

Republique Algerinne Democratique Et Populaire
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen

Faculté de Technologie



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER**

**Spécialité : Electrotechnique
Option : Commandes Electriques**

préparé au Département de Génie Electrique et Electronique

et présenté par

Mr. Walid MELIH et Melle. Zineb MEKKI

Intitulé du mémoire

**Etude comparative de la stratégie de commande
d'un filtre actif de puissance shunt triphasé à quatre bras**

soutenu le 29 Juin 2022:

S.M.MERZOUG	Président	Professeur	U.A.B - Tlemcen
M.A.BRIKCI NIGASSA	Encadreur	Maitre Assistant	U.A.B - Tlemcen
S. BOURI	Examineur	Maitre de conférences	U.A.B - Tlemcen

Année universitaire 2021 - 2022

Dedicaces 1

JE dédie ce travail :

- à mes chers parents pour leur encouragement et leur soutien inconditionnel durant mes années études.
- à ma chère soeur qui m'accompagne et m'aide dans tous mes travaux.
- à mon ami.
- aux martyrs de la lutte de libération nationale qui par leur sacrifice ont permis à notre génération d'accéder à la liberté et à la science.

Walid Melih

Dedicaces 2

J_E dédie ce travail :

- a mon père pour sa générosité,sa bonté,je te remercie ma très chère maman, pour sa tendresses , encouragement et pour ce qu'elle a fait depuis mon enfance jusqu' à jour.
- a mes frères et a mes soeurs.
- a mon binôme Melih Walid avec qui j'ai eu le chance à travaille Razzougui Habibe ,merci pour ses encouragements.
- aux martyrs de la lutte de libération nationale qui par leur sacrifie ont permis à notre génération d'accéder à la liberté et à la science.
- pour finir j'adresse mes remerciements à mes très chers amis qui sont devenus des frères et soeurs pour moi, Menouar Samya, Madi Madjeda,Salma Souad.

Zineb Mekki

Remerciements

Ce document présente les travaux effectués dans le cadre de notre projet de fin d'étude de Master au Département de Génie Électrique et Électronique de la Faculté de Technologie de l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.

Nous tenons à remercier notre encadreur du Projet de Fin d'études Monsieur M.A.BRIKCI NIGASSA pour le soutien technique et moral qu'il nous a apporté tout au long de notre mémoire. Nous le remercions et lui exprimons notre gratitude pour ses conseils et ses observations sévères, sa gentillesse et ses encouragements à notre égard.

Nous tenons à remercier aussi le président de jury Pr MERZOUG SM, ainsi que le membre de jury : Dr BOURIS d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Merci enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidé et donc ont contribué au succès de ce travail.

Walid Melih Zineb Mekki

TABLE DES MATIÈRES

DEDICACES 1	i
DEDICACES 2	ii
REMERCIEMENTS	iii
NOMENCLATURE	viii
GLOSSAIRE	x
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
I QUALITÉ DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE	3
I.1 INTRODUCTION	4
I.2 QUALITÉ DE L'ÉNERGIE [22]	4
I.3 LES PERTURBATIONS ÉLECTRIQUES ET LEURS ORIGINES	5
I.3.1 Creux et coupures de tension	5
I.3.2 Fluctuation de tension	5
I.3.3 Déséquilibre du système triphasé de tension	6
I.3.4 Variation de fréquence	6
I.3.5 Harmonique et inter harmoniques	7
I.4 PERTURBATIONS HARMONIQUES EN COURANT ET EN TENSION	7
I.4.1 Origine et représentation	7
I.4.2 Conséquences de la présence d'harmoniques	8
I.4.3 Caractérisation	8
I.4.4 Décomposition harmonique d'une onde polluée	8
I.5 QUALITÉ DE L'ONDE DANS LE RÉSEAU 4 FILS	9
I.6 SOLUTIONS TRADITIONNELLES DE LA DÉPOLLUTION	10
I.6.1 Solutions modernes de la dépollution	10
I.7 NORMES IMPOSÉ SUR LE THD	12
I.8 CONCLUSION	12
II STRATÉGIE DU COMMANDE D'UN FILTRE ACTIF PARALLÈLE À QUATRE BRAS	13
II.1 INTRODUCTION	14
II.2 CONSTITUANTS D'UN FILTRE ACTIF PARALLÈLE À QUATRE BRAS	14
II.3 ÉTUDE DE LA PARTIE PUISSANCE	15
II.3.1 Description d'un onduleur triphasé à quatre bras	15

