

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Commande électrique

Thème

*Commande direct de puissance d'un filtre actif
parallèle*

Réalisé par :

DACHRI Mohammed Lamine

GUEDIRI Elhabib

MEHAYAECH Bachir

Encadré par:

Dr. ZELLOUMA Laid

Soutenu en 2020

Remerciement

*Nous tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous donnée la force et la patience d'accomplir ce travail. En second lieu, je tiens à remercier **Prof. Laid ZELLOUMA** qui est eu l'amabilité de nous 'encadrer pour la réalisation de ce travail et pour toute l'aide et les conseils qu'il nous 'est prodigué et ses précieux conseils. pour l'achèvement de ce mémoire.*

Enfin, je tiens également à remercier vivement les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire.

Nous sommes très reconnaissants à nos enseignants, pour leur dévouement au transfert de connaissance

Nous remercions tous nos amis et tous les membres de nos familles, pour leur support et encouragement.

Dédicas

*Je dédie ce travail à toute personne ayant contribué à
l'élaboration de ce modeste mémoire par leur soutien et
leurs encouragements, notamment :*

*Au deux personnes les plus précieuses que j'ai, **ma mère**
et **mon père** pour leur confiance, soutien et
encouragement continu.*

*A **mes frères, mes sœurs** spécialement aux petits poussins
"YAHIA, MASSOUDA, MANEL, AYMAN, et à chaque
personne portant le nom "**MEHAYECH**".*

*A tout **mes amis(es)**.*

Bachir



Dédicas

*Je dédie ce modeste travail à mes très chers **parents**,
pour leurs sacrifices, et qui n'ont jamais
cessé de m'encourager que Dieu
me les garde.*

*Mes très chers **frères** et mes **sœurs**.*

*A tous mes **enseignants***

*et tous **mes amis(es)**.*

M-Lamine

Dédicas

*Je dédie ce modeste travail à mes très chers **parents**,
pour leurs sacrifices, et qui n'ont jamais
cessé de m'encourager que Dieu
me les garde.*

*Mes très chers **frères** et mes **sœurs**.*

*A tous mes **enseignants***

*et tous **mes amis(es)**.*

Elhabib

RESUME

Ces dernières années, l'utilisation des convertisseurs statiques est en forte progression. Ces convertisseurs absorbent des courants non sinusoïdaux. Ils comportent alors comme des générateurs de courant harmonique provoquant des dysfonctionnements au niveau des équipements électriques.

Le développement récent des semi-conducteurs de puissance entièrement commandables, tels que les IGBT, a permis la conception de nouvelles structures, comme les filtres actifs de puissance, pour minimiser ces courants harmoniques.

Dans ce travail, nous avons abordé les principales perturbations effectuant sur le réseau électrique, les méthodes d'identifications des courants harmoniques et régulation de bus continue. Puis, nous avons étudié la technique de commande directe de puissance (DPC) d'un filtre actif parallèle, nous avons validé les résultats de simulation obtenus à partir de l'environnement *Matlab/Simulink*.

MOT CLÉ

Courant harmonique, La commande directe de puissance (DPC), Filtre actif parallèle.

ABSTRACT

Recently, the use of power electronic loads is increased. These power electronic loads absorb non-sinusoidal current from the electrical network and behave as harmonic currents generator, which can cause undesirable effects on electrical equipments.

The recent development of semi-conductor completely controllable, such as *IGBT*, allows to conceive new structures, such as active power filter for harmonic compensation.

In this work, we have discussed the main disturbances affecting the electrical network, the methods of identifying harmonic currents and continuous bus regulation. Then, we have studied the technique of direct power control (DPC) of a parallel active filter; we will validate the simulation results obtained from the *Matlab / Simulink* environment.

Key words

Harmonic current, direct power control (DPC), shunt active power filter,

المخلص

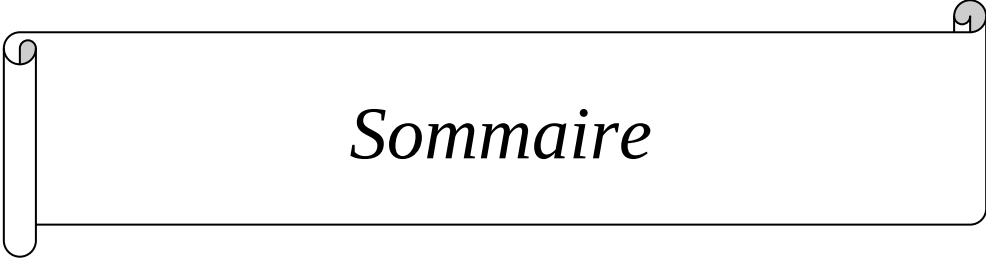
في السنوات الأخيرة، يعتبر استعمال المحولات الثابت في تزايد كبير، حيث أن هؤلاء المحولات يمتصون تيارات غير جيبيه من الشبكة الكهربائية. إذا أنهم يسلكون سلوك مولدات التيار التوافقي الذي يحدث خلل على مستوى الأجهزة الكهربائية.

أدى تطور أشباه النواقل للاستطاعة القابلة للتحكم ال *IGBT* في الألوان الأخيرة إلى ظهور مفهوم لبنية جديد مثل المرشح الفعال من أجل التقليل من هؤلاء التيارات التوافقية.

في هذا العمل ، ناقشنا الاضطرابات الرئيسية التي تؤثر على الشبكة الكهربائية ، وطرق تحديد التيارات التوافقية وتنظيم الناقل المستمر. بعد ذلك ، درسنا تقنية التحكم المباشر في الطاقة (DPC) لمرشح فعال متوازي ، وسوف نتحقق من صحة نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها من بيئة *Matlab / Simulink*.

الكلمات المفتاحية

التيارات التوافقية، التحكم المباشر في الطاقة (DPC)، المرشح الفعال المتوازن.



Sommaire

SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	i
LISTE DES FIGURES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES SYMBOLES.....	ix
LISTE DES ABREVIATIONS.....	xiii
INTRODUCTION GENERALE.....	1

CHAPITRE I

PERTURBATIONS DES RESEAUX ELECTRIQUES ET PRINCIPES DE COMPENSATION

I.1 INTRODUCTION.....	3
I.2 Perturbation électrique.....	3
I.2.1 Creux et coupures de tension.....	3
I.2.2 Fluctuations des tensions	4
I.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension.....	5
I.2.4 Variation de fréquence.....	5
I.2.5 forme de onde.....	6
I.2.5.1 Harmonique et inter harmonique.....	6
I.2.5.1.1 Source d'harmonique.....	6
I.2.5.1.2 Conséquence néfastes des harmoniques.....	7
I.3 Grandeurs caractéristiques.....	7
I.3.1 Grandeur harmonique.....	7
I.3.2 Rang de l'harmonique.....	7
I.3.3 Série de Fourier.....	7
I.3.4 Valeur efficace d'une grandeur alternative.....	8
I.3.5 Taux de distorsion.....	8
I.3.6 Spectre d'harmonique (de fréquence).....	8
I.3.7 Charges linéaires et non linéaires.....	9
I.4 Influence des harmoniques sur le facteur de puissance FP.....	9
I.5 Normes et réglementation de perturbation.....	10
I.6 Les techniques de dépollution des réseaux électriques.....	13
I.6.1 Les solutions traditionnelles.....	13
I.6.1.1 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique.....	13
I.6.1.2 Transformateurs à couplage spécial.....	14
I.6.1.3 Inductances (selfs) série.....	14

I.6.1.4 Filtre passif accordé.....	14
I.6.1.5 Filtre passif série.....	14
I.6.1.6 Pont dodécaphasé.....	14
I.6.2 Solutions modernes de dépollution.....	15
I.6.2.1 Filtrage actif.....	15
I.6.2.1.1 Filtre actif parallèle.....	16
I.6.2.1.2 Filtre actif série.....	17
I.6.2.1.3 Combinaison parallèle série actif.....	17
I.6.2.2 Filtrage hybride.....	18
I.6.2.2.1 Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.....	18
I.6.2.2.2 Association parallèle d'un filtre actif et d'un filtre passif.....	18
I.6.2.2.3 Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif.....	18
I.6.2.3 Les redresseurs MLI.....	18
I.6.2.3.1 Redresseur de tension.....	19
I.6.2.3.2 Redresseur de courant.....	19
I.7 Conclusion.....	20

CHAPITRE II

STRUCTURE DE FILTRE ACTIF DE PUISSANCE PARALLELE, IDENTIFICATION ET REGULATION DE BUS CONTINU

II.1 Introduction.....	21
II.2 Principe de filtrage actif parallèle de puissance.....	21
II.3 Structure du filtre actif parallèle.....	23
II.3.1 Etude de la partie puissance.....	23
II.3.1.1 Onduleur d'un filtre actif parallèle.....	24
II.3.1.1.1 Structures de onduleur.....	24
II.3.1.2 Circuit de stockage d'énergie.....	25
II.3.1.3 Filtre de sortie.....	26
II.3.2 Etude de la partie de commande.....	26
II.3.2.1 Les méthodes d'identification des courants perturbés.....	26
II.3.2.1.a Méthode du filtre coupe-bande (notch filtre).....	27
II.3.2.1.b La méthode de puissance instantanée réelle et imaginaire (<i>PIRI</i>).....	28
II.3.2.1.c La méthode de référentiel lié au synchronisme <i>SRF</i>	31
II.3.2.2 Système à base de PLL.....	32
II.3.2.3 La Commande de l'onduleur.....	32
II.3.2.3.1 La commande par hystérésis.....	33

II.3.2.3.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion(<i>MLI</i>) sinusoïdale.....	34
II.3.2.4 Régulation de la tension continue.....	35
II.4 Conclusion.....	36

CHAPITRE III

LA STRATEGIE DU CONTROLE DIRECT DE PUISSANCE DU FILTRE ACTIVE PARALLELE

III.1 Introduction.....	37
III.2 Etude du contrôle direct de puissance du SAPF (D.P.C.).....	37
III.3 Etat de l'art du contrôle direct de puissance.....	38
III.4 Stratégie du contrôle direct de puissance du SAPF.....	38
III.4.1 Calcul des puissances instantanées.....	38
III.4.2 Contrôleur à hystérésis.....	39
III.4.3 La position angulaire θ_n	40
III.4.4 Table de commutation.....	41
III.4.5 Régulation de la tension continue.....	41
III.5 Conclusion.....	42

CHAPITRE IV

SIMULATION DE L'ENSEMBLE RESEAU, FILTRE ACTIF PARALLELE ET CHARGE POLLUANTE

IV.1 Introduction.....	43
VI.2 Schéma de simulation d'un DPC.....	43
VI.3 Résultats de simulation et Interprétation.....	45
VI.3.1 Comportement du FAP en régime permanent.....	45
VI.3.2 Comportement du FAP en régime dynamique (Changement de la charge).....	47
VI.4 Interprétations des résultats.....	49
VI.5 Conclusion.....	50
CONCLUSION GENERALE.....	51
BIBLIOGRAPHIQUES.....	52

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I: Perturbations des Réseaux Electriques et Principes de Compensation.		
Figure	Titre	Page
Fig.(I.1)	Creux et coupures de tension.	4
Fig.(I.2)	Fluctuations de tension.	4
Fig.(I.3)	Déséquilibre du système triphasé de tension.	5
Fig.(I.4)	Variation de fréquence.	5
Fig.(I.5)	Harmoniques.	6
Fig.(I.6)	Le spectre des harmoniques du courant de la charge polluante.	9
Fig.(I.7)	Diagramme de Fresnel des puissances.	9
Fig.(I.8)	Pont dodécaphasé.	15
Fig.(I.9)	Montage d'un filtre actif parallèle.	16
Fig.(I.10)	Montage du filtre actif en série.	17
Fig.(I.11)	Combinaison parallèle -série actif.	17
Fig.(I.12)	Redresseur à MLI de tension.	19
Fig.(I.13)	Redresseur à MLI de courant.	19

CHAPITRE II: Structure de Filtre Actif de Puissance Parallèle, Identification et Régulation de Bus Continu.		
Figure	Titre	Page
Fig.(II.1)	Schéma de principe du filtre actif parallèle.	21
Fig.(II.2)	Schéma de principe de l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif et formes d'ondes des courants respectifs.	22
Fig.(II.3)	Structure générale de filtre actif parallèle.	23
Fig.(II.4)	Onduleur triphasé de tension.	24
Fig.(II.5)	Onduleur triphasé de courant.	24
Fig.(II.6)	Méthode du filtre coupe-bande.	27
Fig.(II.7)	Filter passe bas (FPB)	29
Fig.(II.8)	Filter passe -haut (FPH)	29
Fig.(II.9)	Algorithme d'extraction des courants de références par PIRI.	30
Fig.(II.10)	Extraction des harmoniques par méthode de référentiel synchrone.	32
Fig.(II.11)	Bande d'hystérésis et signal de commande d'un interrupteur.	33
Fig.(II.12)	commande par hystérésis d'un filter actif parallèle.	33
Fig.(II.13)	Principe de commande des courants par MLI.	34
Fig.(II.14)	Commande des interrupteurs par MLI naturelle.	34
Fig.(II.15)	Boucle de régulation de la tension continue.	36

CHAPITRE III: La stratégie du contrôle direct de puissance du filtre actif parallèle.		
Figure	Titre	Page
Fig.(III.1)	Synoptique de contrôle du SAPF avec la commande DPC.	39
Fig.(III.2)	Comportement d'un contrôleur de puissance à hystérésis a deux niveaux.	40
Fig.(III.3)	Plan α - β divisé en douze secteurs pour détecter la phase du vecteur de la tension.	40
Fig.(III.4)	Régulation de la tension continue.	41
CHAPITRE IV: Simulation de l'Ensemble Réseau, Filtre Actif et Charge Polluante.		
Figure	Titre	Page
Fig.(VI.1)	Schéma de simulation d'un DPC.	43
Fig.(VI.2)	(A): la position angulaire θ , (B): des secteurs, (C) et (D): la tension de source dans le repère (α, β) .	45
Fig.(VI.3)	(A): Courant de source I_s , (B): Courant de harmonique I_h , (C): Tension aux bornes du condensateur V_{dc} .	45
Fig.(VI.4)	La Tension V_s et courant I_s de source.	46
Fig.(VI.5)	(A): Courant de charge I_{ch} , (B): Courant de harmonique I_h , (C): Courant de source I_s , (D): Tension aux bornes du condensateur V_{dc} .	46
Fig.(VI.6)	La Tension V_s et courant I_s de la source.	46
Fig.(VI.7)	Courant source I_s avant (a) / après (b) filtre et son analyse spectrale.	47
Fig.(VI.8)	(A): Courant de charge I_{ch} , (B): Courant de harmonique I_h , (C): Courant de source I_s , (D): Tension aux bornes du condensateur v_{dc} .	48
Fig.(VI.9)	Tension aux bornes du condensateur V_{dc} et V_{dc-ref} , Courant de source I_s , Courant de harmonique I_h .	48

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I: Perturbations des Réseaux Electriques et Principes de Compensation.		
Tableau	Titre	Page
Tableau (I.1)	Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (CEI 61000-2-2).	10
Tableau (I.2)	Limites d'émissions de courants harmoniques des appareils BT de courant $\leq 16A$ (CEI61000-3-2).	11
Tableau (I.3)	Taux (en % de V1) des tensions harmoniques acceptables (CEI 61000-2-4).	12
Tableau (I.4)	Limites des distorsions des tensions au P_{cc} (IEEE 519-1996).	12
Tableau (I.5)	Limites des émissions harmoniques du courant I_h en % de I_L (IEEE 519/1159).	13
CHAPITRE III: La stratégie du contrôle direct de puissance du filtre active parallèle.		
Tableau (III.1)	Table de commutation pour la DPC classique.	41
CHAPITRE IV: Simulation de l'Ensemble Réseau, Filtre Actif et Charge Polluante.		
Tableau	Titre	Page
Tableau (IV.1)	Valeurs des éléments caractérisant la structure étudiée.	44
Tableau (IV.2)	Les résultats des simulations.	49

LISTE DES SYMBOLES

n	La range des harmoniques.
F_n	La fréquence de la composante harmonique de rang n (H_z).
F_1	La fréquence de la composante fondamentale (H_z).
F	La fréquence fondamentale du réseau (H_z).
$S(t)$	Un signal périodique peut représenter un courant (A) ou une tension (V).
T	Un période (S).
ω	La pulsation de réseau (rad/s).
a_0	Composante continue du signal $S(t)$ périodique.
a_n, b_n	Sont les coefficients de la série de Fourier.
Y_{eff}	La valeur efficace d'une grandeur d'harmonique.
Y_n	Les valeurs efficaces exactes des différentes composantes harmoniques.
Q	La puissance réactive associée au courant fondamental.
D	la puissance déformante due aux harmoniques du courant.
P	la puissance active.
S	la puissance apparente.
φ_1	Représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension.
λ^*	Le facteur de puissance.
I_h	Amplitude du courant harmonique.
I_L	Courant maximal demandé par la charge.
I_{sc}	Courant de court-circuit .
L	L'inductance(H).
C	Le condensateur(F).
R	La résistance (Ω).

i_{inj}, i_f	Courant injecte dans le réseau par filtre actif parallèle (A).
v_{dc}	Tension aux bornes du condensateur (V).
i_{dc}	Courant aux bornes du condensateur(A).
C_{dc}	Capacité du condensateur (F).
ε	L'amplitude de l'onde triangulaire.
V_s	La tension simple du réseau.
α	L'angle d'allumage des thyristors du pont Graetz.
W_h	La pulsation la plus faible des harmoniques à compenser.
$p(t)$	Puissance réelle(W).
$p_0(t)$	Puissance homopolaire(W).
$q(t)$	Puissance imaginaire.
$\overline{p}, \overline{q}$	Puissance continue liée à la composante fondamentale du courant et de la tension.
$\tilde{p}, \tilde{q}$	Puissances alternatif correspondantes à la somme les composantes perturbatrices du courant et de la tension.
Δ	Déterminé $V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2$.
I_{ref}	Courant de référence (A).
$I_{h-ref} \{1,2,3\}$	Courants de référence du réseau électrique(A).
$I_{h-ref} \{\alpha, \beta, 0\}$	Courants de référence du réseau électrique dans le repère stationnaire (A).
$\overline{i_d}, \overline{i_q}$	Courant continu (A).
$\widetilde{i_d}, \widetilde{i_q}$	Courant alternatif (A).
$k, \zeta_i, \tau_i, \omega_i$	Paramètres du régulateur P+FPB utilisé pour la régulation de courant injecté.
V_C	Tension continue du condensateur de stockage d'énergie.
U_P	Amplitude de la porteuse.
S_a, S_b, S_c	les sections de commutation.

S_p, S_q	les sections de commutation de l'erreur de puissance.
h_p, h_q	l'erreur des puissances active et réactive.
n	Nombre des secteurs.
θ	l'angle entre les secteurs.
H_q	la largeur de bande d'hystérésis.

LISTE DES ABREVIATIONS

THD	En anglais: Taux de Distorsion Harmonique.
F_p	Facteur de puissance.
IGBTs	En anglais: Insulated Gate Bipolar Transistor.
MOSFETs	En anglais: Metal Oxide Semi-Conductor Field Effect Transistor.
GTO	En anglais: Gate Turn-Off Thyristor.
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion.
VSC	Onduleur de tension.
FAP	Filtre Actif Parallèle.
FAS	Filtre Actif Série.
UPQC	En anglais: Unified Power Quality Conditioner.
IEEE	En anglais: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
CEI	En anglais: Commission Electrotechnique Internationale.
IGBT	En anglais: Isolated Gate Bipolar Transformer.
PLL	Boucle de verrouillage de phase.
FFT	La Transformée de Fourier Rapide.
DFT	La Transformée de Fourier Discrète .
RDFT	La transformée de Fourier discrète récursive.
PIRI	Puissance Instantanée Réelle et Imaginaire.
TCD	Transformation de Concordia Directe .
SRF	Théorie du Référentiel lié au Synchronisme.
PID	Régulateur :Proportionnelle Intégral, Dérivation .
F.e.m.	Force électromotrice.
SAPF	En anglais: Shunt Active Power Filter.
FPB	Filter Pas Bas.
FMV	Filter Multi-Variable.
BT	Basse Tension
MT	Moyenne Tension
DPC	En anglais: Direct Torque Control
PQr	puissances instantanées dans le référentiel.
E/S	Entrée/Sortie.
TDD	Total Demand Distortion.

*INTRODUCTION
GENERALE.*

INTRODUCTION GENERALE

Depuis de nombreuses années, la garantie de la qualité de fourniture d'électricité est la responsabilité de distributeur de l'énergie électrique. Donc, il faut faire des efforts pour assurer la continuité de service afin de rendre toujours disponible l'accès à l'énergie au niveau de l'utilisateur. Pour cela les critères de qualité est développés avec les équipements où l'électronique de puissance prend une place prépondérante dans les systèmes de commande. Mais avec l'utilisation croissante dans l'industrie des systèmes commandés par des convertisseurs statiques entraînent de plus en plus de problème de perturbation au niveau des réseaux électriques. Ces perturbations sont la cause principale d'une dégradation du facteur de puissance et d'une génération de courants alternatifs non sinusoïdaux riches en harmoniques. Les incidences sont à l'origine de la déformation de la tension, de la réduction de la capacité de transport et de l'augmentation des pertes.

Il existe un certain nombre de solutions techniques pour éliminer ou réduire les effets liés à une mauvaise qualité de l'énergie. Il s'agit là d'un domaine très riche tant en innovations qu'en développement. Pour faire face à ce problème, la solution classique qui est connue depuis bien longtemps consiste en l'utilisation des filtres passifs. Cette solution est la plus répandue et pratiquement la plus simple mais elle présente deux inconvénients majeurs. Le premier est lié au phénomène de résonance avec le réseau qui est l'origine de l'amplification de tout harmonique à fréquence voisine de celle du réseau. Le deuxième inconvénient est la dépendance des performances du filtre passif aux caractéristiques du réseau sur lequel il est connecté [1]. Le filtre actif de puissance est proposé comme un moyen efficace pour la compensation des harmoniques de courants ou de tensions générés par les charges non linéaires (convertisseurs statiques). Ils compensent, en temps réel, les perturbations dues à une charge non linéaire en injectant sur le réseau les harmoniques et le réactif du courant consommé par la charge afin que le réseau n'est puisqu' fournir un courant sinusoïdal et en phase avec la tension.

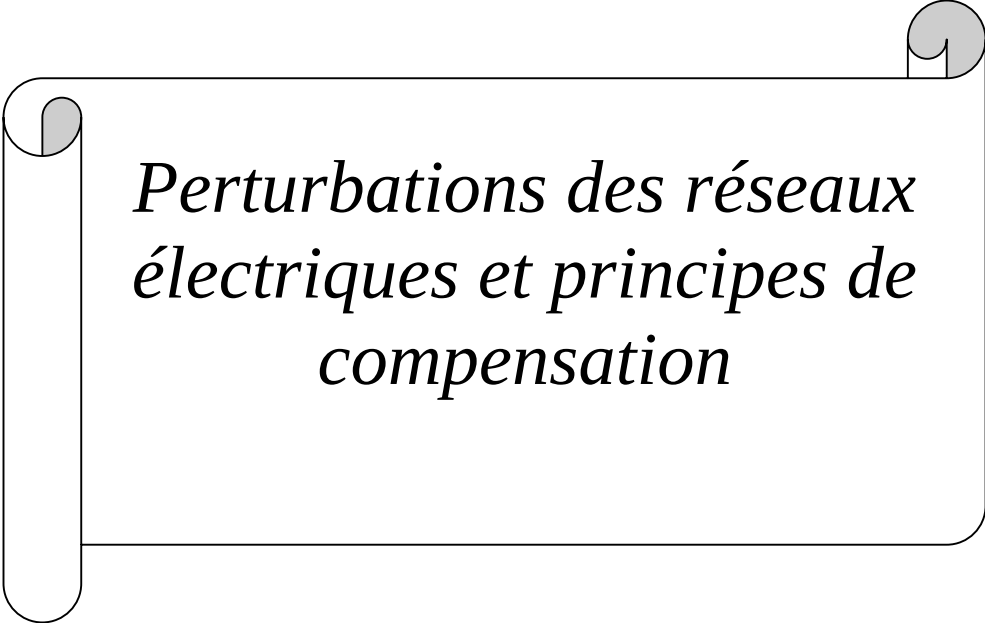
Le but de ce travail est l'étude du filtrage des harmoniques de courant en utilisant un filtre actif parallèle à trois fils .Ce filtre est commandé par la technique de contrôle direct de puissance (DPC). Ensuit validation les résultats de simulation obtenus à partir l'environnement *Matlab/Simulink*.

