

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :
Électrotechnique
Option : Énergies renouvelables en Électrotechnique

ETUDE DES ALGORITHMES DE FILTRAGE ACTIF DES HARMONIQUES DANS LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES POLLUÉS

Présenté par :

- LAHMAR Nassira
- YAHIAOUI Ahlem
- BELKHEIR Moustafa

Soutenu le : 29 /06/2021 devant le Jury :

M. LAOUER Mohammed	Pr	Centre Universitaire Naâma	Président
M. BENOTMANE BENAMARA Noureddine	MAB	Centre Universitaire Naâma	Encadreur
M. MOUFFAK Adnane	MCB	Université M. Stambouli Masscara	Co-encadreur
M. HABCHI Yacine	MCB	Centre Universitaire Naâma	Examineur





REMERCIEMENTS

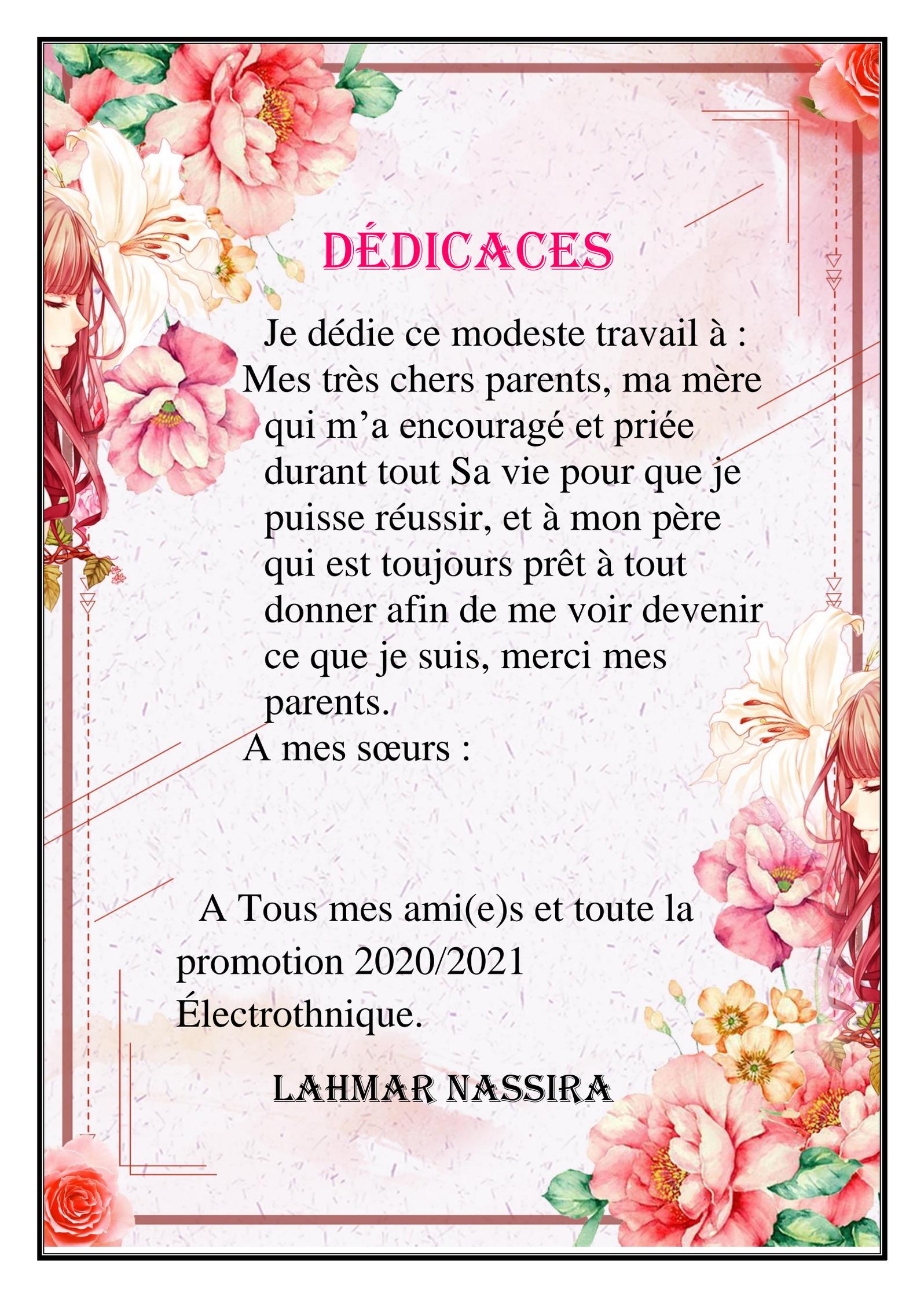
On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement de **Mr BENOTMANE BENAMARA NOUREDDINE**, on le remercie pour la qualité de son encadrement

Je Remercie Infiniment Le Co-encadreur :**MOFFAK ADNANE**

Nos profonds remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont aidé et soutenu de près ou de loin principalement à tous l'effectif de l'Université **SALHI AHMED**.





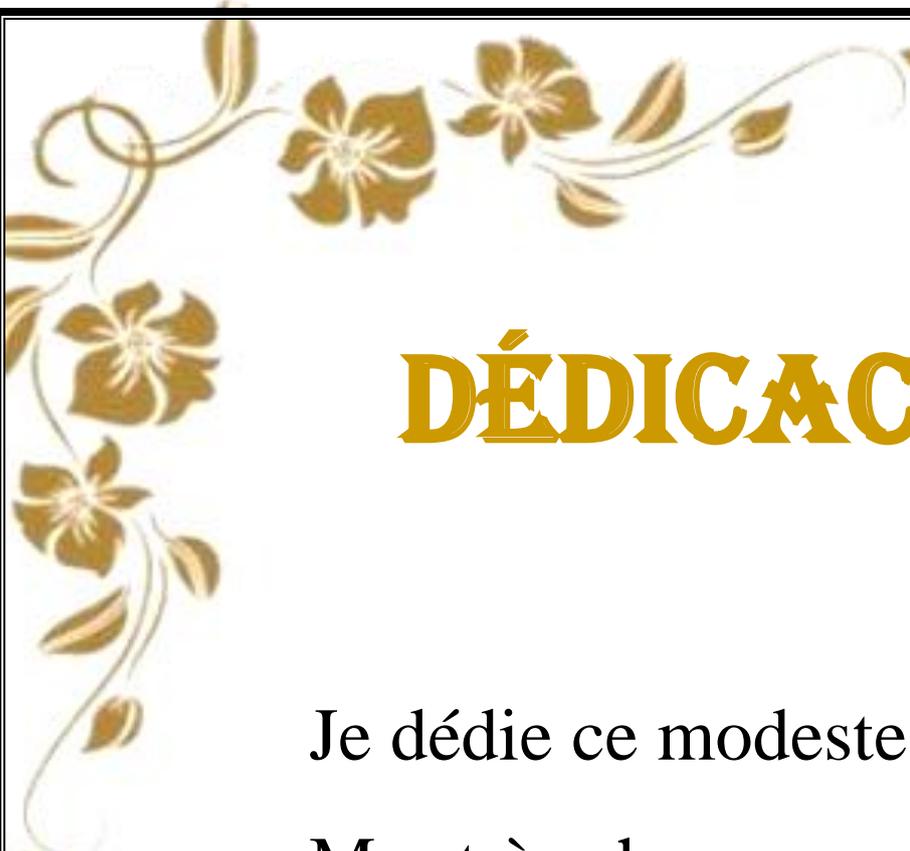
DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail à :
Mes très chers parents, ma mère
qui m'a encouragé et priée
durant tout Sa vie pour que je
puisse réussir, et à mon père
qui est toujours prêt à tout
donner afin de me voir devenir
ce que je suis, merci mes
parents.

A mes sœurs :

A Tous mes ami(e)s et toute la
promotion 2020/2021
Électrothnique.

LAHMAR NASSIRA



DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

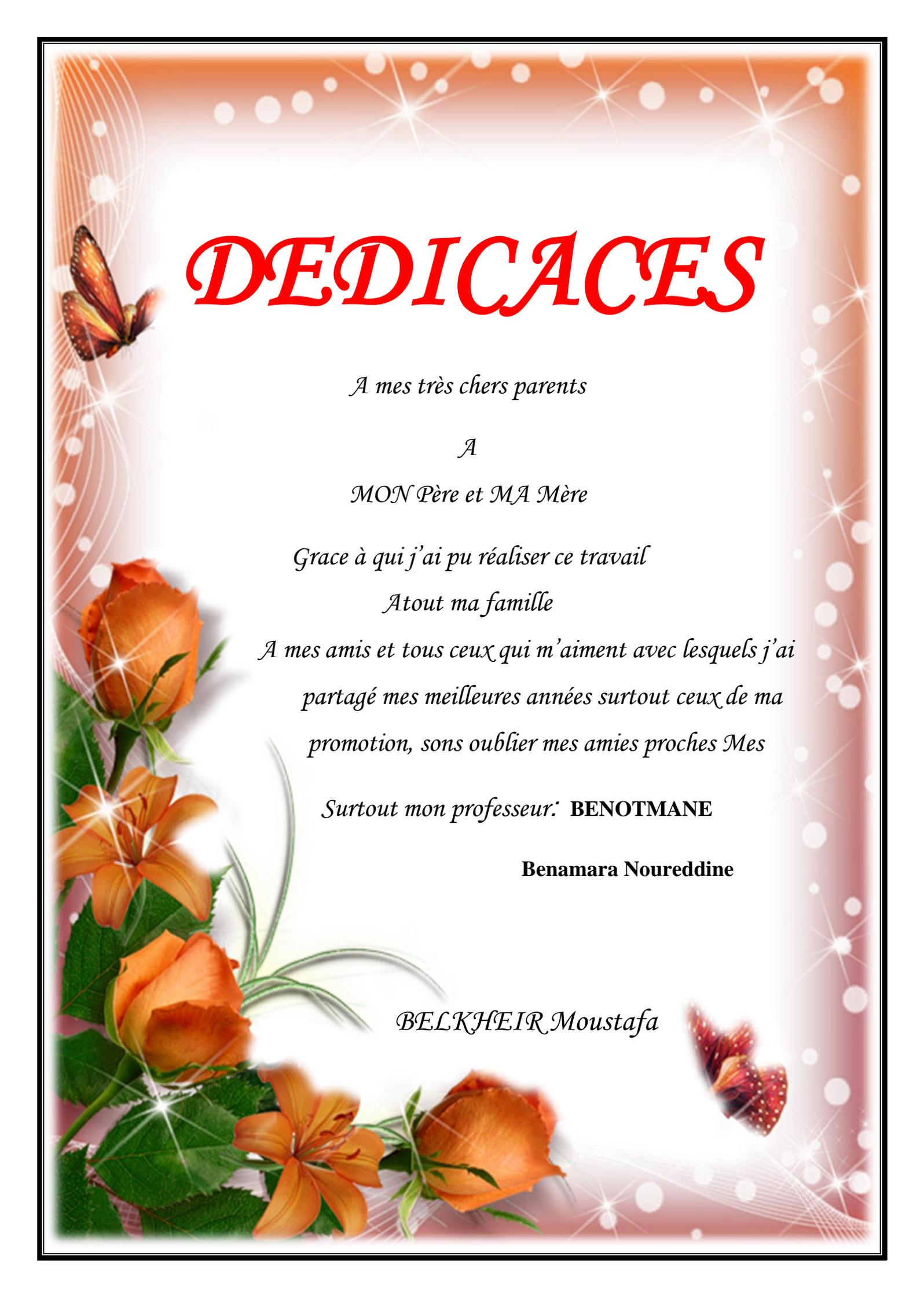
Mes très chers parents, mon père
qui est toujours prêt à tout donner afin
de me voir devenir ce que je suis,
merci mes parents.

A mes sœurs :

A Tous mes ami(e)s et toute la
promotion 2020/2021 Électrothnique.



AHLEM YAHIAOUI



DEDICACES

À mes très chers parents

À

MON Père et MA Mère

Grace à qui j'ai pu réaliser ce travail

À tout ma famille

*À mes amis et tous ceux qui m'aiment avec lesquels j'ai
partagé mes meilleures années surtout ceux de ma
promotion, sans oublier mes amis proches Mes*

*Surtout mon professeur: **BENOTMANE***

Benamara Noureddine

BELKHEIR Moustafa

الملخص

تسببت التطورات الأخيرة التي ظهرت في العديد من مجالات استخدام الطاقة الكهربائية، وخاصة في مجال إلكترونيات القوى في تدهور جودة الموجة الحالية المزودة بسبب ظهور التوافقيات في نقل وتوزيع الطاقة الكهربائية الشبكة، وبالتالي لها آثار ضارة على الأحمال الحساسة التي توفرها نفس الشبكة.

نظرًا لأن وجود هذه التوافقيات يرجع إلى الاستخدام المتزايد لهذه الأجهزة الملوثة، فإن معالجتها ترقى إلى مطالبة المستهلكين الملوئين بتقليل مستويات التوافقيات التي يضخونها في الشبكة إلى قيم مقبولة. تم اعتماد العديد من الحلول للتخلص من هذه التوافقيات: التصفية السلبية والتصفية النشطة. استخدام المرشح النشط هو الأكثر كفاءة وملاءمة.

في هذا العمل اقتربنا من مبدأ تشغيل المرشح النشط. لقد نظرنا إلى أنواعهم المختلفة من هذا الفلتر. تم تنفيذ خوارزميات التصفية النشطة على Matlab، وهما طريقة الإطار المرجعي المتزامن (SRF) وطريقة القدرة النشطة والمتفاعلة اللحظية. كما تم وصف دراسة مقارنة بين هاتين الطريقتين من تقنيات التصفية النشطة. كما تم توضيح نتائج المحاكاة في ظل بيئة ماتلاب للخوارزميات المختلفة المستخدمة. يتم إعطاء معدل التشويه التوافقي (TDH) الناتج عن كل طريقة. ويلاحظ أن طريقة SRF أكثر كفاءة في تقليل التوافقيات.

الكلمات المفتاحية: مرشح نشط على التوازي - THD (معدل التشويه التوافقي) - استراتيجية التحكم ، طريقة الإطار المرجعي المتزامن (SRF) - طريقة الطاقة النشطة والمتفاعلة اللحظية

RÉSUMÉ

Les récents développements apparus dans plusieurs domaines de l'utilisation de l'énergie électrique surtout dans le domaine de l'électronique de puissance, ont causée de la détérioration de la qualité de l'onde de courant fournie, en raison de l'apparition des harmoniques dans le réseau de transport et de distribution de l'énergie électrique, ayant ainsi des effets néfastes sur les charges sensibles alimentées par ce même réseau.

Puisque la présence de ces harmoniques est due à l'utilisation croissante de ces appareils pollueurs, leur traitement donc revient à exiger aux consommateurs pollueurs de réduire à des valeurs acceptables les taux des harmoniques qu'ils injectent dans le réseau.

Plusieurs solutions adoptées pour l'élimination de ces harmoniques : le filtrage passif et le filtrage actif. L'utilisation du filtre actif est la plus efficace et la plus appropriée.

Dans ce travail nous avons abordé le principe de fonctionnement du filtre actif. Nous avons examiné leurs différents types de ce filtre. Deux algorithmes de filtre actif sont implémentés sur Matlab, à savoir la méthode du référentiel lié au synchronisme (Synchronous Reference Frame : SRF) et la méthode des puissances active et réactive instantanées. Une étude comparative entre ces deux techniques de filtrage actif est aussi décrite. Des résultats de simulation sous environnement Matlab des différents algorithmes utilisés sont aussi illustrés. Le taux de distorsion harmonique (TDH) engendré par chaque méthode est donné. Il est constaté que la méthode SRF est beaucoup plus performante en réduction des harmoniques.

Mots-clés : *Filtre actif en parallèle- THD (Taux de Distorsion Harmonique) -Stratégie de commande, méthode Synchrone Référence Frame (SRF) - méthode des puissances active et réactive instantanées*

SUMMARY

Recent developments in several areas of the use of electrical energy, especially in the field of power electronics, have caused the quality of the current wave to deteriorate, due to the appearance of harmonics in the transmission and distribution network of electrical energy, thus having adverse effects on the sensitive loads fed by the same network. Since the presence of these harmonics is due to the increasing use of these polluting devices, their treatment therefore amounts to requiring polluting consumers to reduce to acceptable values the rates of the harmonics they inject into the network.

Since the presence of these harmonics is due to the increasing use of these polluting devices, their treatment therefore amounts to requiring polluting consumers to reduce to acceptable values the rates of the harmonics they inject into the network. Several solutions adopted for the elimination of these harmonics: passive filtering and active filtering. The use of the active filter is the most efficient and appropriate. In this work we discussed the working principle of the active filter. We looked at their different types of this filter.

Two active filter algorithms are implemented on Matlab, namely the synchronous reference frame (SRF) repository method and the instantaneous active and reactive power method

Key words: *Parallel active filter- THD (Harmonic Distortion Ratio) -Control Strategy, Synchronous Frame Reference (SRF) method - Instantaneous active and reactive power method*

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both ending in small circular curls.

Liste des Figures et des Tableaux

Table des Figures

Figure.I.1 : Fluctuation de tension & flicker.....	05
Figure.I.2 : Creux de tension.....	06
Figure.I.3 : Variation de fréquence.....	08
Figure.I.4 : Déséquilibre du système triphasé de tension.....	09
Figure.I.5 : Alternateur.....	10
Figure.I.6 : Dimensionnement de transformateur	11
Figure.I.7 : Redresseur triphasé à pont de graetz.....	12
Figure.I.8 : Inductance saturées.....	14
Figure II.1 : Principe de fonctionnement du filtre actif parallèle.....	19
Figure II.2 : Filtre actif série.....	20
Figure II.3 : Filtre actif parallèle.....	21
Figure II.4 : Filtre passif.....	21
Figure.II.5 : Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.....	22
Figure.II.6 : Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.....	23
Figure.II.7 : Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif.....	23
Figure.II.8 : Simulink diagram of SRF.....	26
Figure II.9 : Transformation from a-b-c to d-q-0 theory.....	26
Figure II.10 : Schéma fonctionnel de la stratégie de contrôle en cours basée sur SRF.....	27
Figure.II.11 : Schéma de principe du filtre utilise pour l'extraction des composantes alternatives de P et Q.....	29
Figure II.12 : Filtre actif commandé par la méthode du filtre Notch.....	31
Figure II.13 : Boucle de réglage de tension continu Vdc.....	33

Figure II.14 : Principe du contrôle par hystérésis.....	34
Figure II.15 : Principe de la commande par hystérésis.....	34
Figure II.16 : Structure d'un onduleur de tension triphasé.....	35
Figure III.1 : charge non linéaire triphasé	38
Figure III.2 : Source de curent phase (a).....	38
Figure III.3 : Source tension a 3 phases.....	38
Figure III.4 : Source de curent 3 phase.....	39
Figure III.5 : Charge de tension 3 phases.....	39
Figure III.6 : Charge de curent 3phase.....	39
Figure III.7 : Charge de curent phase (a).....	40
Figure III.8 : courant de source spectre harmonique THD%.....	40
Figure III.9 : spectre harmonique courant de source avant filtrage.....	40
Figure III.10 : Modèle Simulink de SAPF utilisant SRF.....	41
Figure III.11 : Diagramme de Commande par hystérésis.....	41
Figure III.12 : Source de tension 3phase.....	42
Figure III.13 : Source de courant (3) phase.....	42
Figure III.14 : Source de courant de phase (a).....	42
Figure III.15 : Charge de courant phase (a).....	42
Figure III.16 : Charge de courant 3 phases.....	43
Figure III.17 : Charge de tension de 3 phases.....	43
Figure III.18 : Pulsation signal.....	43
Figure III.19 : tension de capacité c_{dc} en borne onduleur.....	43
Figure III.20 : Courant de compensation fourni par de filtre phase (a) ifa.....	44

Figure III.21 : courant de source phase (a) après filtrage.....	44
Figure III.22 : spectre harmonique de courant après filtrage.....	44
Figure III.23 : charge non linéaire sans filtrage.....	45
Figure III.24 : la source tension de phase vsa.....	45
Figure III.25 : Courant de la source phase 1 isa.....	46
Figure III.26 : Allure de i_{sa} (a) avant filtrage.....	46
Figure III.27 : spectre harmonique de i_{sa} avant filtrage.....	46
Figure III.28 : Block de simulation après filtrage.....	47
Figure III.29 : Courant de la charge après de filtrage.....	47
Figure III.30 : allure i_{sa} avant filtrage.....	47
Figure III.31 : Impulsion de gâchette.....	48
Figure III.32 : allure de courant i_{sa} analyse FFT.....	48
Figure III.33 : spectre harmonique de i_{sa} après filtrage.....	48

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques sensibles.....	07
Tableau II.1 : Montre un récapitulatif des avantages et inconvénients de schémas de dépollution.....	24
Tableau III.1 : les Valeurs THD pour comparaison de méthode technique filtre actif harmoniques	49

Liste des symboles et abréviations

Symboles

V_s : tension de la source

I_s : Courant de source sinusoïdale

I_n : Courants harmoniques.

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

L_s : Inductance de source

F : Fréquence du réseau

R_s :Résistance de source

C_{dc} : Condensateur de stockage.

i_{ch} : Courant de la charge

V_{ch} : Tension de la charge non linéaire

R_f :Résistance du filtre actif

L_f : Inductance du filtre actif

i_{ref} : Courant de référence

AC : réseau alternative

DC : réseau continu

$F_{L_{PF}}$: Fréquence de coupure

I_α, I_β : Courants perturbateurs calculés dans le repère α - β

p : Puissance active.

q : Puissance réactive.

W : Pulsation du réseau

\bar{p} : Puissance continue liée a la composante fondamentale active du courant.

\bar{p} : Puissance continue liée a la composante fondamentale active du courant.

\bar{q} : Puissance continue liée a la composante fondamentale réactive du courant.

\tilde{p}, \tilde{q} : Puissance alternatives liées a la somme des composantes harmoniques du courant.

$p_{\alpha p}$: Puissance instantanée selon l'axe α .

$p_{\beta p}$: Puissance instantanée selon l'axe β .

$p_{\alpha q}$: Puissance instantanée selon l'axe α .

$p_{\beta q}$: Puissance instantanée selon l'axe β .

ΔV_c : variation de tension

Abréviations

THD : Taux harmonique distorsion.

THD_i : Taux harmonique distorsion de courant

PI: Régulateur proportionnel intégral.

ASI : Alimentations statiques interruptibles.

FAP : Filtre Actif Parallèle.

FAS: Filtre Actif série.

PLL: Boucle à verrouillage de phase.en anglais : phase-locked loop

SRF : Synchronous Reference Frame

FFT : Transformée de Fourier rapide

IGBT: Isolated Gate Bipolar Transformer

GTO: Gate Turn-off Thyristors

LPF : Low Pass Filter. Français : filtre passe bas

SAPF : Filtre de puissance active shunt .anglais : *Shunt Active Power Filter*

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left side and rounded corners. The word 'Sommaire' is centered within this border.

