallèle (FAP) : conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive [6].
- Le filtre actif série (FAS): conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension [6].
- La combinaison parallèle série actif : solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension [10].

- **Filtre actif parallèle FAP**

Il est appelé aussi compensateur shunt, il est connecté en parallèle sur le réseau de distribution. Il est habituellement commandé comme un générateur de courant [7].

Son principe est d'injecter dans le réseau électrique des courants harmoniques égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de telle sorte que le courant fourni par le réseau I_s soit sinusoïdale et en phase avec la tension simple correspondante. Ainsi, il empêche les courants harmoniques, réactifs et déséquilibrés de circuler à travers l'impédance du réseau. Par conséquent, Il améliore le taux de distorsion en courant et en tension [2].

La figure suivante représente un filtre actif parallèle.

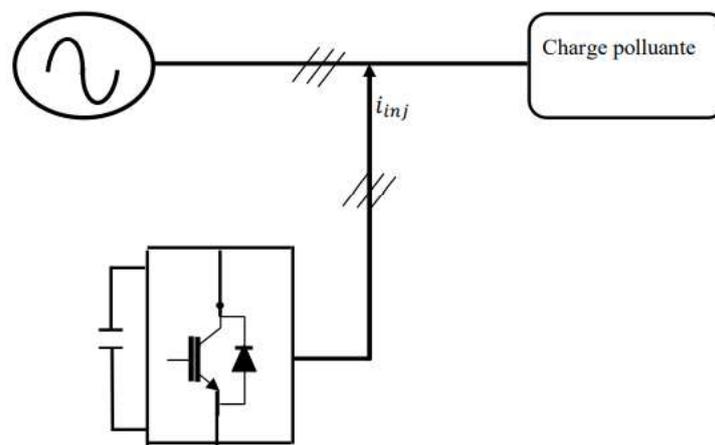


Figure I.2 : Structure d'un filtre actif parallèle.

- **Filtre actif série FAS**

Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau. Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension du réseau est une onde sinusoïdale.

Il est destiné à protéger les installations qui sont sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibrés) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Cette structure est proche, dans le principe, des conditionneurs de réseau. Toutefois, cette topologie présente quelques difficultés et inconvénients lors de sa mise en œuvre, elle ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge [2].

La figure suivante représente un filtre actif série.

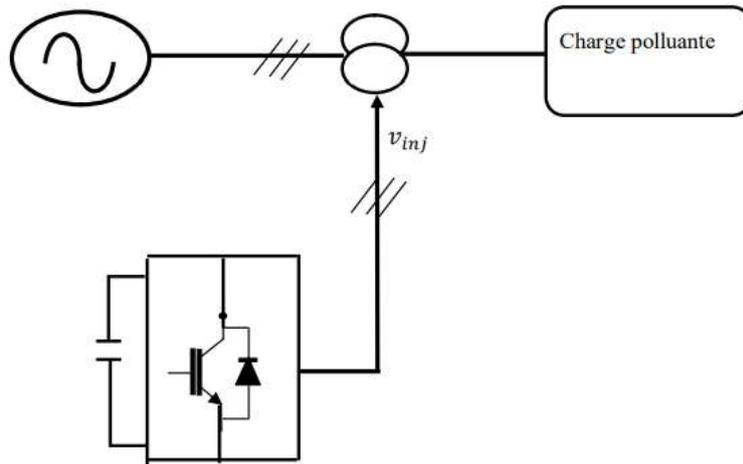


Figure I.3 : Structure d'un filtre actif série FAS.

- **Combinaison parallèle série actif**

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série [6]. Donc elle possède les avantages cumulés de ces derniers.

Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallèle série actif ou en anglais Unified Power Quality Conditioner (UPQC). Un filtre actif série placé en amont du filtre actif parallèle, comme il est montré ci dessous, permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices; ou s'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbé [2].

La figure suivante représente une combinaison série parallèle actif.

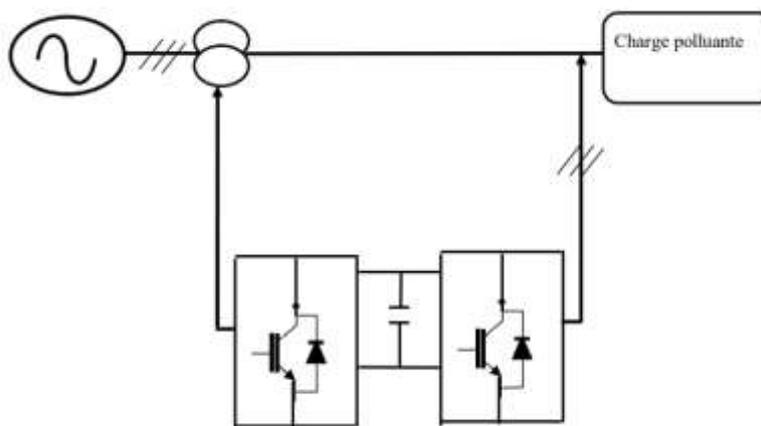


Figure I.4 : Structure d'un filtre hybride (parallèle série).

I.3.4 Filtrage hybride actifs et passifs

Malgré la grande attention portée sur les filtres actifs, leur application industrielle reste limitée à certains pays où les solutions traditionnelles sont inefficaces face à la prolifération des équipements polluants de fortes puissances sur un réseau qui n'est pas assez puissant partout. L'application industrielle de ces nouveaux dispositifs de filtrage est freinée par leur coût.

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, et ainsi augmenter leur potentialité d'application, l'association des filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution.

Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations [2].

Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature, les plus étudiées étant :

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

I.4 Principe et caractéristiques

- **Filtre passif**
 - Compensation d'énergie réactive assurée.
 - Elimination d'un ou plusieurs rangs harmoniques (habituellement : 5, 7, 11).
 - Un filtre pour un ou deux rangs à compenser.
 - Risque de surcharge par pollution extérieure.
- **Filtre actif**
 - Filtrage sur une large bande de fréquence (élimination des harmoniques des rangs 2 à 25).
 - Modification du réseau sans influence.
 - S'adapte à toutes les variations de charge et de spectre harmonique.
- **Filtre hybride**
 - Compensation d'énergie réactive.
 - Grande capacité de filtrage en courant.
 - Bonne solution technico-économique pour un filtrage « réseau » [2].

I.5 Avantages des filtres harmoniques

- Soulager les transformateurs et augmenter leur capacité du réseau en KVA.
- Réduire les pertes par effets Joules, économie d'énergie en KWH.
- S'aligner aux normes internationales pour la distorsion du courant ($THD-I < 10\%$) et la distorsion de la tension ($THD-V < 5\%$).
- Réduire la puissance réactive en KVAR.
- Améliorer le facteur de puissance FP en le portant à des valeurs proches de 1.
- Protéger complètement les charges traitées.
- Supprimer les transitoires causée par les batteries de condensateurs automatiques et par le changement de la charge.
- Améliorer les capacités du variateur de vitesse à supporter les hausses et les chutes de tension.
- 99% d'efficacité (Consommation négligeable) [2].

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types de perturbations affectant l'onde de tension du réseau électrique.

Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. Récemment, en plus du filtrage des harmoniques, les filtres actifs parallèles et séries, et leur combinaison, sont étudiés pour la compensation de tous les types de perturbations susceptibles d'apparaître dans un réseau électrique basse tension [3].

Le chapitre suivant sera consacré sur la modélisation du filtre actif et de l'onduleur trois niveaux de type T.

Chapitre II

Modélisation d'un filtre actif trois niveaux de type T

II.1 Introduction

Comme il a été présenté dans le chapitre précédent, le filtre actif est la solution la plus adéquate pour l'élimination des harmoniques dans un réseau de distribution, afin de garantir une bonne qualité de l'énergie électrique pour le consommateur. Donc ce chapitre a pour objectif de présenter ce filtre actif, le principe sur lequel il repose et sa structure générale. Cette dernière est divisée en deux grandes parties essentielles qui sont la partie puissance et la partie commande.

II.2 Principe d'un filtre actif

Dans le cas idéal le rôle du filtre actif consiste à éliminer tous les harmoniques produits par la charge non linéaire en fournissant à tout instant des harmoniques égaux en amplitude et en opposition de phase à ceux produits par la charge, et ceci afin que le courant dans la ligne reste purement sinusoïdal et égal au fondamental du courant de charge [6].

II.3 Objectif du filtre actif

Un filtre actif est un dispositif qui exploite au moins un convertisseur statique pour satisfaire la fonction de dépollution harmonique. Les besoins en termes de dépollution harmonique sont divers, parce qu'on espère toujours garantir [11].

- Le non pollution d'un réseau propre alimentant une charge sensible.
- Le bon fonctionnement d'une charge sensible dans un environnement pollué.

II.4 Application des filtres actifs

Les filtres actifs sont également utilisés dans des applications industrielles, afin de dépolluer une zone avec plusieurs charges non linéaires (redresseurs, certains éclairages, etc) [10]. En fin, le filtrage actif est également employé dans les applications tertiaires car les filtres actifs peuvent être intéressants dans les bâtiments commerciaux, hôpitaux, etc [12]. Dans lesquels il y a de nombreuses charges polluantes comme des ordinateurs, éclairage économique. Ces filtres actifs compensent les courants harmoniques et les courants réactifs et les déséquilibres des charges [11]. Les applications réseaux, industrielles, tertiaires, domestiques et en télécommunications apparaissent comme des environnements particulièrement pollués par les harmoniques [12].

Les filtres permettent une compensation globale des harmoniques. Ces filtres actifs, en plus de réduire les courants harmoniques, améliorent le facteur de puissance et équilibrent les charges triphasées [11]. L'utilisation de ces filtres produit une réduction des coûts d'exploitation et une prolongation de la durée de vie de l'installation [12].

II.5 Filtre actif de type T

II.5.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du filtre actif consiste à calculer en coordonnées $\alpha\beta$ les puissances instantanées réelle et imaginaire (p_L et q_L) absorbées par le non linéaire, donc, en cas de tension et/ou courants non sinusoïdaux, ces puissances instantanées p_L et q_L seront séparées en valeurs moyennes et en parties oscillatoires. Si l'on suppose que l'objectif est de supprimer les harmoniques et d'améliorer le facteur de puissance, alors seule la valeur moyenne p_L doit être fournie par le réseau en courant alternatif; les autres composantes doivent être supprimées.

II.5.2 Structure générale

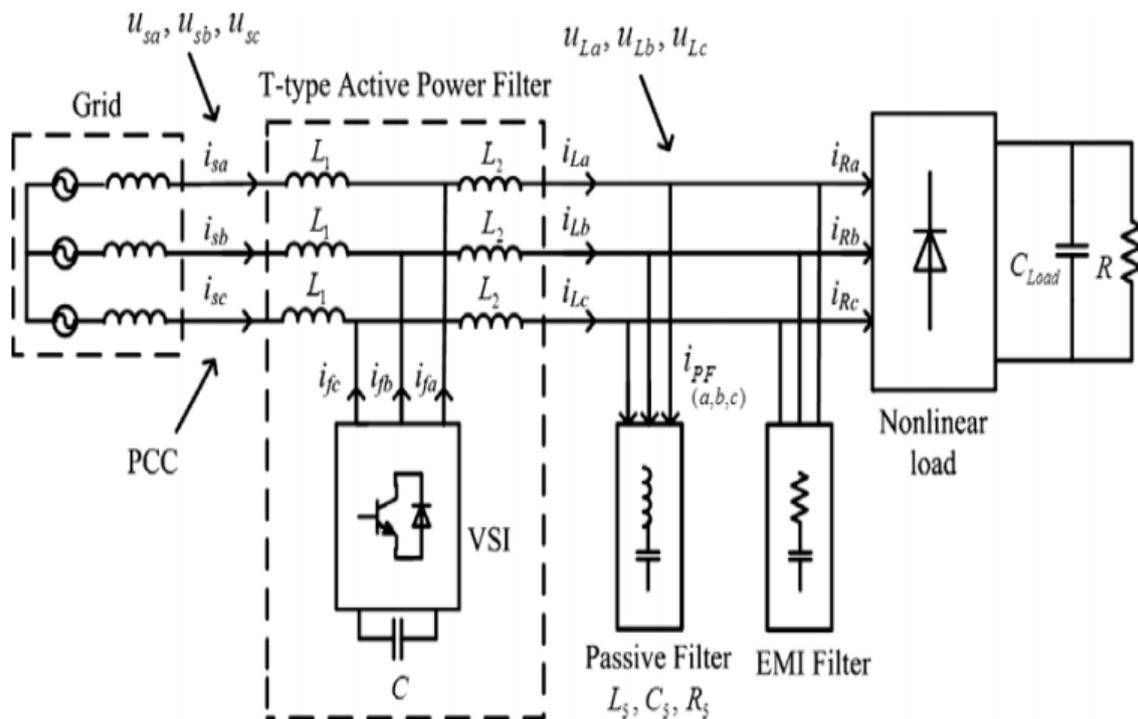


Figure II.1 : Structure générale d'un filtre actif de type T.

La partie puissance qui est constituée

- D'un onduleur de tension.
- D'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif.
- D'un filtre de sortie.

La partie commande qui est constituée

- D'un circuit d'identification des courants perturbés.
- D'un système de commande de l'onduleur de tension.
- De la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
- De la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.

II.6 Système de stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait le plus souvent par un système de stockage capacitif représenté par un condensateur C_{dc} qui joue le rôle d'une source de tension continue V_{dc} .

Le choix des paramètres du système de stockage (V_{dc} et C_{dc}) se répercute sur la dynamique et sur la qualité de compensation des harmoniques du filtre actif. Dans les applications de compensation d'harmoniques, une tension V_{dc} élevée aux bornes du bus continu améliore la dynamique du filtre actif, d'autre part, une valeur élevée de C_{dc} réduit les ondulations mais augmente le coût et la taille du filtre. De plus, les ondulations de la tension continue V_{dc} , causées par les courants engendrés par le filtre actif est limitées par le choix de C_{dc} , Ces ondulations sont d'autant plus élevées que les harmoniques à compenser sont de basses fréquences et d'amplitudes importantes ou la capacité est faible. Pour cette raison, nous pouvons estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres du système de stockage [1].