II.3.2	Filtre de couplage	16
II.3.3	système de stockage d'énergie	17
II.4	ÉTUDE DE LA PARTIE COMMANDE- CONTRÔLE	17
II.4.1	Identification des courants de référence	17
II.4.2	Régulation de la tension continue	17
II.4.3	Commande par hystérésis	18
II.5	PRÉSENTATION DES STRATÉGIES DE COMMANDE	19
II.5.1	Méthode des puissances instantanées réelle, imaginaire et homopolaire avec proposition de simplifications	19
II.5.2	Principe d'une P.L.L [11]	22
II.5.3	Méthode directe dite vecteur croisé "cross-vector"	23
II.5.4	Méthode directe dite théorie p-q-r	25
II.5.5	méthode directe utilisant la théorie du référentiel lié au synchronisme(SRF) :	27
II.6	CONCLUSION	29
III	RÉSULTATS DES SIMULATIONS	30
III.1	INTRODUCTION	31
III.2	LA SIMULATION DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE SANS FILTRE ACTIF	31
III.2.1	cas de charge identique	31
III.2.2	Cas de charge non-identique	33
III.2.3	Interprétations des résultats	34
III.3	LA SIMULATION DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE AVEC FILTRE ACTIF DE PUISSANCE	35
III.3.1	Méthode des puissances instantanées réelle, imaginaire et homopolaire modifié (p-q-o)	35
III.3.1-a	cas de la charge identique	35
III.3.1-b	cas de la charge non identique	37
III.3.1-c	Interprétations des résultats	40
III.3.2	méthode directe utilisant la théorie du référentiel lié au synchronisme (SRF)	40
III.3.2-a	cas de la charge identique	40
III.3.2-b	cas de la charge non identique	42
III.3.2-c	Interprétations des résultats	45
III.4	CONCLUSION	45
	CONCLUSION GÉNÉRALE	46
	BIBLIOGRAPHIE	49
	ANNEXE A : LES HARMONIQUES DE TENSION ET DE COURANT	1
	ANNEXE B : SIMULATION DE LA MÉTHODE DE PUISSANCE INSTANTANÉE MODIFIÉE P-Q-O	2
	ANNEXE C : MÉTHODE DIRECTE UTILISANT LA THÉORIE DU RÉFÉRENTIEL LIÉ AU SYNCHRONISME (SRF)	4

TABLE DES FIGURES

I.1	Creux et coupures de tension	5
I.2	Fluctuations de tension	6
I.3	Déséquilibre du système triphasé de tension	6
I.4	Variation de la fréquence	7
I.5	Harmoniques et inter-harmoniques	7
I.6	Décomposition harmonique d'une onde polluée	9
I.7	Le filtre actif parallèle (FAP)	11
I.8	Model de filtre actif sésie(FAS)	11
I.9	Model de Conditionneur de puissance (UPQC)	11
II.1	Principe du filtrage actif parallèle d'un réseau triphasé à quatre bras	14
II.2	Filtre actif parallèle à quatre bras pour un réseau triphasé à quatre Fils	15
II.3	Boucle de régulation de la tension continue	18
II.4	Principe de la commande par hystérésis d'un cas d'onduleur à quatre bras	19
II.5	commande d'un filtre actif de puissance par la méthode des puissances instantanées simplifiée	21
II.6	Schéma de principe d'une P.L.L classique	22
II.7	Boucle de régulation de la pulsation angulaire	23
II.8	commande d'un filtre actif de puissance par la méthode directe dite Vecteur Croisé	25
II.9	commande d'un filtre actif de puissance par la méthode directe dite théorie p-q-r	27
II.10	commande d'un filtre actif de puissance par la méthode directe dite théorie SRF	29
III.1	schéma d'un réseau triphasé à quatre fils alimentant trois charges monophasé non-linéaires	31
III.2	Tension de la source triphasé	32
III.3	Courant de chage et son spectre d'harmonique du la phase (a)	32
III.4	courant du neutre	32
III.5	Tension de source triphasé	33
III.6	Courant de tois charge (abc) et spectres d'harmonique du chaque phase	33
III.7	Courant du neutre	34
III.8	Model de réseau électrique triphasé à quatre bras avec un Filtre actif parallèle à quatre bras	35
III.9	Tension de source triphasé	36
III.10	Courant de charge de phase (a)	36

III.11	Courant injecté par le filtre actif de puissance de phase (a)	36
III.12	Courant de source après le filtrage de phase (a) et son spectre d'harmonique	37
III.13	Courant de neutre avant et après le filtrage	37
III.14	Tension du source triphasé	38
III.15	Courant triphasé de charge	38
III.16	Courant injecté par le filtre actif de puissance (abc)	38
III.17	Courant de source des trois phases (abc) et son spectre d'harmonique du chaque phase	39
III.18	Courant de neutre avant et après le filtrage	40
III.19	Tension du source triphasé	41
III.20	Courant de charge de phase (a)	41
III.21	Courant injecté par le filtre actif de puissance de phase (a)	41
III.22	Courant de source après le filtrage de phase a et son spectre d'harmonique	42
III.23	Courant de neutre avant et après le filtrage	42
III.24	Tension de source triphasé	43
III.25	Courant triphasé de charge	43
III.26	Courant injecté par le filtre actif de puissance (abc)	43
III.27	Courant de source des trois phases (abc) et son spectre d'harmonique du chaque phase	44
III.28	Courant de neutre avant et après le filtrage	45
29	Niveaux de compatibilite des harmoniques en tension	1
30	Limite des composantes harmoniques en courant	1
31	Schéma bloc Simulink de la méthode pq0	2
32	Schéma de la partie commande par la méthode pq0	3
33	Schéma de la méthode SRF	4
34	Schéma de la partie commande du la méthode SRF	5

Nomenclature

Les principales notations et abréviations utilisées dans ce mémoire sont explicitées ci-dessous, sous leur forme la plus couramment employée dans le domaine du génie électrique.

