

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux Electriques

THÈME

Etude des techniques de commande d'un filtre actif et
amélioration de la qualité de l'énergie électrique

Préparé par : Melle Bekaddour Asma
Mme Benchaib Chaimaa

Devant le Jury :

<i>Nom et prénoms</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>
A. BERKANI	MCA	Président
Y. BEKAOUAL	MAA	Examineur 1
M. KOULALI	MCA	Examineur 2
M. BEDOUI	MCB	Encadrant
K. BELHACEL	MAA	Co-encadrant

PROMOTION 2023 /2024

Remerciements

Mes remerciements vont tout premièrement à Allah tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donnée durant toute cette période.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadrant Mme M. BEDOUI, pour avoir d'abord proposé ce thème, pour le suivi continué tout ce long de la réalisation de ce mémoire et pour leur conseil et remarque.

Nos remerciements à Mr A. BERKANI de nous avoir fait l'honneur de présider le jury.

Nos sincères remerciements aux messieurs les membres du jury pour l'honneur et le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de ce travail :

Mme Y. BEKAOUAL et Mr M. KOULALI

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

Table des matières

Table des Matières

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles et abréviations

Introduction générale : 1

Chapitre I : Etat de l'art sur la qualité de l'énergie électrique et perturbations

I.1 Introduction : 3

I.2 Qualité de l'énergie électrique et perturbations (QEE) : 3

I.2.1 Qualité de tension : 3

I.2.2 Qualité du courant : 4

I.3 Norme et recommandation : 4

I.4 Principaux types de perturbations électriques : 5

I.4.1 Harmoniques : 5

I.4.1.1 Origine des harmoniques : 6

I.4.1.2 Conséquences des harmoniques : 6

I.4.1.3 Caractéristiques de la pollution harmonique : 8

I.4.2 Inter harmoniques : 9

I.4.3 Creux de tension : 9

I.4.3.1 Origine de creux de tension : 10

I.4.4 Surtensions et surintensités : 10

I.4.4.1 Effets principaux de la surtension : 11

I.4.5 Fluctuation rapide de tension : 12

I.4.6 Flicker : 12

I.4.6.1 Conséquences de flicker : 12

I.4.7 Variations de fréquence : 13

I.4.7.1 Définition et Origines : 13

I.4.8 Déséquilibre du Système Triphasé : 13

I.4.8.1 Origines : 14

I.4.8.2 Conséquences : 14

I.5 Solutions de dépollution :	15
I.5.1 Solutions préventives :	15
I.5.2 Solutions correctives :	15
I.5.3 Solutions correctives et modernes :	16
I.5.3.1 Comparaison entre les différentes topologies de filtrage	16
I.6 Conclusion :	21

Chapitre II : Structure et commande d'un filtre actif parallèle FAP

II.1 Introduction :	22
II.2 Filtre actif parallèle :	22
II.2.1 Principe de fonctionnement du filtre actif :	23
II.3 Principe de commande du filtre actif :	23
II.4 Structure d'un filtre actif parallèle FAP :	24
II.4.1 Partie de puissance d'un FAP :	24
II.4.2 Partie de commande d'un FAP :	24
II.4.3 Filtre actif parallèle (FAP) à structure de tension :	25
II.4.4 Filtre actif à structure courant :	26
II.4.5 Comparaison des deux structures :	26
II.4.5.1 Composants semi-conducteurs :	26
II.4.5.2 Commande et protection :	26
II.4.5.3 Atténuations des harmoniques :	27
II.5 Système de régulation du filtre actif parallèle :	27
II.6 Filtre actif parallèle avec un onduleur de tension à trois bras :	28
II.6.1 Modélisation de l'onduleur de tension :	28
II.6.2 Système de stockage d'énergie :	29
II.6.3 Filtre de sortie :	29
II.7 Commande de l'onduleur :	30
II.7.1 Commande par hystérésis :	30
II.7.2 Contrôle par MLI :	31
II.7.2.1 Commande par MLI sinusoïdale :	31

II.7.2.2 Commande par MLI vectorielle :	32
II.8 Détermination des paramètres du régulateur PI :	32
II.9 Dimensionnement du filtre actif :	33
II.9.1 Description du fonctionnement de la capacité :	34
II.9.2 Estimation de la tension de référence du bus continu (V_{dcref})	34
II.9.3 Estimation de la valeur de la capacité du condensateur de stockage (C_{dc}) :	35
II.10 Avantages et inconvénients d'un filtrage actif :	36
II.11 Conclusion :	36

Chapitre III : Filtre actif parallèle et les méthodes de commande et d'identification des courants harmoniques

III.1 Introduction :	37
III.2 Identification des courants de référence :	37
III. 3 Généralités sur les méthodes d'identification :	38
III.3.1 Méthode des puissances active et réactive (PQ) :	38
III.3.2 Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées modifiée :	41
III.3.2.1 Principe du FMV :	41
III.3.3 Théorie du référentiel synchrone (SRF) où (dq) :	42
III.3.3.1 Système à base de PLL :	45
III.3.4 Commande directe de puissance (DPC) :	47
III.3.4.1 Estimation de la puissance instantanée :	48
III.3.4.2 Estimation de la tension du réseau :	48
III.3.4.3 Choix du secteur :	48
III.3.4.4 Table de commutation :	49
III.3.5 Etude de la commande en courant du FAP (DCC) :	50
III.3.6 Méthode indirecte du courant (ICC) :	51
III.4 Introduction aux réseaux de neurones :	53
III.4.1 Historique de réseaux de neurones :	54
III.4.2 Architecture des réseaux de neurones :	54
III.4.3 Apprentissage des réseaux de neurones :	55

III.5 Conclusion :	55
--------------------------	----

Chapitre IV : Simulation d'un filtre actif parallèle FAP et interprétations des résultats

IV.1 Introduction :	57
---------------------------	----

IV.2 Paramètres de simulation :	57
---------------------------------------	----

IV.3 Structure générale de simulation d'un filtre actif parallèle FAP :	58
---	----

IV.3.1 Structure de la source de tension triphasée :	59
--	----

IV.3.2 Structure de la charge non linéaire :	59
--	----

IV.3.3 Structure globale du système à étudier sans filtre actif parallèle FAP (réseau triphasé/charge non linéaire) :	59
---	----

IV.3.4 Structure d'un filtre actif parallèle FAP :	60
--	----

IV.3.5 Structure de la Commande MLI du filtre actif parallèle FAP :	60
---	----

IV.3.6 Structure du régulateur PI de bus continu :	61
--	----

IV.4 Résultats de simulation et interprétations :	61
---	----

IV.4.1 Méthode de puissance instantanée-PQ :	62
--	----

<i>Figure (IV-12) : Courant du filtre-PQ.</i>	64
---	----

IV.4.2 Méthode de référentiel synchrone (SRF) –DQ :	65
---	----

IV.4.2.3 Méthode de commande directe du courant-DCC :	67
---	----

IV.4.2.4 Méthode de commande indirecte du courant-ICC :	70
---	----

IV.4.2.5 Méthode de commande directe de puissance-DPC :	73
---	----

IV.4.2.6 Méthode de commande directe de puissance avec reseaux de neurones-DPC_ANN :	76
--	----

IV.5 Étude comparatif entre les différentes stratégies de commande :	78
--	----

IV.6. Conclusion :	79
--------------------------	----

Conclusion générale :	81
-----------------------------	----

Références bibliographiques

Liste des figures

Chapitre I : Etat de l'art sur la qualité de l'énergie électrique et perturbations

FIGURE (I-1) : SIGNAL DEFORME.	6
FIGURE (I-2) : DIAGRAMME VECTORIELLE DU FACTEUR DE PUISSANCE	9
FIGURE (I-3) : CREUX DE TENSION.	10
FIGURE (I-4) : EXEMPLE DE SURTENSION	11
FIGURE (I-5) : FLUCTUATION DE LA TENSION.	12
FIGURE (I-6) : VARIATION DE FREQUENCE.....	13
FIGURE (I-7) : DESEQUILIBRES DU SYSTEME TRIPHASE DE TENSION	14
FIGURE (I-8) : A)FILTRE PASSIF RESONNANT, B)FILTRE PASSIF AMORTI	15
FIGURE (I-9) : A) FILTRE ACTIF PARALLELE, B) FILTRE ACTIF SERIE.	16

Chapitre II : Structure et commande d'un filtre actif parallèle FAP

FIGURE (II-1) : PRINCIPE D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE	23
FIGURE (II-2) : STRUCTURE D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE.....	24
FIGURE (II-3) : FILTRE ACTIF PARALLELE A STRUCTURE DE TENSION	25
FIGURE (II-4) : FILTRE ACTIF PARALLELE A STRUCTURE DE COURANT	26
FIGURE (II-5) : FILTRE ACTIF PARALLELE A TROIS BRAS	28
FIGURE (II-6) : SCHEMA DE MODELISATION DU FILTRE DE SORTIE.....	30
FIGURE (II-7) : SCHEMA DE COMMANDE PAR HYSTERESIS	31
FIGURE (II-8) : PRINCIPE DE COMMANDE DU COURANT PAR MLI	32
FIGURE (II-9) : SCHEMA DE LA REGULATION DE V_C PAR UN REGULATEUR PI	33

Chapitre III : Filtre actif parallèle et les méthodes de commande et d'identification des courants harmoniques

FIGURE (III-1) : GENERATION DES COURANTS DE REFERENCE PAR LA METHODE DES PUISSANCES INSTANTANEEES PQ	41
FIGURE (III-2) : SCHEMA BLOC DU FMV	42
FIGURE (III-3) : REPRESENTATION VECTORIEL DE PASSAGE DE REPERE ABC VERS LE REPERE (DQ) ..	43
FIGURE (III-4) : PRINCIPE DE LA METHODE (DQ).....	44
FIGURE (III-5) : SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE PLL CLASSIQUE	45
FIGURE (III-6) : SCHEMA FONCTIONNEL DE LA PLL	46
FIGURE (III-7) : CONFIGURATION GENERALE DE LA COMMANDE DIRECTE DE PUISSANCES	47
FIGURE (III-8) : SECTEURS ET VECTEURS DES TENSIONS	49
FIGURE (III-9) : PRINCIPE DE LA METHODE DIRECTE DU COURANT (DCC)	50

FIGURE (III-10) : PRINCIPE DE LA METHODE INDIRECTE DU COURANT ICC	51
FIGURE (III-11) : MODELE D'UN NEURONE ARTIFICIEL	54
Chapitre IV : Simulation d'un filtre actif parallèle FAP et interprétations des résultats	
FIGURE (IV-1) : STRUCTURE GENERALE DU FAP SOUS MATLAB/SIMPOWERSYSTEMS.....	58
FIGURE (IV-2) : SCHEMA BLOC DE LA SOURCE DE TENSION TRIPHASEE.....	59
FIGURE (IV-3) : SCHEMA BLOC DE LA CHARGE NON LINEAIRE.....	59
FIGURE (IV-4) : STRUCTURE SANS FAP (RESEAU TRIPHASE/CHARGE NON LINEAIRE).	60
FIGURE (IV-5) : STRUCTURE DE L'ONDULEUR A TROIS BRAS.	60
FIGURE (IV-6) : SCHEMA DE PRINCIPE DE LA COMMANDE DU FAP PAR MLI.....	61
FIGURE (IV-7) : SCHEMAS DE REGULATION DE LA TENSION DU BUS CONTINU PAR UN PI POUR LES DEUX METHODES PQ ET DPC.....	61
FIGURE (IV-8) : SCHEMAS DE REGULATION DE V_{dc} PAR UN PI POUR LES METHODES DQ, DCC ET ICC.	61
FIGURE (IV-9) : SCHEMA DE PRINCIPE DE LA METHODE DES PUISSANCES INSTANTANEEES P-Q.....	62
FIGURE (IV-10) : SCHEMA DE TRANSFORMATIONS : A) REPERE ABC VERS AB DE LA TENSION, B) REPERE ABC VERS AB DU COURANT C) CALCUL DE PUISSANCES P-Q, D) CALCUL DES COURANTS DE REFERENCES DANS LE REPERE AB, E) CALCUL DES COURANTS DE REFERENCES DANS LE REPERE ABC.	62
FIGURE (IV-11) : COURANT DE SOURCE-PQ.....	63
FIGURE (IV-12) : COURANT DU FILTRE-PQ..	64
FIGURE (IV-13) : TENSION DE BUS CONTINU V_{dc} -PQ.....	64
FIGURE (IV-14) : PUISSANCE ACTIVE ET REACTIVE-PQ.	64
FIGURE (IV-15) : SPECTRE D'HARMONIQUE POUR	64
FIGURE (IV-16) : SPECTRE-PQ.....	64
FIGURE (IV-17) : SCHEMA DE PRINCIPE DE LA METHODE -DQ.....	65
FIGURE (IV-18) : SCHEMA DE PLL DE LA METHODE -DQ.....	65
FIGURE (IV-19) : COURANT ET TENSION DE SOURCE-DQ.	66
FIGURE (IV-20) : COURANT DE FILTRE-DQ.....	66
FIGURE (IV-21) : TENSION V_{dc} DE BUS CONTINU.....	66
FIGURE (IV-22) : PUISSANCE ACTIVE ET REACTIVE-DQ.....	67
FIGURE (IV-23) : SPECTRE D'HARMONIQUE I_s -DQ.....	67
FIGURE (IV-24) : SCHEMA DE PRINCIPE DE LA METHODE DCC.....	68
FIGURE (IV-25) : COURANT ET TENSION DE CHARGE AVANT LE FAP-DCC.....	68
FIGURE (IV-26) : COURANT ET TENSION DE SOURCE APRES LE FAP-DCC.....	69
FIGURE (IV-27) : COURANT DU FILTRE-DCC.....	69
FIGURE (IV-28) : TENSION V_{dc} DE BUS CONTINU.....	72
FIGURE (IV-29) : PUISSANCE ACTIVE ET REACTIVE-DCC : A) AVANT LE FAP, B) APRES LE FAP....	70
FIGURE (IV-30) : SPECTRE D'HARMONIQUE I_s -DCC.	70
FIGURE (IV-31) : SCHEMA DE PRINCIPE DE LA METHODE- ICC.....	70
FIGURE (IV-32) : COURANT ET TENSION DE CHARGE AVANT LE FAP -ICC.....	71
FIGURE (IV-33) : COURANT ET TENSION DE SOURCE APRES LE FAP -ICC.....	72
FIGURE (IV-34) : COURANT DE FILTRE-ICC.....	72
FIGURE (IV-35) : TENSION V_{dc} DE BUS CONTINU.....	75

FIGURE (IV-36) : PUISSANCE ACTIVE ET REACTIVE-ICC. : A) AVANT LE FAP, B) APRES LE FAP.....	73
FIGURE (IV-37) : SPECTRE HARMONIQUE Is-ICC.....	73
FIGURE (IV-38) : SCHEMA DE PRINCIPE DE LA METHODE DPC.....	74
FIGURE (IV-39) : SCHEMA DE COURANT ET TENSION DE SOURCE PAR LA METHODE DPC.....	74
FIGURE (IV-40) : COURANT DE FILTRE-DPC.....	75
FIGURE (IV-41) : TENSION VDC DE BUS CONTINU.....	78
FIGURE (IV-42) : PUISSANCE ACTIVE ET REACTIVE-DPC : A) AVANT LE FAP, B) APRES LE FAP. ...	75
FIGURE (IV-43) : SPECTRE HARMONIQUE Is-DPC.....	76
FIGURE (IV-44) : PROCESSUS D'APPRENTISSAGE AVEC LES RESEAUX DE NEURONES.	76
FIGURE (IV-45) : SCHEMAS DE REGULATION DE V_{DC} PAR UN ANN METHODE_DPC.....	77
FIGURE (IV-46) : SCHEMA DE COURANT ET TENSION DE SOURCE PAR LA METHODE DPC.....	77
FIGURE (IV-47) : TENSION DE BUS CONTINU-DPC-ANN.	78
FIGURE (IV-48) : SPECTRE- DPC-ANN.....	82
FIGURE (IV-49) : PUISSANCE ACTIVE ET REACTIVE-DPC-ANN.....	78

Liste des tableaux

Chapitre I : Etat de l'art sur la qualité de l'énergie électrique et perturbations

TABLEAU I-1: AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE CHAQUE TOPOLOGIE DE FILTRAGE..... 17

Chapitre III : Filtre actif parallèle et les méthodes de commande et d'identification des courants harmoniques

TABLEAU III- 1: TABLE DE COMMUTATION CLASSIQUE..... 50

Chapitre IV : Simulation d'un filtre actif parallèle FAP et interprétations des résultats

TABLEAU IV- 1: PARAMETRES DE SIMULATION..... 57

TABLEAU IV- 2: LES DIFFERENTES STRATEGIE DE COMMANDE ET LEUR PERFORMANCE. 79

Liste des Symboles et Acronymes

THD_v : TAUX DE DISTORSION HARMONIQUE EN TENSION

CEM : COMPATIBILITE ELECTROMAGNETIQUE

CEI : COMMISSION ELECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

CENELEC : COMITE EUROPEEN DE NORMALISATION ELECTROTECHNIQUE

UTE : UNION TECHNIQUE DE L'ELECTRICITE

CEF : COMITE ELECTROTECHNIQUE FRANÇAIS

IEEE : INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS

CE : COMMUNAUTE EUROPEENNE

T : PERIODE

H : RANG D'HARMONIQUE

C_h : COMPOSANTE HARMONIQUE DE RANG H.

C₁ : COMPOSANTE FONDAMENTALE

THD : TAUX GLOBAL DE DISTORSION HARMONIQUE

P : PUISSANCE ACTIVE

S : PUISSANCE APPARENTE

D : PUISSANCE DEFORMANTE

FP :FACTEUR DE PUISSANCE

UF : TENSION DE FOURNITURE

UN : TENSION NOMINALE

FAP :FILTRE ACTIF PARALLÈLE

GTO :GATE-TURN-OFF THYRISTOR

IGBT : INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTORS

C : CAPACITÉ

L_F : INDUCTANCE DE FILTRAGE

PID : REGULATEURS (PROPORTIONNEL, INTEGRAL, DERIVE)

PD : REGULATEURS (PROPORTIONNEL, DERIVE)

PI : REGULATEURS (PROPORTIONNEL, INTEGRAL)

P : REGULATEURS (PROPORTIONNEL)

V_{DC} : TENSION DU BUS CONTINU

C_{DC} : CONDENSATEUR DE STOCKAGE

V_S : TENSION SIMPLE DU RESEAU

I_H : COURANT HARMONIQUE DU RANG H

A : ANGLE D'ALLUMAGE DES THYRISTORS DU PONT DE GRAETZ

ω_H : PULSATION LA PLUS FAIBLE DES HARMONIQUES A COMPENSER

i_f^* : COURANT REFERENCE DE FILTRE

I_F : COURANT DE FILTRE

MLI : MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSION

KP : GAIN PROPORTIONNEL DU REGULATEUR

KI : GAIN INTEGRAL DU REGULATEUR

F(S) : FONCTION DE TRANSFERT

V_{dcref} : TENSION DE REFERENCE DE LA CAPACITE

f_c : FREQUENCE DE COMMUTATION

f_{hmax} : FREQUENCE DE L'HARMONIQUE

M : ZONE DE MODULATION LINEAIRE

V_{fmax} : VALEUR MAXIMALE DE LA TENSION DE PHASE

PQ : METHODE DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE

P_{DC} : PUISSANCE CONTINUE

FMV : FILTRE MULTI-VARIABLES

SDM : METHODE DETECTION SYNCHRONE

V_A, V_B, V_0 : TENSIONS PERTURBATEURS CALCULES DANS LE REPERE A- B- 0

I_A, I_B, I_0 : COURANTS PERTURBATEURS CALCULES DANS LE REPERE A- B- 0

P : PUISSANCE REELLE

Q : PUISSANCE IMAGINAIRE

\bar{p}, \bar{q} : COMPOSANTES CONTINUES DES PUISSANCES INSTANTANEEES

\tilde{p}, \tilde{q} : COMPOSANTES ALTERNATIVES DES PUISSANCES INSTANTANEEES

E : COEFFICIENT D'AMORTISSEMENT

ω_c : PULSATION DE COUPURE DU FILTRE

ω_f : PULSATION DE LA COMPOSANTE FONDAMENTALE DU SIGNAL D'ENTREE

n : RANG DE LA COMPOSANTE DU SIGNAL A FILTRER

K : CONSTANTE POSITIVE

$x_{\alpha\beta}$: SIGNAUX D'ENTREE DU FMV(TENSION OU COURENT)

$\hat{x}_{\alpha\beta}$: SIGNAUX DE SORTIE DU FMV

SRF : THEORIE DU REFERENTIEL SYNCHRONE

$\bar{i}_{cd}, \bar{i}_{cq}$: COMPOSANTE CONTINUE (FONDAMENTALE) DE COURANT DE CHARGE DANS LE REPERE

DQ

$\tilde{i}_{cd}; \tilde{i}_{cq}$: COMPOSANTE ALTERNATIVE (HARMONIQUE) DE COURANT DE CHARGE DANS LE
REPERE DQ

FPB : FILTRE PASSE BAS

i_a^*, i_b^*, i_c^* : COURANTS DE REFERENCE TRIPHASES

i_{ca}, i_{cb}, i_{cc} : COURANTS DE CHARGE TRIPHASES

PLL : BOUCLE DE VERROUILLAGE DE LA PHASE

$v_{sa}(\theta), v_{sb}(\theta), v_{sc}(\theta)$: TROIS TENSIONS AU POINT DE RACCORDEMENT

θ : PHASE INSTANTANEE REELLE DE LA TENSION.

$\hat{\theta}$: INTEGRALE DE L'ESTIMATION DE LA PULSATION DETERMINEE PAR LE REGULATEUR PI

$F_{PI}(s)$: FONCTION DE TRANSFERT DU REGULATEUR PI

DPC : COMMANDE DIRECTE DE PUISSANCE

$\hat{v}_{s\alpha}$: TENSION DE SOURCE REFERENCE SUR L'AXE (α)

$\hat{v}_{s\beta}$: TENSION DE SOURCE REFERENCE SUR L'AXE (β)

N : NUMERO DU SECTEUR

DCC : COMMANDE DIRECT DE COURANT

I_{sp} : COURANT DE CRETE

$i_{sa}^*(t), i_{sb}^*(t), i_{sc}^*(t)$: COURANTS DE SOURCE DE REFERENCE

ICC : COMMANDE INDIRECTE DU COURANT

$v_{sa}^*(t), v_{sb}^*(t), v_{sc}^*(t)$: TROIS TENSIONS DE SOURCE

I_n : AMPLITUDE DU NIEME COURANT HARMONIQUE

ϕ_n : ANGLE DU NIEME COURANT HARMONIQUE

I_1 : AMPLITUDE DU COURANT FONDAMENTAL

ϕ_1 : ANGLE DU COURANT FONDAMENTAL

$P_{C(t)}$: PUISSANCE DE CHARGE INSTANTANEE

$P_{fun(t)}$: PUISSANCE FONDAMENTALE (PUISSANCE REELLE)

$P_{r(t)}$: PUISSANCE REACTIVE

$P_{h(t)}$: PUISSANCE HARMONIQUE

I_{sc} : COMPOSANTE DE PERTE DE L'ONDULEUR

I_{sm} : COURANT DE SOURCE MAXIMUM

I_{sp} : COURANT DE CRETE TOTAL

ANN : ARTIFICIEL NEURAL NETWORKS

SOM : SELF ORGANIZING MAP

LVQ : LEARNING VECTOR QUANTIZATION

ART : ADAPTATIVE RESONNANCE THEORIE

RCE : RESTRICTED COULOMB ENERGY

R : RÉSISTANCE

L : L'INDUCTANCE

F : FREQUENCE

R_{CH} : RESISTANCE DE CHARGE NON LINEAIRE

L_{CH} : L'INDUCTANCE DE CHARGE NON LINEAIRE

R_F : RESISTANCE DE FILTRE ACTIF PARALLELE

L_F : L'INDUCTANCE DE FILTRE ACTIF PARALLELE

Introduction générale

Introduction générale :

Ces dernières années, l'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance dans les systèmes électriques a entraîné de plus en plus de problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques. Ce phénomène touche l'ensemble des secteurs industriels (utilisation de gradateurs, de redresseurs, de variateurs de vitesse...), tertiaire (informatique ou éclairage des bureaux, commerce...) et domestique (téléviseurs, appareils électroménagers grand public...).

La distorsion harmonique est générée par les charges non linéaires connectées au réseau et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau. Pour les autres équipements électriques connectés en ces points, cette pollution harmonique a des effets nocifs. Parmi ces effets, on peut notamment citer la déformation de la tension du réseau au point de raccordement, alors que le distributeur d'énergie est tenu de fournir une tension propre. Cette pollution peut également conduire à l'échauffement des câbles et des équipements électriques ou bien encore à l'arrêt soudain des machines tournantes, voire la destruction totale de tous ces équipements.

Pour compenser ces perturbations, il existe plusieurs solutions parmi lesquelles on cite le filtrage passif. Cette solution connue depuis fort longtemps, est la plus répandue surtout en forte puissance et sous haute tension. Néanmoins elle présente des inconvénients majeurs, notamment le manque d'adaptabilité lors de la variation de la charge, des phénomènes de résonance avec le réseau qui est à l'origine de l'amplification de tout harmonique à des fréquences voisines de celle de la résonance et la dépendance des performances du filtre passif des caractéristiques du réseau sur lequel il est connecté.

Le développement des semi-conducteurs entièrement commandables (Thyristors, GTO et les transistors à IGBT) en particulier a conduit à la conception des autres solutions : le filtrage actif. Une première solution consiste à connecter le filtre actif en parallèle avec le système polluant : ainsi il injecte au réseau un courant de même amplitude que celui du courant harmonique à éliminer mais en opposition de phase. Une seconde approche consiste en la connexion du filtre actif en série avec le réseau : il se comporte alors comme un générateur de tension qui impose une tension harmonique telle que, additionnée à celle du réseau, la tension au point de connexion soit rendue sinusoïdale[1]. Cependant le filtrage actif présente également ses inconvénients spécifiques, notamment son coût élevé pour des applications industrielles ; le dimensionnement du convertisseur de puissance du filtre actif peut alors être relativement élevé. Pour cette raison majeure, les applications des filtres actifs de puissance dans les systèmes

électriques sont aujourd'hui encore limitées bien que des normes fixent les caractéristiques exigées pour la qualité de l'énergie [2, 3]

Dans ce contexte, nous allons principalement axer notre travail sur le filtrage actif triphasé parallèle à trois fils. En début nous étudierons en détail ce filtre puis nous essayons à chaque fois d'appliquer de différentes techniques dont le but d'améliorer les performances de celui-ci. Ainsi, le travail de recherche présenté dans ce mémoire est divisé en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous présentons un rappel sur la qualité de l'énergie électrique et les principaux types de perturbations est abordé. Les solutions de lutte contre la pollution harmonique dans les réseaux électriques sont aussi discutées toutes en mettant un accent particulier sur la normalisation et les standards imposés, notamment la réglementation IEEE st 519-1992 qui exige un THD du courant de source inférieur à 5% pour les installations basse tension.

L'objectif est de produire à la sortie du filtre actif parallèle un courant harmonique proche le plus possible de la référence calculée et par la suite une meilleure qualité du courant de source. Pour cette raison, dans le second chapitre, nous traiterons le problème de perturbation harmonique en courant et sa compensation à partir d'une structure de filtre actif parallèle (connecté en parallèle avec la charge polluante).

Dans le troisième chapitre, nous étudions ensuite les différents algorithmes d'identification des courants harmoniques à savoir la méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées **PQ**, la méthode du référentiel synchrone **SRF**, l'algorithme de puissance directe **DPC**, et en finissant par les deux méthodes directe et indirecte du courant **DCC** et **ICC**. Côté commande des courants (commande des gâchettes), notre onduleur sera piloté par la technique MLI en vue de sa simplicité et sa robustesse. Dans la dernière partie de ce chapitre nous rappelons le principe de fonctionnement des réseaux de neurones artificiels. Cette partie qui correspond à un état de l'art montre l'apport de ces techniques dans le cas particulier de la compensation des harmoniques dans les réseaux électriques.

Le dernier chapitre a pour objectif d'étudié les résultats de simulation sous l'environnement Matlab/SimPowerSystems relatifs aux comportements du FAP en utilisant les principales méthodes d'identification des courants harmoniques citées précédemment.

Nous terminons par une conclusion générale sur l'ensemble de cette étude et nous proposons des perspectives envisageables pour la poursuite de ce travail.

Enfin nous avons terminé ce travail par une conclusion générale relative aux résultats de simulations.

CHAPITRE I

E tat de l'art sur la qualité de l'énergie
électrique et perturbations

I.1 Introduction :

Le distributeur d'énergie doit fournir à l'ensemble de ses clients et utilisateurs une énergie de bonne qualité sous la forme de trois tensions sinusoïdales constituant un réseau triphasé équilibré. Il est crucial pour les distributeurs d'énergie de fournir une tension de bonne qualité à leurs clients, qu'ils soient industriels ou particuliers. Cette tension est généralement fournie sous la forme de trois tensions sinusoïdales dans un réseau triphasé équilibré. Cependant, la qualité de cette énergie peut être altérée pendant son transport vers les clients, en raison de divers facteurs, tels que des incidents liés à la nature physique et matérielle des composants du réseau ou des causes intrinsèques spécifiques au fonctionnement de certains équipements. Pour éviter les dysfonctionnements voire la destruction des composants du réseau électrique ou des équipements finaux, il est essentiel de comprendre l'origine des perturbations, notamment des harmoniques, et de mettre en place des solutions appropriées pour les atténuer ou les éliminer.

Ce chapitre est entièrement consacré aux généralités sur la qualité de l'énergie électrique. Un bref état de l'art sur les principales perturbations est également donné. On donne aussi un aperçu des solutions déployées ainsi que les différentes structures des systèmes de dépollution harmonique [4].

I.2 Qualité de l'énergie électrique et perturbations (QEE) :

La qualité de l'énergie électrique est étroitement liée à la qualité de l'onde de tension laquelle est caractérisée par les paramètres suivants[5] :

- ✓ Forme d'onde parfaitement sinusoïdale ; absence de distorsions, de pics, de creux ;
- ✓ Equilibre et symétrie parfaite des phases en amplitude et en phases ;
- ✓ Valeurs efficaces dans les limites tolérées ;
- ✓ Stabilité de la fréquence ;
- ✓ Facteur de puissance dans des limites tolérables.

I.2.1 Qualité de tension :

La qualité d'énergie où de la tension est le concept d'efficacité de classer les équipements sensibles d'une manière qui convient à l'opération de l'équipement.

Pour rappel, la tension possède quatre caractéristiques principales : Fréquence, amplitude, forme d'onde et symétrie.

Le maintien de ce niveau de qualité est la responsabilité commune de tous les gestionnaires de réseaux concernés, qui doivent participer aux réglages primaires de la fréquence.

Le gestionnaire de réseau doit maintenir l'amplitude de la tension dans un intervalle de l'ordre 10% autour de sa valeur nominale. Cependant, même avec une régulation parfaite

plusieurs de perturbations peuvent dégrader la qualité de la tension [5].

I.2.2 Qualité du courant :

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres : Amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquence constante déphasés de $2\pi/3$ radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale.

Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension », où le terme de « qualité de l'énergie » s'applique uniquement à celle de la tension[6].

I.3 Norme et recommandation :

De nombreux organismes nationaux et internationaux imposent des limites sur l'injection des courants harmoniques afin d'assurer une qualité du réseau de distribution. D'autres ne précisent que les niveaux de courant des harmoniques exprimés en pourcentage du fondamental à ne pas dépasser. Les équipements électriques doivent fonctionner sans dégradation face à des phénomènes perturbateurs, en particulier ceux de basses fréquences tels que les harmoniques de tension du réseau. Rappelons que le taux de distorsion en tension **THD_v** consécutif à l'émission de courants harmoniques dépend de l'impédance de court-circuit du réseau d'alimentation d'énergie au point de raccordement. De plus, l'électricité est désormais un produit, ainsi le fournisseur d'énergie a une responsabilité vis-à-vis des dommages possibles causés par un excès d'harmoniques. Pour garantir un niveau de qualité de l'énergie satisfaisant et une bonne cohabitation entre les sources polluées et les charges polluées, l'ensemble des distributeurs et des utilisateurs est amené à respecter plusieurs normes et recommandations qui définissent les règles relatives à la Compatibilité Electromagnétique (CEM).

Au niveau international par la CEI (Commission Electrotechnique Internationale) ou IEC (International Electro technical Commission) au niveau européen par la CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique), au niveau Français par l'UTE (Union Technique de l'Electricité) et le CEF (Comité Electrotechnique Français) au niveau nord-américain par le standard IEEE 519.

La CEM correspond à la capacité d'un dispositif, équipement ou système, à fonctionner de manière satisfaisante dans son environnement électromagnétique sans introduire de perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement (CEI 60050-161). Les directives CEM s'applique à tous les appareils électriques et/ou

électroniques susceptibles d'être affectées par ces perturbations. Il est à noter que tout appareil doit être conforme aux normes d'immunité et d'émission avant d'être mis en vente sur le marché européen et doit porter la marque CE (Communauté Européenne).

Les principales normes en matière de pollution harmonique basse tension sont au niveau international la CEI 61000, au niveau européen la NF EN 50160 et au niveau Français la NF C15-100 [7].

I.4 Principaux types de perturbations électriques :

Les perturbations sont tous les phénomènes internes ou externes au réseau ayant un pouvoir de modifier d'une manière transitoire ou permanente en amplitude et/ou en forme grandeurs électriques du réseau (courant, tension, fréquence). Ces perturbations peuvent être classées selon deux critères ; Selon la durée de persistance, ou selon le mode d'affectation c'est-à-dire leurs conséquences sur les grandeurs électriques. Ainsi, selon la première classification, on a deux catégories essentielles [8] :

- ✓ Perturbations périodiques (qui durent dans le temps), comme le cas des distorsions harmoniques, chutes de tension dues aux flux de puissance réactive dans le réseau.
- ✓ Perturbations apériodiques ; ou l'en a principalement l'ensemble des phénomènes fugitifs souvent très difficiles à prévoir comme les creux de tension ou surtension transitoires.

Par ailleurs, selon leurs modes d'affectation des grandeurs électriques, on distingue trois familles principales ;

- ✓ Perturbations sur l'amplitude ou les valeurs efficaces.
- ✓ Déséquilibre des systèmes triphasés.
- ✓ Distorsions harmoniques.

I.4.1 Harmoniques :

Un signal périodique de période T déformé contient des harmoniques. On peut le décomposer en une somme de signaux sinusoïdaux dont le premier est le fondamental et les autres sont des harmoniques. Ces derniers ont des fréquences multiples de celle du fondamental. Chaque composante est caractérisée par son rang et son amplitude.

Ainsi, les harmoniques de tension ou de courant sont des signaux de fréquences multiples de la fréquence fondamentale. Ces derniers sont générés par des charges dites non- linéaires.

Certains appareils présentent une impédance non constante durant l'alternance de la sinusoïde de tension à 50Hz. Ils absorbent alors des courants non sinusoïdaux qui se propagent dans le réseau et déforment ainsi l'allure de la tension.

Pour qu'un signal déformé soit accessible à l'étude et à l'analyse, on peut le décomposer en une somme de signaux sinusoïdaux comprenant[9]:

- ✓ Un signal sinusoïdal à la fréquence fondamentale : le fondamental.
- ✓ Des signaux sinusoïdaux dont les fréquences sont des multiples entiers du fondamental : les harmoniques
- ✓ Une composante continue.