La méthode la plus simple et la plus utilisée pour le dimensionnement consiste à calculer la capacité C_{dc} à partir du courant harmonique I_h du rang le plus faible.

La capacité C_{dc} se calcule de la façon suivante :

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\varepsilon V_{dc} \omega_h} \quad (II.1)$$

Avec :

ω_h : est la pulsation de l'harmonique de rang h,

I_h : Harmonique de rang h,

V_{dc} : Tension du bus continue,

C_{dc} : Condensateur de stockage,

II.7 Filtre de couplage (sortie)

Un filtre de sortie est un filtre passif utilisé afin de connecter l'onduleur de tension au réseau électrique [13].

Les types de filtres connus et qui sont souvent utilisés sont les suivants :

- Le filtre type L, dite de premier ordre, ce filtre est le plus utilisé pour sa simplicité.
- Le filtre type LCL, dite de troisième ordre.

Le filtre de sortie est dimensionné pour satisfaire les critères suivants :

- Assurer la dynamique du courant :

$$\frac{d}{dt} \vec{I}_{h-ch} = \frac{d}{dt} \vec{I}_{inj} \quad (II.2)$$

Avec :

\vec{I}_{h-ch} : Le courant harmonique de la charge.

\vec{I}_{inj} : Le courant du filtre actif.

- Minimiser la variation brusque de courant (lissage).
- Empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique.
- Causer le minimum de chute de tension à ses bornes [14].

➤ Filtre du premier ordre

Ce type de filtre est le plus utilisé. Il est composé d'une inductance L_f et de résistance interne f . Une valeur relativement faible de L_f peut réaliser une bonne dynamique du filtre actif et diminuer les chutes de tension. Malheureusement, cette faible valeur de L_f permet à la majorité des composantes dues aux commutations de se retrouver à côté réseau et par conséquent d'affecter les installations et les équipements électriques [1]. Inversement, une valeur élevée de L_f va empêcher ces composantes de se propager sur le réseau électrique mais affectera la dynamique du filtre actif et dégradera alors la qualité de compensation [15].

Ce filtre peut causer des effets secondaires non désirés comme la résonance avec d'autres éléments passifs installés sur le réseau électrique [1].

➤ Filtre du troisième ordre

Souvent appelé filtre en T, composé de deux inductances L_{f1} et L_{f2} , de résistances internes r_{f1} et r_{f2} respectivement et d'une capacité C_f [7]. Le filtre LCL est une combinaison des deux filtres L et LC [1]. La présence du filtre LC à la sortie de l'onduleur de tension, qui se comporte comme un générateur de tensions harmoniques, permet l'élimination des composantes hautes fréquences dues aux découpages [16]. L'association d'un filtre L et LC transforme la source de tension en une source de courant et améliore la qualité des grandeurs de sorties [1].

II.8 Structure et topologie de l'onduleur trois niveaux de type T

II.8.1 Structure générale

La figure ci-dessous présente un onduleur triphasé à trois niveaux de type T à structure de tension. Il se compose de trois bras, chaque bras comporte quatre interrupteurs, et chaque interrupteur se compose d'un transistor IGBT et une diode commandés à la fermeture et à l'ouverture, Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire des deux condensateurs C_1 et C_2 de tension U_{dc} . Le filtre de sortie est un filtre passif (L_f) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique.

La figure suivante présente la structure générale d'un onduleur trois niveaux de type T.

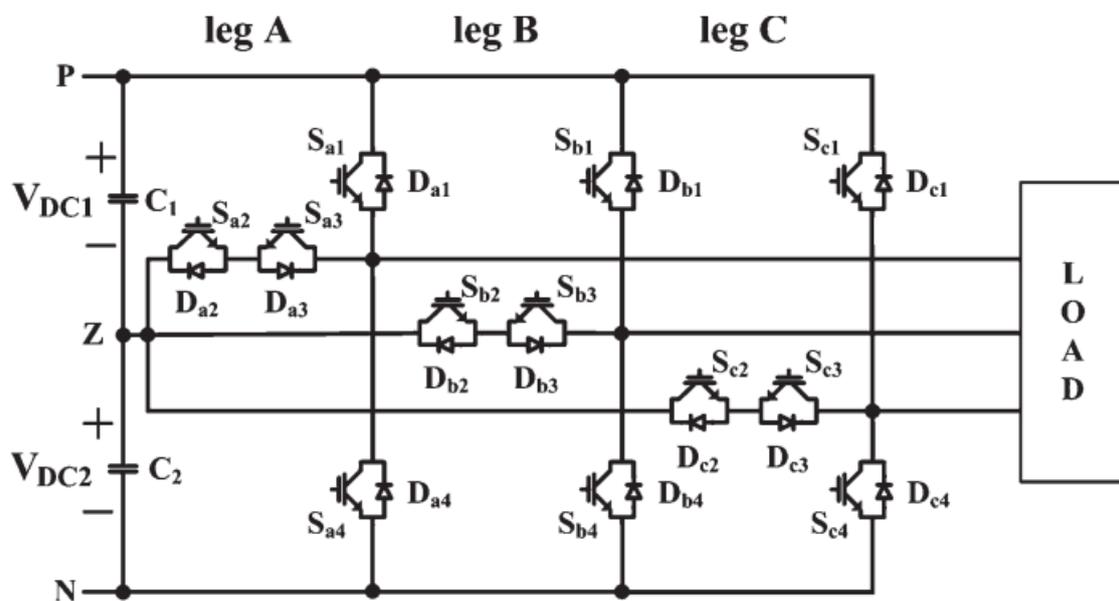


Figure II.2 : Structure générale d'un onduleur trois niveaux de type T.

II.8.2 Topologie

Une topologie simple de l'onduleur à trois niveaux de type T est présentée dans le tableau suivant. Le principe de base de cette configuration peut être exprimé par trois états de commutation [P], [N] et [Z] qui correspondent à trois tensions de sortie de l'onduleur $+U_{dc}/2$, $-U_{dc}/2$ et 0. Par conséquent 27 configuration de commutation possibles sont considérées pour un onduleur 3 niveaux de type T. Le tableau (II.1) présente le résumé du principe de fonctionnement pour l'onduleur trois niveaux de type T [17].

Etat	Interrupteur				Tension de sortie
	S_{1x}	S_{2x}	S_{3x}	S_{4x}	
S_x	S_{1x}	S_{2x}	S_{3x}	S_{4x}	U_{xz}
P	1	1	1	0	0
Z	0	1	1	1	0
N	0	0	1	1	1

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

II.8.3 Etats de commutations possibles de l'onduleur

Les états possibles de cet onduleur sont huit. Ils sont représentés en ordre selon les combinaisons des interrupteurs [18].

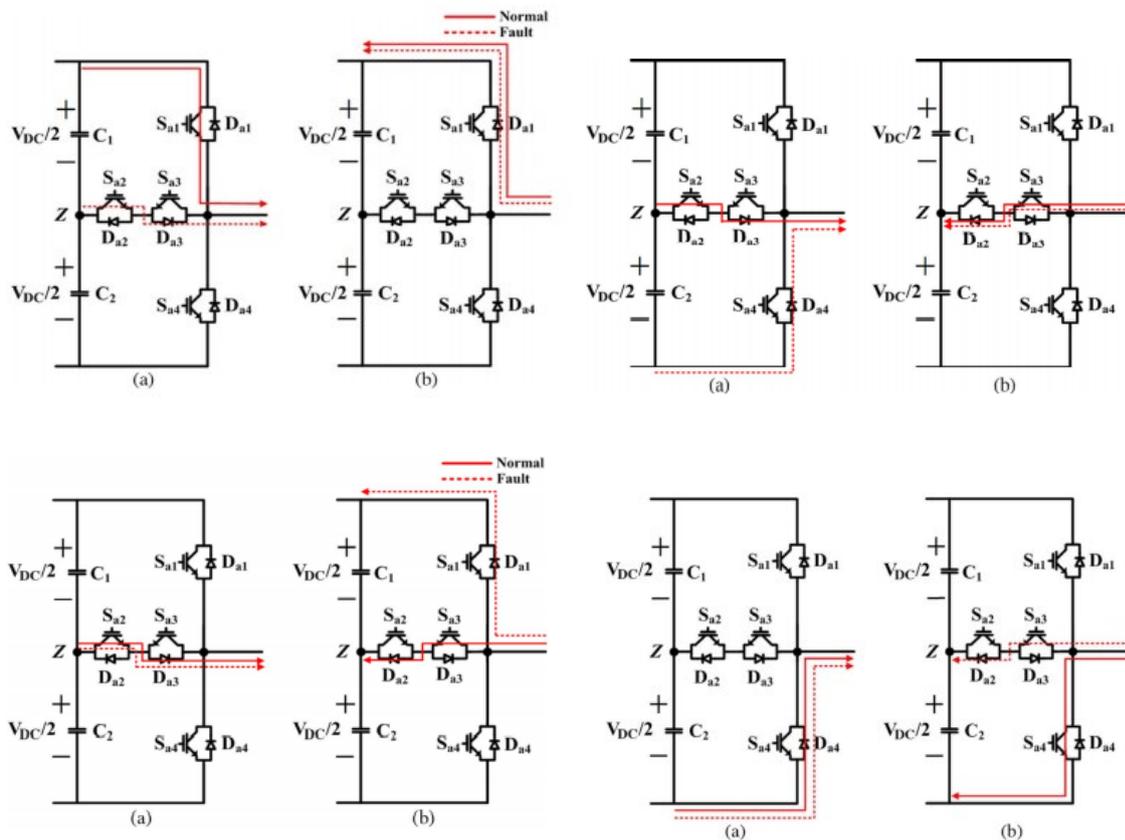


Figure II.3 : Etats de commutations possibles de l'onduleur trois niveaux de type T.

II.9 Modélisation de l'onduleur

La tension de sortie est donnée par [17] :

$$U_{inv} = \frac{2}{3}(U_{AZ} + kU_{BZ} + k^2U_{CZ}) \quad (II.3)$$

Où

U_{AZ} , U_{BZ} et U_{CZ} sont les tensions de phase de sortie ; $k = e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$

La tension de phase U_{XZ} est calculée en fonction de la tension du circuit intermédiaire U_{dc} et l'état de commutation S_x comme :

$$U_{xZ} = S_x \frac{U_{dc}}{2} \quad (II.4)$$

Où S_x représente l'état de commutation et a trois valeurs possible : $\{-1, 0, 1\}$.

Avec l'indice $x \in \{a, b, c\}$.

Le comportement dynamique du filtre LC peut être décrit comme suit :

$$L_f \frac{di_f}{dt} = U_{inv} - U_c \quad (II.5)$$

$$C_f \frac{dU_c}{dt} = i_f - i_0 \quad (II.6)$$

Où U_{inv} et U_c sont les vecteurs de tension de l'onduleur et du condensateur de sortie ; i_f et i_0 sont des vecteurs de courant du filtre et de la charge de sortie et L_f , C_f sont l'inductance et la capacité du filtre [17].

Les variables de contrôle U_c et i_f sont mesurées tandis que U_{inv} est obtenu à partir des équations (1) et (2). En générale, i_0 est mesuré ou estimé en utilisant un observateur, ce qui entraîne une augmentation du coût et de la complexité du système. Pour obtenir un modèle simple, nous supposons que le courant de charge de sortie est dérivé de la tension du condensateur de sortie. Ainsi, l'équation précédente est réécrite comme suit [17] :

$$\frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C_f} \left(i_f - \frac{U_c}{R_{load}} \right) \quad (II.7)$$

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{1}{L_f} (U_{inv} - U_c) \quad (II.8)$$

Où R_{load} est la résistance de charge.

Afin de réduire le nombre de variables de contrôle, la tension du point neutre est prise en compte dans le modèle au lieu de deux tensions de condensateur. La tension du point neutre U_z peut être exprimé en supposant que la tension du circuit intermédiaire est maintenu constante et que $C_1=C_2=C$ comme suit [17] :

$$\frac{dU_z}{dt} = \frac{d(U_{C1} - U_{C2})}{dt} = -\frac{1}{C}i_z = -\frac{1}{C}\left((1 - |S_a|)i_{fa} + (1 - |S_b|)i_{fb} + (1 - |S_c|)i_{fc}\right) \quad (II.9)$$

Par conséquent, nous avons une représentation du modèle dynamique comme suit [17] :

$$\frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C_f}\left(i_f - \frac{U_c}{R_{load}}\right) \quad (II.10)$$

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{1}{L_f}(U_{inv} - U_c) \quad (II.11)$$

$$\frac{dU_z}{dt} = -\frac{1}{C}\left((1 - |S_a|)i_{fa} + (1 - |S_b|)i_{fb} + (1 - |S_c|)i_{fc}\right) \quad (II.12)$$

II.10 Modélisation du filtre actif

II.10.1 Modèle mathématique du filtre actif parallèle dans le repère triphasé (abc)

L'équation de la tension par phase du FAP triphasé [3] :

$$v_{sk} = v_{fk} - v_{Lfk} - v_{Rfk} = v_{fk} - L_f \frac{di_{fk}}{dt} - R_f i_{fk}, \quad k = a, b, c \quad (II.13)$$

Où, $k = a, b, c$ est l'indice de phase.