Ce mémoire est composé des quatre chapitres présenté comme suit :

- ✓ Dans le premier chapitre, nous présentons les perturbations des réseaux électriques connectés à des charges dites polluantes. Ensuite, les origines/les conséquences de cette pollution harmonique avec la citation des normes et régulations imposées aux utilisateurs, ainsi que les solutions classiques et modernes pour la réduction des harmoniques.
- ✓ Dans le deuxième chapitre, sera consacré à la structure du filtre actif parallèle de puissance ainsi que son principe de fonctionnement. Nous avons présenté la différente méthode d'identifications des courants harmoniques des références, les principaux types de commande d'onduleur, et la régulation de bus continue.
- ✓ Dans le troisième chapitre, nous étudierons la stratégie du contrôle direct de puissance du filtre active parallèle.
- ✓ Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté la simulation de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle, et charge polluante et interprété les résultats.

En fin de ce mémoire nous présentons une conclusion générale de cette étude.

Chapitre I



*Perturbations des réseaux
électriques et principes de
compensation*

I.1 Introduction

Comme tout générateur d'énergie électrique, un réseau de puissance fournit de l'énergie aux appareils utilisateurs par l'intermédiaire des tensions qu'il maintient à leurs bornes. Il apparaît évident que la qualité de cette énergie dépend de celle de la tension au point de livraison. Cette tension subit généralement beaucoup de perturbations [2].

Tels que les déséquilibres de la tension, les distorsions harmoniques, les creux de tension, les variations de fréquence, et les fluctuations des tensions etc. Ces perturbations peuvent générer des pannes, des endommagement ou des confusions qui impact négatif sur paramètres de la tension du réseau électrique suivants: la fréquence, l'amplitude, la symétrie des tensions triphasées et la forme de l'onde. Dans ce chapitre nous expliquerons des exemples de perturbations, nous détaillerons les perturbations des harmoniques.

I.2 Perturbation électrique

L'énergie électrique est délivrée sous forme de tension, caractérise par sa fréquence, son amplitude et sa forme d'onde qui doit être sinusoïdale. La qualité de la tension peut être affectée, soit par des perturbations aléatoires à caractère accidentel, soit par des perturbations existantes en permanence ou pendant des instants de durées bien déterminées. Ces perturbations sont classées comme suit [3]:

I.2.1 Creux et coupures de tension

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10% et 90% de la tension nominale pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelque second.

Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation ou dans les réseaux tant publics que ceux des utilisateurs. Ils s'apparaissent également lors de manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.)

Une coupure de tension quand à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90% de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. La figure (I.1) montre un exemple de creux et de coupure de tension [4].

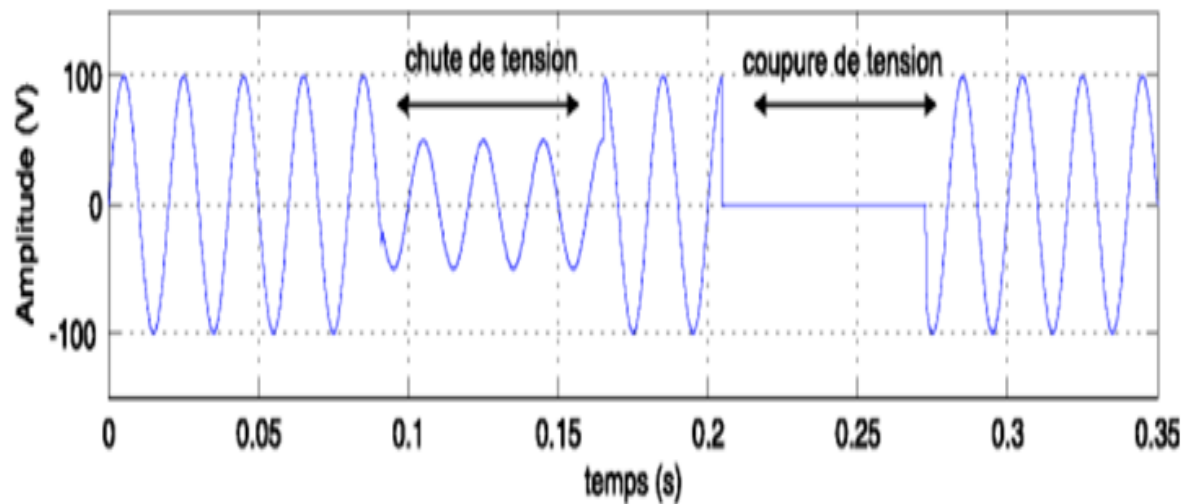


Fig. (I.1): Creux et coupures de tension.

I.2.2 Fluctuations des tensions

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de $\pm 10\%$ et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes [4].

Ce type de fluctuation est à distinguer des variations lentes de tension dues à la variation progressive de la consommation dans les réseaux. Les principales sources de fluctuations rapides sont les charges industrielles dont le fonctionnement aléatoire ou intempestif occasionne de brusques variations de puissances telles que les machines à souder et les fours à arc. Ces derniers produisent des variations erratiques permanentes de tension. Ces fluctuations sont responsables du phénomène de "Flicker" [5]. Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure (I.2).

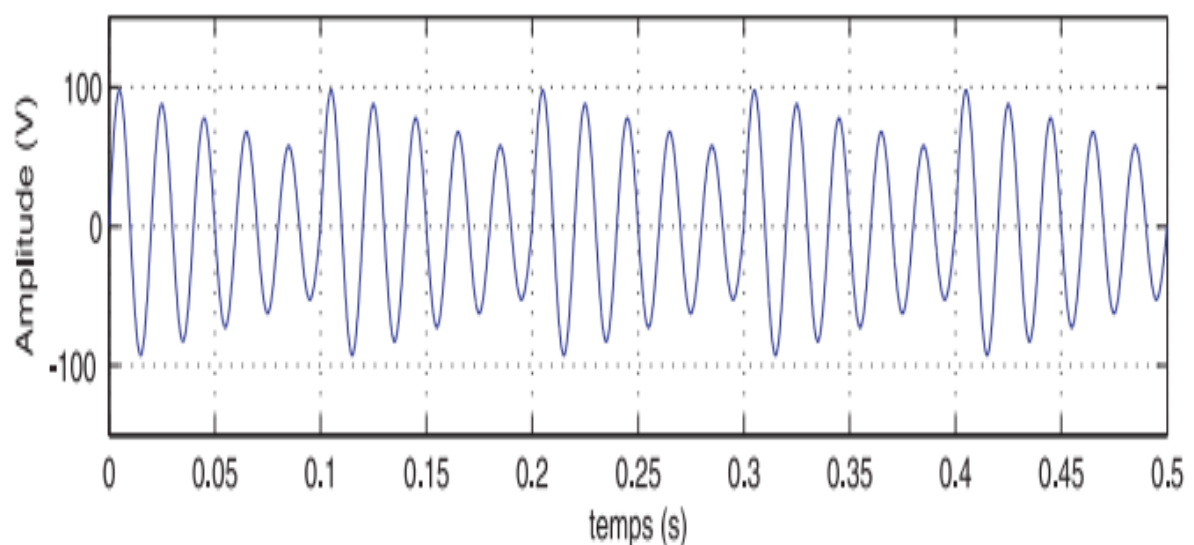


Fig. (I.2): Fluctuations de tension.

I.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé comme le montre la figure (I.3).

Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau [4].

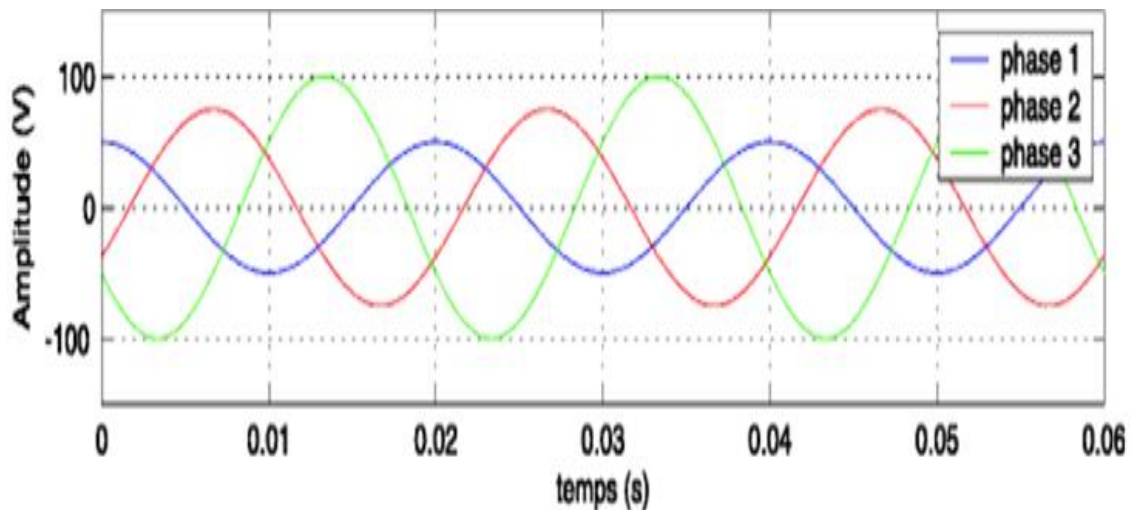


Fig. (I.3): Déséquilibre du système triphasé de tension.

I.2.4 Variation de fréquence

Elles sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles, par exemple certains défauts graves du réseau au niveau de la production ou du transport. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ [3]. Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure (I.4).

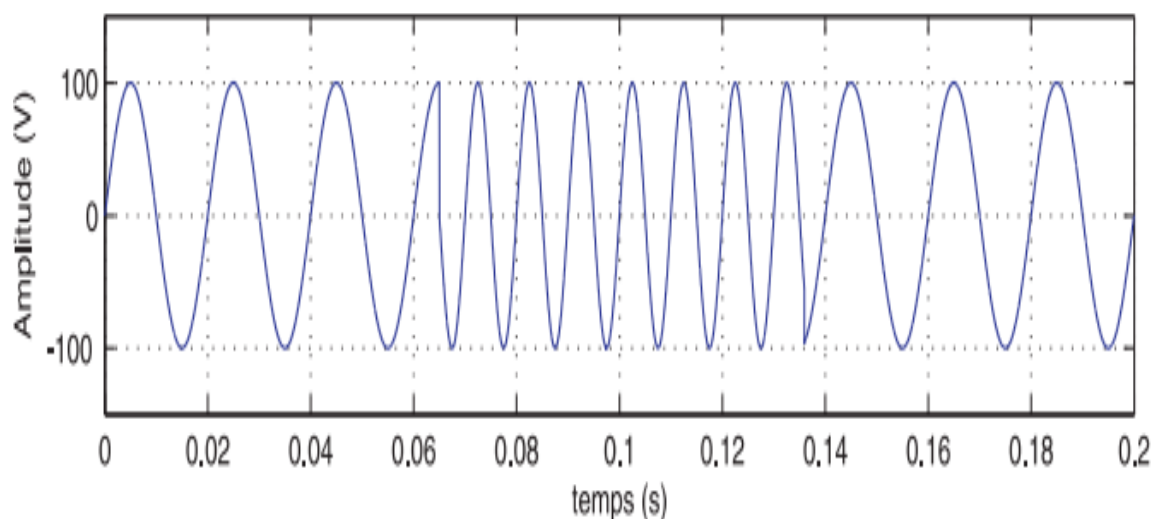


Fig. (I.4): Variation de fréquence.

I.2.5 la forme d'onde

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz appelées également harmoniques. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non-périodiques, alors dénommés bruits [6].

I.2.5.1 Harmonique et inter-harmonique

Les harmoniques sont une superposition à l'onde fondamentale (50Hz) des ondes sinusoïdales mais de fréquences multiples entières du fondamental. La figure (I.5) montre la superposition de l'harmonique d'ordre 3 sur un courant fondamental de fréquence 50 Hz. La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipements de l'électronique de puissance à base de thyristors [4].

Les inter harmoniques sont superposés à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence des réseaux [7].

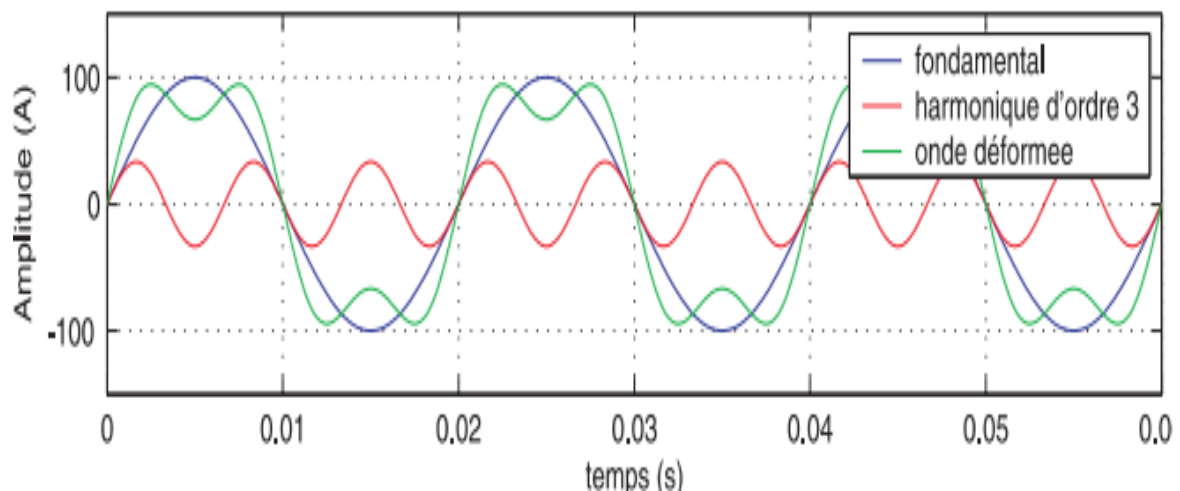


Fig. (I.5): Harmonique.

I.2.5.1.1 Source d'harmoniques

La cause principale de l'existence des harmoniques de tension est l'injection des courants non sinusoïdaux par des charges non linéaires, ou des charges déséquilibrées branchées au réseau. Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental [8]. En général, les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impairs existent [9].

I.2.5.1.2 Conséquences néfaste des harmoniques

On distingue deux sortes d'effets possible :

a. Effets instantanés

Sur certains types d'appareillage, tels que l'électronique de puissance, calculateurs, relais, systèmes de contrôle et régulation, etc., la présence des harmoniques sur les signaux provoque le déplacement du passage par zéro et des modifications de la valeur de crête de l'onde [10].

b. Effets à terme

Dans les machines tournantes, les transformateurs et les condensateurs, ils se manifestent par des échauffements supplémentaires; ce qui entraîne la destruction du matériel ou plus fréquemment une diminution de leur durée de vie par surcharge thermique [11].

I.3 Grandeurs caractéristiques

I.3.1 Grandeur harmonique

C'est l'une des composantes sinusoïdales de la variation d'une grandeur physique possédant une fréquence multiple de celle de la composante fondamentale. L'amplitude de l'harmonique est généralement de quelques pour cent de celle du fondamental [12].

I.3.2 Rang de l'harmonique

C'est le rapport de sa fréquence F_n à celle de la fondamentale (généralement la fréquence industrielle, 50 ou 60 Hz) :

$$n = \frac{F_n}{F_1} \quad (\text{I.1})$$

Par principe, la fondamentale F_1 a le rang un [13].

I.3.3 Série de Fourier

Ceci revient à dire que : « tout signal, périodique de période $T = \frac{1}{f}$, peut se décomposer en une somme infinie de termes sinus et cosinus de fréquences multiples de f ». Mathématiquement, cela s'écrit :

$$S(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (\text{I.2})$$

On calcule les coefficients a_n et b_n avec les formules suivantes :

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt \text{ et } b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt \quad (\text{I.3})$$

De plus, il existe quelques prérequis qui permettent de ne pas faire de calculs inutiles :

- si la fonction est symétrique par glissement, la valeur a_0 est nulle.
- si la fonction est paire, les coefficients b_n sont nuls.
- si la fonction est impaire, les coefficients a_n sont nuls.
- si la fonction possède une symétrie sur ses deux demi-périodes, les termes d'indice pairs sont nuls [13].

I.3.4 Valeur efficace d'une grandeur alternative

Un procédé couramment utilisé pour décrire un signal $S(t)$ périodique T est l'évaluation de sa valeur efficace:

$$S_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T S^2(t) dt} \quad (I.4)$$

Lorsque le développement en série de *Fourier* d'une fonction période est continu, on peut déterminer sa valeur efficace comme suit:

$$S_{eff} = \left(\sum_{h=1}^{\infty} (S_h)^2 \right)^{1/2} \quad (I.5)$$

La valeur efficace d'un signal tient compte de la présence de tous les composants, harmonique, inter-harmonique et de la composante continue.

Lorsqu'un signal comporte des composantes harmoniques, sa valeur efficace est différente de la valeur efficace du signal fondamental. Il est alors possible d'évaluer grossièrement la déformation du signal en comparant la valeur efficace de la composante fondamentale et la valeur efficace [14].

I.3.5 Taux de distorsion

Il y a plusieurs critères existant pour mesurer les perturbations harmoniques mais c'est la Distorsion Totale des Harmoniques (en anglais, Total Harmonic Distortion, THD) qui est le plus couramment utilisé.

Le *THD* étant défini comme le rapport entre la résultante de toutes les composantes harmoniques ($h \geq 2$) et le fondamental du courant peut être exprimé en pourcentage et calculé comme suit:

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n S_{eff_h}^2}}{S_{eff_1}} \times 100 \quad (I.6)$$

Avec: S_{eff_1} la valeur efficace du signal fondamental et S_{eff_h} les valeurs efficaces des différentes harmoniques du signales [15].

I.3.6 Spectre d'harmonique

C'est la représentation de l'amplitude des harmoniques en fonction de leur rang, la valeur des harmoniques étant généralement exprimée en pourcentage du fondamental par un histogramme. Comme montre la figure (I.6) [13].

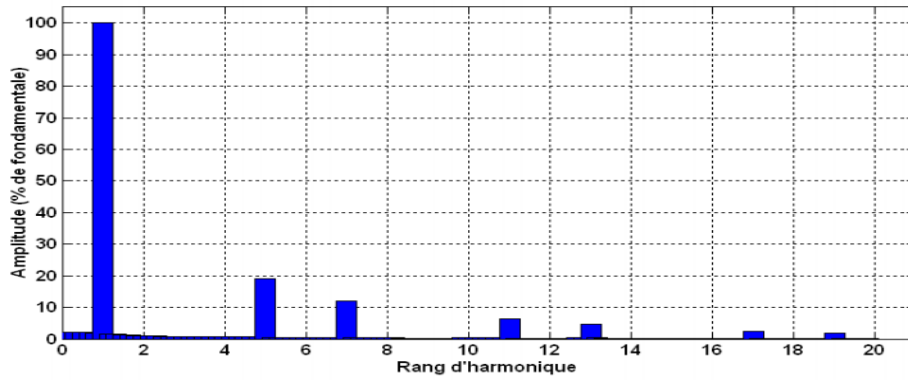


Fig. (I.6): Le spectre des harmoniques du courant de la charge polluante.

I.3.7 Charges linéaires et non linéaires

Une charge est dite linéaire si, alimentée par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal. Cependant, le courant et la tension peuvent être déphasés. Les charges linéaires couramment utilisées sont constituées de résistances, de capacités et d'inductances.

Une charge est dite non-linéaire lorsque la relation entre la tension et le courant n'est plus linéaire. Un tel récepteur alimenté par une tension sinusoïdale, consomme un courant non-sinusoïdal [16].

I.4 Influence des harmoniques sur le facteur de puissance FP

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S .

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties ; actives P , réactive Q et déformante D . Cette dernière est la puissance provoquée par les courants harmoniques, comme montre par équation suivante [17]:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{I.7})$$

$$P = 3 \cdot U \cdot I_1 \cos(\varphi_1) \quad (\text{I.8})$$

$$Q = 3 \cdot U \cdot I_1 \sin(\varphi_1) \quad (\text{I.9})$$

$$D = 3 \cdot U \cdot I_1 \cdot \sqrt{\sum_{h=2}^n Y_h^2} \quad (\text{I.10})$$

Finalement le facteur de puissance F_p est donné par l'expression :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{I.11})$$

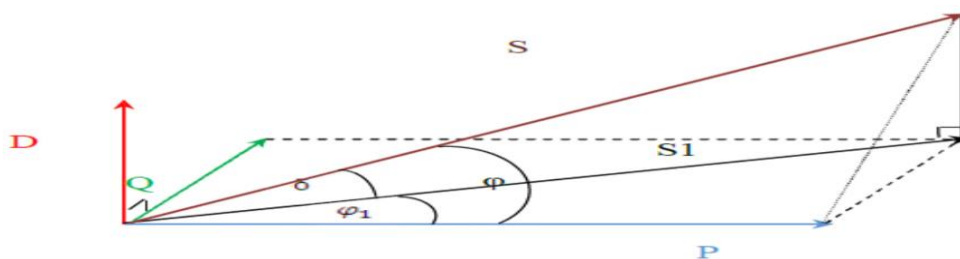


Fig. (I.7): Diagramme de Fresnel des puissances.

I.5 Normes et réglementation de perturbation

Les deux principaux organismes de normalisation internationaux dans le domaine électrotechnique sont la CEI (Commission Electrotechnique Internationale), et l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Ces deux organismes réalisent la principale activité de normalisation dans le domaine des perturbations électriques au niveau mondial mais n'ont pas une uniformité de critères en ce qui concerne la définition des interactions entre le réseau et les charges connectées.

L'objectif des normes et des réglementations est de limiter les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques. La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) définit le niveau des courants et des tensions harmoniques à ne pas dépasser par une série de normes de compatibilité électromagnétique (CEI 61000) Nous pouvons citer à titre d'exemple [18]:

➤ La norme CEI 61000-2-2

Cette norme fixe les limites de compatibilité pour les perturbations conduites basse fréquence et la transmission de signaux sur les réseaux publics d'alimentation basse tension. Les phénomènes perturbateurs incluent les harmoniques tableau (I.1), inter-harmoniques, fluctuations de tension, creux de tension, déséquilibres de tension transitoires, etc .. [19].

Tableau (I.1): Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (CEI 61000-2-2).