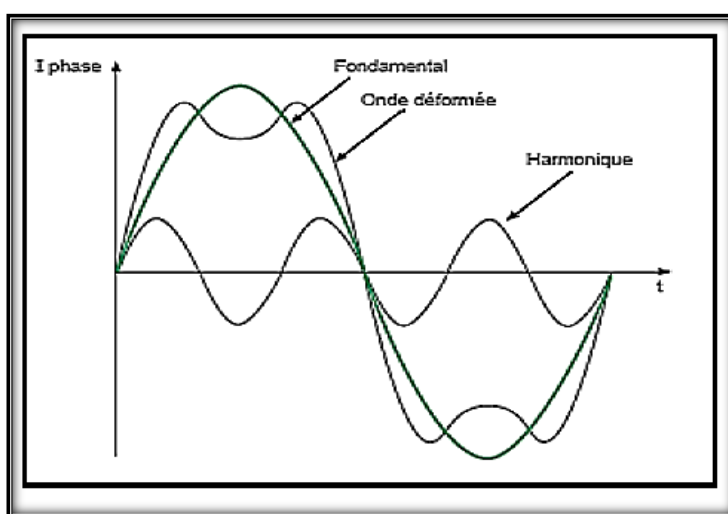


Figure (I-1) : Signal déformé [9].

I.4.1.1 Origine des harmoniques :

L'accroissement des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et ainsi polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique[10].

I.4.1.2 Conséquences des harmoniques :

Les courants harmoniques se propagent dans le réseau électrique, déforment l'allure du courant de la source et polluent les consommateurs alimentés par ce même réseau. Ils peuvent occasionner des incidents au niveau de l'appareillage du client et donnent lieu à des surcoûts de production d'énergie importants. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux types : les effets instantanés et les effets à terme [4] :

a) Effets instantanés :

Les effets instantanés apparaissent immédiatement dans certains appareillages :

- ✓ **Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques :** En présence d'harmoniques, la tension et le courant peuvent changer plusieurs fois de signe dans une demi-période. Les appareils dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électriques peuvent être affectés.
- ✓ **Troubles fonctionnels des micro-ordinateurs :** Les effets sur ces équipements peuvent se manifester par la dégradation de la qualité de l'image et par des couples pulsatoires des moteurs d'entraînement de disque.
- ✓ **Erreurs dans les appareils de mesure :** Certains appareils de mesure et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesure des erreurs de lecture supplémentaires en présence d'harmoniques.
- ✓ **Vibrations et bruits :** Les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances et machines tournantes).

b) Effets à terme :

Ils se manifestent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique. L'effet à terme le plus important est de nature thermique, il se traduit par l'échauffement. Il conduit à une fatigue prématurée du matériel, des lignes et amènent un déclassement des équipements.

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

- ✓ **Echauffement des condensateurs :** L'échauffement est causé par les pertes dues au phénomène d'hystérésis dans le diélectrique. Les condensateurs sont donc sensibles aux surcharges, qu'elles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques. Ces échauffements peuvent conduire au claquage.
- ✓ **Echauffement due aux pertes supplémentaires des machines électriques et des transformateurs :** L'échauffement est causé par les pertes dans le stator des machines électriques et principalement dans leurs circuits rotoriques à cause des différences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor.

Les harmoniques génèrent aussi des pertes supplémentaires dans les transformateurs, par effet Joule dans les enroulements, accentuées par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courants de Foucault dans les circuits magnétiques.

I.4.1.3 Caractéristiques de la pollution harmonique :

Différentes grandeurs sont définies pour chiffrer ces perturbations. Parmi celles-ci les plus utilisées sont :

a) Rang d'harmonique h :

$$h = \frac{C_h}{C_1} \quad (\text{I-1})$$

Avec

C_h : Composante harmonique de rang h .

C_1 : Composante fondamentale.

b) Taux global de distorsion harmonique THD :

Le THD est le rapport entre la réelle valeur efficace de l'harmonique d'un signal (courant ou tension) par rapport à la valeur efficace du même signal à la fréquence fondamentale [11].

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} C_h^2 / C_1^2} \quad (\text{I-2})$$

c) Facteur de puissance :

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S . Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation des équipements.

Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante D , donnée par la relation (I-3), apparaît comme le montre le diagramme de Fresnel de la figure (I-2) [8].

$$D = 3V_1 \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \quad (\text{I-3})$$

Le facteur de Puissance (FP) :

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \varphi_1 \cdot \cos \gamma \quad (\text{I-4})$$

On voit bien que les harmoniques affectent aussi le facteur de puissance.

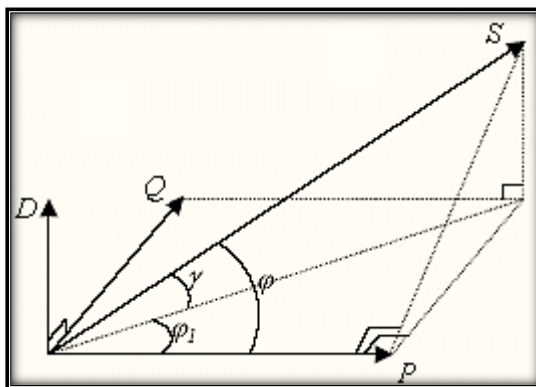


Figure (I-2) : Diagramme vectorielle du facteur de puissance [11].

φ_1 : Déphasage entre la puissance active et la puissance apparente S_1

γ : Déphasage entre la puissance apparente dans le cas d'un système équilibré linéaire S_1 et la puissance apparente dans le cas déséquilibré non linéaire S .

φ : Déphasage entre la puissance active et la puissance apparente S .

I.4.2 Inter harmoniques :

L'analyse harmonique des courants et des tensions nous indique qu'en plus des harmoniques de rang entier, il existe des inters harmoniques. Ceux-ci ont d'ordinaire une amplitude relativement réduite, mais peuvent être gênants s'ils provoquent des résonances. Ils peuvent également avoir des effets très néfastes lorsque leur fréquence se situe dans les plages de fréquence réservées pour les signaux de commande.

Les inters harmoniques ont principalement origine [12]:

- ✓ Les imperfections du convertisseur et de sa commande (chutes de tension dans les thyristors, variation ou inégalité des angles de commutation, variation de l'impédance vue du côté continu du redresseur.
- ✓ L'association de plusieurs convertisseurs fonctionnant à des fréquences différentes : variateurs de vitesse des moteurs à courant alternatif.
- ✓ Les convertisseurs statiques de commande non périodique,
- ✓ Les fours à arc et les cyclo convertisseurs.

I.4.3 Creux de tension :

Un creux de tension est une diminution brusque de la tension de fourniture U_f [13].

Cette diminution, située entre 90% et 10% de la tension nominale U_n , est suivie du rétablissement de la tension après un court laps de temps. Un creux de tension peut durer de 10 ms à 3 mn.

La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une

durée inférieure à 10 ms.

I.4.3.1 Origine de creux de tension :

Il y a deux types de phénomène à l'origine des creux de tension[13] :

- ✓ Creux provenant du fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou de la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage (moteurs ...etc.),
- ✓ Creux liés aux phénomènes aléatoires, comme la foudre ou tout le court-circuit accidentel sur les réseaux de distribution, ou les réseaux internes des clients (défaut d'isolation, blessure de câble, projection de branches sur les lignes aériennes).

Les creux de tension sont caractérisés par leur amplitude et par leur durée. Ils sont monophasés, biphasés ou triphasés suivant le nombre de phases concernées.

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

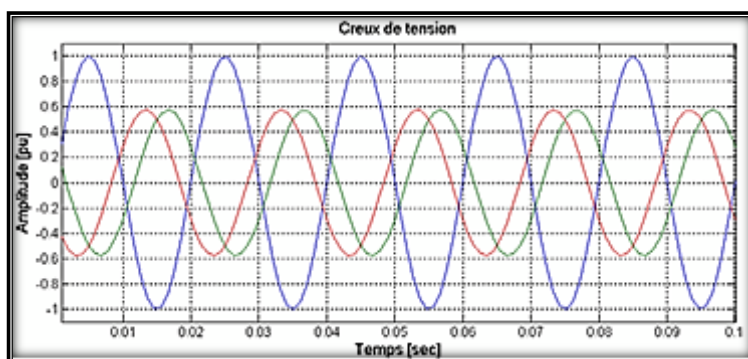


Figure (I-3) : Creux de tension [12].

I.4.4 Surtensions et surintensités :

Les surtensions correspondent à des augmentations de l'amplitude de la tension de 1,1 pu à 1,8 pu. Les surtensions sont moins fréquentes que les creux de tension et sont généralement dues à des courts-circuits dans les systèmes à neutre isolé qui engendrent à la fois des creux de tension et des surtensions. En cas de court-circuit monophasé dans un tel système, les deux phases non concernées par le défaut peuvent prendre une valeur pouvant aller jusqu'à 1,73 pu, c'est à dire la tension composée. En cas de court-circuit biphasé, la phase non affectée par le défaut se caractérise par une surtension qui peut aller jusqu'à 1,5 pu[14].

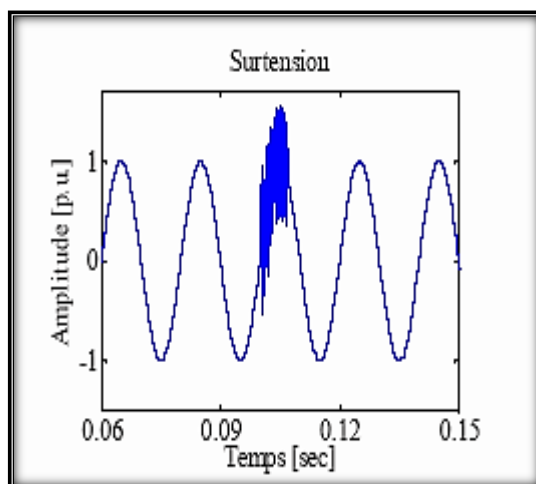


Figure (I-4) : Exemple de Surtension [14].

Des surtensions peuvent également être provoquées par des phénomènes d'origine atmosphérique (foudre), par des déclenchements de charges importantes, par des mauvais fonctionnements de régulateurs de tensions, par Ferro résonance ou par des manœuvres sur le réseau. Ce type de surtensions se caractérise généralement par une durée très brève et s'assimile le plus souvent à des transitoires.

I.4.4.1 Effets principaux de la surtension :

Les effets impliqués sont très divers selon le temps d'application, la répétitivité, l'amplitude, le mode (commun ou différentiel), la raideur du front de montée et la fréquence.

On cite par exemple [15] :

- ✓ Claquage diélectrique, cause de destruction de matériel sensible (composants électroniques...).
- ✓ Dégradation de matériel par vieillissement (surtensions non destructives mais répétées).
- ✓ Coupure longue entraînée par la destruction de matériel (perte de facturation pour les distributeurs, pertes de production pour les industriels).
- ✓ Perturbations des circuits de contrôle commande et de communication à courant faible.
- ✓ Contraintes électrodynamiques et thermiques (incendie) causées par :
 - ❖ La foudre essentiellement : les réseaux aériens sont les plus affectés par la foudre, mais les installations alimentées par des réseaux souterrains peuvent subir des contraintes de tension élevées en cas de foudroiement à proximité du site.

Les surtensions de manœuvre qui sont répétitives et dont la probabilité d'apparition est nettement supérieure à celle de la foudre et de durée plus longue. Elles peuvent conduire à des dégradations

aussi importantes que la foudre

I.4.5 Fluctuation rapide de tension :

Une fluctuation de tension est décrite comme une variation de l'enveloppe de la tension. L'amplitude de celle-ci doit se situer dans une bande de 10% de sa valeur nominale, les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude [16].

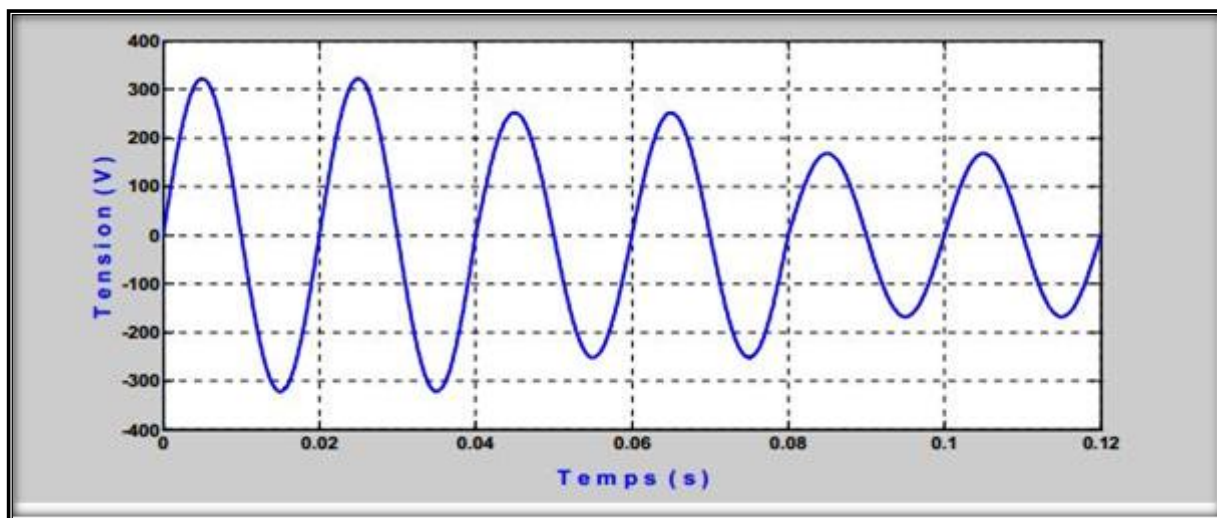


Figure (I-5) : Fluctuation de la tension [17].

I.4.6 Flicker :

Flicker est le phénomène de papillotement des sources lumineuses, dit aux fluctuations de tension de l'alimentation électrique. Il peut gêner les personnes dans les ateliers, les bureaux, les locaux d'habitation en amenant une fatigue visuelle et nerveuse. Il peut concerner, simultanément, un grand nombre de personnes (perturbation du réseau de distribution publique HTA et HTB). Aujourd'hui, les limites des fluctuations de tension périodiques qui provoquent l'effet du flicker sont connues. Les générateurs du flicker sont nombreux et peuvent être très puissants (fours à arc). Il est très important de les connaître, sachant que des variations de tension de moins de 1 % peuvent apporter une gêne. Leur identification est une nécessité car le flicker est souvent difficile de supprimer sur un réseau existant [16].

I.4.6.1 Conséquences de flicker :

Comme les fluctuations ont une amplitude qui n'excède pas $\pm 10\%$, la plupart des appareils ne sont pas perturbés. Le principal effet des fluctuations de tension est la fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker). La gêne physiologique (fatigue visuelle et nerveuse) dépend de l'amplitude des fluctuations, de la cadence de répétition des variations, de la composition spectrale et de la durée de la perturbation [18].

I.4.7 Variations de fréquence :

I.4.7.1 Définition et Origines :

La périodicité de la sinusoïde n'est plus constante. Les variations de fréquence sont très faibles ($< 1\%$) au sein des grands réseaux interconnectés et une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome. Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$; qui ne causent aucun préjudice aux équipements électriques ou électroniques.

Les variations de fréquence dues à un déséquilibre entre la production et la consommation, c'est notamment le cas lorsque la charge varie ou quand la production d'énergie électrique par un groupe électrogène dont la vitesse n'est pas constante [19].

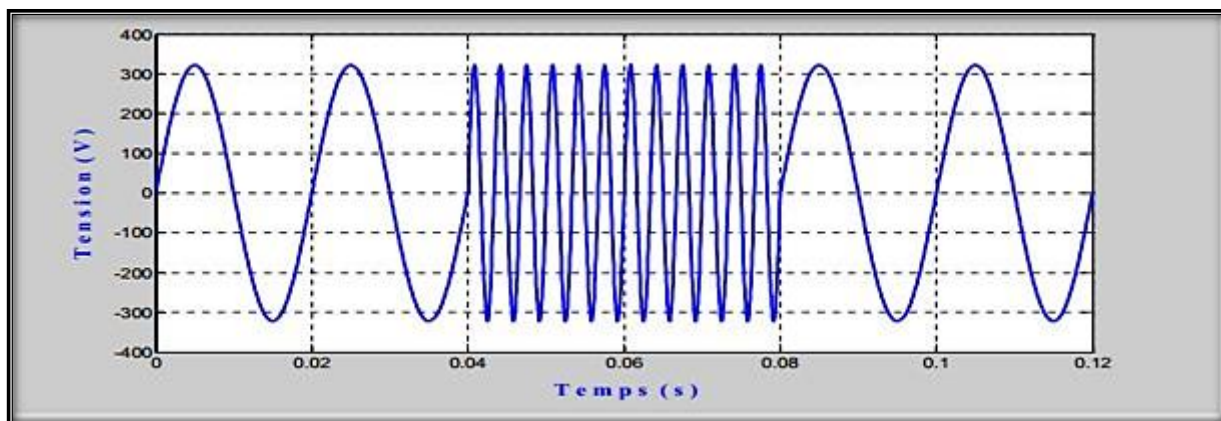


Figure (I-6) : Variation de fréquence [17].

I.4.8 Déséquilibre du Système Triphasé :

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension résultent généralement des charges monophasées et biphasées mal réparties, le système de distribution électrique peut être équilibré en changeant la configuration du système par des opérations manuelles et automatiques de commutation d'alimentation pour transférer des charges entre les circuits [20].

- ❖ Equilibrer les charges monophasées sur les trois phases.
- ❖ Diminuer l'impédance du réseau en amont des générateurs de déséquilibre en augmentant les puissances des transformateurs et la section des câbles.
- ❖ Prévoir une protection adaptée des machines.
- ❖ Augmentation de la puissance de court-circuit.
- ❖ Dispositif de rééquilibrage.

- ❖ Modification de l'architecture du réseau.
- ❖ Compensation de la puissance réactive.

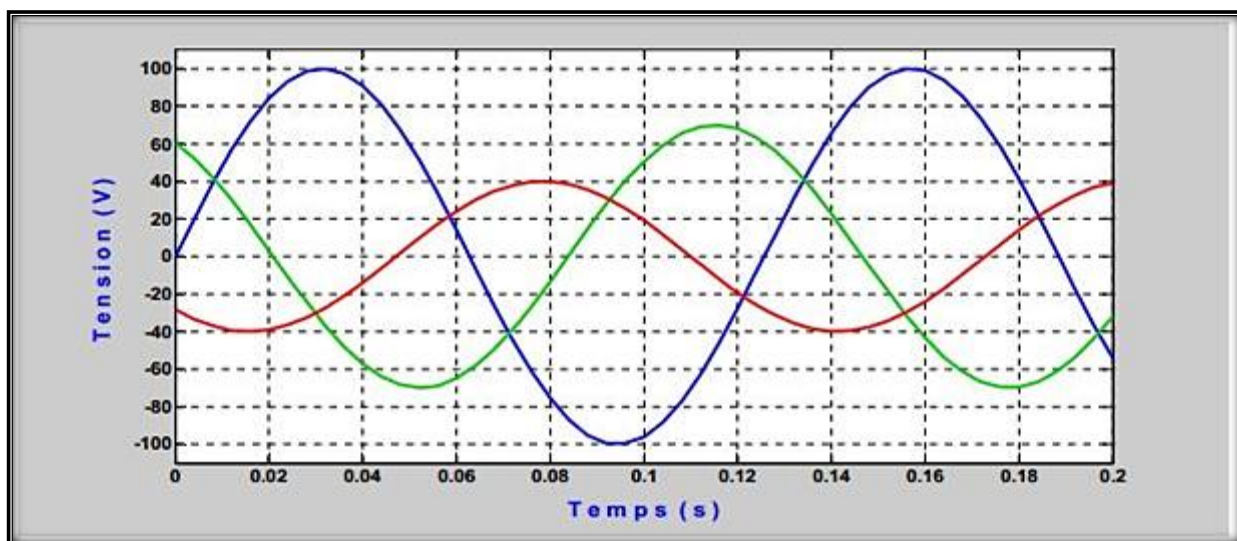


Figure (I-7) : Déséquilibres du système triphasé de tension [17].

I.4.8.1 Origines :

Un récepteur triphasé électrique qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. Ceci est fréquent pour les récepteurs monophasés à basse tension. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc[21].

I.4.8.2 Conséquences :

- ✓ Mauvais fonctionnement d'un appareil monophasé alimenté par une tension très faible (lampe à incandescence qui fournit un mauvais éclairage),
- ✓ Destruction d'un appareil monophasé alimenté par une tension trop élevée, il peut être détruit (claquage d'un filament de lampe par surtension).
- ✓ Concernant les dispositifs triphasés d'électronique de puissance, principalement les ponts redresseurs, le fonctionnement en présence de déséquilibre entraîne l'apparition de composantes harmoniques non caractéristiques, notamment des harmoniques de rang multiple de 3. L'apparition de ces courants harmoniques peut poser des problèmes, comme la génération d'une antirésonance lors du filtrage de l'harmonique de rang 5.

Outre les effets classiques des harmoniques, ces fréquences non caractéristiques peuvent conduire, dans certains cas, au blocage de la commande. La conséquence des composantes inverses sur les machines tournantes est la création d'un champ tournant en sens inverse du sens de rotation normal, D'où un couple de freinage parasite et des pertes supplémentaires

qui provoquent l'échauffement de la machine.

- ✓ Concernant l'effet du déséquilibre homopolaire, il faut signaler le risque d'échauffement du conducteur neutre dans un réseau BT qui, lorsque le conducteur est d'un diamètre trop faible, peut provoquer une rupture du conducteur ou un incendie.

I.5 Solutions de dépollution :

I.5.1 Solutions préventives :

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. Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques[22] :

- ❖ L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique,
- ❖ L'utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par des charges non linéaires.

I.5.2 Solutions correctives :

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti ou passe-haut[22]

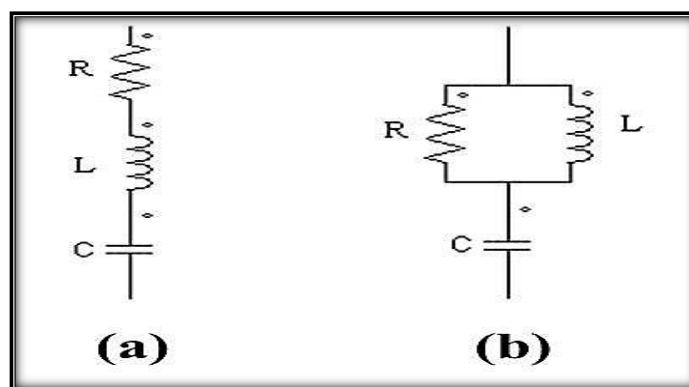


Figure (I-8) : a)Filtre passif résonnant, b)Filtre passif amorti [22].

Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive. Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients :

- ✓ Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge.

I.5.3 Solutions correctives et modernes :

Les solutions de dépollution traditionnelle ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger, d'autres solutions modernes ont été proposées. 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.

Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques. En effet, ces solutions peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur.

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 [22].

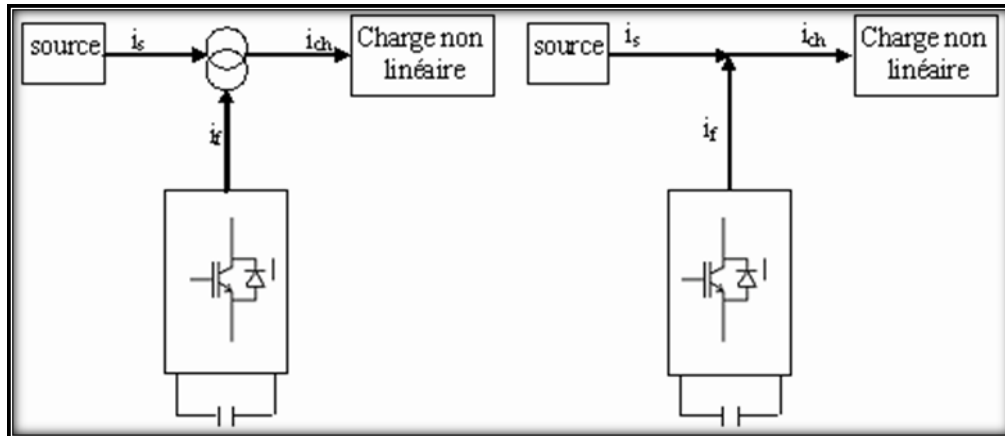
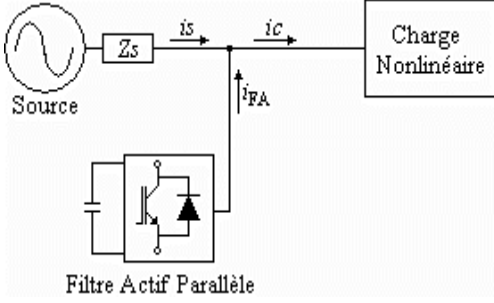
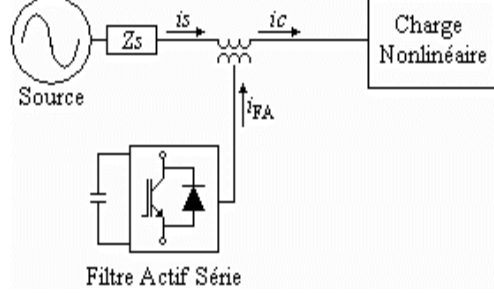


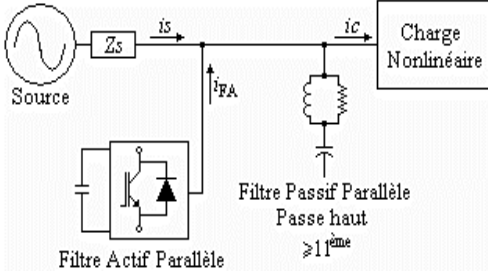
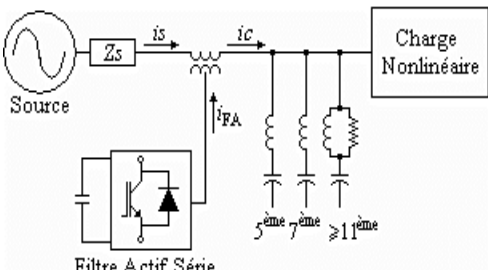
Figure (I-9) : a) filtre actif parallèle, b) filtre actif série [22].

I.5.3.1 Comparaison entre les différentes topologies de filtrage [23]:

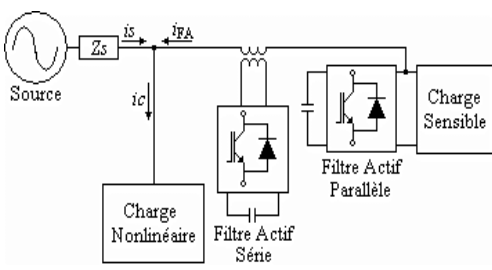
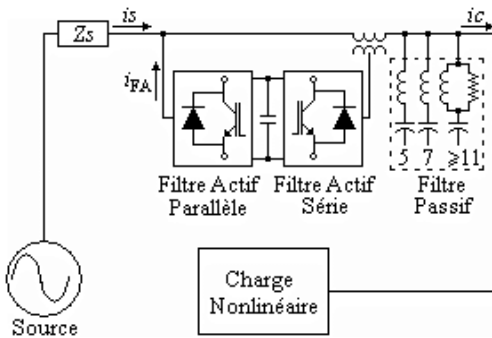
Le tableau (I-1) récapitule les avantages et les inconvénients des différentes configurations de filtrage actif

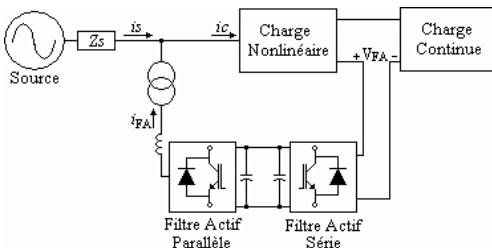
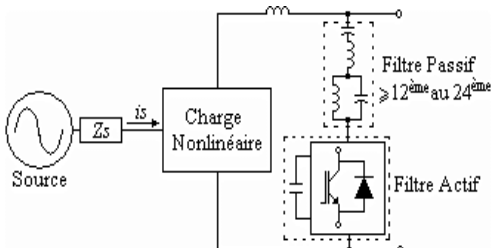
Tableau (I-1) : Avantages et inconvénients de chaque topologie de filtrage.

Type	Configuration	Avantages/Inconvénients
<p>A) Actif Parallèle</p> <p>Sasaki & Machida 1971 Gyugyi & Strycula 1976</p>	 <p>Filtre Actif Parallèle</p>	<p>❖ Avantages :</p> <p>Elimination des courants harmoniques, compensation de l'énergie réactive, correction du facteur de puissance, rééquilibrage des courants de la charge non-linéaire.</p> <p>❖ Inconvénients :</p> <p>Coût et pertes élevés, limité aux charges de faible et moyenne puissance, risque d'écoulement des courants de compensation dans les filtres passifs raccordés au même réseau.</p>
<p>B) Actif Série</p> <p>Gyugyi & Strycula 1976</p>	 <p>Filtre Actif Série</p>	<p>❖ Avantages :</p> <p>Isolation et absorption des tensions harmoniques, rééquilibrage et régulation des tensions alimentant la charge non-linéaire.</p> <p>❖ Inconvénients :</p> <p>Coût et pertes élevés, difficulté de protéger le filtre actif contre les surintensités, incapacité à contrôler l'énergie réactive.</p>

<p>c) Actif Parallèle & Passif Parallèle</p> <p><i>Takeda et al.</i> 1987</p>		<p>❖ Avantages :</p> <p>Dimensionnement réduit du filtre actif destiné seulement aux basses fréquences harmoniques, applicabilité aux fortes puissances, régulation de l'énergie réactive, suppression des creux de tension des fours à arc et des cyclo-convertisseurs.</p> <p>❖ Inconvénients :</p> <p>Les courants de compensation peuvent circuler dans les filtres passifs, les courants harmoniques peuvent transiter dans le filtre actif.</p>
<p>D) Actif Série & Passif Parallèle</p> <p><i>Peng et al.</i> 1988</p>		<p>❖ Avantages :</p> <p>Taux plus réduit du filtre actif destiné seulement à améliorer les caractéristiques de compensation du filtre passif, aucun risque de circulation d'harmoniques dans le filtre actif.</p> <p>❖ Inconvénients :</p> <p>Difficulté à protéger le filtre actif contre les surintensités, incapacité à contrôler l'énergie réactive.</p>

<p>E) Mise en série Actif & Passif</p> <p><i>Fujita & Akagi 1999</i> <i>Rastogi et al. 1995</i></p>		<p>❖ Avantages :</p> <p>Taux plus réduit du filtre actif destiné seulement à améliorer les caractéristiques de filtrage du filtre passif, aucun risque de circulation d'harmoniques dans le filtre actif, protection aisée du filtre actif contre les surintensités, pas de grande nécessité aux transformateurs de couplage.</p> <p>❖ Inconvénients :</p> <p>Incapacité à contrôler l'énergie réactive.</p>
<p>F) Actif Parallèle Dédié aux 5^{ème} et 7^{ème} harmoniques</p> <p><i>Cheng et al. 1996</i></p>		<p>❖ Avantages :</p> <p>Isolation source-charge aux fréquences dominantes (5^{ème} et 7^{ème}), obéissance à la norme standard IEEE 519, applicabilité aux charges de forte puissance, taux très réduits des filtres actifs (1% à 2%), moindre perte par commutation en comparant avec les onduleurs MLI, et équilibre des puissances des bus continus des deux onduleurs.</p>

<p>G) Combinaison Actif Parallèle & Actif Série</p> <p><i>Moran 1989</i></p>		<p>❖ Avantages :</p> <p>Isolation d'harmoniques entre la charge sensible placée en aval et la charge non-linéaire placée en amont, régulation de la tension continue commune aux deux filtres actifs, correction des distorsions de la tension d'entrée.</p> <p>❖ Inconvénients :</p> <p>Incapacité de rééquilibrage des courants de charge et de compensation du courant du neutre.</p>
<p>H) Hybride : Actif Parallèle, Actif Série & Passif Parallèle</p> <p><i>Fujita & Akagi 1998</i></p>		<p>❖ Avantages :</p> <p>Elimination d'harmoniques et des courants de séquence négative, régulation de la tension continue commune aux deux filtres actifs, correction des distorsions et des déséquilibres de la tension d'entrée, compensation des creux de tension.</p> <p>❖ Inconvénients :</p> <p>Fluctuations à basses fréquences de la puissance active s'écoulant à partir ou vers le filtre série lors de l'absorption des creux de tension.</p>

<p>I) AC Actif Parallèle & DC Actif Série</p> <p><i>Barbosa et al.</i> 1998</p>		<p>❖ Avantages :</p> <p>Elimination des courants harmoniques du côté alternatif AC et des ondulations de la tension redressée du côté continu DC.</p>
<p>J) DC Actif parallèle Pour HVDC</p> <p><i>Zhang et al.</i> 1993</p>		<p>❖ Avantages :</p> <p>Elimination des courants et tensions harmoniques engendrés par les systèmes HVDC (haute tension continue) et de traction.</p>

I.6 Conclusion :

Effectivement, les problèmes liés à la qualité de l'onde électrique sont divers et touchent tous les aspects du réseau électrique, depuis les lignes de transmission à haute tension jusqu'aux appareils domestiques. Ces problèmes peuvent être causés par des phénomènes naturels ou des interférences provenant de récepteurs polluants.

La question de la qualité de l'onde est devenue un domaine distinct et crucial, nécessitant des solutions dynamiques variées. Les progrès rapides dans la technologie des interrupteurs à semi-conducteurs ont rendu ces solutions de plus en plus réalisables.

Les équipements de mitigation, tels que les filtres actifs, commencent à être déployés sur les lignes de transport et de distribution des réseaux électriques, ainsi que près des charges polluantes à l'intérieur des usines. Cependant, la commande et les topologies de ces équipements restent des sujets d'étude passionnants visant à optimiser leur exploitation.

Le deuxième chapitre abordera différents aspects relatifs aux dispositifs de filtrage fonctionnel. Il examinera les éléments constitutifs d'un filtre actif du point de vue des principes d'application et des options offertes aux concepteurs. Il s'agit là d'une étape cruciale dans la compréhension et la mise en œuvre de solutions pour améliorer la qualité de l'onde électrique et assurer le bon fonctionnement des réseaux électriques et des équipements connectés.

CHAPITRE II

Structure et commande d'un filtre
actif parallèle FAP

II.1 Introduction :

Les filtres actifs de puissance (FAP), également connus sous le nom de compensateurs shunts, utilisés pour compenser les perturbations harmoniques dans les réseaux électriques.

Les FAP sont des dispositifs électroniques composés de convertisseurs à base d'interrupteurs de puissance, tels que des onduleurs, associés à un système de contrôle et de commande. Ils sont utilisés pour compenser directement les perturbations harmoniques dans le réseau électrique en injectant des courants ou des tensions en opposition de phase par rapport aux perturbations mesurées. Ces FAP sont connectés en parallèle avec le réseau électrique et sont dimensionnés pour compenser la puissance due aux harmoniques absorbées par les charges polluantes. Ils fonctionnent de manière autonome par rapport à la source d'alimentation et aux charges, ce qui leur confère des propriétés avantageuses telles que l'auto-adaptabilité, la fiabilité et l'efficacité pour identifier et filtrer les harmoniques. Différentes techniques peuvent être utilisées, mais l'une des plus efficaces consiste à le faire dans l'espace des puissances instantanées. Cette approche présente de nombreux avantages, ce qui explique pourquoi elle est adoptée dans de nombreux travaux de recherche et d'applications pratiques [6]

Ce chapitre comporte trois parties, la première partie décrit la structure générale du filtre actif parallèle, laquelle a été divisée en deux : la partie puissance et la partie commande. La deuxième partie est consacrée à l'étude de l'ensemble de régulation du bus de filtre actif parallèle. La troisième partie de ce chapitre est basé sur les méthodes de régulation en vue d'étudier la faisabilité de la commande du filtre actif parallèle.