D'où, les équations des trois phases sont exprimées par l'équation matricielle suivante :

$$L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} = -R_f \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \\ v_{fc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (II.14)$$

Et, pour le coté continu :

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_{fa} + S_b i_{fb} + S_c i_{fc} \quad (II.15)$$

Le système d'équation définissant le filtre actif dans le repère triphasé est donnée par :

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{fa}}{dt} = -R_f i_{fa} + v_{fa} - v_{sa} \\ L_f \frac{di_{fb}}{dt} = -R_f i_{fb} + v_{fb} - v_{sb} \\ L_f \frac{di_{fc}}{dt} = -R_f i_{fc} + v_{fc} - v_{sc} \\ C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_{fa} + S_b i_{fb} + S_c i_{fc} \end{cases} \quad (II.16)$$

II.10.2 Modèle du filtre actif dans le repère synchrone (de Park)

Appliquons la transformée de Park sur le système (II.16), nous obtiendrons le modèle de l'onduleur dans le repère synchrone dq comme suit [19]:

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{fd}}{dt} = -R_f i_{fd} + L_f \omega i_{fq} + v_{fd} - v_{sd} \\ L_f \frac{di_{fq}}{dt} = -R_f i_{fq} - L_f \omega i_{fd} + v_{fq} - v_{sq} \\ C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = -S_d i_{fd} + S_q i_{fq} \end{cases} \quad (II.17)$$

Avec

$$\begin{aligned} S_d &= S_\alpha \cos \omega t + S_\beta \sin \omega t \\ S_q &= -S_\alpha \sin \omega t + S_\beta \cos \omega t \end{aligned} \quad (II.18)$$

$$\begin{aligned} S_\alpha &= \frac{1}{\sqrt{6}} (2S_a - S_b - S_c) \\ S_\beta &= \frac{1}{\sqrt{2}} (S_b - S_c) \end{aligned} \quad (II.19)$$

II.10.3 Modèle du filtre actif dans le repère stationnaire

A partir du modèle du filtre actif dans le repère triphasé, et en appliquant la transformée de Concordia directe sur ce modèle, le modèle de l'onduleur dans le repère stationnaire est donné par [19] :

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{f\alpha}}{dt} = -R_f i_{f\alpha} - v_{f\alpha} - v_{s\alpha} \\ L_f \frac{di_{f\beta}}{dt} = -R_f i_{f\beta} + v_{f\beta} - v_{s\beta} \\ C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = -S_\alpha i_{f\alpha} + S_\beta i_{f\beta} \end{cases} \quad (II.20)$$

Où, les tensions du réseau, les courants et les tensions du filtre sont donnés par [19] :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (II.21)$$

$$\begin{bmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \end{bmatrix} V_{dc} \quad (II.22)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} \quad (II.23)$$

II.11 Modélisation du réseau électrique

Le réseau d'alimentation est modélisé par trois sources de tension sinusoïdales parfaites en série avec une impédance Z_s . La figure suivante montre le schéma de principe d'un réseau électrique triphasé [3].

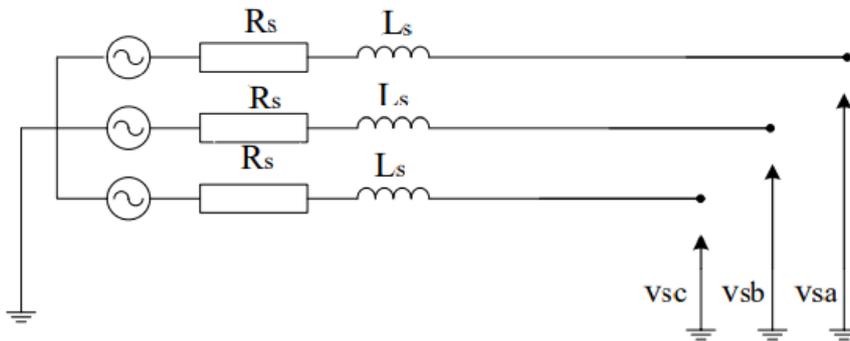


Figure II.4 : Schéma électrique du réseau triphasé.

D'où la représentation du réseau par le système d'équations triphasées équilibrées sont exprimées par le système d'équations suivants [3] :

$$\begin{cases} v_a = \sqrt{2}v \sin(\omega_t) \\ v_b = \sqrt{2}v \sin(\omega_t - 2\pi/3) \\ v_c = \sqrt{2}v \sin(\omega_t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (II.24)$$

Avec

$$Z_s = R_s + jL_s\omega \quad (II.25)$$

II.12 Modélisation de la charge polluante

La charge polluante utilisé dans notre système est représentée par un pont redresseur à diodes débitant sur une charge R_{ch} comme illustré dans la figure ci-dessous. Une charge non linéaire à base d'électronique de puissance considérée comme une source des courants harmoniques [1].

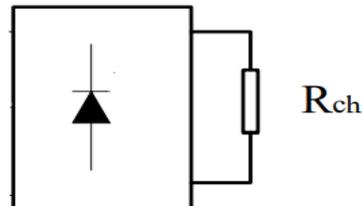


Figure II.5 : Modèle de la charge non linéaire équilibrée.

Le courant circulant dans la charge se décomposer en une composante fondamentale i_{ch} et une composante harmonique i_{chh} [1].

$$i_{ch}(t) = i_{chf} + i_{chh} \quad (II.26)$$

Avec le fondamental

$$i_{chf} = \sqrt{2} \times I_1 \times \sin(\omega_t + \varphi_1) \quad (II.27)$$

Et pour les harmoniques

$$i_{chh}(t) = \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2} \times I_h \times \sin(h\omega_t + \varphi_h) \quad (II.28)$$

II.13 Algorithme d'identification des courants harmoniques

La méthode que nous avons explicitée ci-dessous, peut être résumée par le schéma suivant qui illustre les différentes étapes qui nous permettent d'obtenir valeurs des courants de références.

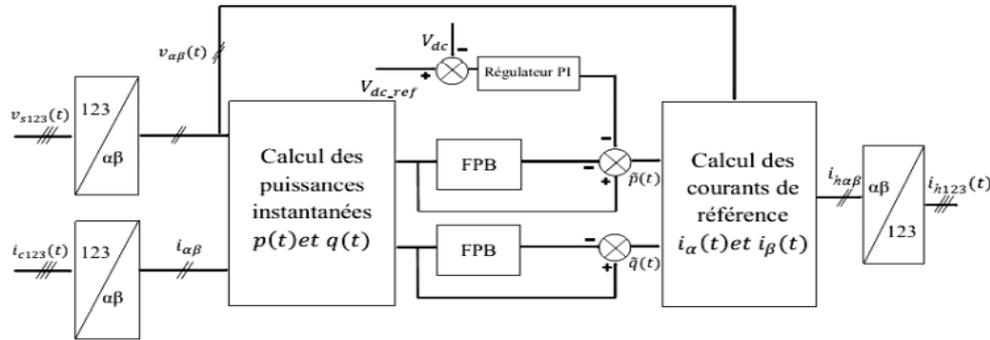


Figure II.6 : Algorithme de la méthode des puissances instantanées pour l'extraction des courants harmoniques.

En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties [19] :

Active (P), réactive (Q) et déformante (D) comme le montre la relation suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (II.29)$$

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

$$p(t) = v_{sa}i_{fa} + v_{sb}i_{fb} + v_{sc}i_{fc} = p(t) + p_0(t) \quad (II.30)$$

On peut écrire dans le repère stationnaire par :

$$p(t) = v_{\alpha}i_{\alpha} + v_{\beta}i_{\beta} \quad (II.31)$$

De la même manière la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous forme suivante :

$$q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}}[(v_{sa} - v_{sb})i_{fc} + (v_{sb} - v_{sc})i_{fa} + (v_{sc} - v_{sa})i_{fb}] = v_{\alpha}i_{\beta} - v_{\beta}i_{\alpha} \quad (II.32)$$

La puissance q a une signification plus large que la puissance réactive habituelle. En effet, contrairement à la puissance réactive, qui ne considère que la fréquence fondamentale, la puissance imaginaire prend en compte toutes les composantes harmoniques de courant et de tension. C'est pourquoi on lui donne une autre dénomination (puissance imaginaire) avec comme unité le volt-ampère imaginaire (VAI). A partir des relations (II.31) et (II.32), nous pouvons établir la relation matricielle suivante [19]:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (II.33)$$

Dans le cas générale, chacune des puissances p et q comporte une partie continue et une partie alternative, ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous [19] :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (II.34)$$

Avec

\bar{p} une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension.

\bar{q} une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension.

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

En inversant la relation (II.33), nous pouvons recalculer les courants dans le repère $\alpha \beta$ comme le montre l'équation [19]:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (II.35)$$

En considérant les équations (II.34) et (II.35), nous pouvons séparer le courant dans le repère en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{courant harmonique}} \quad (II.36)$$

Avec $\Delta = v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2$ [19].

Il est évident que pour pouvoir calculer les trois composants du courant indépendamment les uns des autres, il faut tout d'abord pouvoir isoler les puissances active et réactive (\bar{p}, \bar{q}) liées respectivement à la composante fondamentale du courant active et réactive.

Avec un filtre de puissance, pour isoler ces puissances, il faut connaître avec précision les fréquences de leurs pulsation, pour pouvoir dimensionner ce filtre qui peut remplir cette fonction. On peut utiliser un circuit constitué soit d'un filtre passe bas ou un filtre passe haut avec soustracteur comme le représente la figure suivante [19] :

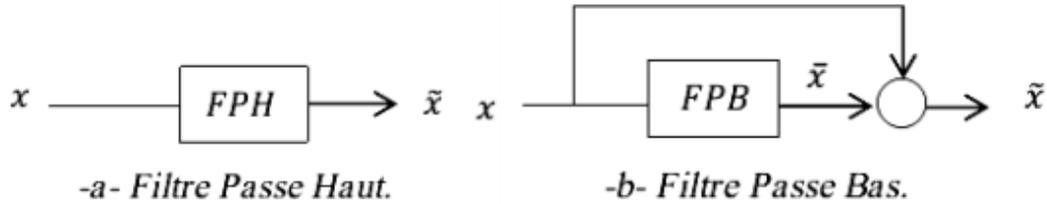


Figure II.7 : Schéma du filtre de puissance utilisé pour l'extraction des composantes fondamentales (p, q).

Dans notre étude, nous avons choisi un filtre passe-bas du deuxième ordre en vue de simplifier l'approche d'implantation numérique de ce dernier. En effet, un ordre plus élevé entraînerait des temps de calcul plus longs ce qui peut être préjudiciable dans notre étude. La relation suivante donne l'expression générale d'un filtre passe-bas du deuxième ordre [19].

$$\frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2} \quad (II.37)$$

La fréquence de coupure, $f_c = \omega_c/2\pi$, est choisie pour que le filtre de puissance puisse bloquer toute composante perturbatrice des puissances instantanées (\tilde{p}, \tilde{q}). Elle doit aussi permettre le passage des composantes continues représentant les puissances active et réactive à la fréquence fondamentale (\bar{p}, \bar{q}).

Une fois les valeurs $\bar{p}, \bar{q}, \tilde{p}$ et \tilde{q} isolées, il devient aisé de calculer les courants réactifs et les courants harmoniques.

Donc le courant de référence harmonique est donné par :

$$\begin{bmatrix} I_{h1} \\ I_{h2} \\ I_{h3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (II.38)$$

II.13 Principe d'une P.L.L

La boucle à verrouillage de phase (Phase Locked Loop :PLL) est utilisée pour détecter la phase et la fréquence du réseau électrique [20].

La figure suivante représente le schéma détaillé de la PLL utilisée.

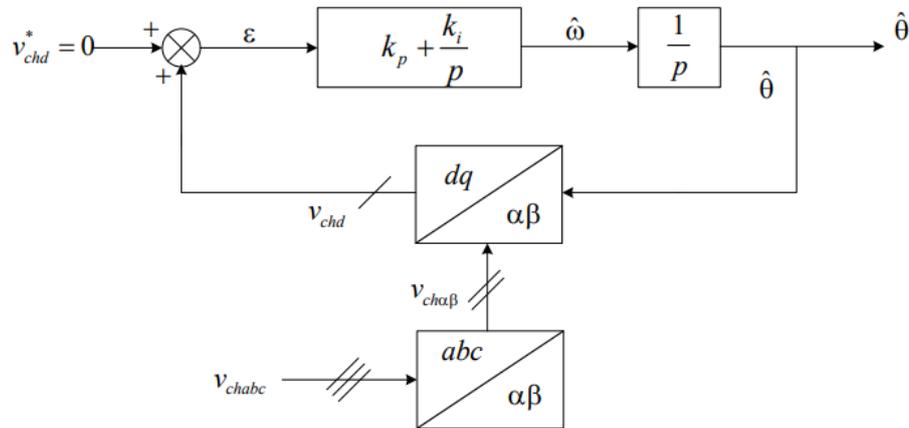


Figure II.8 : Schéma du principe d'une PLL classique.

Supposons que les trois tensions du réseau au point de raccordement sont sinusoïdales, définies par [20]:

$$\begin{bmatrix} v_{cha} \\ v_{chb} \\ v_{chc} \end{bmatrix} = v_{ch_{max}} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (II.39)$$

L'application de la transformation de Concordia sur l'équation (II.39), conduit à :

$$\begin{aligned} v_{ch_\alpha} &= \sqrt{\frac{2}{3}} v_{ch_{max}} \left(\sin(\omega t) - \frac{1}{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{1}{2} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right) \\ v_{ch_\beta} &= \sqrt{\frac{2}{3}} v_{ch_{max}} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right) \end{aligned} \quad (II.40)$$

Après simplification des relations précédentes, on trouve :

$$\begin{bmatrix} v_{ch_\alpha} \\ v_{ch_\beta} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{2}{3}} v_{ch_{max}} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ -\cos(\omega t) \end{bmatrix} = \sqrt{3} v_{ch_{eff}} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ -\cos(\omega t) \end{bmatrix} \quad (II.41)$$

Ces grandeurs peuvent être obtenues dans le repère dq en appliquant la matrice de rotation suivante [20]:

$$\begin{bmatrix} v_{ch_d} \\ v_{ch_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \\ -\sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ch_\alpha} \\ v_{ch_\beta} \end{bmatrix} \quad (II.42)$$

Avec $\hat{\theta}$ est la position angulaire estimée du vecteur de tension.