Sommaire

SOMMAIRE

Introduction Générale.....	01
CHAPITRE I : Généralités sur la Pollution Harmonique	
I.1.Introduction	02
I.2.Paramètres de la qualité de l'énergie électrique.....	02
I.3. Les principales sources d'harmoniques.....	03
I.4. Sources des harmoniques et leurs effets.....	03
I.5. Types Perturbations harmoniques en courant et en tension.....	04
I.5.1. Perturbations de type courant.....	04
I.5.1.1. Surintensité	05
I.5.1.2. Les surcharge.....	05
I.5.1.3. Les courts-circuits.....	05
I.5.2. Perturbations de type tension	05
I.5.2.1. Fluctuation de tension & flicker.....	05
I.5.2.2. Creux et coupures de tension	06
I.5.2.2.1. Sources des creux de tension	07
I.5.2.2.2. Effets et conséquences des creux de tension	07
I.5.2.3. Variation de fréquence	08
I.5.2.4.Déséquilibre du système de tension triphasé	09
I.5.2.4.1Conséquences du déséquilibre du système triphasé	09
I.6.Origine des harmoniques	10

I.6.1. Emission en tension	10
I.6.1.1. Alternateurs.....	10
I.6.1.2. Transformateurs.....	11
I.6.1.3. Alimentations statiques ininterrompibles (ASI)	11
I.6.2. Emission en courant	11
I.6.2.1. Le redresseur triphasé à thyristors	12
I.6.2.2. Les charges non linéaires passives	12
I.6.2.3. Les lampes	12
I.6.2.4. Les appareils à arc électrique	13
I.6.2.5. Convertisseur de courant	13
I.6.2.5.1. La commande en vitesse variable des moteurs à courant continu.....	13
I.6.2.5.2. La commande en vitesse variable des machines synchrones.....	13
I.6.2.5.3. Les électrolyseurs.....	14
I.6.2.5.4. Les inductances saturées.....	14
I.7. Conséquences des harmoniques.....	14
I.7.1. Effets instantanés.....	14
I.7.1.1. Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques.....	14
I.7.1.2. Troubles fonctionnels des micro-ordinateurs.....	15
I.7.1.3. Erreurs dans les appareils de mesure.....	15
I.7.1.4. Vibrations et bruits.....	15
I.7.2. Effets à terme.....	15
I.7.2.1. Echauffement des câbles et des équipements.....	15
I.7.2.2. Echauffement des condensateurs.....	16

I.7.2.3. Echauffement due aux pertes supplémentaires	16
I.8. Caractérisation des perturbations harmoniques.....	16
I.8.1. Taux de Distorsion Harmonique (THD).....	16
I.8.2. Le facteur de puissance lié à la consommation de l'énergie réactive.....	17
I.9. Conclusion.....	18

CHAPITRE II : Les Solutions Modernes de Filtrage Actif des Harmoniques

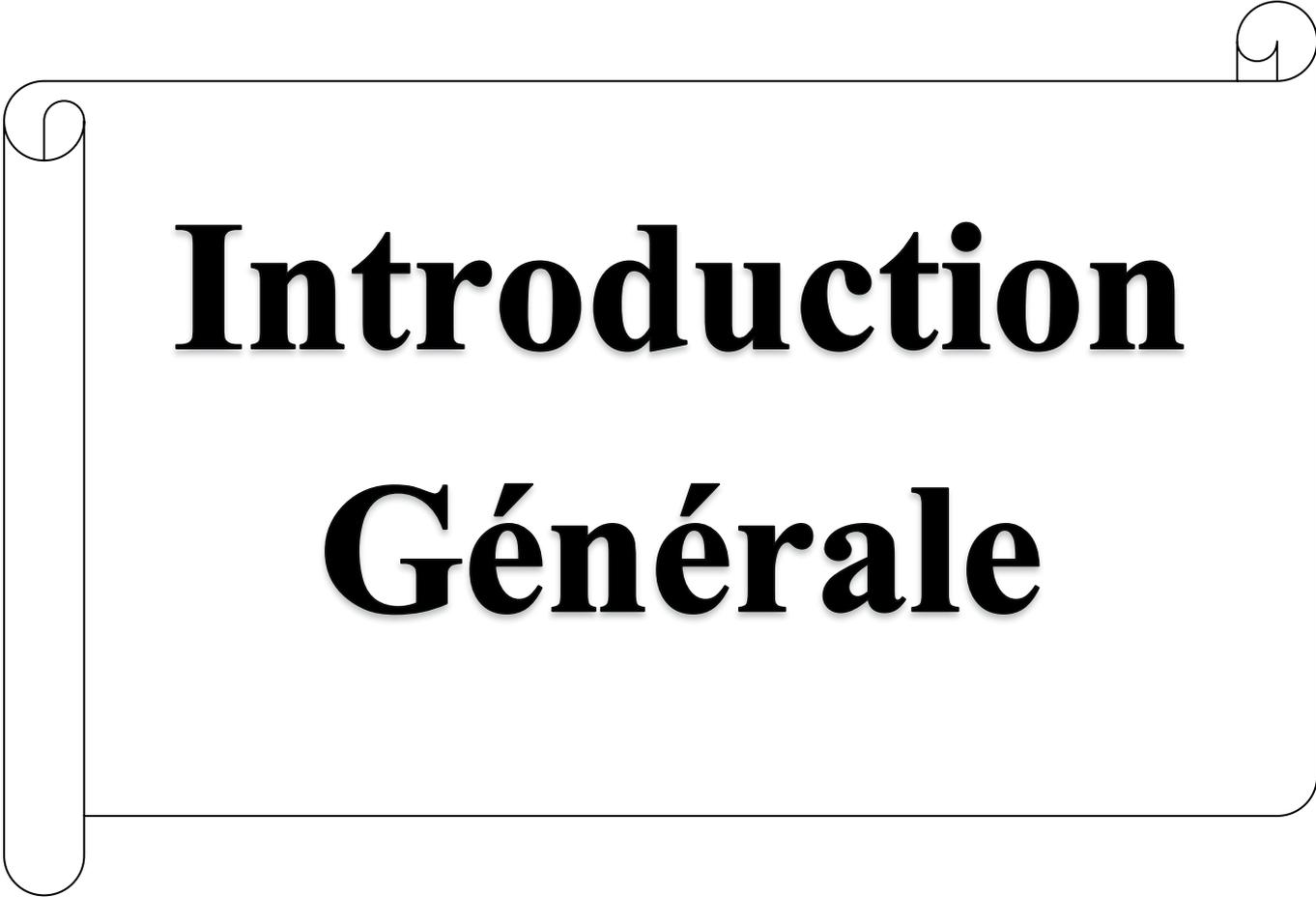
II.1. Introduction.....	19
II.2. Principe de fonctionnement du filtre actif.....	19
II.3. Classification des filtres actifs.....	20
II.3.1. Filtre actif série (FAS).....	20
II.3.2. Filtre actif parallèle.....	21
II.3.3. Filtrage passif.....	21
II.3.4. Filtre hybrides actifs et passifs	22
II.3.4.1. Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif	22
II.3.4.2. Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.....	22
II.3.4.3. Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif.....	23
II.4. Avantages et inconvénients des schémas de dépollution.....	23
II.5. Méthode de référentiel lié au synchronisme (Synchronous Reference Frame : SRF)...	24
II.6. Méthode des puissances active et réactive instantanées.....	27
II.7. Transformée de Fourier rapide (FFT).....	30
II.8. Algorithme de commande basé sur le filtre Notch.....	31

II.9. Régulation de la tension continue.....	32
II.10. Contrôleur Proportionnel et Intégral (PI).....	32
II.11. Commande par hystérésis.....	33
II.11.1. Inconvénients de la commande par hystérésis.....	34
II.12. Structure générale Onduleur de tension.....	35
II.13. Inductance de Couplage.....	36
II.14. Conclusion.....	36

CHAPITRE III : Simulation et interprétation des résultats

III.1. Introduction.....	37
III.2. Simulation en Méthode SRF : synchronous reference frame.....	37
III.3. Simulation en Méthode puissance instantanées.....	45
III.4. Interprétation des résultats de simulation.....	48
III.5. Comparaison des résultats.....	49
III.6. Conclusion.....	49
Conclusion Générale.....	50

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both featuring rounded ends and small circular motifs at the corners.

Introduction

Générale

INTRODUCTION GENERAL

Depuis de nombreuses années, le fournisseur d'énergie électrique s'efforce d'en garantir la qualité. Les premiers efforts se sont portés sur la continuité de service afin de rendre toujours disponible l'accès à l'énergie chez l'utilisateur.

Aujourd'hui, les critères de qualité ont évolué avec le développement des équipements où l'électronique prend une place prépondérante dans les systèmes de commande et de contrôle et qui entraîne de plus en plus de problèmes de perturbations au niveau des réseaux électriques.

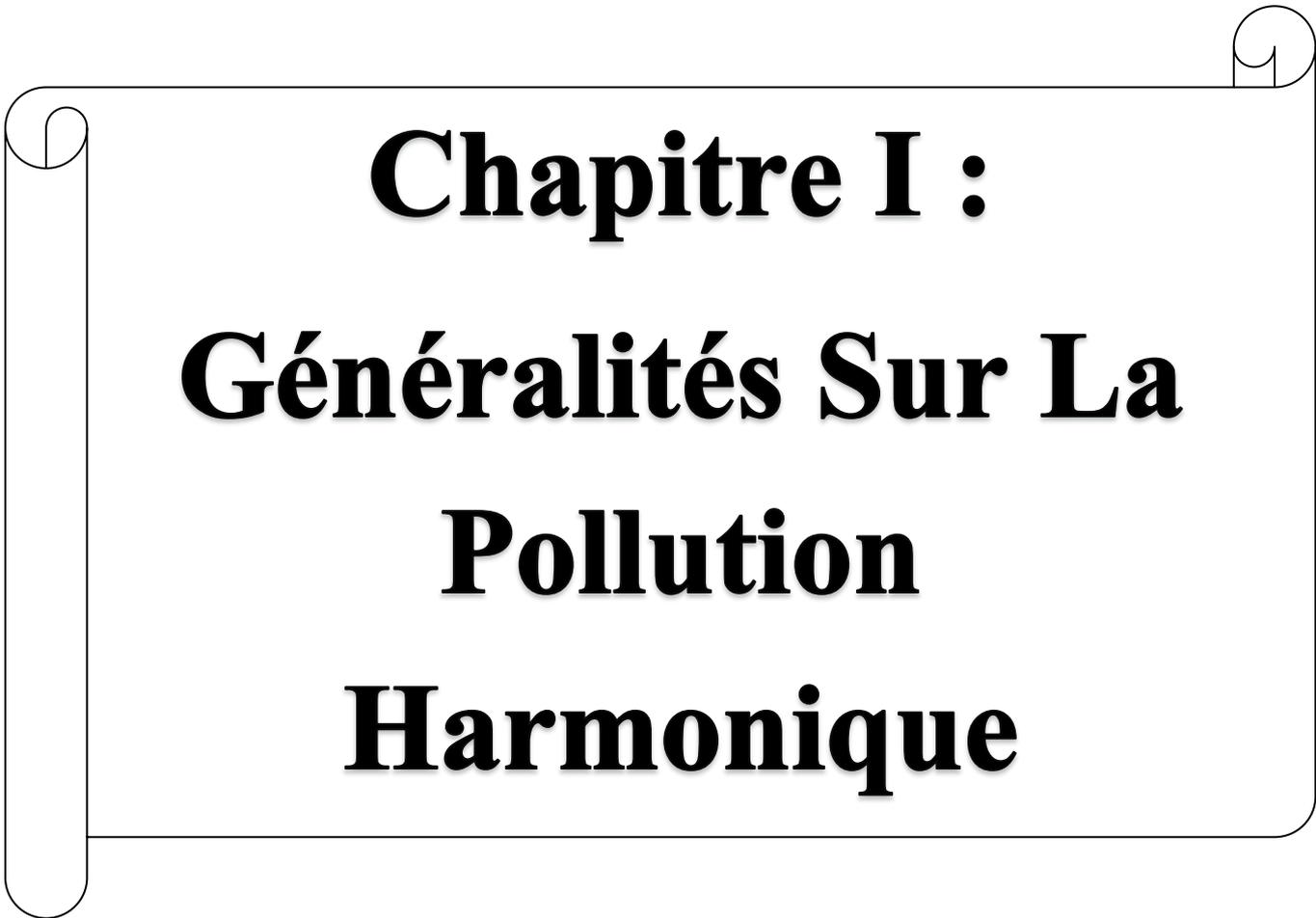
D'un côté, l'expansion de l'électronique de puissance et l'utilisation de plus en plus des équipements électroniques (redresseurs, gradateurs, cyclo-convertisseurs, ordinateurs, radio, imprimantes, téléviseurs, etc.) ont fait que le problème de la pollution des réseaux électriques par les harmoniques s'intensifie rapidement. On appelle ces équipements des charges non linéaires.

La problématique des harmoniques dans le réseau électrique, également appelée pollution harmonique, n'est pas un phénomène nouveau. La distorsion harmonique est générée par les charges non linéaires connectées au réseau et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau. Dans le cadre de ce mémoire on s'intéresse à limiter cette pollution par une technique dite : filtre actif des harmoniques. A cet effet, nous avons structuré notre étude de la manière suivante:

Le premier chapitre commence par la question des harmoniques, origine et caractérisation, conséquences et effets négatifs sur le réseau et sur les récepteurs et les charges non linéaires.

Dans le deuxième chapitre, nous décrivons des solutions classiques et modernes et un état de l'art des filtres actifs. Un intérêt particulier est réservé aux méthodes telles que le référentiel lié au synchronisme (en anglais : Synchronous Reference Frame : SRF) et les puissances active et réactive instantanées. La commande hystérésis et PI (proportionnelle et intégrale) est aussi abordée.

Le Troisième chapitre concerne les résultats de l'étude du filtre actif en simulation sous environnement Matlab et la stratégie de commande qui se base sur les calculs des puissances active et réactive instantanées(PQ) et le référentiel lié au synchronisme (SRF). Une étude comparative est aussi illustrée. Finalement une conclusion générale est donnée à la fin de ce mémoire.

A decorative border resembling a scroll, with rounded corners and a slight shadow effect, framing the central text.

Chapitre I :
Généralités Sur La
Pollution
Harmonique

I.1.Introduction :

L'utilisation des appareils électriques est de plus en plus intense que ce soit pour des applications industrielles ou domestiques. Cependant la plupart de ces appareils tels que les redresseurs, les gradateurs, le matériel informatique, les appareils de climatisation ou encore les éclairages à base de tubes fluorescents absorbent des courants non sinusoïdaux, ce qui provoque des distorsions harmoniques dans l'ensemble du réseau électrique. Ces harmoniques peuvent perturber le fonctionnement normal de certains équipements électriques voir même les endommager.

Toutefois, le rôle des réseaux électriques est de fournir aux consommateurs de l'énergie électrique avec une parfaite continuité, sous forme de tension parfaitement sinusoïdale ayant des valeurs d'amplitude et de fréquence préétablies en fonction du point de raccordement. Afin d'atteindre cet objectif, plusieurs méthodes de dépollution harmonique sont étudiées, parmi elles les filtres actifs qui sont une alternative très intéressante du point de vue rendement, fiabilité et coût. Dans ce chapitre, nous présentons d'abord les différentes sources d'harmoniques et leurs effets sur l'ensemble des équipements électriques, nous abordons ensuite les différentes stratégies de dépollution de ces harmoniques [1].

I.2.Paramètres de la qualité de l'énergie électrique :

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants:

- Les fluctuations,
- le déséquilibre,
- la fréquence,
- la forme d'onde.

La qualité de l'énergie peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres définis précédemment. [2]

On a donc quatre possibilités distinctes de perturbation.

I.3. Les principales sources d'harmoniques :

L'arrivée des semi-conducteurs de puissance dans l'industrie avec les possibilités de non linéarité que ceci comporte, a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux. À cet effet, il faut aujourd'hui que l'ingénieur en électrotechnique connaisse la provenance et les effets des harmoniques sur les équipements qu'il installe ou qu'il gère. Mieux encore, s'il se présente un problème d'harmoniques, il doit pouvoir proposer des solutions.

En principe, les harmoniques proviennent de charges dont la caractéristique tension/courant n'est pas linéaire, comme c'est le cas avec les convertisseurs électroniques de puissance, des entraînements de moteurs, les alimentations à découpage, les fours à arc, les machines à souder, etc. En théorie, tous les procédés comportant de l'électronique, quelle que soit leur puissance, produisent des courants riches en harmoniques dont le spectre dépend beaucoup de la nature de la charge. Ces courants harmoniques circulent à travers les impédances du réseau et par suite créent des tensions harmoniques qui peuvent perturber le fonctionnement des autres utilisateurs raccordés à la même source. L'impédance de la source aux différentes fréquences harmoniques a donc un rôle fondamental dans la sévérité de la distorsion harmonique en tension. À remarquer que si l'impédance de la source est faible (Puissance de court-circuit élevée) la distorsion harmonique en tension sera aussi faible. Toutefois, on peut considérer qu'il existe deux sortes : d'harmoniques dans les systèmes d'exploitation d'énergie électrique soient les harmoniques caractéristiques et les harmoniques aléatoires. Les harmoniques caractéristiques sont généralement produits par les convertisseurs d'électronique de puissance qui, en réalité, laissent passer un courant qui n'est pas sinusoïdal même si la tension demeure sinusoïdale. Quant aux harmoniques aléatoires, ils sont générés par des phénomènes non linéaires comme la variation de la résistance d'un four à arc alimenté par une tension sinusoïdale [3].

I.4 Sources des harmoniques et leurs effets :

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non-linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques (les harmoniques les plus

importants étant les harmoniques 5, 7, 11 et 13). Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les utilisateurs alimentés par le même réseau électrique.[4]

La présence d'harmoniques de courant ou de tension conduit à des effets néfastes sur le réseau de distribution, comme par exemple :

-L'échauffement des conducteurs, des câbles, des condensateurs et des machines dû aux pertes cuivre et fer supplémentaires,

-L'interférence avec les réseaux de télécommunication, causée par le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et les réseaux de télécommunication qui peut induire dans ces derniers des bruits importants,

-Le dysfonctionnement de certains équipements électriques comme les dispositifs de commande et de régulation,

-En présence d'harmoniques, le courant et la tension peuvent changer plusieurs fois de signe au cours d'une demi-période. Par conséquent, les équipements sensibles au passage par zéro de ces grandeurs électriques sont perturbés,

-Les fréquences de résonance des circuits formés par les inductances du transformateur et les capacités des câbles sont normalement assez élevées, mais celles-ci peuvent coïncider avec la fréquence d'un harmonique ; dans ce cas, il y aura une amplification importante qui peut détruire les équipements raccordés au réseau,

-La dégradation de la précision des appareils de mesure,

-Des perturbations induites sur les lignes de communication, rayonnement électromagnétique notamment [5].

I.5 Types Perturbations harmoniques en courant et en tension :

I.5.1 Perturbations de type courant :

Les courants perturbateurs comme les courants harmoniques, déséquilibrés, et la puissance réactive sont majoritairement émis par des charges non linéaires, à base d'électronique de puissance, et/ou déséquilibrées, sans pour autant négliger les

I.5.1.1 Surintensité :

Dans un circuit électrique, la surintensité est atteinte lorsque l'intensité du courant dépasse une limite jugée supérieure à la normale, ces causes sont multiples.

I.5.1.2. Les surcharge :

Elles interviennent quand un grand nombre d'appareils sont alimentés en même temps ou lorsqu'un de ces appareils consomme trop de puissance.

I.5.1.3. Les courts-circuits :

Le courant de court-circuit est en général une forte intensité produite par la mise en connexion de deux points (ou plus) d'un circuit électrique entre lesquels il y a une différence de potentiel, par un conducteur de résistance négligeable [6].

I.5.2. Perturbations de type tension :

Les perturbations de tension comme les creux, les déséquilibres et les harmoniques de tension trouvent généralement leurs origines dans le réseau électrique lui-même mais parfois également dans les charges.

I.5.2.1 Fluctuation de tension & flicker :

Les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension. Ces fluctuations se situent dans les limites de variation normale de la tension, c'est-à-dire dans la tolérance de $\pm 10\%$ autour de la tension nominale, ils sont principalement dus à des charges industrielles rapidement variables comme les machines à souder, les fours à arc.

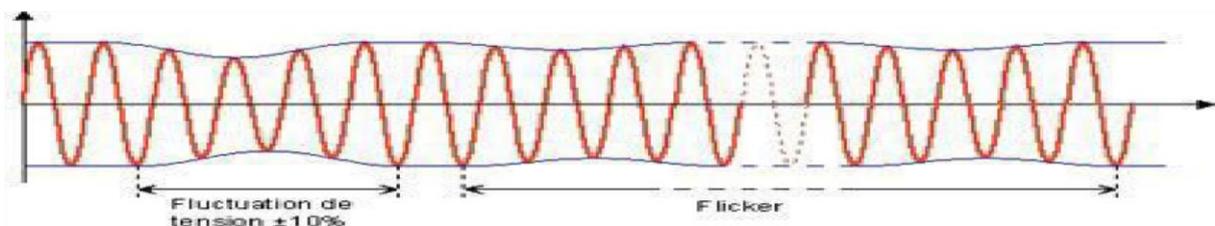


Figure.I.1. Fluctuation de tension & flicker

Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant une gêne visuelle perceptible pour une variation de 1 % de la tension.

Ce phénomène de papillotement est appelé flicker.

Ces perturbations sont générées par deux types d'équipement :

Les fours à arcs qui produisent des variations erratiques permanentes de tension, dont le contenu spectral est situé dans la bande 0.5 à 25 Hz

Les machines à souder qui provoquent des variations souvent plus périodique, à des intervalles de temps de quelques secondes. Du fait de leur faible amplitude, ces fluctuations n'ont pas d'effet sur le fonctionnement des équipements électriques. Leurs conséquences est plutôt d'ordres physiologique : il s'agit de la perception par l'oeil des fluctuations de luminosité des appareils d'éclairage, liées aux fluctuations de tension [7].

I.5.2.2 Creux et coupures de tension :

Un creux de tension est une diminution brusque de la tension de fourniture U_f . Cette diminution, située entre 90% et 10% de la tension nominale U_n , est suivie du rétablissement de la tension après un court laps de temps. Un creux de tension peut durer de 10 ms à 3 mn. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. Il y a deux types de phénomène à l'origine des creux de tension :

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

Ceux liés aux phénomènes aléatoires, comme la foudre ou tous les courts-circuits accidentels sur les réseaux de distribution, ou les réseaux internes des clients (défaut d'isolation, blessure de câble, projection de branches sur les lignes aériennes).

Les creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles et tertiaires. En effet, ce type de perturbation peut causer des dégradations de fonctionnement des équipements électriques qui peuvent aller jusqu'à la destruction totale de ces équipements [8].

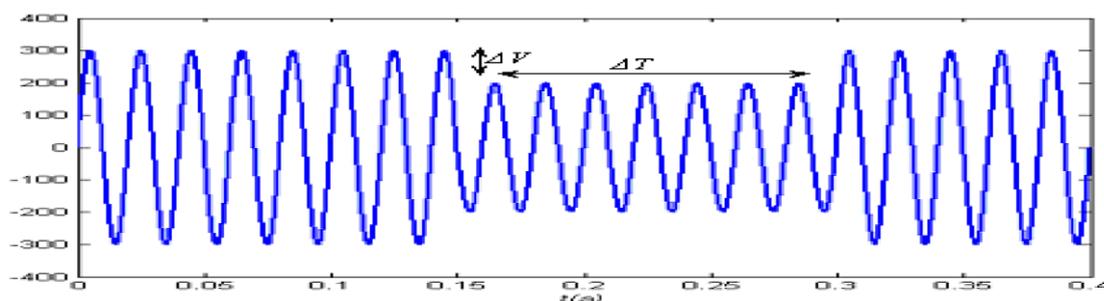


Figure.I.2.Creux de tension.