Indices et exposants

Symbole	Signification
L_s	L'inductance de la source.
R_s	La résistance de la source.
L	L'inductance de charge.
R	La résistance de charge
i_{ch}	Courant de charge
i_{dc}	Le courant de côté continue
L_f	L'inductance du filtre
R_f	La résistance du filtre
v_{dc}	Tension aux bornes du condensateur
i_f^*	Courant de référence
i_f	Courant produit par l'onduleur
v_f	Tension simple efficace à la sortie du filtre
T_i	Etat de l'interrupteur i (ouvert ou fermé)
v_{sabc}	Tensions de la source
i_{chabc}	Courant de charge triphasé
i_n	Courant de neutre
p	La puissance réelle
q	La puissance imaginaire
p_o	La puissance homopolaire
i_o	Courant instantané homopolaire

Symbole	Signification
$v_{\alpha\beta o}$	Les tensions de la charge dans le repère $(\alpha\beta o)$
v_{dqo}	Les tensions de la charge dans le repère (dqo)
$i_{\alpha\beta o}$	Les courants de la charge dans le repère $(\alpha\beta o)$
$i_{\alpha\beta o}^*$	Les courants de références du filtre actif parallèle à quatre bras dans le repère $(\alpha\beta o)$
v_n	Tensions de neutre
i_{abc}^*	Les courants de références du filtre actif parallèle à quatre bras dans le repère (abc)
i_{pqr}	Les courants du filtre actif parallèle à quatre bras dans le repère (pqr)
p_{dc}	Puissance absorbée par le condensateur
c_{dc}	Condensateur du bus continue
k_{pdc}	Les gains du régulateur PI de la tension continue
k_{idc}	
ξ	Coefficient d'amortissement
w_c	La pulsation de coupure du régulateur PI

Glossaire

Acronyme	Signification
IGBT	Insolated Gate Bipolar Transistor
FAP	Filtre Active Parallele
FAS	Filtre Active Série
UPQC	Conditionneur Universel de puissance Électrique
THD	Taux de Distorsion Harmonique
GTO	Gate turn Off Thyristor
CEI	Commission Electrotechnique Internationale
FPB	Filtre Passe Bas
PI	Régulateur Proportionnel Intégral
PLL	Phase Locked Loop
PWM	Pulse Width Modulation

Introduction générale

Depuis quelques années, on constate que la consommation d'énergie électrique augmente de plus en plus avec l'utilisation des technologies d'intégration d'équipements basés sur l'électronique et l'électronique de puissance. Cette augmentation entraîne diverses perturbations du réseau électrique qui affectent par la suite la qualité de l'alimentation et ont donc des effets négatifs sur les utilisateurs.

De plus, on note que les perturbations les plus importantes dans les réseaux électriques sont les harmoniques de courant générés par les charges non linéaires qui entraînent des dysfonctionnements dans les appareils électroménagers tels que les ordinateurs et les machines tournantes, et dans le réseau de distribution, en raison des pertes dans les lignes de transmission et une diminution du facteur de puissance.

Plusieurs solutions de dépollution des réseaux électriques ont été proposées dans la littérature. Ceux qui répondent le mieux aux exigences industrielles sont Compensateurs de puissance active (parallèle, série et groupe parallèle).

Un filtre actif de puissance est connecté au réseau électrique, soit en parallèle ou en série, suivant le choix de compensation des courants harmoniques ou tensions harmoniques. En ce qui concerne le filtre actif parallèle, il injecte dans le réseau les courants harmoniques produits par la charge, de telle sorte que le générateur ne fournisse plus que le courant fondamental. En revanche, le filtre actif série, injecte des tensions harmoniques dont la somme avec la tension réseau devient sinusoïdale. Il est destiné à protéger les installations sensibles aux perturbations provenant du réseau, telles que les harmoniques en tension, les surtensions,ect..[11]

L'un des types de filtres actifs le plus répondu est le filtre actif parallèle qui est chargé de l'annulation des courants harmoniques présents sur le réseau électrique. Le principe du filtre actif parallèle consiste à générer des courants harmoniques en opposition de phase à ceux existants sur le réseau. Le courant absorbé par les charges polluantes est non-sinusoïdal, alors que le courant généré par le filtre actif parallèle est tel que le courant du réseau sont sinusoïdal [11].

L'objectif de ce travail sera de faire une étude comparative de stratégie de commande d'un filtre actif de puissance shunt triphasé à quatre bras.

Ce mémoire sera divisé en trois chapitres tels que :

Le premier chapitre sera consacré à la présentation des différents phénomènes qui affectent la qualité de l'énergie électrique, et nous présenterons des solutions traditionnelles et modernes pour lutter contre la pollution.

Le deuxième chapitre présentera le principe de fonctionnement du filtre actif parallèle ainsi que ses topologies pour le cas du filtre actif de puissance à quatre bras. Une description théorique des quatre méthodes d'extraction des courants de référence sera fournie.

Le troisième chapitre portera sur la présentation des résultats de simulation obtenus pour deux stratégies de commande soit en mode équilibré soit en mode déséquilibré. Elle sera suivie d'une étude comparative des deux situations.