La composante directe du vecteur tension est donc :

$$v_{ch_d} = \sqrt{3}v_{cheff} \sin(\omega t - \hat{\theta}) \quad (II.43)$$

En supposant que l'angle de phase $(\omega t - \hat{\theta})$ est très petit, alors, l'expression (II.43) peut être simplifié à :

$$v_{ch_d} = \sqrt{3}v_{cheff}(\omega t - \hat{\theta}) \quad (II.44)$$

La pulsation angulaire estimée est donnée par :

$$\hat{\omega} = H\sqrt{3}v_{eff}(\omega t - \hat{\theta}) \quad (II.45)$$

Avec H la fonction de transfert du régulateur PI, définie par :

$$H(P) = k_p + \frac{k_i}{p} \quad (II.46)$$

La position angulaire est donnée par :

$$\hat{\theta} = \hat{\omega} \frac{1}{p} \quad (II.47)$$

La figure suivante représente la boucle de régulation de la pulsation angulaire.

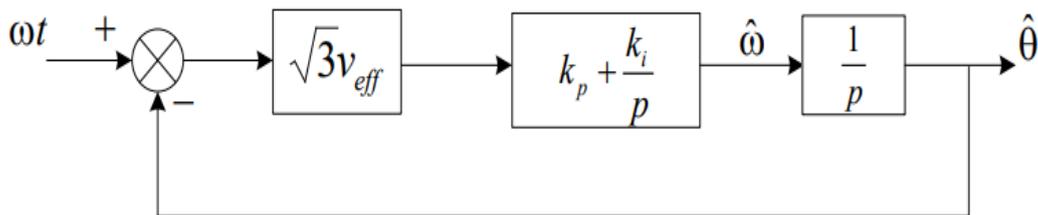


Figure II.9 : Boucle de régulation de la pulsation angulaire.

Le remplacement des relations (II.47) dans (II.45) nous donne [20] :

$$\hat{\theta} p = \left(k_p + \frac{k_i}{p}\right) \sqrt{3}v_{eff}(\omega t - \hat{\theta}) \quad (II.48)$$

La fonction de transfert en boucle fermée du système est :

$$G(P) = \frac{\sqrt{3}v_{eff}(k_p p + k_i)}{p^2 + \sqrt{3}v_{eff}k_p p + \sqrt{3}v_{eff}k_i} \quad (II.49)$$

Ce qui nous permet de déterminer :

$$k_p = \frac{2\xi\omega_c}{\sqrt{3}v_{eff}}, k_i = \frac{\omega_c^2}{\sqrt{3}v_{eff}} \quad (II.50)$$

Afin d'obtenir un bon compromis entre la stabilité et la réponse dynamique, on a choisi $\xi = 0.707$, et une fréquence de coupure $f_c = 1500 \text{ Hz}$ [20].

II.15 Commande de l'onduleur

Le but de la commande de l'onduleur est le contrôle des courants à la sortie du filtre afin qu'ils suivent leurs références. Le principe est basé sur la comparaison entre les courants à la sortie du filtre actif et leurs références calculées à partir des différentes méthodes d'extraction et de régulation des courants harmoniques et de la tension du condensateur de stockage d'énergie [19].

Les deux principales stratégies de commande des convertisseurs statiques sont :

- ❖ la commande par hystérésis.
- ❖ la commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI).

II.15.1 Commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)

La technique de commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur [21].

La figure suivante représente le principe de la commande MLI [1].

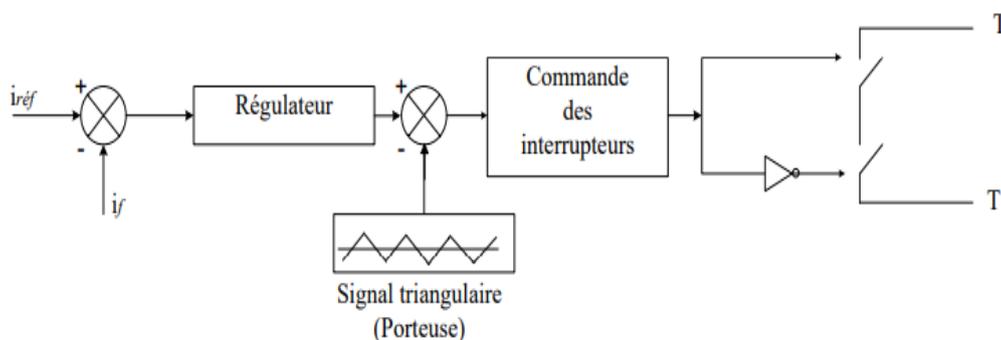


Figure II.10 : Principe de la commande par MLI.

Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette tension est ensuite comparée avec un signal en dent de scie (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). Le signal de commutation est déterminé à partir de l'intersection de ces deux signaux comme le montre la figure ci-dessous. La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs [21,22].

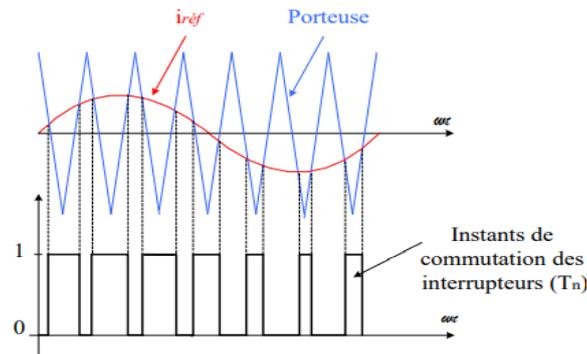


Figure II.11 : Signal de commutation de la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).

Deux paramètres caractérisent cette commande:

❖ L'indice de modulation « m » :

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad (II.51)$$

Avec $m > 1$.

❖ Le taux de modulation « r » appelé aussi coefficient de réglage en tension :

$$r = \frac{V_{mmax}}{V_{pmax}} \quad (II.52)$$

Avec $0 < r < 1$.

II.16 Régulation de la tension continue

La boucle de régulation de la tension du bus continu sert à maintenir la tension aux bornes du condensateur à une valeur fixe, afin d'assurer la compensation des pertes dans le filtre et limiter les variations en régime dynamique [1].

Les principales causes susceptibles de modifier cette tension sont :

- Les pertes dans le filtre actif.
- L'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante.

- Les pertes de commutation et par conduction des interrupteurs de puissance.
- Les pertes par effet Joule dans les composants passifs L et C.

Son principe est basé sur la comparaison entre la tension V_{dc} du bus continu et la consigne V_{dc}^* . L'erreur obtenue passe par un régulateur PI pour la maintenir limitée et oscillante autour de sa consigne [1].

la boucle de régulation de la tension continue est représentée par la figure suivante.

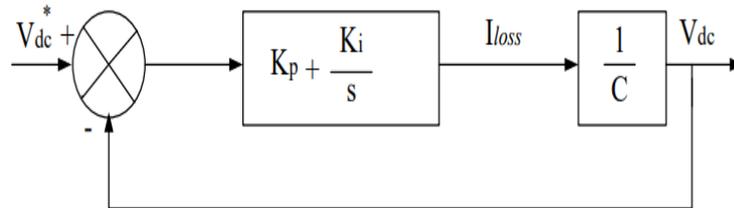


Figure II.12 : Boucle de régulation de la tension continue.

A partir la figure II.12 la fonction de transfert en boucle fermée de la régulation de la tension continue est la suivante :

$$F_{BF}(s) = \frac{1 + \frac{K_p}{K_i} s}{s^2 + 2 \frac{K_p}{C} s + 2 \frac{K_i}{C}} \quad (II.53)$$

La fonction de transfert obtenue est de deuxième ordre, la forme canonique du deuxième ordre est donnée comme suite:

$$F_T(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\xi\omega_c s + \omega_c^2} \quad (II.54)$$

Par identification avec la forme canonique, les expressions des coefficients du régulateur PI sont comme suit [1]:

$$\begin{aligned} K_i &= \frac{1}{2} C \omega_c^2 \\ K_p &= \xi \sqrt{2CK_i} \end{aligned} \quad (II.55)$$

II.17 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit la modélisation du filtre actif de type T ainsi que la modélisation de l'onduleur triphasé à trois niveaux.

Le chapitre suivant sera consacré sur la commande linéaire du filtre actif multi-niveaux par un régulateur proportionnel intégral (PI).

Chapitre III

***Commande d'un filtre actif : Commande par
un régulateur proportionnel intégral***

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à la technique de commande par un régulateur proportionnel intégral, et d'appliquer cette technique dans la commande du filtre actif de type T.

III.2 Contrôle du courant du filtre par un régulateur PI

Le régulateur proportionnel-intégral est le correcteur le plus classiquement utilisé pour le contrôle du courant à cause de sa simplicité. Le schéma simplifié de la boucle de régulation du courant par ce régulateur est illustré par la figure suivante [19].

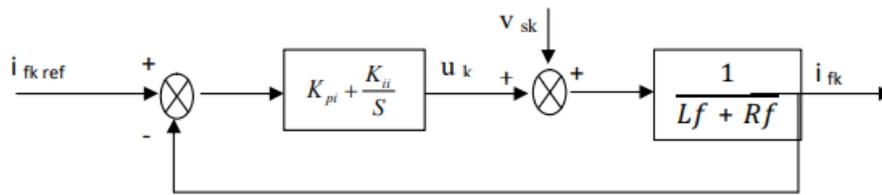


Figure III.1 : Boucle de régulation du courant.

La fonction de transfert en boucle ouverte correspondante à la version compensée de ce schéma est [20] :

$$F(p) = \frac{K_p p + K_i}{p} \frac{1}{L_f p + R_f} \quad (III.1)$$

La fonction de transfert en boucle fermée sera donc :

$$H(p) = \frac{K_p p + K_i}{L_f p^2 + (R_f + k_p)p + k_i} \quad (III.2)$$

Pour commander le système en boucle fermée, il est nécessaire de bien choisir les coefficients K_p et K_i . L'équation caractéristique de la fonction de transfert d'un système du deuxième ordre donnée par [20] :

$$G(p) = p^2 + 2\xi\omega_{cp}p + \omega_{cp}^2 \quad (III.3)$$

Finalement on en déduit les valeurs des constantes du régulateur comme suit :

$$\begin{aligned} K_p &= 2\xi\omega_{cp}L_f - R_f \\ K_i &= L_f\omega_{cp}^2 \end{aligned} \quad (III.4)$$

Avec

$$\omega_{cp} = 2\pi f_{cp} \quad (III.5)$$

III.3 Simulation et interprétation des résultats

Les résultats suivants représentent la réponse du filtre actif commandé par régulateur PI, dans le repère triphasé.

Dans le but de résoudre le problème de l'influence des charges non linéaires sur les courants de source, on opte pour la simulation que nous allons exposer dans cette partie.

La figure suivante représente le schéma de simulation avec MATLAB/Simulink de l'ensemble réseau électrique, filtre actif et charge non linéaire.

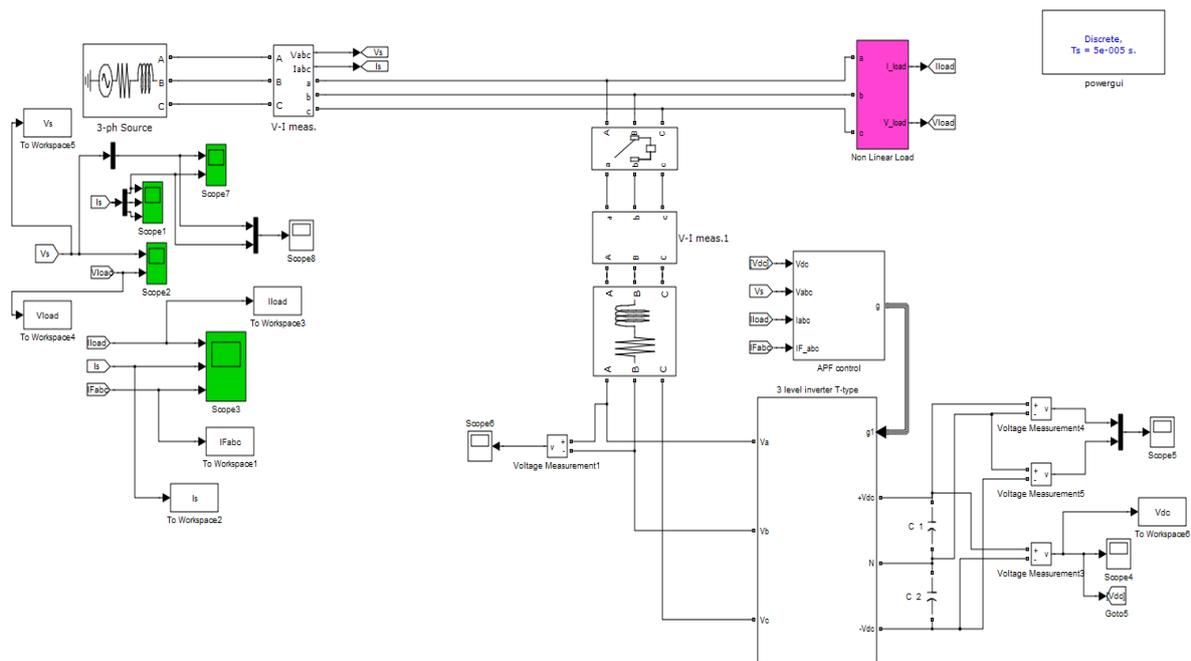


Figure III.2 : Schéma de simulation.

Les paramètres utilisés lors de la simulation sont:

- **Tension entre phase**

$$U = 400 \text{ V}$$

$$V = 230 \text{ V}$$

- **Fréquence**

$$f = 50 \text{ Hz}$$

- **Impédance du réseau**

$$L = 0.006 \text{ H}$$

$$r = 0.001 \Omega$$

- **Charge non linéaire**

Un pont redresseur à diodes débit sur une charge résistive, avec les paramètres suivants:

La valeur de la charge résistive $R_{ch} = 10 \Omega$.