I.5.2.2.1 Sources des creux de tension :

La principale source de creux de tension et de coupures brèves sont les courts-circuits et le démarrage de machines de forte puissance (asynchrones essentiellement). En général, le courant des moteurs atteint au moment de leur démarrage 5 à 6 fois le courant nominal et diminue progressivement lorsque la machine se rapproche de sa vitesse nominale. Cette surintensité produit une chute de tension qui décroît avec la diminution du courant. Les creux de tensions engendrés par le démarrage des moteurs de forte puissance durent entre quelques secondes et quelques dizaines de seconde et se caractérisent par des chutes de tension sur les trois phases.

Les creux de tension peuvent également être engendrés par la saturation des transformateurs ou des modifications dans la structure du réseau. Cependant, ces perturbations provoquent rarement des chutes de tension importantes. Les creux de tension sont les perturbations électriques les plus pénalisantes du fait de leur fréquence et de la sensibilité de nombre d'appareillages présents dans les réseaux industriels. Il faut néanmoins souligner que les coupures brèves peuvent avoir des conséquences plus graves (à la reprise), mais sont bien moins fréquentes [9].

I.5.2.2.2 Effets et conséquences des creux de tension :

Les creux et les coupures de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de nombreuses installations industrielles, tertiaires et domestiques raccordées au réseau. En effet, ce type de perturbation est la cause la plus fréquente de problèmes de qualité d'énergie qui peut se traduire par des conséquences néfastes, allant de la dégradation de fonctionnement des équipements électriques jusqu'à leur destruction totale. Le Tableau 1.1 résume les conséquences néfastes causées par les creux de tension sur quelques matériels industriels et tertiaires sensibles [10].

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

Type d'équipement	Conséquences néfastes
Systèmes éclairage	Moins de luminosité, extinction et réallumage

Systèmes a base d'électronique de puissance	Arrêt ou mauvais fonctionnement des équipements
Dispositifs de protection	Dèclenchement et ouverture des contacteurs
Moteurs asynchrones	Ralentissement. décrochage. surintensité au Retour de la tension
Moteurs synchrones	Perte de synchronisme. Dècrochage et arrêt du moteur
Variateurs de vitesse pour un moteur à courant continu –	en mode onduleur : destruction des protections – en mode redresseur : ralentissement de la machine
Variateur de vitesse pour un moteur asynchrone	Ralentissement décrochage surintensité au retour de la tension- destruction éventuelle de matériel au niveaux convertisseur

I.5.2.3 Variation de fréquence :

Les réseaux de distributions ou de transports ont une fréquence constante, sa variation est très rare sauf dans des circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau.

Dans les conditions normales d'exploitations, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle de 50 Hz $\pm 1\%$ [11].

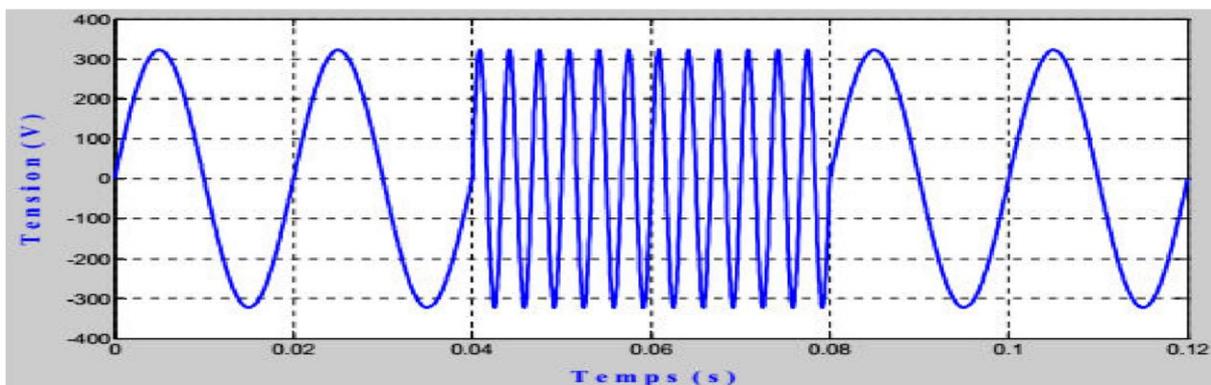


Figure.I.3.Variation de fréquence

I.5.2.4. Déséquilibre du système de tension triphasé :

On dit qu'il y a déséquilibre dans un réseau, lorsqu'on enregistre en régime permanent, des asymétries d'amplitudes et de déphasages des tensions de phases. Ce type de perturbation est causé essentiellement par les asymétries d'impédances des lignes du réseau ou des charges, et aussi par des courts-circuits monophasés ou biphasés. Ce déséquilibre se manifeste par des perturbations dans les machines tournantes, des échauffements, etc...

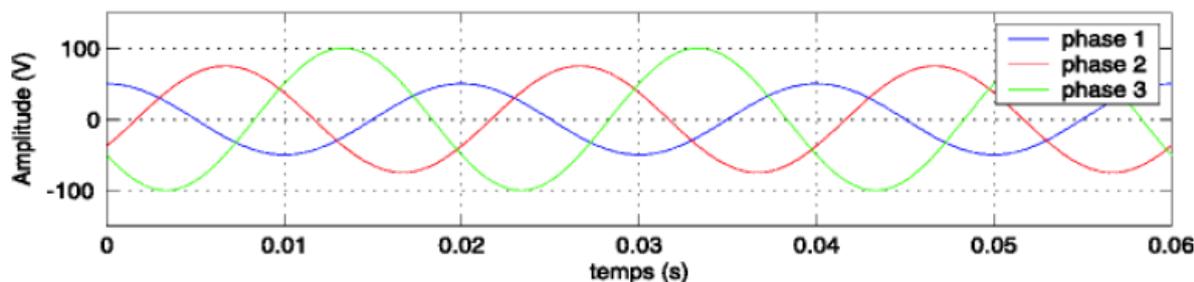


Figure.I.4. Déséquilibre du système triphasé de tension

I.5.2.4.1 Conséquences du déséquilibre du système triphasé :

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

-Mauvais fonctionnement d'un appareil monophasé alimenté par une tension très faible

(Lampe à incandescence qui fournit un mauvais éclairage),

-Destruction d'un appareil monophasé alimenté par une tension trop élevée, il peut être détruit (claquage d'un filament de lampe par surtension).

Concernant les dispositifs triphasés d'électronique de puissance, principalement les ponts redresseurs, le fonctionnement en présence de déséquilibre entraîne l'apparition de composantes harmoniques non caractéristiques, notamment des harmoniques de rang multiple de 3. L'apparition de ces courants harmoniques peut poser des problèmes, comme la génération d'une anti-résonance lors du filtrage de l'harmonique de rang 5. Outre les effets classiques des harmoniques, ces fréquences non caractéristiques peuvent conduire, dans certains cas, au blocage de la commande. La conséquence des composantes inverses sur les machines tournantes est la création d'un champ tournant en sens inverse du sens de rotation normal, d'où un couple de freinage parasite et des pertes supplémentaires qui provoquent l'échauffement de la machine. Concernant l'effet du déséquilibre homopolaire, il faut signaler

le risque d'échauffement du conducteur neutre dans un réseau BT qui, lorsque le conducteur est d'un diamètre trop faible, peut provoquer une rupture du conducteur ou un incendie [12].

I.6 Origine des harmoniques :

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et ainsi polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique. [13]

I.6.1. Emission en tension :

L'émission harmonique en tension due aux matériels de réseaux entre pour une faible part, et avec des taux généralement faible, dans la distorsion des réseaux. Elle est due aux imperfections de construction (dissymétrie, distribution non sinusoïdale du champ dans les alternateurs, saturation des circuits magnétiques etc...) des bobinages des machines tournantes et des transformateurs.

I.6.1.1 Alternateurs :

Les alternateurs des centrales de production fournissent une tension d'alimentation qui contient très peu d'harmoniques ($< 0.5\%$). Le contenu harmonique de la tension générée par les alternateurs est lié à la qualité du bobinage et des pièces polaires qui assurent la forme sinusoïdale de l'onde. Sur un groupe électrogène, le taux de 1% lorsque le groupe électrogène débite à pleine puissance sur une charge linéaire

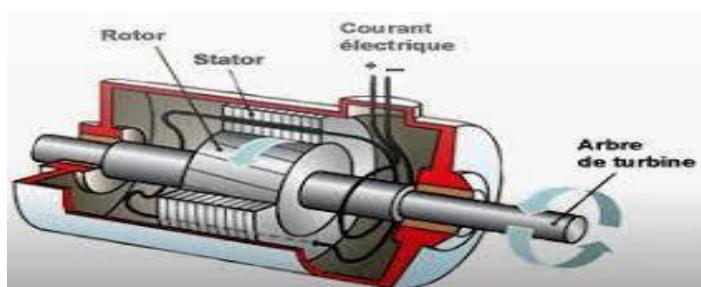


Figure.I.5.Alternateur

I.6.1.2 Transformateurs :

Les transformateurs peuvent être générateurs de tensions harmoniques lorsqu'ils fonctionnent en régime saturé. Sur les réseaux, le taux de distorsion harmonique en tension dû à ces appareils reste toujours faible.

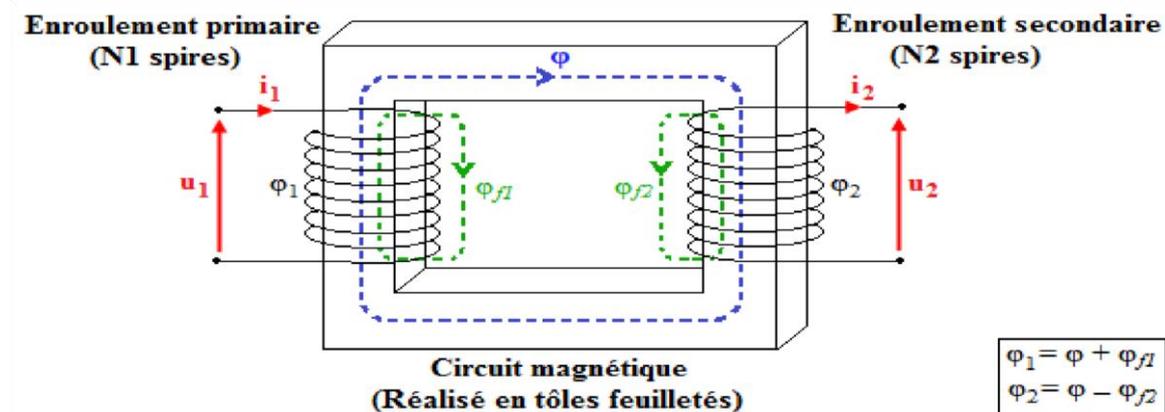


Figure.I.6.Dimensionnement de transformateur

I.6.1.3. Alimentations statiques ininterrompibles (ASI) :

Ces dispositifs ont des performances très intéressantes pour la protection du matériel contre les creux de tension et les coupures. En revanche, ils ont parfois des limitations dans le domaine harmonique qu'il convient de connaître pour bien les maîtriser. En effet, le réseau protégé alimente généralement des charges non linéaires comme

Exemple le matériel informatique.

Pour une ASI d'une puissance de 80KVA, le taux de distorsion harmonique en tension est inférieur à 4% pour une charge linéaire, est inférieur à 7% pour une charge non linéaire. En générale, le taux de distorsion harmonique en tension diminue avec l'augmentation de la puissance de L'ASI.

Il faut bien noter qu'en charge, le taux de tension harmonique est dû essentiellement aux courants harmoniques créés par les charges non linéaires qui sont alimentées par L'ASI. [14]

I.6.2. Emission en courant :

Les charges non linéaires consomment un courant qui n'est pas sinusoïdale. Elles représentent les principales sources d'émission en courants harmoniques sur les réseaux. On peut distinguer sept différents types de « charges perturbatrices élémentaires » chez l'utilisateur, dont quatre sont des montages électroniques :

- le redresseur monophasé à filtre capacitif,

- le gradateur monophasé,
- le redresseur triphasé à thyristors,
- le redresseur triphasé à diodes et filtre capacitif,
- les moteurs asynchrones,
- les lampes,
- les appareils à arc électrique.
- les appareils domestiques (TV, fours micro-onde, éclairage néon, ...) [14].

I.6.2.1. Le redresseur triphasé à thyristors :

Le redresseur triphasé à thyristors, en pont de Graëtz, constitue l'un des montages de l'électronique de puissance les plus répandus dans le secteur industriel. Ils représentent 55% de la puissance des matériels électroniques. Dans le domaine de la vitesse variable. Les redresseurs triphasés à thyristors sont la principale source de pollution harmonique dans le secteur industriel.

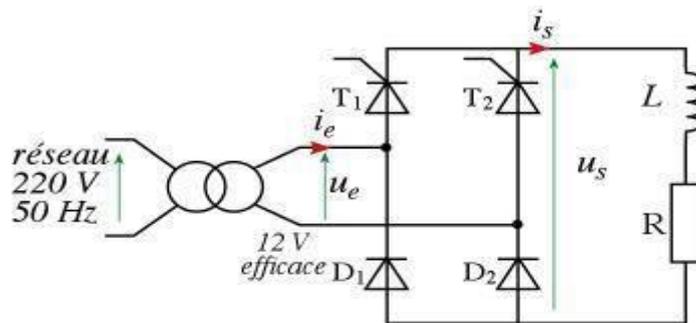


Figure.I.7.Redresseur triphasé à pont de graëtz

I.6.2.2. Les charges non linéaires passives :

On distingue trois types de charges passives non linéaires. Ce sont, d'une part, les lampes et les petits moteurs dans les secteurs tertiaire, domestique et industriel et, d'autre part, les fours à arc dans le secteur industriel.

I.6.2.3. Les lampes :

On distingue deux types de lampes qui produisent des courants harmoniques : Les lampes fluorescentes et les lampes à vapeur haute pression. Elles représentent les deux tiers de la puissance consommée par l'éclairage. La génération d'harmoniques dans ces lampes est liée à la nature fortement non linéaire du phénomène entraînant

l'illumination, ainsi qu'à la présence d'un ballast.

I.6.2.4. Les appareils à arc électrique :

Les appareils à arc électrique regroupent les fours à arc à courant alternatif, dont la puissance peut atteindre plusieurs dizaines de MW, et les machines de soudure à l'arc, à courant alternatif ou continu [16].

Dans le cas du four a arc a courant alternatif l'arc est non lineaire, dissymetrique et instable. Il va induire des spectres possedant des raies impaires, paires et un spectre continu (bruit de fond a toutes les frequences). Le niveau spectral est en fonction du type de four, de sa puissance, de la période de fonctionnement considérée : fusion, a nage...Aussi seules des mesures peuvent determiner le spectre de facon precise.

Dans le cas du four a arc a courant continu l'arc est alors alimente par l'intermediaire d'un redresseur. L'arc est plus stable qu'en courant alternatif. Le courant absorbe se decompose en un spectre semblable a celui d'un redresseur, et un spectre continu de niveau inferieur a celui d'un four a courant alternatif [17].

I.6.2.5. Convertisseur de courant :

Les convertisseurs de courant constituent l'un des montages les plus répandus dans le secteur industriel. Ce type de montage est constitué de thyristors qui sont commandés en ouverture. Ceci ce fait en jouant sur l'angle d'allumage a de commande des gâchettes des thyristors. Ils sont utilisés dans de nombreuses applications telles :

I.6.2.5.1. La commande en vitesse variable des moteurs à courant continu :

Les machines à courant continu sont utilisées dans de multiples activités nécessitant de la vitesse variable aussi bien dans les applications de faible puissance que celle de grande puissance telles les machines outils, les procédés de commande dans l'industrie du papier et du textile ainsi que les laminoirs.

I.6.2.5.2. La commande en vitesse variable des machines synchrones :

On rencontre des convertisseurs de courant suivis d'un onduleur pour commander la machine synchrone en vitesse variable.

I.6.2.5.3. Les électrolyseurs :

L'électrolyse est surtout employée dans la production des métaux non ferreux et dans l'industrie de la chimie [18].

I.6.2.5.4. Les inductances saturées :

De telles inductances ont leur impédance fonction de l'amplitude du courant qui les traverse, et de fait elles provoquent des déformations notables de ce courant. C'est le cas, dans une certaine mesure, des transformateurs à vide soumis à une surtension permanente [19]

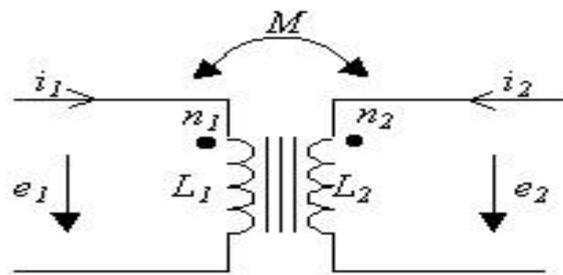


Figure.I.8. Inductance saturées

I.7. Conséquences des harmoniques :

Les courants harmoniques se propagent dans le réseau électrique, déforment l'allure du courant de la source et polluent les consommateurs alimentés par ce même réseau. Ils peuvent occasionner des incidents au niveau de l'appareillage du client ce qui donne lieu à des surcoûts de production d'énergie importants. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux types : les effets instantanés et les effets à terme.

I.7.1: Effets instantanés :

Les effets instantanés apparaissent immédiatement dans certains appareillages :

I.7.1.1: Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques:

En présence d'harmoniques, la tension et le courant peuvent changer plusieurs fois de signe dans une demi-période. Les appareils dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électriques peuvent être affectés.

I.7.1.2: Troubles fonctionnels des micro-ordinateurs:

Les effets sur ces équipements peuvent se manifester par la dégradation de la qualité de l'image et par des couples pulsatoires des moteurs d'entraînement de disque.

I.7.1.3: Erreurs dans les appareils de mesure:

Certains appareils de mesure et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesure des erreurs de lecture supplémentaires en présence d'harmoniques.

I.7.1.4 : Vibrations et bruits:

Les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances et machines tournantes)[20].

-Des phénomènes de résonance. Les fréquences de résonance des circuits formés par les inductances du transformateur et les capacités des câbles sont normalement assez élevées, mais elles peuvent coïncider avec la fréquence d'un harmonique .

-surcharge des conducteurs de neutre en raison de la sommation des harmoniques de rang 3 créés par les charges monophasées.

-surcharge des réseaux de distribution par l'augmentation du courant efficace [21].

I.7.2: Effets à terme :

Ils se manifestent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique.

L'effet à terme le plus important est de nature thermique, il se traduit par l'échauffement. Il conduit à une fatigue prématurée du matériel, des lignes et amènent un déclassement des équipements.

I.7.2.1: Echauffement des câbles et des équipements:

Ces effets peuvent être à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (de quelques heures à quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être le siège du sur échauffement du neutre et les enroulements comme pour les transformateurs ou les moteurs.

I.7.2.2: Echauffement des condensateurs:

L'échauffement est causé par les pertes dues au phénomène d'hystérésis dans le diélectrique. Les condensateurs sont donc sensibles aux surcharges, quelles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques. Ces échauffements peuvent conduire au claquage.

I.7.2.3: Echauffement due aux pertes supplémentaires des machines électriques et des transformateurs

L'échauffement due aux pertes supplémentaires des machines électriques et des transformateurs, est causé par les pertes dans le stator des machines électriques et principalement dans leurs circuits rotoriques à cause des différences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor [22].

Les harmoniques gênent aussi des pertes supplémentaires dans les transformateur, par effet Joule dans les enroulements, accentuées par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courants de Foucault dans les circuits magnétique

I.8.Caractérisation des perturbations harmoniques :

Différentes grandeurs sont définies pour caractériser la distorsion en régime déformé. Le taux global de distorsion harmonique (THD) et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement la perturbation harmonique et la consommation de puissance réactive.

I.8.1.Taux de Distorsion Harmonique (THD) :

Notre étude se limite au cas où la source est sinusoïdale et/ou le courant absorbé par la charge est entaché de composants harmoniques. Dans ces conditions, le taux global de distorsion harmonique (THD) est bien adapté pour quantifier le degré de pollution harmonique sur les réseaux électriques. Il s'évalue par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde déformée du courant.

Il est donné par l'expression suivante [23] :

$$\text{THD (\%)} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n I_{ci}^2}}{I_{c1}} \quad (\text{I.1})$$

Avec I_{c1} la valeur efficace du courant fondamental et I_{ci} les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant. Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 et 2000 Hz. Soit de l'harmonique de rang 2 jusqu'à l'harmonique de rang 40. Il est à signaler aussi que l'amplitude des harmoniques décroît généralement avec la fréquence.

Par analogie, le taux global de distorsion harmoniques des tensions peut s'écrire :

$$\text{THD \%} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_{ci}^2}}{U_{c1}} \quad (\text{I.2})$$

I.8.2. Le facteur de puissance lié à la consommation de l'énergie réactive :

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties : active P , réactive Q et déformante D .

Son expression est donnée par l'équation suivante :

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

La puissance réactive Q est associée au courant fondamental. La puissance déformante D est due aux harmoniques de courant avec :

$$D = 3V\sqrt{I_c + I_{c1}} \quad (\text{I.4})$$

Où I_c est la valeur efficace du courant de la charge.

Pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance F_p est égal au quotient de la puissance active P par la puissance apparente S :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{I.5})$$

Le facteur de puissance sera toujours inférieur à 1, en posant:

$$P = 3vI_c \cos \varphi \quad (\text{I.6})$$

On aura

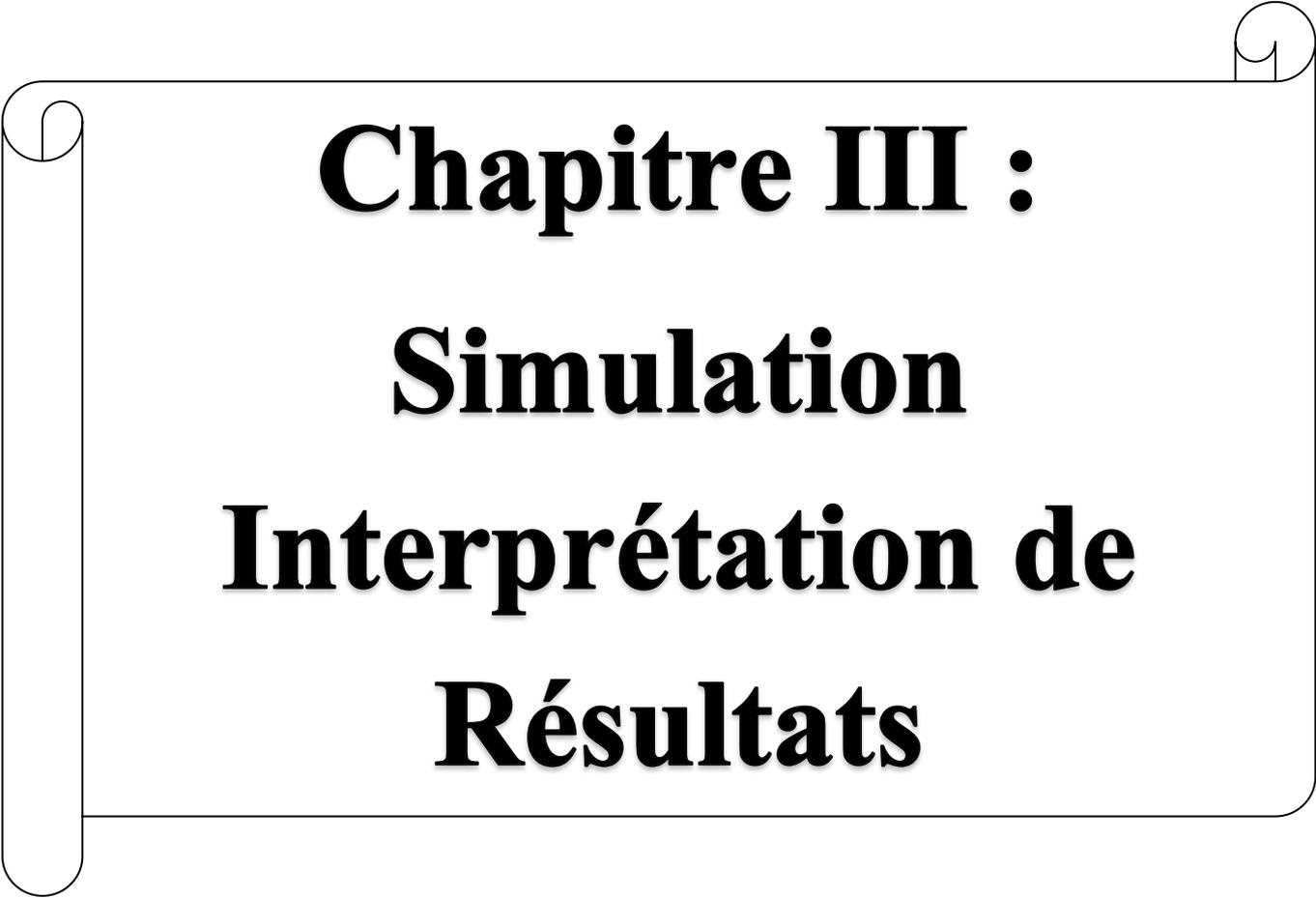
$$F_p = \frac{I_{c1}}{I_c} \cos \varphi = F_{dis} \cos \varphi \quad (\text{I.7})$$

Où F_{dis} représente le facteur de distorsion. Il vaut 1 lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal et il décroît lorsque la déformation de l'onde s'accroît. Φ représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension. Afin d'éviter les désagréments causés par la présence de courants et de tensions harmoniques dans le réseau, des normes sont imposées aux utilisateurs.