II.2 Filtre actif parallèle :

Les filtres actifs parallèles sont les plus utilisés et les plus sujets de recherches depuis plus de 30 ans. Le principe consiste à mettre en œuvre une source de courant qui permettra d'injecter un courant de compensation en opposition de phase avec les courants harmoniques créés par la charge. Cela a pour effet de rendre le courant sinusoïdal au point de connexion et de limiter ainsi, la propagation des courants harmoniques en amont. Il faut attendre les années 80 pour que ces applications se développent, profitant des améliorations des interrupteurs de puissance. Les premières applications industrielles arrivent pour donner lieu à une véritable commercialisation dans les pays industrialisés (plus de 500 filtres installés au Japon en 1996). Ces premiers prototypes ne compensaient que les harmoniques alors qu'aujourd'hui ils présentent aussi d'autres fonctionnalités : compensation d'énergie réactive, équilibrage des courants et réduction du flicker. De plus en plus d'applications sont

concernés par les filtres actifs parallèles allant des applications réseaux industries lourdes. Plusieurs fabricants (ABB, MGE UPS, AIM Europe, Mesta électroniques) proposent des gammes de compensateurs ayant une puissance variant entre 10 et 2000 kVA [24].

II.2.1 Principe de fonctionnement du filtre actif :

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

Le filtre actif peut être connecté au réseau en série ou en parallèle, suivant qu'il est conçu pour compenser les tensions ou les courants harmoniques [25].

II.3 Principe de commande du filtre actif :

Le rôle de la commande est la génération de courants harmoniques produits par le filtre actif afin qu'ils suivent en temps réel leurs références harmoniques. Dans un premier temps, il faut donc déterminer ces courants harmoniques de référence. L'objectif est de compenser l'ensemble des harmoniques de courant générés par la charge non linéaire. Le système global à étudier, constitué du réseau d'alimentation, de la Charge polluante et du filtre actif parallèle [26].

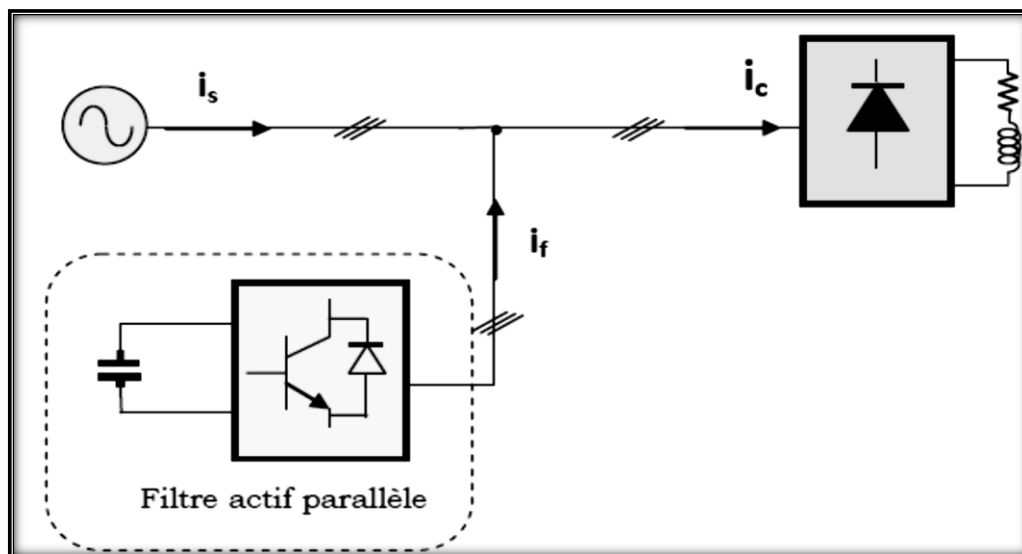


Figure (II-1) : Principe d'un Filtre actif parallèle [2].

II.4 Structure d'un filtre actif parallèle FAP :

L'onduleur est la partie essentielle du filtre actif. Dépendamment du type de filtre de couplage IE reliant au réseau ainsi que de l'élément passif qui lui sert de source d'énergie, il s'agira d'un onduleur de tension ou de courant. L'onduleur peut être commande en tension ou en courant et peut donner se comporter comme une source de tension ou de courant vis-à-vis du circuit extérieur. En pratique, suivant le type de correction à apporter au réseau, une structure sera préférée à l'autre si elle rend plus aisée et moins onéreuse la réalisation de l'ensemble convertisseur commande.

La source d'énergie composant le filtre peut être une source de tension ou de courant. Comme l'onduleur n'a pas fourni de puissance active, cette source peut être un élément réactif, condensateur ou inductance, dans lequel on maintient constante la valeur moyenne de l'énergie stockée. Cet élément de stockage d'énergie n'a pas besoin d'être lui-même alimenté par une source continue. La raison est que le filtre actif peut être contrôlé de manière à suppléer aux pertes de sa source d'énergie à partir du courant fondamental génère par la source du réseau auquel il est connecté [4].

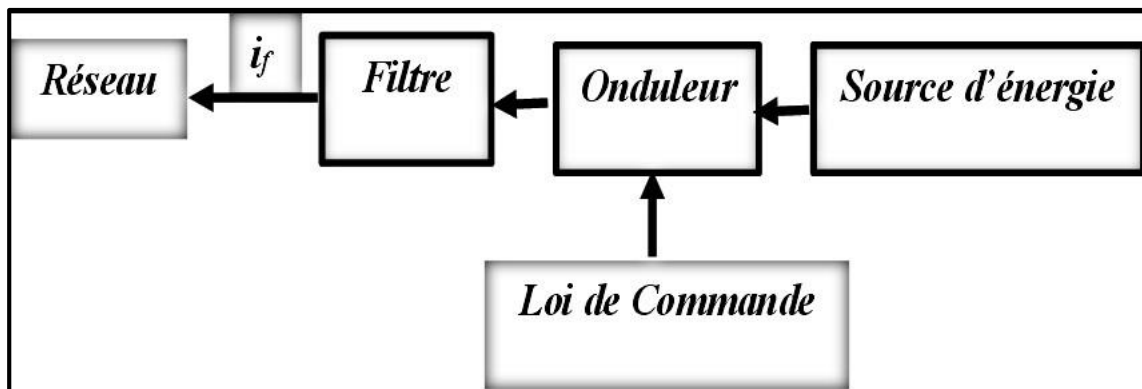


Figure (II-2) : Structure d'un filtre actif parallèle[4].

II.4.1 Partie de puissance d'un FAP :

La partie de puissance d'un filtre actif parallèle est constituée par un :

- ✓ Onduleur à base d'interrupteurs de puissance, commandés à l'ouverture et à la fermeture (GTO, IGBT, MOSFET, etc....) avec des diodes en antiparallèle.
- ✓ Circuit de stockage d'énergie.
- ✓ Filtre de sortie.

II.4.2 Partie de commande d'un FAP :

La partie de puissance d'un filtre actif parallèle est constituée par la :

- ✓ Méthode d'identification des courants perturbés.
- ✓ Régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
- ✓ Régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.
- ✓ Commande de l'onduleur de tension.

II.4.3 Filtre actif parallèle (FAP) à structure de tension :

La figure (II-3) illustre le filtre actif parallèle à structure de tension. La capacité et l'inductance de couplage caractérisent cette structure. L'élément servant de source d'énergie est la capacité C qui doit délivrer une tension quasi constante. La fluctuation de cette tension doit être faible, elle ne doit pas dépasser la limite de tension supportable par les semi-conducteurs. De plus, pour une inductance L_f donnée, cette tension ne doit pas être inférieure à une certaine limite, car cela affectera les performances de compensation du filtre actif. L'inductance par laquelle l'onduleur est relié au réseau sert à filtrer les courants harmoniques hautes fréquences. Ces derniers sont causés par les impulsions de tension générées par l'onduleur [27].

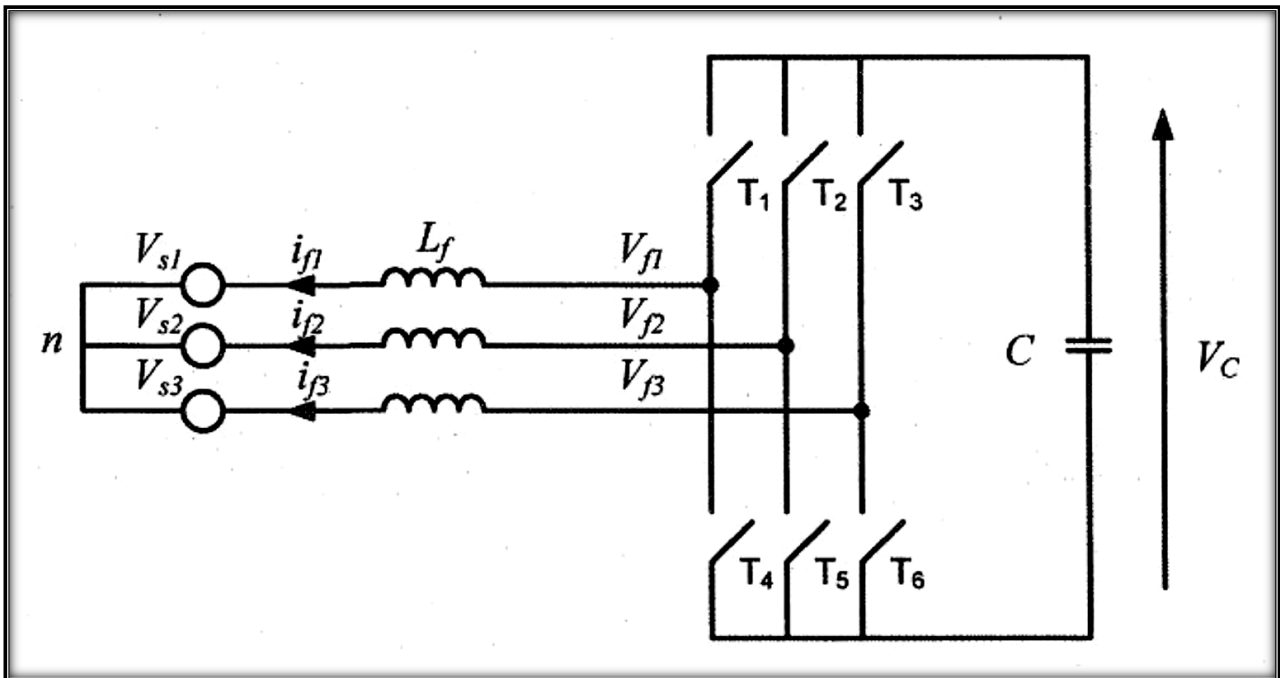


Figure (II-3) : Filtre actif parallèle à structure de tension [27].

Pour la structure de tension, les interrupteurs sont unidirectionnels en tension et doivent être réversibles en courant. Pour y parvenir, les éléments semi-conducteurs composant l'onduleur doivent être associés en antiparallèle avec des diodes. Ces semi-conducteurs sont commandés à la fermeture et à l'ouverture.

II.4.4 Filtre actif à structure courant :

Sur la figure (II-4) est illustré le filtre actif à structure courant (connecté en parallèle sur le réseau). Le filtre deuxième ordre entre l'onduleur et le réseau avec l'inductance caractérisent cette structure. L'inductance L_{df} sert à stocker l'énergie et joue le rôle d'une source du courant continu, le courant circulant de l'inductance est maintenu à une valeur positive quasi-constante. Les interrupteurs sont unidirectionnels, ils sont formés par des semi-conducteurs commandés à la fermeture et à l'ouverture. Comme les transistors et les thyristors GTO. Les transistors et les GTO ne peuvent pas tenir une tension inverse, ils nécessitent donc une diode en série [28].

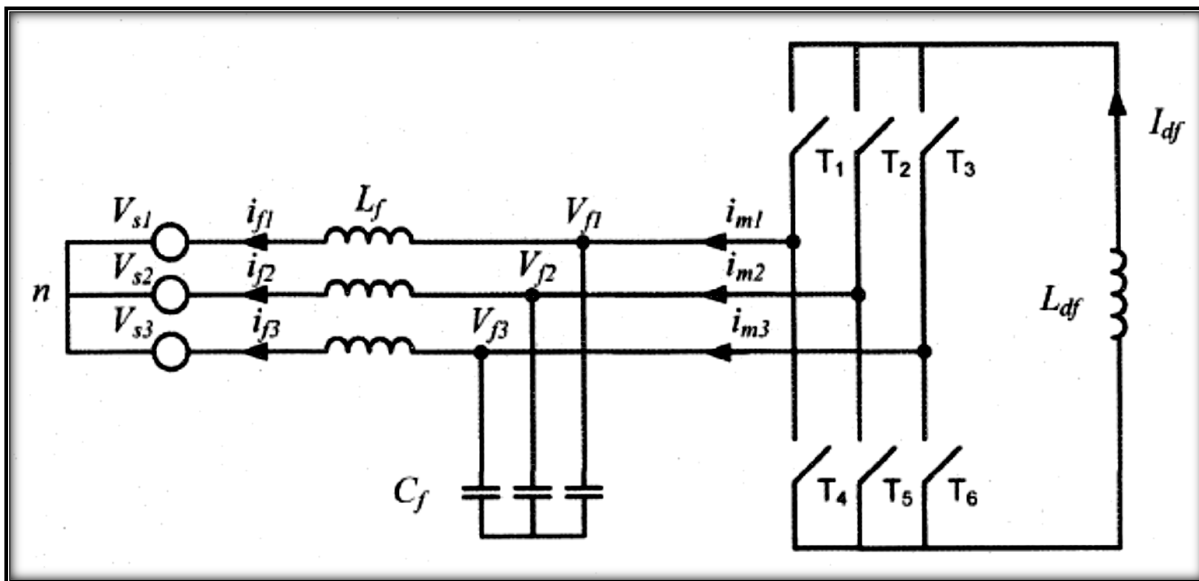


Figure (II-4) : Filtre actif parallèle à structure de courant [28].

II.4.5 Comparaison des deux structures :

II.4.5.1 Composants semi-conducteurs :

Les semi-conducteurs sont caractérisés par leur aptitude à supporter une tension ou un courant maximal. Pour les onduleurs de tensions, la tension maximale supportée par les interrupteurs est limitée par la valeur maximale de la tension continue, le courant maximal dépend des courants harmoniques à compenser. D'une manière duale, pour l'onduleur du courant, le courant maximal est limité par la valeur maximale du courant continu, tandis que la tension maximale aux bornes des interrupteurs dépend des tensions entre phases.

II.4.5.2 Commande et protection :

Pour les filtres à structure de tension l'onduleur de tension alimente une inductance en série avec une source de tension quasi-sinusoïdale. La variation des courants générés est contrôlée directement par les tensions de l'onduleur, la correction des erreurs établies d'une façon rapide, donc les régulations sont simples pour cette structure.

Pour les filtres aux structures courant, la commande de l'onduleur de courant doit tenir compte de l'effet d'amplification des harmoniques ayant des fréquences proches de la fréquence de résonance du filtre **LC**. Pour cela il est obligé de programmer à une fréquence beaucoup plus élevée que la fréquence de résonance, de ce fait, la commande de cette structure se trouve plus délicate à réaliser.

Pour l'onduleur de tension, il convient d'insérer un temps mort lors du passage du courant entre les deux interrupteurs d'un même bras. Pour l'onduleur de courant, lors du passage du courant d'une phase à l'autre, il ne nécessite pas à priori une protection contre l'ouverture simultanée des interrupteurs d'un demi-point.

Pour le côté de protection, les interrupteurs constituant l'onduleur de tension doivent être protégés contre les surintensités, pour les interrupteurs de l'onduleur de courant doivent être protégés contre les surtensions, la protection contre les surtensions est plus complexe.

II.4.5.3 Atténuations des harmoniques :

Pour les filtres actifs à structure de tension, les tensions générées par l'onduleur sous forme d'impulsions engendrent des ondulations de courant, ces ondulations sont difficiles à atténuer par l'augmentation de l'inductance de filtrage **L_f**. Il convient, si nécessaire, d'ajouter un filtre passe-haut à la sortie du filtre actif pour absorber les harmoniques dus aux découpages. Pour des filtres actifs fonctionnant à une fréquence assez élevée, les ondulations de courant sont relativement faibles et peuvent être directement filtrées par le réseau.

Pour les filtres à structure courant, une forte atténuation des harmoniques dus aux découpages peut être obtenue en choisissant une fréquence de coupure du filtre **L_c** suffisamment faible par rapport à celle de l'onduleur. Néanmoins, un compromis entre la bande passante du filtre actif et l'atténuation des harmoniques doit être recherché.

Pour cette raison avec la simplicité de commande et de protection pour les onduleurs de tensions, nous avons retenu cette structure [28].

II.5 Système de régulation du filtre actif parallèle :

La régulation dans le domaine des procédés industriels est définie comme étant la mise en œuvre de l'ensemble des moyens théoriques, matériels et techniques pour maintenir chaque grandeur physique essentielle égale à une valeur désirée. Cette valeur désirée est appelée consigne.

Par action sur une grandeur réglant et ce malgré l'influence des grandeurs perturbatrices du système, les grandeurs physiques essentielles sont maintenues égale à celle désirée.

Dans le cas du filtre actif parallèle, la régulation des courants de référence et de tension continue

aux bornes du condensateur est primordiale pour son bon fonctionnement. Ainsi pour pouvoir contrôler et réguler le FAP, nous avons besoin d'un régulateur.

Les principaux régulateurs connus sont [29]:

- ❖ Régulateurs PID (Proportionnel, intégral, dérivé)
- ❖ Régulateurs PD (Proportionnel, dérivé)
- ❖ Régulateurs PI (Proportionnel, intégral)
- ❖ Régulateurs P (Proportionnel)
- ❖ Régulateur par retour d'état avec intégrateur
- ❖ Régulateur quasi linéaire
- ❖ Régulateur flou.

II.6 Filtre actif parallèle avec un onduleur de tension à trois bras :

Un onduleur de tension à trois bras est représenté par la figure (II-5). Ceci est employé dans un filtre actif parallèle à structure tension, il est relié au réseau électrique à trois fils. Chaque bras de l'onduleur comporte donc deux interrupteurs bidirectionnels en courant, commandés à l'amorçage et au blocage. Le stockage de l'énergie se fait à travers une source de tension continue, il s'agit d'un condensateur C_{dc} délivrant à ses bornes une tension V_{dc} régulée avec une valeur positive bien déterminée.

II.6.1 Modélisation de l'onduleur de tension :

En théorie les deux semi-conducteurs d'un même bras doivent être commandés de façon complémentaire. En effet, si l'un conduit alors l'autre doit être bloqué. Basant sur cette hypothèse, l'ouverture et la fermeture des interrupteurs dépendent de l'état de trois signaux de commande (T_1 , T_2 et T_3)[30].

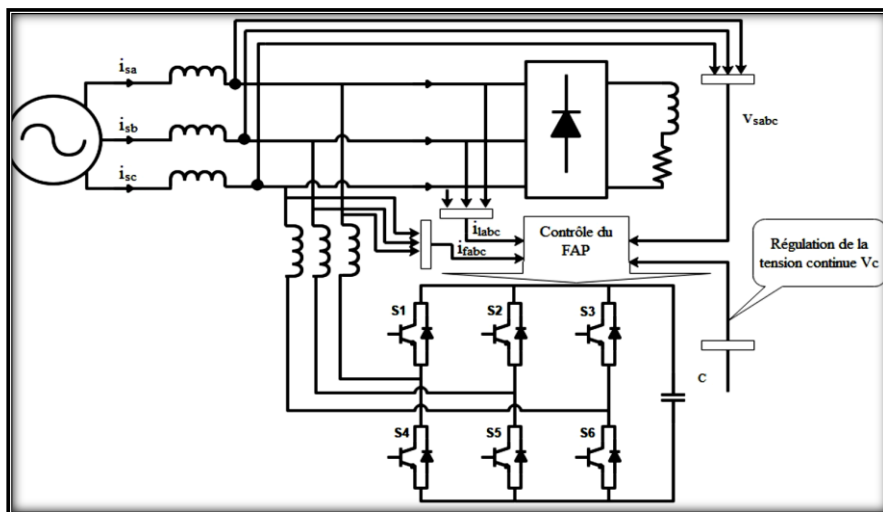


Figure (II-5) : Filtre Actif Parallèle à trois bras [30].

II.6.2 Système de stockage d'énergie :

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un élément de stockage capacitif représenté par un condensateur C_{dc} qui joue le rôle d'une source de tension continue V_C . Le choix des paramètres du système de stockage ($V_{c-réf}$ et C_{dc}) a une influence directe sur la dynamique du FAP et sur ses performances de compensation. D'une part, une tension $V_{c-réf}$ élevée améliore la dynamique du FAP. D'autre part, les ondulations de la tension continue V_C , causées par les courants engendrés par le FAP et limitées par le choix de la valeur de C_{dc} , peuvent dégrader la qualité de compensation du FAP. Une valeur élevée de C_{dc} réduit les ondulations de V_C mais augmente le coût et la taille du FAP. 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[31] :-La première méthode se base sur le calcul de l'énergie fournie par le filtre actif pendant une demi-période de la pulsation de puissance liée aux deux premiers harmoniques (5 et 7 pour un pont redresseur de Great). En choisissant un taux d'ondulation acceptable (ϵ), généralement de l'ordre de 5% de V_C , nous pouvons calculer la capacité C_{dc} à partir de la relation suivante :

$$C_{dc} = \frac{V_s \sqrt{I_5^2 + I_7^2 - 2I_5 I_7 \cos(5\alpha - 7\alpha)}}{2\omega \epsilon V_C^2} \quad (\text{II-1})$$

Avec

V_s : Tension simple du réseau,

I_h : Courant harmonique du rang h ,

α : l'angle d'allumage des thyristors du pont Great.

-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 :

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\epsilon V_C \omega_h} \quad (\text{II-2})$$

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

II.6.3 Filtre de sortie :

Le filtre de sortie d'un filtre actif série est généralement un filtre passif du deuxième ordre (L_f , C_f , R_f), comme le montre la (Figure II-6).

L'ensemble onduleur et filtre de sortie se comportant comme une source de tension, le filtre de sortie sert d'une part à atténuer les composantes dues aux commutations de l'onduleur, d'autre part à connecter le filtre actif au réseau électrique à travers les transformateurs d'injection[9].

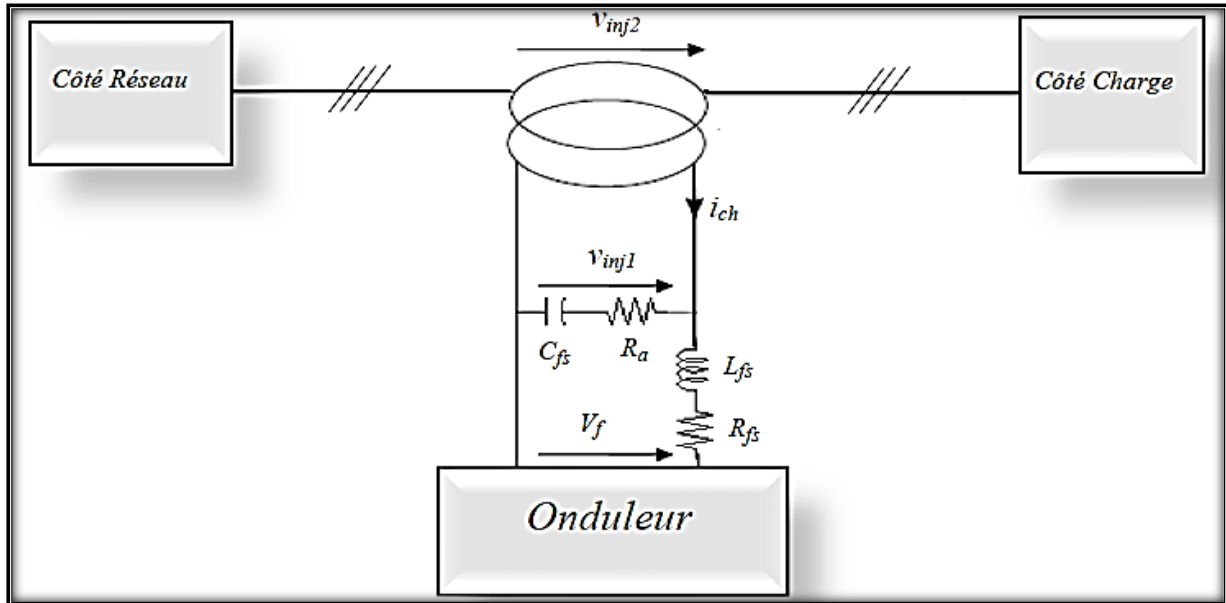


Figure (II-6) : Schéma de modélisation du filtre de sortie [9].

II.7 Commande de l'onduleur :

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des courants de référence, à travers les ordres de commande appliqués aux interrupteurs de puissance. Ils existent plusieurs méthodes de commande, les deux principales familles de commande sont [21]:

- ❖ Commande par hystérésis.
- ❖ Commande par modulation de largeur d'impulsions.

II.7.1 Commande par hystérésis :

La commande conventionnelle par hystérésis est très couramment utilisée de par sa simplicité d'utilisation et sa robustesse. En fait, cette stratégie assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres. La figure (II-7) expose son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence i_{f-ref} et le courant produit par l'onduleur i_f . Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs. Cette commande présente cependant un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation des semi-conducteurs, d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générés [13].

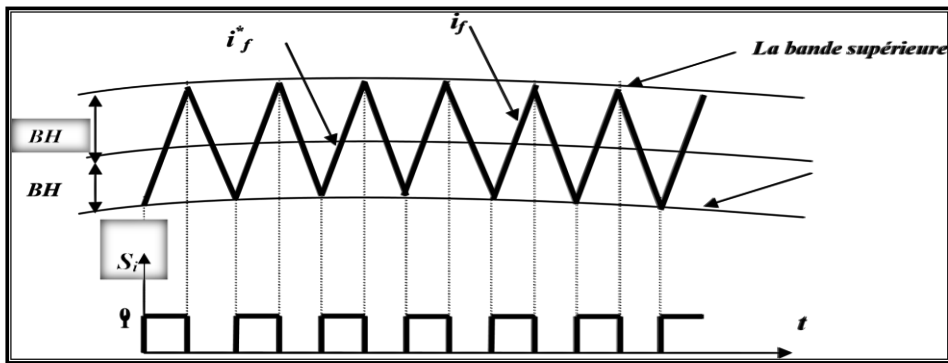


Figure (II-7) : Schéma de commande par hystérésis [13].

II.7.2 Contrôle par MLI :

Le principe du contrôle par MLI dans ce cas, la différence entre le courant référence i_f^* et le courant réel i_f est appliquée à l'entrée d'un régulateur. Le signal de sortie du régulateur, appelé modulatrice, est ensuite comparé à un signal triangulaire de fréquence fixe (porteuse) afin de déterminer les ordres de commutations des interrupteurs. La fréquence de la porteuse triangulaire fixe donc la fréquence de découpage des semi-Conducteurs de puissance.

Le contrôle par MLI est d'une complexité réduite ; il garantit un fonctionnement à fréquence fixe et conduit à un contenu harmonique parfaitement identifié. Cependant, cette technique a des propriétés dynamiques qui peuvent être limitatives et la réponse du système lors d'un changement brutal des courants de référence est plus lente que celle d'une commande par hystérésis [26].

II.7.2.1 Commande par MLI sinusoïdale :

La technique de commande par Modulation de Largeur d'impulsion (MLI) résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur. 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 à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette tension est ensuite comparée avec un signal en dent de scie (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs [13].

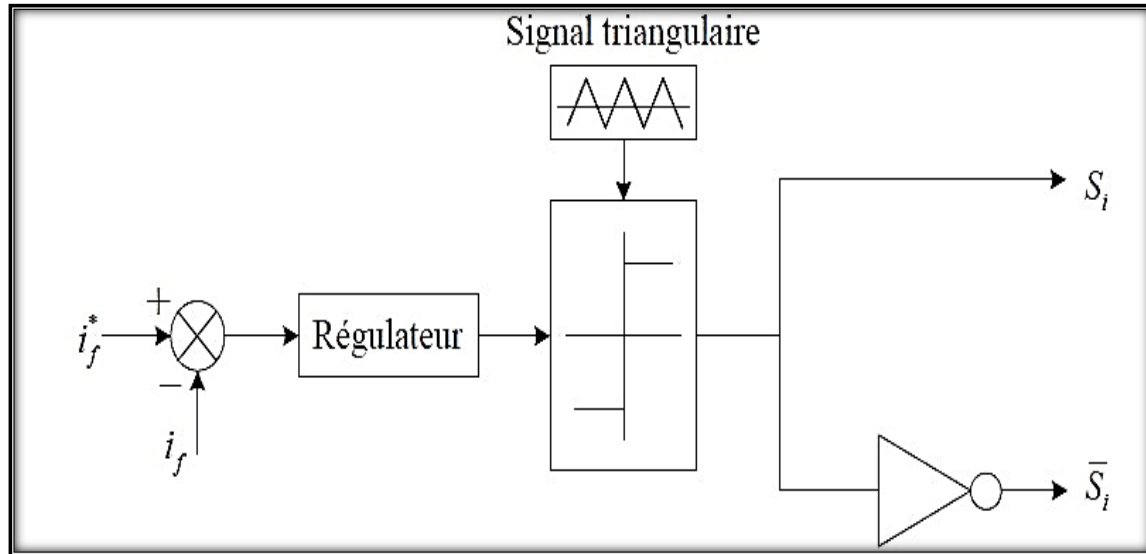


Figure (II-8) : Principe de commande du courant par MLI [13].

Plus récemment, nous avons vu apparaître une technique de commande, dite commande à modulation vectorielle. Cette dernière diffère des techniques présentées précédemment par le fait qu'elle ne s'appuie pas sur des modulations appliquées à chacun des interrupteurs.

II.7.2.2 Commande par MLI vectorielle :

La méthode MLI vectorielle est largement utilisée dans la commande des onduleurs, elle peut augmenter la valeur maximale de la tension de sortie de l'onduleur avec un taux de distorsion harmonique réduit par rapport à ceux obtenus par la méthode MLI sinusoïdale. Il y a plusieurs algorithmes utilisant la MLI vectorielle pour commander l'onduleur ou le redresseur. Le but de toutes les stratégies de modulation est de réduire les pertes de commutation et les harmoniques, et d'assurer une commande précise[13].

II.8 Détermination des paramètres du régulateur PI :

La relation (II-3) donne l'expression générale du régulateur PI utilisé dans notre étude [11] :

$$K(S) = K_p + \frac{K_I}{S} \quad (\text{II-3})$$

Avec :

K_p : Gain proportionnel du régulateur

K_I : Gain intégral du régulateur

La figure (II-9) présente le schéma de la régulation de V_c . Le bloc $G(s)$ est défini par :

$$G(S) = \frac{1}{CS} \quad (\text{II-4})$$

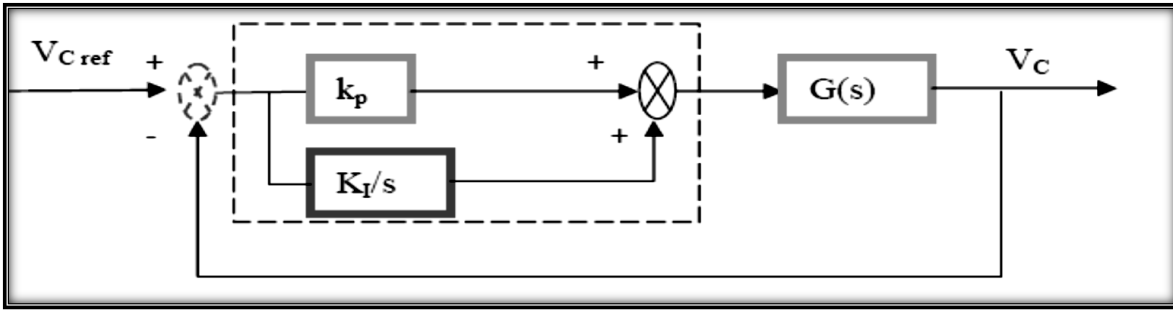


Figure (II-9) : Schéma de la régulation de V_c par un régulateur PI [11].

La fonction de transfert en boucle fermée est alors donnée par :

$$F(S) = \frac{(1 + \frac{K_P S}{K_I}) \frac{K_I}{C}}{S^2 + \frac{K_P}{C} S + \frac{K_I}{C}} \quad (\text{II-5})$$

L'expression générale d'une fonction de transfert du second ordre est :

$$F(S) = \frac{(1 + \frac{K_P}{K_I} S) \omega_c^2}{S^2 + 2\varepsilon_c \omega_c S + \omega_c^2} \quad (\text{II-6})$$

Après identification avec l'équation (II-5), on obtient :

$$K_I = \omega_c^2 C \quad \text{et} \quad K_P = 2 \varepsilon_c \sqrt{K_I C}$$

II.9 Dimensionnement du filtre actif :

Les trois principaux paramètres qu'il faut estimer, dans la conception du circuit de puissance, afin d'assurer une commande adéquate et une bonne qualité de filtrage, sont [6]:

- ✓ La sélection de la valeur de la tension de référence de la capacité (V_{dcref}).
- ✓ La sélection de la valeur de la capacité de stockage (C_{dc}).
- ✓ Le choix du type de filtre en sortie de l'onduleur de tension, ainsi que le dimensionnement de ses paramètres.

Notons que l'estimation de ces paramètres est basée sur les hypothèses suivantes :

- a) La source de tension du réseau au point de connexion est supposée sinusoïdale.
- b) Pour la conception du filtre de sortie ou de couplage, un facteur d'atténuation d'oscillations du courant du filtre de 5% est accepté.
- c) L'onduleur commandé en MLI travaille dans la zone de modulation linéaire $0 \leq m \leq 1$.
- d) La fréquence de commutation f_c est sélectionnée en fonction du plus grand rang d'harmoniques à compenser.

Théoriquement, il faut choisir une fréquence f_c supérieure au double de la fréquence de l'harmonique le plus haut à compenser (f_{hmax}).

Par contre, plus la fréquence de commutation est élevée, plus les pertes dans les semi-conducteurs sont importantes. Pour satisfaire ces deux contraintes, il est nécessaire de trouver un compromis.

II.9.1 Description du fonctionnement de la capacité :

Pour les grandes puissances du FAP, on utilise une bobine soumise à des conditions de refroidissement plus complexes tel que l'utilisation des supraconducteurs[6].

En régime permanent, la puissance réelle générée par la source est égale à celle imposée par la charge ajoutée à une petite quantité de puissance pour compenser les pertes dans le filtre actif. Donc, la tension du bus continu peut être maintenue constante à sa référence.

Lorsque les conditions de fonctionnement de la charge non-linéaire évoluent, l'équilibre en puissance réelle entre celle-ci et la source sera perturbé. La différence en puissance engendrée doit être compensée par celle du condensateur. En conséquence, la valeur de la tension à ses bornes change en s'éloignant de sa référence. Pour un bon fonctionnement du filtre actif, l'amplitude de la valeur du courant de référence doit être ajustée pour adapter proportionnellement la puissance réelle demandée par la source. Cette puissance réelle, avec un flux positif ou négatif au niveau du condensateur, compense celle consommée par la charge. Si la tension aux bornes du condensateur est rétablie et atteint sa référence, la puissance réelle produite par la source est supposée égale à celle consommée par la charge de nouveau. Alors, de cette manière, l'amplitude du courant de référence peut être effective en régulant la valeur moyenne de la tension du bus continu. Si cette tension V_{dc} est inférieure à la tension de référence V_{dcref} , cela se traduit par un manque de puissance réelle produite par la source, donc le courant réseau doit être augmenté. Au contraire, une valeur de tension V_{dc} supérieure à la référence V_{dcref} conduit à une diminution du courant de référence de l'alimentation.