III.3.1 Simulation avant filtrage

a) Courants de source

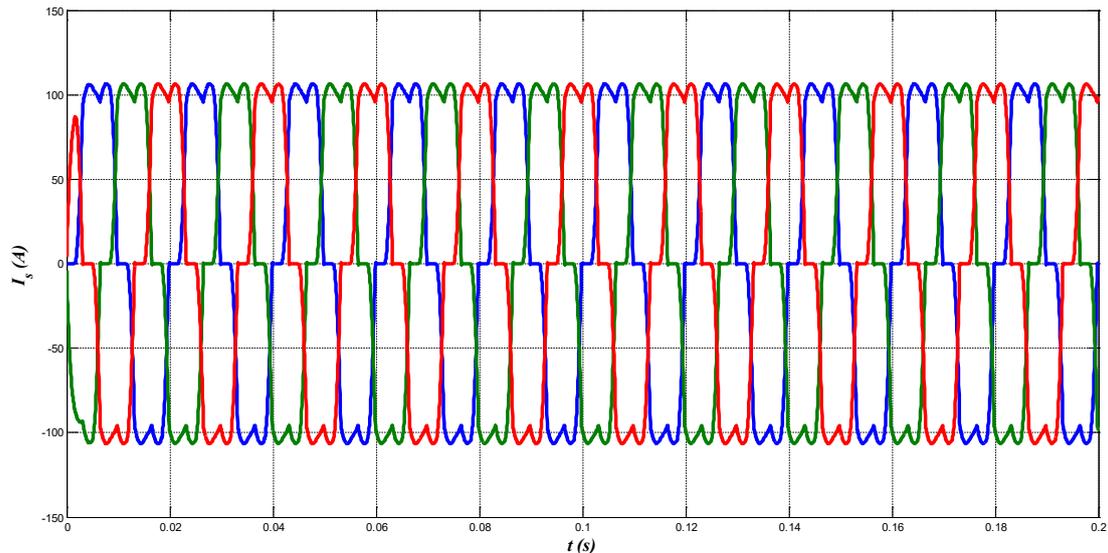


Figure III.3 : Courants de source avant filtrage.

Comme le montre la figure (III.3), les courants absorbés par la charge non linéaire ont une forme déformante. La propagation de ces ondes déformées provoque la pollution du réseau étudié

Les figures suivantes, montre l'analyse harmonique des courants de sources (a, b et c).

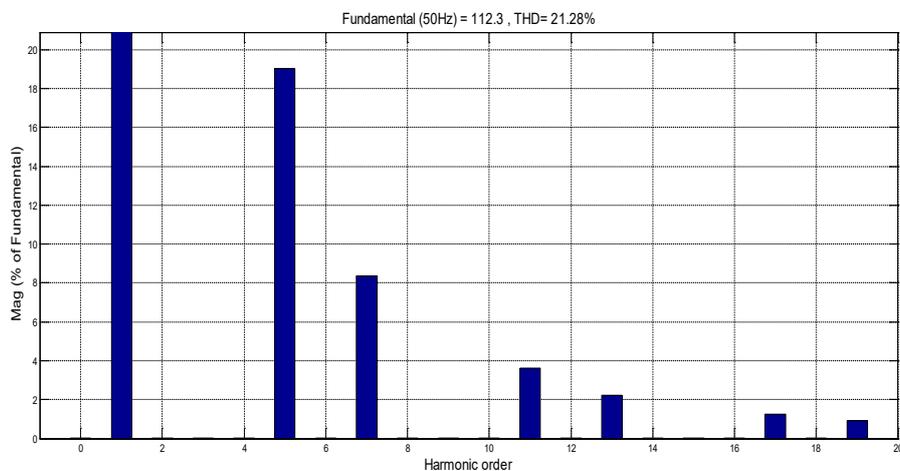


Figure III.4 : Analyse spectrale du courant de source (phase a).

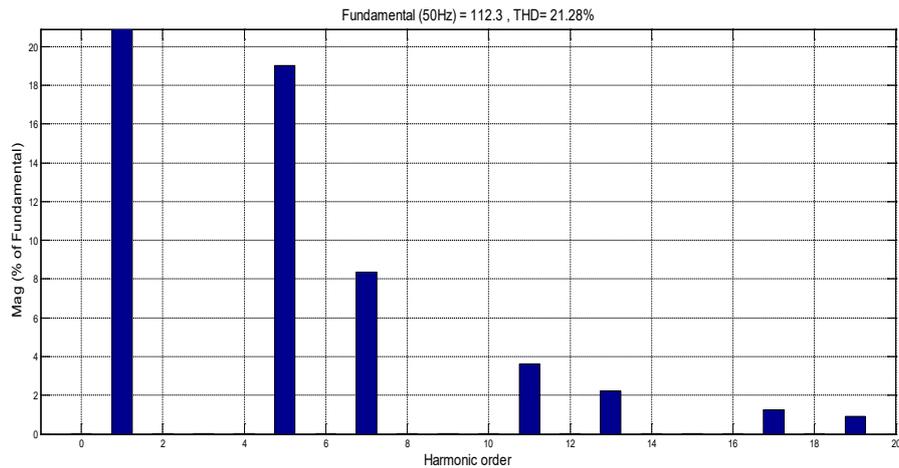


Figure III.5 : Analyse spectrale du courant de source (phase b).

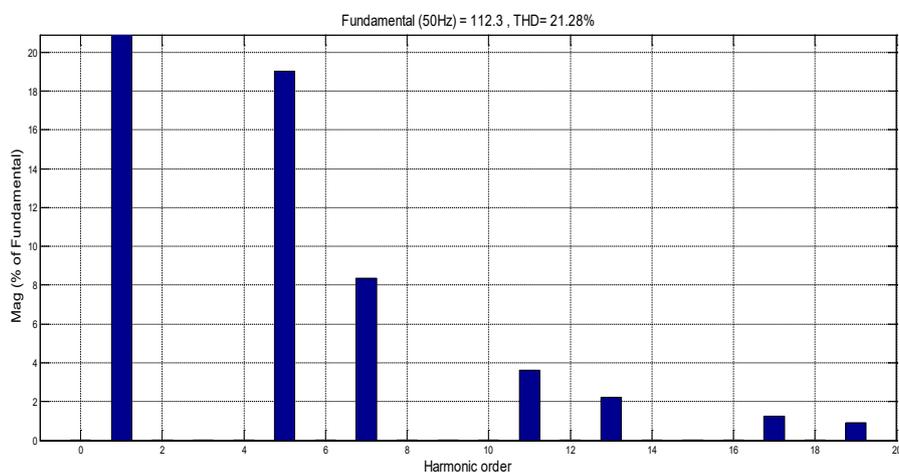


Figure III.6 : Analyse spectrale du courant de source (phase c).

L'analyse spectrale de ces figures nous montre qu'en plus du fondamental, les courants absorbés par la charge non linéaire sont très riches en harmoniques, avec un THD du fondamental égale à 21.28% pour les trois phases. Ces THD sont égaux car notre charge utilisée est équilibrée. On comparant ces résultats du THD avec celles imposées par la norme CEI 61000-3-2, on remarque qu'elles sont largement supérieures, donc cela exige un système de filtrage d'harmoniques.

III.3.2 Simulation après filtrage

Les paramètres utilisés lors de la simulation sont:

- Filtre de raccordement

$$L_f = 2e^{-3} H$$

$$R_f = 0.001 \Omega$$

- Bus continu

$$C = 1500e^{6/2} F$$

- Tension de référence

$$V_{dc}^* = 800 \text{ V}$$

Avec

L_f, R_f : Impédance du filtre de raccordement.

C : Capacité du bus continu.

V_{dc}^* : Tension de référence du bus continu.

- Régulateur PI

$$K_p = 200$$

$$K_i = 10$$

a. Courants de référence

La figure ci-dessous présente la forme d'onde des courants injectés par le filtre actif à travers le filtre de raccordement dans les trois phases du réseau, ces ondes s'annulent avec les harmoniques détectés par le système d'identification du filtre actif dans le réseau électrique afin d'avoir un signal sinusoïdal.

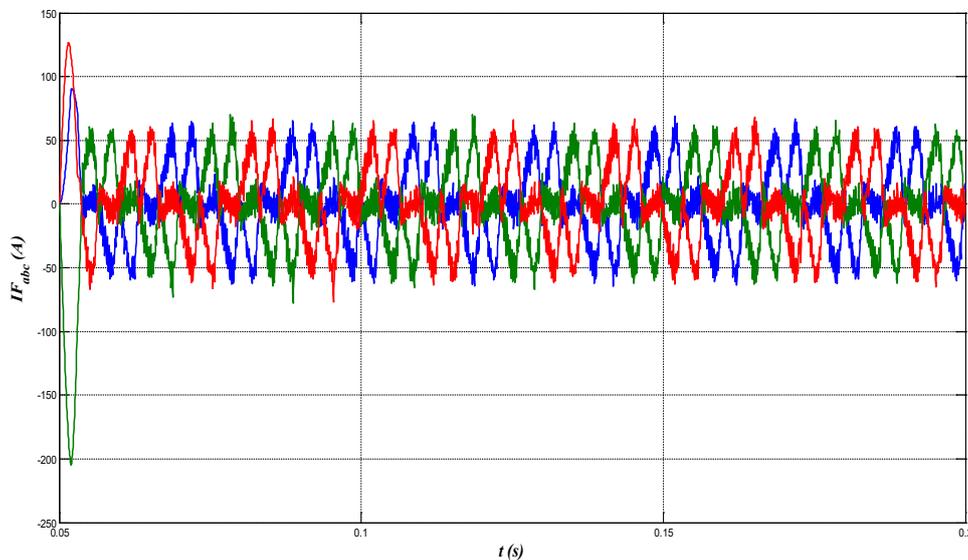


Figure III.7 : Courants de référence injectés.

b. Tension V_{dc} du bus continu

La figure ci-contre représente l'allure de la tension du bus continu qui est initialement nulle et qui se charge à travers les phases du réseau, le condensateur se charge et stabilise grâce à une boucle de régulation connecté directement au bloc d'identification afin de réguler les courants de référence.

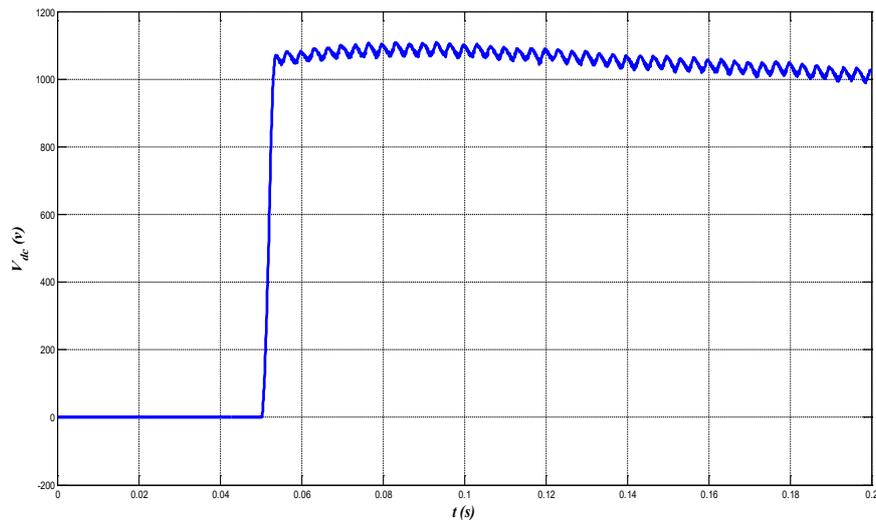


Figure III.8 : Tension V_{dc} du bus continu.

c. Courants de source après filtrage

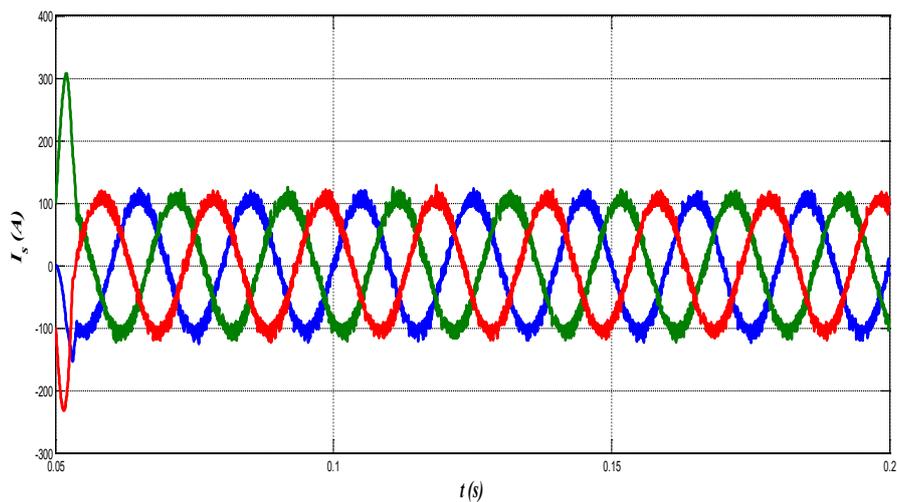


Figure III.9 : Courants de source après filtrage.

La figure ci-dessus, nous montre les courants triphasés générés par la source après l'élimination des harmoniques qui circulaient dans les trois phases du réseau. On remarque que les courants de la source sont bien compensés et ne présentent plus de perturbations et ont une forme plus proche d'une sinusoïde.

Les figures suivantes représentent l'analyse spectrale des courants de source.