I.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté différents types de perturbations pouvant affecter la tension du réseau électrique, ces perturbations sont les harmoniques, les déséquilibres de courant et de tension, les creux de tension et les surtensions. Ces perturbations ont des effets néfastes sur les équipements électriques pouvant aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

Pour surmonter ce phénomène, de nombreuses solutions de traitement traditionnelles et modernes ont été introduites. Nouvelles techniques de filtrage actif sont utilisées ces dernières années : par exemple les algorithmes de puissances instantanées et le référentiel lié au synchronisme (synchronous reference frame : SRF). Ces algorithmes seront l'objet du prochain chapitre.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both ending in rounded, scroll-like shapes at the corners.

Chapitre III :
Simulation
Interprétation de
Résultats

II.1.Introduction :

La problématique des harmoniques dans le réseau électrique, également appelée pollution harmonique, n'est pas un phénomène nouveau. Néanmoins, du fait que de plus en plus de charges non linéaires se connectent au réseau, la problématique des harmoniques est devenue très répandue. Les charges non linéaires provoquent une distorsion des courants et, ce qui peut entraîner un mauvais fonctionnement des dispositifs raccordés au réseau. D'où, l'intérêt d'éliminer ou de minimiser ces harmoniques. Pour diminuer ou supprimer ces perturbations et ainsi améliorer la qualité de l'énergie distribuée, plusieurs solutions existent :

- les types de filtre actif et filtre passif
- la modification du convertisseur statique polluant en termes de la topologie
- la commande afin d'intervenir directement à la source des perturbations harmoniques. et les dispositifs de filtrage.
- les méthodes algorithmiques pour éliminer les harmoniques [24].

II.2.Principe de fonctionnement du filtre actif :

Les filtres actifs sont composés d'onduleurs qui sont des convertisseurs statiques de puissance. Alimenté par une source de courant ou de tension continue, l'onduleur peut délivrer un courant ou une tension dont le contenu harmonique dépend uniquement de la loi de commande de commutation des interrupteurs [25]. Les filtres actifs agissent donc comme des sources de tension ou de courant harmoniques en opposition de phase avec ceux du réseau afin de rétablir un courant de source quasi sinusoïdal.

Le filtre actif peut être connecté au réseau en série ou en parallèle, suivant qu'il est conçu pour compenser les tensions ou les courants harmoniques.

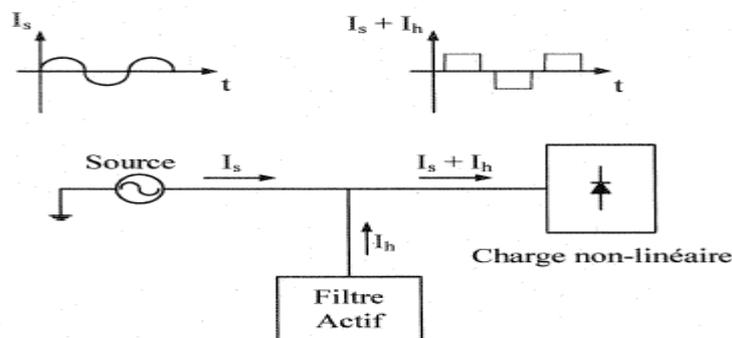


Figure II.1. Principe de fonctionnement du filtre actif parallèle

Ou

I_s : Courant de source sinusoïdale (fondamental).

I_h : Courants harmoniques.

II.3.Classification des filtres actifs :

Les filtres actifs peuvent être classifiés à partir du type de convertisseur qu'ils utilisent, de leur topologie ou encore de leur nombre de phases. Nous nous limiterons ici à la classification selon leurs différentes topologies. Suivant leurs topologies, les FA peuvent être en série, en parallèle ou mixtes [26].

II.3.1.Filtre actif série(FAS) :

Le filtre actif série (FAS) se comporte comme une source de tension qui s'oppose à une éventuelle tension harmonique venant de la source et également à celle provoquée par la circulation du courant harmonique de la charge polluante à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge polluante est purement sinusoïdale, ce qui n'est pas le cas du courant dans le réseau car celui-ci est traversé par la totalité du courant de la charge.

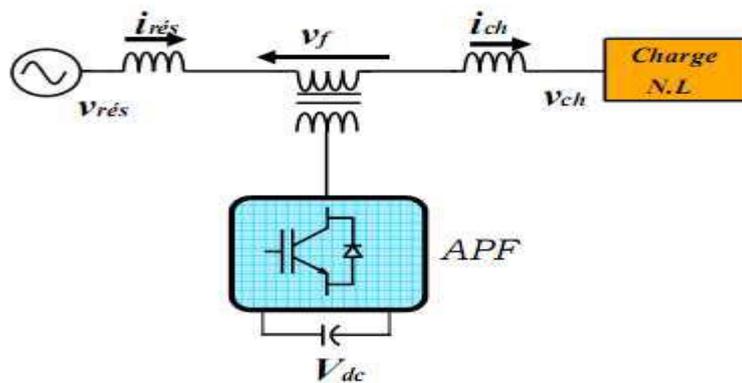


Figure II.2. Filtre actif série.

Cette approche est basée sur le principe d'isoler les harmoniques par le contrôle de la tension de sortie du FAS. En d'autres mots, le FAS présente une impédance élevée au courant harmonique, ce qui isole ces courants les empêchant ainsi d'aller vers la source ou vers la charge. Il se comporte donc, comme une source de tension contrôlable. Le FAS est surtout utilisé pour filtrer les harmoniques générés par les charges de tensions harmoniques.

II.3.2. Filtre actif parallèle :

Le filtre actif (FAP) connecté en parallèle sur le réseau est le plus souvent contrôlé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants harmoniques égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseaux sera ainsi sinusoïdal, cependant la tension au point de raccordement ne le sera que si la tension ne contient pas d'harmoniques. Ainsi l'objectif d'un filtre parallèle générateur de courant consiste à empêcher les courants harmoniques absorbés par la charge non linéaire de circuler à travers l'impédance du réseau située en amont du point de connexion du filtre. Le dimensionnement du filtre actif est lié au courant harmonique à générer. La majorité des filtres actifs parallèles actuellement installés sur les réseaux électriques fonctionne selon ce principe.

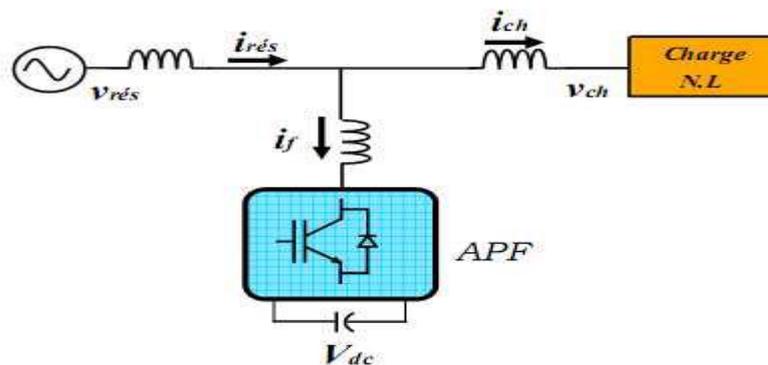


Figure II.3. Filtre actif parallèle.

II.3.3. Filtrage passif :

Le filtre passif est le moyen le plus répandu et le plus utilisé depuis des années. Il permet de filtrer un courant à une fréquence spécifiée, et de supprimer les harmoniques en reliant un ou plusieurs circuits auprès de la charge.

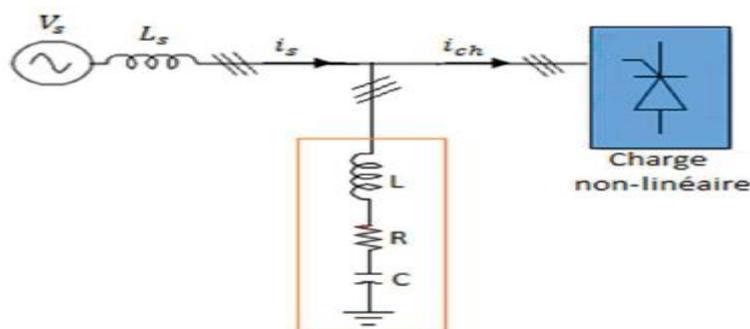


Figure II.4. Filtre passif

II.3.4. Filtre hybrides 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 de filtres actifs de faibles puissances à des filtres passifs semble être une solution prometteuse. Donc on peut trouver plusieurs configurations, en voici quelque une [27] :

II.3.4.1 Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif :

Dans cette configuration, les deux filtres actif et passif sont directement connectés en série, sans l'intermédiaire d'un transformateur. L'ensemble est connecté en parallèle sur le réseau comme le décrit la figure II.5.

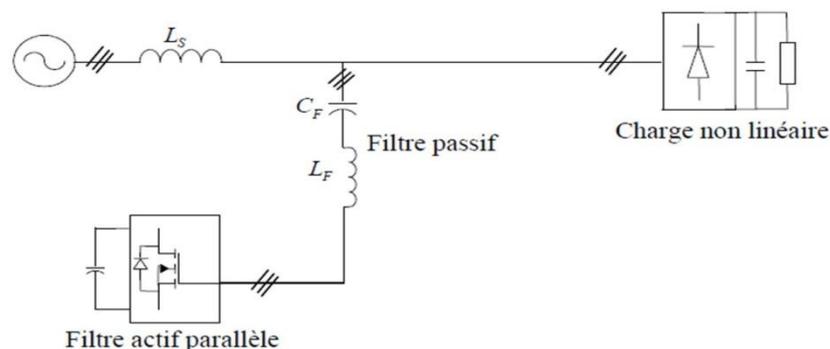


Figure.II.5. Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.

Dans ce cas, le filtre passif se comporte comme une impédance faible à la fréquence d'accord et comme une grande impédance à la fréquence fondamentale. Ce système présente deux avantages : le dimensionnement en puissance du filtre actif est encore plus réduit du fait que le courant qui le traverse est plus faible et le filtre actif est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge.

II.3.4.2 Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif :

Dans cette topologie, le filtre actif est connecté en parallèle avec le filtre passif. Tous deux sont également en parallèle avec la charge. Le filtre actif parallèle sert à

compenser les courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante alors que le filtre passif, accordé sur une fréquence harmonique élevée, permet de compenser les harmoniques hautes fréquences.

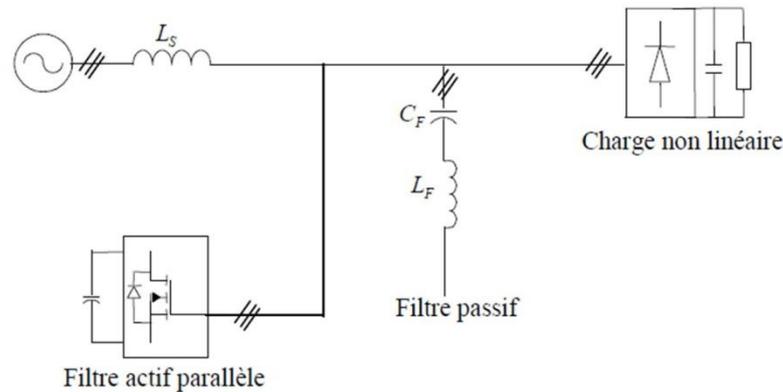


Figure.II.6. Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.

II.3.4.3 Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif :

Cette structure permet de réduire les risques d'antirésonance entre les éléments des filtres passifs et l'impédance du réseau. Dans ce cas, le filtre actif série agit comme une résistance vis-à-vis des courants harmoniques et les oblige à circuler dans le filtre passif, tout en restant transparent à la fréquence fondamentale. La figureII.7 illustre cette topologie.

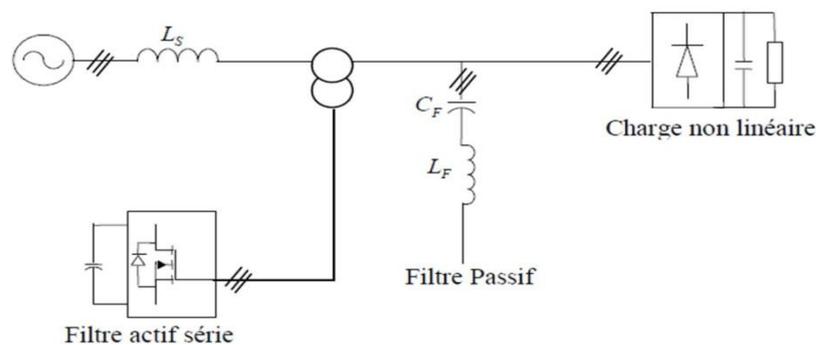


Figure.II.7. Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif.

II.4. Avantages et inconvénients des schémas de dépollution :

Toute solution a des avantages mais également des inconvénients, ainsi nous avons jugé bon de les regrouper dans le tableau suivant :

Le tableau II.1 : Montre un récapitulatif des avantages et inconvénients de schémas de dépollution [28] :

Principes	Avantages	Inconvénients
-Filtrage actif serie	-Amelioration de la forme de la tension, adaptabilite aux variations de charge et du reseau electrique -Il est destiné à protéger les installations sensibles aux perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques en tension, les surtensions, déséquilibres et creux de tension	-Pas d'amelioration de la forme du courant Il ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge. En plus, ce type nécessite une protection complexe contre les courts-circuits des réseaux. En effet, lors d'un court-circuit côté réseau, ce dernier peut être amené à supporter tout le courant de court-circuit.
-Filtrage actif parallèle	-Amélioration de la forme du courant, adaptabilite aux variations de charge et du reseau	-Amelioration de la forme de la tension pas toujours evidente
-Filtre actif hybride	-Amelioration de la forme du courant, amelioration de la forme de la tension, adaptabilite aux variations de charge et du reseau	-Realisation difficile
-Filtrage passif	-Amelioration de la forme du courant	-Risque de resonance, pas d'adaptabilite -Risque d'amplification des harmoniques (deplacement de lafrequence d'antiresonance vers une frequence harmonique)

II.5.Méthode de référentiel lié au synchronisme (Synchronous Reference

Frame : SRF) :

Différentes stratégies de contrôle sont utilisées pour calculer les courants de référence dans le filtre de puissance active, à savoir la théorie de la puissance réactive instantanée (théorie pq), la méthode du facteur de puissance unitaire, la commande à cycle unique, la technique de Fourier rapide, etc. courants de référence triphasés (i_{aref} , i_{bref} , i_{cref}) utilisés par les filtres de puissance actifs.

$$\begin{bmatrix} i\alpha \\ i\beta \\ i\gamma \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

Maintenant, les quantités de courant à deux phases $i\alpha$ et $i\beta$ des axes $\alpha\beta$ stationnaires sont transformées en trame synchrone (ou en rotation) à deux phases (axes dq), où $\cos(\theta)$ et $\sin(\theta)$ représentent les vecteurs unitaires synchrones pouvant être générés à l'aide de système de boucle (PLL).

$$\begin{bmatrix} id \\ iq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i\alpha \\ i\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Les d-q courants ainsi obtenus comprennent des parties alternative et continue. La composante fondamentale du courant est représentée par la partie DC fixe et la partie AC représente la composante harmonique. Ce composant harmonique peut être facilement extrait à l'aide d'un filtre passe-bas, tel que mise en œuvre. Le courant de l'axe d est une combinaison du courant fondamental actif (id_{dc}) et du courant harmonique de charge (id_h). La composante fondamentale du courant tourne de manière synchronisée avec le cadre en rotation et peut donc être considérée comme un courant continu. En filtrant (id_h), on obtient le courant qui représente la composante fondamentale du courant de charge dans la trame synchrone. Ainsi, la composante alternative i_h peut être obtenue en soustrayant (id_{dc}) une partie du courant total d'axe d (id), ce qui laisse derrière elle la composante harmonique présente dans le courant de charge. Dans le cadre en rotation, le courant d'axe q (iq) représente la somme des courants de charge réactifs fondamentaux et d'une partie des courants harmoniques de charge. Ainsi, le courant de l'axe des q peut être totalement utilisé pour calculer les courants de compensation de référence. On effectue maintenant une transformation inverse pour transformer les courants d'une trame synchrone biphasée d-q en une trame stationnaire biphasée $\alpha\beta$.

$$\begin{bmatrix} i\alpha \\ i\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} id_h \\ iq \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

Enfin, le courant provenant de la trame stationnaire biphasée $\alpha\beta$ est reconverti en trame stationnaire triphasée abc et les courants de référence de compensation ($i_{aref}, i_{bref}, i_{cref}$) sont obtenus. Ces sorties sont obtenues à partir du cadre de référence synchrone.

La figure.II.8 montre un diagramme de liaison simultanée du cadre de référence synchrone.

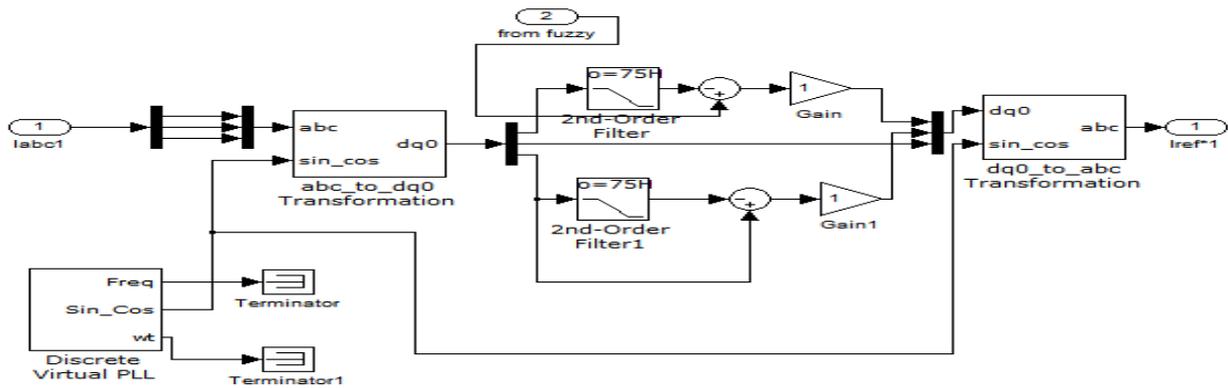


Figure.II.8.Simulink diagram of SRF

Pour le modèle de simulation de Butterworth LPF, les paramètres de conception sont choisis comme suit: $\delta = 0,707$, $F_{LPf} \delta = 75$ Hz, où δ est le coefficient d’amortissement, F_{LPF} est la fréquence de coupure et f_s est la fréquence d’échantillonnage du Butterworth LPF numérique. Les composantes fondamentales basse fréquence obtenues à partir de LPF sont soustraites du signal non filtré et ajoutées au signal de courant obtenu à partir du contrôleur de tension de bus continu pour obtenir des courants de référence de compensation dans la trame de référence d-q. En appliquant ces courants à «d-q-0 au bloc de transformation a-b-c», on obtient les courants de référence de compensation dans le cadre de référence a-b-c [29].

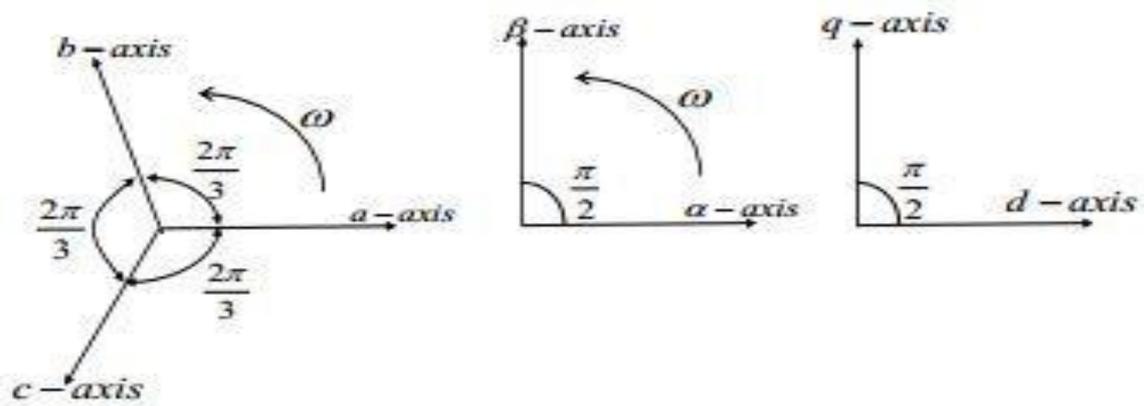


Figure.II.9.Transformation from a-b-c to d-q-0 theory.

Figure.II.10 présente le schéma de principe de la stratégie de contrôle de courant basée sur la fonction SRF.