Chapitre I

Qualité de l'Energie Electrique

SOMMAIRE

I.1	INTRODUCTION	4
I.2	QUALITÉ DE L'ÉNERGIE [22]	4
I.3	LES PERTURBATIONS ÉLECTRIQUES ET LEURS ORIGINES	5
I.3.1	Creux et coupures de tension	5
I.3.2	Fluctuation de tension	5
I.3.3	Déséquilibre du système triphasé de tension	6
I.3.4	Variation de fréquence	6
I.3.5	Harmonique et inter harmoniques	7
I.4	PERTURBATIONS HARMONIQUES EN COURANT ET EN TENSION	7
I.4.1	Origine et représentation	7
I.4.2	Conséquences de la présence d'harmoniques	8
I.4.3	Caractérisation	8
I.4.4	Décomposition harmonique d'une onde polluée	8
I.5	QUALITÉ DE L'ONDE DANS LE RÉSEAU 4 FILS	9
I.6	SOLUTIONS TRADITIONNELLES DE LA DÉPOLLUTION	10
I.6.1	Solutions modernes de la dépollution	10
I.7	NORMES IMPOSÉ SUR LE THD	12
I.8	CONCLUSION	12

I.1 Introduction

L'électricité disponible au niveau des réseaux électriques devrait se présenter sous une forme de tension sinusoïdale et de fréquence constante. Cependant les signaux réels disponibles ne le sont pas que ce soit pour les courants ou les tensions. Ceci est dû principalement à la présence de charges non linéaires. Il est à noter que les fournisseurs imposent à leurs clients le respect de normes relatives à la qualité électrique permettant de contenir ou d'éliminer les phénomènes perturbateurs [4].

Il devient nécessaire d'intégrer des compensateurs pour neutraliser les perturbations courants produite par des charges non linéaires ou à la suite de l'apparition de défauts, de sorte à garantir l'intégrité du signal produit par la source [4].

I.2 Qualité de l'énergie [22]

L'énergie électrique fournie par le producteur/distributeur à tous ses clients doit être une énergie triphasée de qualité répondant à des critères prédéfinis (tolérances admissibles de tension, de fréquence).

À l'heure actuelle, les récepteurs domestiques ou industriels sont pour la plupart des charges non linéaires. Une charge est dite "non linéaire" si le courant consommé n'est pas sinusoïdal lorsqu'il est alimenté par une tension sinusoïdale.

En plus des changements subis par cette énergie électrique pendant la transmission, les charges non linéaires à la réception génèrent des courants harmoniques (signaux sinusoïdaux dont les fréquences sont des multiples entiers du signal fondamental à 50 Hz), déformant ainsi les signaux électriques des courants qui sont initialement une courbe sinusoïdale.

Ces charges créent une distorsion harmonique dans tout le réseau et peuvent endommager certains équipements électriques et provoquer des pannes de fonctionnement normales.

- Déséquilibre tension et courant : Les trois tensions (courant) d'un système triphasé sont d'amplitude différente et/ou déphasées de 120 degrés.
- Les perturbations de tension causées par des tensions perturbatrices, telles que les tensions harmoniques, les creux de tension et les interruptions brèves, les surtensions, les fluctuations rapides de tension.

Par conséquent, il est impératif de comprendre les sources de ces perturbations et d'appliquer des solutions appropriées pour les éliminer afin d'éviter les pannes ou les dommages subit au réseau et aux récepteurs finaux.

Dans ce qui suit, nous décrirons la définition et l'origine des harmoniques, leurs effets, ainsi que les réglementations et normes en vigueur.

I.3 Les perturbations électriques et leurs origines

Les perturbations électriques affectant l'un des quatre paramètres ci-dessous peuvent se manifester par : des creux ou des coupures de tension triphasée, des changements de fréquence, la présence d'harmoniques et/ou d'inter harmoniques.

I.3.1 Creux et coupures de tension

Un creux de tension est une chute soudaine de la tension à une valeur comprise entre 10% et 90% de la tension nominale, qui dure de 10 millisecondes à quelques secondes.

Les creux de tension sont causés par des phénomènes naturels tels que la foudre ou par des pannes d'installation ou des pannes des réseaux publics et de consommation. Ils apparaissent également dans les manoeuvres impliquant des courants importants (moteurs, transformateurs, etc.).

La coupure de tension est le moment où la tension chute brutalement à une valeur supérieure à 90 % de la tension nominale ou disparaît complètement, typiquement entre 10 millisecondes à 1 minute (pour les coupures courtes) et supérieur à 1 minute (pour les coupures longues). La plupart des équipements électriques permettent une durée totale de coupure inférieure à 10 ms [21].

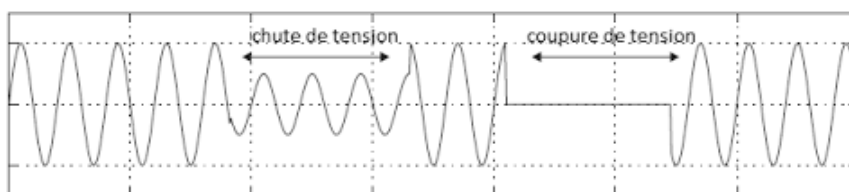


FIGURE I.1 – Creux et coupures de tension

I.3.2 Fluctuation de tension

Les fluctuations de tension sont des changements périodiques ou irréguliers de l'enveloppe de tension, qui sont des changements brusques d'amplitude de tension dans la plage de $\pm 10\%$, se produisant à des intervalles de quelques centièmes de seconde.

Ils sont notamment dus aux courants d'appel importants se propageant sur les lignes du réseau. La principale source de ces courants est le fonctionnement d'équipements qui absorbent une puissance à variation rapide, tels que les fours à arc électrique et la soudure. Ces fluctuations se traduisent par une intensité, visible au niveau de l'éclairage, qui se traduit par une tension de 1% dans les changements de gênes visuels perceptibles. Ce phénomène de scintillement est appelé scintillement.