Harmoniques impairs non multiples de 3		Harmonique impairs multiples de 3		Harmonique pairs	
Rang harmonique N	Tension harmonique (%)	Rang harmonique n	Tension harmonique (%)	Rang harmonique n	Tension harmonique (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2 + 0.5 \cdot 25/n$				

➤ La norme CEI 61000-3-2

Dans cette norme les appareils électriques sont répertoriés selon les classes A, B, C, D.

- ✓ Classe A : Appareil triphasé et tout autre appareil à l'exception de ceux qui sont indiqués dans l'une des classes suivantes.
- ✓ Classe B : Outils portatifs, appareils de soudage à l'arc hors matériel professionnel.
- ✓ Classe C : Appareil d'éclairage y compris des dispositifs variateurs de lumière.
- ✓ Classe D : Appareil ayant un courant d'entrée à « forme d'onde spéciale » et dont la puissance active d'entrée $P \leq 600 \text{ W}$.

Le tableau (I.2) montre les limites d'émissions des harmoniques par ces appareils [20].

Tableau (I.2): Limites d'émissions de courants harmoniques des appareils BT de courant $\leq 16 \text{ A}$ (CEI61000-3-2).

Harmoniques H	Classe A [A]	Classe B [A]	Classe C [% fondamental]	Classe D [mA/W]
Harmonique impaires				
3	2.3	3.45	$30 \times \lambda^*$	3.4
5	1.14	1.71	10	1.9
7	0.77	1.155	7	1
9	0.4	0.6	5	0.5
11	0.33	0.495	3	0.35
13	0.21	0.315	3	3.85/13
$15 \leq h \leq 39$	$0.15 \times 15/h$	$0.225 \times 15/h$	3	$3.85/h$
Harmonique paires				
2	1.08	1.62	2	-
4	0.43	0.645	-	-
6	0.3	0.45	-	-
8	$0.23 \times 8/h$	$0.345 \times 8/h$	-	-

➤ Norme IEC 600001-2-4

Cette norme définit les limites de compatibilité pour les réseaux industriels et non publics basse tension et moyenne tension, à l'exclusion des réseaux de navires, des avions, des plates formes offshore et des installations ferroviaires, tableau (I.3) [21].

Tableau (I.3): Taux (en % de V1) des tensions harmoniques acceptables
(CEI 61000-2-4).

Rang harmonique H	Classe 1: matériels et systèmes sensibles	Classe 1 : Réseaux industriels	Classe 1 : Réseaux industriels perturbés
2	2	2	3
3	3	5	6
4	1	1	1.5
5	3	6	8
6	0.5	0.5	1
7	3	5	7
8	0.5	0.5	1
9	1.5	1.5	2.5
10	0.5	0.5	1
11	3	3.5	5
Pair, >10	0.2	0.2	1
13	3	3	4.5
15	0.3	0.3	2
17	2	2	4
19	1.5	1.5	4
21	0.2	0.2	1.75
impair, >21 et =3h	0.2	0.2	1
23	1.5	1.5	3.5
25	1.5	1.5	3.5
impair, >21 et =3h	$0.2+12.5/h$	$0.2+12.5/h$	$5*(11/h)^{\frac{1}{2}}$
THD	5%	8%	10%

➤ **Norme IEEE 519-1996**

Qui définit les limites des perturbations des tensions et courant au P_{cc} . Le tableau (I.4) indique ces limites des distorsions des tensions. Le tableau (I.4) indique ces limites des distorsions des tensions.

Tableau (I.4): Limites des distorsions des tensions au P_{cc} (IEEE 519-1996).

Niveau des tensions au P_{cc}	Taux individuel d'harmoniques (%)	Taux de distorsion global $THD(\%)$
$v_n \leq 69kv$	3	5
$69kv \leq v_n \leq 161kv$	1.5	2.5
$v_n \geq 161kv$	1	1.5

Dans cette norme, les limites pour les courants ne se calculent pas en fonction du courant fondamental mais en fonction du courant maximal appelé par la charge I_h (courant effectif). La distorsion globale est quantifiée alors par le TDD (Total Demand Distortion) au lieu de TDH . Les limites des émissions sont aussi liées au courant de court-circuit de l'installation issu de la puissance de court-circuit pour chaque niveau de tension. On présente dans le tableau(I.5) ces limites uniquement pour $v_n \leq 69kV$ [22].

Tableau (I.5): Limites des émissions harmoniques du courant I_h en % de I_L

(IEEE 519/1159).

$v_n \leq 69kV$						
I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
< 20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20-50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50-100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100-1000	12	5.5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2.5	1.4	20

Avec:

$$TDD (\%) = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_h^2}{I_L}} \times 100 \quad (I.12)$$

I.6 Les techniques de dépollution des réseaux électriques

I.6.1 Les solutions traditionnelles

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens. Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation [23].

I.6.1.1 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique

On procède généralement au surdimensionnement des équipements afin d'assurer leur tenue aux surcharges harmoniques. Cette solution n'agit pas sur les harmoniques qui ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur. Par cette approche, les problèmes liés à la pollution harmoniques sont résolus pendant une durée limitée. Le déclassement des équipements de distribution électrique soumis aux harmoniques est utilisé dans le cas des installations existantes. Cette méthode cause un surcoût de production et ne tire pas profit du potentiel réel de l'installation [3].

I.6.1.2 Transformateurs à couplage spécial

Il s'agit de limiter la circulation des courants harmoniques à une partie aussi petite que possible de l'installation à l'aide d'un transformateur à couplage approprié. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou trianglezigzag, empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre, ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques [24].

I.6.1.3 Inductances (selfs) série

Cette solution, utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse) et les redresseurs triphasés, consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non linéaire. Peu onéreuse, la self a cependant efficacité limitée. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux [25].

I.6.1.4 Filtre passif accordé

Le principe est de « piéger » les courants harmoniques dans des circuits LC, accordés sur les rangs d'harmoniques à filtrer. Un filtre comprend donc une série de « gradins » qui correspondent tous à un rang d'harmonique. Les rangs 5 et 7 sont les plus couramment filtrés. On peut installer un filtre pour une charge ou pour un ensemble de charges. Sa conception nécessite une étude approfondie du réseau électrique et un travail de conception de bureau d'étude. Le dimensionnement dépend du spectre harmonique de la charge et de l'impédance de la source d'énergie. Il convient également de coordonner ses caractéristiques avec les besoins en puissance réactive des charges ; enfin, il est souvent difficile de concevoir les filtres de manière à éviter un facteur de puissance avance (capacitif) pour certaines conditions de charge [26].

I.6.1.5 Filtre passif série

Le principe est le même que le précédant, mais au lieu de piéger les harmoniques, on les empêche de remonter à la source. Un exemple de filtre passif série est le circuit bouchon [27].

I.6.1.6 Pont dodécaphasé

Deux redresseurs hexaphasés montés en série font composer ce pont, qui est le pont le plus utilisé (cas des puissances importantes) . Donc, toujours dans le souci de repousser le premier harmonique présent sur un spectre pollué, l'association de deux ponts triphasés en série a été envisagée comme il est illustré sur le schéma de la figure (I.8) :

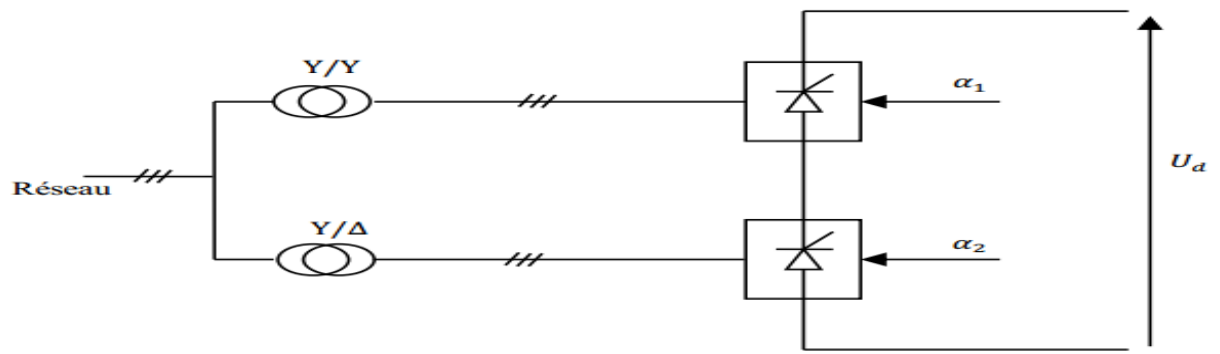


Fig. (I.8): Pont dodécaphasé.

L'utilisation d'un grand nombre de semi-conducteurs et de transformateurs à deux enroulements secondaires rend cette solution onéreuse. Elle entraîne un coût supplémentaire et demande plus que le savoir-faire habituel pour les mettre en œuvre.

Ces solutions ne résolvent pas les problèmes causés par les charges polluantes qui existent sur le marché.

Le manque d'adaptabilité des filtres passifs ainsi que le problème de résonance entre le filtre et l'inductance du réseau a conduit approfondir les recherches vers d'autres techniques plus adaptatives. Grâce au développement de l'électronique de puissance, de nouvelles structures de dépollution des réseaux sont apparues sous le nom de filtre actif afin d'adapter une solution efficace aux problèmes d'harmoniques [28].

I.6.2 les Solutions modernes de dépollution

La première solution de dépollution consiste à fabriquer la charge la moins polluante possible, comme le pont redresseur dodécaphasé, de manière à réduire le taux d'émission d'harmoniques. Les appareils à prélèvement sinusoïdal sont aussi proposés pour la compensation des harmoniques et de la puissance réactive. Cependant, ces solutions entraînent un coût supplémentaire et demandent plus que le savoir-faire habituel pour les mettre en œuvre. De plus, ces solutions ne résolvent pas les problèmes causés par les charges polluantes qui existent sur le marché [29].

I.6.2.1 Filtrage actif

Les inconvénients inévitables aux filtres passifs et l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les Transistors IGBT, ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtres appelée filtres actifs de puissance. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension du réseau soient rendus sinusoïdaux et parfois avec un facteur de puissance unitaire. Le filtre actif est connecté en série, en parallèle, en combinant ces deux dernières structures ensemble ou associé avec des filtres passifs en fonction des grandeurs électriques harmoniques (courants ou tensions) à compenser.

Les avantages de ces filtres actifs par rapport aux filtres passifs sont les suivants :

- le volume physique du filtre est plus réduit.
- la capacité de filtrage est supérieure.
- la flexibilité et adaptabilité sont très supérieures.

Pourtant, ils présentent quelques inconvénients :

- Leur coût élevé a limité leur implantation dans l'industrie.
- Les pertes sont plus élevées.

Deux types de convertisseurs connus dans la littérature constituent l'APF:

- ✓ convertisseur à source de courant (CSI)
- ✓ convertisseur à source de tension (VSI) [30].

I.6.2.1.1 Filtre actif parallèle

Ce filtre est le plus souvent commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec le réseau, afin que la somme avec ceux-ci soit nulle. On obtient alors des courants sinusoïdaux au niveau du réseau. Il permet donc de supprimer au point de raccordement tous les harmoniques de courants de charge non linéaire. Il peut aussi fonctionner comme un compensateur de tensions harmoniques dont il permet de maintenir sinusoïdale la tension au point de raccordement quel que soit le courant absorbé par la charge ou la qualité de la source de tension.

En générale, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. Son impédance totale vis à vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec les performances appréciables [28].

Ce type de configuration est indiqué par la figure (I.9) :

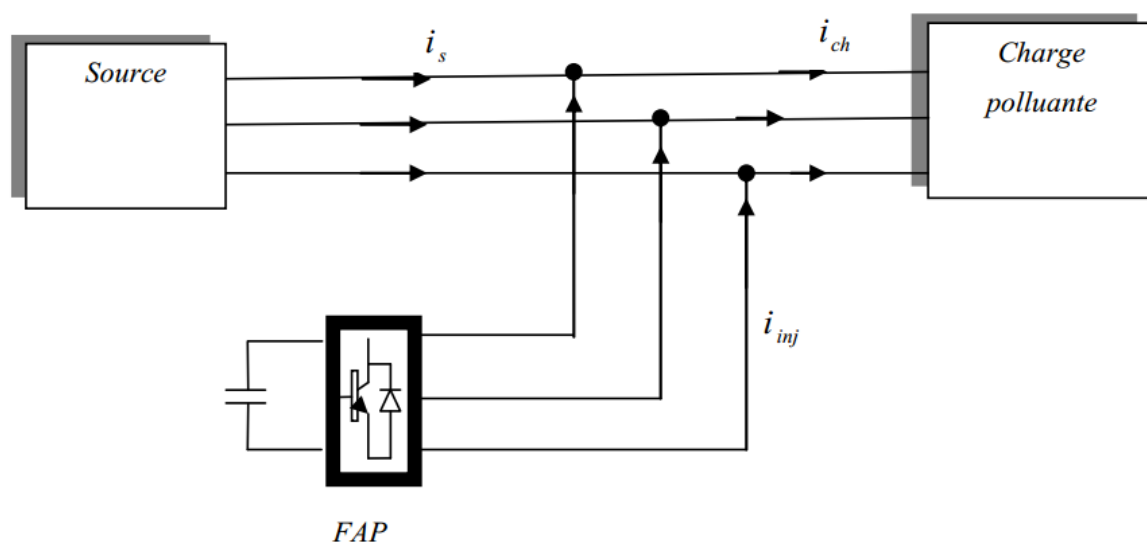


Fig. (I.9): Montage d'un filtre actif parallèle.

I.6.2.1.2 Filtre actif série

Comme son nom l'indique, ces filtres sont connectés en série avec la ligne à travers un transformateur. Ce filtre injecte la tension de compensation en série avec la tension d'alimentation. Ainsi, il agit comme une source de tension qui peut être commandée pour compenser la chute / le dépassement [31]. Le schéma d'un tel filtre est illustré à la Figure (I.10) :

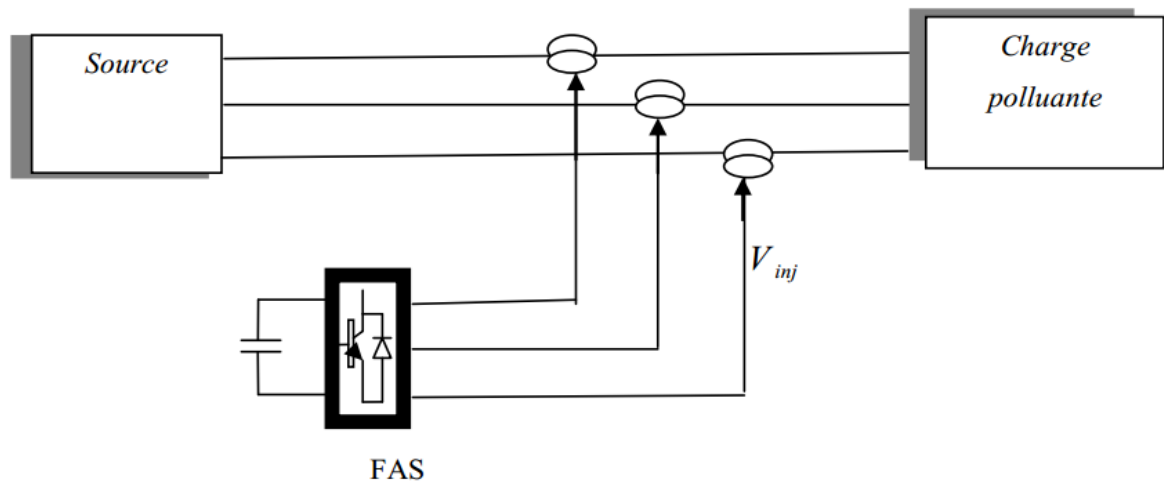


Fig. (I.10): Montage du filtre actif en série.

I.6.2.1.3 Combinaison parallèle série actif

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série dans la figure (I.11). Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallèle série actif ou Unified Power Quality Conditioner (UPQC).

Le filtre actif série placé en amont du filtre actif parallèle, comme il est montré dans la figure (I.11), permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices; or s'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée [4].

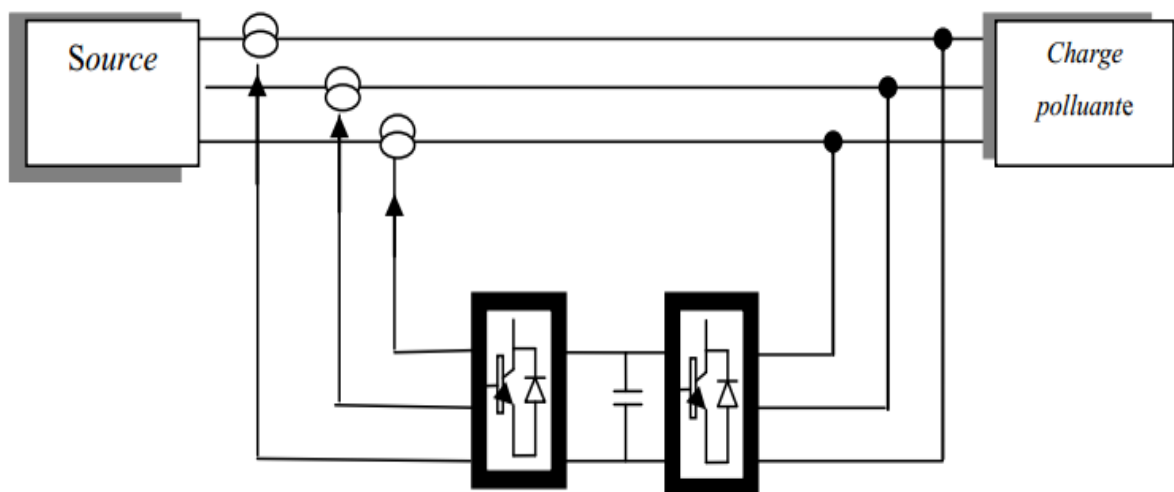


Fig. (I.11): Combinaison parallèle-série actif.

I.6.2.2 Filtrage hybride

Le filtre hybride est une topologie de filtre qui combine les avantages des filtres passifs et des filtres actifs. Pour cette raison, il est considéré comme l'une des meilleures solutions pour filtrer les harmoniques de courant des réseaux de distribution. Une des principales raisons de l'utilisation du filtre actif hybride est liée au développement des semi conducteurs de puissance tels que les transistors de puissance de types MOSFET ou IGBT. De plus, du point de vue économique, le filtre hybride présente un atout majeur : il permet de réduire le coût du filtre actif, actuellement l'obstacle majeur à l'utilisation de filtres actifs [32].

I.6.2.2.1 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.

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 [2], [33].

I.6.2.2.2 Association parallèle d'un filtre actif 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 [33].

I.6.2.2.3 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 [34].

I.6.2.3 Les redresseurs MLI

Ce sont des convertisseurs à modulation de largeurs d'impulsions, utilisant des composants à commutation forcée tels que les IGBT ou les thyristors GTO. L'emploi de cette technique permet non seulement une réduction de la perturbation harmonique en prélevant des courants d'allure sinusoïdale mais aussi un contrôle des puissances actives et réactives. On distingue deux structures, la structure courant et la structure tension. Elles sont développées dans la suite [29]:

I.6.2.3.1 Redresseur MLI de tension

Son schéma de principe est présenté sur la figure (I.12). Les composants de puissance disponibles (IGBT, GTO) étant unidirectionnels en courant, le courant I_d le sera également unidirectionnel. La réversibilité en puissance s'effectue par l'inversion de la tension redressée U_d . Le contrôle de la puissance réactive est obtenu par action sur la phase du courant réseau par rapport à la tension [35].

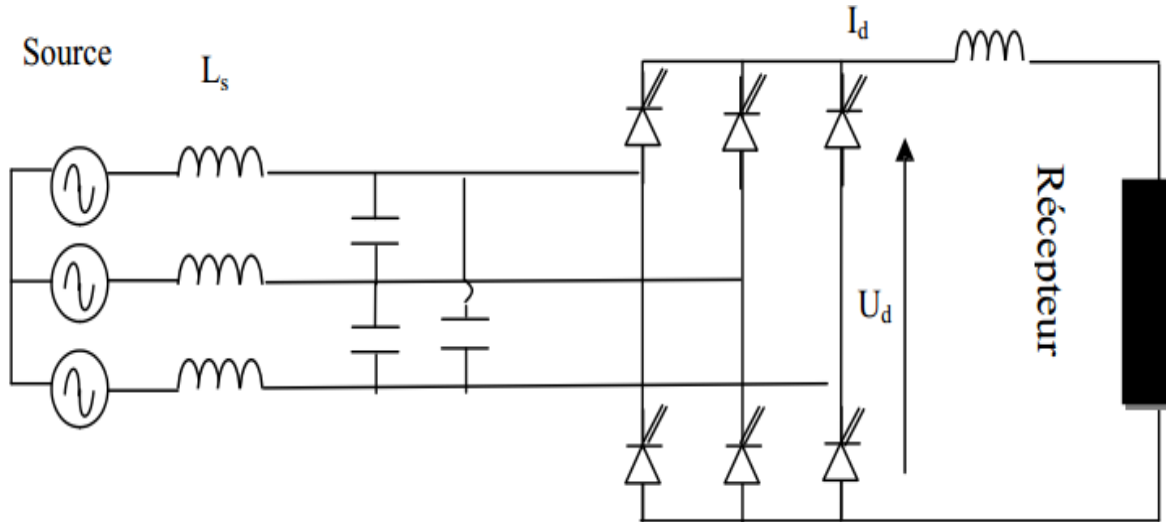


Fig. (I.12): Redresseur à MLI de tension.

I.6.2.3.2 Redresseur MLI de courant

La tension U_d étant unidirectionnelle, la réversibilité de la puissance active est assurée par le courant I_d , qui est bidirectionnel. Le contrôle de la puissance réactive est réalisé par action indirecte sur la phase du fondamental de courant du réseau.

Les inductances L_r servent dans la figure (I.13) à découpler le convertisseur de réseau car les deux réseaux alternatifs et continus sont tous deux sources de tension [13].