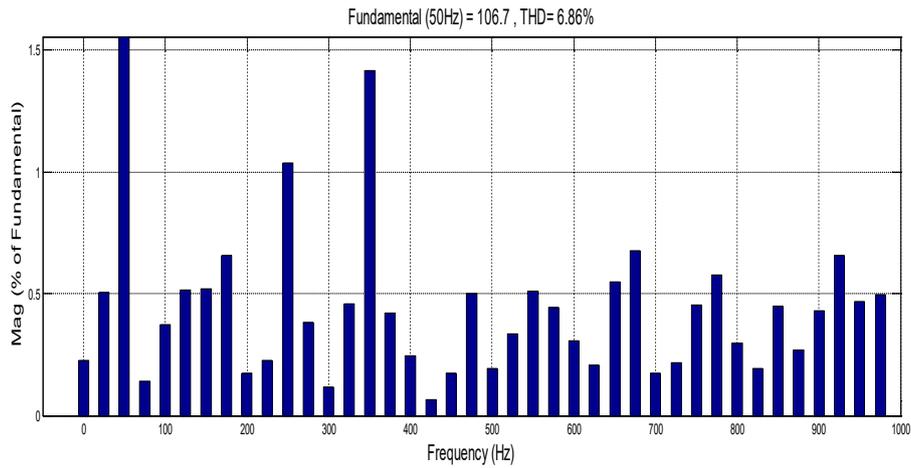


Figure III.10 : Analyse spectrale du courant de source (phase a).

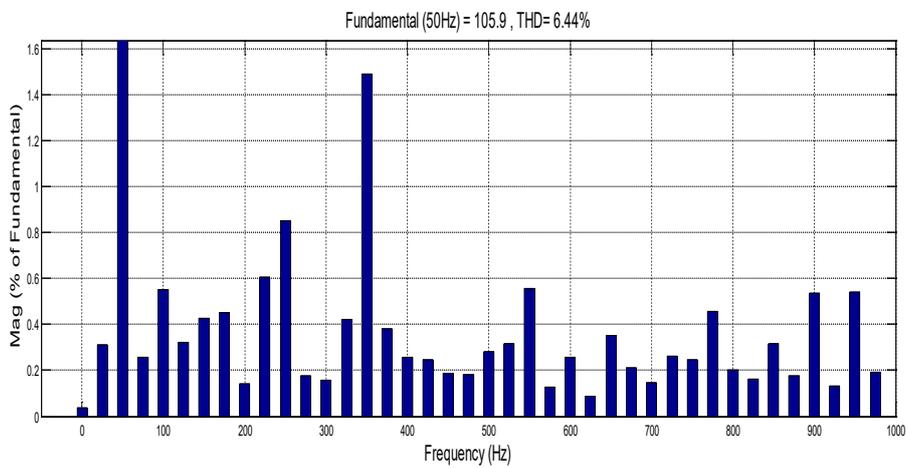


Figure III.11 : Analyse spectrale du courant de source (phase b).

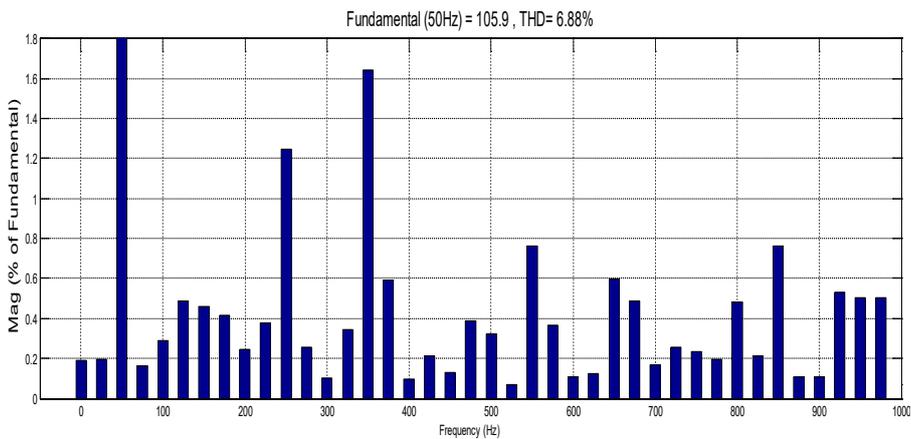


Figure III.12 : Analyse spectrale du courant de source (phase c).

L'analyse spectrale de ces figures nous montre que le THD de la fondamentale égale à 6.8% pour les trois phases. Ces THD sont égaux car notre charge utilisée est équilibrée.

On remarque que les résultats du THD s'adaptent avec la norme standard **CEI 61000-2-2**.

III.4 Conclusion

Notre étude dans cette partie a pour objectif de contrôler les perturbations et de commander le filtre actif de type T, avec la commande linéaire par un régulateur PI. Nous avons simulé sous MATLAB un réseau électrique au quel une charge non linéaire est y raccordée et nous avons obtenus les résultats avant et après le filtrage.

Le chapitre suivant sera consacré sur la commande par mode glissant du filtre actif de type T.

Chapitre IV

***Commande par mode glissant : Commande
par régulateur non linéaire par mode glissant***

IV.1 Introduction

Dans le but de réduire ou d'éliminer le phénomène de réticence de la commande par mode glissant d'ordre 1, de nombreuses solutions ont été proposées, comme la solution de couche limite. Une nouvelle solution basée sur la théorie des modes glissants d'ordre supérieur conduit à des lois de commande relativement simples et permet de réduire le phénomène de réticence, tout en conservant les performances du système. Ceux-ci sont caractérisés par une commande discontinue agissant sur les dérivées d'ordre supérieur de la variable de glissement, préservant les principaux avantages de la précédente approche. Ils réduisent le phénomène de réticence en garantissant même une meilleure précision de convergence par rapport aux imperfections du modèle ou d'organes de commande. L'ordre de glissement caractérise en particulier le degré de continuité des dynamiques du système au voisinage de la surface et correspond au nombre de dérivées continues de la variable à contraindre. Pour cela, des algorithmes de commande capables de générer des modes glissants de tout ordre doivent être synthétisés [23].

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à la technique de commande par mode glissant d'ordre 2 (Algorithme du super-twisting). Notre objectif n'est pas de traiter en profondeur cette technique de commande, mais plutôt de présenter un bref rappel sur la commande par mode glissant puis, d'appliquer cette technique dans la commande du filtre actif de type T.

IV.2 Principe de la commande par mode glissant

Le principe de la commande par modes glissants est de contraindre le système à atteindre une surface donnée appelée surface de glissement et d'y demeurer jusqu'à l'équilibre. Cette commande se fait en deux étapes : la convergence vers la surface et ensuite le glissement le long de celle-ci [23].

Cette configuration est représentée à la figure suivante [19].

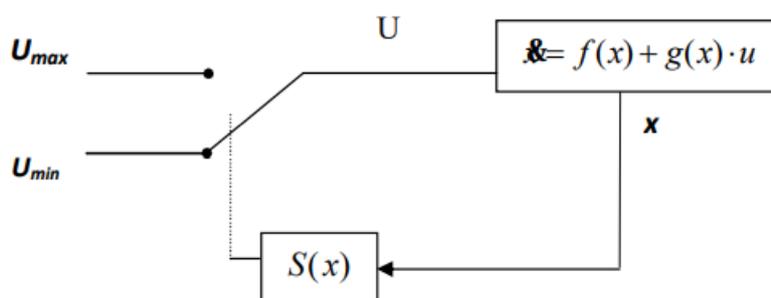


Figure IV.1 : Système de réglage à structure variable avec changement de la structure par commutation.

IV.3 Commande par mode glissant d'ordre supérieur

Les modes glissants d'ordre supérieur ont été introduits pour pallier au problème du chattering tout en gardant les propriétés de convergence en temps fini et de robustesse des commandes par modes glissants classiques ils permettent aussi d'améliorer la précision asymptotique [23].

IV.4 Commande par mode glissant d'ordre deux

Dans le cas d'un filtre actif, l'objectif de commande consiste à forcer le courant alternatif du filtre actif, ainsi que la tension du bus continu à suivre précisément leurs références, respectivement i_d^* , i_q^* et V_{dc}^* . Pour assurer cet objectif, en utilisant la commande par mode glissant, la première étape consiste à choisir la fonction de mode glissant. Ensuite, la commande doit forcer la trajectoire du système à évoluer sur une surface de glissement S sur laquelle la fonction de mode glissant est nul. De plus, la commande doit satisfaire la condition d'invariance qui consiste à maintenir l'état du système sur cette surface. Cette condition est généralement exprimée par une dérivée temporelle nulle de la fonction de mode de glissement.

$$\dot{\sigma} = 0 \quad (IV.1)$$

Pour les objectifs mentionnés ci-dessus, la fonction de mode glissant respectivement pour le courant du filtre actif alternatif et la tension du bus continu peut être présentée comme suit:

$$\sigma = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^* - i_d \\ i_q^* - i_q \\ v_{dc}^* - v_{dc} \end{bmatrix} \quad (IV.2)$$

Où i_{dq}^* et i_{dq} représentent le courant de référence et le courant réel alternatif du filtre actif, V_{dc} et V_{dc}^* sont la tension du bus continu et sa référence. La tension du bus continu dépend du courant alternatif, i_d et i_q , par conséquent, sa régulation est indirectement prise en compte dans la régulation du courant.

IV.4.1 Exemples de commandes par modes glissants d'ordre 2

Plusieurs algorithmes modes glissants d'ordre 2 ont été introduits, parmi ces algorithmes, on cite [23]:

- Algorithme du Twisting.
- Algorithme du Super Twisting.
- Algorithme du prescribed convergence law (Algorithme avec une loi de convergence prédéfinie).

IV.4.2 Choix du régulateur

En régime permanent, la commande en mode glissant force l'état du système à respecter les conditions ci-dessus, c'est-à-dire ($\sigma = 0, \dot{\sigma} = 0$). Habituellement, la loi de commande par mode glissant nécessite la mesure de la dérivée temporelle de la fonction de glissement, et fournit une forme discontinue, ce qui est parfois un inconvénient en raison du phénomène de claquement. La commande par mode glissant à super-twisting représente une alternative pour surmonter cette contrainte. En effet, elle fournit une sortie continue et ne nécessite que la mesure des fonctions de glissement. La sortie continue dans les trames dq ou abc est donc modulée à l'aide d'un PWM ou SVPWM avec une porteuse à fréquence fixe activer/désactiver l'onduleur à trois niveaux. La loi de commande du super-twisting est donnée par la formule suivante:

$$\begin{aligned} u_{dq} &= K_{p-dq} |\sigma|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(\sigma) + w_{dq} \\ \dot{w}_{dq} &= K_{i-dq} \text{sign}(\sigma) \end{aligned} \quad (IV.3)$$

Où K_{p-dq} et K_{i-dq} sont des vecteurs colonnes. Les entrées dans ces vecteurs sont respectivement les gains proportionnels et intégraux. Le schéma fonctionnel de ce régulateur est représenté dans la figure suivante.

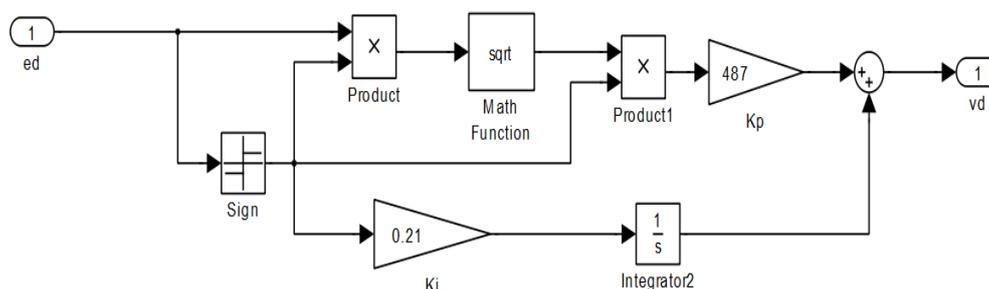


Figure IV.2 : Structure du régulateur du super-twisting.

Le régulateur se comporte comme un régulateur PI mais avec des gains non linéaires (à cause du signe (σ)). Ces gains peuvent être déduits comme suit.

$$\begin{aligned} K_p(\sigma) &= \frac{u_1}{\sigma} = \lambda \frac{|\sigma|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(\sigma)}{\sigma} \\ K_i(\sigma) &= \frac{\dot{u}_2}{\sigma} = \alpha \frac{\text{sign}(\sigma)}{\sigma} \end{aligned} \quad (IV.4)$$

Où

α et λ sont des gains proportionnels et intégraux fixes.

IV.5 Simulation et interprétation des résultats

Dans le but de résoudre le problème de l'influence des charges non linéaires sur les courants de source, on opte pour la simulation que nous allons exposer dans cette partie.

La figure suivante représente le schéma de simulation avec MATLAB/Simulink de l'ensemble réseau électrique, filtre actif et charge non linéaire.