II.9.2 Estimation de la tension de référence du bus continu (V_{dcref})

Pour assurer la commandabilité du courant du filtre actif, la tension du bus continu (V_{dcref}) doit être supérieure à la valeur maximale (valeur crête) de la tension composée côté alternatif de l'onduleur[6].

Le choix de la référence de la tension du bus continu est en fonction de la puissance de la charge et du rang maximal de l'harmonique compense. En effet, la tension à la sortie de l'onduleur s'écrit :

$$v_f(t) = v_s(t) + L_i \frac{di_f(t)}{dt} \quad (\text{II-7})$$

Avec :

$$i_f(t) = \sqrt{3} \cdot \sum i_{ch} \quad (\text{II-8})$$

Tel que le terme $\sum i_{ch}$ représente le courant fourni par l'onduleur et correspond à la composante harmonique du courant de la charge constituée d'un pont à diode triphasé.

Donc, $i_f(t)$ peut être développé par :

$$i_f(t) = \frac{6}{\pi} \cdot I_d \left(-\frac{1}{5} \sin(5\omega t) - \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \frac{1}{11} \sin(11\omega t) + \dots \right) \quad (\text{II-9})$$

$$\Rightarrow \frac{di_f(t)}{dt} = \frac{6}{\pi} \cdot \omega \cdot I_d \left(-\cos(5\omega t) - \cos(7\omega t) + \cos(11\omega t) + \dots \right) \quad (\text{II-10})$$

Grâce aux expressions (II-21) et (II-23) il est possible de déduire :

$$v_f(t) = v_m \sin(\omega t) + \frac{6}{\pi} \cdot L_f \cdot \omega \cdot I_d \left(-\cos(5\omega t) - \cos(7\omega t) + \cos(11\omega t) + \dots \right) \quad (\text{II-11})$$

La puissance apparente de la charge est proportionnelle au courant continu de la charge I_d :

$$S = 3 \cdot V_S \cdot I_d \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (\text{II-12})$$

Sachant que l'équation de la tension du bus continu est la suivante :

$$V_{dcref} = \frac{V_{fmax}}{r} \quad (\text{II-13})$$

Avec : $0 \leq r \leq 1$ coefficient de réglage d'amplitude en tension.

Où :

V_{fmax} : Valeur maximale de la tension de phase V_f à la sortie de l'onduleur.

En se basant sur ce développement, une méthode de calcul peut être déduite :

- ❖ Calcul de I_d en fonction de la puissance apparente (S) de la charge.
- ❖ Ecriture de $v_f(t)$, incluant les termes correspondant aux harmoniques à compenser, Puis détermination de la valeur maximale de la tension V_{fmax} .
- ❖ Calcul de V_{dcref} à partir de l'expression (II-27).

Il est à remarquer qu'il est possible de conclure que le calcul de la tension V_{dcref} par Cette méthode est dépendant de la connaissance de l'inductance L_f , de la puissance apparente (S) de la charge et exige une simulation afin de déterminer la tension maximale V_{fmax} .

Cependant, la valeur de la tension V_{dcref} est bornée par un choix du rang d'harmonique à éliminer, ce qui conduit à une minimisation des pertes de commutation des interrupteurs.

II.9.3 Estimation de la valeur de la capacité du condensateur de stockage (C_{dc}) :

La détermination de la valeur de la capacité du condensateur de stockage d'énergie électrique (C_{dc}) peut être estimée en se basant sur le principe de l'échange instantané de l'énergie nécessaire

pour subvenir à une augmentation ou une diminution d'un échelon de puissance imposé par la charge (régime transitoire), en appliquant le concept de l'équilibre de l'énergie [6].

Un autre principe réside dans la mitigation des oscillations de la tension du bus continu V_{dc} imposées par les harmoniques de la charge non-linéaire ou au déséquilibre de celle-ci en régime permanent, l'aspect déséquilibre s'applique aussi au cas d'une charge linéaire.

Dans ce cadre est exposée des approches afin d'aboutir à une estimation de la valeur de la capacité du condensateur C_{dc} .

II.10 Avantages et inconvénients d'un filtrage actif :

- ❖ Le filtre actif offre de nombreux avantages [27] :
- ❖ Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau.
- ❖ Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques (dans la limite de sa bande passante).
- ❖ Il ne passe pas en surcharge lorsque le courant harmonique à compenser dépasse le dimensionnement du filtre actif. Il limite son émission de compensation harmonique au maximum de ses capacités, mais il n'y a aucun risque de destruction.
- ❖ L'effet de l'impédance du réseau est moindre que dans le cas du filtre passif. Le risque de résonance entre le filtre actif et l'impédance du réseau est inexistant.
- ❖ Il peut protéger les condensateurs de compensation par élimination des courants harmoniques générés par une charge.

Toutefois, le filtre actif présente quelques inconvénients :

- ❖ Le filtrage actif n'est possible que dans le cas de petites puissances.
- ❖ Son coût est beaucoup plus élevé que celui du filtre passif.

II.11 Conclusion :

La définition et la construction du filtre actif parallèle ont été présentées dans ce chapitre. Cette structure comporte deux parties : la partie puissance et la partie commande-contrôle. Les critères qui ont conduit à la sélection de chaque élément des parties concernées ont été énoncés. En conséquence, nous avons pu déterminer les composants de la partie commande-contrôle, tels que le contrôle de l'onduleur et la régulation de la tension du bus continu, ainsi que les éléments de la partie puissance, tels que l'onduleur, l'élément de stockage et le filtre de sortie.

Nous avons s'intéressé dans la suite aux méthodes de commandes et d'identification des courants harmoniques qui seront détaillés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III

Filtre actif parallèle et les méthodes de commande et d'identification des courants harmoniques

III.1 Introduction :

L'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs comme les thyristors, GTO et les transistors IGBT, a permis d'envisager de nouvelles solutions de compensation des courants harmoniques. Les filtres actifs constituent une alternative intéressante aux solutions classiques. Flexibles car auto adaptative, ils viennent s'ajouter à des structures déjà existantes de convertisseurs. Le rôle d'un filtre actif est de compenser en temps réel les perturbations harmoniques.

Ce chapitre traite le filtrage actif des courants harmoniques, les différentes méthodes d'identification et de commande. Les méthodes de génération des courants de référence PQ, SRF, DPC, DCC, et ICC sont étudiées. Il convient de noter qu'il faut distinguer entre la méthode de génération des courants harmoniques et la technique de commande des interrupteurs de l'onduleur de tension VSI.

III.2 Identification des courants de référence :

- La qualité de la compensation des harmoniques de courant dépend fortement des performances de la méthode d'identification choisie. En effet, un système de commande, même très efficace, ne pourra pas à lui seul effectuer un filtrage satisfaisant si les courants harmoniques sont mal identifiés. Pour cette raison, de nombreuses méthodes d'identification ont été développées dans la littérature. Elles peuvent être regroupées selon deux approches[32] :

a) Identification dans le domaine fréquentiel :

Ce type d'approche utilise la transformée de Fourier rapide, pour extraire les harmoniques du courant de charge. Cette méthode est particulièrement adaptée aux charges dont le contenu harmonique varie lentement. Elle présente également l'avantage de sélectionner chaque harmonique individuellement et permet ainsi de ne compenser que les courants harmoniques prépondérants. Cependant, cette méthode nécessite des calculs lourds afin d'identifier ces courants harmoniques. Pour cette raison, les méthodes fréquentielles ne sont pas utilisées en pratique car la charge polluante peut généralement varier rapidement au cours du temps.

b) Identification dans le domaine temporel :

De nombreuses méthodes d'identification des courants de référence dans le domaine temporel ont été publiées dans la littérature scientifique. Les plus significatives feront l'objet des paragraphes suivants.

Chapitre III : Filtre actif parallèle et les méthodes de commande et d'identification des courants harmoniques

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 de 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 :

- Identification par la méthode des puissances instantanées classique avec FPB.
- Identification par la méthode des puissances instantanées avec FMVs.
- Identification par la méthode de détection synchrone (SDM).
- Identification par la méthode du courant indirect.

III. 3 Généralités sur les méthodes d'identification :

III.3.1 Méthode des puissances active et réactive (PQ) :

Cette méthode d'identification est la plus utilisée car elle offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité, et facilité d'implantation. Les principales étapes de cette technique sont [33, 34] :

- ❖ Capture des trois tensions de source et des courants de charge.
- ❖ Une transformation des courants et des tensions dans le repère biphasé des puissances (transformation de Concordia).
- ❖ Calcul des puissances active et réactive.
- ❖ L'utilisation d'un filtre passe-bas ou passe-haut afin de séparer les puissances active et réactive alternatives.
- ❖ La compensation de l'énergie réactive permet également de corriger le facteur de puissance.
- ❖ Une puissance continue P_{dc} sera ajoutée au système à partir du régulateur de tension continu V_{dc} .
- ❖ Les courants de référence sont fournis après retour dans le repère triphasé (Concordia inverse).

La méthode des puissances instantanées est basée sur la mesure des tensions de la source (V_s) et des courants de la charge N_L (I_c), elle est valide aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire. La première étape de l'identification des courants harmoniques consiste à transformer les courants et les tensions du repère triphasé (**abc**) vers le repère biphasé dont les axes sont en quadrature. La transformation ($\alpha, \beta, 0$) triphasé permet d'écrire les relations (III-1) et (III-2) en courants et en tensions :

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III-1})$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ca} \\ I_{cb} \\ I_{cc} \end{bmatrix} \quad (\text{III-2})$$

Le courant du neutre est la somme des trois courants (i_a, i_b, i_c), le courant homopolaire est donc égale à :

$$i_0 = I_{ca} + I_{cb} + I_{cc} = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{ca} + i_{cb} + i_{cc}) = \frac{1}{\sqrt{3}} i_n \quad (\text{III-3})$$

De même pour les tensions :

$$v_0 = V_{sa} + V_{sb} + V_{sc} = \frac{1}{\sqrt{3}} (v_{sa} + v_{sb} + v_{sc}) \quad (\text{III-4})$$

Si on suppose que notre système est parfaitement équilibré et qu'on utilise un système de trois fils, sa implique que les composantes homopolaires v_0 et i_0 deviennent nulles, alors nos matrices peuvent s'écrire comme suit :

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

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III-6})$$

Les puissances réelle et imaginaire instantanées, respectivement \mathbf{p} et \mathbf{q} , sont données par :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{III-7})$$

Elles peuvent être décomposées selon $\mathbf{p} = \bar{\mathbf{p}} + \tilde{\mathbf{p}}$ et $\mathbf{q} = \bar{\mathbf{q}} + \tilde{\mathbf{q}}$.

Dans le cas sinusoïdal, $\bar{\mathbf{p}}$ est la partie continue liée à la composante fondamentale active du courant, $\bar{\mathbf{q}}$ est la partie continue liée à la composante fondamentale réactive du courant, alors que $\tilde{\mathbf{p}}$ et $\tilde{\mathbf{q}}$ sont les parties fluctuantes liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension.

Chapitre III : Filtre actif parallèle et les méthodes de commande et d'identification des courants harmoniques

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. L'inverse de l'équation (III-7) des puissances active et réactive permet d'établir La relation (III-8) des courants i_α et i_β :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{III-8})$$

En remplaçant les puissances p et q par leurs parties continues et alternatives, il vient :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_{S\beta} \\ V_\beta & V_{S\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_{S\beta} \\ V_\beta & V_{S\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_{S\beta} \\ V_\beta & V_{S\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{III-9})$$

avec

$$\Delta = V_\alpha^2 + V_\beta^2$$

Le calcul des courants perturbateurs dans le repère biphasé (α, β) est finalement donné par :

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{III-10})$$

Des parties alternatives des puissances, \tilde{p} et \tilde{q} ont déduit des courants perturbateurs triphasés grâce à la Transformation de Concordia Inverse (TCI). Ces courants représentent les perturbations et correspondent à des courants de référence qui sont à réinjecter en opposition de phase sur le réseau électrique pour éliminer les harmoniques [32].

$$\begin{bmatrix} i_{a-ref} \\ i_{b-ref} \\ i_{c-ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{3}{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{III-11})$$

Figure (III-1) montre le processus d'identification des courants harmoniques de référence par la méthode des puissances réelles et imaginaires PQ . Les courants de filtre obtenus à la sortie serviront par la suite comme une référence dans la commande des courants.

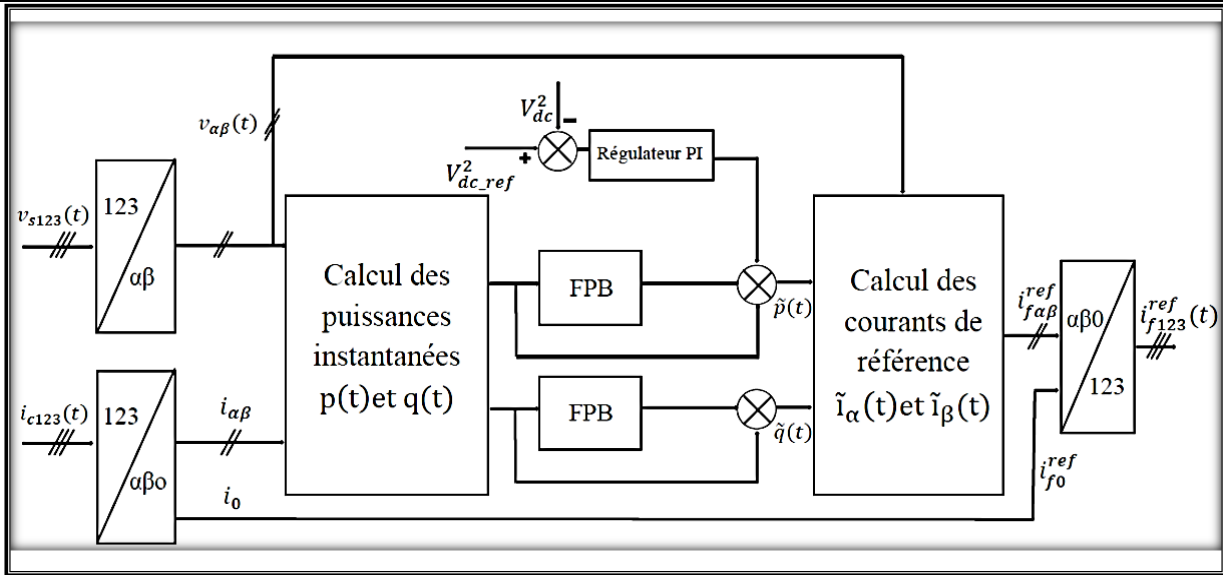


Figure (III-1) : Génération des courants de référence par la méthode des puissances instantanées PQ [32].

III.3.2 Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées modifiée :

III.3.2.1 Principe du FMV :

Son principe de base s'appuie sur les travaux de Song Hong-Scok [35, 36]. Il est basé directement sur l'extraction de la composante fondamentale des signaux d'entrée (tension ou courant), suivant les axes (α, β). La fonction de transfert de ce filtre est alors la suivante :

$$H(s) = \frac{\hat{x}_{\alpha\beta}(s)}{x_{\alpha\beta}(s)} = K \frac{(s+K)+j\omega_c}{(s+K)^2+\omega_c^2} \quad \text{(III-12)}$$

Avec

$$\omega_c = \varepsilon \cdot n \cdot \omega_f$$

ω_c : Pulsation de coupure du filtre ;

ω_f : Pulsation de la composante fondamentale du signal d'entrée ;

n : Rang de la composante du signal à filtrer ;

ε : Constante égale à ± 1 (composante directe ($\varepsilon = 1$) ou inverse ($\varepsilon = -1$)) ;

K : Constante positive ;

$x_{\alpha\beta}$: Signaux d'entrée du FMV (tension ou courant) ;

$\hat{x}_{\alpha\beta}$: Signaux de sortie du FMV.

$$\hat{X}_{\alpha}(s) = \frac{(s+K)K}{(s+K)^2+\omega_c^2} X_{\alpha}(s) - \frac{K\omega_c}{(s+K)^2+\omega_c^2} X_{\beta}(s) \quad \text{(III-13)}$$

$$\hat{X}_\beta(s) = -\frac{K\omega_c}{(s+K)^2+\omega_c^2}X_\alpha(s) - \frac{K(s+K)}{(s+K)^2+\omega_c^2}X_\beta(s) \quad \text{(III-14)}$$

Les équations (III.13) et (III.14) peuvent également être exprimées sous la forme :

$$\hat{X}_\alpha(s) = \frac{K}{s}[X_\alpha(s) - \hat{X}_\alpha(s)] - \frac{\omega_c}{s}\hat{X}_\beta(s) \quad \text{(III-15)}$$

$$\hat{X}_\beta(s) = \frac{K}{s}[X_\beta(s) - \hat{X}_\beta(s)] + \frac{\omega_c}{s}\hat{X}_\alpha(s) \quad \text{(III-16)}$$

La Figure (III-2) présente le schéma bloc du filtre multi-variable.

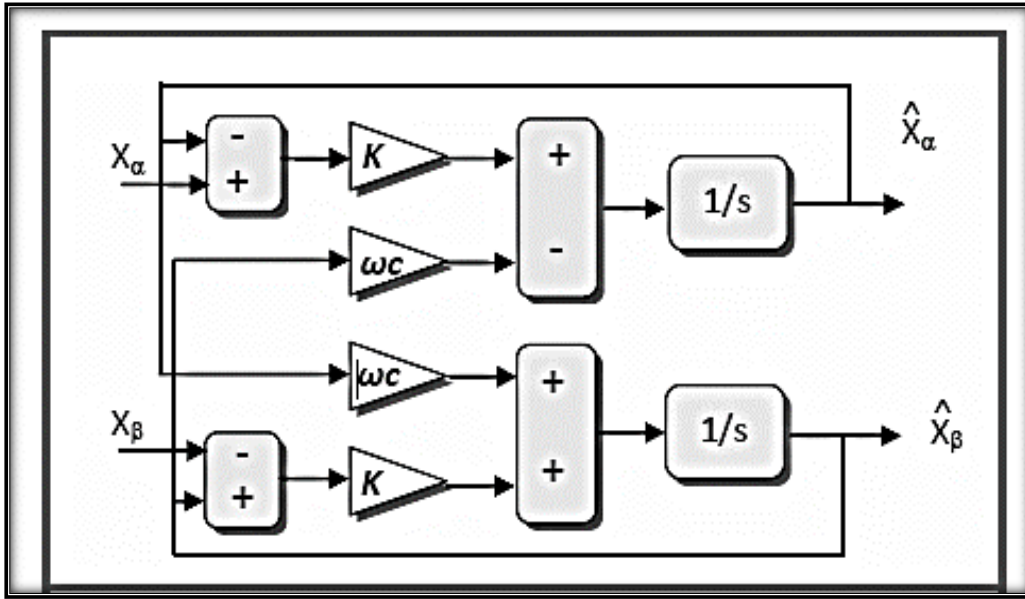


Figure (III-2) : Schéma bloc du FMV [35].

III.3.3 Théorie du référentiel synchrone (SRF) où (dq) :

Le principe d'identification sélectif à base de référentiel synchrone de Park (**dq**) est basé sur la transposition des systèmes triphasés des courants de charge à un axe biphasé tournant (**dq**) qui tourne avec une vitesse angulaire de la fréquence harmonique désirée à filtré. Ainsi, dans l'axe **dq**, l'harmonique choisi à identifier devient un signal continu, et les autres harmoniques changent leurs fréquences.

Cette opération permet de séparer cette composante des autres courants par un filtrage simple à réaliser (filtre passe bas de premier ordre).

Le terme fondamental de la théorie (**dq**) est le résultat de la transformation vectorielle des signaux d'entrée (les courants de charge pour notre cas) qui sont initialement réalisés dans les coordonnées **abc** (repère de référence fixe) vers les coordonnées **dq** (repère tournant avec la fréquence fondamentale) par la transformation de Park [37, 38].

Il y a cinq étapes pour calculer les courants de référence pour un filtre actif parallèle :

- 1) Étape 1 :** Transformer les courants de charge triphasés (i_{ca} , i_{cb} , i_{cc}) à ($i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$, i_{10}) en utilisant l'équation (III-17):

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad \text{(III-17)}$$

- 2) Étape 2 :** Transformer les courants $i_{c\alpha}$ et $i_{c\beta}$ à i_{cd} et i_{cq} par :

$$\begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad \text{(III-18)}$$

Où ω est la pulsation électrique.

Le schéma vectoriel de passage du repère (abc) vers le repère (dq) est représenté dans la Figure III.3

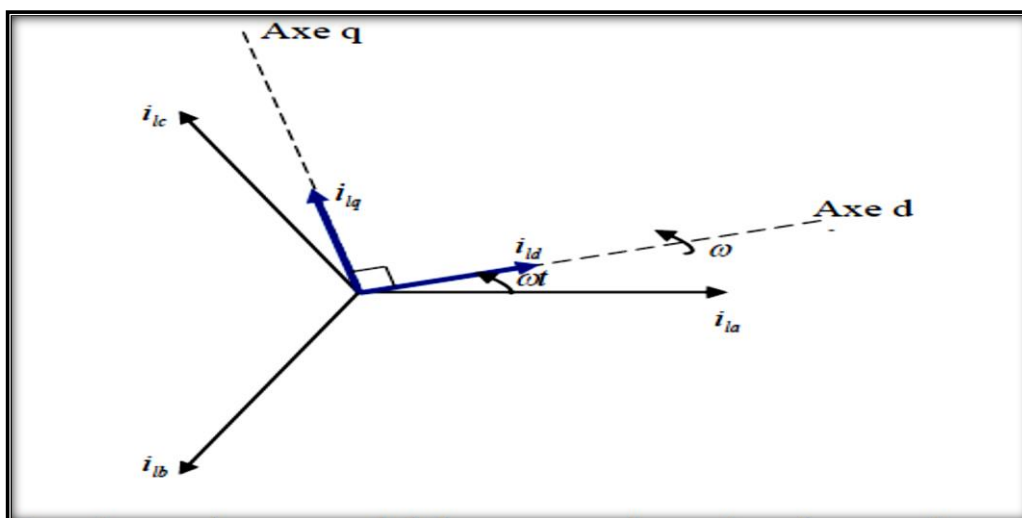


Figure (III-3) : Représentation vectoriel de passage de repère abc vers le repère (dq) [37].

On peut décomposer les courants i_{cd} et i_{cq} en deux termes, les composantes fondamentales et harmoniques. Les harmoniques se comportent comme une composante alternative et les termes fondamentaux se comportent comme une composante continue, donc on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_{cd} + \tilde{i}_{cd} \\ \bar{i}_{cq} + \tilde{i}_{cq} \end{bmatrix} \quad \text{(III-19)}$$

Avec :

$\bar{i}_{cd} ; \bar{i}_{cq}$: Composante continue (fondamentale) de courant de charge dans le repère dq.

$\tilde{i}_{cd}; \tilde{i}_{cq}$: Composante alternative (harmonique) de courant de charge dans le repère dq.

3) Étape 3 : De l'étape 2, il est montré que les courants de charge se composent de deux termes. Pour cette étape, le filtre passe-bas (FPB) est utilisé pour séparer les composantes harmoniques $\tilde{i}_{cd} , \tilde{i}_{cq}$ comme la montre la Figure (III-4).

4) Étape 4 : Le passage des composantes harmoniques ($\tilde{i}_{cd} , \tilde{i}_{cq}$) de repère dq vers le repère $\alpha\beta$ ($\tilde{i}_{1\alpha}, \tilde{i}_{1\beta}$) en utilisant l'équation suivant :

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_{c\alpha} \\ \tilde{i}_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{cd} \\ \tilde{i}_{cq} \end{bmatrix} \quad \text{(III-20)}$$

5) Étape 5 : Calcule des courants de référence triphasés (i_a^*, i_b^*, i_c^*) à partir de l'équation (III-21).

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{c\alpha} \\ \tilde{i}_{c\beta} \\ \tilde{i}_{c0} \end{bmatrix} \quad \text{(III-21)}$$

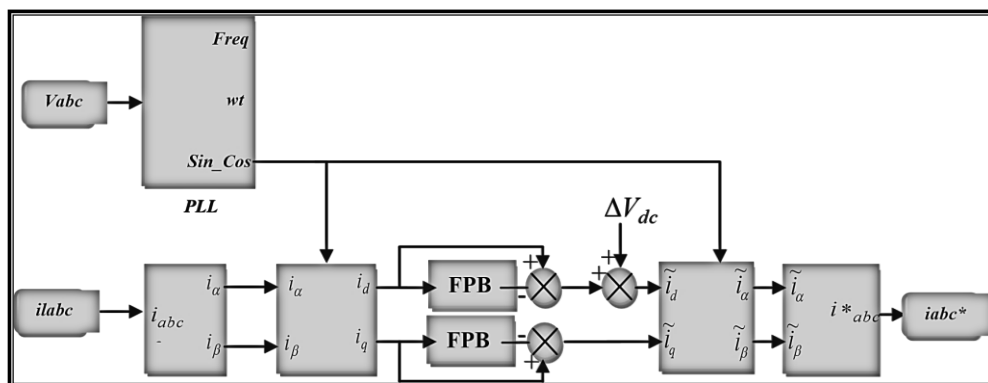


Figure (III-4) : Principe de la méthode (dq)[37].

Afin d'échanger une puissance contrôlée, l'onduleur doit toujours être synchronisé avec le réseau. Le but du bloc de synchronisation est d'obtenir la phase de la tension instantanée du réseau. Plusieurs techniques sont utilisées, le choix le plus commun consiste à utiliser une boucle à verrouillage de phase (Phase Lock Loop PLL).

III.3.3.1 Système à base de PLL :

Principalement le **PLL** est un système utilisé comme moyen afin d'extraire les composantes directe, inverse et homopolaire de la tension triphasée et pour récupérer les informations de la phase et de la fréquence. Son principe de base est illustré sur la figure (III-5) [39].

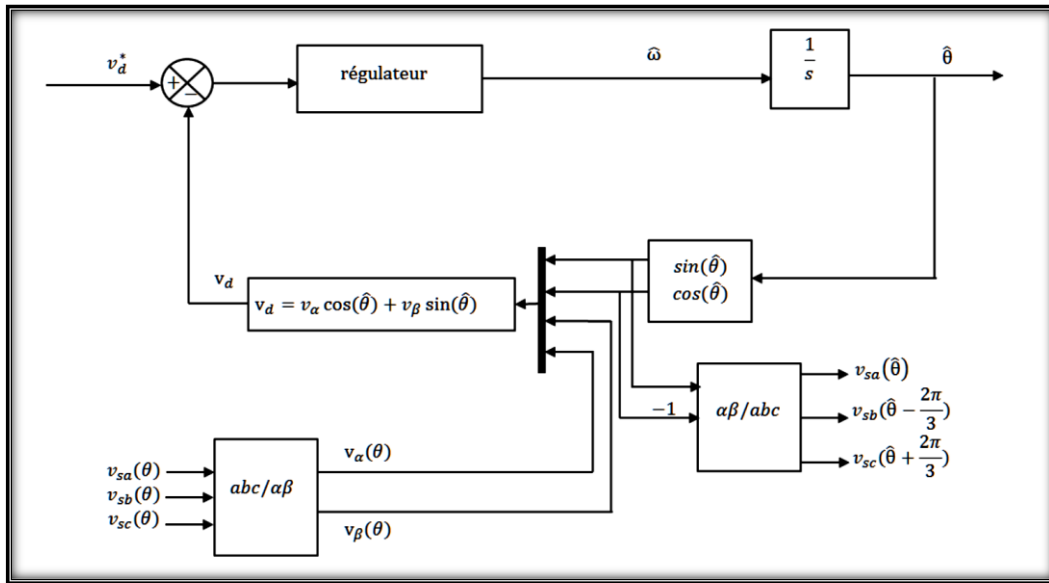


Figure (III-5) : Schéma de principe d'une PLL classique [39].

Supposons que les trois tensions au point de raccordement sont données par le système triphasé suivant :

$$\begin{cases} v_{sa}(\theta) = \sqrt{2} v_s \sin(\theta) \\ v_{sb}(\theta) = \sqrt{2} v_s \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ v_{sc}(\theta) = \sqrt{2} v_s \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad \text{(III-22)}$$

D'un premier temps, ces tensions subissent une transformation triphasée biphasée de Concordia :

$$\begin{cases} v_{s\alpha}(\theta) = \sqrt{3} v_s \sin(\theta) \\ v_{s\beta}(\theta) = -\sqrt{3} v_s \cos(\theta) \end{cases} \quad \text{(III-23)}$$

Les tensions obtenus $v_{s\alpha}(\theta)$ et $v_{s\beta}(\theta)$ sont exprimées dans le repère de Park (dq) par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \\ -\sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{III-24})$$

Avec,

θ : Phase instantanée réelle de la tension.

$\hat{\theta}$: Intégrale de l'estimation de la pulsation $\hat{\omega}$ déterminée par le régulateur PI

Nous obtenons ainsi :

$$v_{sd} = \sqrt{3} v_s \sin(\theta - \hat{\theta}) \quad (\text{III-25})$$

Il apparait clair que, l'angle de phase de la tension v_{sd} est égale à $(\theta - \hat{\theta})$. Pour satisfaire la condition $(\theta = \hat{\theta})$, il faut choisir la valeur de la tension référence v_{sd}^* nulle. A cette condition, la PLL sera verrouillée.

Supposons que $(\theta - \hat{\theta})$ soit petit, alors, l'expression (III.25) peut être réécrite comme suit :

$$v_{sd} = \sqrt{3} v_s (\theta - \hat{\theta}) \quad (\text{III-26})$$

Comme la pulsation angulaire estimée $\hat{\omega}$ est déterminé par le régulateur PI, de ce fait, on peut écrire :

$$\hat{W} = F_{PI}(s) \cdot \sqrt{3} v_s (\theta - \hat{\theta}) \quad (\text{III-27})$$

Avec $F_{PI}(s)$ la fonction de transfert du régulateur PI, donnée par l'expression suivante :

$$F_{PI}(s) = K_P + \frac{K_i}{s} = K_P \left(\frac{1 + \tau_i s}{\tau_i s} \right) \quad (\text{III-28})$$

Ainsi, la position angulaire aura pour expression :

$$\hat{\theta} = \frac{1}{s} \hat{W} \quad (\text{III-29})$$

Nous obtenons donc le schéma fonctionnel de la PLL illustré sur la figure (III-6) :

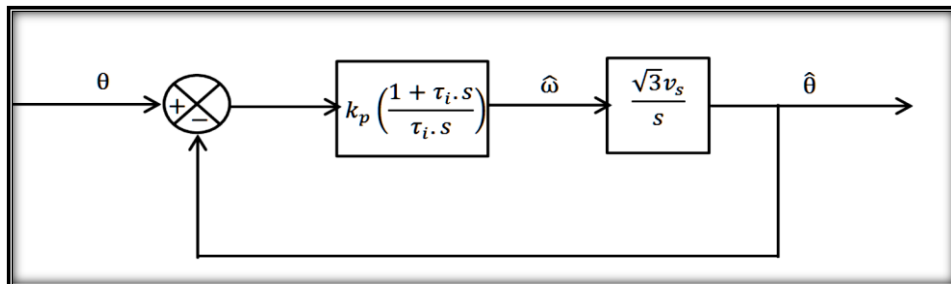


Figure (III-6) : Schéma fonctionnel de la PLL [39].

Afin de déterminer les paramètres du régulateur PI, la fonction de transfert en boucle fermée de ce système est donnée par :

$$\frac{\hat{\theta}(s)}{\theta(s)} = \frac{\sqrt{3} v_s K_P \left(\frac{1+\tau_i s}{\tau_i s} \right)^{\frac{1}{s}}}{1 + \sqrt{3} v_s K_P \left(\frac{1+\tau_i s}{\tau_i s} \right)^{\frac{1}{s}}} \quad \text{(III-30)}$$

Afin de réaliser un bon compromis entre la stabilité et les performances dynamiques, nous avons choisi : $\varepsilon = 0.707$ ce qui nous permet de déterminer à partir de III.30 [39] .

$$K_P = \frac{2\varepsilon W_n}{\sqrt{3} W_n} \quad \text{et} \quad \tau_i = \frac{2\varepsilon}{W_n} \quad \text{(III-31)}$$

III.3.4 Commande directe de puissance (DPC) :

Le contrôle direct de puissance **DPC** est devenu une stratégie adéquate pour contrôler les convertisseurs connectés au réseau électrique. Cette stratégie de contrôle non linéaire est définie comme une technique de contrôle direct, car elle choisit le vecteur de tension le mieux approprié du convertisseur sans aucune technique de modulation. La structure de contrôle de base de la **DPC** est décrite par le synoptique de la figure (III-7). Les deux boucles de régulation en cascade correspondent à : une boucle de régulation interne des puissances active et réactive et une boucle de contrôle externe qui établit la tension du bus continu à sa valeur de référence. La boucle interne évalue directement les performances de suivi des puissances actives et réactive, les obligeant à suivre les valeurs de références [40, 41].

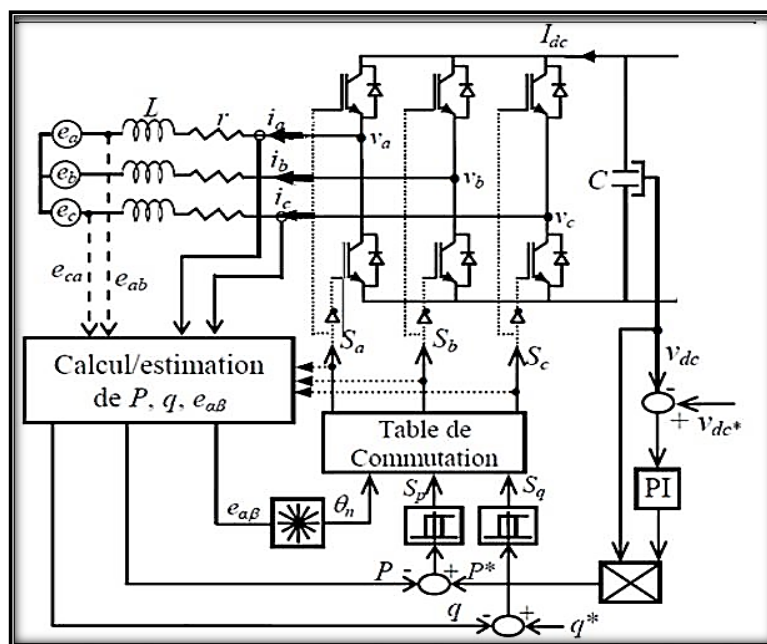


Figure (III-7) : Configuration générale de la commande directe de puissances [40].

III.3.4.1 Estimation de la puissance instantanée :

La puissance active instantanée est définie par le produit scalaire entre les courants et les tensions de ligne. Alors que, la puissance réactive est définie par le produit vectoriel entre eux, ces expressions sont exprimées respectivement par les relations suivantes :

$$P = (e_{abc})^t \cdot i_{abc} = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (\text{III-32})$$

$$Q = \|e_{abc} \wedge i_{abc}\| \quad (\text{III-33})$$

Avec

$$e_{abc} \wedge i_{abc} = \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ e_a & e_b & e_c \\ i_a & i_b & i_c \end{bmatrix} = (e_c i_b - e_b i_c) \vec{i} - (e_c i_a - e_a i_c) \vec{j} + (e_b i_a - e_a i_b) \vec{k} \quad (\text{III-34})$$

Puisque le système triphasé est équilibré, la puissance réactive peut s'exprimer par :

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} [(e_b - e_c) i_a + (e_c - e_a) i_b + (e_a - e_b) i_c] \quad (\text{III-35})$$

Cependant, l'équation (III-35) exige la connaissance des tensions du réseau. De ce fait, il faut exprimer les indépendantes des tensions du réseau.