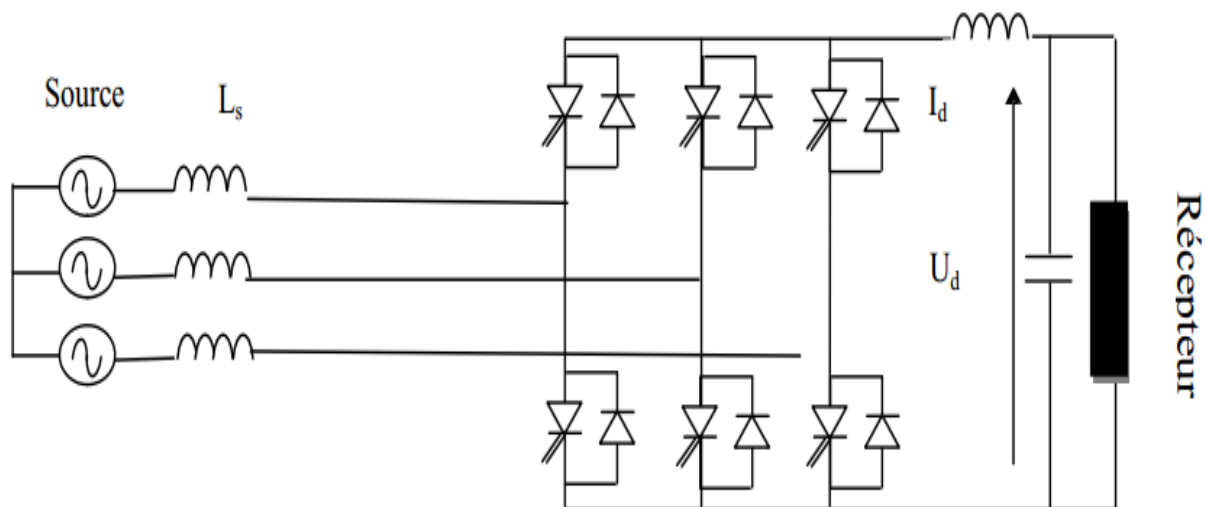


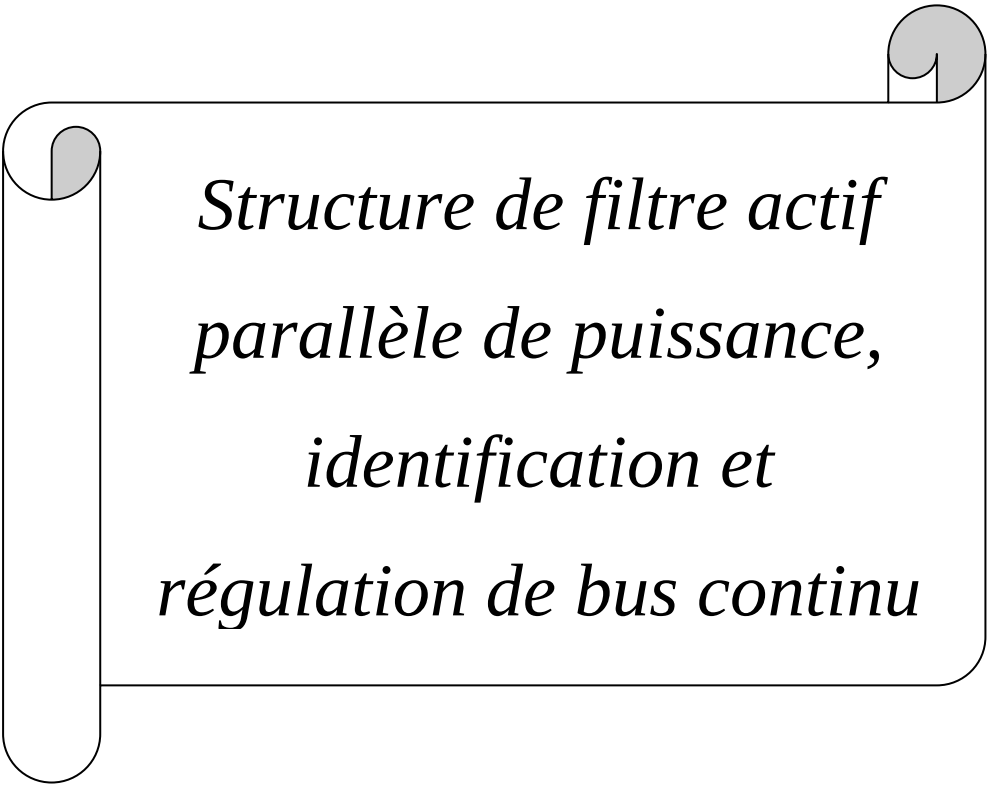
Fig. (I.13): Redresseur à MLI de courant

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes origines des perturbations affectant les réseaux électriques et les solutions de dépollution existantes. Ces perturbations étant néfastes pour les installations électriques à cause des dysfonctionnements éventuels qu'ils peuvent engendrer. Par conséquent, leur compensation est amplement souhaitée pour des raisons technico-économiques.

Dans le chapitre suivant nous nous intéresserons aux solutions modernes telles que le filtre actif parallèle qui sera l'objet de ce mémoire.

Chapitre II

A decorative scroll graphic with a light gray background and a dark gray border. The scroll is unrolled on the left side, with a small gray circle at the top left corner. The text is centered within the scroll.

*Structure de filtre actif
parallèle de puissance,
identification et
régulation de bus continu*

II.1 Introduction

Depuis quelques années, le filtrage actif fait l'objet de nombreux travaux de recherche afin de compenser les courants harmoniques générés par les charges polluantes connectées aux réseaux électriques [27].

Dans ce chapitre nous présentons la description générale des différentes parties de filtre actif de puissance. Nous commencerons par un exposé la structure générale du filtre actif parallèle, laquelle a été divisée en deux: la partie puissance et la partie contrôle-commande. Ensuite, dans la partie puissance, nous allons introduire les trois principaux blocs de cette structure, à savoir l'onduleur de tension, l'élément de stockage d'énergie et le filtre de sortie. Finalement, dans la partie de contrôle-commande, nous exposerons les cinq principaux blocs, soit l'identification des courants perturbés, la régulation de la tension continue et du courant du filtre actif parallèle, la commande de l'onduleur et le système à base de PLL. Le système à base de PLL sera intégré dans la méthode d'identification des courants perturbés afin de généraliser l'application de cette dernière dans les cas les plus défavorables de la tension du réseau.

II.2 Principe de filtrage actif parallèle de puissance :

Le schéma de principe du filtre actif parallèle est représenté sur la figure (II.1), il doit fournir la puissance déformante et la puissance réactive. Ainsi, le réseau fournit uniquement la puissance active.

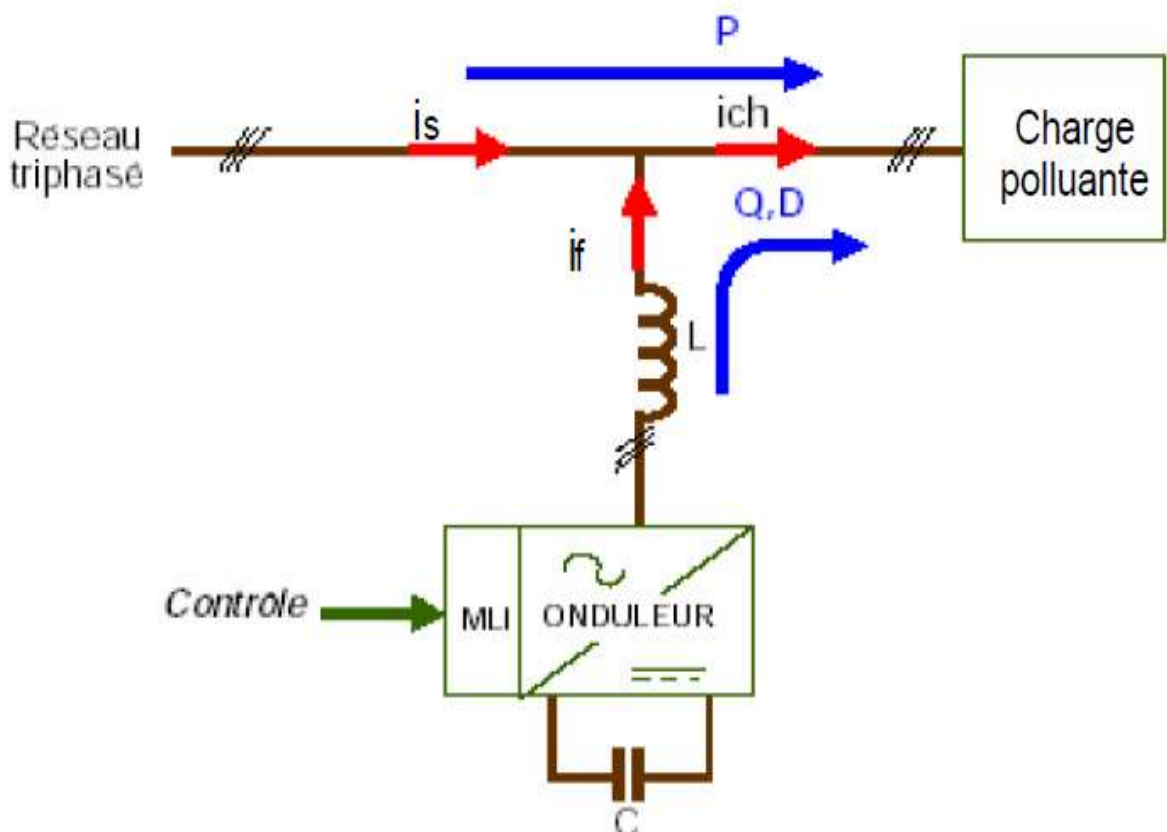


Fig. (II.1): Schéma de principe du filtre actif parallèle.

Pour cela, le circuit de contrôle, en agissant sur la commande de l'onduleur, doit imposer la valeur instantanée du courant débité par l'onduleur de telle sorte que le courant fourni par le réseau soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante.

Dans le cas général, le courant absorber par la charge comporte une composante active (i_{cha}), une composante réactive (i_{chr}) et une composante harmonique ($\sum_{n+1}^{\infty} i_{chn}$).

$$i_{ch} = i_{cha} + i_{chr} + \sum_{n+1}^{\infty} i_{chn} \quad (II.1)$$

Le compensateur actif ne peut absorber ou fournir de la puissance active puisqu'il ne comporte pas de source active.

D'après la première loi de Kirchhoff, le courant fourni par la source est égale à :

$$i_s = i_{ch} - i_f \quad (II.2)$$

La source fournit la puissance active absorbée par la charge :

$$i_s = i_{cha} \quad (II.3)$$

Le filtre actif parallèle fournit la puissance réactive et déformante :

$$i_f = i_{chr} + \sum_{n+1}^{\infty} i_{chn} \quad (II.4)$$

Pour illustrer le principe de filtrage actif, considérons l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif représenté sur la figure (II.2). La charge polluante est constituée d'un pont triphasé à diodes débitant sur un circuit RL.

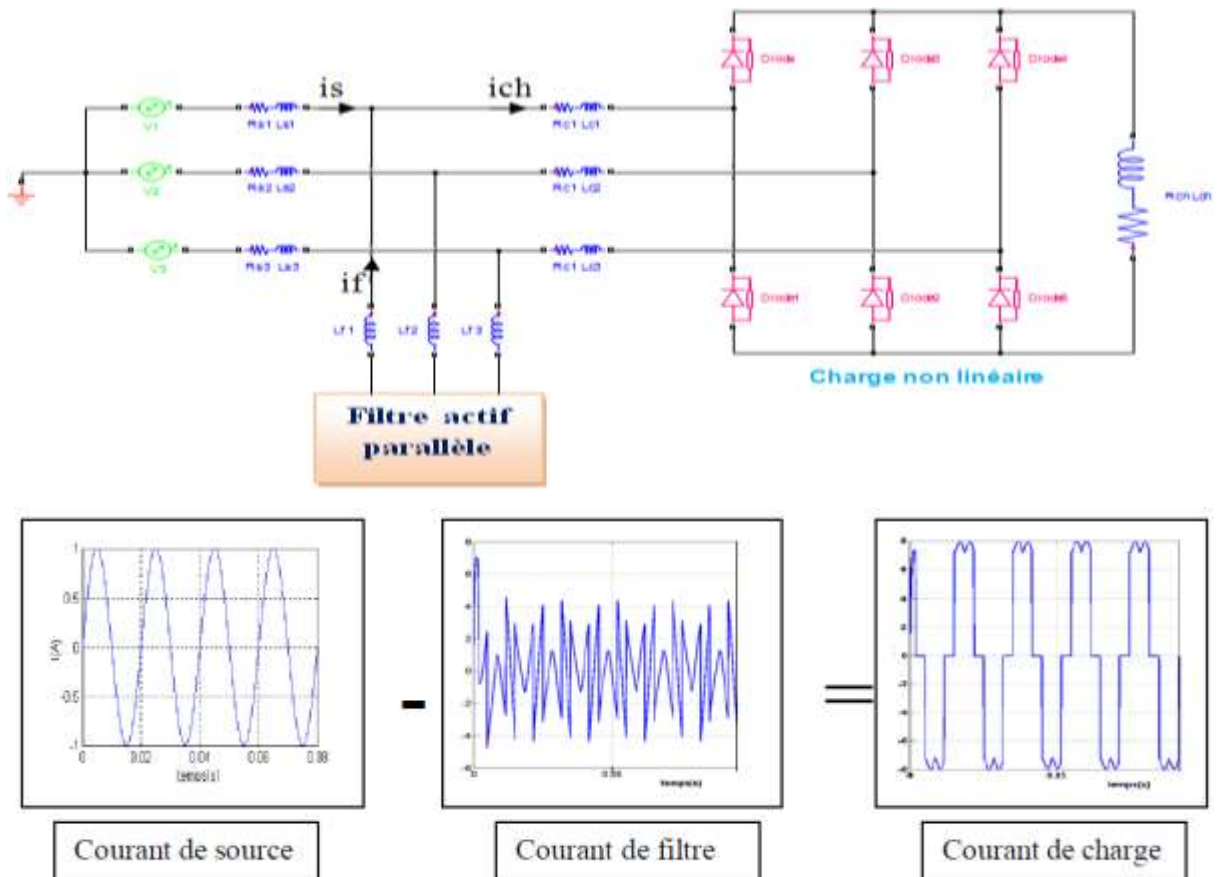


Fig. (II.2): Schéma de principe de l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif et formes d'ondes des courants respectifs.

Alors que le courant absorbé par la charge polluante est non sinusoïdal, le filtre actif injecte un courant de telle manière que le courant absorbé par le réseau doit être sinusoïdal [18].

II.3 Structure d'un filtre actif parallèle :

La structure générale du filtre actif parallèle, est présentée dans la figure (II.3) sous la forme de deux blocs: la partie puissance et la partie contrôle-commande.

La partie puissance est constituée:

- D'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandés à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, ...etc.) avec des diodes en antiparallèle.
- D'un circuit de stockage d'énergie.
- D'un filtre de sortie.

La partie commande est constituée :

- la méthode d'identification des courants perturbés.
- la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
- la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.
- la commande de l'onduleur de tension [1] .

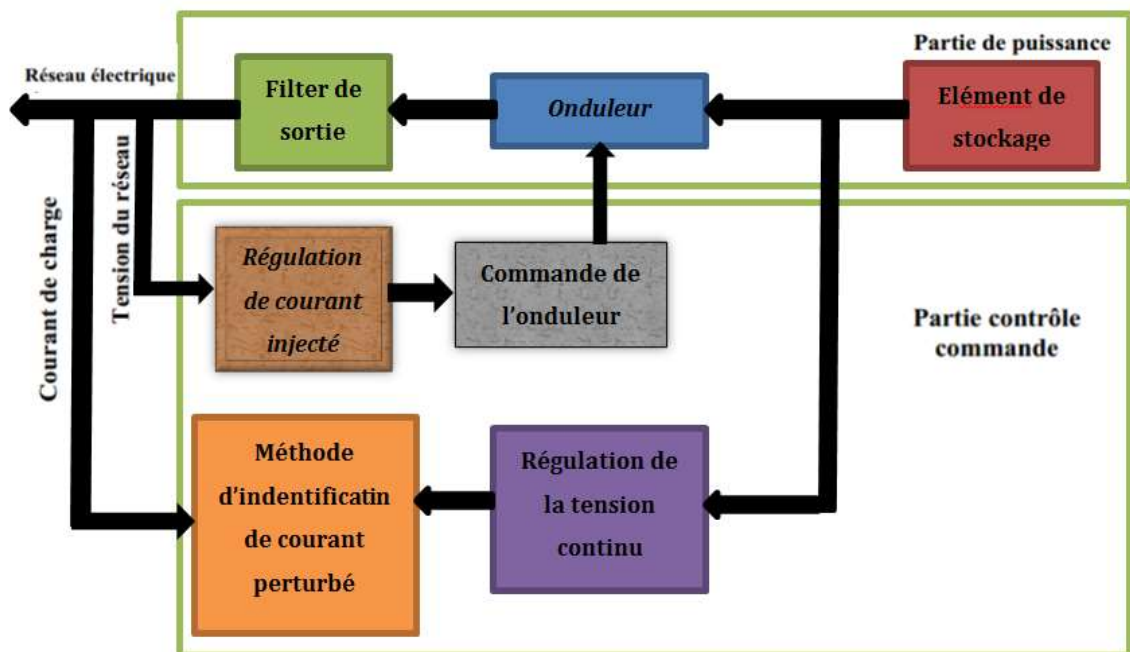


Fig.(II.3): Structure générale de filtre actif parallèle.

II.3.1 Etude de la partie puissance

Dans cette section nous nous sommes intéressés à la partie puissance du FAP dont les composants sont les suivants [29] :

- L'onduleur d'un filtre actif parallèle
- Circuit de stockage de l'énergie.
- Le filtre de couplage.

II.3.1.1 Onduleur d'un filtre actif parallèle

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue - alternative. Deux structures de l'onduleur sont envisagées [25].

II.3.1.1.1 Structures de l'onduleur

Il existe la structure tension et la structure courant. Dans la structure tension l'onduleur connecté en parallèle au réseau est illustré (Cas triphasé) par la figure (II.4).

La capacité C_{dc} joue le rôle d'une source de tension continue [36].

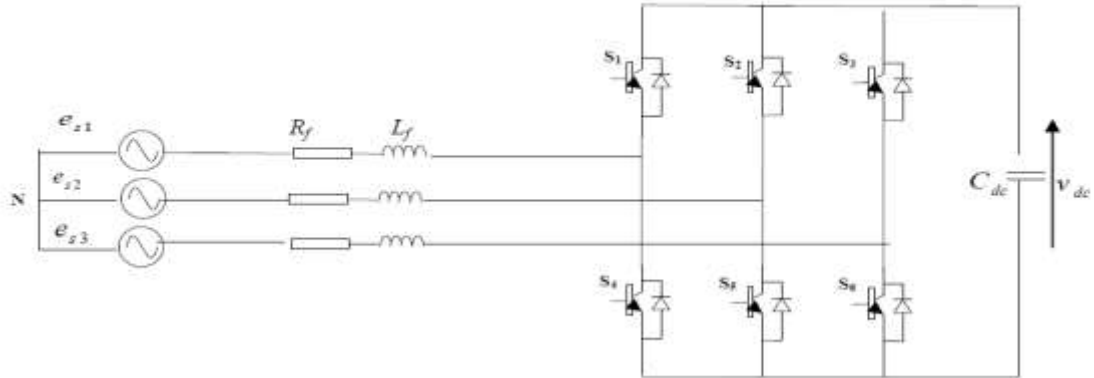


Fig. (II.4): Onduleur triphasé de tension.

L'onduleur de tension est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre du premier ordre constitué d'une inductance L_f .

Dans la structure courant l'inductance joue le rôle d'une source de courant continu. Le courant i_f traversant cette inductance est maintenu quasiment constant pour ne pas dégrader les performances du filtre actif. L'onduleur de courant est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre passe-bas du second ordre constitué d'une inductance L_f et d'une capacité C_f . Ainsi le courant i_f du filtre actif est égal au courant délivré par l'onduleur filtré par le filtre LC dont la fréquence propre $\frac{1}{2\pi} \sqrt{L_f C_f}$. La bande passante du filtre actif est donc essentiellement imposée par le choix de L_f et de C_f . Ceux-ci peuvent être dimensionnés de manière à atténuer la fréquence de commutation des interrupteurs de l'onduleur.

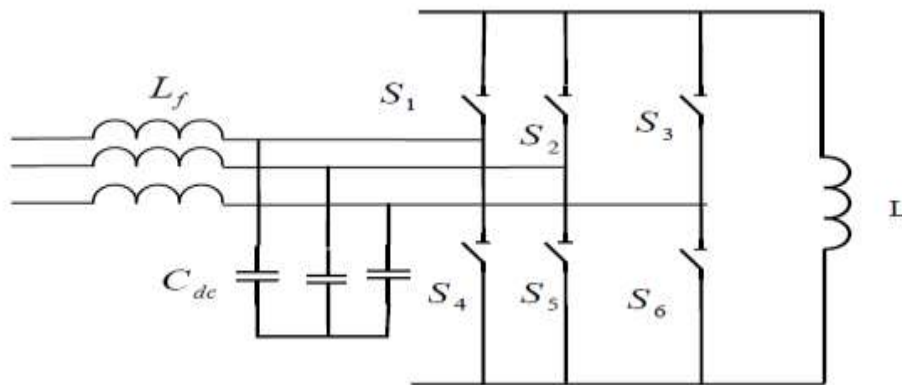


Fig. (II.5): Onduleur triphasé de courant.

Les interrupteurs sont unidirectionnels. Ils sont formés par des transistors commandés à l'ouverture et à la fermeture. Ceux-ci ne pouvant supporter de tension inverse, ils nécessitent une diode en série [37]. Cette structure est présentée par la figure (II.5) [38].

II.3.1.2 Circuit de stockage d'énergie

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

Le choix des paramètres du système de stockage (V_{dc} et C_{dc}) se répercute sur la dynamique et la qualité de compensation du FAP. En effet, une tension V_{dc} élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue V_{dc} , causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de C_{dc} , peuvent dégrader la qualité de compensation du FAP.

Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. Pour cette raison, nous pouvons estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres du système de stockage. Pour démontrer ceci, deux méthodes peuvent être utilisées :

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

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

Puisque l'augmentation de la valeur de la tension continue améliore la commandabilité du filtre actif et sachant que le choix de cette tension se répercute en grande partie sur le choix des interrupteurs, la tension continue V_{dc} doit être choisie comme la plus grande tension respectant les contraintes des interrupteurs.

La deuxième méthode, plus simple, se base sur la mesure du courant harmonique I_h du rang le plus faible. La capacité C_{dc} se calcule de la façon suivante [39]:

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\epsilon V_{dc} \omega_h} \quad (II.6)$$

II.3.1.3 Filtre de sortie

Ce filtre ne permet pas de satisfaire simultanément les deux critères dimensionnement du filtre de sortie :

- assurer la dynamique du courant.
- empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique.

Le bon dimensionnement du filtre de sortie du premier ordre dépendra donc du compromis à trouver entre la dynamique et l'efficacité du filtre actif parallèle. Ce compromis est très difficile à fixer sans l'emploi d'un filtre passif auxiliaire installé à la sortie de l'onduleur ou en amont du côté réseau. Cependant, ce filtre auxiliaire peut causer des effets secondaires non désirés comme la résonance avec d'autres éléments passifs installés sur le réseau électrique. Il occasionne également une consommation de puissance active par sa résistance d'amortissement. De plus, la qualité de filtrage de ces filtres auxiliaires se dégrade avec le temps à cause du vieillissement de leurs éléments passifs.

L'équation de la variation de courant du filtre actif peut s'écrire comme suit :

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{V_{dc} - V_s}{L_f} \quad (II.7)$$

On souhaite augmenter la vitesse de variation du courant à compenser, pour cela, d'après l'équation (II.7) on doit diminuer L_f mais sans engendrer une augmentation d'ondulation du courant à la fréquence de commutation.

$$\left(\frac{di_f}{dt}\right)_{\max} = \frac{V_{dc} - V_s(t)}{L_f} \quad (II.8)$$

La vitesse maximale de variation du courant dépend des deux paramètres V_{dc} et $V_s(t)$.

Le fait d'augmenter V_{dc} revient à augmenter la rapidité de réponse du courant $I_f(t)$.

D'après l'équation (II.8) on peut conclure que la rapidité de réponse de ce courant n'est pas la même à chaque instant puisqu'elle dépend également de la valeur instantanée de $V_s(t)$. L'inductance sera alors choisie en fonction de la vitesse maximale de variation du courant et de l'ondulation parasite. Cette inductance sert de filtre haute fréquence [40].

II.3.2 Etude de la partie commande :

Cette section est consacrée à la partie commande du filtre actif, dont laquelle on présente les stratégies de commande du filtre actif, l'identification du courant perturbateur, la commande de l'onduleur, la boucle de verrouillage de la phase et la régulation de la tension du bus continu [25].

II.3.2.1 Les méthodes d'identification des courants perturbés

La charge polluante absorbe un courant constitué d'une composante fondamentale et de composantes harmoniques. Le but du filtrage actif est la génération des courants harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase avec ceux absorbés par la charge. Ainsi, le courant

absorbé au réseau sera sinusoïdal. Il est donc nécessaire d'identifier avec précision les courants harmoniques de la charge polluante.