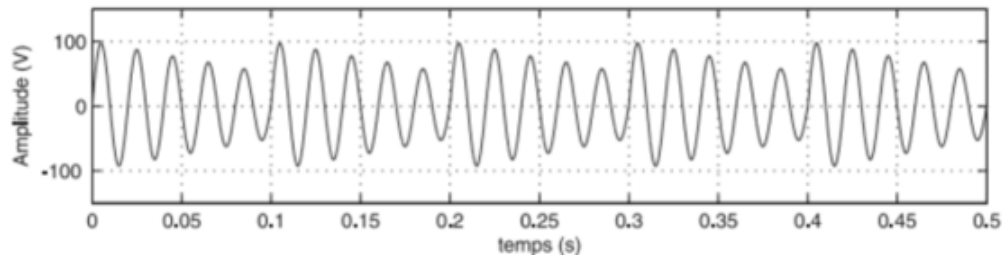


FIGURE I.2 – Fluctuations de tension

I.3.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

Un système triphasé est dit déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas du même ordre de grandeur et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° l'une par rapport à l'autre comme illustre dans le figure (I.3) Un réseau triphasé équilibré alimente un récepteur électrique triphasé déséquilibré de tension dû à la circulation de courant déséquilibré dans l'impédance du réseau.

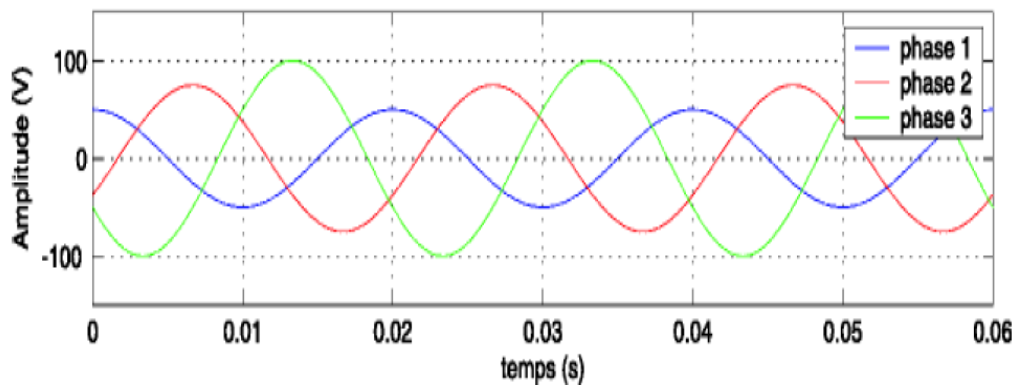


FIGURE I.3 – Déséquilibre du système triphasé de tension

I.3.4 Variation de fréquence

Des changements importants de la fréquence du réseau peuvent se produire dans L'utilisateur n'est pas interconnecté ou alimenté par une source de chaleur autonome comme illustré dans la figure (I.4). Au niveau du réseau de distribution ou de transport, ce changement La fréquence est très rare et ne se produit que dans des circonstances exceptionnelles, comme en cas de panne grave du réseau.

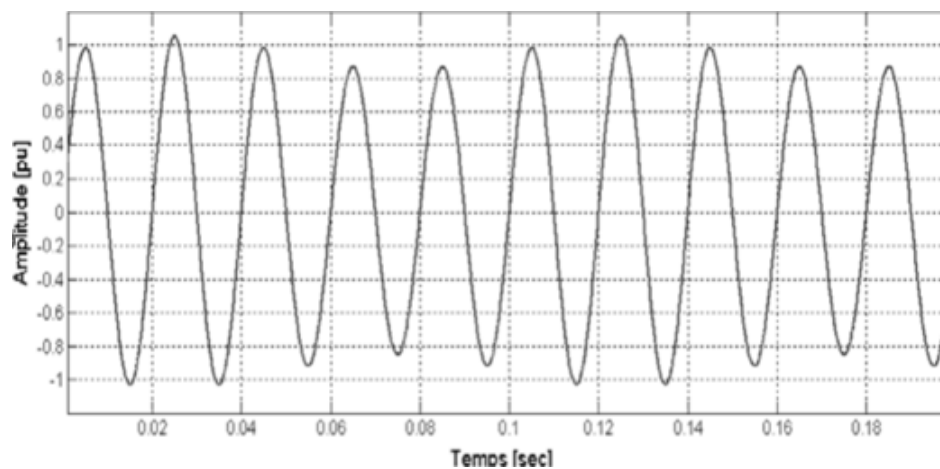


FIGURE I.4 – Variation de la fréquence

I.3.5 Harmonique et inter harmoniques

Les harmoniques sont des superpositions d'ondes fondamentales de 50 Hz avec d'autres ondes sinusoïdales, mais à des fréquences qui sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale. La figure (I.5) montre la superposition de la 3^{ème} harmonique sur le courant fondamental à 50 Hz. Électronique de puissance à base de thyristors. Les interharmoniques se superposent à l'onde fondamentale, mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du secteur. Les interharmoniques se produisent de plus en plus et leur source principale est les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et autres dispositifs de contrôle-commande similaires.