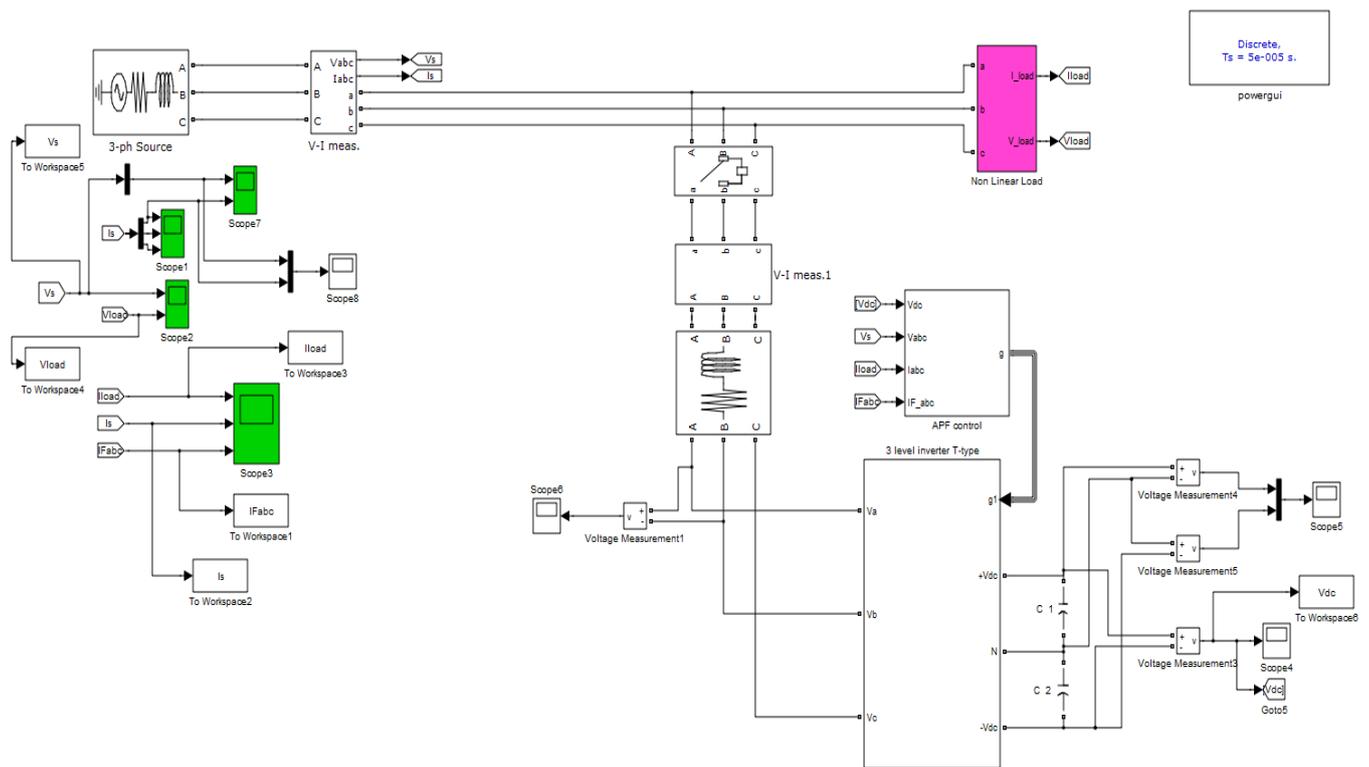


Figure IV.3 : Schéma de simulation.

Les paramètres de la simulation sont :

- **Tension entre phase**

$$U = 400 \text{ V}$$

$$V = 230 \text{ V}$$

- **Fréquence**

$$f = 50 \text{ Hz}$$

- **Impédance du réseau**

$$L = 0.006 \text{ H}$$

$$r = 0.001 \Omega$$

- **La charge non linéaire:**

Un pont redresseur à diodes débit sur une charge résistive, avec les paramètres suivants:

La valeur de la charge résistive $R_{ch} = 10 \Omega$.

IV.5.1 Simulation avant filtrage

a) Courants de source

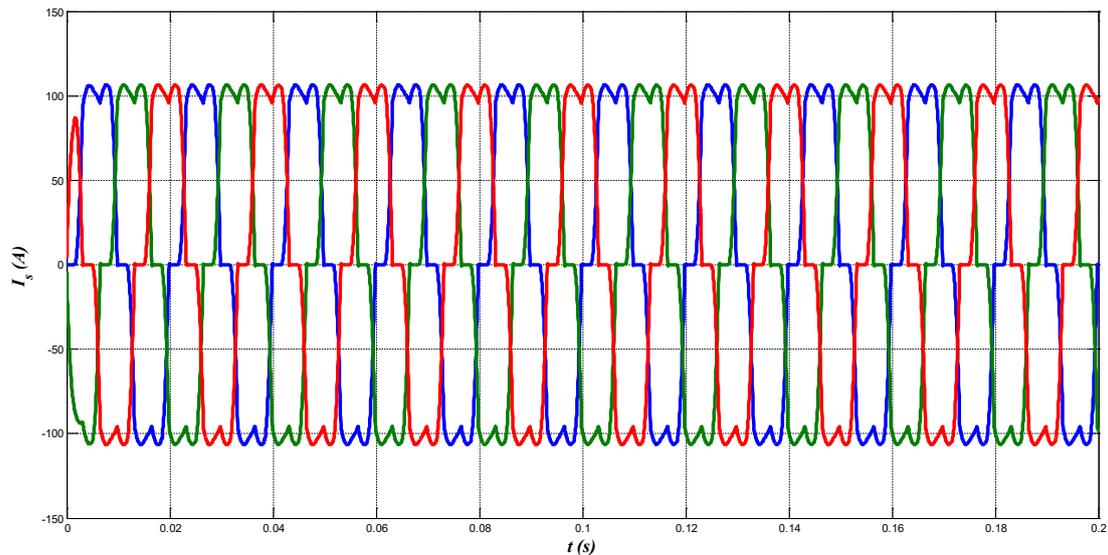


Figure IV.4 : Courants de source avant filtrage.

Comme le montre la figure (IV.4), les courants absorbés par la charge non linéaire ont une forme déformante. La propagation de ces ondes déformées provoque la pollution du réseau étudié

Les figures suivantes, montrent l'analyse harmonique des courants de source (a, b et c).

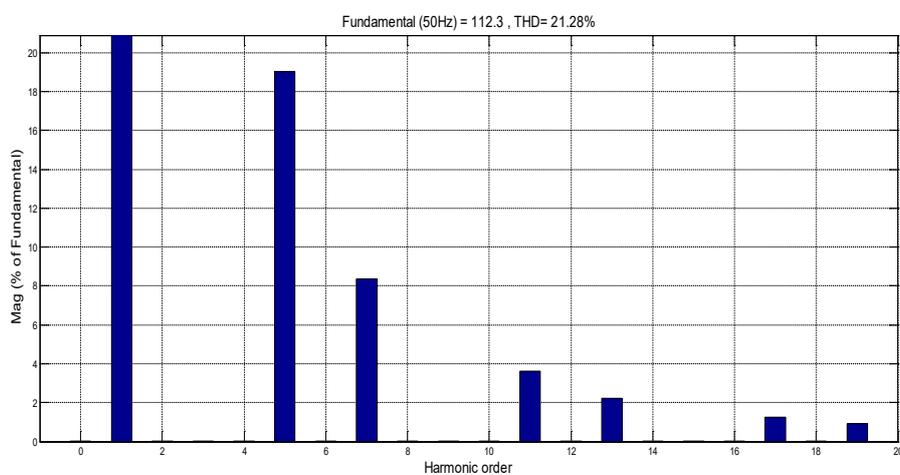


Figure IV.5 Analyse spectrale du courant de source (phase a).

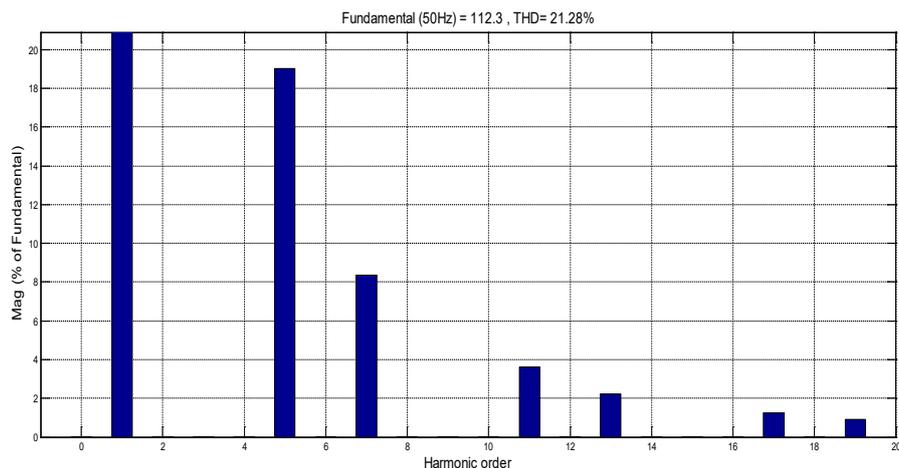


Figure IV.6 : Analyse spectrale du courant de source (phase b)

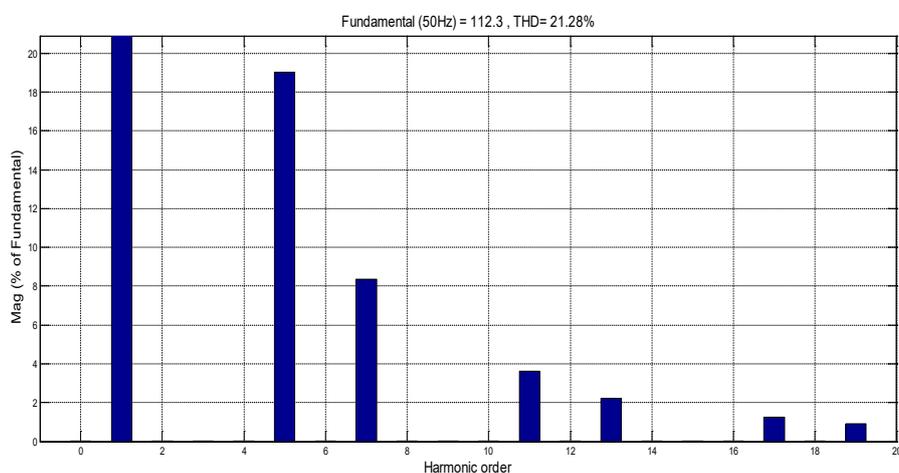


Figure IV.7 : Analyse spectrale du courant de source (phase c).

L'analyse spectrale de ces figures nous montre qu'en plus du fondamental, les courants absorbés par la charge non linéaire sont très riches en harmoniques, avec un THD du fondamental égale à 21.28% pour les trois phases. Ces THD sont égaux car notre charge utilisée est équilibrée. On comparant ces résultats du THD avec celles imposées par la norme CEI 61000-3-2, on remarque qu'elles sont largement supérieures, donc cela exige un système de filtrage d'harmoniques.

IV.5.2 Simulation après filtrage

Les paramètres utilisés lors de la simulation sont:

- Filtre de raccordement

$$L_f = 2e^{-3} H$$

$$R_f = 0.001 \Omega$$

- Bus continu

$$C = 1500e^{6/2} F$$

- Tension de référence

$$V_{dc}^* = 800 \text{ V}$$

Avec

L_f, R_f : Impédance du filtre de raccordement.

C : Capacité du bus continu.

V_{dc}^* : Tension de référence du bus continu.

- Régulateur PI

$$K_p = 487$$

$$K_i = 0.21$$

a. Courants de référence

La figure ci-dessous présente la forme d'onde des courants injectés par le filtre actif à travers le filtre de raccordement dans les trois phases du réseau, ces ondes s'annulent avec les harmoniques détectés par le système d'identification du filtre actif dans le réseau électrique afin d'avoir un signal sinusoïdal.

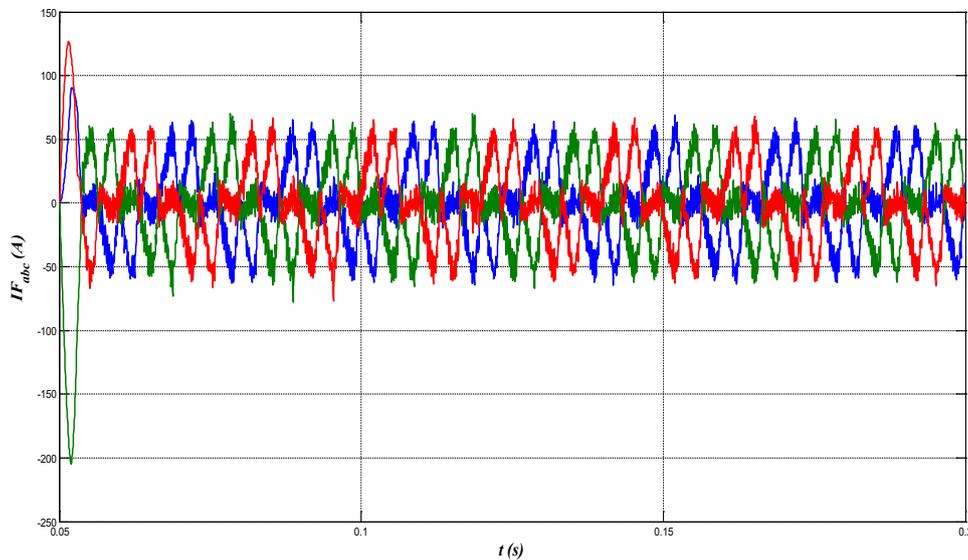


Figure IV.8 : Courants de référence injectés.

b. Tension V_{dc} du bus continu

La figure ci-contre représente l'allure de la tension du bus continu qui est initialement nulle et qui se charge à travers les phases du réseau, le condensateur se charge et stabilise grâce à une boucle de régulation connecté directement au bloc d'identification afin de réguler les courants de référence.

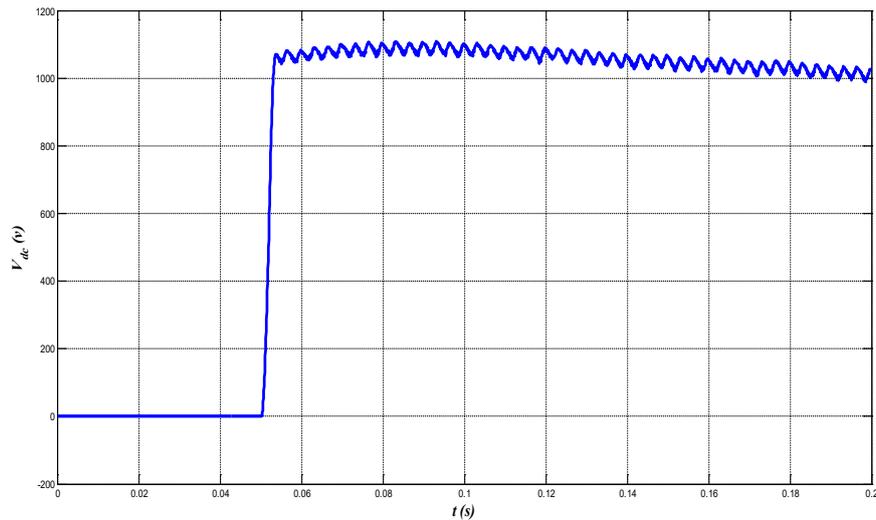


Figure IV.9 : Tension V_{dc} du bus continu.

c. Courants de source après filtrage

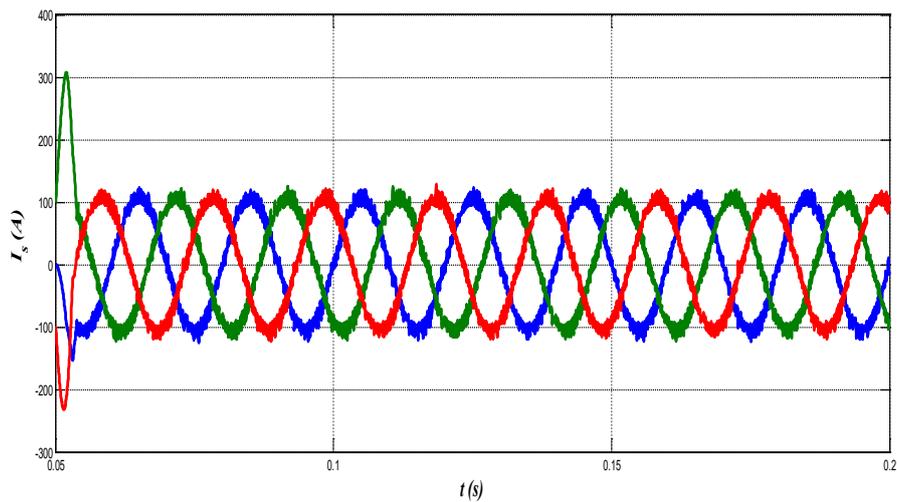


Figure IV.10 : Courants de source après filtrage.