Plusieurs algorithmes d'identification des grandeurs harmoniques de référence et de nombreuses techniques de commande et de régulation ont été développés depuis la mise en place des premiers filtres actifs. Génération de signaux de référence afin de générer les signaux de référence servant à la commande du filtre actif, nous avons opté pour les algorithmes de commande suivants : puissances instantanées et référentiel synchrone [41].

II.3.2.1.a Méthode du filtre coupe-bande (notch filtre)

C'est le plus simple des algorithmes du calcul des courants de référence, comme l'illustre le diagramme représenté sur la figure (II.6).

Dans ce type de commande le courant de charge est filtré par un filtre coupe-bande qui parfois est appelé filtre « notch ». Ces filtres coupe-bande éliminent la composante fondamentale tout en laissant passer les composantes harmoniques. Ils ont, par conséquent, la même fréquence de coupure. Le courant de référence ainsi créé permet la génération des signaux de commande des semi-conducteurs de l'onduleur.

Le filtre coupe-Bande s'applique sans problème aux systèmes (équilibré ou non) monophasé, biphasé ou triphasé avec que Le nombre d'harmoniques compensé dépend de la bande passante des semi-conducteur composant l'onduleur du filtre actif. Cette méthode est caractérisée par un bon temps de réponse lors de régime transitoire et de calcul simple [42].

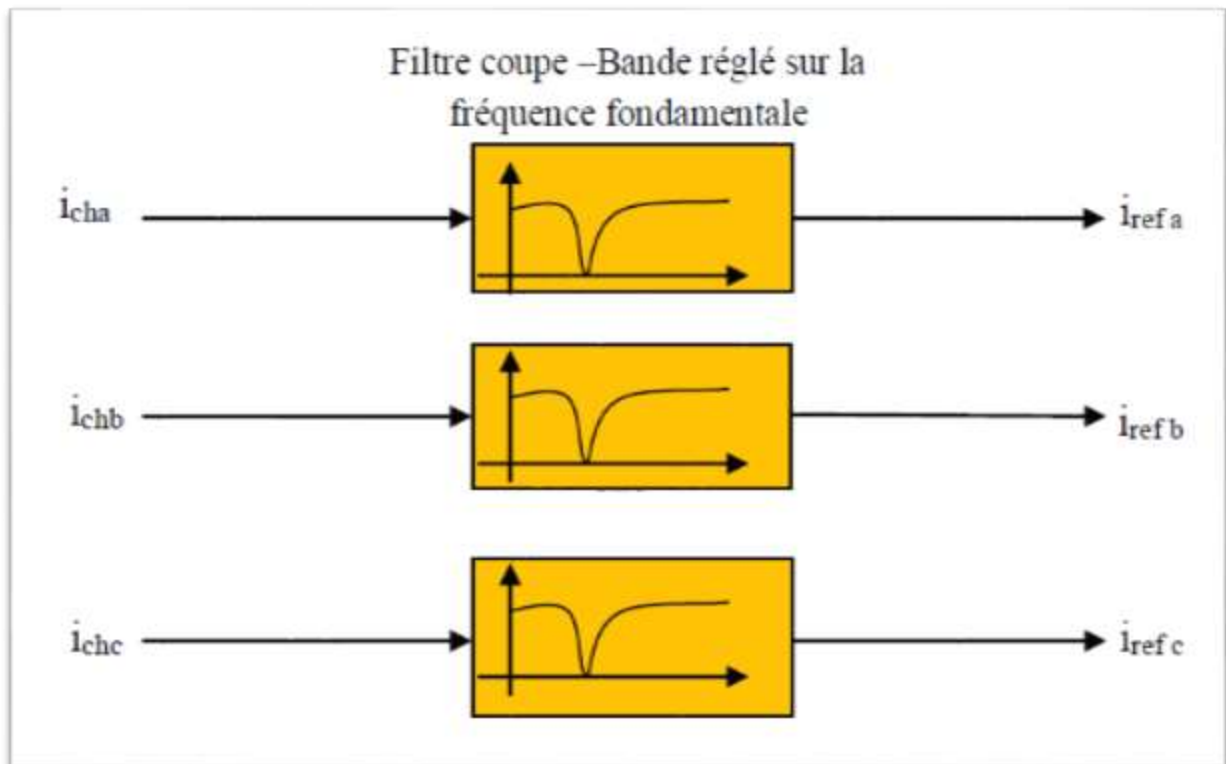


Fig. (II.6): Méthode du filtre coupe-bande.

II.3.2.1.b Méthode de la puissance instantanée réelle et imaginaire (PIRI)

La méthode des puissances active et réactive est une technique de compensation bien établie (Akagi et al.,1984) [4].

Cette méthode exploite la transformation de Concordia (α - β) des tensions simples et des courants de ligne, afin de calculer les puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées. Elle permet de transformer la composante fondamentale en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives.

Cette transformation est nécessaire si on veut éliminer facilement la composante continue [25]. Notons par (V_α, V_β) et (I_α, I_β) les composantes orthogonales du repère α - β associées respectivement aux tensions de raccordement du filtre actif parallèle (V_s) et aux courants absorbés par les charges polluantes (I_s). La transformation α - β -0 triphasée permet d'écrire, son principe est énoncé comme suit :

Soient respectivement les tensions simples et les courants de ligne d'un système :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [I_{ch}] = \begin{bmatrix} i_{cha} \\ i_{chb} \\ i_{chc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

La transformation $\alpha, \beta, 0$ triphasées permet d'écrire [1]. les relations suivantes:

$$\begin{bmatrix} V_o \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

$$\begin{bmatrix} V_o \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cha} \\ i_{chb} \\ i_{chc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

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

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

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

La puissance q ne représente pas la puissance instantanée conventionnelle (puissance réactive) dans le sens où elle est le résultat du produit d'une tension définie sur un axe en quadrature, contrairement à la puissance réactive qui ne considère que la fréquence fondamentale. La puissance imaginaire prend en compte toutes les composantes harmoniques du courant et de la

tension .C'est pour cette raison que ce nouveau concept est appelé « puissance imaginaire instantanée ».

Les puissances p et q peuvent être décomposées selon :

$$P = \bar{p} + \tilde{p} \quad (\text{II.13})$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (\text{II.14})$$

Un filtre passe bas dans l'espace des puissances permet de séparer la composante fondamentale (autrement dit la partie continue), des composantes perturbatrices (la partie alternative).

Deux filtres sont nécessaires, le premier pour isoler la partie $\bar{p}$ de la puissance active instantanée, le second pour isoler la partie $\bar{q}$ de la puissance réactive instantanée. Les deux filtres sont dimensionnés en tenant compte de la décomposition fréquentielle des puissances dans le repère diphasé .

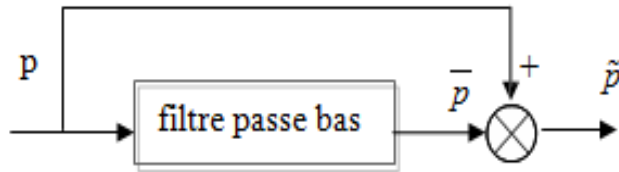


Fig. (II.7): Filtre passe bas (FPB).

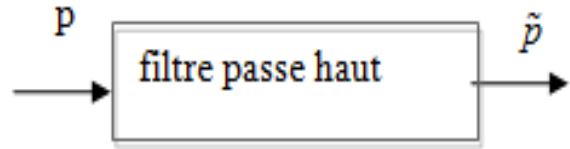


Fig. (II.8): Filtre passe-haut (FPH).

La fréquence d'accord de ce filtre (passe bas) doit être choisie en fonction de la performance dynamique attendue du filtre actif. Une bonne dynamique du filtre actif demande une fréquence d'accord élevée, alors que les bonnes performances aux rangs faibles nécessitent une fréquence de coupure faible. C'est ce qui nous a amené à faire un compromis entre la performance dynamique et la performance basses fréquences en choisissant la fréquence de coupure de ce filtre à 35Hz .

L'inverse de l'équation (II.12) de la puissance active et réactive permet d'établir la relation (II.15) des courants I_α et I_β :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

En remplaçant les puissances p et q par leurs parties continues et alternatives, on obtient :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant Actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courants Harmoniques}} \quad (\text{II.16})$$

le calcul des courants perturbateurs dans le repère diphasé (α, β) est finalement donnée par :

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

Grace à la transformation de Concordia inverse, les parties alternatives des puissances permettent de déduire les courants perturbateurs triphasés. Ces courants représentent les perturbations et deviennent les courants de référence qui sont à injecter en opposition de phase sur le réseau électrique pour éliminer les harmoniques.

$$\begin{bmatrix} i_{refa} \\ i_{refb} \\ i_{refc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Cette méthode possède les caractéristiques suivantes :

La méthode des PIRI classique utilise un filtre passe bas pour séparer les composantes des puissances active et réactive et a besoin d'un système d'extraction de la tension direct du réseau électrique. Elle n'est pas applicable pour les systèmes monophasés.

La tension du réseau doit être saine (sinusoïdale et équilibrée), sinon la méthode des puissances instantanées PIRI n'est pas applicable puisque la tension du réseau est perturbée et/ou déformée, et afin de généraliser d'application de la méthode PIRI que nous avons adoptée à tout type de tension.

Le bloc fonctionnel ci-dessous, explique et résume d'une façon implicite le procédé de calcul des courants de référence par cette méthode.

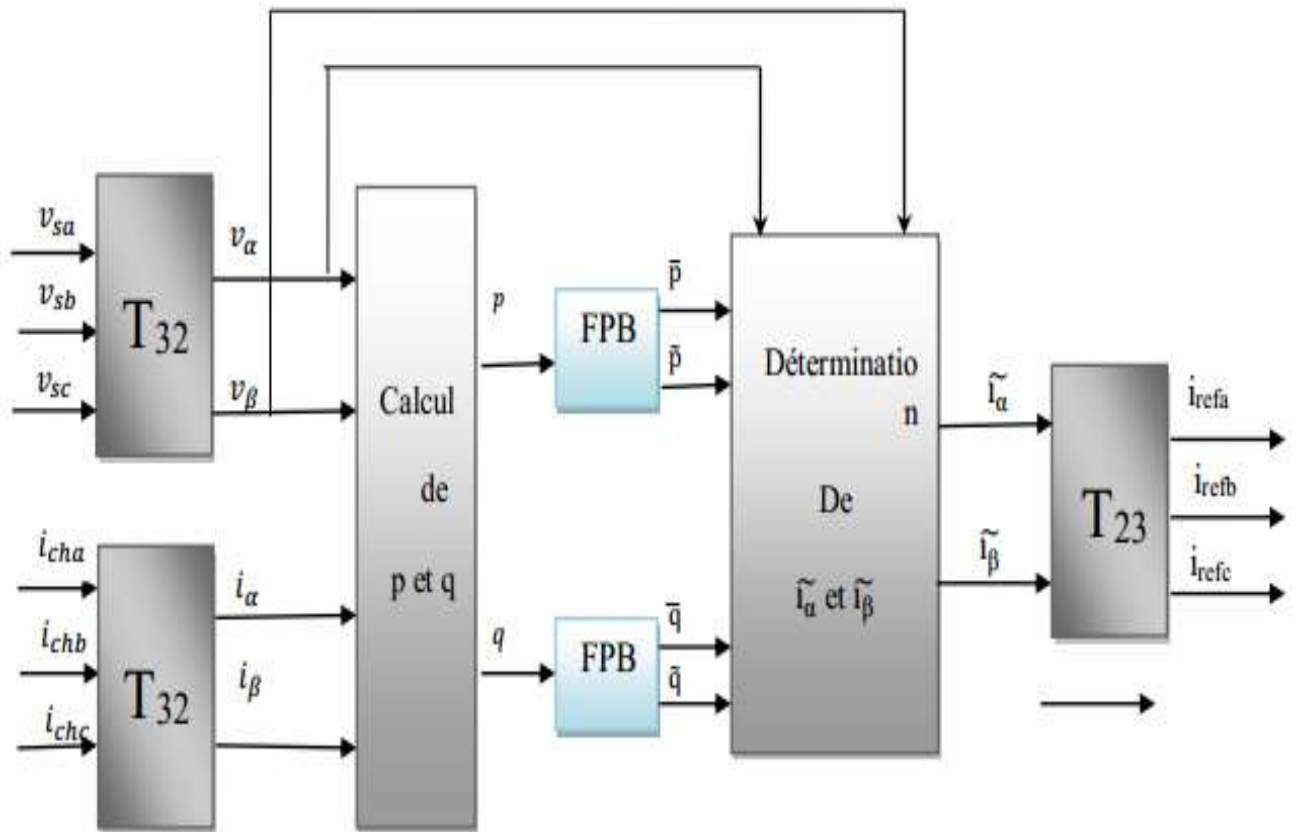


Fig. (II.9): Algorithme d'extraction des courants de références par PIRI.

II.3.2.1.c Méthode du référentiel synchrone SRF

Dans la méthode du repère synchrone, appelée aussi méthode des courants instantanés dq , les courants de la charge sont transformés dans le repère synchrone afin d'extraire la composante harmonique. Elle permet d'obtenir des meilleures performances même si la tension du réseau est perturbée ou déséquilibrée. La figure (II.10) représente le schéma de principe de cette méthode. La transformation est définie comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(wt) & \sin(wt - \frac{2\pi}{3}) & \sin(wt + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(wt) & \cos(wt - \frac{2\pi}{3}) & \cos(wt + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Où θ qui représente la position angulaire du repère tournant est une fonction linéaire de la pulsation angulaire. Ce repère de référence tourne à une vitesse constante en synchronisme avec les tensions triphasées. La référence harmonique sera extraite des courants dans le repère stationnaire à l'aide d'un FMV. Les courants sur les axes d et q peuvent être décomposés en deux composantes comme suit:

$$i_{ld} = \overline{i_{ld}} + \widetilde{i_{ld}} \quad (\text{II.20})$$

$$i_{lq} = \overline{i_{lq}} + \widetilde{i_{lq}} \quad (\text{II.21})$$

En l'absence du neutre, seule les composantes alternatives seront présentées à la sortie du système filtre-soustracteur. En plus, en insérant ce système-là uniquement sur l'axe d , tout le courant sur l'axe q sera disponible comme référence. Par conséquent, la puissance réactive de la charge sera compensée en plus des harmoniques, les courants de référence deviennent alors:

$$\begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \widetilde{i_{ld}} \\ \widetilde{i_{lq}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

Utilisons la transformation inverse de *Park*, les références dans le repère triphasé seront :

$$\begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(wt) & \cos(wt) \\ \sin(wt - \frac{2\pi}{3}) & \cos(wt - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(wt + \frac{2\pi}{3}) & \cos(wt + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ld} \\ i_{lq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

Cette méthode est sensible aux variations de la fréquence, Ce qui signifie le besoin d'une boucle de verrouillage de phase (PLL). La méthode montre des meilleures performances dans des conditions imparfaites du système de tensions. Une autre méthode également utilisée pour déterminer l'angle θ repose sur la transformation de Concordia. Après la transformation des courants de la charge polluante dans le repère stationnaire, ces derniers sont définis dans le repère synchrone par [41]:

$$\begin{bmatrix} i_{l\alpha} \\ i_{l\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ld} \\ i_{lq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

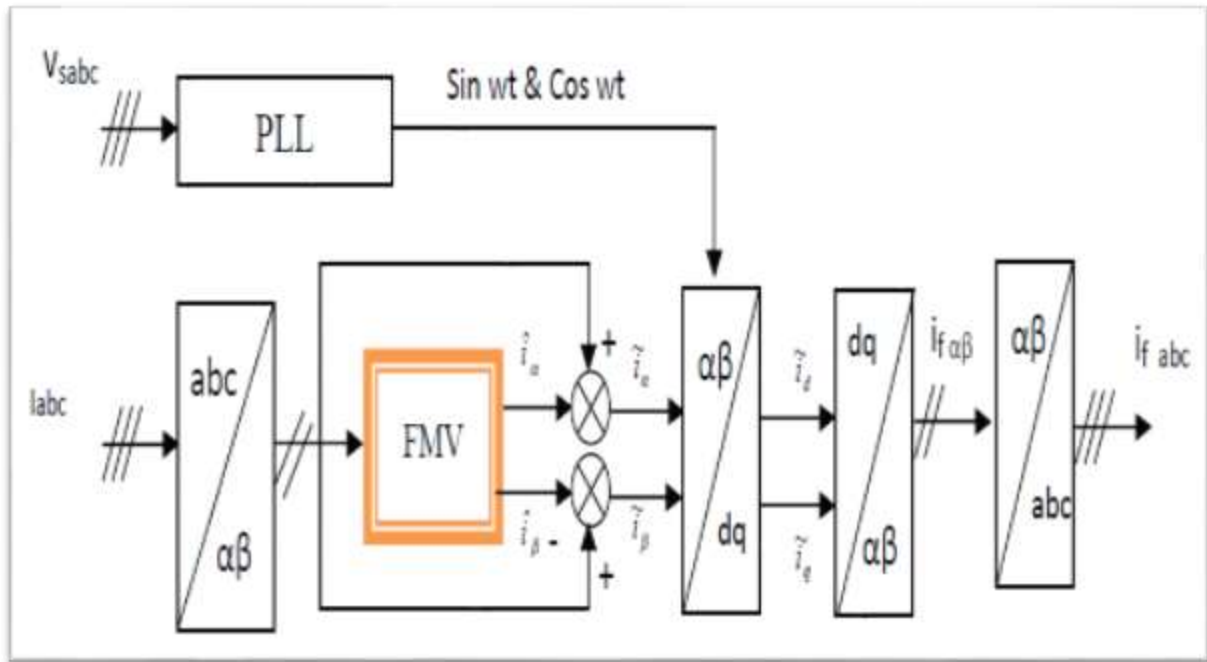


Fig. (II.10): Extraction des harmoniques par méthode de référentiel synchrone.

II.3.2.2 Système à base de PLL

L'identification des courants perturbés se fait à partir d'une méthode de calcul basée sur l'exploitation des tensions du réseau $v_{r1,2,3}$ saines, c'est-à-dire sinusoïdales et équilibrées, et pour obtenir ces tensions, on utilise une boucle de verrouillage de phase ou PLL (phase locked loop).

La PLL est la technique la plus répandue pour l'extraction de la composante fondamentale de la tension du réseau, son fonctionnement se base sur la transformation de Park pour passer au repère dq. Les tensions $v_{r1,2,3}$ subissent dans un premier temps la transformation de Concordia dans le repère $\alpha\beta$. Les tensions ainsi obtenues $v_{\alpha,\beta}$ sont exprimées dans le repère de Park par une rotation, l'angle de cette rotation représente l'angle de la composante directe de la tension, il est issu de l'intégration de l'estimation de la pulsation déterminée par le régulateur, ainsi la PLL ne sera verrouillée que lorsque l'angle estimé est égal à l'angle de la tension directe [43].

II.3.2.3 La commande de l'onduleur

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des courants perturbés de référence, à travers les ordres de commande appliqués aux drivers interrupteurs de puissance. Les deux principales familles de commande des convertisseurs statiques sont :

- la commande par hystérésis.
- la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) [44].

II.3.2.3.1 La Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur entre le courant de référence et le courant généré par l'onduleur. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la limite inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé aux interrupteurs pour rendre l'erreur à l'intérieur de la bande. La simplicité de la mise en œuvre est le principal atout de cette technique. Cependant, la fréquence de commutation n'est pas maîtrisée (aléatoire); en conséquence, les commutations évoluent librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis [2].

Cette commande est très adaptée pour les systèmes ayant une action à deux positions comme l'IGBT qui peut être ouvert ou fermé. En pratique la largeur de la bande d'hystérésis est fixée à 5% du courant nominal. Cependant elle ne garantit pas d'une manière systématique le respect de la fréquence maximale de commutation des semi-conducteurs [45]. Le Schéma de principe est donné par la Figure (II.11).

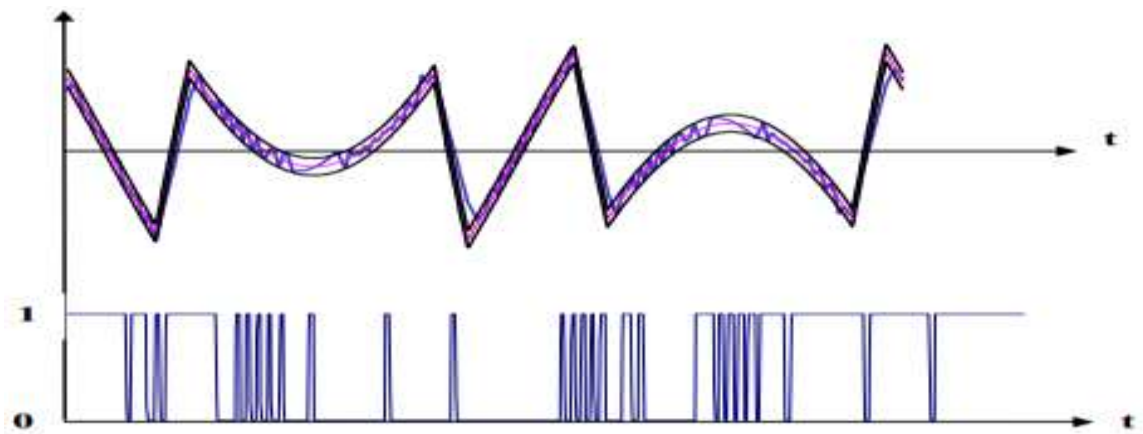


Fig. (II.11): Bande d'hystérésis et signal de commande d'un interrupteur.

Le schéma synoptique de la commande des courants du filtre actif par des régulateurs à hystérésis est donné par la figure (II.12) :

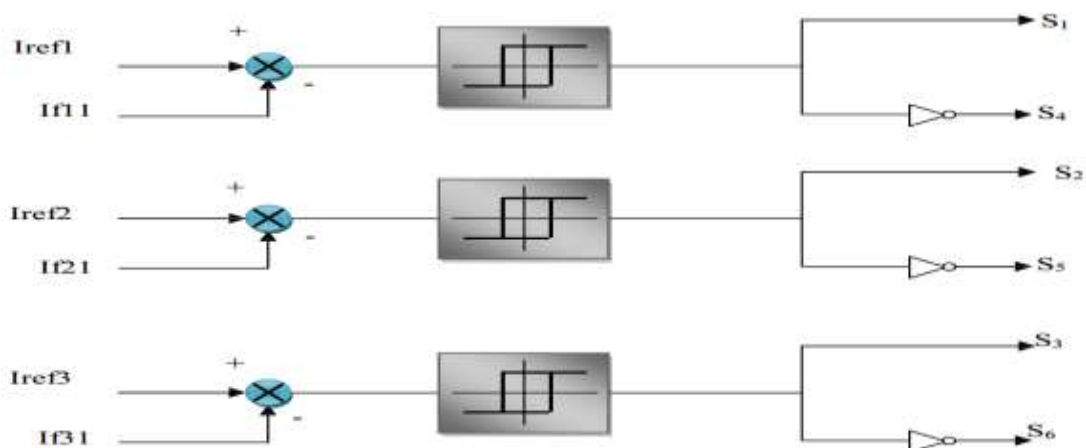


Fig. (II.12): Commande par hystérésis d'un filtre actif parallèle.

II.3.2.3.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) :

Le schéma de principe de la MLI est donné par la Figure (II.13). La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) est la technique de commande la plus utilisée, elle résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur. La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence.