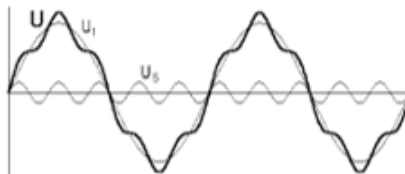


FIGURE I.5 – Harmoniques et inter-harmoniques

I.4 Perturbations harmoniques en courant et en tension

I.4.1 Origine et représentation

Dans les secteurs industriels et domestiques on constate un accroissement de générateurs d'harmoniques. Il s'agit des dispositifs, tels que les convertisseurs statiques, contenant des éléments de commutation ainsi que d'autres dispositifs à caractéristique tension-courant non linéaire [1] :

Convertisseurs statiques : Les convertisseurs statiques sont les sources d'harmoniques les plus gênantes du fait du nombre et de la puissance des dispositifs installée. On peut citer de manière non exhaustive [2] :

- Les redresseurs monophasés et triphasés. Ils génèrent des harmoniques dont la fréquence dépend sensiblement de la commande adoptée ;
- Les cyclo-convertisseurs utilisés pour régler la vitesse des moteurs à courant alternatif ;
- Les gradateurs utilisés dans les entraînements de faible puissance, les systèmes d'éclairage, de chauffage ;
- Les variateurs de vitesse électroniques constitués principalement d'un convertisseur statique et d'une partie électronique, destinés à commander la vitesse d'un moteur électrique.

Dispositifs à caractéristique tension-courant non linéaire, on distingue :

- Les fours à arc et à induction ;
- Les transformations ;
- Les machines tournantes ;
- Inductances saturées, etc.

I.4.2 Conséquences de la présence d'harmoniques

De nombreux effets produits par les harmoniques sur les installations et équipements électriques peuvent être observés [3] :

- L'échauffement : surchauffe du neutre, surchauffe des transformateurs, déclenchement intempestif des coupe-circuit, surcharge des condensateurs, etc. ;
- Problèmes causés par les tensions harmoniques : distorsion de la tension,
- Problèmes causés par les courants harmoniques au niveau de l'alimentation
- Surchauffe du neutre : dans un système triphasé, la tension est déphasée de 120° , si bien que lorsque les charges sont égales, le courant résultant dans le neutre est nul. Lorsque les charges ne sont pas équilibrées, seule la résultante de la somme des courants de retour se retrouve dans le neutre. Ce principe était admis et a conduit à un sous-dimensionnement du neutre [3].

I.4.3 Caractérisation

Taux de Distorsion Harmonique La mesure de cette pollution est très importante car elle permet de caractériser les installations et de s'assurer de la bonne qualité de l'énergie distribuée. Différents critères sont définis pour mesurer les perturbations harmoniques, mais c'est le taux de Distorsion Harmonique (Total Harmonic Distorsion) THD qui est le plus employé : c'est le rapport de la valeur efficace des harmoniques avec la valeur efficace du fondamental seul [4].

I.4.4 Décomposition harmonique d'une onde polluée

La figure ci-dessous illustre l'allure d'une onde polluée par des harmoniques de rang 5 et 7. La décomposition de cette onde permet de mettre en évidence la composante fondamentale,

ainsi que ces harmoniques considérées comme les plus néfastes. Il est à noter que dans les réseaux électriques triphasés, les principales composantes harmoniques sont des rangs 5, 7, 11 et 13 ($6 \cdot h \pm 1$, avec $h=1,2,\dots$). L'un des convertisseurs les plus polluants, on citera les convertisseurs à diode sont très présents au niveau des charges et ce pour plusieurs raisons : ils sont non commandables et possèdent une durée de vie importante et un coût d'achat beaucoup plus faible que des solutions plus évoluées. Bien plus que les ordinateurs et autres téléviseurs, les redresseurs monophasés à diodes avec filtrage capacitif ont la particularité de générer les courants harmoniques [4].

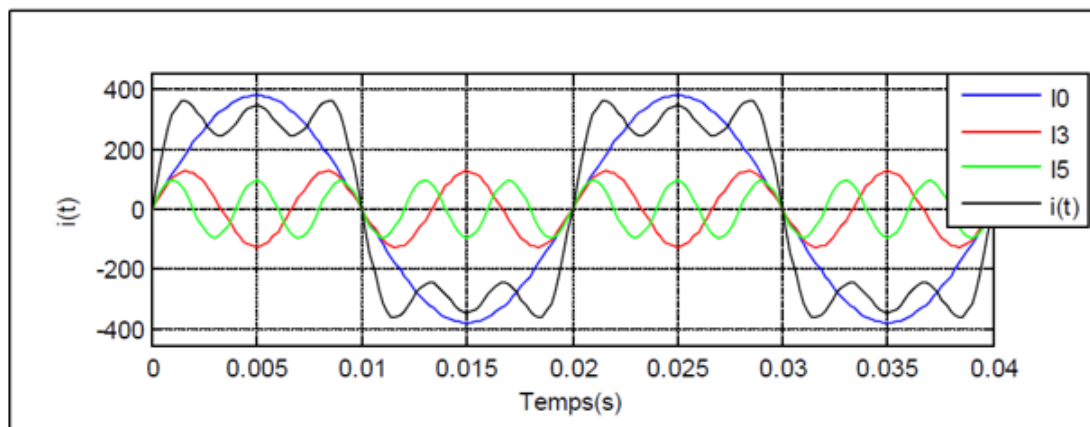


FIGURE I.6 – Décomposition harmonique d'une onde polluée

I.5 Qualité de l'onde dans le réseau 4 fils

Les caractéristiques du réseau triphasé à quatre fils sont : [1]

- Courant de neutre excessif dû à un déséquilibre de charge non linéaire ;
- Surchauffe des circuits magnétiques, transformateurs, etc. ;
- La technologie passive peut être utilisée pour éliminer certains ordres harmoniques
Les techniques actives les plus efficaces permettent :
 - * réduire jusqu'à élimination du courant de neutre,
 - * compensation harmonique,
 - * Compensation de puissance réactive.