La figure ci-dessus, nous montre les courants triphasés générés par la source après l'élimination des harmoniques qui circulaient dans les trois phases du réseau. On remarque que les courants de la source sont bien compensés et ne présentent plus de perturbations et ont une forme plus proche d'une sinusoïde.

Les figures suivantes représentent l'analyse spectrale des courants de source.

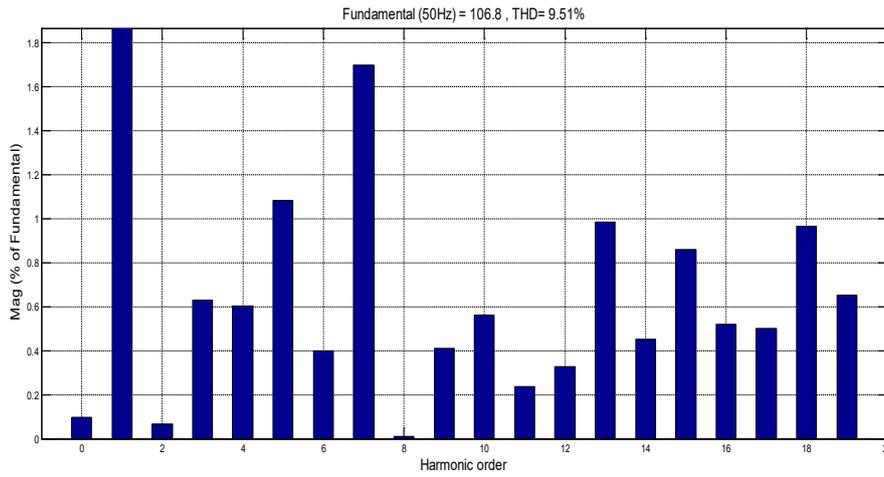


Figure IV.11 : Analyse spectrale du courant de source (phase a).

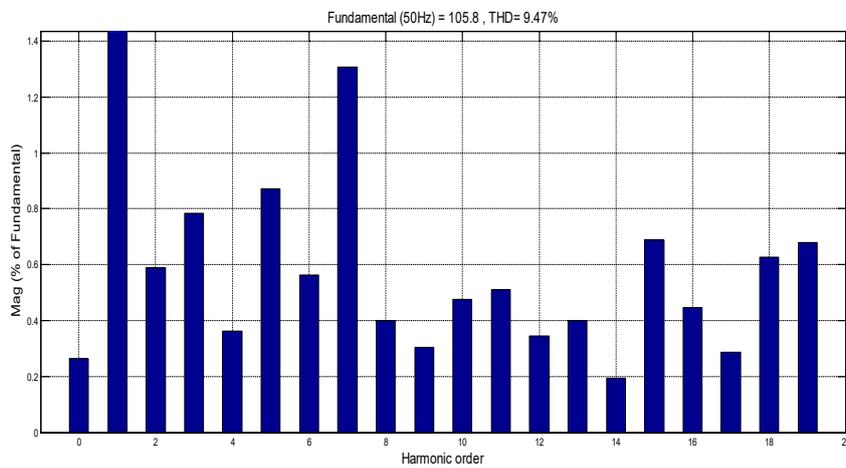


Figure IV.12 : Analyse spectrale du courant de source (phase b).

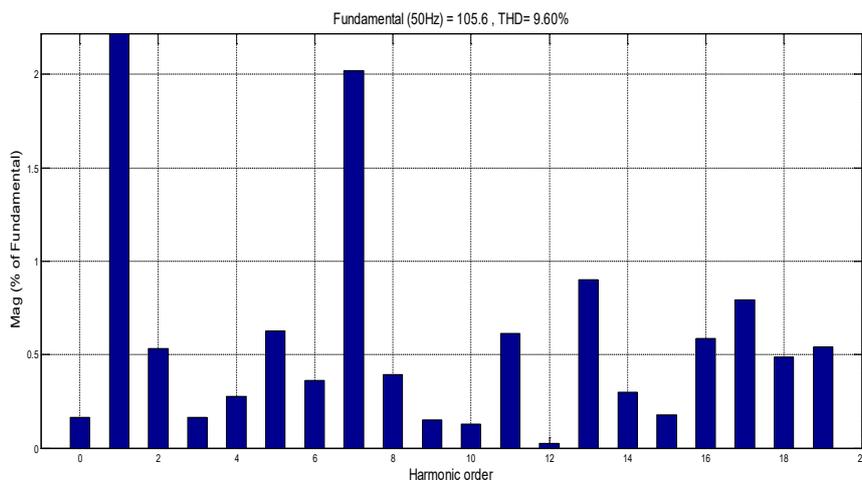


Figure IV.13 : Analyse spectrale du courant de source (phase c).

L'analyse spectrale de ces figures nous montre que le THD de la fondamentale égale à 9.50% pour les trois phases. Ces THD sont égaux car notre charge utilisée est équilibrée.

On remarque que les résultats du THD s'adaptent avec la norme standard **CEI 61000-3-2**.

IV.6 Conclusion

Notre étude dans cette partie a pour objectif de contrôler les perturbations et de commander le filtre actif de type T avec la commande par mode glissant d'ordre deux. Nous avons simulé sous MATLAB un réseau électrique au quel une charge non linéaire est y raccordée et nous avons obtenus les résultats avant et après le filtrage.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans un réseau de distribution, des différentes charges sont connectées, elles peuvent être linéaires ou non linéaires, équilibrées ou déséquilibrées. Une charge non linéaire, à base d'électronique de puissance, est la cause principale de perturbations dans un réseau de distribution. Cette charge impose un courant qui n'est pas proportionnel à la tension sinusoïdale, c'est-à-dire déformé [1].

Dans ce travail, nous avons effectué une analyse et une simulation pour le filtre actif de type T, qui est pour objectif la dépollution du réseau électrique de ces perturbations générées par les charges polluantes. Pour cela, nous avons partagé ce mémoire en quatre chapitres, qui sont les suivants :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les sources de perturbations, leurs origines ainsi que leurs impacts sur le réseau et les équipements électriques, comme on a présenté les solutions envisageables pour réduire leurs effets et les éliminer. Parmi les solutions proposées, le filtrage actif qui est une nouvelle solution pour la dépollution harmonique.

Deuxièmement nous avons étudié le filtre actif de type T, sa structure générale en présentant sa partie puissance et commande ainsi que son principe de fonctionnement et une modélisation pour le filtre actif de type T et l'onduleur à trois niveaux.

Le troisième chapitre a été concentré sur la commande linéaire par un régulateur proportionnel intégral et son application dans la commande du filtre actif. Les résultats de simulation ont montrés l'efficacité et la robustesse de cette méthode dans la commande du filtre actif et le maintient de la tension continue lors de la variation de la charge polluante.

Finalement, le dernier chapitre a été consacré à l'étude de la méthode de commande par mode glissant d'ordre deux. Cette méthode de commande a prouvé son efficacité dans la commande du filtre actif de type T en offrant des bons résultats du THD du courant côté source.

Bibliographie

Bibliographie

[1]	C.MADANI, L.BOUAITA, « Commande d'un filtre actif à quatre fils », Mémoire Master, Université A.MIRA-Béjaia, 2017/2018.
[2]	N.REGUIG, B.HERIZI « Etude et simulation d'un filtre actif de puissance », Mémoire de Master académique, Université Mohamed BOUDIAF-M'sila, 2017/2018.
[3]	O.MOUSSA, « Etude des harmoniques et technique de commande du filtre actif », Mémoire magister, Université de Batna 2.
[4]	R.KIFOUCHE, « Identification des harmoniques et génération du courant de référence (application au convertisseur statique) », Mémoire Magister, Université M'HAMED BOUGUARRA-Boumerdes, 2005.
[5]	M.MOSTEFA TOUNSI, « Compensation des harmoniques et des perturbations du réseau connecté à une charge non linéaire utilisant les convertisseurs statiques avancés », Thèse doctorat, Université Mohamed BOUDIAF-Oran, 2020/2021.
[6]	D.OULDABDESLAM, « Technique neuromimétique pour la commande dans les systèmes électrique : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension », Thèse doctorat, Université de HAUTE-ALSACE, 2005.
[7]	A.LAHMAR, « Filtrage et qualité d'énergie », Mémoire Master, Université Badji MOKHTAR-Annaba, 2017.
[8]	J.XU, « Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité », Thèse doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine, 20 janvier 1994.
[9]	M.GUERGAH, H.BENALLA, « Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif parallèle monophasé », 5 ^{ème} conférence internationale des énergies renouvelables (CIER-2017).
[10]	S.DAHMANI, « Elaboration de différentes techniques intelligentes pour le contrôle de convertisseurs statiques dédiés à la compensation active des harmoniques dans les réseaux électrique », Thèse Doctorat, Université Djilali LIABE de Sidi-Bel Abbas.
[11]	M.YETTOU, N.DEBLA, « Commande d'un filtre actif parallèle à trois niveaux (NPC) par différents stratégie de commande », Mémoire Master académique, Université Mohamed BOUDIAF-M'sila, 2017/2018.
[12]	A.LOPEZ DE HEREDIA BEMEO, « Commande avancée des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la montée en tension », Thèse Doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 14 novembre 2006.
[13]	N.ALLOUI, « Contribution à l'amélioration de la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques en utilisant les filtres hybrides », Thèse Doctorat, Université Batna 2, 2017.
[14]	M.FRENEA « Filtrage analogique ; généralité », Notes de cours, ENS Cachan-Antonne de Bretagne, 2003.

[15]	A.OMEIRI, « Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant », Thèse Doctorat d'état, Université Badji MOKHTAR-Annaba, 2007.
[16]	A.CHAOUI, « Filtrage actif triphasé pour charges non linéaire », Thèse Doctorat, Université Ferhat ABBES-Sétif.
[17]	V.Binh Ngo, M.Nguyen, T.Tran, Y.Lim, « Asimplified Model predictive control for T-type inverter with output LC filter », Article, energies, 22 décembre 2018.
[18]	U.Choi, « Diagnosis and Tolerant strategy of an open-switch fault for T-type three-level inverter system », Article, IEEE Transactions of industry applications, VOL 50, NO.1, janvier/février, 2014.
[19]	I.GHABANI, « Commande d'un filtre actif triphasé parallèle par différents régulateurs », Mémoire Magister, Université Mohamed KHEIDER-Biskra, 2010/2011.
[20]	M.BADRA, Z.DJERAR, A.DEHIRI, « Commande par mode glissant d'un filtre actif à quatre bras », Mémoire d'ingénieur d'état, Université de M'sila, 2011/2012.
[21]	M.ALALI, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », Thèse Doctorat de l'Université Louis PASTEUR, Strasbourg I, 2002.
[22]	M.SARRA, « Contribution à l'étude des filtres hybrides de puissance utilisés pour améliorer la qualité de l'énergie dans le réseau électrique de distribution », Thèse Doctorat, Ecole de technologie supérieure, Université du Québec, 14 septembre 2010.
[23]	I.DEGHBOUJJI, « Commande des systèmes non linéaires par mode glissant d'ordre supérieur », Mémoire Magister, Université Constantine 1, 2013.

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire s'intéresse à l'étude d'une technique de compensation, via un filtre actif de type T, à base d'un onduleur de tension à trois niveaux. Il a pour objectif de réduire et d'éliminer les perturbations causées par des charges non linéaires. L'identification des courants de références, le contrôle de la tension du bus continu et le contrôle des courants injectés par l'onduleur ont été élaborés. Pour l'identification, nous avons développé la méthode des puissances instantanées, grâce à une PLL (Boucle à verrouillage de phase) qui nous permet d'avoir une bonne identification de la séquence directe fondamentale des tensions perturbées. Pour le contrôle de l'onduleur, nous avons utilisé la commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) à fin d'engendrer des courants opposants aux harmoniques polluants. Finalement une simulation a été faite avec des résultats satisfaisants.

Abstract

The work presented in this dissertation focuses on the study of a compensation technique, via an active T-type filter, based on a three-level voltage inverter. Its objective is to reduce and eliminate disturbances caused by non-linear loads. The identification of reference currents, the control of the DC bus voltage and the control of the currents injected by the inverter have been developed. For the identification, we developed the method of instantaneous powers, thanks to a PLL (Phase Locked Loop) which allows us to have a good identification of the fundamental direct sequence of the disturbed voltages. For the control of the inverter, we used the pulse width modulation (PWM) control in order to generate currents opposing the polluting harmonics. Finally, a simulation has been done with satisfactory results.