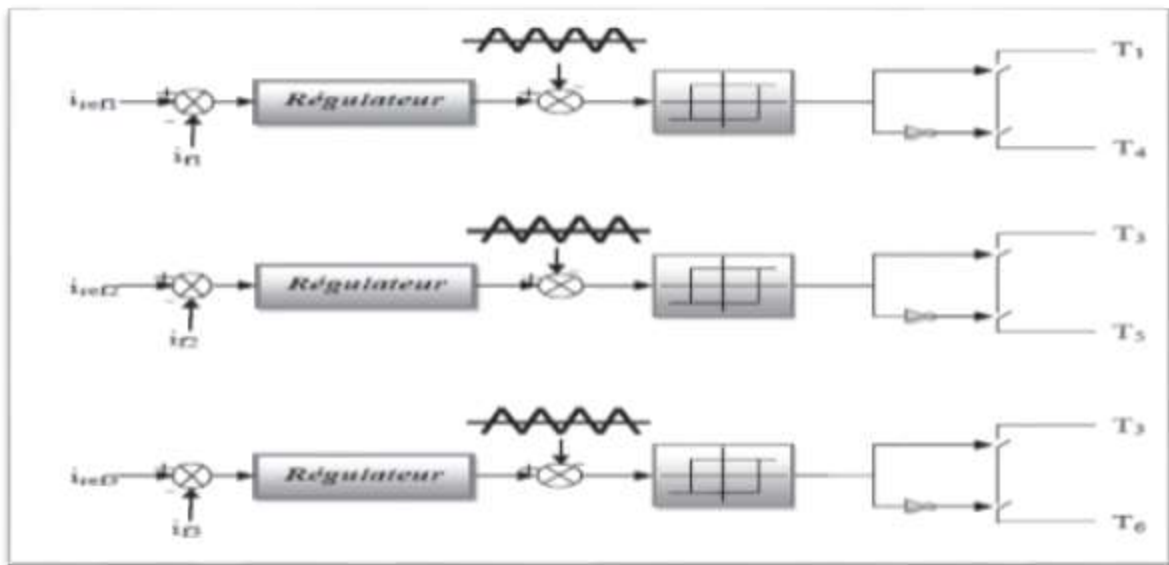


Fig. (II.13): Principe de commande des courants par MLI.

L'erreur à la sortie des régulateurs est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs comme il est présenté dans la figure (II.14) [46].

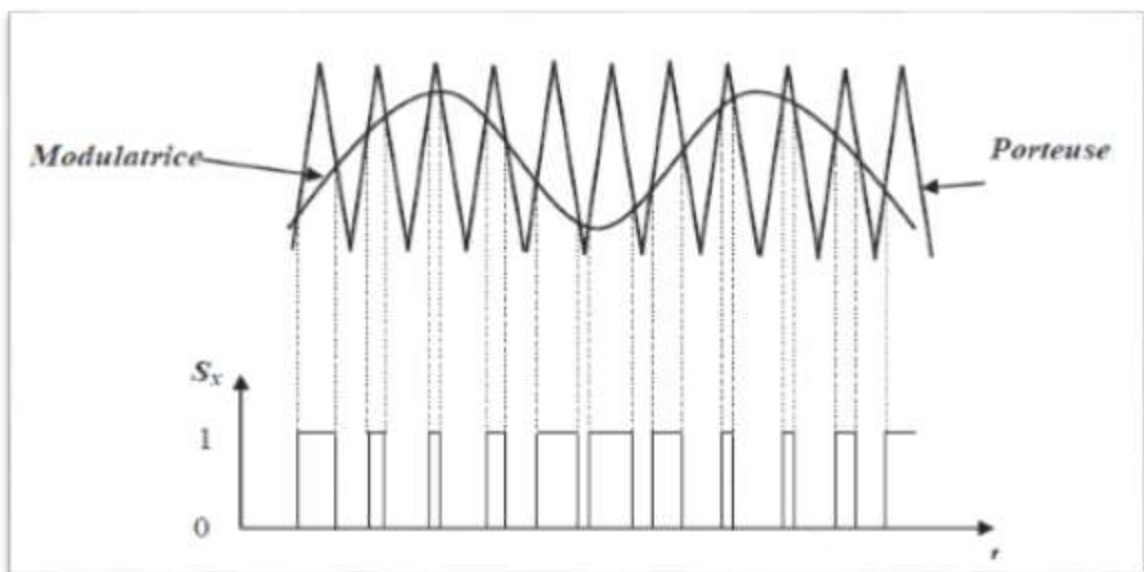


Fig. (II.14): Commande des interrupteurs par MLI naturelle.

II.3.2.4 Régulation de la tension continue

La régulation de la tension du bus continu du filtre actif peut être améliorée en ajustant le petit taux de puissance active s'écoulant dans le (les) condensateur(s), compensant ainsi les pertes par conduction et par commutation. La boucle de régulation de la tension est désignée pour être 10 fois plus petite que la boucle du courant. De là, les deux boucles se trouveront désormais découplées. Le circuit de régulation de la tension continue doit être rapide dans la mesure où il répond seulement aux conditions du régime permanent. Les changements transitoires dans la tension continue ne sont pas permis et sont pris en considération lors de la sélection de la valeur appropriée du condensateur.

Afin d'obtenir la quantité P_{dc} représentant la puissance active nécessaire pour maintenir V_{dc} proche de sa référence V_{dcref} , on peut utiliser un simple régulateur type proportionnel .

En effet, d'une part les courants de référence ne contiennent pas de composantes fondamentales lors du régime permanent, et d'autre part, la puissance nécessaire pour la compensation des pertes est faible. Le régulateur peut être un filtre passe-bas du 1er ordre, dont la fonction de transfert est donnée par:

$$G_c(s) = \frac{K_c}{1 + \tau_c \cdot s} \quad (II.25)$$

En négligeant les pertes par commutation dans le filtre actif ainsi que l'énergie stockée dans l'inductance de sortie LFA, la relation entre la puissance absorbée par le filtre actif et la tension continue V_{dc} s'exprime par:

$$P_{dc} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \cdot C \cdot V_{dc}^2 \right) \quad (II.26)$$

Pour des faibles variations de V_{dc} autour de V_{dcref} , l'équation (II.20) peut s'écrire:

$$P_{dc} = C \cdot V_{dcref} \frac{d}{dt} (V_{dc}) \quad (II.27)$$

Des équations (II.20) et (II.21), la boucle de régulation de la tension continue V_{dc} sera représenté par le schéma bloc de la figure (II.15) et aura pour fonction de transfert la formule:

$$H(s) = \frac{w_c^2}{s^2 + 2 \cdot \xi_c \cdot w_c \cdot s + w_c^2} \quad (II.28)$$

Avec :

$$w_c = \sqrt{\frac{K_c}{C \cdot V_{dcref} \cdot \tau_c}} \quad (II.29)$$

$$\xi_c = \sqrt{\frac{C \cdot V_{dcref}}{K_c \cdot \tau_c}} \quad (II.30)$$

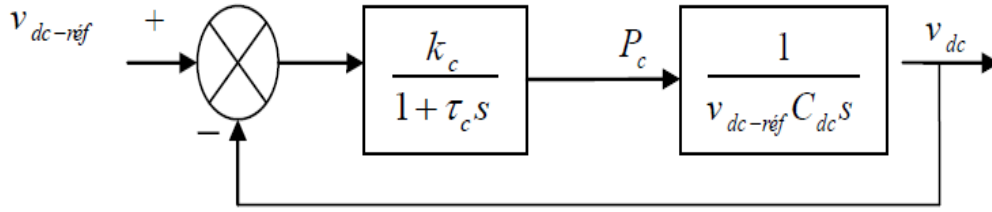


Fig. (II.15): Boucle de régulation de la tension continue.

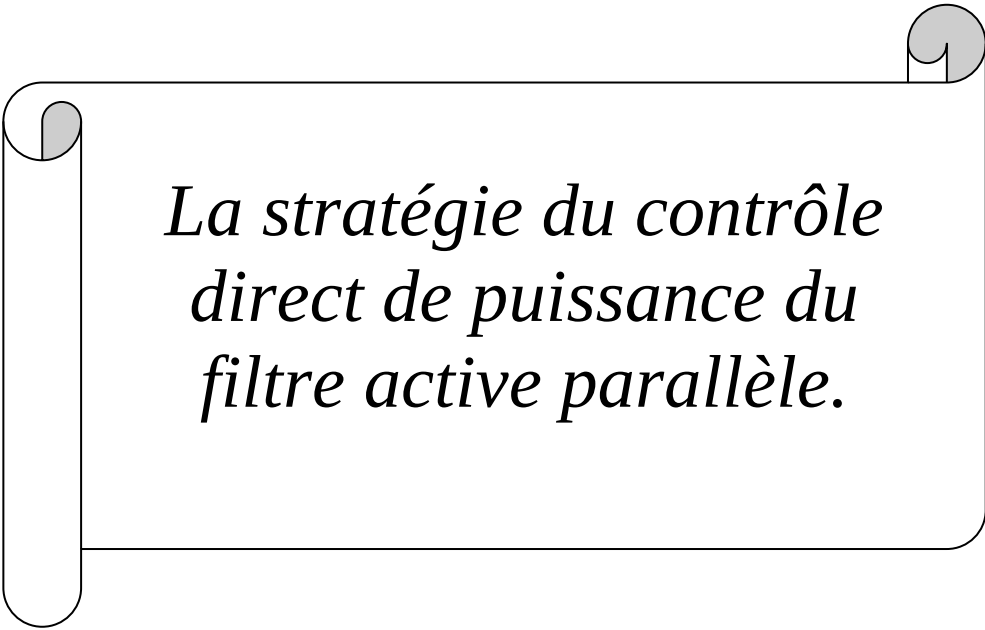
En générale, la régulation est stable, mais pour l'obtention d'un amortissement suffisant, le produit $K_c \cdot \tau_c$ doit être limité et ξ_c compris entre 0.4 et 0.8 [47].

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement du filtre actif parallèle de puissance, la structure générale du FAP, les différentes méthodes d'identifications des grandeurs harmoniques de référence où on a consacré la théorie de la puissance instantanée réelle et imaginaire avec (FPB et FMV) et étudié le principe de base et stratégies de commande de l'onduleur de tension. Finalement, on a présenté le circuit de régulation du courant ainsi qu'une boucle de régulation de la tension continue v_{dc} du filtre actif afin d'assurer un fonctionnement plus stable.

Le chapitre suivant, sera consacré Résultats Simulation de l'ensemble réseau, charge polluante et filtre actif / Interprétions et simulés sous Matlab/Simulink.

Chapitre III



*La stratégie du contrôle
direct de puissance du
filtre active parallèle.*

III.1 Introduction

Deux différentes tendances sont identifiées par les chercheurs qui travaillent sur le Contrôle Direct de Puissance.

➤ Une définition générale décrit le DPC comme étant la structure de contrôle qui utilise directement les puissances instantanées comme variables de contrôle, en remplaçant les variables de courant utilisées dans les systèmes imbriqués. Cette définition inclut les deux types de correcteurs DPC principaux, le DPC classique et le DPC avec modulation vectorielle.

➤ Une définition plus restrictive analyse la DPC comme étant le contrôle qui utilise directement les puissances instantanées comme variables de contrôle et qui n'a pas besoin d'utiliser des blocs de modulation car les états de commutation de l'onduleur sont choisis directement par un tableau de commutation. Cette définition n'inclut que la DPC classique [39].

III.2 Etude du contrôle direct de puissance du SAPF (D.P.C.)

Le principe du contrôle direct a été proposé à la référence et il a été développé plus tard dans de nombreuses applications. Le but était d'éliminer le bloc de modulation et les boucles internes en les remplaçant par un tableau de commutation dont les entrées sont les erreurs entre les valeurs de références et les mesures.

La première application développée visait le contrôle d'une machine électrique et la structure de contrôle est connue sous la dénomination de Contrôle Direct de Couple (D.T.C). Dans ce cas, le flux statorique et le couple électromagnétique de la machine sont contrôlés sans aucun bloc de modulation. Par la suite, une technique similaire de commande en puissance (D.P.C.) était proposée pour une application de contrôle des redresseurs connectés au réseau.

Dans ce cas, les grandeurs contrôlées sont les puissances active et réactive instantanées. Avec la D.P.C. il n'y a pas de boucle de régulation encourant ni d'élément de modulation MLI, car les états de commutation de l'onduleur, pour chaque période d'échantillonnage, sont sélectionnés à partir d'une table de commutations, basée sur l'erreur instantanée entre les valeurs de références et celles mesurées ou estimées des puissances active et réactive, et la position angulaire du vecteur de tension de source.

Généralement avec cette stratégie de commande, la tension du bus continu est régulée pour un contrôle de la puissance active et le fonctionnement avec un facteur de puissance unitaire est obtenu en imposant la puissance réactive à une valeur nulle [48].

III.3 Etat de l'art du contrôle direct de puissance

L'idée de la D.P.C. a été proposée par Ohnishi. Pour la première fois, il a utilisé les valeurs des puissances actives et réactive comme variables de commande au lieu des courants triphasés instantanés. Premièrement, il a établi une relation proportionnelle entre les valeurs des puissances instantanées et les courants exprimés dans le référentiel tournant (d_q) pour un fonctionnement sinusoïdal équilibré. Cette méthode est basée sur la sélection du vecteur de tension à partir d'une table de commutation, relativement aux erreurs des puissances active et réactive, ainsi qu'à la position angulaire du vecteur de tension de source. Ainsi le choix de l'état optimum de commutation est effectué de sorte que l'erreur de la puissance active puisse être limitée dans une bande à hystérésis de largeur et de même pour l'erreur de la puissance réactive. Pour améliorer les performances, les auteurs ont proposé de diviser l'espace vectoriel en douze secteurs afin de déterminer ensuite la position du vecteur de la tension de source.

L'inconvénient majeur de la D.P.C réside dans sa fréquence de commutation variable qui dépend principalement de la fréquence d'échantillonnage, de la structure de table de commutation, des paramètres du système, des valeurs de référence des puissances active et réactive, des bandes d'hystérésis et finalement de l'état des interrupteurs de l'onduleur [30].

III.4 Stratégie du contrôle direct de puissance du SAPF

La stratégie de commande D.P.C appliquée au SAPF est illustrée sur le synoptique de la figure (III.1). Elle consiste à sélectionner l'état approprié à partir d'une table de commutation basée sur les erreurs, qui sont limitées par une bande d'hystérésis, présentes dans les puissances active et réactive [30].

Deux aspects importants garantissent un fonctionnement viable du système :

- Une exacte détermination exacte des états de commutation.
- Une estimation rapide et précise des puissances active et réactive.

III.4.1 Calcul des puissances instantanées

Basée sur la mesure des tensions et courants de source, les puissances active et réactive instantanées peuvent être calculées par les expressions :

$$P_S(t) = V_{sa} \cdot i_{sa} + V_{sb} \cdot i_{sb} + V_{sc} \cdot i_{sc} \quad (I.1)$$

$$Q_S(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{sa} - V_{sb}) \cdot i_{sc} + (V_{sb} - V_{sc}) \cdot i_{sa} + (V_{sc} - V_{sa}) \cdot i_{sb}] \quad (I.2)$$

Toutefois, le nombre des capteurs requis augmente le coût et réduit la fiabilité du système. Par conséquent, afin d'estimer correctement la puissance et en même temps de réduire le nombre de capteurs de tension, Noguchi propose l'utilisation d'un estimateur du vecteur de tension [49].

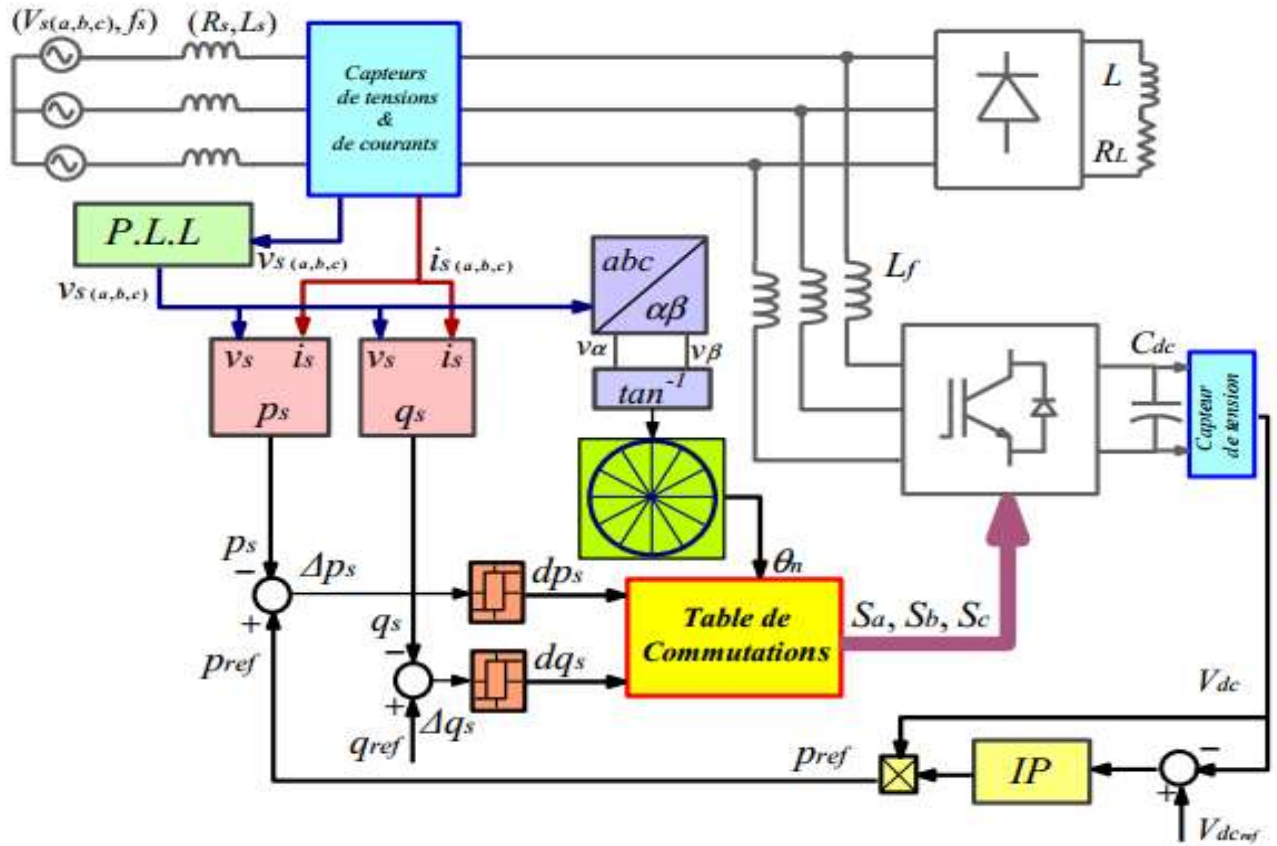


Fig. (III.1): Synoptique de contrôle du SAPF avec la commande DPC.

III.4.2 Contrôleur à hystérésis

Le mode de commutation du convertisseur est réalisé de façon à ce que l'erreur entre la valeur de référence de la puissance active instantanée, P_{ref} et la valeur mesurée, P_s rentre dans la bande d'hystérésis $2\Delta P_s$. De la même façon, l'erreur de la puissance réactive doit rester dans la bande d'hystérésis $2\Delta q_s$.

Pour y parvenir, les erreurs des puissances active et réactive instantanées sont introduites dans deux comparateurs à hystérésis de deux niveaux, dont les sorties (dp_s et dq_s) sont mises à 1 lorsqu'il faut augmenter la variable de contrôle (P_s ou q_s) et à 0 lorsque la variable de contrôle doit rester inchangée ou doit diminuer.

$$\begin{cases} dp_s = 1 & p_{ref} - p_s \geq \Delta p_s \\ dp_s = 0 & p_{ref} - p_s \leq \Delta p_s \end{cases} \quad \begin{matrix} (I.3) \\ (I.4) \end{matrix}$$

$$\begin{cases} dq_s = 1 & q_{ref} - q_s \geq \Delta q_s \\ dq_s = 0 & q_{ref} - q_s \leq \Delta q_s \end{cases} \quad \begin{matrix} (I.5) \\ (I.6) \end{matrix}$$

Ainsi, la table de commutation reçoit le changement de l'entrée et commute la sortie sur un vecteur approprié qui permettra à l'onduleur de modifier l'état des puissances active et réactive instantanées. Le niveau de sortie du contrôleur à hystérésis est maintenu jusqu'à ce que le signal d'erreur atteigne la bande inférieure, où la sortie commutée à zéro (Figure (III.2)). Bien que la sortie du contrôleur soit maintenue jusqu'à ce que l'erreur parvienne à l'autre bande, la

table de commutation peut commuter sur un autre vecteur de sortie suite à un basculement du deuxième contrôleur à hystérésis ou à une modification de la position du vecteur de tension [39].

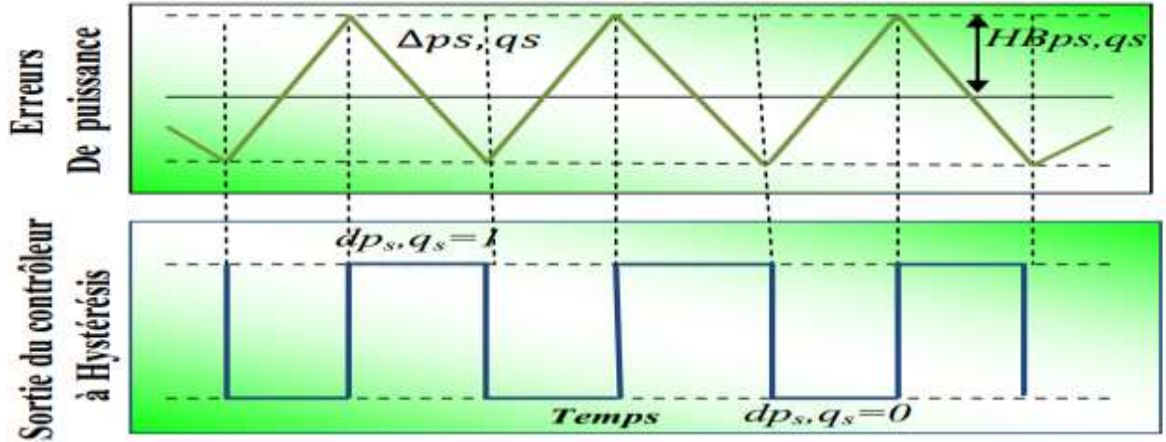


Fig. (III.2): Comportement d'un contrôleur de puissance à hystérésis à deux niveaux.