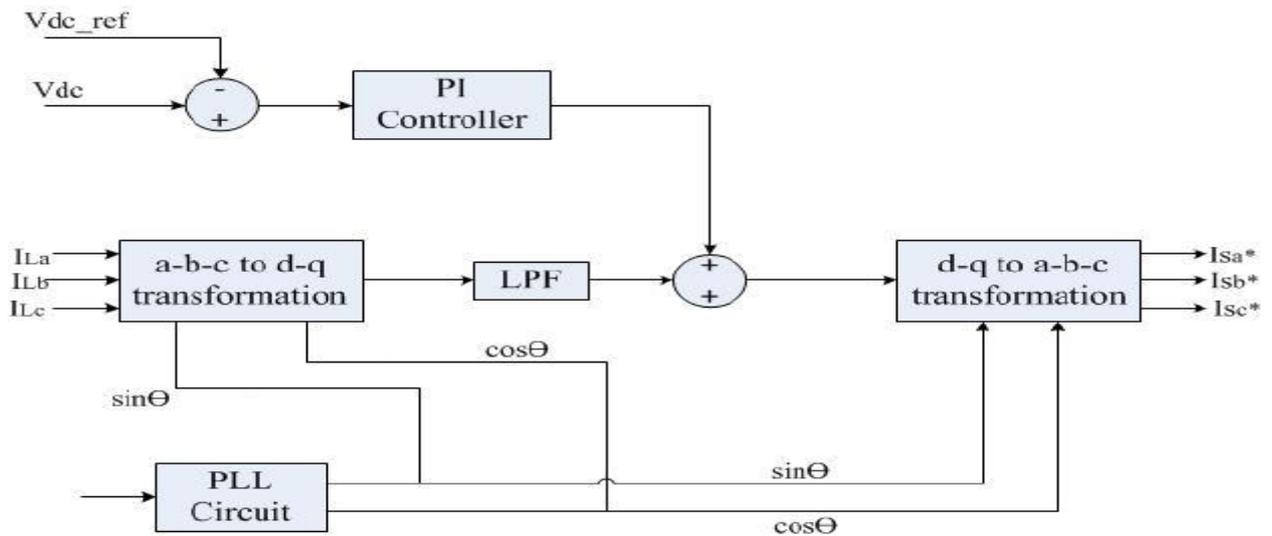


Figure.II.10.Schéma fonctionnel de la stratégie de contrôle en cours basée sur SRF.

II.6. Méthode des puissances active et réactive instantanées :

La méthode des puissances instantanées a été introduite par H. Akagi.

Cette méthode d'identification des courants harmoniques, plus simple, consiste à éliminer la composante continue des puissances active et réactive instantanées ce qui est relativement facile à réaliser. On exploite la transformation de Concordia pour obtenir les puissances active et réactive et nécessité de tensions sinusoïdales à la fréquence fondamentale. On note respectivement les vecteurs des tensions simples au point de raccordement V_s et des courants de charge d'un système triphasé et équilibré par :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [i_c] = \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

La transformation des valeurs triphasées instantanées de la tension et du courant dans le repère des coordonnées $\alpha - \beta$ est donnée par les expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Et pour les courants :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Les puissances réelle et imaginaire instantanées, notées respectivement p et q , sont définies par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

En remplaçant les tensions et les courants diphasés par leurs homologues triphasés, on obtient:

$$P = V_{s\alpha} i_{c\alpha} + V_{s\beta} i_{c\beta} = V_{sa} i_{ca} + V_{sb} i_{cb} + V_{sc} i_{cc} \quad (\text{II.8})$$

De même. Pour la puissance imaginaire on a :

$$Q = V_{s\alpha} * i_{c\alpha} + V_{s\beta} i_{c\alpha} = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{sa} - V_{sb}) i_{cc} + (V_{sb} - V_{sc}) i_{ca} + (V_{sc} - V_{sa}) i_{cb}] \quad (\text{II.9})$$

A partir de l'expression (4). En posant:

$$\Delta = V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2 \text{ on a : } \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \left\{ \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & - \\ & * \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \right\} \quad (\text{II.10})$$

$$\text{Ou alors : } \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \left\{ \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & - \\ & * \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & - \\ & * \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} i_{c\alpha p} \\ i_{c\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{c\alpha q} \\ i_{c\beta q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

$$\text{avec : } i_{c\alpha p} = \frac{V_{s\alpha}}{\Delta} p \quad i_{c\alpha q} = -\frac{V_{s\beta}}{\Delta} q \quad (9) \quad i_{c\beta p} = \frac{V_{s\beta}}{\Delta} p \quad i_{c\beta q} = \frac{V_{s\alpha}}{\Delta} p \quad (\text{II.12})$$

Les puissances instantanées selon les axes α et β peuvent s'écrire :

$$\begin{bmatrix} p_{\alpha} \\ p_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & * \\ V_{s\beta} & * \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & * \\ V_{s\beta} & * \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha p} \\ i_{c\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & * \\ V_{s\beta} & * \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha q} \\ i_{c\beta q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{\alpha p} \\ p_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_{\alpha q} \\ p_{\beta q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

$$p_{\alpha p} = \frac{V_{s\alpha}^2}{\Delta} p \quad P_{\alpha q} = -\frac{V_{s\alpha} V_{s\beta}}{\Delta} p \quad (\text{II.14})$$

$$P_{\beta p} = \frac{V_{s\beta}^2}{\Delta} p \quad P_{\beta q} = \frac{V_{s\alpha} V_{s\beta}}{\Delta} p$$

D'après les expressions (12), on peut écrire :

$$P = P_{\alpha p} + P_{\beta p} + P_{\alpha q} + P_{\beta q} = P_{\alpha p} + P_{\beta p} \quad (\text{II.15})$$

L'analyse de l'équation (13) nous ramené aux conclusions suivantes :

La somme des puissances instantanées $P_{\alpha p}$ et $P_{\beta p}$ coïncide avec la puissance instantanée dans un circuit triphasé.

La puissance réactive correspond a la partie de la puissance instantanée qui dépend de q. Ces puissances $P_{\alpha q}$ et $P_{\beta q}$ s'annulent entre elles et elles n'apportent aucune contribution au transfert de puissance instantanée entre la source et la charge.

Dans le cas ou les tensions sont sinusoïdales et alimentent une charge non linéaire. les puissances instantanées p et q ont pour expression :

$$\begin{aligned} P &= \bar{p} + \tilde{q} \\ q &= \bar{q} + \tilde{q} \end{aligned} \tag{II.16}$$

En considérant les équations (8) et (14), nous pouvons séparer le courant dans le repère $(\alpha - \beta)$ en trois composantes active et réactive a la fréquence fondamentale et la somme des harmoniques. Ceci conduit à :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & - & V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & * & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & - & V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & * & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{q} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \tag{II.17}$$

Il est évident, d'après la relation (15), que pour identifier une des trois composantes. par exemple les courants harmoniques. les parties alternatives des puissances réelle et imaginaire doivent être séparées des parties continues. Cette séparation peut être réalisée en utilisant l'un des deux méthodes de filtrage illustre sur la Figure. II.11.

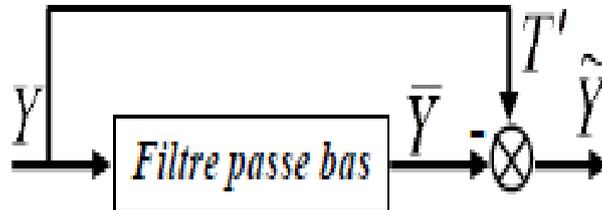


Figure.II.11. Schéma de principe du filtre utilise pour l'extraction des composantes alternatives de P et Q.

les courant harmonique triphasés i_{hk}^* ($K=a,b,c$) sont obtenues à partir des courant diphasés $i_{h\alpha}^*$ et $i_{h\beta}^*$ par la transformation inverse de Concordia soit :

$$\begin{bmatrix} i_{ha}^* \\ i_{hb}^* \\ i_{hc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{3}{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{h\alpha}^* \\ i_{h\beta}^* \end{bmatrix} \tag{II.18}$$

Si V et I_a la représented respectivement les valeurs efficaces de la tension et du courant fondamental et θ_a le dephasage entre eux, alors on peut écrire :

$$\bar{p} = 3VI_{ca} \cos \theta_a \quad \text{et} \quad \bar{q} = -3VI_{ca} \sin \theta_a \tag{II.19}$$

Les termes \bar{p} et \bar{q} sont respectivement équivalents à la puissance active conventionnelle et à la puissance réactive conventionnelle.

De cette manière, éliminer les courants harmoniques revient à compenser les composantes alternatives \tilde{p} et \tilde{q} . La suppression des courants réactifs revient à compenser la composante continue q [30].

II.7. Transformée de Fourier rapide (FFT) :

Parmi les méthodes d'identification les plus anciennes, nous pouvons citer la méthode de la transformée de Fourier rapide (Fast Fourier Transform) (FFT) dans le domaine fréquentiel. Cette méthode est bien adaptée aux charges dont le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement et de ne compenser que les plus prépondérants. Pour cela, une grande puissance de calcul est nécessaire afin de réaliser, en temps réel, toutes les transformations nécessaires pour extraire les harmoniques.

Dans son principe, la transformée de Fourier est appliquée au signal capté de tension ou de courant. Les composantes harmoniques du signal sont d'abord séparées en éliminant la composante fondamentale après on applique la transformée de Fourier inverse pour estimer le signal de référence de compensation dans le domaine temporel. Le principal inconvénient de cette technique est le calcul difficile des coefficients de Fourier. Ceci fait qu'il est impossible pour une application en temps réel avec différentes charges dynamiques [31].

Soit un signal $Sg(t)$, pouvant représenter un courant ou une tension, périodique de période T , donc de fréquence $f = \frac{1}{T}$ et de pulsation $w = 2\pi f$.

Ce signal peut se décomposer en série de Fourier de la façon suivante:

$$Sg(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cdot \cos(w \cdot h \cdot t) + b_h \cdot \sin(w \cdot h \cdot t)] \quad (II.20)$$

Avec : $a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T Sg(t) \cdot dt$

et pour $h \geq 1$, $a_h = \frac{2}{T} \int_0^T Sg(t) \cdot \cos(w \cdot h \cdot t) \cdot dt$

$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T Sg(t) \cdot \sin(w \cdot h \cdot t) \cdot dt$

$$\text{soit : } Sg(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [C_h \cdot \sin(w \cdot h \cdot t + \theta_h)] \quad (II.21)$$

ou : $C_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$ et $\theta_h = \arctang\left(\frac{a_h}{b_h}\right)$

Les fréquences harmoniques f_h , sont définies comme les fréquences multiples de la fréquence dite fondamentale f . Leur rang « h » est tel que: $f_h = h \times f$.

Le terme $[a_h \cdot \cos(w \cdot h \cdot t) + b_h \cdot \sin(w \cdot h \cdot t)]$ est l'harmonique de rang h .

La grandeur : $Ch = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$ est l'amplitude de l'hannonique de rang h .

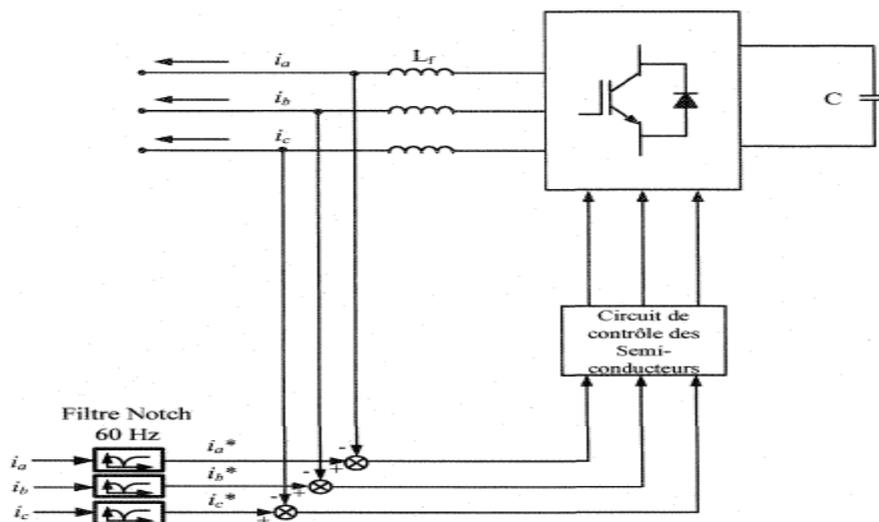
Un signal déformé comporte généralement plusieurs harmoniques. On représente souvent ce signal sous la forme d'un spectre. A chaque fréquence harmonique f_h , on fait correspondre la valeur de Ch .

L' intérêt de la décomposition harmonique est de faciliter les calculs de réseaux, car on dissocie l'étude à la fréquence fondamentale de celles relatives aux fréquences harmoniques. Cette décomposition, dite harmonique, est un artifice mathématique très commode, il ne s'agit pas d'un phénomène physique distinct car, en réalité, on observe que des signaux non sinusoïdaux et non pas réellement des harmoniques [32].

II.8: Algorithme de commande basé sur le filtre Notch :

Dans ce type de commande le courant de charge est filtré par un filtre coupe-bande qui parfois est appelé filtre « notch » [33]. Ces filtres coupe-bande éliminent la composante fondamentale tout en laissant passer les composantes harmoniques. Ils ont, par conséquent, la même fréquence de coupure. Un simple filtre coupe-bande avec une bande passante de 40 Hz possède de bonnes caractéristiques isolantes. Le courant de référence ainsi créé permet la génération des signaux de commande des semi-conducteurs de l'onduleur. La fonction de transfert permettant la réalisation du filtre notch est la suivante :

$$T(s) = \frac{s^2 + W_0^2}{s^2 + s\frac{W_0}{Q} + W_0^2} \tag{ II.22}$$



FigureII.12: Filtre actif commandé par la méthode du filtre Notch

Cette méthode possède les quelques caractéristiques suivantes :

- Elle s'applique sans problème aux systèmes monophasé, biphasé ou triphasé, équilibré ou non.
- Possède un bon temps de réponse lors de régime transitoire.
- Le nombre d'harmoniques compensé dépend de la bande passante des semi-conducteurs composant l'onduleur du filtre actif.
- Méthode de calcul simple.
- Découplage moins net entre le fondamental et les harmoniques. Risque d'atténuation des harmoniques de compensation du filtre actif.

Pour les petites et moyennes puissances, l'élément de stockage de l'énergie le plus adapté

II.9: Régulation de la tension continue :

La tension aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur fixe. Les éléments à l'origine de la variation de la tension moyenne V_{dc} aux bornes du condensateur sont les suivants:

- Les pertes statique et dynamique dans les semi-conducteurs de puissance de l'onduleur.
- Les pertes dans les inductances de découplage L_f ,
- L'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante.

Pour que cette tension V_{dc} soit maintenue constante, nous ajoutons à la puissance réelle instantanée une consigne de puissance active P_c . Cette régulation est plus lente que celle des courants harmoniques, ce qui permet de la considérer comme parfaite à l'échelle de la régulation des harmoniques [34].

II.10. Contrôleur Proportionnel et Intégral (PI) :

La variation de tension ΔV_c aux bornes du condensateur de stockage dépend principalement de la valeur de la capacité C_{dc} . En effet, une diminution de C_{dc} entraîne l'augmentation de ΔV_c et inversement. L'objectif principal de la régulation de tension revient donc à limiter la variation de la tension ΔV_c en utilisant une capacité de valeur aussi faible que possible. De cette façon, le dimensionnement du condensateur pourra être optimisé.

Pour cela la régulation du niveau de tension Vdc est faite par un régulateur de type proportionnel intégral (PI). Le courant de référence additionnel Iloss est généré par le régulateur PI comme suit :

$$I_{loss} = K_P(V_{dc}^* - V_{dc}) + K_i \int (V_{dc}^* - V_{dc}) dt \quad (II.23)$$

Avec kp et ki les termes du régulateur PI. Ils sont déterminés à partir de l'étude de la fonction de transfert en boucle fermée élaborée sur la Figure.II.13 [35].

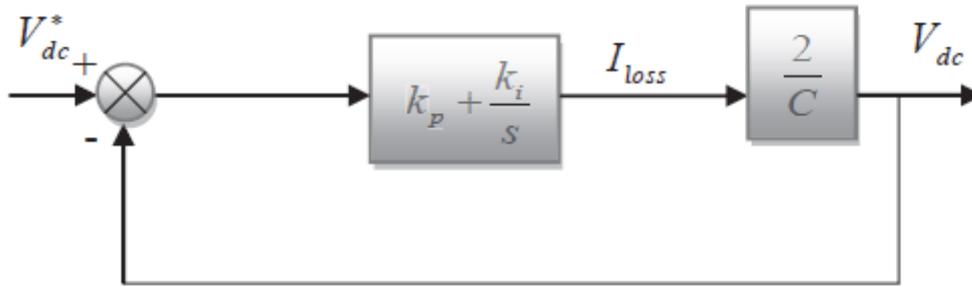


Figure.II.13.Boucle de réglage de tension continu Vdc.

La fonction de transfert est donnée par:

$$\frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = \frac{2\varepsilon W_c S + W_c^2}{S^2 + 2\varepsilon W_c S + W_c^2} \quad (II.24)$$

Où le coefficient d'amortissement ε et la fréquence de coupure ω_c sont donnés par :

$$W_c = \sqrt{\frac{2K_i}{C}} \quad (II.25)$$

$$\varepsilon = K_p \sqrt{\frac{1}{2K_i C}} \quad (II.26)$$

II.11: COMMANDE PAR HYSTERESIS :

La stratégie de commande par hystérésis revient à comparer les courants de référence avec le courant produit par l'onduleur, la différence entre eux est comparée à une bande fixe appelée bande d'hystérésis, dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure un ordre de commande est envoyé afin de diminuer ou augmenter la tension en sortie de l'onduleur, et maintenir l'erreur à l'intérieur de la bande entourant la référence comme le Montre la figure. II.14 :

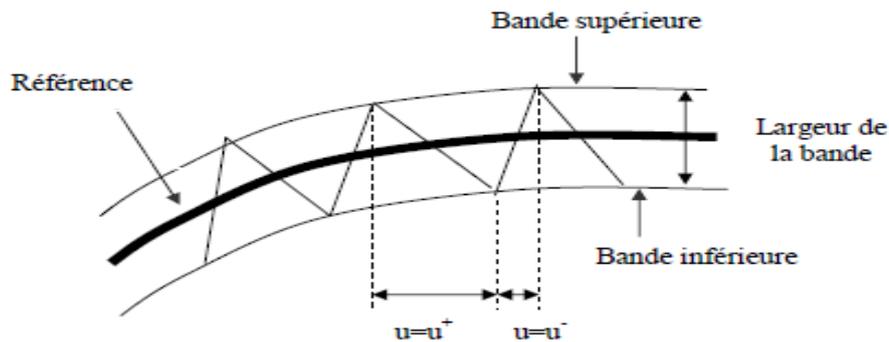


Figure.II.14. Principe du contrôle par hystérésis

Malgré la simplicité de sa mise en oeuvre comme le montre la figure.II.15, sa robustesse et son excellente dynamique, la commande par hystérésis présente certains inconvénients à savoir, l'évolution libre des commutations à l'intérieur de la bande d'hystérésis qui empêche la maîtrise du spectre hautes fréquences dû aux fréquences de commutation. De plus, le fait que la commande soit appliquée séparément sur les trois phases du courant, alors qu'ils sont dépendants, empêche le courant asservi de respecter les limites imposées par la bande [36].

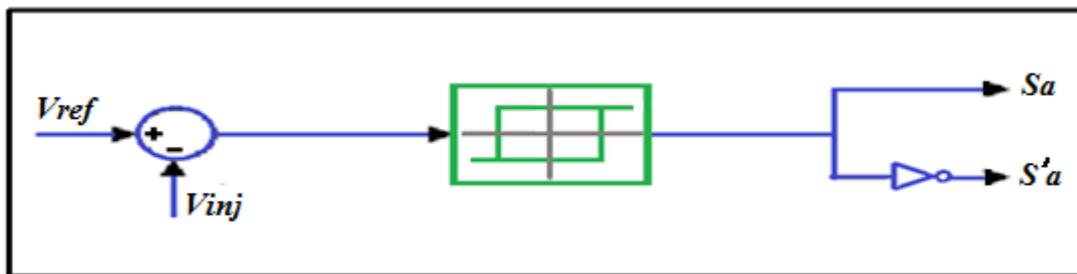


Figure.II.15. Principe de la commande par hystérésis

II.11.1. Inconvénients de la commande par hystérésis :

Malgré sa grande robustesse, sa rapidité et la simplicité de son implantation dans les systèmes, la commande par hystérésis présente certains inconvénients. En effet, la Génération d'une fréquence de commutation variable rend difficile la localisation des fréquences harmoniques que l'on souhaite éliminer. Outre ce fonctionnement à fréquence libre est susceptible d'introduire des nuisances sonores et de bruyantes interférences entre les phases surtout dans le cas des systèmes triphasés à point neutre isolé [37].

II.12. Structure générale Onduleur de tension :

La figure.II.16 présente un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor (GTO ou IGBT) et d'une diode en antiparallèle. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension V_{dc} . Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (L, R) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique.

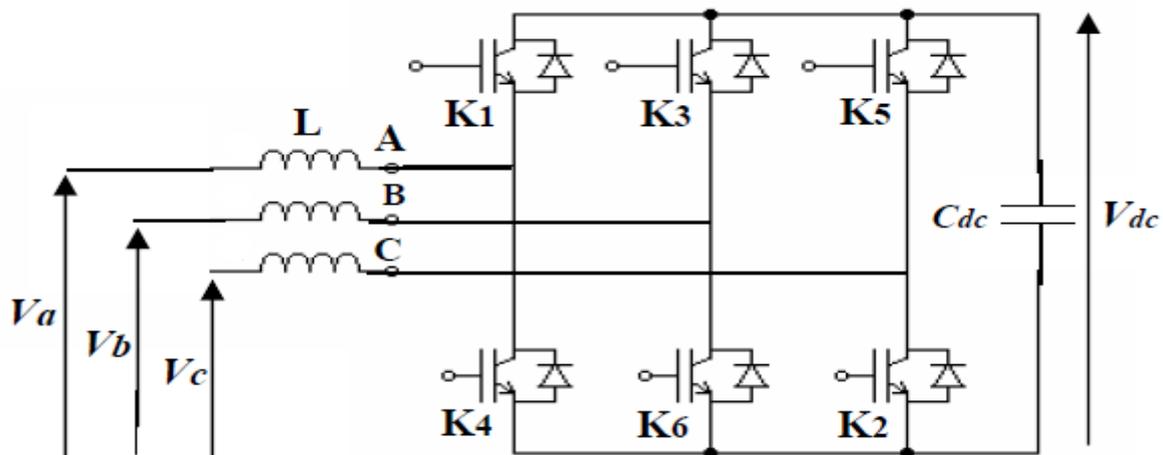


Figure.II.16. Structure d'un onduleur de tension triphasé.

Cette structure du filtre actif parallèle ne permet pas la fermeture simultanée des semiconducteurs d'un même bras sous peine de court-circuiter le condensateur de stockage. Par contre, ils peuvent être tous les deux ouverts (pendant un temps mort). La continuité des courants est alors assurée par la mise en conduction d'un des diodes d'un même bras. En pratique, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. En réalité, le mode, où les semi-conducteurs d'un même bras sont tous les deux fermés, n'existe que durant les commutations.

Afin d'éviter un court-circuit à cause du délai de blocage des interrupteurs, il faut insérer sur un même bras, un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre. Avec l'hypothèse des commutations instantanées, ce mode de fonctionnement ne sera pas pris en compte et par conséquent, aucun risque de court-circuit le condensateur n'est à craindre [38].