Alors, les expressions qui donnent l'estimation des puissances active et réactive instantanées sans capteur de tensions sont comme suit :

$$\hat{P} = L \left(\frac{di_a}{dt} i_a + \frac{di_b}{dt} i_b + \frac{di_c}{dt} i_c \right) + v_{dc} (s_a i_a + s_b i_b + s_c i_c) \quad (\text{III-36})$$

$$\hat{Q} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[L \left(\frac{di_a}{dt} i_c - \frac{di_c}{dt} i_a \right) - v_{dc} (s_a (i_b - i_c) + s_b (i_c - i_a) + s_c (i_a - i_b)) \right] \quad (\text{III-37})$$

Les premières parties des deux expressions représentées précédemment présentent la puissance dans les inductances de ligne, notant ici que les résistances internes de ces inductances sont négligeables car la puissance active dissipée dans ces résistances est en fait beaucoup plus faible devant la puissance mise en jeu. Les autres parties représentent la puissance dans le convertisseur.

III.3.4.2 Estimation de la tension du réseau :

Pour calculer la position du vecteur de tension du réseau dans le plan (α, β) . La tension peut être estimée par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_{s\alpha} \\ \hat{v}_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{(i_\alpha^2 + i_\beta^2)} \begin{bmatrix} i_\alpha & -i_\beta \\ i_\beta & i_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{p} \\ \hat{q} \end{bmatrix} \quad (\text{III-38})$$

III.3.4.3 Choix du secteur :

L'influence de chaque vecteur de contrôle appliqué par l'onduleur sur les puissances active et réactive est très dépendante de la position réelle du vecteur de la tension de source. Ainsi,

Chapitre III : Filtre actif parallèle et les méthodes de commande et d'identification des courants harmoniques

le tableau de commutation possède comme entrées les signaux issus des deux contrôleurs à hystérésis et la position du vecteur de la tension de source. Pour cela, le plan (α , β) est divisé en douze secteurs (Figure III-8), ces derniers peuvent être déterminés par la relation suivante [40] :

$$(n - 2) \frac{\pi}{6} < \theta_n < (n - 1) \frac{\pi}{6} \quad n=1,2,3,\dots,12 \quad (\text{III-39})$$

Où : n le numéro du secteur.

Selon l'angle du vecteur de la tension de source référencé sur l'axe (α), le secteur où le vecteur est localisé sera sélectionné. L'angle est calculé en utilisant la fonction trigonométrique inverse, basée sur les composantes du vecteur de la tension dans le repère (α , β), comme indiquée par l'équation suivante :

$$\hat{\theta}_n = \text{Artg} \left(\frac{\hat{v}_{s\beta}}{\hat{v}_{s\alpha}} \right) \quad (\text{III-40})$$

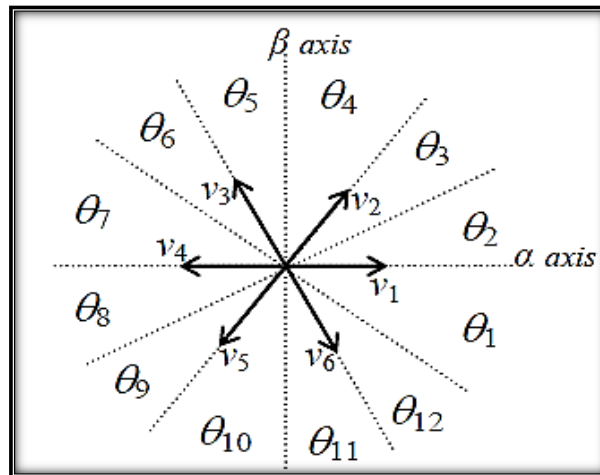


Figure (III-8) : Secteurs et vecteurs des tensions [40].

III.3.4.4 Table de commutation :

La table de commutation est la partie primordiale dans la commande directe de puissance. Elle sélectionne le vecteur de tension approprié de l'onduleur pour permettre d'orienter les puissances active et réactive instantanées dans leur valeur désirée, en se basant aussi sur la position du vecteur de la tension de la source et des erreurs des puissances active et réactive [40].

Tableau III- 1: Table de commutation classique.

S_p	S_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}
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
0	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
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	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

($V_1 : 100$), ($V_2 : 110$), ($V_3 : 010$), ($V_4 : 011$), ($V_5 : 001$), ($V_6 : 101$), ($V_7 : 111$)

III.3.5 Etude de la commande en courant du FAP (DCC) :

Le but de cette stratégie d'identification est de générer une meilleure qualité des courants de référence avec un algorithme simple. Après avoir calculé les trois signaux sinusoïdaux avec la technique PLL comme montre Figure III.9 la sortie du régulateur PI dans la partie de régulation de la tension continue est considérée comme un courant de crête (I_{sp}) qui peut se multiplier par les signaux sinusoïdaux afin d'obtenir les courants de source de référence exprimés comme dans (III-41) [7, 33, 42].

$$i_{sa}^*(t) = I_{sp} \sin(\omega t)$$

$$i_{sb}^*(t) = I_{sp} \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_{sc}^*(t) = I_{sp} \sin(\omega t - 240^\circ)$$

(III-41)

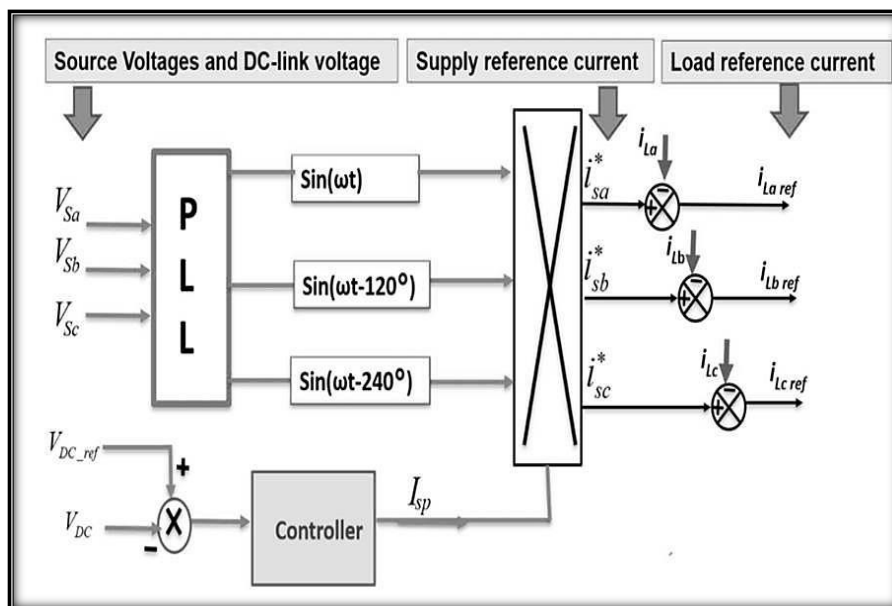


Figure (III-9) : Principe de la méthode directe du courant (DCC) [33].

Une fois les courants de source de référence sont calculés, nous devons les comparer avec les courants de charge afin d'obtenir les courants de référence du filtre qui sont utilisés comme

référence dans le contrôle d'hystérésis du VSI. Cette méthode d'identification des courants harmoniques a prouvé son efficacité et sa supériorité par rapport à d'autres techniques. En plus, sa structure simple de calcul du courant de référence la rendre prioritaire dans les implémentations en temps réel.

III.3.6 Méthode indirecte du courant (ICC) :

La méthode indirecte du courant est une méthode simple de génération des courants de références. Son modèle mathématique simplifié permet une implémentation en temps réels très facile [33].

Tout d'abord, les trois tensions de source données par une PLL peuvent être exprimées Comme suit :

$$v_{sa}^*(t) = \sin(\omega t)$$

$$v_{sb}^*(t) = \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$v_{sc}^*(t) = \sin(\omega t - 240^\circ)$$

(III-42)

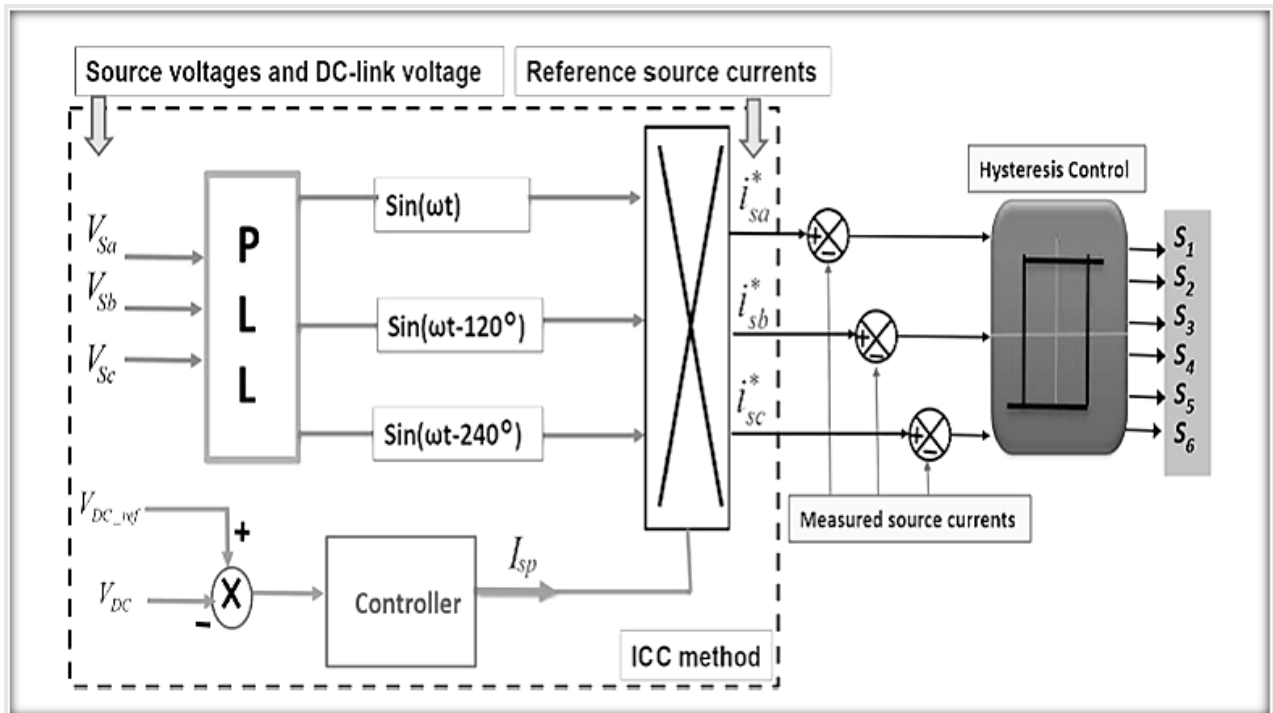


Figure (III-10) : Principe de la méthode indirecte du courant ICC [33].

D'après le diagramme illustré sur Figure III-9, le courant de source à PCC est écrit comme :

$$i_s(t) = i_c(t) - i_f(t) \tag{III-43}$$

Où :

$i_s(t)$, $i_L(t)$, $i_f(t)$ représentent respectivement les valeurs instantanées du courant de source, du courant de charge, et du courant de filtre.

À la présence d'une charge non linéaire, le courant de charge peut être décomposé en une composante fondamentale et des composantes harmoniques qui peuvent être représentées par un développement de série de Fourier comme suit :

$$i_L(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \phi_n) = I_1 \sin(\omega t + \phi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (\text{III-44})$$

Avec

I_n et ϕ_n sont l'amplitude et l'angle du nième courant harmonique,

I_1 et ϕ_1 sont l'amplitude et l'angle du courant fondamental.

D'autre part, la puissance de charge instantanée $P_{C(t)}$ peut être calculée comme suit :

$$P_{C(t)} = v_{s(t)} \times i_{C(t)} \quad (\text{III-45})$$

À partir des équations (III-43) et (III-44), la puissance de charge peut être réécrite comme suit :

$$P_{C(t)} (= V_m I_1 \sin^2(\omega t) \times \cos(\phi_1) + V_m I_1 \sin(\omega t) \times \cos(\omega t) \times \sin(\phi_1) + V_m \sin(\omega t) \times \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \phi_n)) \quad (\text{III-46})$$

En outre, la puissance de charge peut être représentée comme suit :

$$P_{C(t)} = P_{fun(t)} + P_{r(t)} + P_{h(t)} \quad (\text{III-47})$$

Dans l'équation (III-46), les termes $P_{fun(t)}$, $P_{r(t)}$ et $P_{h(t)}$ représentent respectivement la puissance fondamentale (puissance réelle), la puissance réactive et la puissance harmonique tirées par la charge non linéaire. Seule la puissance fondamentale doit être fournie par la source sous une compensation idéale. Les composants réactifs et harmoniques sont fournis par le filtre actif. Il ressort des équations (III-45) et (III-46) que la puissance fondamentale absorbée par la charge non linéaire peut être représentée par :

$$p_{fun(t)} = V_m I_1 \sin^2(\omega t) \times \cos(\phi_1) = v_s(t) \times i_s(t) \quad (\text{III-48})$$

À partir de l'équation (III-43), après compensation, le courant fourni par la source :

$$i_s(t) = \frac{P_{fun(t)}}{v_s(t)} = I_1 \cos(\phi_1) * \sin(\omega t) = I_{sm} \sin(\omega t) \quad (\text{III-49})$$

Compte tenu de certaines pertes dans l'onduleur, le courant de crête total I_{sp} illustré à la figure III.9 peut être défini comme suit :

$$I_{sp} = I_{sm} + I_{sl} \quad (\text{III-50})$$

Où :

I_{sc} , I_{sm} , et I_{sp} , représentent respectivement la composante de perte de l'onduleur, le courant de source maximum, et le courant de crête total.

L'équation (III-45) montre qu'il y a des pertes liées à la commutation dans l'onduleur VSI et à la fuite du condensateur (I_{sc}). Pour compenser ces pertes, la source principale devrait fournir

Chapitre III : Filtre actif parallèle et les méthodes de commande et d'identification des courants harmoniques

plus d'énergie en plus de la demande réelle de puissance de la charge non linéaire. Pour remplir de manière satisfaisante la compensation, le filtre actif doit fournir Le courant suivant :

$$i_f(t) = i_c(t) - i_s(t) \quad \text{(III-51)}$$

De l'équation (III-46), on voit clairement que le courant de source peut être soustrait du courant de charge pour obtenir le courant filtrant fourni par le filtre actif. Par conséquent, pour une compensation précise des harmoniques et de la puissance réactive, il est nécessaire de calculer l'alimentation en courant instantané requise par la source comme suit :

$$i_s(t) = I_{SP} \sin(\omega t) \quad \text{(III-52)}$$

Où I_{SP} , est le courant de crête estimé à la sortie du régulateur du bus continu.

Les courants triphasés de référence de la source après compensation peuvent maintenant être exprimés comme suit :

$$\begin{aligned} i_{sa}^*(t) &= I_{sp} \sin(\omega t) \\ i_{sb}^*(t) &= I_{sp} \sin(\omega t - 120^\circ) \\ i_{sc}^*(t) &= I_{sp} \sin(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \quad \text{(III-53)}$$

Dans l'algorithme **ICC**, le courant de crête est estimé à partir du courant continu de sortie du régulateur comme suit.

$$I_{sp} = I_{dc} \quad \text{(III-54)}$$

III.4 Introduction aux réseaux de neurones :

Les réseaux de neurones artificiels (Artificial Neural Networks ou **ANN**) consistent en un ensemble d'outils et de méthodes de calcul. Ils sont caractérisés par leur capacité d'apprentissage, de généralisation, de mémorisation, de classification, d'adaptation et de décision. Ils sont appliqués dans divers domaines, tel que la reconnaissance de formes, le contrôle et la robotique. En maintenance industrielle, les réseaux de neurones sont utilisés pour résoudre les problèmes du diagnostic par la classification automatique des signaux et des formes correspondantes aux différents états de fonctionnements normaux et anormaux des machines.

Le modèle mathématique d'un neurone artificiel est illustré par la figure (III.10). Un neurone est essentiellement constitué d'un intégrateur qui effectue la somme pondérée de ses entrées. Le résultat de cette somme est ensuite transformé par une fonction de transfert qui produit la sortie du neurone. Cette sortie correspond à une somme pondérée des poids et des entrées moins ce qu'on nomme le biais du neurone. Le résultat de la somme pondérée s'appelle le niveau d'activation du neurone. Le biais s'appelle aussi le seuil d'activation du neurone. Lorsque le niveau d'activation atteint ou dépasse le seuil, alors la sortie devient positive (ou nul). Sinon, il est négatif [43]

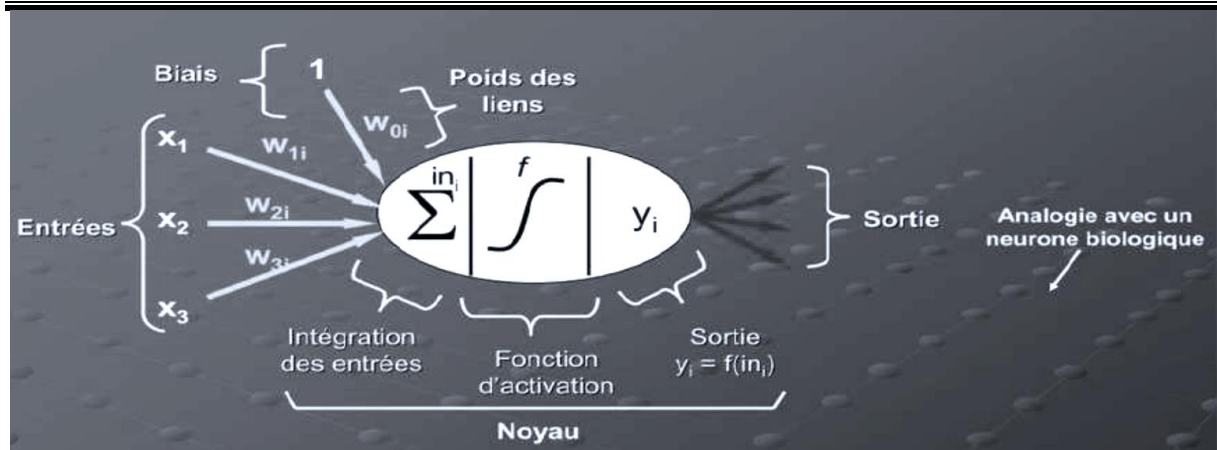


Figure (III-11) : Modèle d'un neurone artificiel [43].

III.4.1 Historique de réseaux de neurones :

Les réseaux de neurones artificiels ANN sont apparus en 1943 lors d'essais de modélisation du neurone biologique par Warren McCulloch et Walter Pitts. Ils supposaient que l'impulsion nerveuse était le résultat d'un calcul simple effectué par chaque neurone et que la pensée naissait grâce à l'effet collectif d'un réseau de neurones interconnectés. La première règle d'apprentissage fut proposée par Donald Hebb en 1950. Son intuition était que si deux neurones étaient actifs en même temps, les synapses entre ces neurones seraient renforcées. Le Perceptron, proposé par Rosenblatt en 1962, est le premier modèle de réseau de neurones intégrant le neurone de McCulloch et Pitts et la règle d'apprentissage de Hebb. Les capacités d'apprentissage du Perceptron susciteront de grands espoirs, mais le véritable essor des réseaux de neurones a débuté au cours des années 80 avec une variante multicouche du perceptron et la règle d'apprentissage de rétropropagation. Une synthèse complète sur l'évolution des réseaux de neurones et de leurs classifications peut être trouvée dans le livre d'Haykin (1994) ou encore dans les livres de Héroult et Jutten (1994) et Dreyfus et al. (2002) [44].

III.4.2 Architecture des réseaux de neurones :

L'architecture est la manière avec laquelle les neurones sont interconnectés afin de constituer un réseau. On peut distinguer trois types d'architectures de réseaux de neurones : les réseaux non bouclés, les réseaux bouclés et les réseaux à connexions complexes [43, 44]

- Les réseaux non bouclés ou réseaux unidirectionnels (feedforward networks) ont leurs neurones organisés sous la forme d'une ou de plusieurs couches successives. L'information circule de la couche d'entrées vers la couche de sortie au travers d'éventuelles couches intermédiaires mais sans retour en arrière. Le Perceptron adopte ce type d'architecture.
- Les réseaux bouclés ou les réseaux récurrents (recurrent networks) possèdent une

structure similaire à celle des réseaux unidirectionnels mais complétée par des connexions entre éléments de la même couche ou vers des couches amonts. Ces réseaux sont assez puissants car leur fonctionnement est séquentiel et adopte un comportement dynamique.

- Dans la catégorie des réseaux à connexions complexes se trouve tous les réseaux qui ne trouvent pas leur place dans les deux catégories précédemment citées. Nous pouvons mentionner les SOM (Self Organizing Map), LVQ (Learning Vector Quantization), ART (Adaptative Resonance Theorie), RCE (Restrict-ed Coulomb Energy), les réseaux probabilistes, etc.

III.4.3 Apprentissage des réseaux de neurones :

Lorsque la structure du réseau de neurones est fixée, il faut choisir un processus d'apprentissage, par lequel les poids vont être ajustés de manière à satisfaire un critère d'optimisation. Il est possible d'obtenir une solution satisfaisante seulement si la complexité du réseau de neurones est adaptée au problème à résoudre. L'apprentissage fait appel à des exemples de comportement du processus à modéliser [43, 44]

- L'apprentissage est *supervisé* quand il est possible de fournir une sortie désirée. Les poids du réseau de neurones sont ajustés en fonction d'un signal d'erreur qui est la différence entre la sortie fournie par le réseau et la sortie désirée.
- L'apprentissage est *non-supervisé* lorsque l'adaptation des poids ne dépend que des critères internes au réseau. L'adaptation se fait uniquement avec les signaux d'entrées. Aucun signal d'erreur, aucune sortie désirée n'est prise en compte.
- L'apprentissage est de type (par *renforcement*) lorsque le réseau de neurones interagit avec l'environnement. L'environnement donne une récompense pour une réponse satisfaisante du réseau et assigne une pénalité dans le cas contraire. Le réseau doit ainsi découvrir les réponses qui lui donnent un maximum de récompenses.

Le choix d'utiliser telle ou telle architecture de réseau de neurones, tel ou tel type d'apprentissage dépend de l'application mais aussi des capacités de traitement du système sur lequel ces architectures vont être implantées.

III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié les principales méthodes d'identification utilisées dans le système de filtrage actif. Les méthodes PQ, SRF, DPC, DCC, et ICC sont étudiées dans l'unique but d'identifier et générer les courants harmoniques de la charge non linéaire. PQ, SRF, et DPC réduisent leur complexité du modèle par l'application de la transformation de Concordia qui transforme le système triphasé en un système biphasée équivalent. Cette transformation

Chapitre III : Filtre actif parallèle et les méthodes de commande et d'identification des courants harmoniques

permis une réduction notable de la complexité de la résolution des équations mathématiques du système. Par contre les deux méthodes DCC et ICC sont plus simple et repose sur le signal de sortie du régulateur de tension continu de l'onduleur. Dans la dernière partie de ce chapitre nous avons présenté une étude sur le réseau de neurones artificiels, où nous avons appris son histoire, ses types et son principal avantage, qui est l'apprentissage.

Les résultats de simulation pour les méthodes d'identification PQ, SRF, DPC, DCC, et ICC sont l'objective du quatrième chapitre.

CHAPITRE IV

Simulation d'un filtre actif parallèle FAP et interprétations des résultats



IV.1 Introduction :

Pour commander un filtre actif parallèle, il est essentiel d'abord détecter les courants harmoniques émis par la charge polluante, car ils servent de références pour configurer le filtre. La détection harmonique est cruciale pour caractériser les harmoniques présents dans un signal d'entrée (comme la tension ou le courant) en utilisant des algorithmes mathématiques spécifiques.

Dans ce chapitre, nous proposons d'étudier la simulation d'un système comprenant un réseau, charge polluante (redresseurs) et un filtre actif parallèle à trois bras en régime équilibré en utilisant l'environnement Matlab-Simulink. Nous présentons et nous expliquons ensuite les résultats de simulation obtenus.

IV.2 Paramètres de simulation :

Nous avons effectué des simulations à l'aide des outils **Matlab/Simulink** et de la bibliothèque **SymPowerSystems**. Dans cette section, nous présentons les résultats des différentes méthodes d'identification et les différentes formes d'onde ont été simulées telles que celles des courants de compensation, de charge, et de source ainsi que la tension aux bornes du bus continu, une analyse spectrale de ces signaux a été conduite. Les paramètres du système simulé sont récapitulés sur le tableau (IV-1).

Tableau (IV- 1): Paramètres de simulation.

<i>Nom</i>	<i>Symbole</i>	<i>Valeur</i>
<i>Réseau électrique</i>		
<i>Tension</i>	<i>V</i>	<i>220 V</i>
<i>Fréquence</i>	<i>F</i>	<i>50 Hz</i>
<i>Résistance</i>	<i>R</i>	<i>0.2mΩ</i>
<i>Inductance</i>	<i>L</i>	<i>0.015mH</i>
<i>Charge non linéaire</i>		
<i>Résistance</i>	<i>R_{ch}</i>	<i>75 Ω</i>
<i>Résistance</i>	<i>R_{ch}</i>	<i>0.1 Ω</i>
<i>Inductance</i>	<i>L_{ch}</i>	<i>0.3mH</i>

<i>Filtre Actif parallèle</i>		
<i>Résistance</i>	R_f	$30m\ \Omega$
<i>Inductance</i>	L_f	$3mH$
<i>Condensateur de stockage</i>	C_{dc}	$5600\ \mu F$
<i>Tension de référence</i>	V_{dc-ref}	$620V$

IV.3 Structure générale de simulation d'un filtre actif parallèle FAP :

Le schéma global du réseau électrique avec le filtre active parallèle est donné par ta figure (IV-1) qui contient les parties suivantes :

- Source de tension triphasée.
- Charge non linéaire : pont redresseur triphasé à diode.
- Filtre actif, le quel est composé d'un onduleur de tension à trois bras à interrupteur réversible en courant et bi-commandables (IGBT avec des diodes antiparallèles).
- Élément de stockage de l'énergie continue est une capacité C_{dc} qui joue le rôle d'une source de tension V_{dc} .
- Filtre de sortie du premier ordre représenté par (R_f et L_f).
- Commande de FAP, qui génère les signaux de commande de l'onduleur.

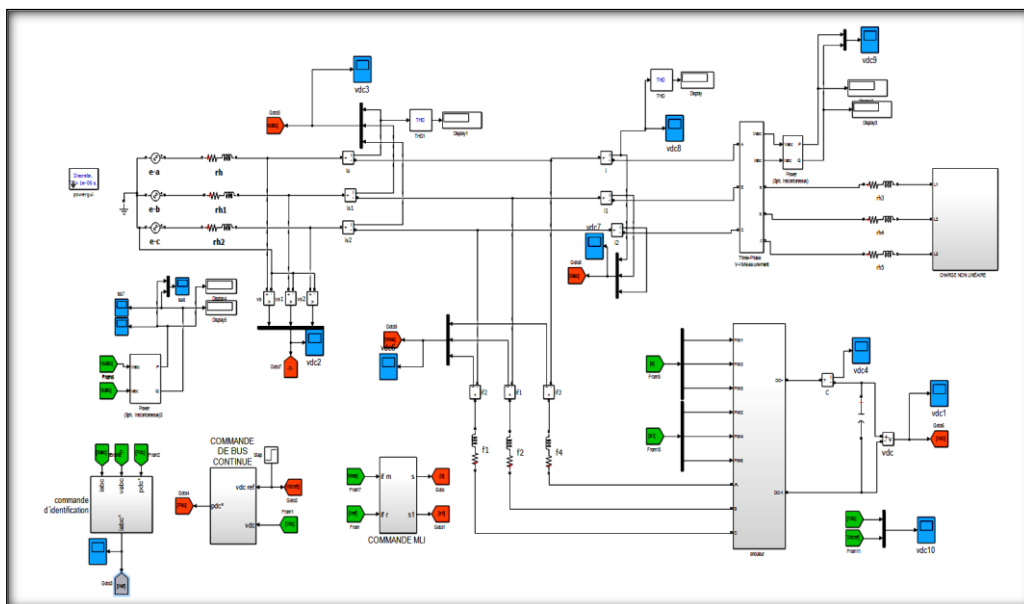


Figure (IV-1) : Structure générale du FAP sous Matlab/SimPowerSystems.

IV.3.1 Structure de la source de tension triphasée :

La figure (IV-2) présente le schéma bloc de la source de tension triphasée.

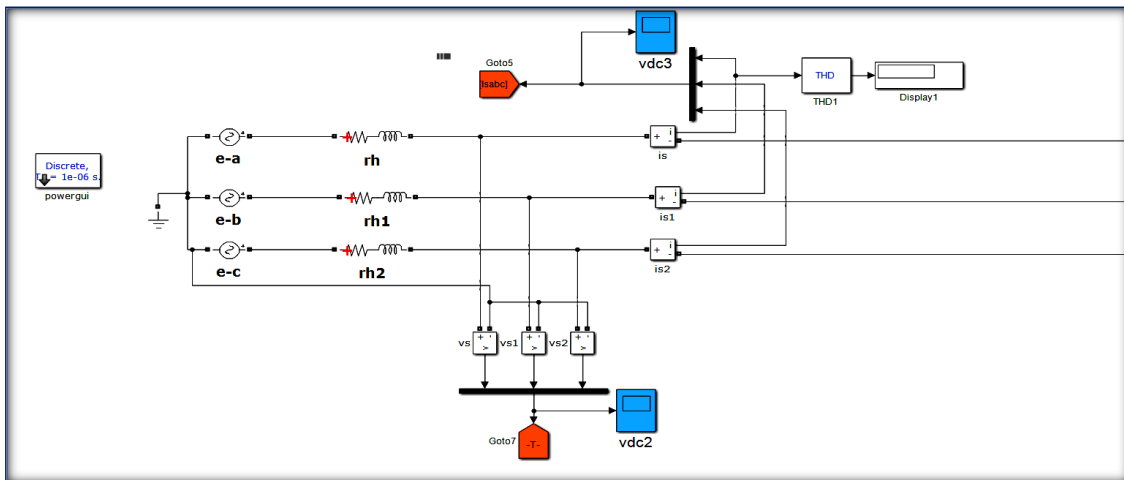


Figure (IV-2) : Schéma bloc de la source de tension triphasée.

IV.3.2 Structure de la charge non linéaire :

La figure (IV-3) présente la charge non linéaire à base de diode.

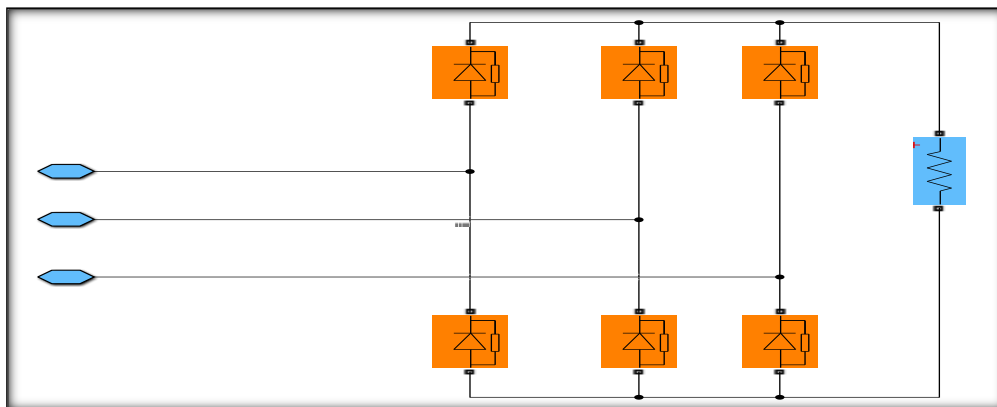


Figure (IV-3) : Schéma bloc de la charge non linéaire.

IV.3.3 Structure globale du système à étudier sans filtre actif parallèle FAP (réseau triphasé/charge non linéaire) :

La figure (IV-4) présente le schéma bloc d'un réseau triphasé avec une charge non linéaire sans FAP.

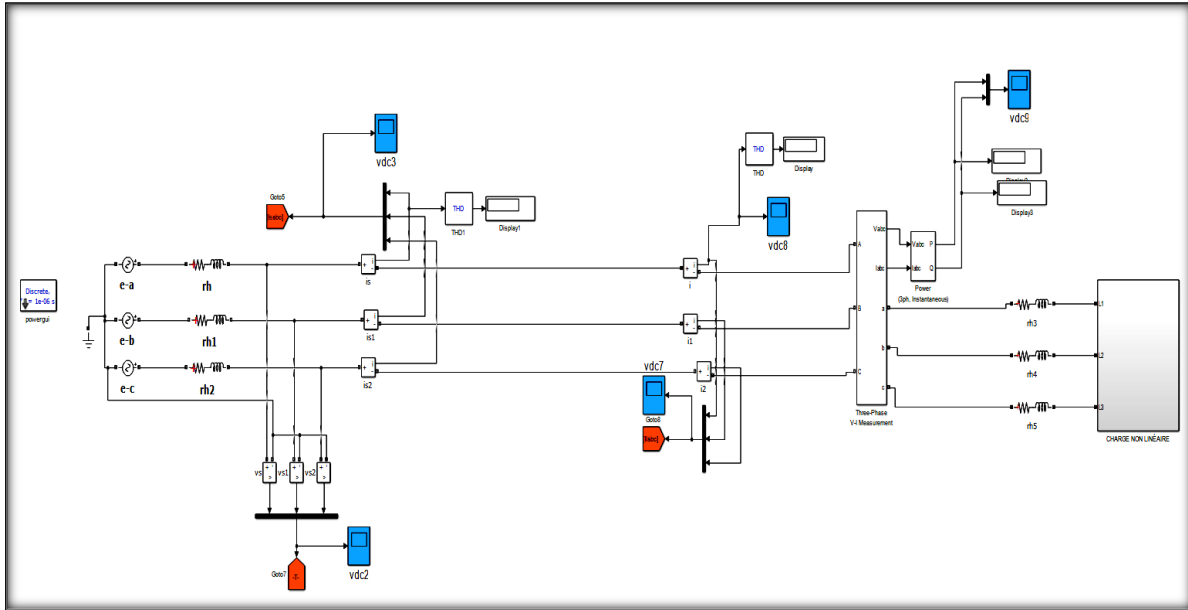


Figure (IV-4) : Structure sans FAP (réseau triphasé/charge non linéaire).

IV.3.4 Structure d'un filtre actif parallèle FAP :

La figure (IV-5) présent le filtre actif parallèle à base d'un onduleur à trois bras.