I.6 Solutions traditionnelles de la dépollution

Pour assainir le réseau, plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature dont le but est de limiter la propagation et l'impact des harmoniques dans le réseau.

- Une augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation de convertisseurs peu polluants avec pour effet de réduire la distorsion harmonique.
- a. Utiliser des dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques des charges non linéaires,
- b. Pont à douze phases : La structure à douze phases présente des caractéristiques très intéressantes par rapport à la structure à six phases. Cependant, le nombre de semi-conducteurs utilisés et le transformateur à deux enroulements secondaires rendent cette solution coûteuse.

Filtres passifs : Une seconde solution de décontamination consiste à mettre en parallèle une très faible impédance sur le réseau d'alimentation, proche de la fréquence à filtrer et suffisamment élevée à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue les filtres passifs résonnants et les filtres passifs amortis ou passe-haut. Bien qu'ils soient largement utilisés dans l'industrie, ces appareils peuvent présenter un certain nombre d'inconvénients :

- 1- Manque de flexibilité pour s'adapter aux changements de réseau et de charge,
- 2- du matériel encombrant,
- 3- Le problème de résonance de l'impédance du réseau.

I.6.1 Solutions modernes de la dépollution

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques. La deuxième raison fait suite à l'apparition de nouveaux composants semi conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques [5]. Il existe trois topologies possibles de filtres actifs[6] :

- a. Model de filtre actif parallèle (FAP) : conçu pour compenser les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive,

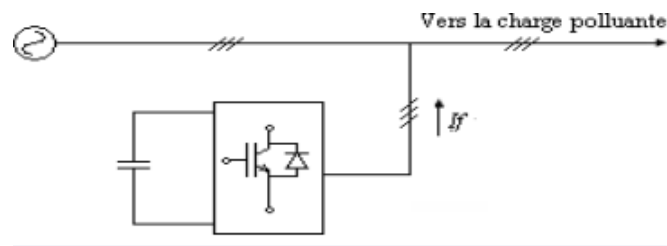


FIGURE I.7 – Model de filtre actif parallèle (FAP)

- b. Model de filtre actif série (FAS) : conçu pour compenser les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension,

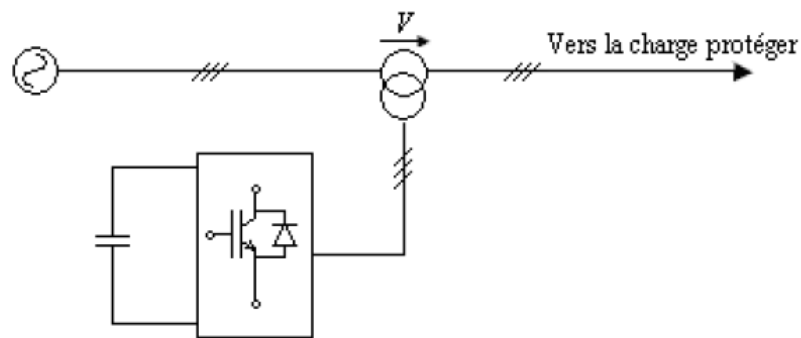


FIGURE I.8 – Model de filtre actif série(FAS)

- c. La combinaison parallèle-série actifs (UPQC) : solution universelle pour compenser les perturbations en courant et en tension,

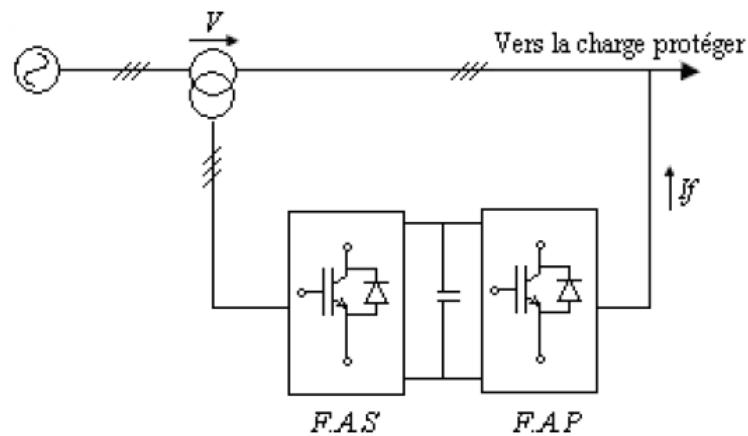


FIGURE I.9 – Model de Conditionneur de puissance (UPQC)

- d. Combinaison hybride active et passive : a fin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association des filtres actifs de faibles puissances à des filtres passifs peut être une solution [7].