II.13. Inductance de Couplage :

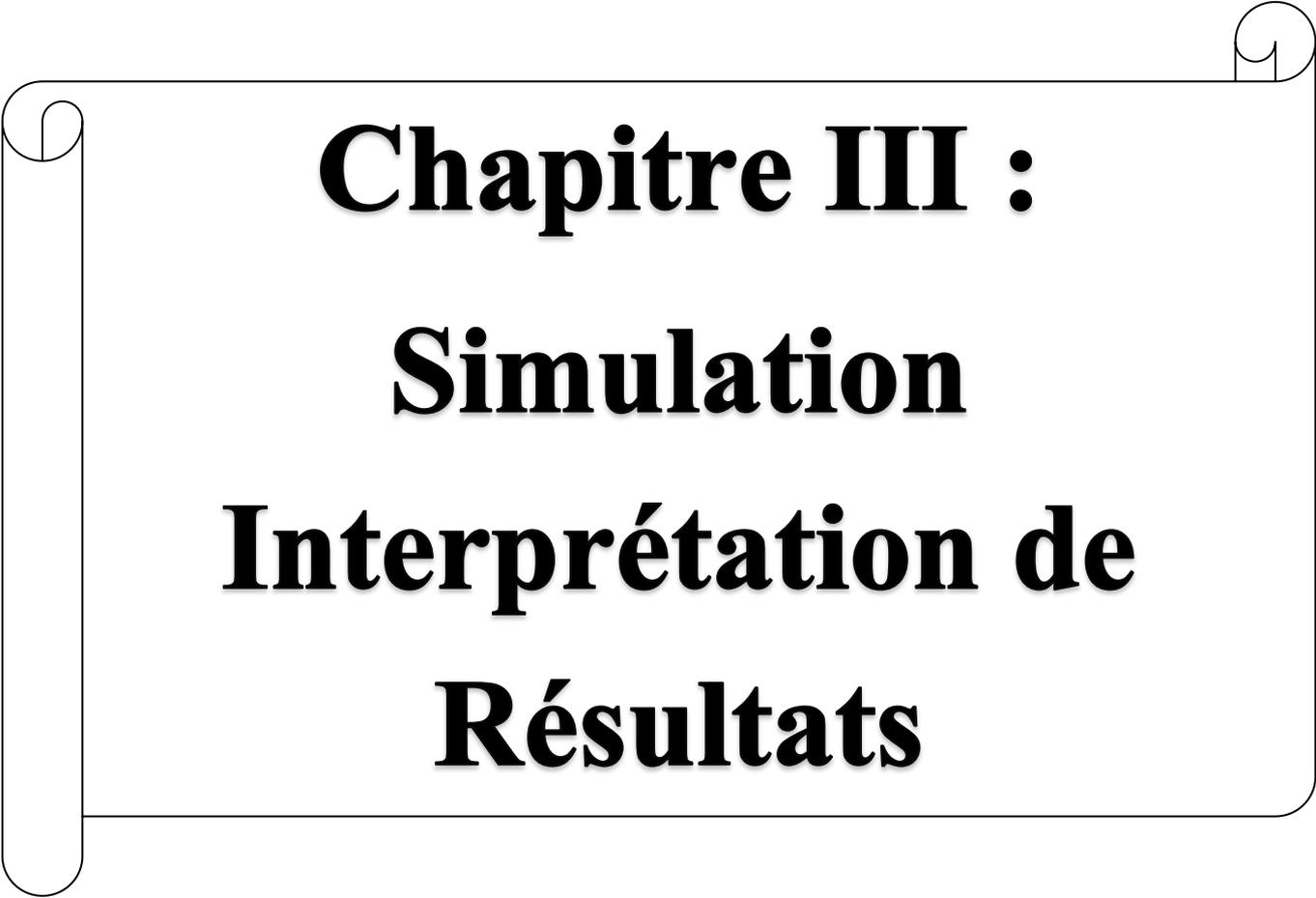
Afin de connecter l'onduleur de tension en parallèle avec le réseau et lui faire remplir le rôle de source de courant, il est nécessaire de disposer entre les deux un filtre de raccordement ou dit de sortie de nature inductive. La fonction de ce filtre permet d'une part de convertir le compensateur en un dipôle de courant du point de vue du réseau, et d'autre part à limiter la dynamique du courant, de façon à le rendre plus facile à contrôler.

Dans la plupart des cas, Le filtre utilisé en sortie de l'onduleur est une inductance qui s'appelle inductance de couplage ou inductance de lissage. Cette inductance est un paramètre important parce qu'avec une fréquence de commutation élevée, il faut régler le niveau d'ondulation du courant de compensation à injecter. Pour un filtrage performant, les interrupteurs du convertisseur doivent être commandés parfaitement. Le contrôle de la forme d'onde du courant est limité par la fréquence de commutation du convertisseur et aussi par la tension disponible de l'inductance. Pour une fréquence de commutation élevée et une faible puissance, l'inductance doit suffisamment être faible pour être capable de suivre la vitesse de changement du courant de compensation. D'autre part, pour une puissance et une fréquence de commutation faibles, l'inductance doit être de grande valeur pour ralentir la vitesse de changement du courant de compensation. Cette inductance est dimensionnée pour satisfaire la garantie de la dynamique du courant de compensation et empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique [39].

II.14. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude sur les filtres d'harmoniques actifs. Nous avons également choisi deux méthodes de courant pour leur simplicité: la méthode de détermination de la SRF et la méthode des puissances active et réactive instantanées PQ. Nous avons décrit les techniques de commande hystérésis pour la simplicité de contrôle et le contrôleur PI.

Dans le prochain chapitre, nous ferons implémentation de ces différentes algorithmes de filtrage actif sous l'environnement Matlab.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both featuring rounded ends and a slight shadow effect.

Chapitre III :
Simulation
Interprétation de
Résultats

III.1.Introduction :

Après avoir l'illustré au chapitre II précédent, l'algorithme de détermination des courants harmoniques des références, ainsi que des stratégies pour contrôler un candidat actif en classe. Nous présenterons dans ce chapitre la simulation sous Matlab simulink de notre modèle d'étude, afin d'assurer la compensation des courants harmoniques, par les deux méthodes SRF et PQ. Nous allons présenter aussi les résultats de simulation d'un système complet constitué du réseau électrique, de la charge non linéaire et contrôlé par la méthode du référentiel lié au synchronisme SRF et la méthode des puissances instantanées. En dernier lieu, une étude comparative entre des deux méthodes est illustrée en se basant sur le Taux de Distorsion Harmonique (THD).

III.2.Simulation en Méthode SRF : synchronous reference frame:

Les paramètres de simulation sont donnés :

Source: $V_s = 200$ v, $F = 50$ Hz, $L_{line} = 3$ mH,

Charge: $L_{ch} = 25$ mH, $R_{CH} = 100$ ohm

Temps : $T_s = 20 \mu s$

Avant filtrage :

Avant de commencer à mettre en œuvre nos commandes sur notre système, nous devons connaître les performances de notre réseau sans filtrage. Pour cela, analyser le courant et la tension et le rapport THD.

Le réseau électrique est simulé pour supporter des charges non linéaires, comme illustré à la figure.III.1 ci-dessous.

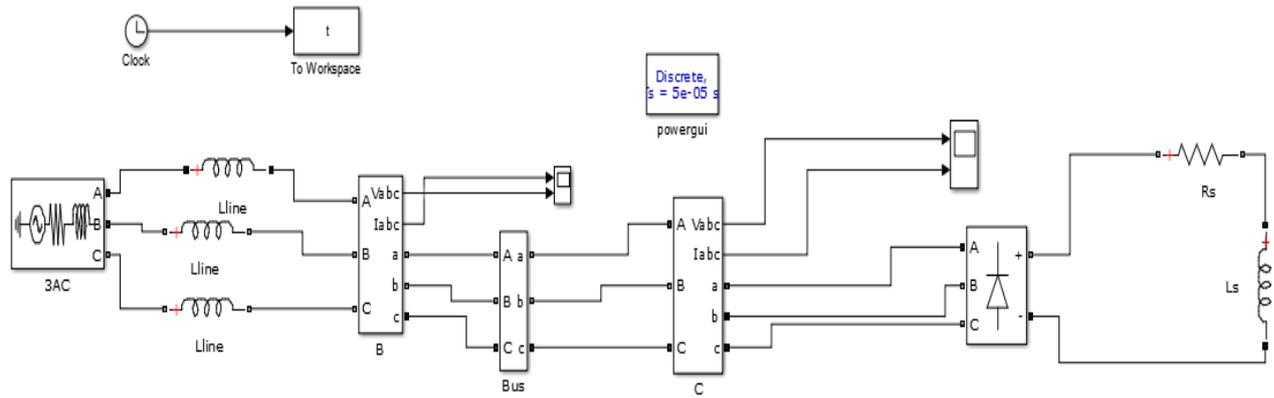


Figure.III.1. charge non linèare en triphasè

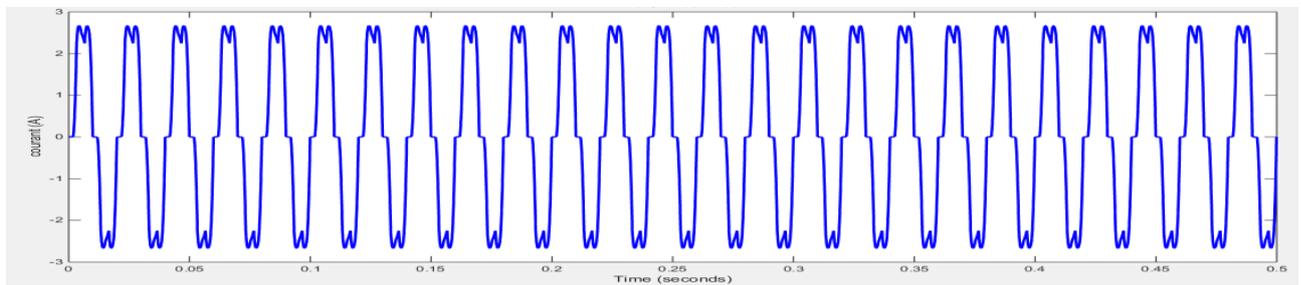


Figure.III.2.Source de courant de phase (a)

lorsque le réseau électrique est équilibré les trois tensions cotées source qui sont sinusoïdale mais avec une légère perturbation harmonique.

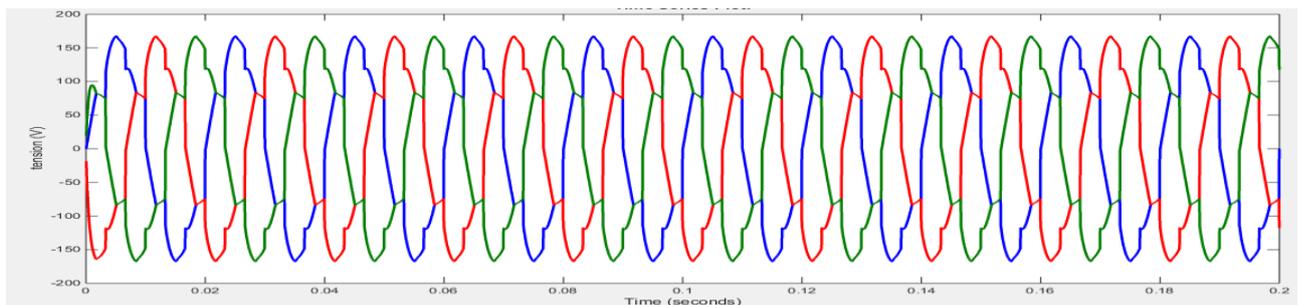


Figure.III.3.Source de tension à 3 phase

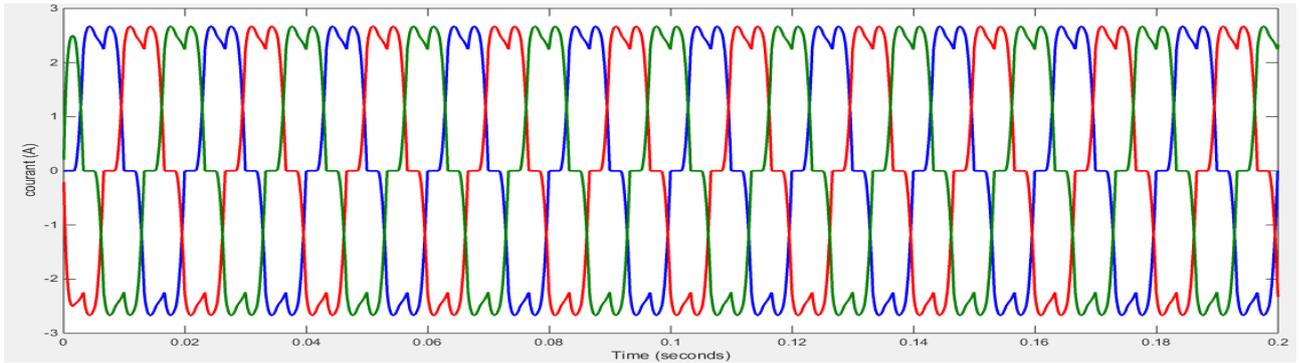


Figure.III.4.Source de courant à 3 phase

lorsque le réseau électrique est déformé les trois tensions cotées source qui sont sinusoidale mais avec une légère perturbation harmonique.

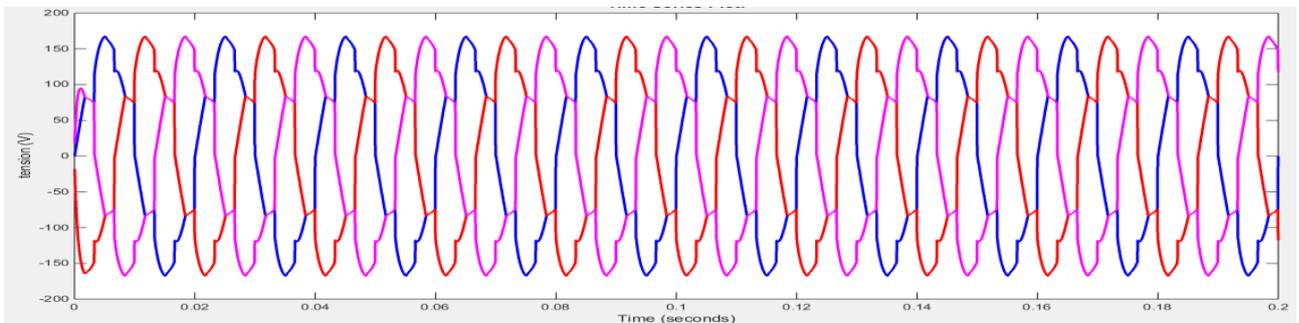


Figure.III.5.Charge de tension à 3 phase

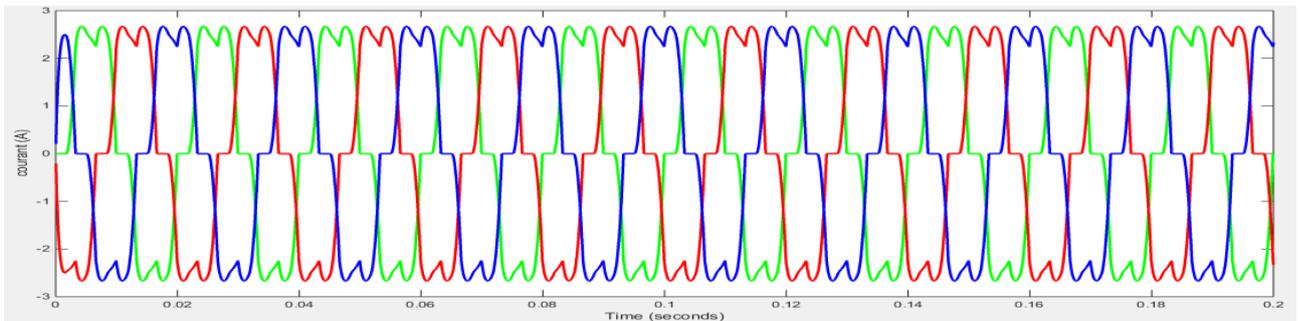


Figure.III.6.Charge de courant à 3 phase

Le courant absorbé par une les charges non linéaire et gènèrent des harmornique de la phase

(a) est présenté par la figure.III.7 suivante :

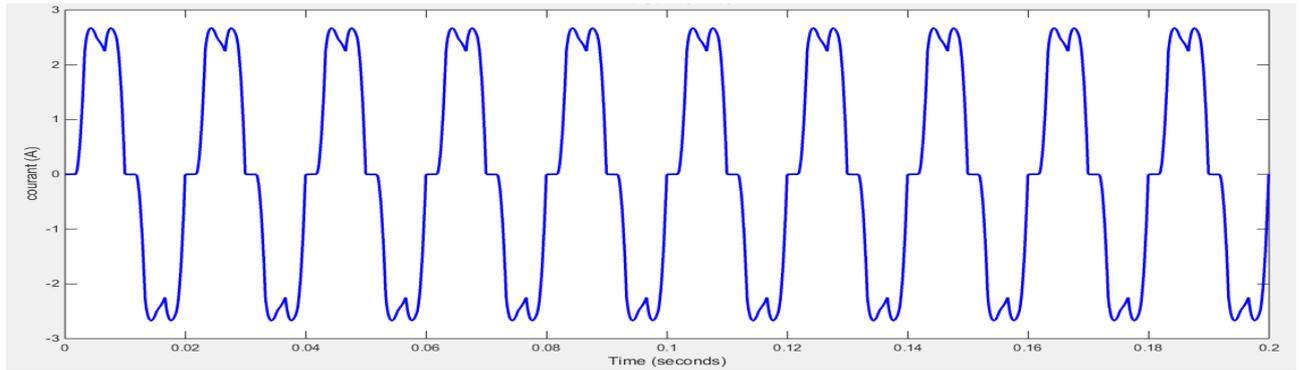


Figure.III.7.Charge de courant à phase (a)

La figure.III.8 et figure.III.9 présente les résultats de simulation obtenus. Avant filtrage, le THD du courant de source est égal à 21.87 %.

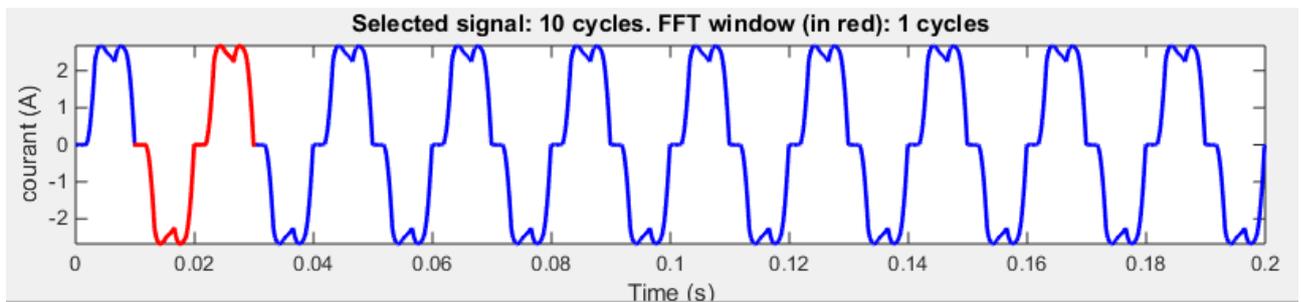


Figure.III.8.courant de source spectre harmonique THD%

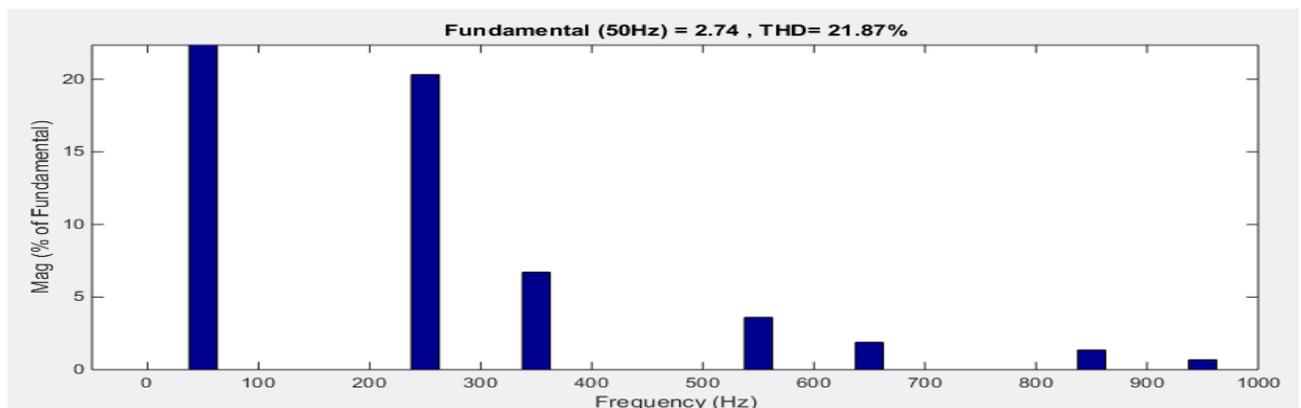


Figure.III.9.spectre harmonique du courant de source avant filtrage

Après filtrage :

Paramètre: Shunt APF: $R_{abc} = 10 \text{ ohm}$, $C_{abc} = 200 \text{ mF}$

$L_f = 3 \text{ mh}$, $T_s = 20 \mu s$

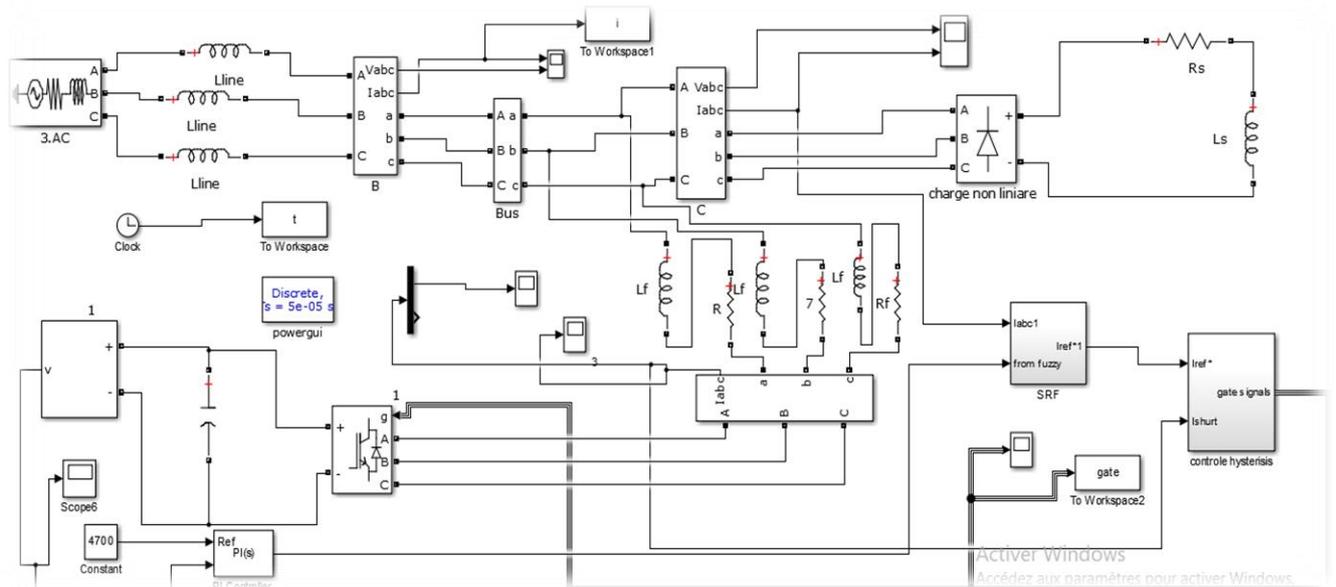


Figure.III.10.Modèle Simulink de SAPF utilisant SRF

Le filtre actif d'alimentation avec régulateur PI est connecté au système de test au point commun. Le shunt Active puissance Filter a trois jambes à savoir six portes. La porte doit être marchè conduction de SAPF. La source de tension de SAPF est par rapport à la tension de référence dans PI Controller et la sortie est donnée à un cadre de référence synchrone (SRF) où il est comparé avec le courant de charge pour produire courant de référence. Ce courant de référence est comparé à le courant de filtre dans le bloc de contrôle d'hystérésis à produire impulsions de porte qui déclenchent les portes présentes dans le shunt actif Filtre de puissance pour produire le courant de compensation.