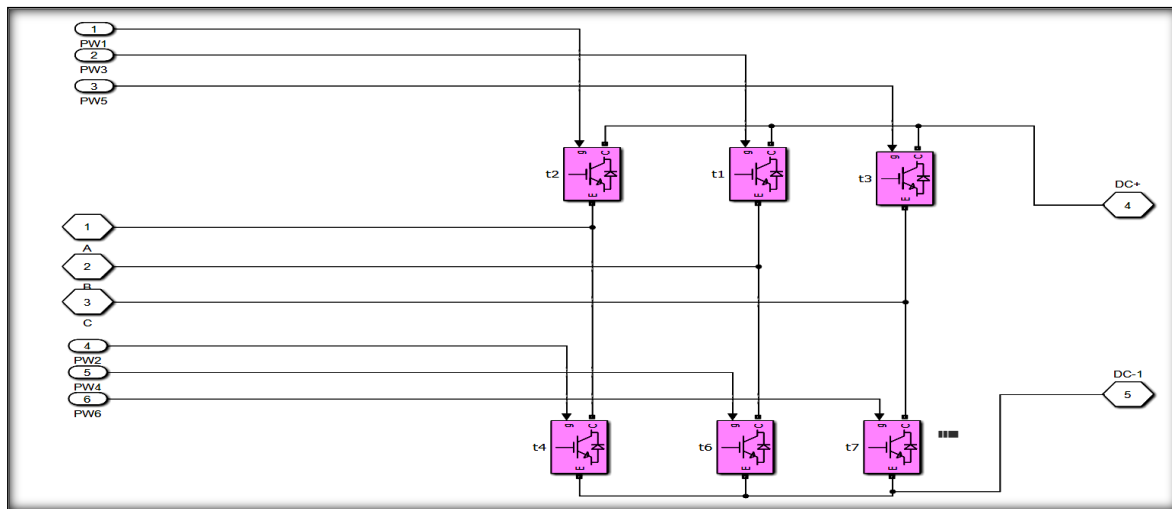


Figure (IV-5) : Structure de l'onduleur à trois bras.

IV.3.5 Structure de la Commande MLI du filtre actif parallèle FAP :

La figure (IV-6) représenté la commande du filtre actif parallèle par la méthode de modulation de largeur d'impulsion MLI.

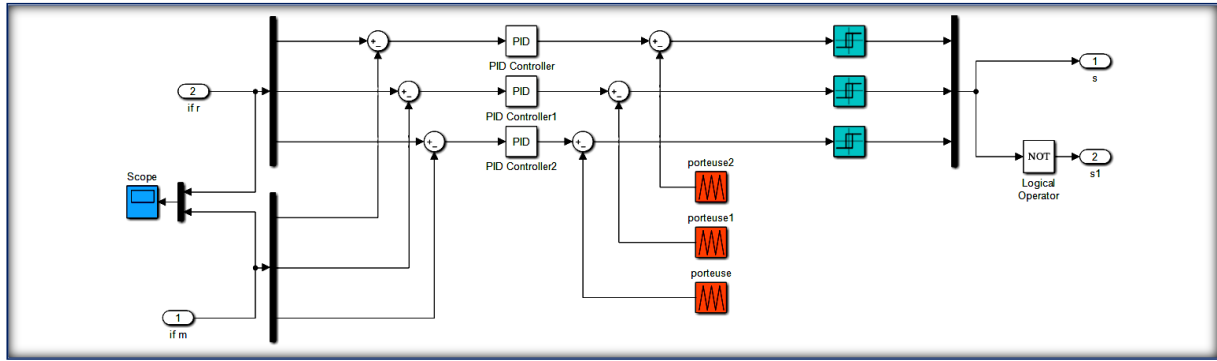


Figure (IV-6) : Schéma de principe de la commande du FAP par MLI.

IV.3.6 Structure du régulateur PI de bus continu :

Les figures (IV-7) et (IV-8) présentent le régulateur proportionnel intégrateur PI pour la régulation du bus continu.

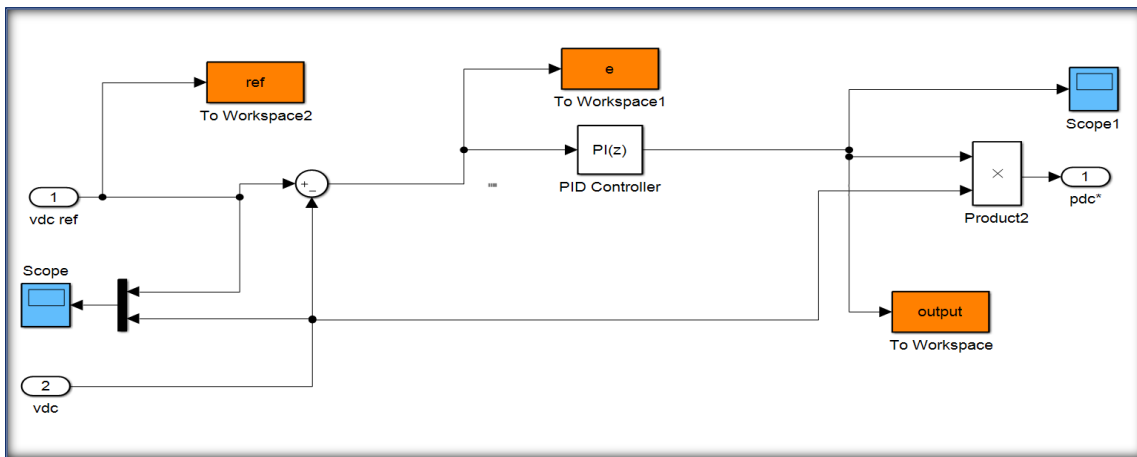


Figure (IV-7) : Schémas de régulation de la tension du bus continu par un PI pour les deux méthodes PQ et DPC.

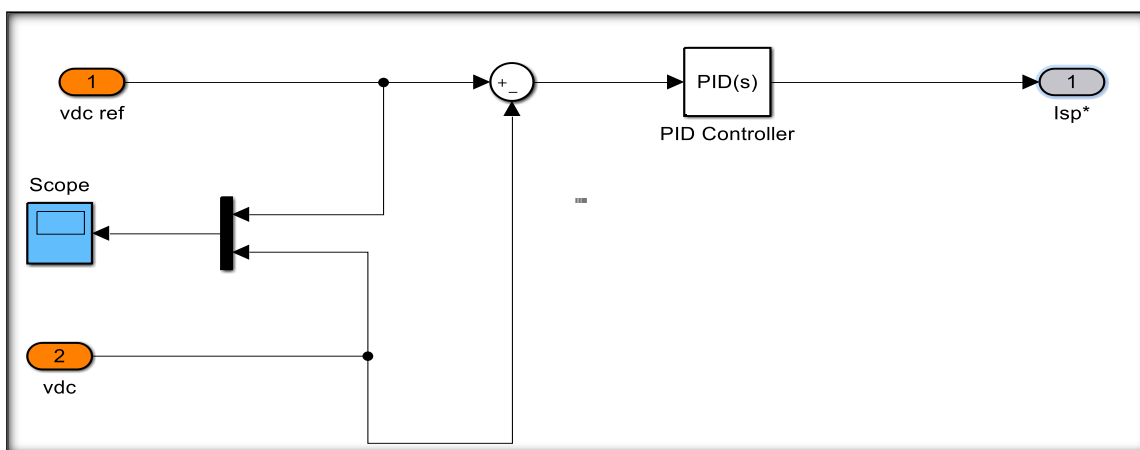


Figure (IV-8) : Schémas de régulation de V_{dc} par un PI pour les méthodes DQ, DCC et ICC.

IV.4 Résultats de simulation et interprétations :

Nous avons pris un système de charges équilibrés pour une charge non linéaire et un filtre actif parallèle FAP (un onduleur triphasé à trois bras) pour dépolluer ce système. Nous

considérons que notre système de tension est sinusoïdal et équilibré et pour déterminer les courants de références, nous avons utilisé des algorithmes basés sur plusieurs méthodes : **PQ**, **SRF(DQ)**, **DPC**, **DCC** et **ICC**.

IV.4.1 Méthode de puissance instantanée-PQ :

Élimination des harmoniques à l'aide d'un filtre de puissance active basé sur la théorie du calcul de la puissance instantanée a été étudié par simulation sous Matlab. Les figures (IV-9) et (IV-10) montrent la structure d'algorithme de la méthode de puissances instantanées **PQ** utilisée.

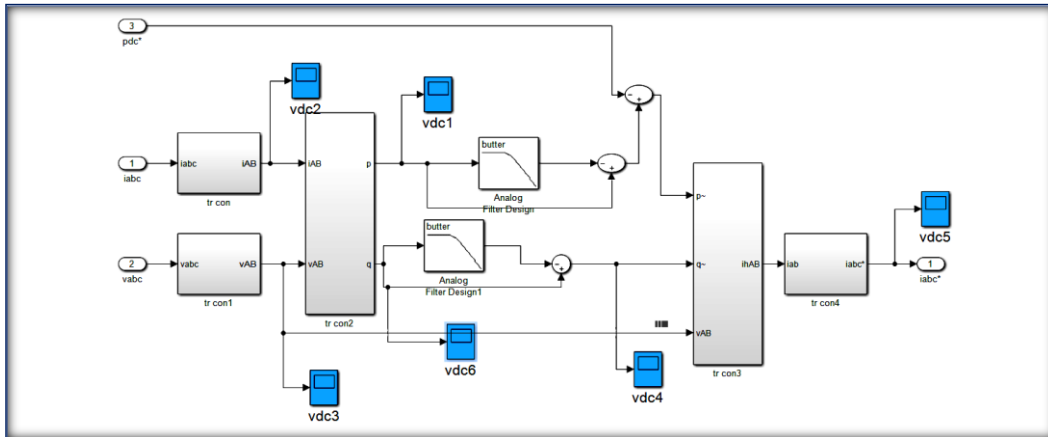


Figure (IV-9) : Schéma de principe de la méthode des puissances instantanées PQ.

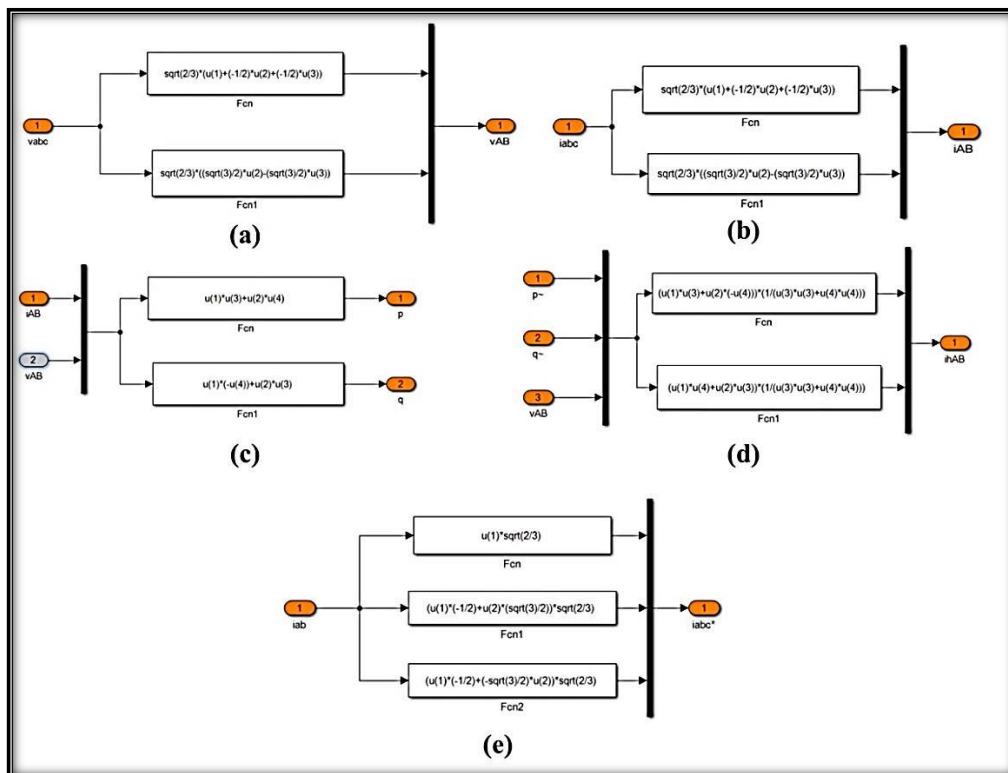


Figure (IV-10) : Schéma de transformations : a) Repère abc vers $\alpha\beta$ de la tension, b) Repère abc vers $\alpha\beta$ du courant c) Calcul de puissances p-q, d) Calcul des courants de références dans le repère $\alpha\beta$, e) Calcul des courants de références dans le repère abc.

Les figures (IV-11), (IV-12), (IV-13), (IV-14), (IV-15) et (IV-16) présentent les résultats obtenus en utilisant l'extraction des courants harmoniques basée sur la méthode de puissances instantanées PQ .

La figure (IV-11) montre que le courant avant d'injecter les courants d'harmoniques dans le réseau est déformé avec THD de 29.62 % (figure (IV-15)) et ce dernier prend la forme sinusoïdale quand injecter les courants d'harmoniques avec THD de 1.36 % (figure (IV-16)) une valeur nettement inférieure à 5 % (conformément à la norme IEEE standard 519) par contre la tension du réseau avant et après le filtre actif parallèle est sinusoïdale (figure (IV-11)). La figure (IV-12) présente le courant du filtre injecté dans le réseau.

Le régulateur proportionnel-intégral (PI) permet de maintenir la tension continue aux bornes du condensateur C_{dc} constante et arrive à atteindre sa valeur de référence V_{dc-ref} fixée à 620 V dans notre cas (figure IV-13) avec un dépassement de 1.29 %.

A partir de la figures (IV-11) on remarque que le filtre corrigé le facteur de puissance est unitaire, la tension et le courant de source sont en phase ce qui permet la compensation de la puissance réactive (figure (IV-14)) et une bonne régulation du courant du filtre actif par MLI qui joue le rôle d'un régulateur du courant.

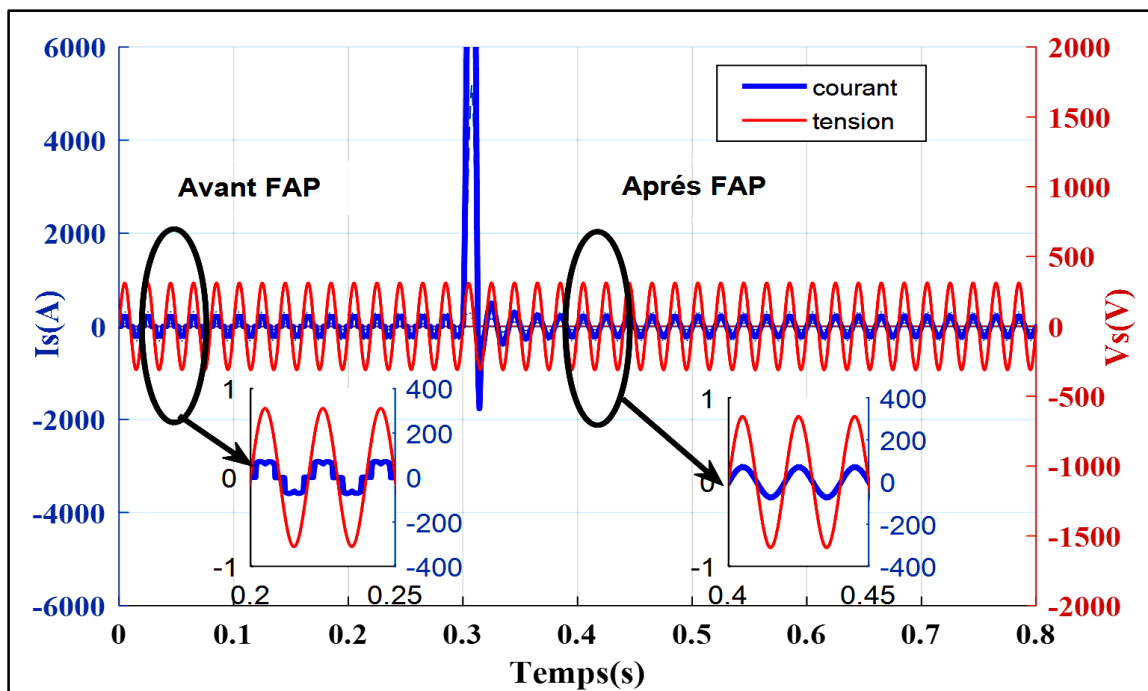


Figure (IV-11) : Courant de source-PQ.

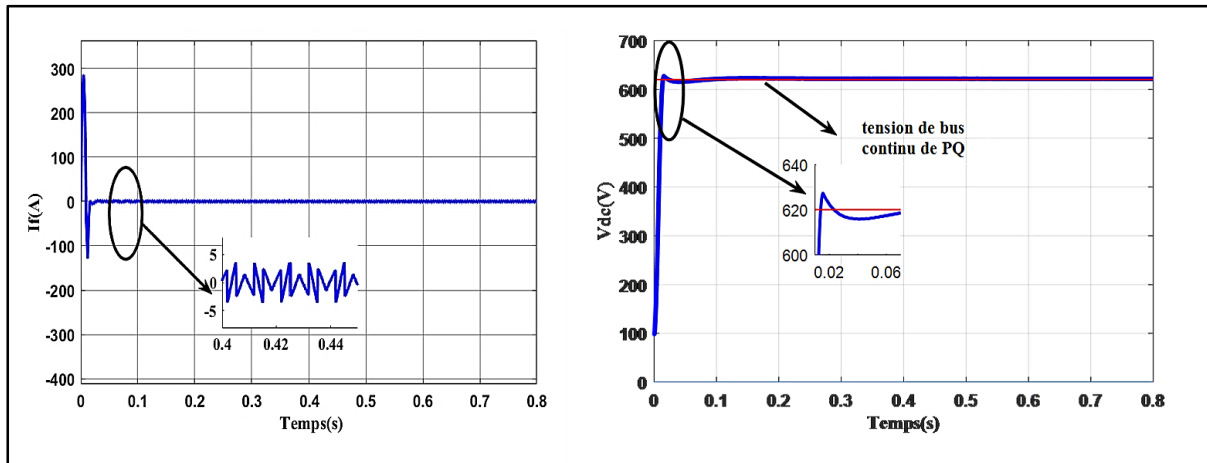


Figure (IV-12) : Courant du filtre-PQ.

Figure (IV-13) : Tension de bus continu V_{dc} -PQ.

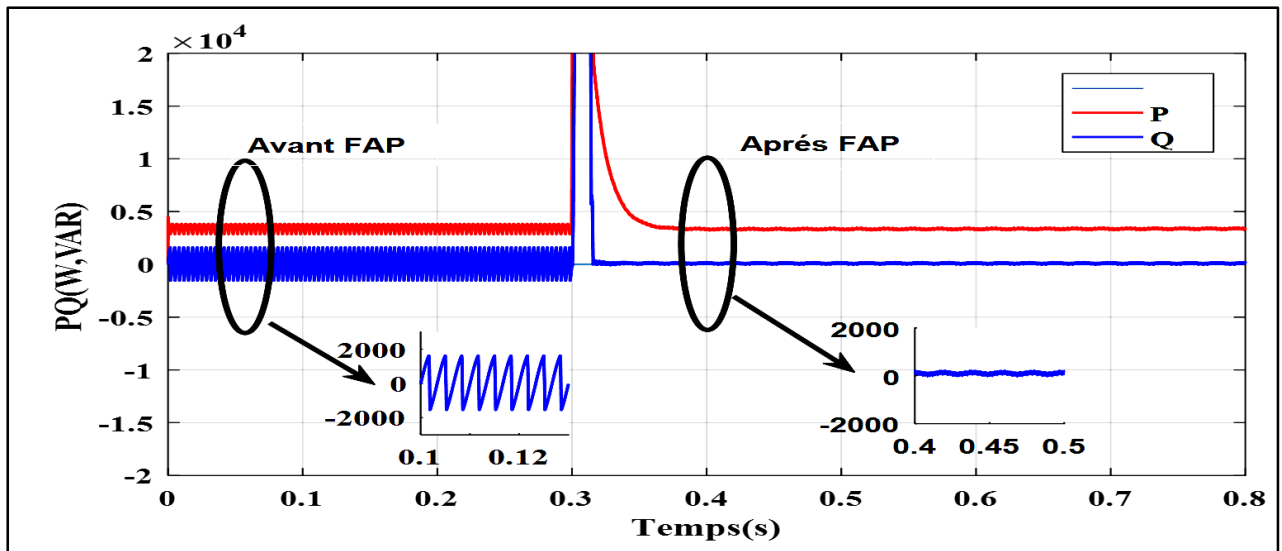


Figure (IV-14) : Puissance active et réactive-PQ.

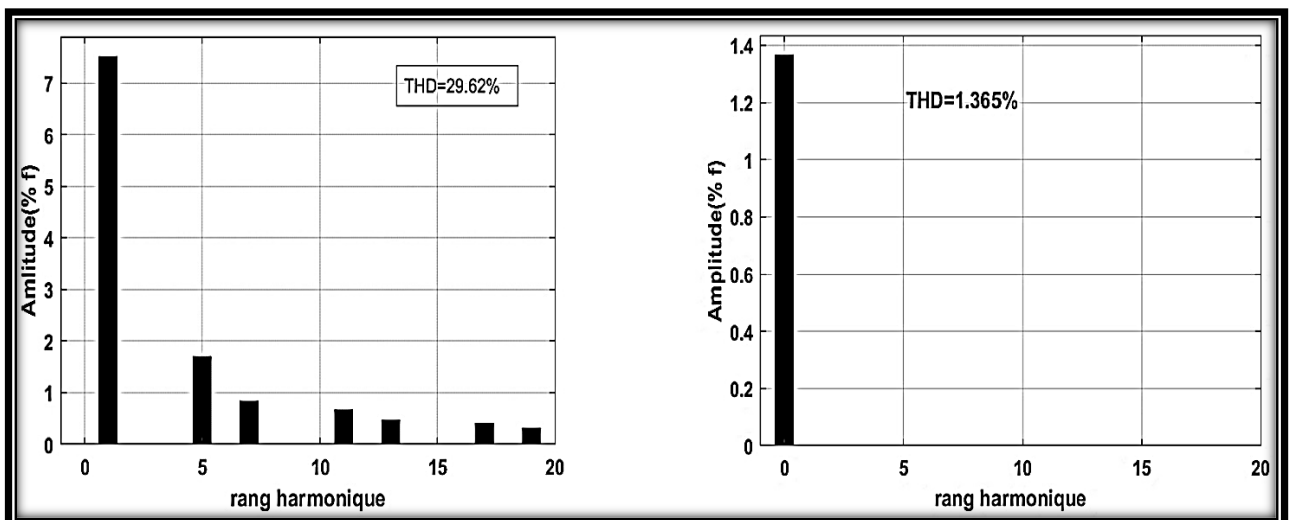


Figure (IV-15) : Spectre d'harmonique pour I_{ch} -PQ

Figure (IV-16) : Spectre d'harmonique pour I_s -PQ.

IV.4.2 Méthode de référentiel synchrone (SRF) –DQ :

Les figures (IV-17) et (IV-18) montrent la structure d'algorithme de la méthode de référentiel synchrone *DQ* utilisée.

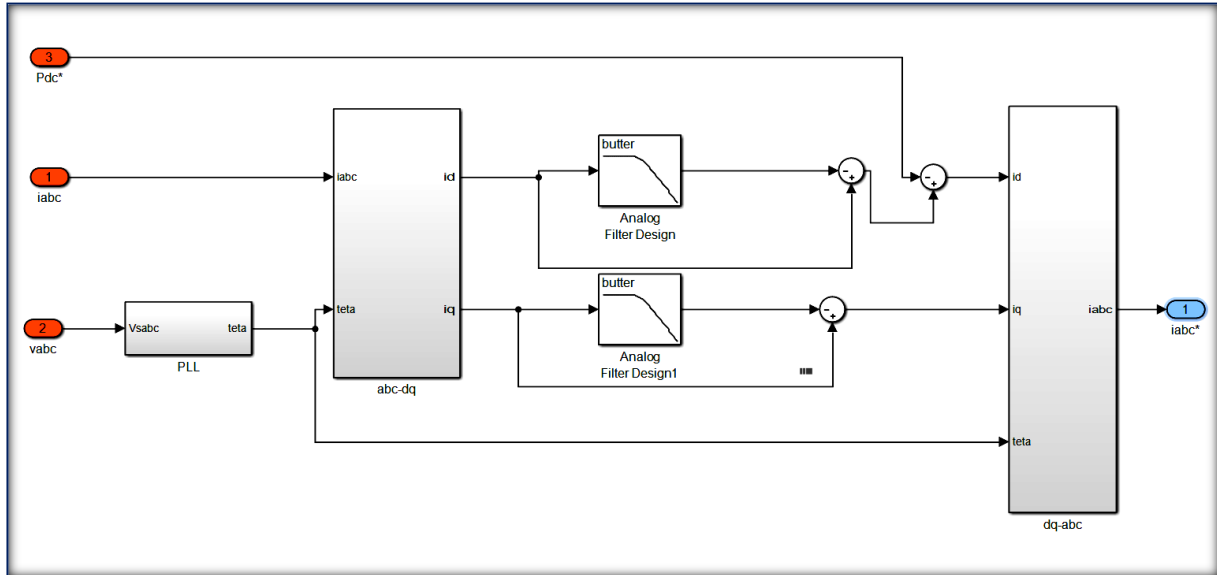


Figure (IV-17) : Schéma de principe de la méthode -DQ.

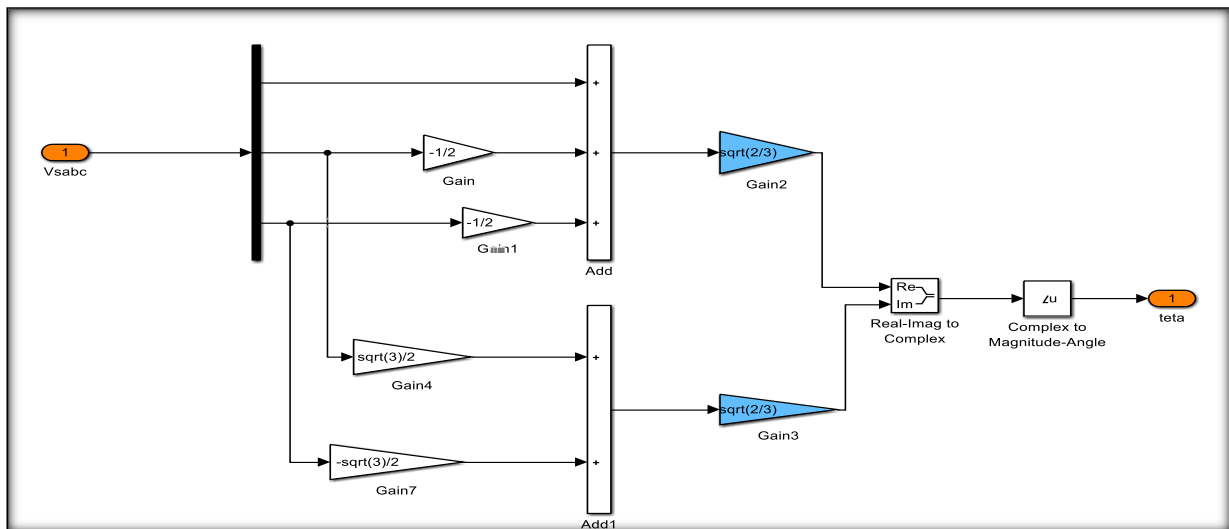


Figure (IV-18) : Schéma de PLL de la méthode -dq.

Les figures (IV-19), (IV-20), (IV-21), (IV-22) et (IV-23) présentent les résultats obtenus en utilisant la méthode de référentiel synchrone *DQ*.

La figure (IV-19) donne le courant et la tension de phase, ce courant est pratiquement sinusoïdal et en phase avec la tension du réseau avec un THD égale à 1.338% (figure (IV-23)) par contre la tension avant et après le filtre actif parallèle est sinusoïdale, la figure (IV-20) présentes la forme du courant de filtre actif. A partir de la figures (IV-19) on remarque que le filtre corrigé le facteur de

puissance est unitaire, la tension et le courant de source sont en phase ce qui permet la compensation de la puissance réactive (figure (IV-22)).

On remarque sur la figure (IV-21) que la de tension de bus continu, se stabilise sur sa valeur de référence imposée par la commande avec un dépassement de 6.29%.

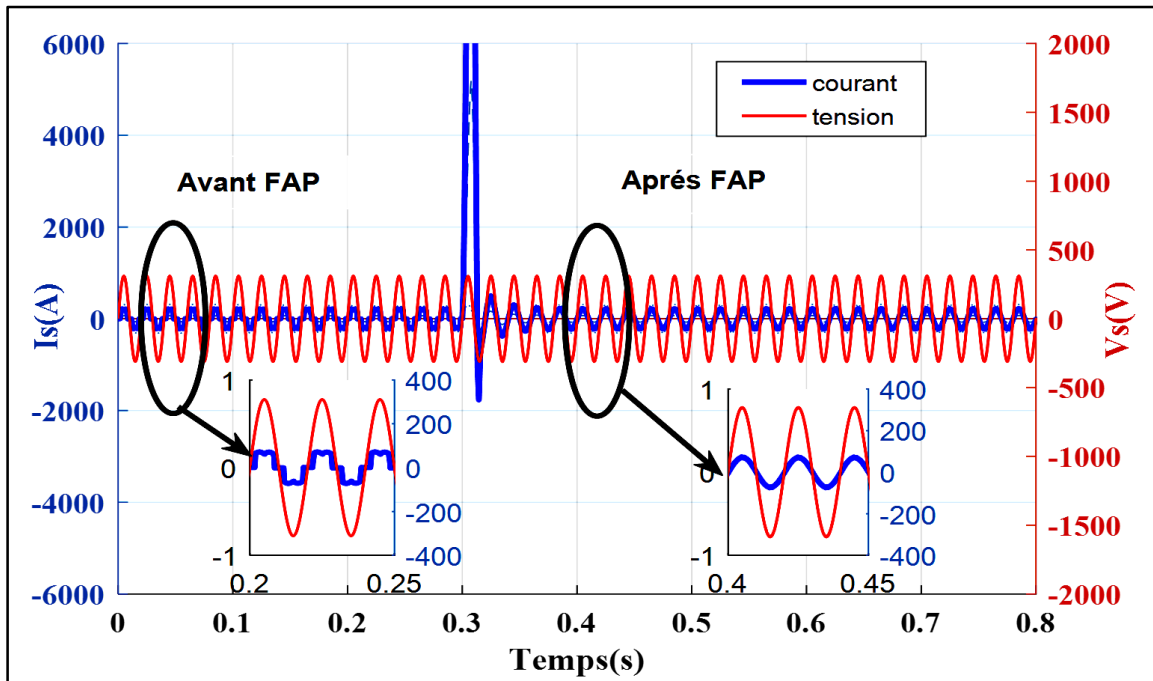


Figure (IV-19) : Courant et tension de source-DQ.

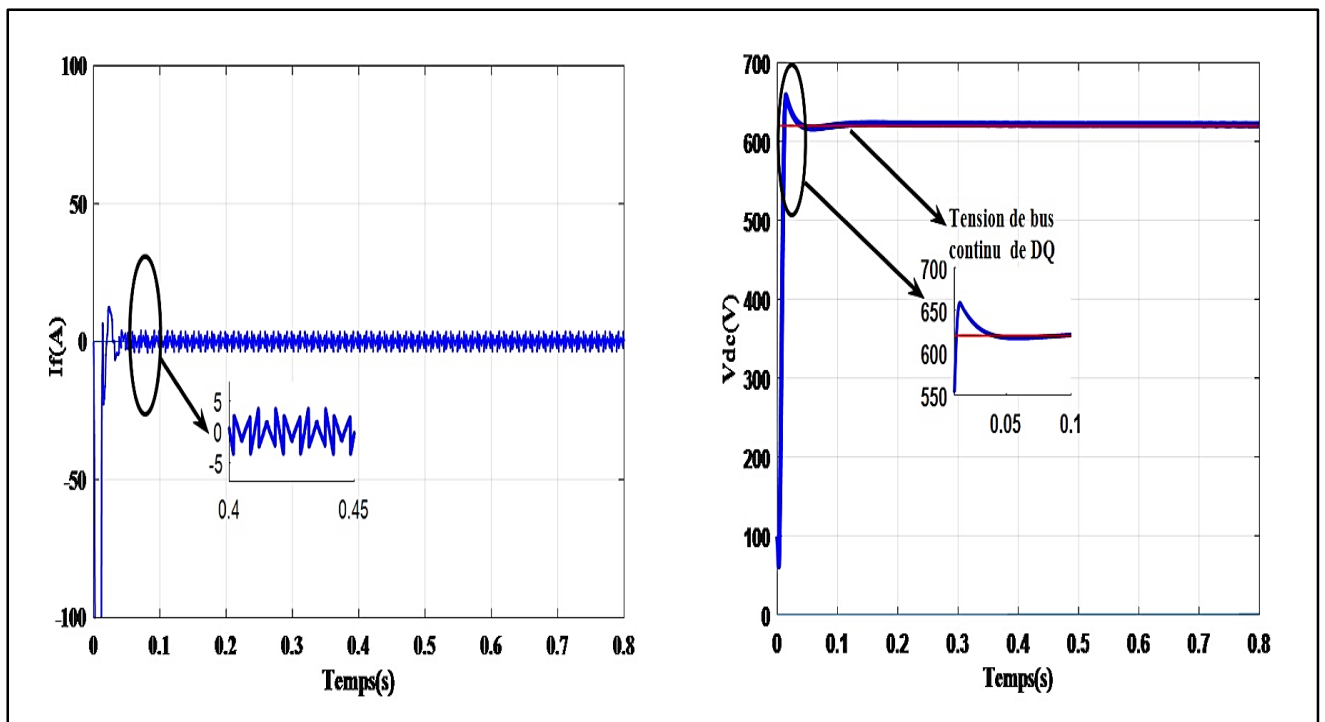


Figure (IV-20) : Courant de filtre-DQ.

Figure (IV-21) : Tension V_{dc} de bus Continu-DQ.

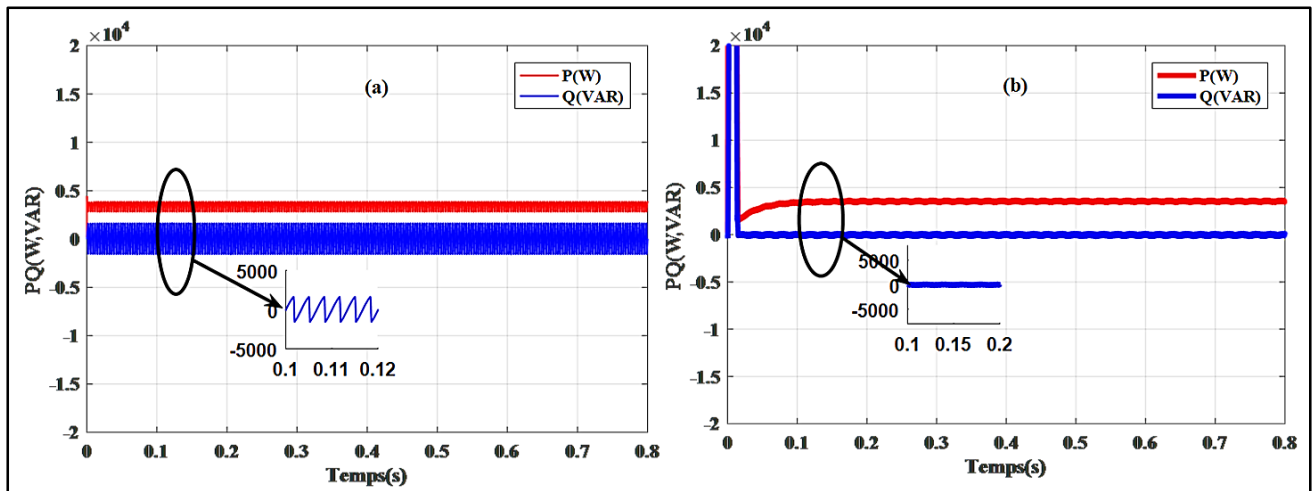


Figure (IV-22) : Puissance active et réactive-DQ.