III.4.3 La position angulaire θ_n

La phase du vecteur de tension du réseau est convertie en signal numérisé θ_n (positionangulaire). Le calcul de cette position nécessite la connaissance des composantes e_α et e_β , qui peuvent être calculées à partir de la transformation des tensions du réseau du plan triphasé abc au plan stationnaire α - β :

$$\theta_n = \arctan\left(\frac{v_\beta}{v_\alpha}\right) \quad (I.7)$$

A cet effet, les coordonnées stationnaires sont divisées en 12 secteurs pour optimiser les performances du FAP, comme il est montré sur la Figure III.2. Les secteurs peuvent être numériquement exprimés comme suit [31] :

$$(n-2) \cdot \frac{\pi}{6} \leq (\theta_n - 1) \leq (n-1) \cdot \frac{\pi}{6}, n = 1, 2, 3, \dots, 12. \quad (I.8)$$

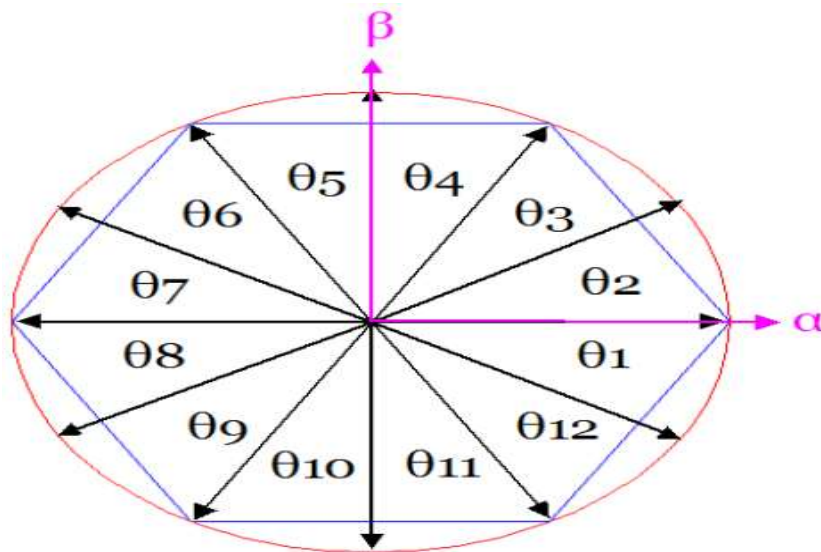


Fig. (III.3): Plan α - β divisé en douze secteurs pour détecter la phase du vecteur de la tension.

III.4.4 Table de commutation

La table de commutation, désignée par classique dans le présent manuscrit, a été élaborée par l'initiateur *DTC* et présentée initialement dans puis ultérieurement par M. Malinowski.

La table de commutation peut être considérée comme le cœur de la commande directe en puissance. Elle sélectionne un vecteur de tension de l'onduleur approprié pour permettre le déplacement des puissances active et réactive instantanées dans la direction désirée, en se basant aussi sur la position du vecteur de la source et des erreurs des puissances active et réactive [39].

La table de commutation classique est représentée par le Tableau (III.1).

Tableau (III.1) : Table de commutation pour la DPC classique.

d_p	d_q	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}
1	0	V_6	V_7	V_1	V_0	V_2	V_7	V_3	V_0	V_4	V_7	V_5	V_0
	1	V_7	V_7	V_0	V_0	V_7	V_7	V_0	V_0	V_7	V_7	V_0	V_0
0	0	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6
	1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1
$V_1(100), V_2(110), V_3(010), V_4(011), V_5(001), V_6(101), V_0(000), V_7(111).$													

III.4.5 Régulation de la tension continue

La régulation de la tension continue est assurée par un régulateur de type PI. Ce dernier corrige l'erreur entre la tension continue mesurée et sa référence. Le produit du courant continu de référence avec la tension continue (V_{dc}) donne la puissance active de référence (P_{ref}) [50].

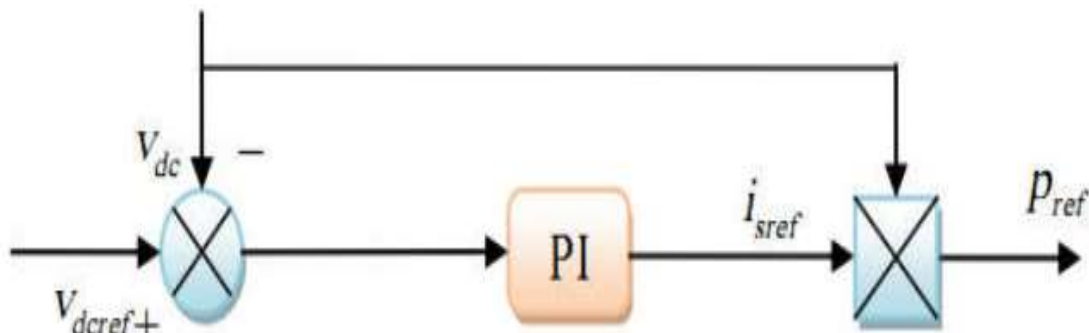


Fig. (III.4): Régulation de la tension continue.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, pour contribuer à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux électriques de distributions, nous avons présenté la configuration de la commande direct de puissance appliquée au filtre actif parallèle.

Chapitre VI

*simulation de
l'ensemble réseau, filtre
actif parallèle et charge
polluante*

IV.1 Introduction

Après avoir étudié les différentes algorithmes d'identification des courants harmoniques, les stratégies de commande, et de régulation de filtre actif parallèle, nous allons présenter les résultats de simulations du filtre actif parallèle commandé par la technique contrôle direct de puissance (DPC).

IV.2 Schéma de simulation d'un DPC

Les programmes de simulation développés ont été effectués en utilisant le logiciel Matlab/Simulink qui permet de visualiser sur un intervalle de temps donné l'évolution des courants et de la tension dans les différentes branches du circuit de la figure (IV.1).

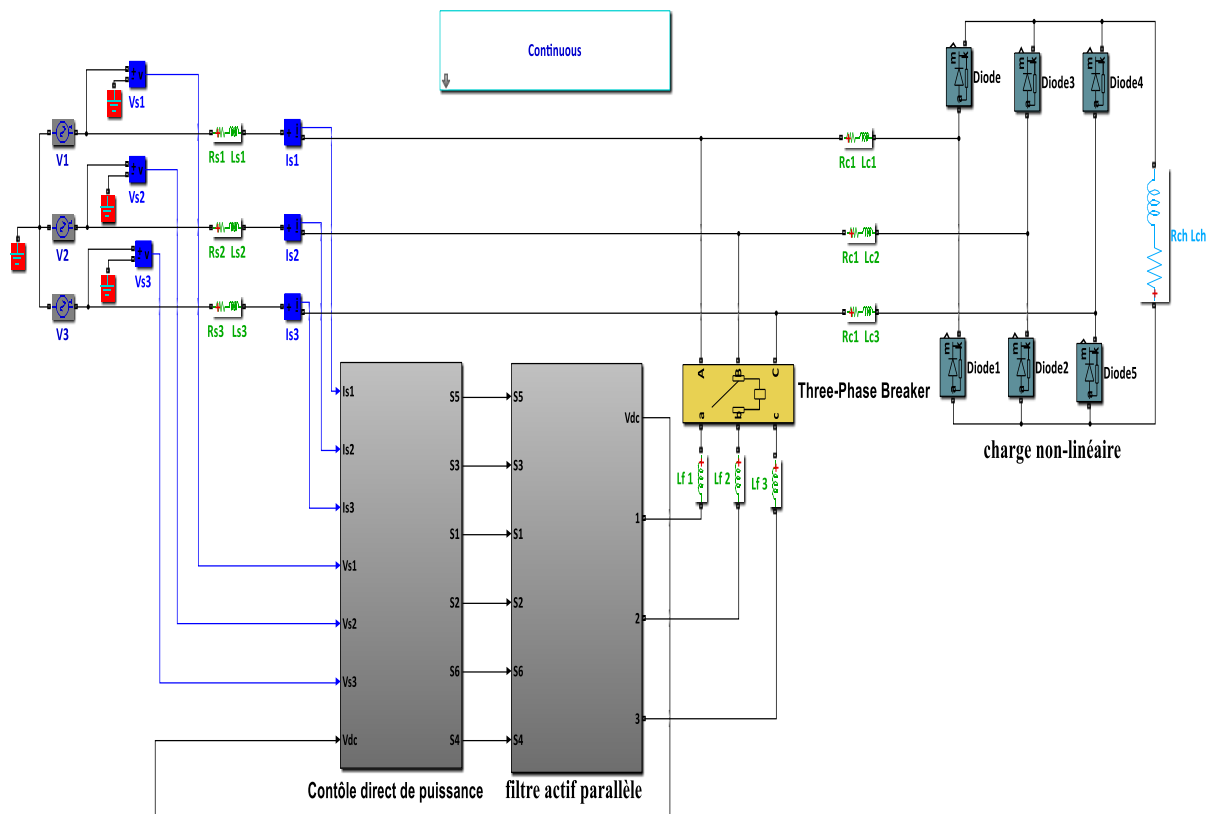


Fig. (IV.1): Schéma de simulation d'un DPC.

Le schéma de simulation de la figure (IV.1) constitue d'un réseau électrique alimente une charge non-linéaire, un filtre actif parallèle à commande hystérésis, la commande par la technique contrôle direct de puissance pour la détection des courants sources, et un régulateur proportionnel-intégral (PI) pour la régulation de la tension continu aux bornes du conducteur.

Les valeurs des éléments caractérisant cette structure ont été regroupées dans le tableau(IV.1).

Tableau (IV.1): Valeurs des éléments caractérisant la structure étudiée.

<i>Réseau électrique</i>
$V_{smax} = 57.74 \text{ V}, f_s = 50 \text{ Hz}, R_s = 0.42 \Omega, L_s = 2.5 \text{e-}3 \text{H}.$
<i>Charge polluante</i>
<i>Résistance et inductance de l'entrée du redresseur</i>
$R_c = 0.2 \Omega, L_c = 1 \text{e-}3 \text{H}.$
<i>Pont de Gréât alimentant une charge R-L série</i>
$R_{ch} = 8.5 \Omega, L_{ch} = 3 \text{e-}3 \text{H}.$
<i>Filtre actif parallèle</i>
$V_{dc-ref} = 120 \text{V}, C_{dc} = 1.1 \text{e-}3 \text{F}, L_f = 3 \text{e-}3 \text{H}.$
<i>Commande hystérésis</i>
$\Delta I = \pm 0.02 \text{A}$
<i>Régulateur de bus continue</i>
$K_{idc} = 19.5313, K_{pdc} = 0.1445, f_c = 30 \text{ Hz}, w_c = 188.49 \text{ Hz}, \zeta_c = 0.707$

IV.3 Résultats de simulation et Interprétation

IV.3.1 Comportement du FAP en régime permanent

✓ Compensation des courants harmoniques

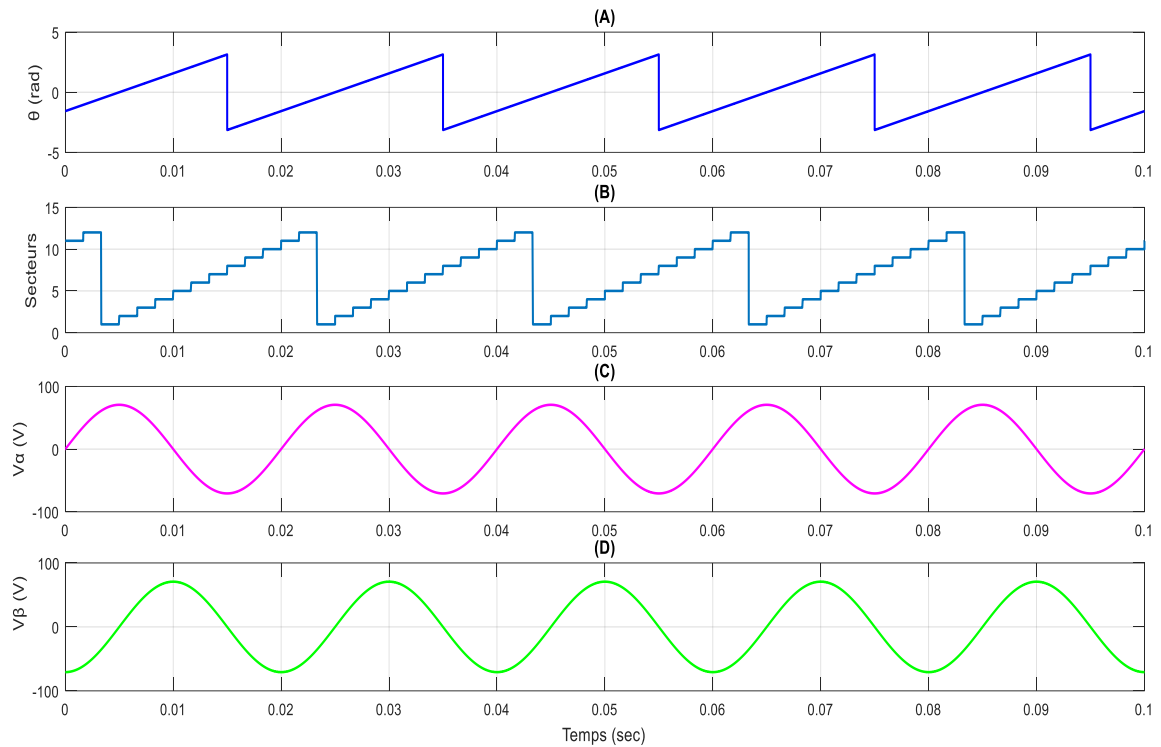


Fig. (IV.2): (A):la position angulaire θ , (B): des secteurs, (C) et (D): la tension de source dans le repère (α, β) .

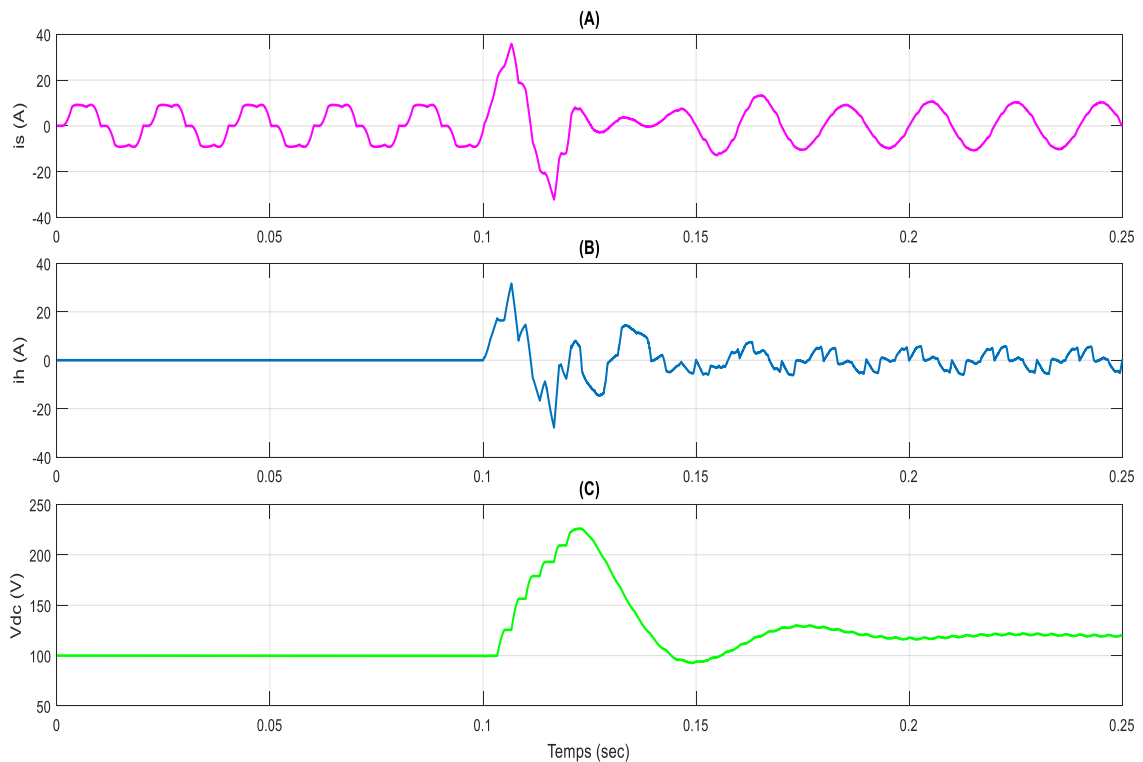


Fig. (IV.3): (A):Courant de source I_s , (B):Courant de harmonique I_h , (C):Tension aux bornes du condensateur V_{dc} .

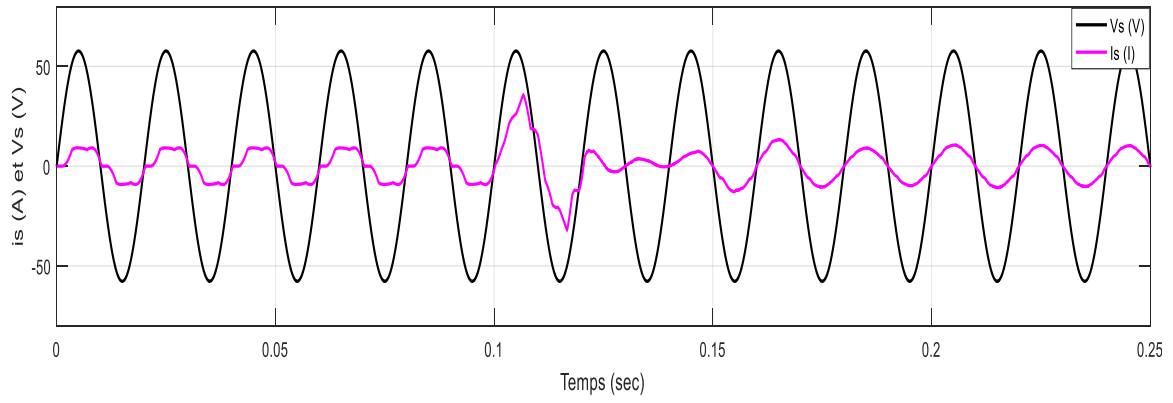


Fig. (IV.4): La Tension V_s et courant I_s de la source.

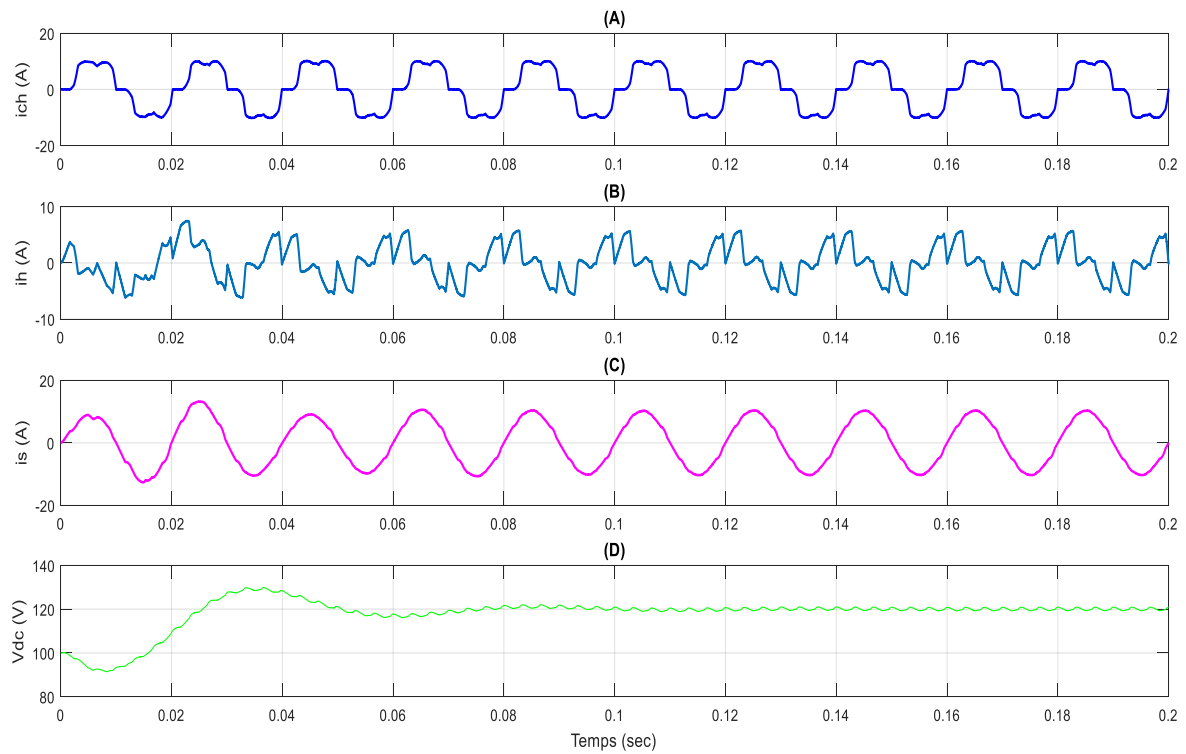


Fig. (IV.5): (A): Courant de charge I_{ch} , (B): Courant de harmonique I_h , (C): Courant de source I_s , (D): Tension aux bornes du condensateur V_{dc} .

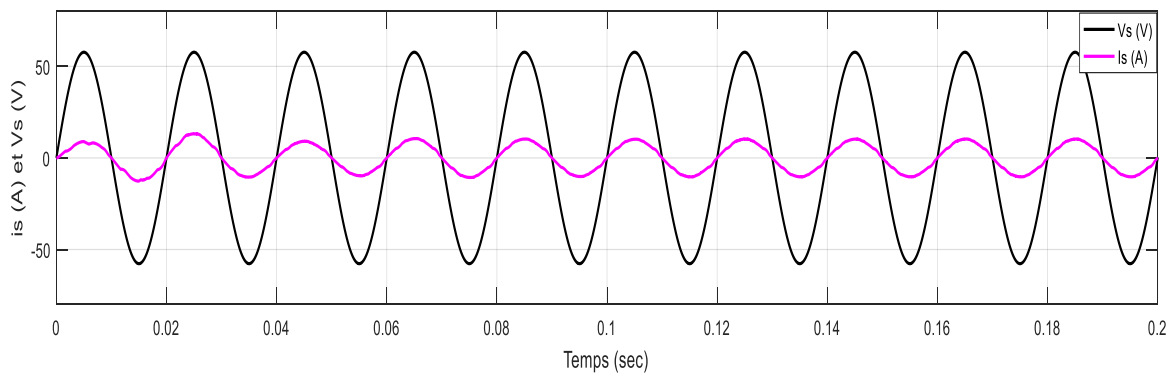


Fig. (IV.6): La Tension V_s et courant I_s de la source.