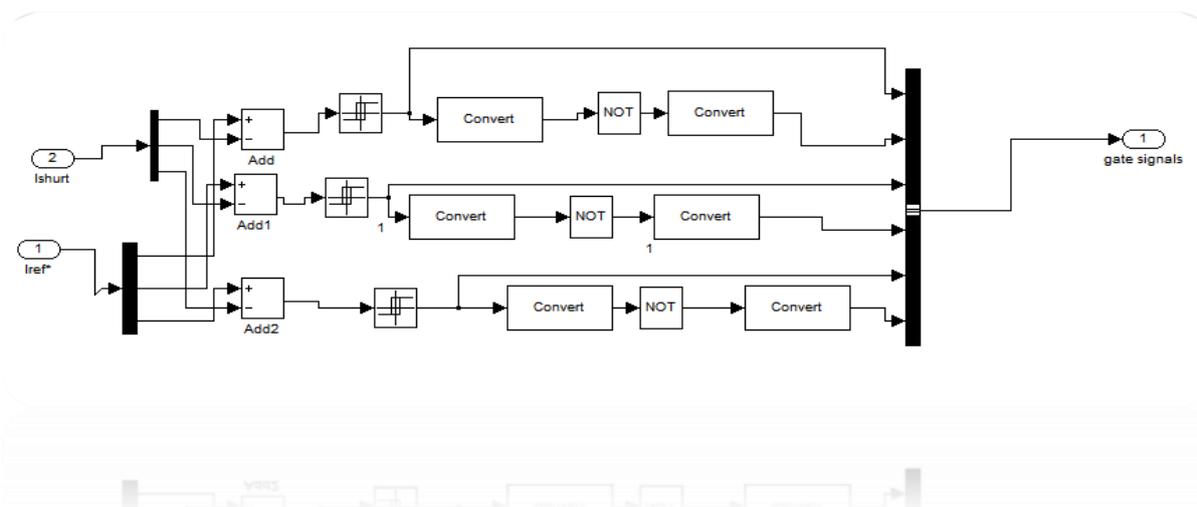


Figure.III.11.Diagramme de Commande par hystérésis

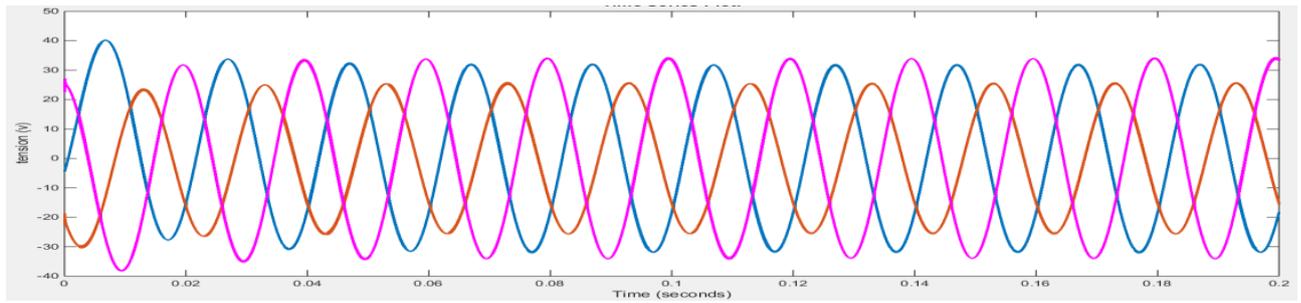


Figure.III.12.Source de tension à 3 phases

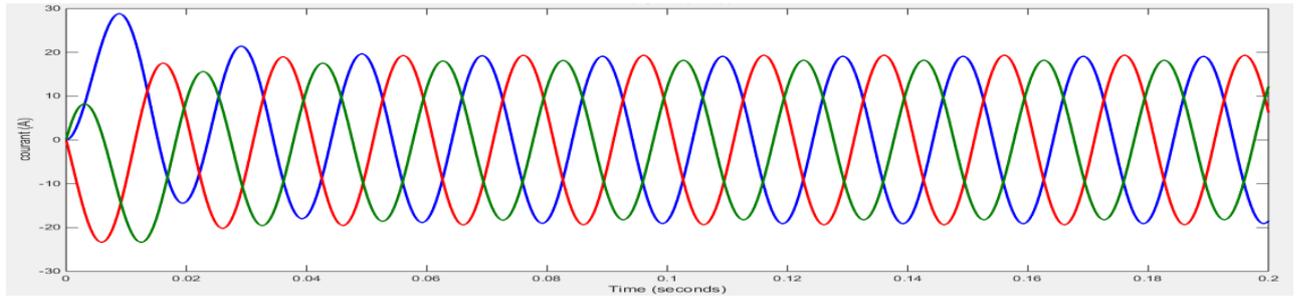


Figure.III.13.Source de courant à 3 phases

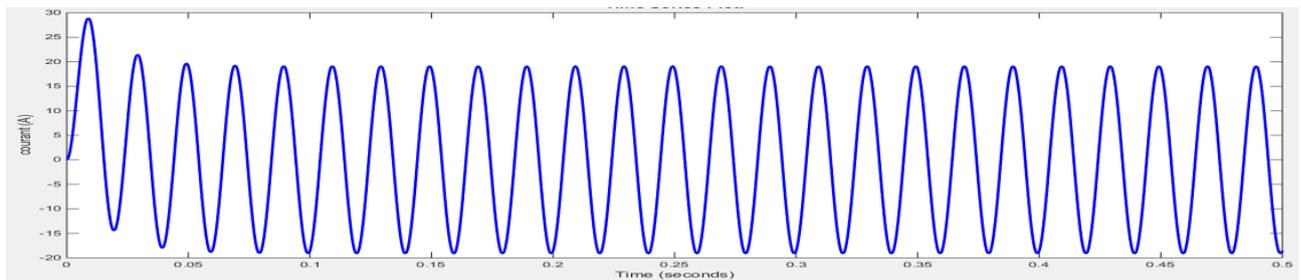


Figure.II.14.Source de courant de phase (a)

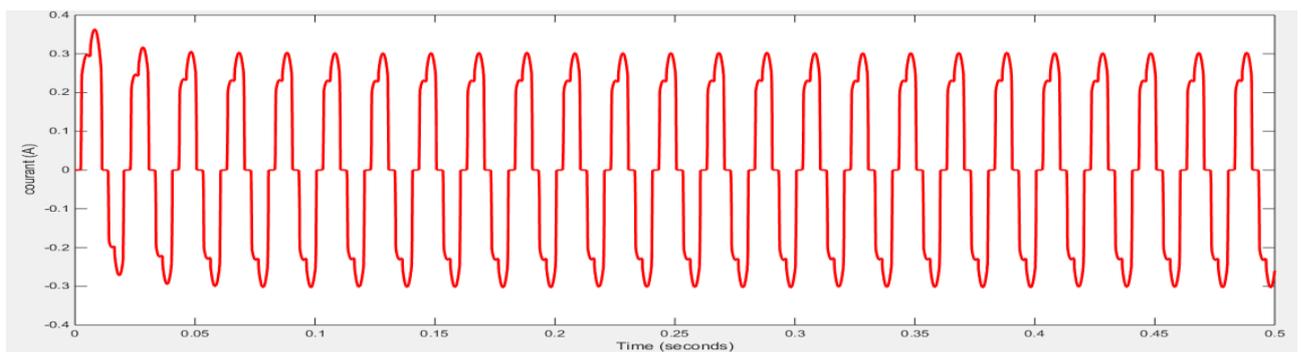


Figure.III.15.Charge de courant de phase (a)

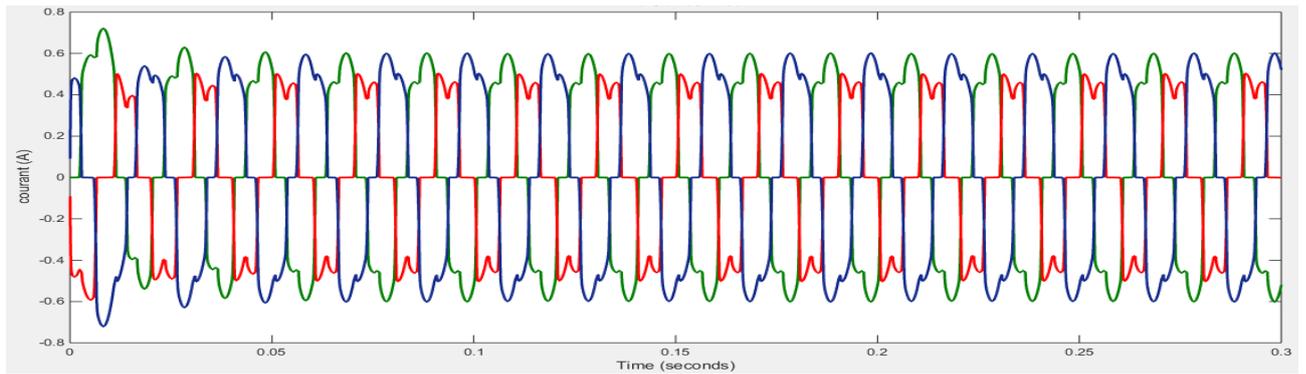


Figure.III.16.Charge de courant à 3 phases

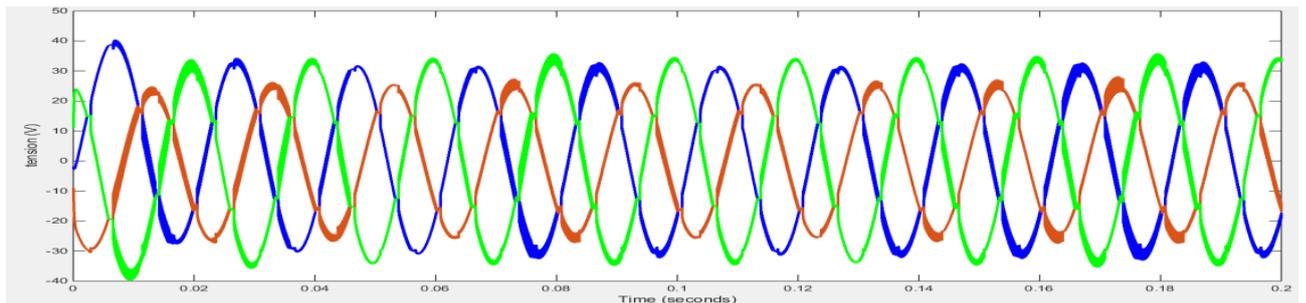


Figure.III.17.Charge de tension à 3 phases

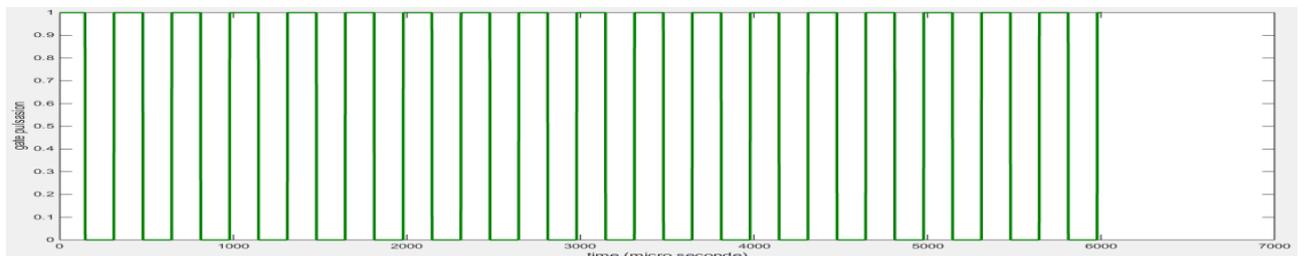


Figure.III.18.Pulsation signal

La tension aux bornes du condensateur dans figure.III.19

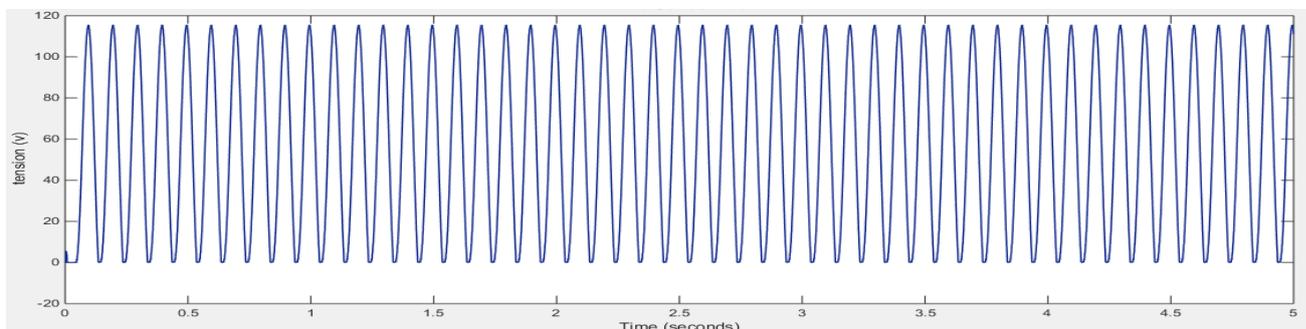


Figure.III.19.tension de capacité C_{dc} au borne d'onduleur

Nous obtenons le courants injectés par le filtre actif de puissance pour chaque phase comme suite :

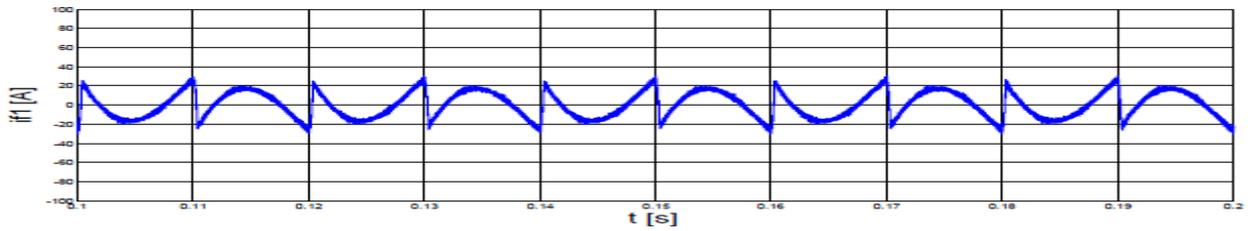


Figure.III.20.Courant de compensation fourni par de filtre phase (a) ifa

Les figures.III.21 et la figure.III.22 illustrent les résultats de la simulation du système. Pour la phase (a). Calculer le THD de la source de courant après filtrage Donnée une valeur de 1.12 %.

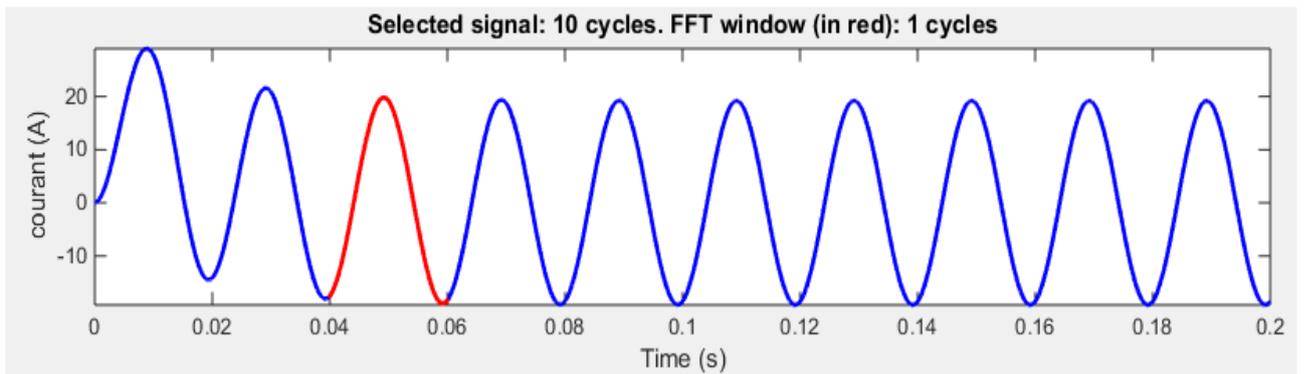


Figure.III.21.courant de source phase (a) après filtrage

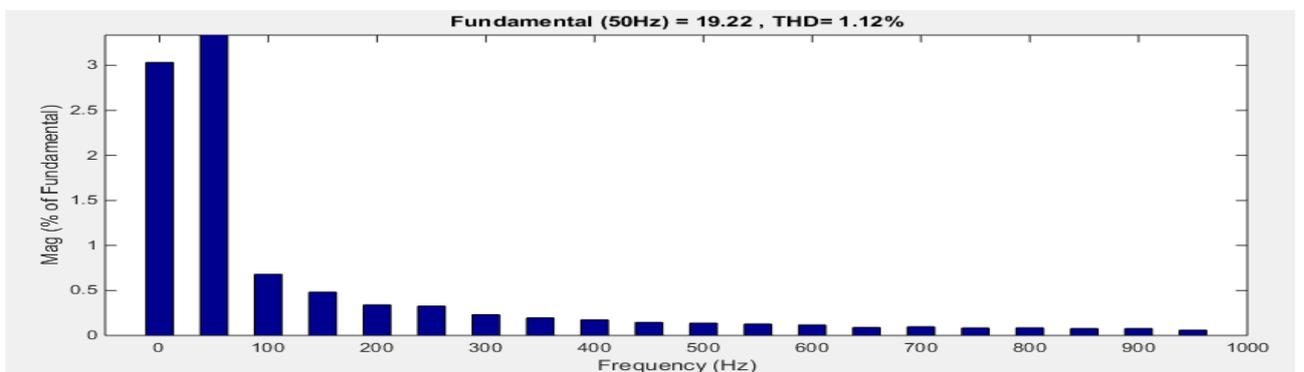


Figure.III.22.spectre harmonique de courant après filtrage

III.3.Simulation en Méthode puissance instantanées :

Avant de filtrage :

Parametre de simulation :

$V_s = 230 \text{ v}$, $F = 50 \text{ Hz}$, $R_s = 0.25 \text{ ohm}$,

$R_{ch} = 6.5 \text{ ohm}$, $L_{ch} = 20 \text{ mh}$

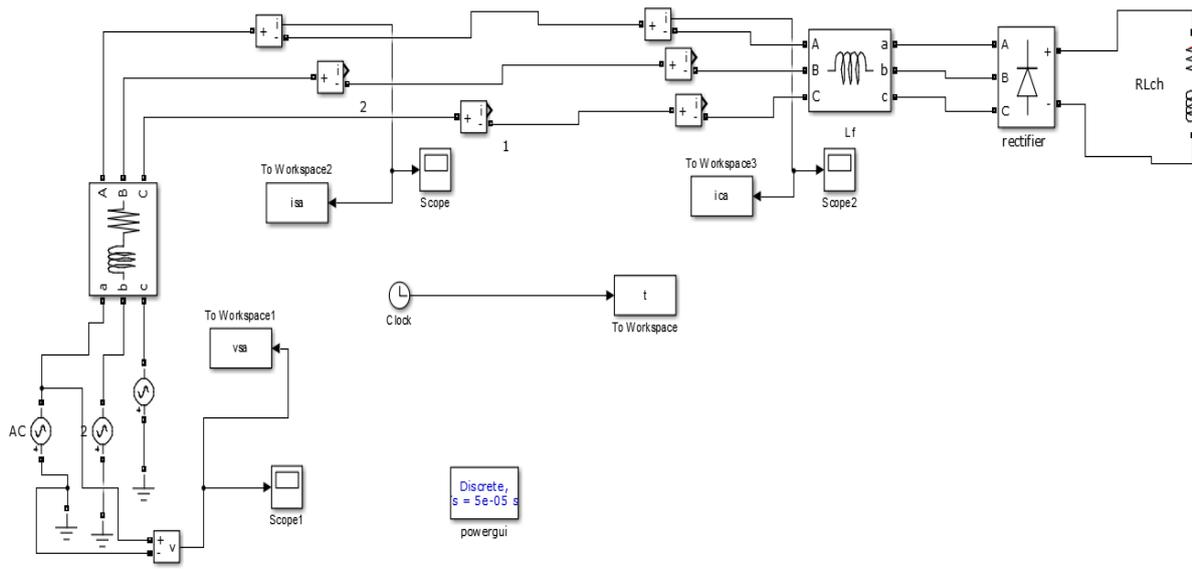


Figure.III.23.charge non linèaire sans filtrage

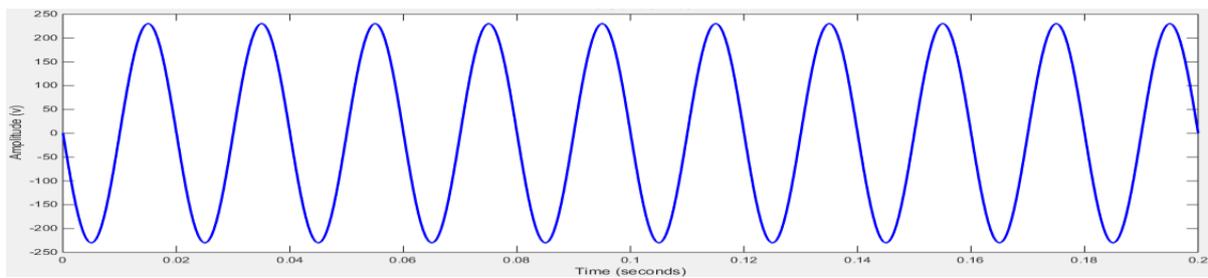


Figure.III.24.la source tension de phase vsa

Le courant absorbé par une les charges non linéaire et gènèrent des harmornique de la phase 1 isa et Pollution causée par le courant de source est présenté par la figure.III.28 suivante :