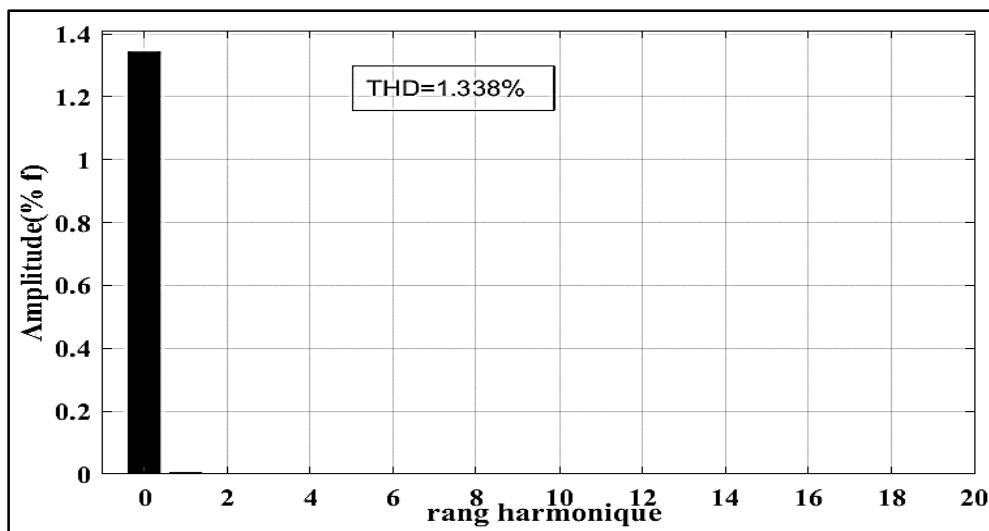


Figure (IV-23) : Spectre d'harmonique I_s -DQ.

IV.4.2.3 Méthode de commande directe du courant-DCC :

La figures (IV-24) montre la structure d'algorithme de la méthode de commande directe du courant *DCC* utilisée.

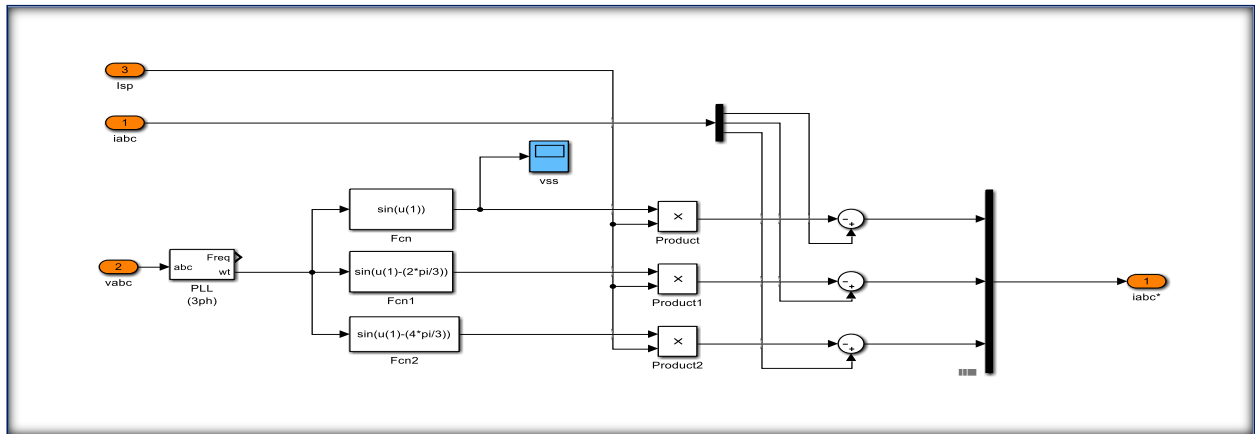


Figure (IV-24) : Schéma de principe de la méthode DCC.

Les figures (IV-25), (IV-26), (IV-27), (IV-28) (IV-29) et (IV-30) présentent les résultats obtenus en utilisant la méthode de commande directe du courant *DCC*.

Les figures (IV-25) et (IV-26) donnent le courant et la tension de phase avant et après le FAP, le courant est pratiquement sinusoïdal et en phase avec la tension du réseau avec un THD égale à 1.287% (figure (IV-30)) par contre la tension avant et après le filtre actif parallèle est sinusoïdale, la figure (IV-27) présentes la forme du courant de filtre actif. A partir de la figures (IV-26) on remarque que le filtre corrigé le facteur de puissance est unitaire, la tension et le courant de source sont en phase ce qui permet la compensation de la puissance réactive (figure (IV-29)).

On remarque sur la figure (IV-28) que la de tension de bus continu, se stabilise sur sa valeur de référence imposée par la commande avec un dépassement de 3.06 %.

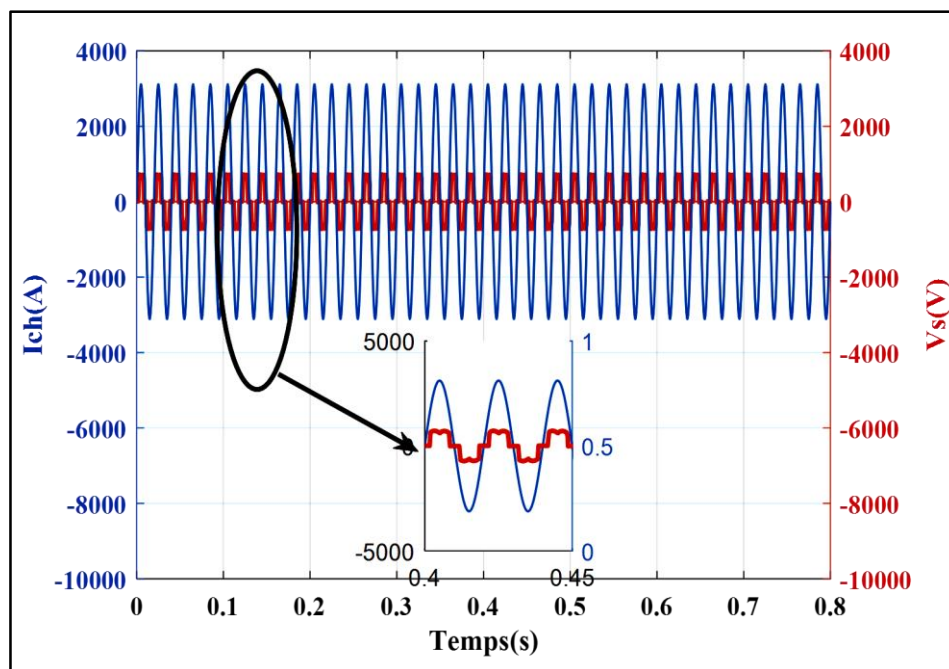


Figure (IV-25) : Courant et tension de charge avant le FAP-DCC.

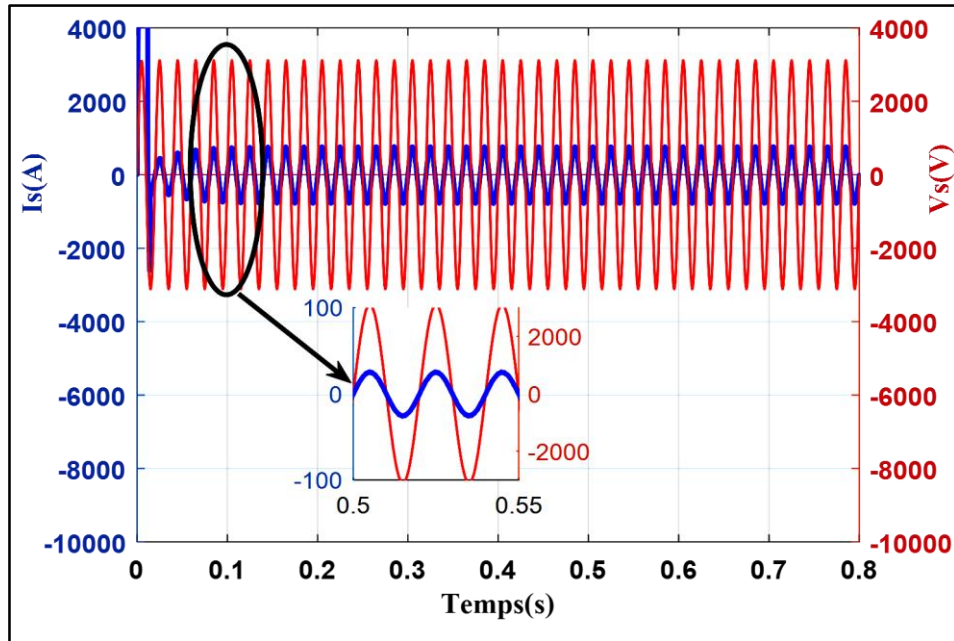


Figure (IV-26) : Courant et tension de source après le FAP-DCC.

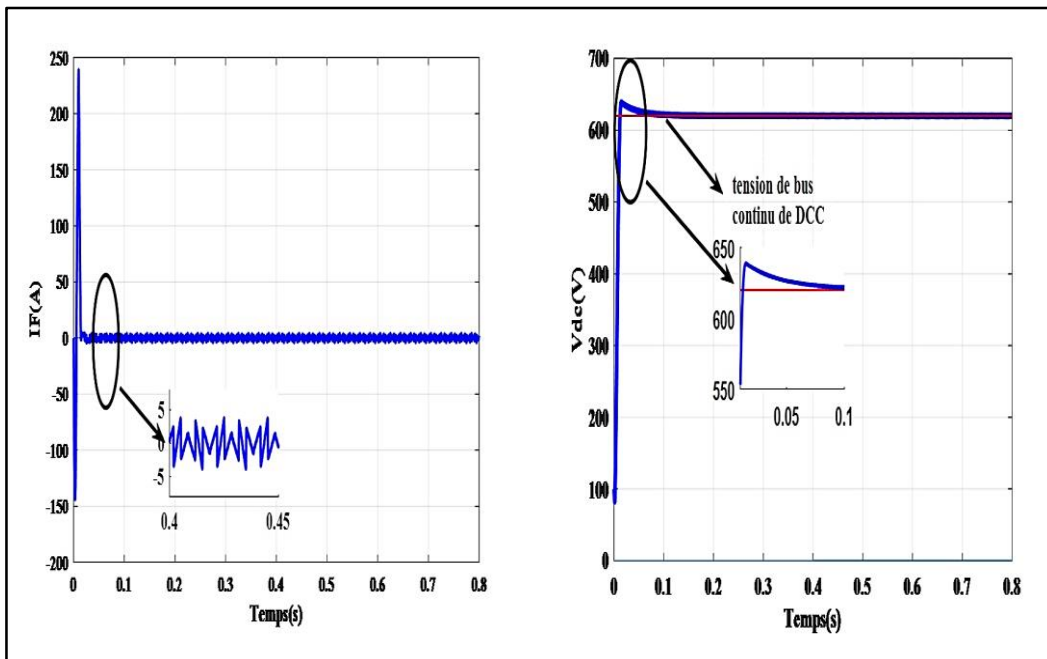


Figure (IV-27) : Courant du filtre-DCC.

Figure (IV-28) : Tension V_{dc} de bus continu-DCC.

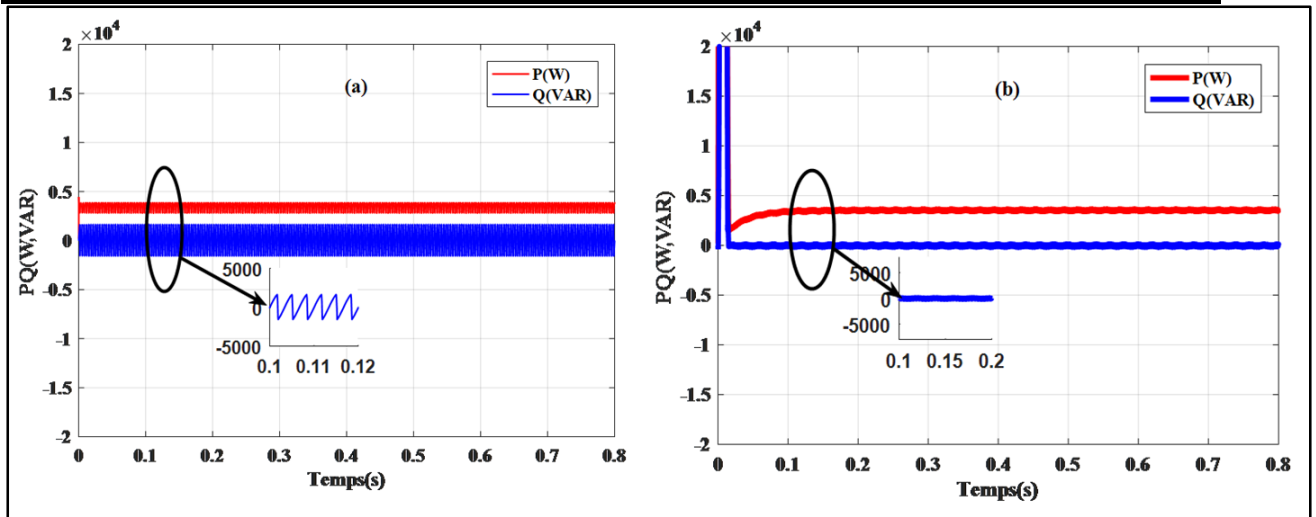


Figure (IV-29) : Puissance active et réactive-DCC : a) Avant le FAP, b) Après le FAP.

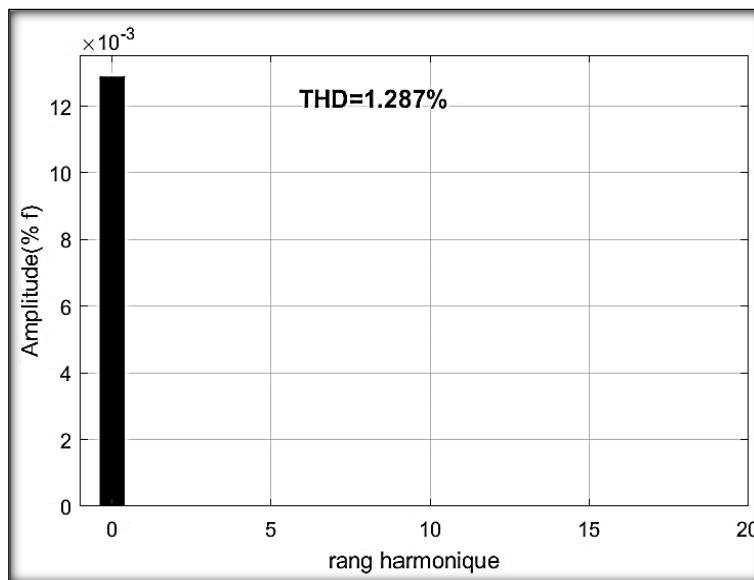


Figure (IV-30) : Spectre d'harmonique I_s -DCC.

IV.4.2.4 Méthode de commande indirecte du courant-ICC :

La figure (IV-31) montre la structure d'algorithme de la méthode de commande indirecte du courant ICC utilisée.

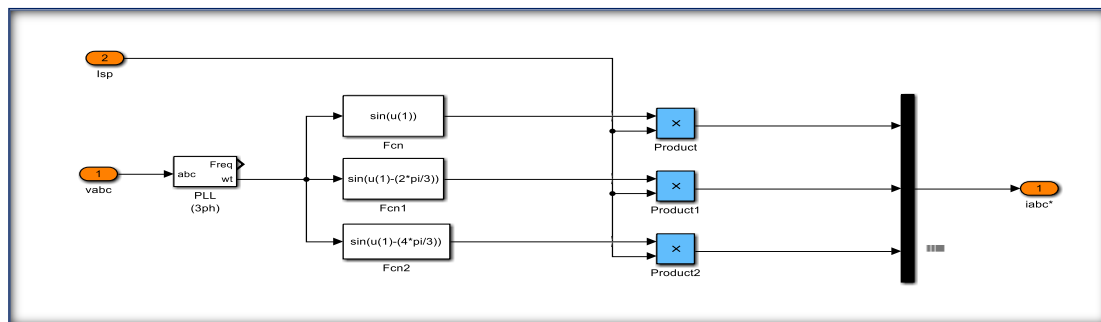


Figure (IV-31) : Schéma de principe de la méthode-ICC.

Les figures (IV-32), (IV-33), (IV-34), (IV-35), (IV-36) et (IV-37) présentent les résultats obtenus en utilisant la méthode de commande direct du courant *ICC*.

Les figures (IV-32) et (IV-33) donnent le courant et la tension de phase avant et après le FAP, le courant est pratiquement sinusoïdal et en phase avec la tension du réseau avec un THD égale à 1.287 % (figure (IV-37)) par contre la tension avant et après le filtre actif parallèle est sinusoïdale, la figure (IV-34) présentes la forme du courant de filtre actif. A partir de la figures (IV-33) on remarque que le filtre corrigé le facteur de puissance est unitaire, la tension et le courant de source sont en phase ce qui permet la compensation de la puissance réactive (figure (IV-36)) et une bonne régulation du courant du filtre actif par MLI qui joue le rôle d'un régulateur du courant.

On remarque sur la figure (IV-35) que la de tension de bus continu, se stabilise sur sa valeur de référence imposée par la commande avec un dépassement de 3.06 %.

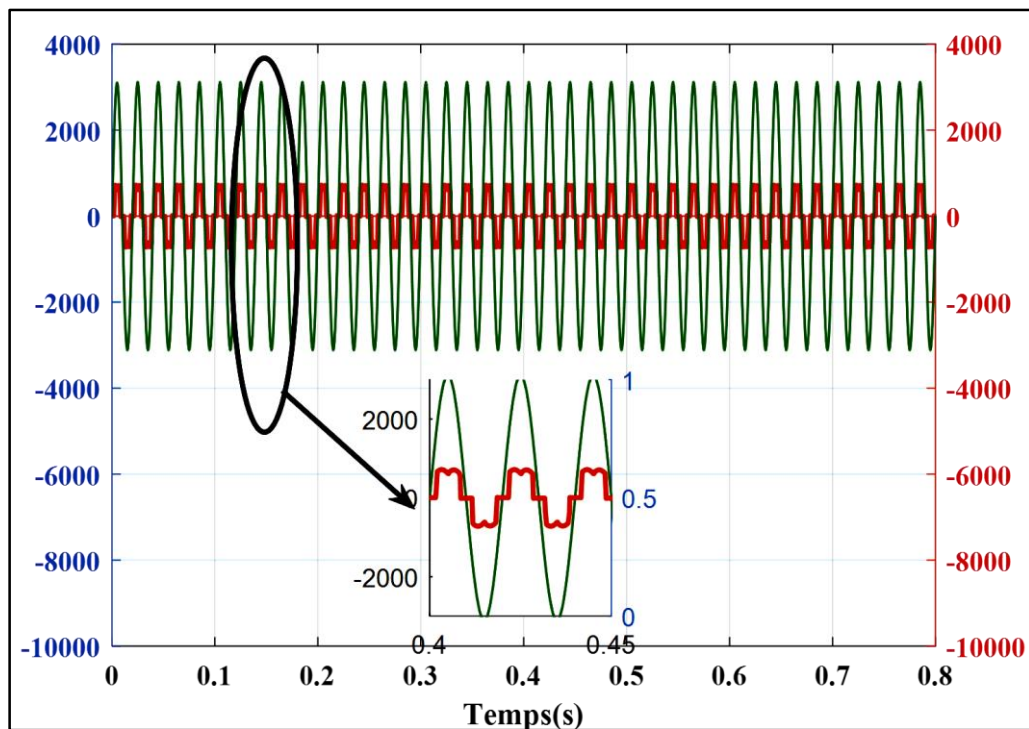


Figure (IV-32) : Courant et tension de charge avant le FAP -ICC.

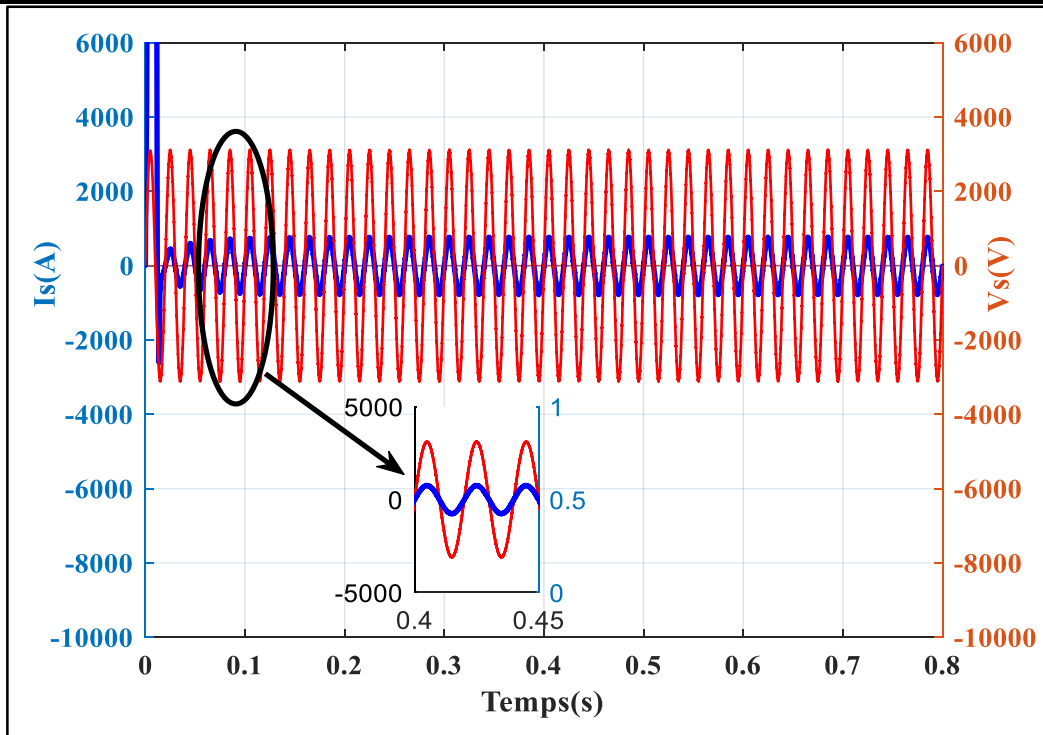


Figure (IV-33) : Courant et tension de source après le FAP –ICC.

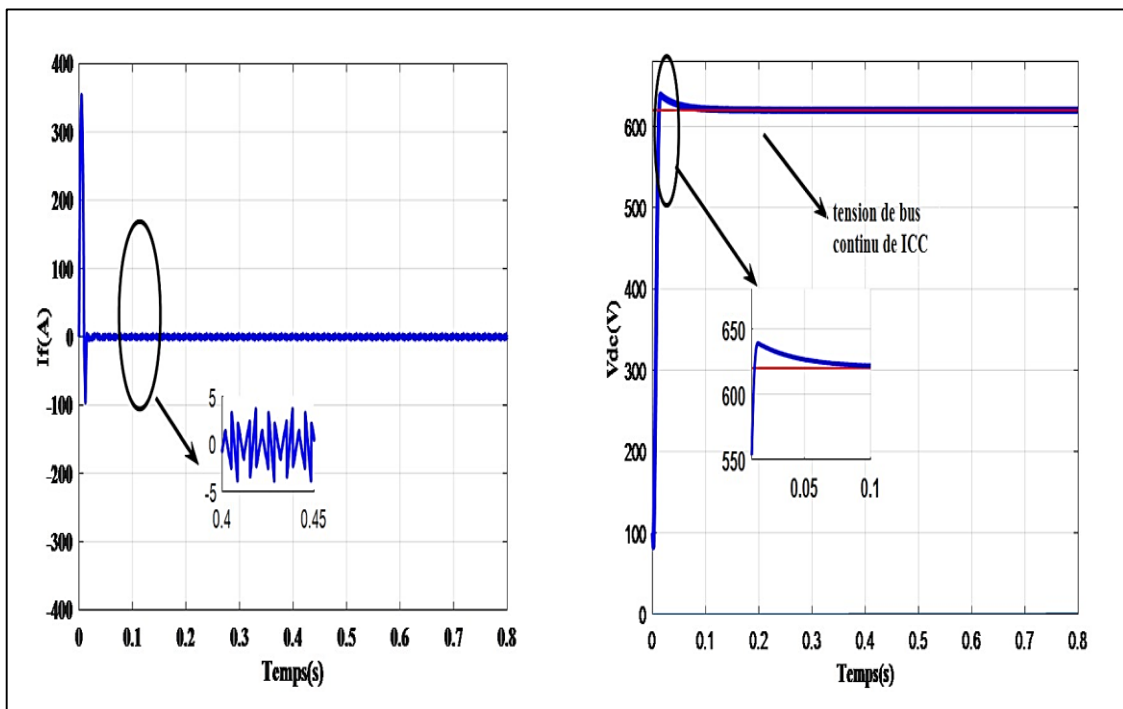


Figure (IV-34) : Courant de filtre-ICC.

Figure (IV-35) : Tension Vdc de bus continu-ICC.

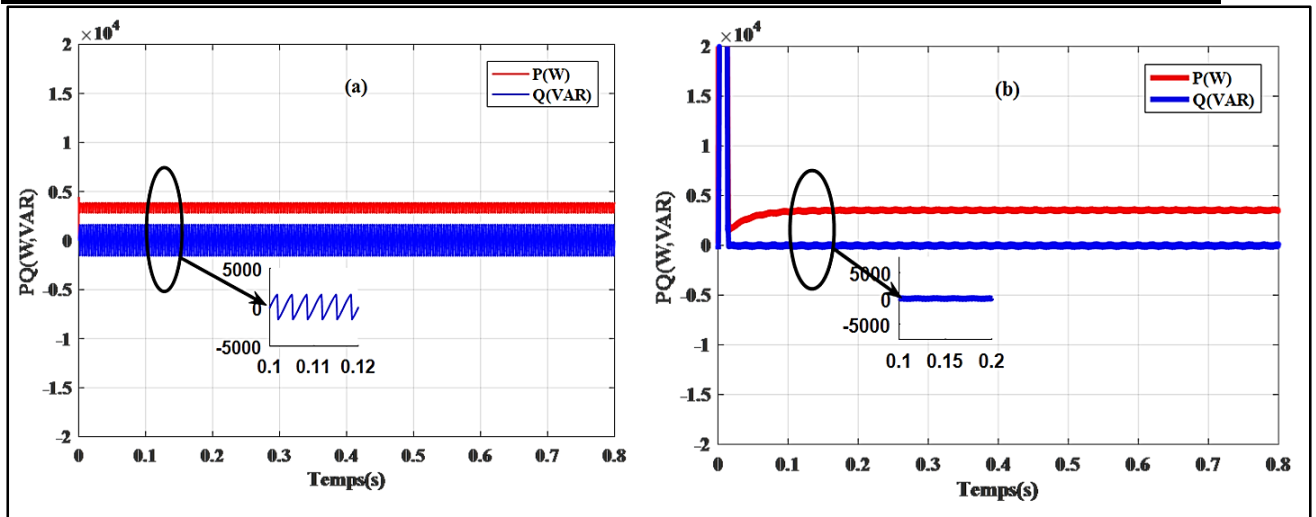


Figure (IV-36) : Puissance active et réactive-ICC. : a) Avant le FAP, b) Après le FAP

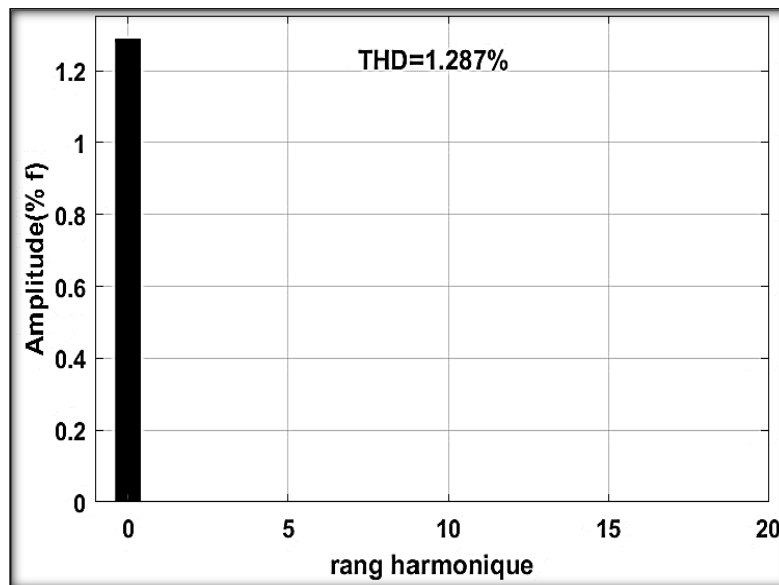


Figure (IV-37) : Spectre harmonique Is-ICC.

IV.4.2.5 Méthode de commande directe de puissance-DPC :

La figure (IV-38) montre la structure d'algorithme de la méthode de commande directe de puissance *DPC* utilisée.

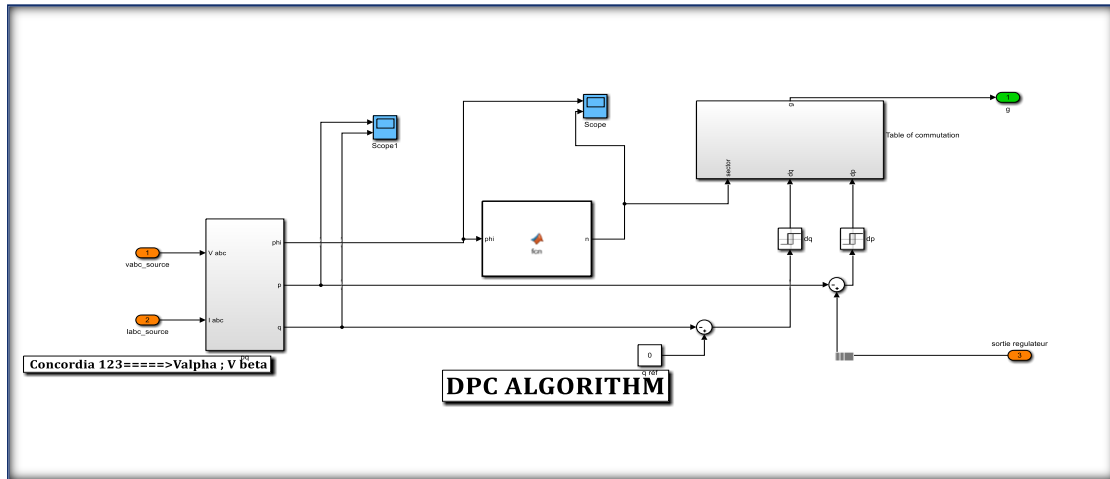


Figure (IV-38) : Schéma de principe de la méthode DPC.

Les figures (IV-39), (IV-40), (IV-41), (IV-42) et (IV-43) présentent les résultats obtenus en utilisant la méthode de commande direct de puissance DPC.

La figure (IV-39) donne le courant et la tension de phase avant et après le FAP, le courant est pratiquement sinusoïdal et en phase avec la tension du réseau avec un THD égale à 0.889% (figure (IV-43)) par contre la tension avant et après le filtre actif parallèle est sinusoïdale, la figure (IV-40) présentes la forme du courant de filtre actif. A partir de la figures (IV-39) on remarque que le filtre corrigé le facteur de puissance est unitaire, la tension et le courant de source sont en phase ce qui permet la compensation de la puissance réactive (figure (IV-42)).

On remarque sur la figure (IV-41) que la de tension de bus continu, se stabilise sur sa valeur de référence imposée par la commande avec un dépassement de 1.58 %.

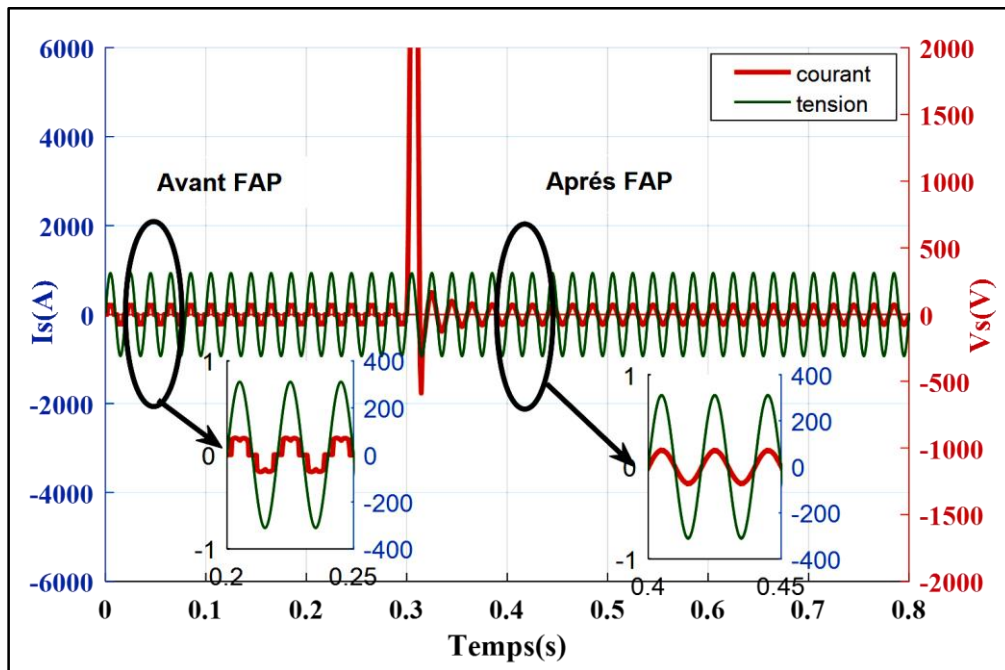


Figure (IV-39) : Schéma de courant et tension de source par la méthode DPC

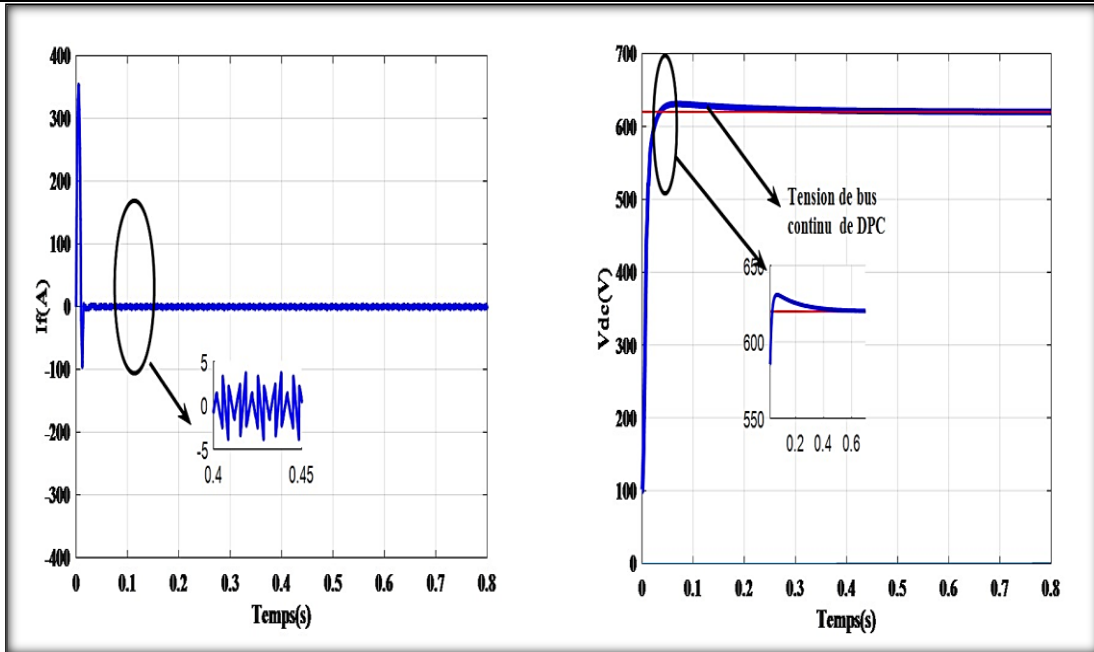


Figure (IV-40) : Courant de filtre-DPC

Figure (IV-41) : Tension V_{dc} de bus continu-DPC

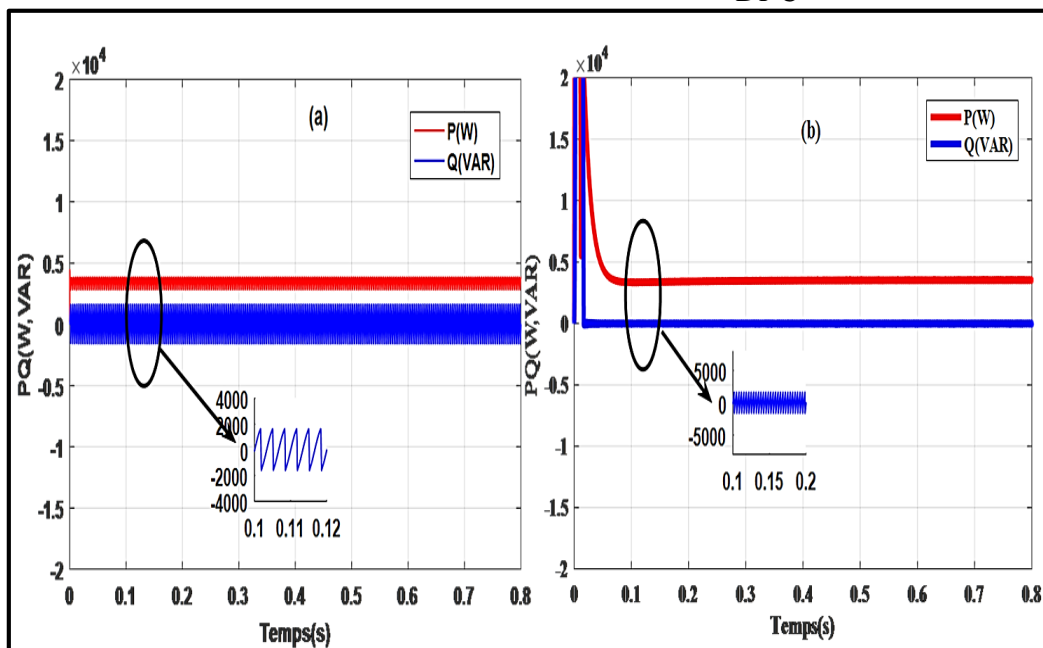


Figure (IV-42) : Puissance active et réactive-DPC : a) Avant le FAP, b) Après le FAP.