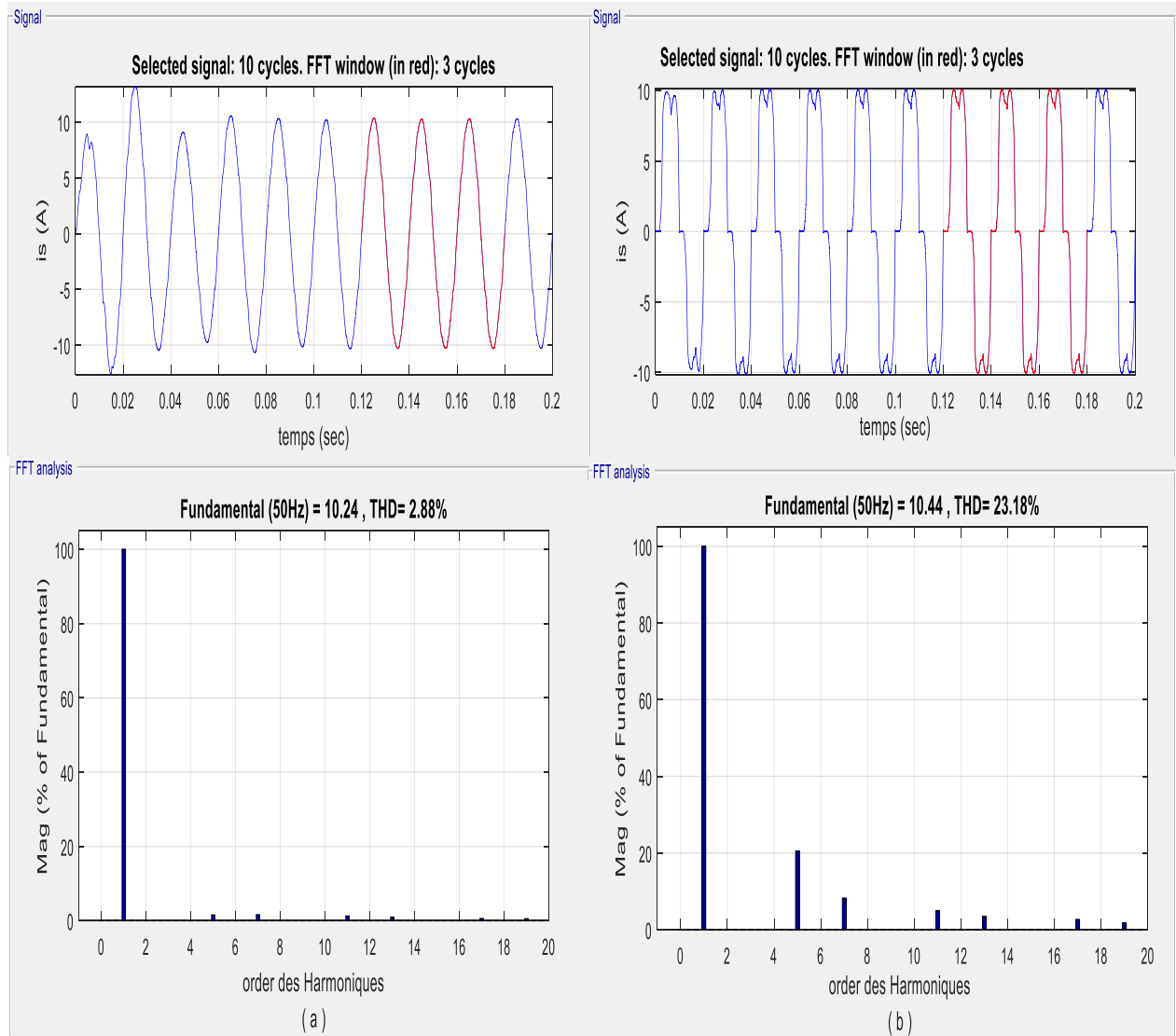


Fig. (IV.7): Courant source I_s avant (a) / après (b) filtre et son analyse spectrale.

IV.3.2 Comportement du FAP en régime dynamique (Changement de la charge)

Pour étudier l'adaptation et le comportement du *FAP* en régime dynamique, nous avons procédé à une variation de la charge non linéaire et une variation de la tension du bus continu.

Le passage de la charge(1) à la charge(2), se fait à l'instant $t=0.1\text{sec}$. Comme la montre les figures suivants:

⇒ Charge R_{L1} : $R_{ch_1} = 8.5\Omega$, $L_{ch_1} = 3\text{mH}$ et Charge R_{L2} : $R_{ch_2} = 11.5\Omega$, $L_{ch_2} = 3\text{mH}$;

⇒ $V_{dc-ref1} = 140\text{ V}$ à $V_{dc-ref2} = 120\text{ V}$.

A. Changement de la charge ($R_1L_1 \Rightarrow R_2L_2$) :

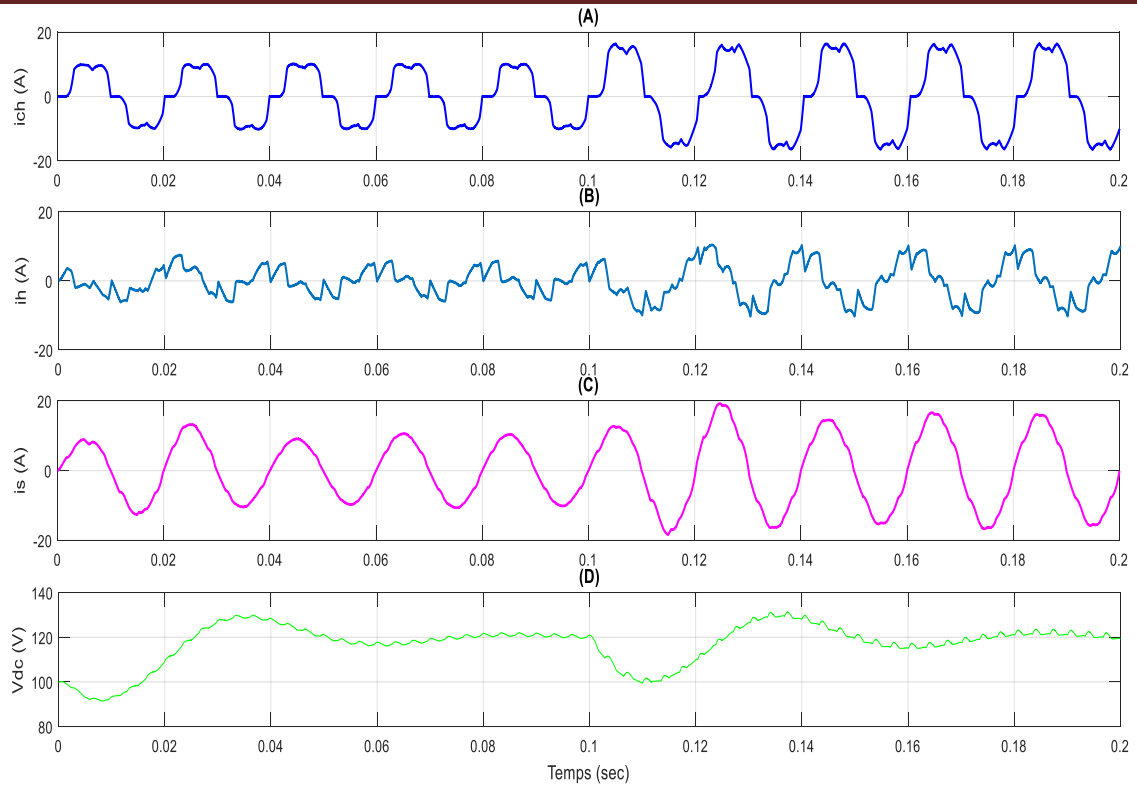


Fig. (IV.8): (A): Courant de charge I_{ch} , (B): Courant de harmonique I_{ch} , (C): Courant de source I_s , (D): Tension aux bornes du condensateur V_{dc} .

B. Changement de la tension aux bornes du condensateur de référence V_{dc-ref} :

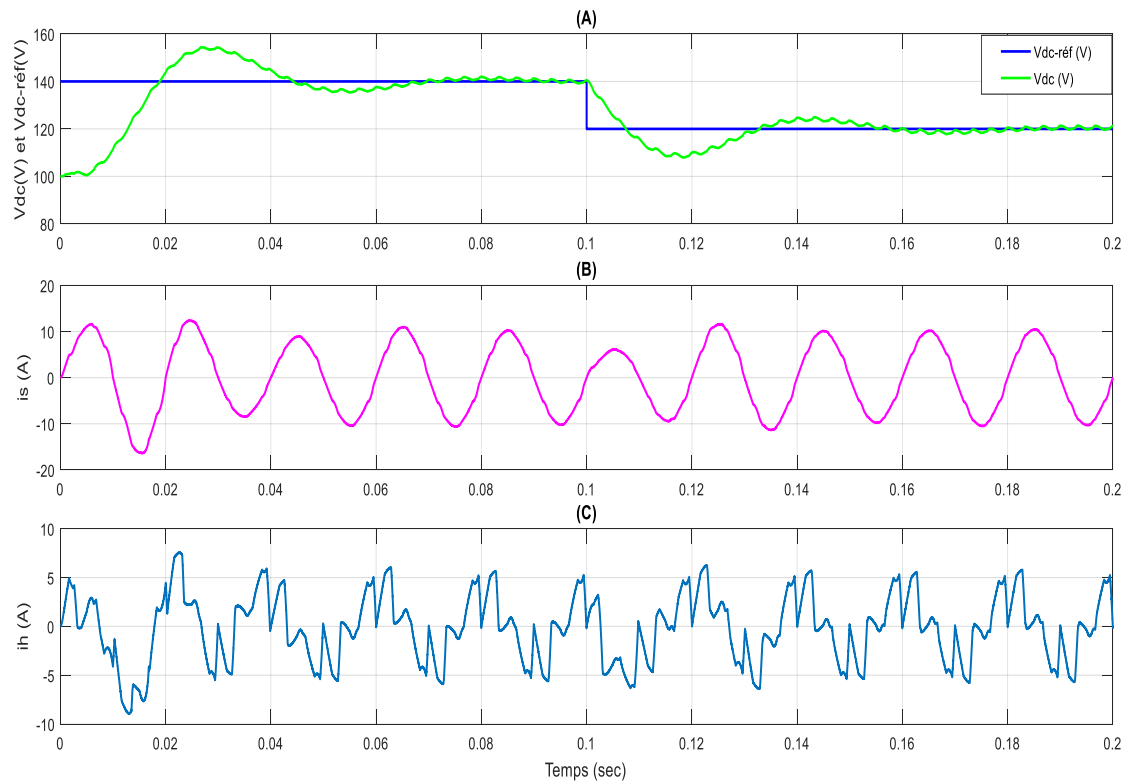


Fig. (IV.9): Tension aux bornes du condensateur V_{dc} et V_{dc-ref} , Courant de source I_s , Courant de harmonique I_h .

IV.4 Interprétations des résultats

D'après les résultats de simulation obtenus sur les figures ci-dessus montrant la compensation des courants harmoniques, avec une commande d'un filtre actif parallèle commandé par la technique contrôle direct de puissance (DPC) et régulateur proportionnel; on remarque que:

A) En régime permanent

- La figure (IV.2) nous pouvons constater l'évolution de la position angulaire θ , les secteurs, et les composantes V_α , V_β du vecteur de la tension de source $\vec{V}_s$.
- La figure (IV.3.c) montre que la tension du bus continu est régulée par un régulateur proportionnel intégral (PI). On voit qu'avant le filtrage, la tension du bus continu est d'environ 100 V. Cette valeur de la tension veut dire que la capacité du bus continue est chargée initialement; à l'instant 0.1 sec après le filtrage V_{dc} se stabilise à 120 V, valeur de la tension V_{dc-ref} .
- la figure (IV.5.c) montre que le courant I_s est quasi-sinusoïdal, néanmoins un pic apparaissant au démarrage. En autre côté, le courant de source après la compensation est presque sinusoïdale et en phase avec la tension de source, ce qui signifie une excellente correction du facteur de puissance, ce qui prouve une bonne qualité du filtrage avec le FAP.
- La figure (IV.7) représente la forme d'onde du courant de source avant (a) et après (b) filtrage et son analyse spectrale, on remarque que le courant de source avant filtrage est très riche en harmoniques de rang $(2k+1, k = 2, \dots, 9)$, ainsi que son taux de distorsion harmonique est mesurée sur 3 périodes (colorés en rouge) entre les instants 0.12 et 0.18 sec et un $THD_i = 23.18\%$ (avant le filtrage) et $THD_i = 2.88\%$ (après le filtrage), ce qui signifie la conformité à la norme IEEE 519-1992.

Tableau (IV.2): Les résultats des simulations.

Commande	charge	THD_i % avant filtre	THD_i % après filtre
Commande DPC	Charge R-L	23.18%	2.88%

B) En régime dynamique

- En régime dynamique les figure (IV.8) et (IV.9): montrent des résultats très satisfaisants du point de vue dépassement est temps de réponse, aussi, ils montrent que le courant de source est toujours quasi-sinusoïdal malgré la variation de la charge.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté et interprété les résultats de simulation de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle, et charge polluante. Le filtre est commandé par la technique de contrôle direct de puissance (DPC).

Avec ce filtre actif, le THD_i du courant de source est réduit de 23,18 % à 2,88 % (pour une charge R-L). D'autre côté, nous avons constaté que les performances du filtre actif parallèles sont excellentes lors de la variation de la charge. Le régulateur PI a permis de réguler la tension du bus continu pour les différents régimes de fonctionnement. Le filtre permet aussi d'améliorer le facteur de puissance.

***CONCLUSION
GENERALE***

CONCLUSION GENERALE

la pollution harmonique est l'un des problèmes majeurs qui dégrade la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux. La circulation des courants harmoniques dans les lignes et entre les charges est difficile à prédire et à contrôler.

Dans un premier temps, après l'analyse des perturbations harmoniques et leurs effets sur le réseau électrique, les normes en vigueur, et les solutions ont été proposées permettant pour remédier à chaque type de perturbation, on distingue deux types: les solutions traditionnelles notamment le filtrage passif et les solutions modernes particulièrement le filtrage actif est une nouvelle solution pour le filtrage des harmoniques.

Dans ce contexte, notre travail présente dans ce mémoire a été consacré à l'étude d'un filtre actif parallèle de puissance afin d'améliorer la qualité de l'énergie dans le réseau électrique et particulièrement compenser les harmoniques et la puissance réactive.

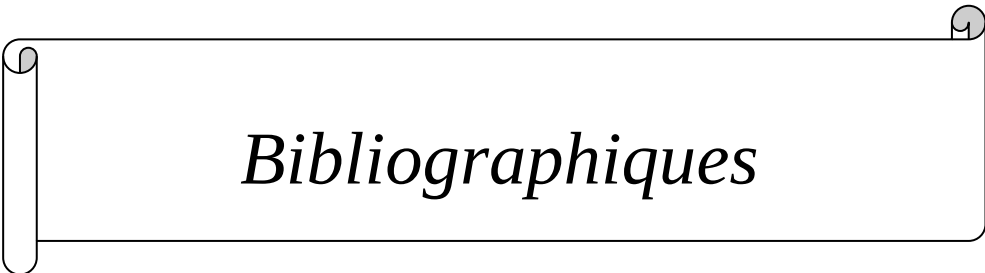
Pour atteindre notre objectif dans ce travail nous choisissons la commande directe de puissance (DPC) que nous donne des bons résultats et cette méthode s'est avérée très efficace dans le cas de la connexion des charges non-linéaires, pour la commande de l'onduleur triphasé nous utilisons la commande hystérésis, puisqu'elle est une commande très simple à mettre en œuvre. Concernant le régulateur de bus continu nous avons utilisé un simple régulateur proportionnel intégral (PI).

Les résultats obtenus que soit par simulations (dans l'environnement Simulink/Matlab) prouvent que le filtre actif choisie peut réduire les harmoniques de courant à des valeurs inférieures à 5% qui répond aux normes internationales; ainsi que une bonne compensation de l'énergie réactive, et ce filtre adapte aux variations de la charge.

En conclusion, on peut affirmer que l'objectif de ce mémoire est atteint. Les résultats obtenus très satisfaisantes et montrent l'efficacité et les bonnes performances du filtre actif parallèle de puissance à deux niveaux.

Finalement, dans ce travail plusieurs perspectives peuvent être évoquées. Nous pouvons citer:

Application d'autre technique de régulation de bus continu par exemple des méthodes d'intelligence artificielle comme la logique floue (*Fuzzy Logic*), PSO....etc.



Bibliographiques



BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] L. ZELLOUMA, " Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé", Mémoire de magister, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2006.
- [2] M. Alali, "Contribution A l'Etude Des Compensateurs Actifs Des Réseaux Electriques Basse Tension", Thèse Doctorat, universitéLOUIS PASTEUR – SATRASBOURG, 2002.
- [3] R. BACHAR, "Commande Prédictive Appliquée au Filtre Actif", Thèse de doctorat en sciences, Université Mohamed Khider-Biskra, 2019.
- [4] D. OULD ABDESLAM, "Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques: Application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension ", Thèse de doctorat, Université de Haute-Alsace, 2005.
- [5] Z. CHELLI, "Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique", Thèse de doctorat en sciences, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2015.
- [6] L. ZELLOUMA, " Qualité de l'énergie électrique", Cours, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2020.
- [7] B. Gattal, " Méthode d'analyse des perturbations électriques dans la qualité de l'énergie électrique en utilisant des nouvelles techniques pour l'application aux creux de tension",Mémoire de Magister. Université de Batna, 2012.
- [8] M. Shafiee Khor, "Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs actifs : série ,parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électrique",Thèse de doctorat de l'école Polytechnique de l'université de Nantes, Nantes, 2006.
- [9] L. BENCHAITA, " Etude, par Simulation Numérique et Expérimentation, d'un Filtre Actif Parallèle à Structure Courant avec une Nouvelle Méthode de Contrôle-Commande ", Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré-Nancy-France, 1998.
- [10] I. ETXEBERRIA-OTADUI, "Sur les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique-application à la qualité de l'énergie", Thèse de doctorat, Institut national Polytechnique de Grenoble, 2003.
- [11] L.D.H.B. Amaia, "Commande avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la montée en tension", Thèse de doctorat, LEG, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, Novembre 2006.

- [12] C. COLLOMBET, J. LUPIN et J. SCHONEK, "Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement ", Cahier Technique Schneider Electric n° 152, septembre 1999.
- [13] S .BOUGUERRA et I.BOURENNANE , "filtrage actifs parallèles des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive", mémoire d'ingénieur d'état en génie électrotechnique, Université de m'sila, 2007.
- [14] H. DOUAR, "Evaluation du cout des pertes générées par les perturbations harmoniques dans les réseaux électriques", Mémoire de Magister, Université M'hamed Bougara-Boumerdes , 2006.
- [15] H. Melle, "Analyse harmonique dans un réseau électrique avec une production d'énergie éolienne", Mémoire de Magister, Université Setif 1, 2013.
- [16] B. BOUGHAZI, "Etude et réalisation d'un filtre actif parallèle de puissance", Mémoire de Magistère, Université-Oran, 2013.
- [17] S. BEN ALI et S. BOUHANAK, "étude et simulation d'un filtre actif parallèle quatre fils", Mémoire Master , Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued , 2015.
- [18] A. OMEIRI, " Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant", Thèse de doctorat d'état, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2007.
- [19] CEI 61000-2-2 Compatibilité Electromagnétique (CEM)-Partie 2-2: Environnement-Niveaux decompatibilité pour les perturbations conduites à basse fréquence et la transmission des signaux sur les réseaux publics d'alimentation basse tension. Deuxième édition 2002-03.
- [20] CEI 61000-3-2 Compatibilité électromagnétique (CEM) –Partie 3-2: Limites – Limites pour les émissions de courant harmonique (Courant appelé par les appareils 16A par phase) édition 3.2-2009.
- [21] IEC 61000-2-4 Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 2-4: Environnement – Niveaux de compatibilité dans les installations industrielles pour les perturbations conduites à basse fréquence. Deuxième édition 2002-06.
- [22] IEEE Recommended Practice and Requirement for Harmonic Control in Electrical Power systems. IEEE Std. 519-1996.
- [23] José Rodríguez et Jorge Pontt, "Predictive Current Control of a Voltage Source Inverter ", IEEE Transactions on Iindustrial Electronics, vol. 54, no. 1, Februry 2007.
- [24] L. ZELLOUMA, "Contribution à l'étude du filtrage des harmoniques des réseaux dedistribution à l'aide du filtre actif ", Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2010.

- [25] T. MAHNI, "Etude et conception d'un filtre actif parallèle triphasé à quatre fils en vue de sa commande par des méthodes d'intelligence artificielle", Thèse de doctorat en sciences, Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.
- [26] S. BERNARD et G. TROCHAIN, " Deuxième Génération de Compensateur Actif d'Harmoniques Forte Capacité Basé sur le Mode d'Injection du Courant ", MGE UPS SYSTEMS MGE0121UKI, p. 3 ,1998.
- [27] I. GHADBANE, "Commande d'un Filtre Actif Triphasé Parallèle Par Différents Régulateurs ", Thèse de magistère, Université Mohamed Kheider-Biskra, 2011.
- [28] H. KOUARA, " Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension ", Mémoire de magister, Université de Batna , 2006.
- [29] S. Hafsia, "Commande d'un filtre actif parallèle à quatre bras par des techniques avancées", Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider -Biskra, 2015.
- [30] A. CHAOUI, " Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires ". Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Setif , 2010.
- [31] S. OUCHEN, "Contribution à la Commande Direct de Puissance Dédiée au Filtrage Active, Associé à une Source Photovoltaïque", Thèse de doctorat en sciences, Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.
- [32] M. M. ABDUSALAM, " Structures et Stratégies de Commande des Filtres Actifs Parallèle et Hybride avec Validations Expérimentales ", Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy-I-France, 2008.
- [33] L. BENCHAITA, " Etude, par Simulation Numérique et Expérimentation, d'un Filtre Actif Parallèle à Structure Courant avec une Nouvelle Méthode de Contrôle-Commande ", Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré-Nancy-France, 1998.
- [34] N. BRUYANT, " Etude et Commande Généralisées de Filtres Actifs Parallèles, Compensation Global ou Sélective des Harmoniques, Régime Equilibré ou Déséquilibré ", Thèse de doctorat de l'université de Nantes, France, 1999.
- [35] B. SINGH Et K. AL-HADDADm, "A Review Of Active Filters For Power Quality Improvement", IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 46, N° 5, P. 960-971, 1999.
- [36] J. XU. <Filtrage Actif Parallèle des Harmoniques des Réseaux de Distribution d' _ Electricité >. Thèse de doctorat, INPL, 1994.
- [37] G. SE0GUIER et F.LABRIQUE. < La Conversion Continu Alternatif >. Tec et doc Lavoisier, Les convertisseurs de l'_electronique de puissance, V. 4, 1989.

- [38] M. C. BENHABIB, E. JACQUOT et S. SAADATE. < An Advanced Control Approach for a Shunt Active Power Filter >.International Conference on Renewable Energy and Power Quality, Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique-Nancy-France,2003.
- [39] K. DJAZIA, "Etude des filtres actifs pour réseaux déséquilibrés et distordus " , Thèse de doctorat , UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF 1,2015.
- [40] M. MAGRAOUL, "Validation de techniques de commande d'un filtre actif parallèle, Mémoire présente à l'école de technologie supérieure, Université du Québec, 2007.
- [41] I. GHADBANE, "Etude et réalisation d'un filtre actif parallèle en utilisant différentes stratégies de contrôle", Thèse de doctorat en sciences, Université Mohamed Khider-Biskra, 2016.
- [42] M. HİND DJEGHLOUD , " FILTRAGE ACTIF DE PUISSANCE " , Thèse Doctorat De L'université MENTOURİ CONSTANTİNE, 2007.
- [43] S. KEBIRI, "Modélisation et simulation d'un filtre actif multi niveaux", Mémoire de Magister, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU , 2009.
- [44] M. BENGOURINA, " " , Mémoire de Magister, Université des Sciences et de Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2012.
- [45] T. GHENNAM, "Etude Et Réalisation D'un Compensateur Actif De Puissance Commandé Par DSP", Thèse De Magister, EMP, 2005.
- [46] D. NEKKAR, "Contribution à l'étude des Stratégies de Commande des Filtres Actifs Triphasés", Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Mes Saadia de Souk-Ahras,2013.
- [47] A. RABIE, " Contribution à l'étude du filtre actif parallèle de puissance à trois niveaux", Mémoire de Magister, Université d'El-Oued et Le Laboratoire de génie Électrique de Biskra (LGEB),2012.
- [48] A.Sahli," Filtrage actif et contrôle de puissances:application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau ",Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas Sétif (UFAS), Algérie, 2012.
- [49] T. Noguchi, H. Tomiki, S. Kondo, I. Takahashi, "Direct power control of PWM converter without power-source voltage sensors ", IEEE Trans. on Industrial Application, vol. 34, no. 3, pp. 473-479, May/Jun. 1998.
- [50] B. MANSOUR, S.BARKAT, «Commande par Orientation de la Tension d'un Redresseur PWM Utilisant la Commande Non Linéaire Adaptative», le premier séminaire national sur le génie électrique appliqué aux énergies renouvelables, Chlef, 2010.