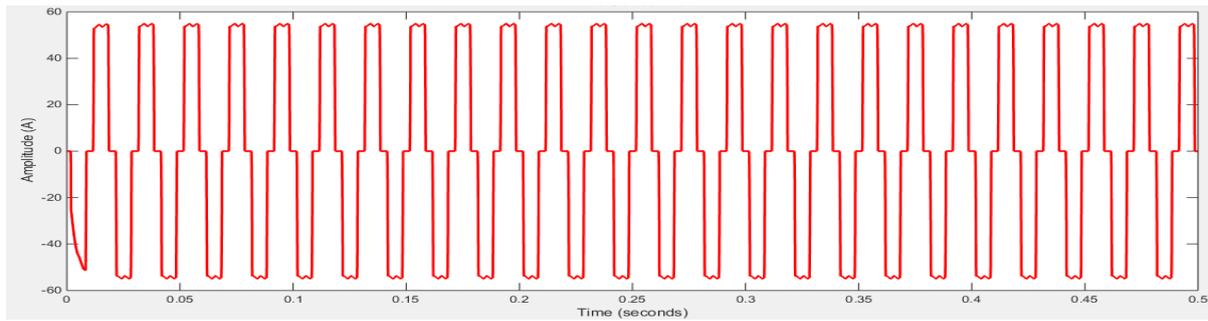


Figure.III.25.Courant de la source phase 1 isa

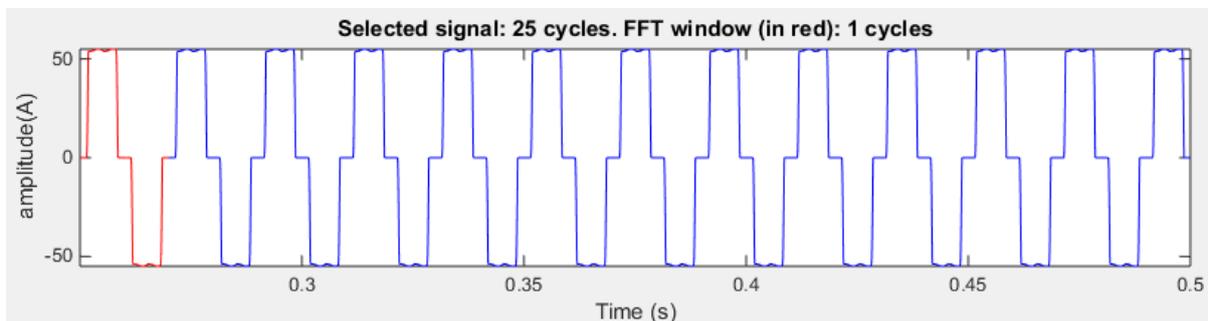


Figure.III.26. Allule de isa (a)avant filtrage

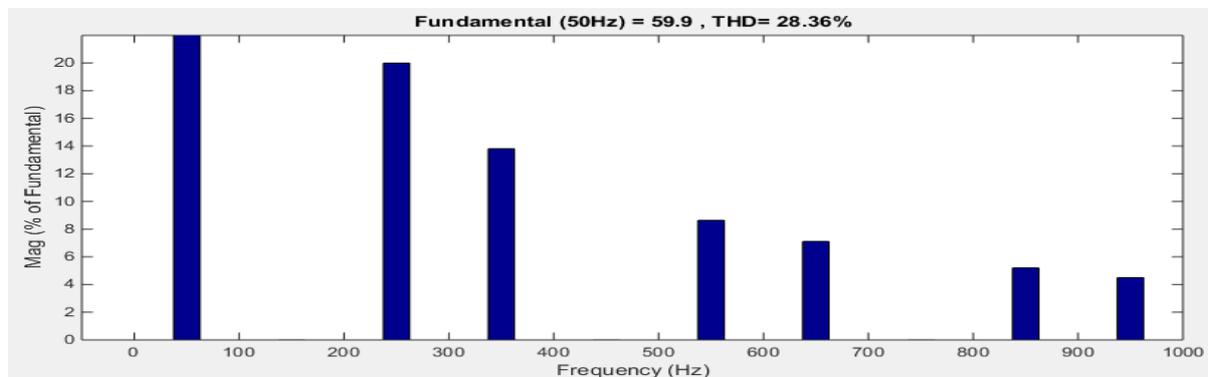


Figure.III.27.spectre harmonique de isa avant filtrage

Après filtrage :

$V_s = 230 \text{ v}$, $F = 50 \text{ hz}$, $R_s = 0.25 \text{ om}'h$,

$R_{ch} = 6.5 \text{ om}'h$, $L_{ch} = 20 \text{ mh}$,

$V_{dc} = 100 \text{ v}$, $L_f = 1.5 \text{ mh}$, $L_{fa} = 1.5 \text{ mh}$

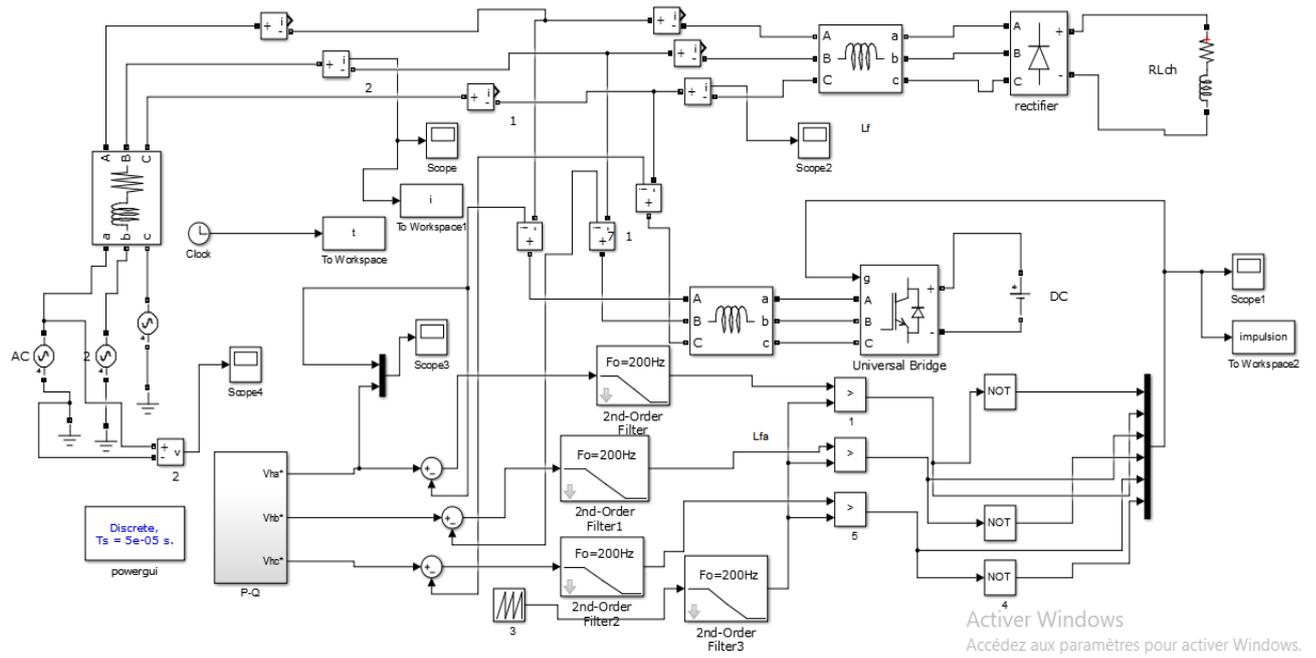


Figure.III.28. Block de simulation après filtrage

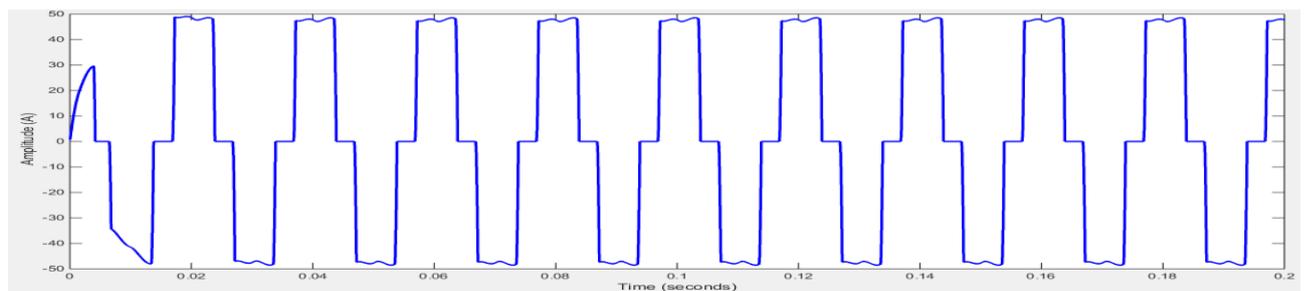


Figure.III.29. Courant de la charge après de filtrage

Le courant de source après filtrage nous donne la figure.III.33 suivante :

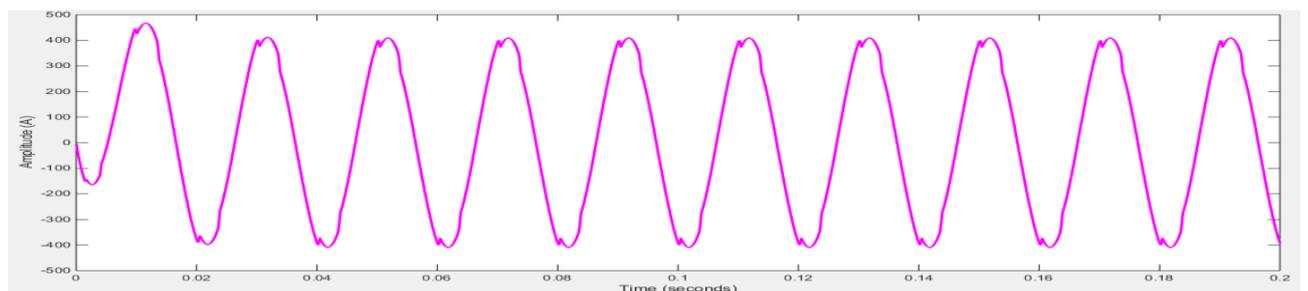


Figure.III.30. allule isa avant filtrage

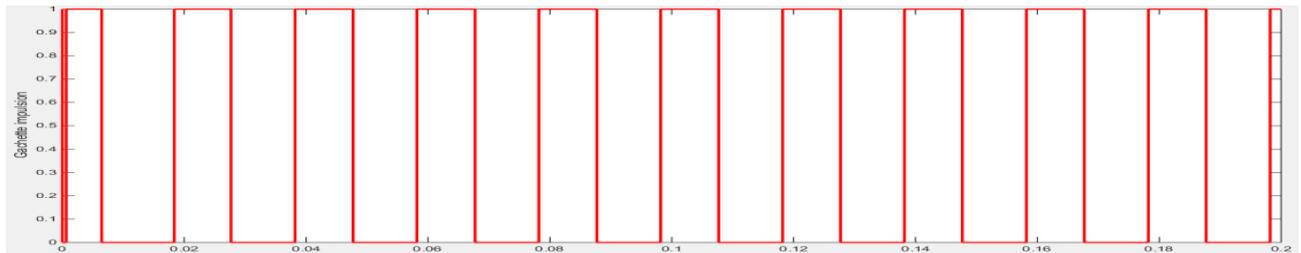


Figure.III.31. Impulsion de gâchette

Les figures.III.35 et la figure.III.36 illustrent les résultats de la simulation du système. Pour la phase (a). Calculer le THD de la source de courant après filtrage. Donnée une valeur de 3.73 %.

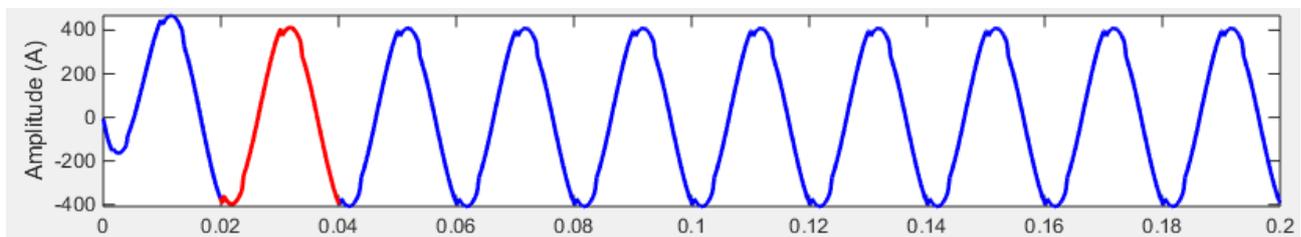


Figure.III.32. allule de courant isa analyse FFT

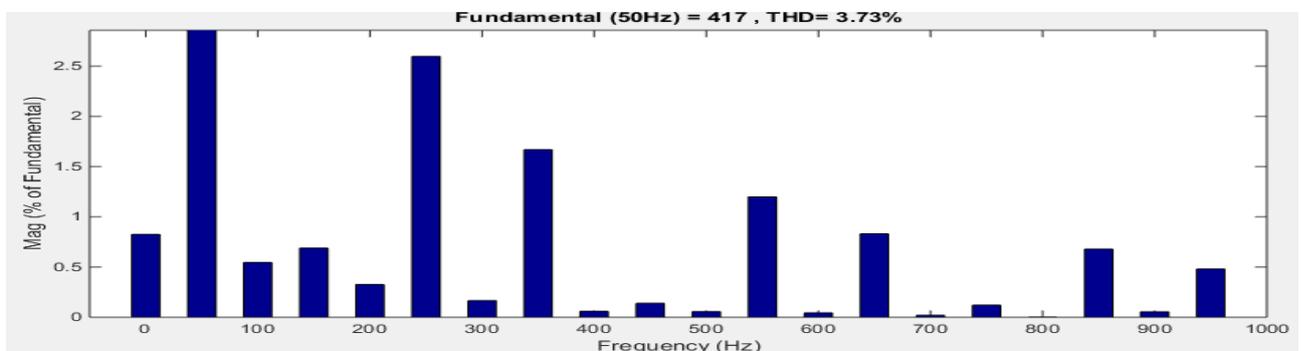


Figure.III.33. spectre harmonique de i_{sa} après filtrage

III.4. Interprétation des résultats de simulation :

La seconde méthode décrit les résultats de la simulation PQ obtenues en utilisant l'analyse de THD. La performance de la méthode SRF est meilleure que celle de la méthode PQ. Celle-ci a été améliorée par filtrage où le THD passe de 28,36% à 3,73%. Mais finalement, la méthode PQ devient moins filtrée que la SRF.

III.5.Comparaison des résultats :

Tableau III.1 : les Valeurs THD pour comparaison de méthode technique filtre actif harmoniques :

Méthode	Synchrone référence frame (SRF)	Puissance instantanées (PQ)
Avant filtrage THD %	21.87 %	28.36 %
Après filtrage THD %	1.12 %	3.73 %

Le tableau.III.1 résume les résultats de la simulation proposée en présence de méthodes SRF et PQ. Nous constatons que les performances obtenues sont bien meilleures après le filtrage par analyse THD_i et que la méthode SRF est le meilleur filtre en terme de précision élevé

III.6.Conclusion :

Nous avons simulé le filtre actif sur des réseaux électriques qui exploitent les charges non-linéaires contaminants des réseaux de sources en courant à l'aide du programme MATLAB-Simulink. Nous avons illustrés les résultats de la simulation proposée en présence de méthodes SRF et PQ. Nous constatons par analyse THD_i que les performances obtenues sont bien meilleures après le filtrage et que la méthode SRF est le meilleur filtre en termes de faible THD.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both featuring rounded ends and small circular details.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERAL

Dans ce travail on s'est intéressé à limiter le problème de la pollution des réseaux électriques par une technique dite : filtre actif des harmoniques. A cet effet, nous avons structuré notre étude de la manière suivante :

Dans un premier temps, nous avons présenté les sources des harmoniques et leurs effets sur le réseau électrique. Ensuite, un état de l'art des différents algorithmes de contrôle de filtrage actif a été décrit. Un intérêt particulier a été réservé à deux méthodes de dépollution actif des harmoniques, à savoir : la méthode de référentiel lié au synchronisme (SRF) et la méthode des puissances active et réactive instantanées (PQ). Nous avons aussi, présenté des résultats de simulation sous environnement Matlab en se basant sur ces deux méthodes d'implémentation.

Nous avons constaté par analyse de taux de distorsion harmonique (THD) que les performances obtenues sont bien meilleures après le filtrage. Aussi, nous avons remarqué que la méthode SRF est le meilleur filtre en termes de faible THD par rapport à la méthode PQ. En outre, cette stratégie de contrôle SRF est très simple et robuste.



BIBLIOGRAPHIE

[1] : Meriem AZMANI & Nerimane BENBACHIR « étude et simulation d'un conditionneur de puissance » mémoire master université Abou beker belkaid de Tlemcen ,2017.

[2] : OMEIRI AMAR « Simulation D'un Filtre Actif Parallele De Puissance Pour La Compensation Des Harmoniques De Courant » Thèse Doctorat Universite Badji Mokhtar Annaba, 2007.

[3] : HAKIM SAKKOU « Conception D'un Compensateur Actif

Multifonctions Corrigeant Toutes Les Perturbations En Tension Generees Par Les Charges Non Lineaires Et Les Fours A Arc » Memoire De Magisteruniversite Universite Du Quebec, 09 Janvier 2007.

[4] : Boucif Abdelmalek « Filtrage actif d'un réseau Électrique », Mémoire de Fin d'Etudes Université Mohamed Khider Biskra, 2013 / 2014

[5] : GHADBANE Ismail « Etude Et Réalisation D'un Filtre Actif Parallèle En Utilisant Différentes Stratégies De Contrôle » Thèse Doctorat 05/05/2016

[6] : OMEIRI AMAR « Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant » Thèse Doctorat UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2007.

[7] : KEBIRI « Samia Modelisation Et Simulation D'un Filtre Actif Multi Niveaux » Memoire De Magisteruniversite Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2009.

[8] : CHENNAI Salim « Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs Apport des Techniques de l'Intelligence Artificielle » Memoire Doctorat Universite Mohamed Khider – Biskra, 2013.

[9] : CHENNAI Salim « Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs : Apport des Techniques de l'Intelligence Artificielle » mémoire doctorat Université Mohamed Khider – Biskra, 2013.

[10] : Harici Otman « Etude D'un Filtre Actif A Commande Intelligente » Magistere Universite Des Sciences Et De La Technologie D'oran, 2012.

- [11] : REGUIG Nadjah.HERIZI Brahim « Etude Et Simulation D'un Filtre Actif De Puissance »Memoire Master Universite Mohamed Boudiaf - M'sila 2018
- [12] : CHENNAI Salim « Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs : Apport des Techniques de l'Intelligence Artificielle » mémoire Doctorat Université Mohamed Khider – Biskra ,2013.
- [13] : OMEIRI AMAR « Simulation D'un Filtre Actif Parallele De Puissance Pour La Compensation Des Harmoniques De Courant » These Doctorat Universite Badji Mokhtar Annaba, 2007.
- [14] : OMEIRI AMAR « Simulation D'un Filtre Actif Parallele De Puissance Pour La Compensation Des Harmoniques De Courant » These Doctorat Universite Badji Mokhtar Annaba 2007.
- [15] : OMEIRI AMAR « Simulation D'un Filtre Actif Parallele De Puissance Pour La Compensation Des Harmoniques De Courant » These Doctorat Universite Badji Mokhtar Annaba 2007
- [16] : STEEVE BEAULIEU « Etude Et Mise Au Point D'un Filtre Actif D'harmoniques En Vue D'améliorer La Qualité De L'alimentation Electrique » Memoire Ingénierie Universite Quebec A Chicoutimi, 2007.
- [17] : Tidjani MAHNI « Etude Et Conception D'un Filtre Actif Parall_Ele Triphase _A Quatre Fils En Vue De Sa Commande Par Des Methodes D'intelligence Arterielle »Doctorat Universite Mohamed Khider Biskra, 2017.
- [18] : OMEIRI AMAR « Simulation D'un Filtre Actif Parallele De Puissance Pour La Compensation Des Harmoniques De Courant » These Doctorat, Universite Badji Mokhtar Annaba ,2007.
- [19] : Tidjani MAHNI «Etude Et Conception D'un Filtre Actif Parallele Triphase A Quatre Fils En Vue De Sa Commande Par Des Methodes D'intelligence Arti_Cielle »Doctorat, Universite Mohamed Khider Biskra, 2017.
- [20] : OMEIRI AMAR « Simulation D'un Filtre Actif Parallele De Puissance Pour La Compensation Des Harmoniques De Courant » These Doctorat Universite Badji Mokhtar Annaba, 2007.

[21]: Fethi Chouaf « Compensation Du Courant Harmonique Genere Par Une Charge Non Lineaire »Memoire Ingenieur ,2011.

[22] : OMEIRI AMAR « Simulation D'un Filtre Actif Parallele De Puissance Pour La Compensation Des Harmoniques De Courant » These Doctorat Universite Badji Mokhtar Annaba ,2007.

[23] : BOUKADOUM AZIZ « Contribution A L'analyse Et La Reduction De La Pollution Harmonique Dans Le Reseau Electrique » Magister Universite Badji Mokhtar Annaba ,2007.

[24] : Mustapha SARRA « *Contribution A L'etude Des Filtres Actifs Hybrides* » Memoire Doctorat, Universite Ferhat Abbas – Setif, 2010.

[25] : STEEVE BEAULIEU « Etude Et Mise Au Point D'un Filtre Actif D'harmoniques En Vue D'améliorer La Qualité De L'alimentation Electrique » Memoire Ingenieur 2007 Universite Du Quebec A Chicoutiml

[26] : STEEVE BEAULIEU « Etude Et Mise Au Point D'un Filtre Actif D'harmoniques En Vue D'améliorer La Qualité De L'alimentation Electrique » Memoire Ingenieur 2007 Universite Du Quebec A Chicoutiml

[27] : HARICI Otman « Etude D'un Filtre Actif A Commande Intelligente » Magistere Universite Des Sciences Et De La Technologie D'oran, 2012.

[28] : TAHRI MERYEM ET ZOUKHA DJEMAA « Etude Et Simulation D'une Commande Robuste Pour Filtre Actif De Puissance A Deux Bras A Point Milieu Pour La Compensation De Courant Harmonique » Memoire Master Universite Abou Belk Belkaid De Tlemcen, 2017.

[29] : S. CHOCKALINGAM, M. ABHINAV SRINIVAS, S.BALAGURUNATHAN, MME KUMARAVEL. Contrôleur à logique floue pour filtre de puissance active shunt utilisant le département de théorie Du Cadre De Référence Synchrones De L'ingénieur Electrique Et Electronique, Sri Venkateswara College Of Engineering, Chennai, Inde. 17 et 18 avril 2015 Conférence Nationale Des Avancées En Génie Electrique Et Electronique (Ncaeee – 2015).p.1-19.

[30] : A. morsli, A. tlemcani, M.S. boucherit et N. ould cherchali « Dépollution des Réseaux Electriques Basse Tension utilisant un Filtre Actif Parallèle a deux niveaux contrôle par l'Algorithme P-Q »2012.p105-111.Adresse URL : https://ie.utcluj.ro/files/acta/2012/Number2/Paper03_Morsli.pdf.

- [31] : CHELLI Zoubir « Amelioration De La Qualite De L'energie Electrique Par Un Filtre Actif D'harmonique » These Doctora ,Universite Badji Mokhtar-Annaba-2015
- [32] : SANAE RECHKA « Etude De Méthodes De Filtrage Des Harmoniques Dans Les Réseaux Electriques De Ditribution » Mémoire Ingenieur A L'université Du Québec A Trois-Rivières 2002.
- [33] : STEEVE BEAULIEU « Etude Et Mise Au Point D'un Filtre Actif D'harmoniques En Vue D'améliorer La Qualité De L'alimentation Electrique » Memoire Ingénierie Universite Du Quebec A Chicoutimi 2007.
- [34] : Mohamed Muftah ABDUSALAM « Structures Et Strategies De Commande Des Filtres Actifs Parallele Et Hybride Avec Validations Experimentales » These Doctora L'universite Henri Poincare, Nancy-I.2008.
- [35] : NEKKAR Djamel « Contribution A L'étude Des Strategies De Commande Des Filtres Actifs Triphases » Memoire De Magister Universite Mohamed Cherif Messaadia De Souk-Ahras 2014.
- [36] : KEBIRI Samia « Modelisation Et Simulation D'un Filtre Actif Multi Niveaux » Memoire De Magister Universite Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou. 2009.
- [37] : Boucif Abdelmalek « Filtrage actif d'un réseau Électrique » Mémoire MASTER Université Mohamed Khider Biskra 2014.
- [38] : BENNAIDJA Tarek « Filtrage Actif Pour Les Reseaux Desequilibres Et Distordus » Magister, Universite Ferhat Abbas – Setif, 2014.
- [39] : BELHAOUCHET NOURI « Fonctionnement A Frequence De Commutation Constante Des Convertisseurs De Puissance En Utilisant Des Techniques De Commande Avancees Application : Amelioration De La Qualite De L'energie » Memoire Doctorat Universite Ferhat Abbas – SETIF, 2011.