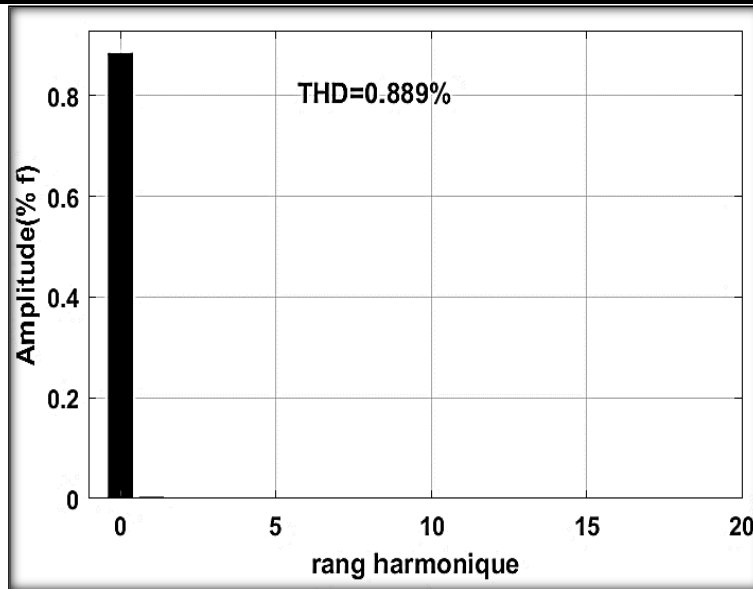


Figure (IV-43) : Spectre harmonique Is-DPC.

IV.4.2.6 Méthode de commande directe de puissance avec reseaux de neurones-DPC_ANN :

Les figures (IV-44) et (IV-45) montrent la structure d'algorithme de la méthode de commande directe de puissance avec réseaux de neurones **DPC-ANN** utilisée. Dans cette partie nous étudions la commande **DPC** en utilisant un régulateur **ANN**.

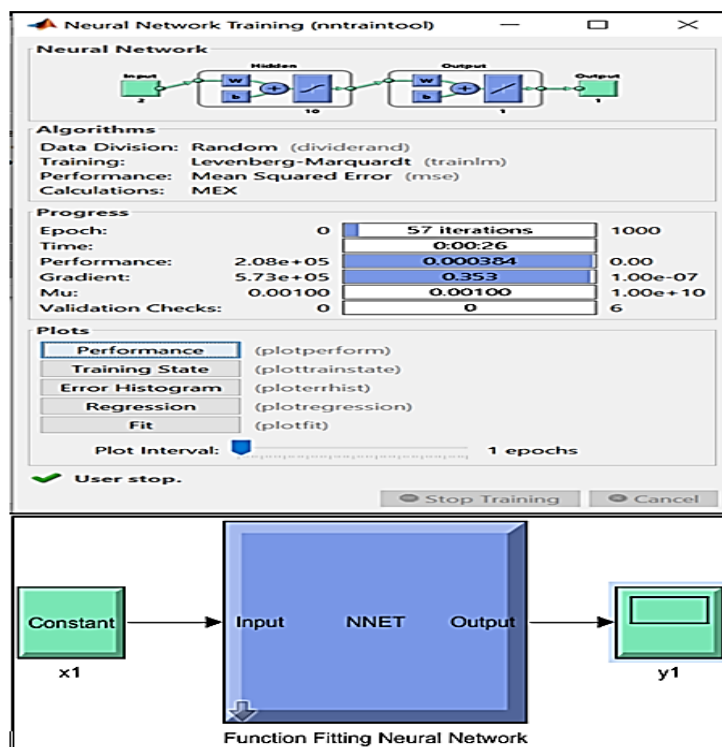


Figure (IV-44) : Processus d'apprentissage avec les réseaux de neurones.

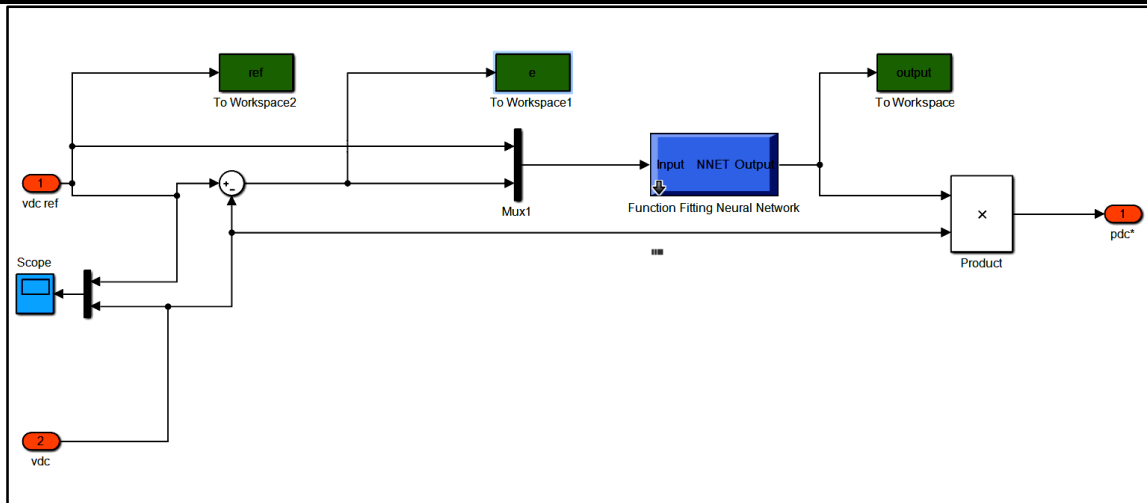


Figure (IV-45) : Schémas de régulation de V_{dc} par un ANN méthode_DPC.

Les figures (IV-46) donnent le courant et la tension de phase après le FAP, le courant est pratiquement sinusoïdal et en phase avec la tension du réseau

La figure (IV-47) montre que la de tension de bus continu, se stabilise sur sa valeur de référence imposée par la commande avec un dépassement de 0 % et la figure (IV-48) représente le spectre du

courant avec THD égale à 0.824 % après le FAP. A partir de la figures (IV-46) on remarque que le filtre corrigé le facteur de puissance est unitaire, la tension et le courant de source sont en phase ce qui permet la compensation de la puissance réactive (figure (IV-49)).

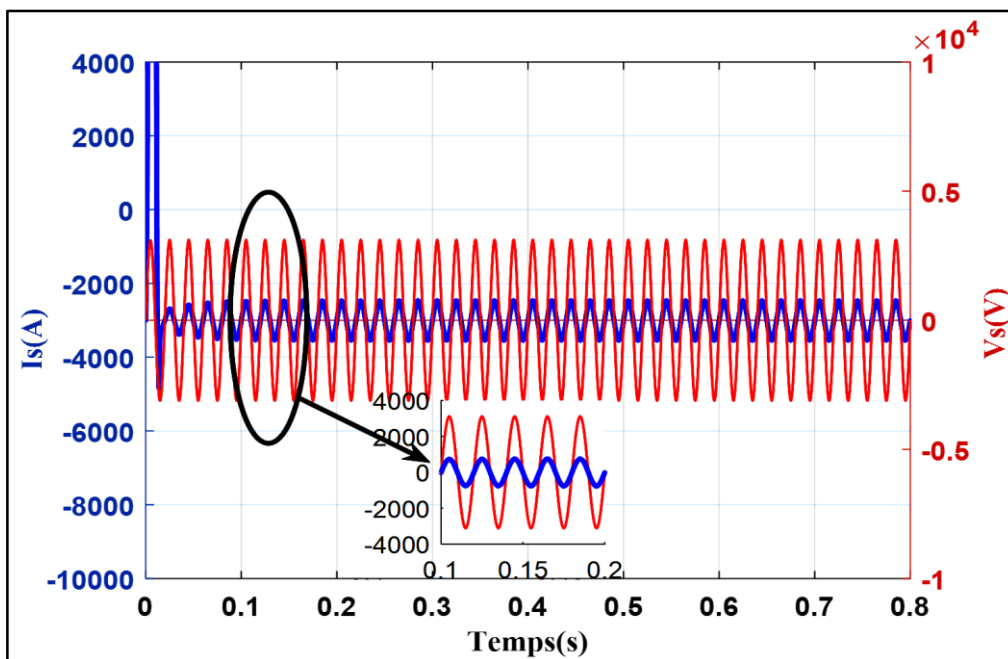


Figure (IV-46) : Schéma de courant et tension de source par la méthode DPC.

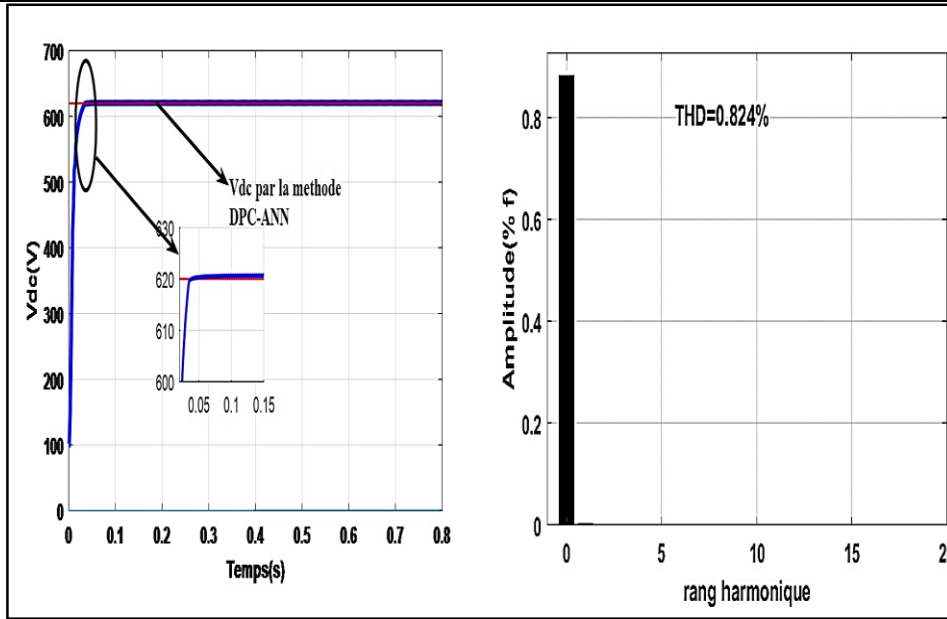


Figure (IV-47) : Tension de bus continu-
DPC-ANN.

Figure (IV-48) : Spectre harmonique-
DPC-ANN.

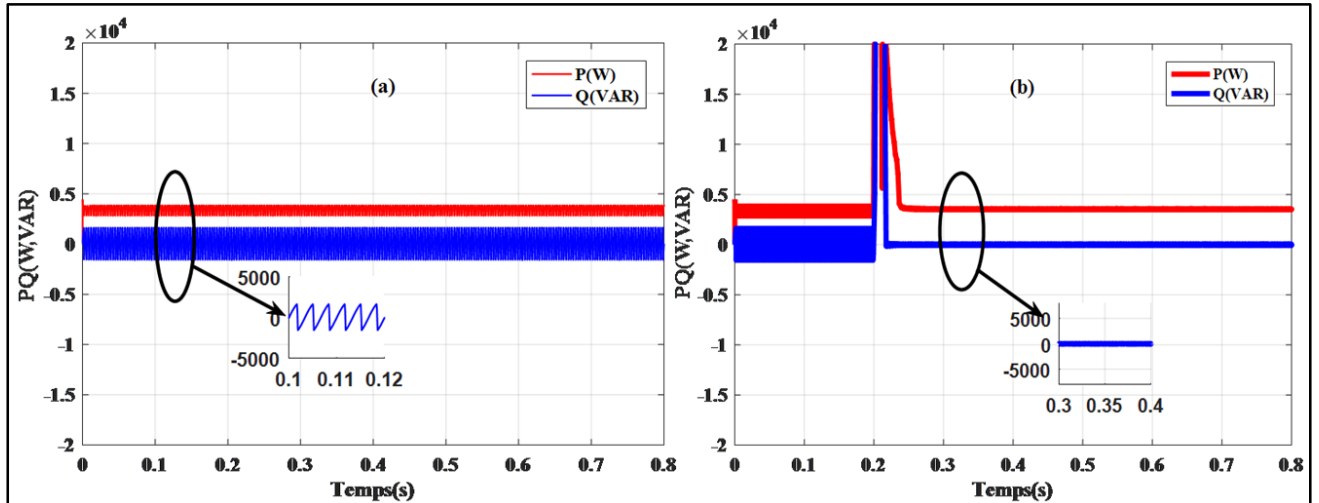


Figure (IV-49) : Puissance active et réactive-DPC-ANN.

IV.5 Étude comparatif entre les différentes stratégies de commande :

Le tableau (IV-2) représente les résultats de différentes stratégies de commande du FAP.

Tableau IV- 2: Les différentes stratégie de commande et leur performance.

<i>Stratégie de commande</i>	<i>Qualité des courants (%)</i>	<i>Régulateur PI</i>	<i>Depassement (%)</i>	<i>Temps de reponse (s)</i>
<i>PQ</i>	<i>THD=1.358</i>	<i>$K_P = 0.5$ $K_I = 0.3$</i>	<i>1.29</i>	<i>0.045</i>
<i>DQ</i>	<i>THD=1.338</i>	<i>$K_P = 0.5$ $K_I = 0.3$</i>	<i>6.29</i>	<i>0.0171</i>
<i>DCC</i>	<i>THD=1.287</i>	<i>$K_P = 0.3305$ $K_I = 2.6433$</i>	<i>3.06</i>	<i>0.01093</i>
<i>ICC</i>	<i>THD=1.287</i>	<i>$K_P = 0.3305$ $K_I = 2.6433$</i>	<i>3.06</i>	<i>0.0109</i>
<i>DPC</i>	<i>THD=0.887</i>	<i>$K_P = 0.5$ $K_I = 0.65$</i>	<i>1.58</i>	<i>0.021</i>
<i>DPC-ANN</i>	<i>THD=0.8</i>	<i>/</i>	<i>0</i>	<i>0.0207</i>

IV.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons simulé et interprété les résultats obtenus par les principales méthodes d'identification utilisées dans le système de filtrage actif, toutes dans le but spécifique d'identifier et de générer les courants harmoniques produits par la charge non linéaire. Les méthodes PQ, DQ, DPC, DPC_ANN, DCC et ICC sont étudiées dans cette partie.

PQ, DQ, DPC et DPC_ANN réduit leur complexité du modèle par l'application de la transformation de Concordia qui convertit le système triphasé en un système biphasé équivalent. Cette transformation a permis une réduction significative de la complexité dans la résolution des équations mathématiques du système.

En revanche, les méthodes DCC et ICC sont plus simples et reposent sur le signal de sortie du régulateur de tension continue de l'onduleur. Les résultats obtenus avec les méthodes DCC et ICC sont très significatifs, avec un THD du courant de source 1,28% et un temps de repense égale 0.109%. Cela démontre l'efficacité de ces techniques pour réduire les harmoniques du courant de source. Par contre la méthode DPC est complexe par rapport les différentes techniques mais d'après les résultats on remarque que le THD est meilleure et égale à 0.889%. Pour cette raison, nous avons ajouté un

Chapitre IV : Simulation d'un filtre actif parallèle FAP et interprétations des résultats
régulateur réseaux de neurones pour améliorer les performances et éliminer le dépassement. Enfin la méthode DPC-ANN est considérée comme un choix idéal pour notre système de filtrage actif.

Conclusion générale

Conclusion générale :

En conclusion, ce mémoire met en lumière les multiples problèmes rencontrés dans les réseaux électriques au niveau du point de couplage commun (PCC), notamment les variations de tension, les ondulations dues à des charges non équilibrées et/ou aux harmoniques. Ces problèmes sont souvent le résultat de l'exploitation de l'énergie et, dans une large mesure, de la consommation de puissance réactive, ce qui entraîne des perturbations sur la ligne de transmission.

L'objectif principal de ce mémoire est d'améliorer la qualité de l'énergie électrique en se concentrant sur la dépollution harmonique dans les réseaux électriques de distribution. Pour ce faire, il est nécessaire de rechercher des solutions permettant aux charges non linéaires d'absorber une énergie sinusoïdale avec un facteur de puissance proche de l'unité.

Parmi les solutions envisagées, le filtrage actif de type shunt a été choisi en raison de ses nombreux avantages. Dans le cadre de cette étude, la charge non linéaire est représentée par un pont redresseur triphasé alimentant une charge inductive, ce qui génère un courant absorbé alternatif très riche en harmoniques. Le filtre actif parallèle triphasé est un dispositif efficace pour réduire le courant harmonique dans les systèmes de distribution électrique. Son processus de filtration repose sur une méthode de contrôle appropriée permettant d'extraire le courant de référence et de réguler la tension du condensateur du bus continu de l'onduleur. Ce type de filtre est généralement mis en œuvre avec un onduleur triphasé à source de tension à trois bras, où les commutations des interrupteurs de puissance de l'onduleur sont générées par la modulation de largeur d'impulsion. Cette modulation permet de contrôler avec précision la forme d'onde du courant injecté dans le réseau, en ajustant la largeur des impulsions pour obtenir le courant de référence souhaité. Ainsi, le filtre actif parallèle triphasé offre une solution efficace pour atténuer les harmoniques dans les systèmes de distribution électrique, en fournissant un courant compensateur qui annule les harmoniques présents dans le réseau. Cette approche contribue à améliorer la qualité de l'énergie électrique en réduisant les distorsions et en assurant un fonctionnement plus stable du système électrique.

Dans un premier temps, il a été démontré par différentes méthodes d'identification harmoniques telles que PQ, SRF, DPC, DCC, et ICC que les performances d'un filtre actif de puissance dépendent non seulement du type de commande de son circuit de puissance (onduleur), mais aussi d'une grande partie des stratégies dédiées à la détermination des courants harmoniques. Nous avons testé par des validations par simulations sous l'environnement Matlab/SimPowerSystems le FAP en utilisant les principales méthodes d'identifications des courants de références pour des conditions idéales de la

Conclusion générale

tension de source. L'analyse temporelle et spectrale des résultats de simulation est essentielle pour évaluer la performance du système dans le temps et dans le domaine fréquentiel. La capacité du filtre actif parallèle à atténuer efficacement les harmoniques générées par la charge non linéaire, car cela confirme que notre approche de filtrage est efficace pour dépolluer le réseau électrique et réduire les perturbations indésirables.

Par ailleurs, les contrôles basés sur l'intelligence artificielle comme le système d'apprentissage avec les réseaux de neurones artificiels (ANN) est l'une des méthodes largement utilisées de nos jours en raison de ses réponses rapides et de sa bonne capacité de prédiction. Toutefois, il est aussi connu que les réseaux de neurones consomment une quantité importante de ressource de calcul. Dans la dernière partie de ce travail nous avons essayé d'améliorer les performances du FAP en appliquant la technique de l'intelligence artificielle qui est la théorie des réseaux de neurones artificiels dans la régulation de la tension du bus continue du FAP. D'après les résultats de simulation, nous avons constaté que la régulation neuronale présente une meilleure performance que la régulation classique par un régulateur PI conventionnel.

Pour conclure, nous pouvons affirmer que les résultats obtenus, en particulier le taux de distorsion harmonique, sont satisfaisants et répondent bien aux limites imposées par les normes internationales CEI et IEEE. Ainsi on voit bien l'efficacité de technique intelligente : réseaux de neurones dans l'amélioration des performances du FAP proposé.

Comme perspectives associées à ce travail, plusieurs axes d'études et de recherches complémentaires peuvent être envisagés.

- Etude du FAP multi-niveaux.
- Validation expérimentale des travaux réalisés sur le FAP.
- Application d'autres méthodes pour faire une meilleure optimisation que la méthode ANN tel que la méthode PSO ou l'hybridation entre les algorithmes génétiques et le PSO.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] K. Smail and F. Boubaker, "Etude des Différentes Méthodes d'Identification des Harmoniques," Mémoire de Licence, CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED, 2010.
- [2] N. ALLOUI, "Contribution à l'amélioration de la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques en utilisant les Filtrés Hybrides," Thèse de Doctorat, Université de Batna 2, 2017.
- [3] N. Djafer, "Technique de Correction du Facteur de Puissance (PFC) dans les convertisseurs AC-DC monophasé: Application boost PFC," Mémoire De Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2008.
- [4] O. Amar, "Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant," Thèse de Doctorat, Université de Badji Mokhtar-Annaba-2007.
- [5] Y. LANSARI, A. MOUSSAOUI, and B. Khechab, "Amélioration de la qualité d'énergie dans un réseau électrique par le dispositif STATCOM," Mémoire de Master Université Ahmed Draia-ADRAR, 2017.
- [6] N. ZOUKH and A. RAS GHANEM, "Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par l'utilisation d'un filtre actif parallèle dans un réseau électrique," Mémoire de Master, Université Ibn Khaldoun -Tiaret-, 2023.
- [7] A. Chaoui, "Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires," Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2010.
- [8] F. Hamoudi, "Commande Robuste d'un Filtre Actif Shunta Quatre Fils," Thèse de Magistère, Université de Batna 2, 2008.
- [9] A. Messad, S. Bouadine, and R. E. Yacef, "Modélisation et stratégie de commande et contrôle d'un filtre actif parallèle triphasé de puissance," Mémoire De Master, Université de Jijel, 2022.
- [10] B. Moustafa, "ETUDE DES ALGORITHMES DE FILTRAGE ACTIF DES HARMONIQUES DANS LES RÉSEAUX ELECTRIQUES POLLUÉS," Mémoire de Master UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA, 2021.
- [11] I. GHADBANE, "Commande d'un filtre actif triphasé parallèle par différents régulateurs," Thèse de Magister, Faculté des sciences et de la technologie UMKBiskra, 2011.
- [12] V. Ignatova, "Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique," Thèse de Doctorat, Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2006.
- [13] I. GHADBANE, "Etude Et Réalisation D'un Filtre Actif Parallèle En Utilisant Différentes Stratégies De Contrôle," Doctorat en sciences, Université Mohamed Khider-Biskra, 2016.
- [14] M. H. SALIM, "Gestion de la qualité d'énergie électrique dans un réseau de transmission," Thèse de Doctorat, Badji Mokhtar -Annaba-, 2010.
- [15] Z. KHERAKHERIA, "Qualité de l'énergie électrique en moyenne tension," Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945-Guelma-, 2019.
- [16] O. Nawal, "Qualite d'energie électrique," Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 -Guelma-, 2018.
- [17] K. Samiha, "Etude et simulation de filtre actif parallèle de puissance," Mémoire De Master, université de Biskra, 2018.
- [18] B. GATTAL, "METHODES D'ANALYSE DES PERTURBATIONS ELECTRIQUES DANS LA QUALITE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE EN UTILISANT DES NOUVELLES TECHNIQUES POUR L'APPLICATION AUX CREUX DE TENSION," Thèse de Magister Université de Batna 2, 2012.
- [19] F. Boudelloua and M. E. Melit, "Caractérisation des perturbations affectant la qualité d'énergie électrique: cas des creux de tension," Mémoire de Master, Université de Jijel, 2021.

Références bibliographiques

- [20] A. ABED, "Diagnostic Des Contraintes Pour Une Performance De La Qualité D'énergie," Mémoire de Master Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, 2016.
- [21] 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 Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.
- [22] A. Boulahia and H. Benalla, "Etude des convertisseurs statistiques destinés à la qualité de l'énergie électrique," Thèse De Magister, Université Constantine, 2009.
- [23] H. Djeghèoud and H. Benalla, "Filtrage actif de puissance," Thèse De Doctorat, Université Mentouri Constantine, 2007.
- [24] F. Defay, "Commande prédictive directe d'un convertisseur multicellulaire triphasé pour une application de filtrage actif," Thèse de Doctorat, L'Université de Toulouse, 2008.
- [25] S. Beaulieu, "Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique," Mémoire de Master, Université du Québec à Chicoutimi, 2007.
- [26] M. M. Abdusalam, "Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales," *These de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy-I-France*, 2008.
- [27] A. Lounes, "Etude et simulation d'un filtre actif parallèle," Mémoire De Master Université Mouloud Mammeri, 2014.
- [28] A. Zaiadi, "Compensation des harmoniques à base d'un filtre actif Multi-niveaux," Mémoire De Master Université Larbi Tebessi Tebassa 2020.
- [29] Y. SELATNIA, Ahmed Lamine, "Détection de défaut des convertisseurs de puissance «Application au filtre actif parallèle»,» Mémoire De Master, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila, 2014.
- [30] S. Othman, "Modélisation et Commande à base d'une représentation par Réseau de Pétri d'un Filtre Actif Parallèle avec un Onduleur Multicellulaire Série," Thèse De Doctorat En Cotutelle Internationale, CY Cergy Paris Université; École nationale d'ingénieurs de Gabès (Tunisie), 2021.
- [31] B. Messaoud and H. Ayyoub, "Amélioration de la qualité d'énergie dans le réseau électrique par la technique UPQC et identification des courants harmoniques," Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du diplôme de Master, Abdelhafid boussouf university Centre mila, 2020.
- [32] K. M. Abdeldj, "Techniques de commande avancées d'un filtre actif parallèle pour améliorer la qualité d'énergie fournie au réseau autonome hybride," Thèse De Doctorat, Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, 2017.
- [33] A. Bouhouta, "Amélioration de la Qualité de l'Énergie Électrique Par des Convertisseurs Statiques Associés Aux Générateurs Photovoltaïques " Thèse de Doctorat, Université Yahia Farés de Médéa 2022.
- [34] A. Morsli, A. Tlemçani, M. Boucherit, and N. O. Cherchali, "Dépollution des Réseaux Electriques Basse Tension utilisant un Filtre Actif Parallèle à deux niveaux contrôlé par l'Algorithme PQ," *Médiamira Science*, vol. 53, pp. 105-111, 2012.
- [35] R. Electricques, "Contribution à l'Etude des Performances des Onduleurs Multiniveaux sur les Réseaux de Distribution," Thèse De Doctorat, Université de Biskra, 2014.
- [36] N. Hamouda, K. E. Hemsas, and H. Benalla, "Etude comparative des techniques de filtrage actif sélectif par référentiel synchrone de Park dq et approche FMV," *MJMS*, vol. 1, pp. 089-098, 2014.
- [37] D. le Jury, "Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique," Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences Université de Annaba, 2015.

Références bibliographiques

- [38] P. K. Nanda, "Power quality improvement in 3- ϕ power system using shunt active filter with synchronous detection method," 2014.
- [39] R. BACHAR, "Commande Prédictive Appliquée au Filtre Actif," Doctorat en Sciences en : Génie Electrique, Université Mohamed Khider-Biskra, 2019.
- [40] Y. MIMOUN and A. R. MEBROUK, "Contrôle avancé d'un système PV connecté au réseau," Mémoire de fin de cycle pour l'obtention du diplôme de Master, Université Ibn Khaldoun Tiaret, 2022.
- [41] A. Chaoui, J.-P. Gaubert, and F. Krim, "Power quality improvement using DPC controlled three-phase shunt active filter," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, no. 6, pp. 657-666, 2010.
- [42] A. Bouhouta, S. Moulahoum, N. Kabache, and I. Colak, "Simplicity and performance of direct current control dcc compared with other identification algorithms for shunt active power filter," in *2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2018: IEEE, pp. 1352-1357.
- [43] M. OUGUISSI and A. ALMAOUI, "Prédiction de rayonnement solaire journalière par réseau de neurone," Mémoire De Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2020.
- [44] D. O. Abdeslam, "Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques: application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension," Université de Haute Alsace-Mulhouse, 2005.

ملخص:

أصبحت مشكلة التلوث بالتوافقيات في شبكات التوزيع الكهربائية مثيرة للقلق أكثر فأكثر مع زيادة استخدام الأحمال غير الخطية. لتحسين نوعية الطاقة الموزعة، توجد عدة حلول. من بينها المصفاة الغير فعالة وهذا الحل المعروف منذ زمن طويل هو الأكثر انتشارا خاصة عند الطاقة العالية والجهد العالي. ومع ذلك، فإن لها عيوباً، أبرزها عدم القدرة على التكيف عند تغيير الحمل، واحتمال حدوث رنين مع مقاومة الشبكة. دعونا نذكر أيضاً المصفاة الفعالة (FAP) التي تقدم حلاً أفضل لهذا النوع من المشكلات، والتي تعتبر من أنجع الحلول لمثل هذه المشاكل لكنها هي الأخرى لديها مساوئها المتمثلة في تكلفتها وتصميمها العالين في التطبيقات الصناعية. الهدف من هذه الأطروحة هو اقتراح حلول لتحسين نوعية الطاقة في الشبكة الكهربائية باستخدام المصفاة الفعالة المتوازية (FAP) للقيام بذلك، قمنا أولاً بعرض مختلف الاضطرابات التي يمكن أن تحدث في الشبكات الكهربائية، والمعايير القياسية الدولية، فضلاً عن الحلول التقليدية والحديثة لمكافحة التلوث بالتوافقيات. ثانياً، ركزت الدراسة على المصفاة الفعالة المتوازية (FAP) ، المخصص لتعويض التيارات التوافقية باستخدام عدة طرق لتحديد التيارات المرجعية (PQ ، DQ ، DPC ، DCC ، ICC) ثم لتحسين أداء المصفاة الفعالة المتوازية (FAP) ، قمنا بتطبيق تقنيات ذكية لتنظيم جهد التيار المستمر للمصفاة الفعالة المتوازية باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN). نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها تظهر فعالية النماذج المقترحة. الكلمات المفتاحية: التلوث بالتوافقيات، جودة الطاقة، مرشح الطاقة النشط (FAP) ، طرق لتحديد التيارات المرجعي، الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN) ، منظم PI.

Résumé :

Le problème de la pollution harmonique dans les réseaux électriques de distributions devient de plus en plus préoccupant avec l'accroissement de l'usage des charges non linéaires. Pour améliorer la qualité de l'énergie distribuée, plusieurs solutions existent. Parmi elles, citons le filtrage passif. Cette solution connue depuis fort longtemps est la plus répandue surtout en forte puissance et sous haute tension. Néanmoins elle présente des inconvénients, notamment le manque d'adaptabilité lors de la variation de la charge, et des résonances possibles avec l'impédance du réseau. Citons aussi le filtrage actif de puissance (FAP) qui présente une meilleure solution pour ce type de problèmes, mais lui aussi présente l'inconvénient de son coût et dimensionnement élevé pour des applications industrielles. Le but de ce mémoire est de proposer des solutions afin d'améliorer la qualité de l'onde dans le réseau électrique en utilisant des filtres parallèle (FAP). Pour ce faire, nous avons tout d'abord présenté les différentes perturbations qui peuvent avoir lieu dans les réseaux électriques, les normes standards internationales, ainsi que les solutions traditionnelles et modernes de dépollution. Dans un deuxième temps, l'étude a été focalisée sur le filtre actif parallèle (FAP), dédié à la compensation des harmoniques du courant de la source en utilisant plusieurs méthodes d'identifications des courants harmoniques (PQ, DQ, DPC, DCC et ICC). Ensuite pour améliorer les performances du filtre actif parallèle (FAP), nous avons appliqué des techniques intelligentes pour la régulation de la tension continue du filtre actif parallèle en utilisant les réseaux de neurones artificiels (ANN). Les résultats de simulations obtenues, montrent l'efficacité des modèles proposés.

Mots-clés : Pollution harmonique, Qualité de l'énergie, Filtre actif de puissance (FAP), Méthode d'identification, Réseau de neurones artificiels (ANN), Régulateur PI.

Abstract:

The problem of harmonic pollution in electrical distribution networks is becoming more and more worrying with the increasing use of non-linear loads. To improve the quality of distributed energy, several solutions exist. Among them is passive filter. This solution, known for a long time, is the most prevalent especially in high power and high voltage. However, it has disadvantages, notably the lack of adaptability when the load varies, and possible resonances with the network impedance. Let us also mention active power filter (PAF) which presents a better solution for this type of problem, but it also has the disadvantage of its high cost and design for industrial applications. The aim of this work is to propose solutions to improve the power quality in the electrical network by using parallel power active filters (PAF). To do this, we first presented the different disturbances that can occur in electrical networks, international standards, as well as traditional and modern depollution solutions. Secondly, the study focused on the Parallel Active Filter (PAF), dedicated to the compensation of current harmonics of the source using several harmonic current identification methods (PQ, DQ, DPC, DCC and ICC). Then to improve the performance of the parallel active filter (PAF), we applied intelligent techniques for regulating the DC voltage of the parallel active filter using artificial neural networks (ANN). The simulation results obtained show the effectiveness of the proposed models.

Keywords: Harmonic pollution, Energy quality, Active power filter (APF), Identification method, Artificial neural network (ANN), PI regulator.