I.7 Normes imposé sur le THD

Afin de garantir des niveaux satisfaisants de qualité de l'énergie en limitant les effets des interférences harmoniques, les distributeurs d'énergie et les utilisateurs doivent se conformer aux normes et recommandations définissant les règles relatives à la compatibilité électromagnétique (CEM), telles que définies ci-dessous :

- IEC au niveau international,
- CENELEC au niveau européen,

En fait, ces normes sont élaborées par un groupe international d'experts représentant les fabricants et les utilisateurs d'équipements, ainsi que des représentants de laboratoires d'essais, des consultants et des universitaires spécialisés dans des domaines connexes.

I.8 conclusion

Dans ce chapitre,nous avons présenté les principales pertubations,leur origine,les conséquence et les caractérisations.

Ensuite,nous avons présenté les solutions traditionnels et modernes de dépollution pour diminuer les effets des pertubations .

Chapitre II

Stratégie de Commande D'un Filtre Actif Parallèle à Quatre Bras

SOMMAIRE

II.1	INTRODUCTION	14
II.2	CONSTITUANTS D'UN FILTRE ACTIF PARALLÈLE À QUATRE BRAS	14
II.3	ÉTUDE DE LA PARTIE PUISSANCE	15
II.3.1	Description d'un onduleur triphasé à quatre bras	15
II.3.2	Filtre de couplage	16
II.3.3	système de stockage d'énergie	17
II.4	ÉTUDE DE LA PARTIE COMMANDE- CONTRÔLE	17
II.4.1	Identification des courants de référence	17
II.4.2	Régulation de la tension continue	17
II.4.3	Commande par hystérésis	18
II.5	PRÉSENTATION DES STRATÉGIES DE COMMANDE	19
II.5.1	Méthode des puissances instantanées réelle, imaginaire et homopolaire avec proposition de simplifications	19
II.5.2	Principe d'une P.L.L [11]	22
II.5.3	Méthode directe dite vecteur croisé "cross-vector"	23
II.5.4	Méthode directe dite théorie p-q-r	25
II.5.5	méthode directe utilisant la théorie du référentiel lié au synchronisme(SRF) :	27
II.6	CONCLUSION	29

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier la structure générale d'un filtre actif à quatre bras parallèles, qui se décompose en deux parties : la partie puissance et commande de contrôle de pièce. Dans la partie puissance, nous présenterons les trois blocs principaux de cette structure, qui sont l'onduleur de tension à quatre bras, et le circuit de stockage d'énergie et le filtre de découplage. Dans la partie Contrôle-Commande, nous aborderons la détermination des courants turbulents, la régulation de la tension continue et du courant Filtre actif parallèle et ainsi nous allons présenter les stratégies de commande.

II.2 Constituants d'un filtre actif parallèle à quatre Bras

FAP à quatre bras essentiellement composé deux partie :

- partie puissance.
- partie commande-côntrole.

Ces deux étages vont être détaillées dans les deux sections qui suivent.

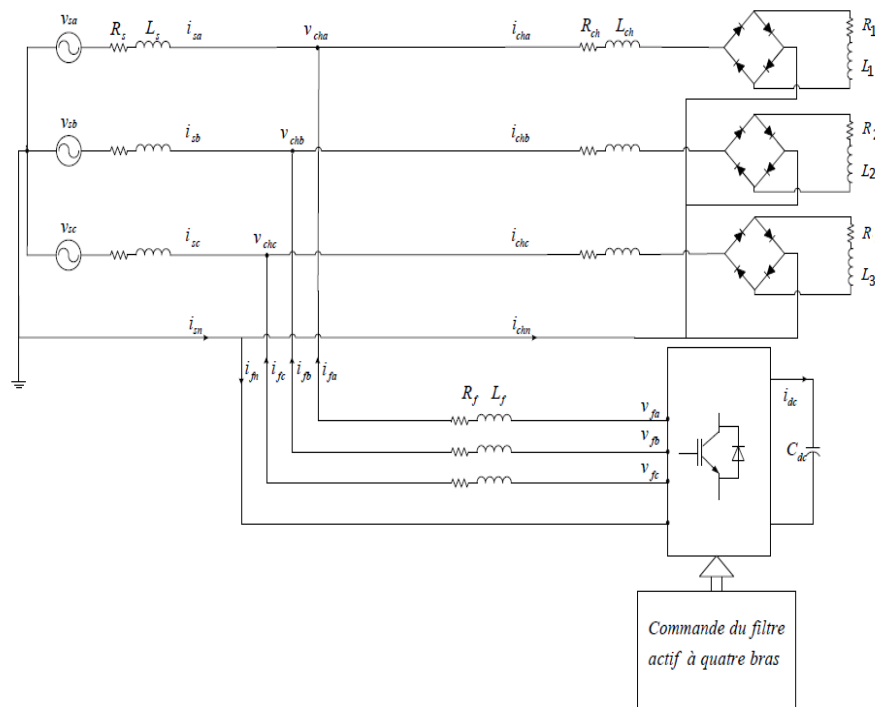


FIGURE II.1 – Principe du filtrage actif parallèle d'un réseau triphasé à quatre bras

II.3 Étude de la partie puissance

Dans cette partie, nous sommes intéressés par la partie de puissance des composants FAP comme suit :

- L'onduleur à quatre bras.
- Le filtre de couplage.
- Le système de stockage de l'énergie.

II.3.1 Description d'un onduleur triphasé à quatre bras

Dans cette structure, nous utilisons un onduleur à quatre bras composé de huit interrupteurs de courant à diode (transistors bipolaires, IGBT, GTO) en parallèle avec la diode. Comme le montre la figure(II.2).

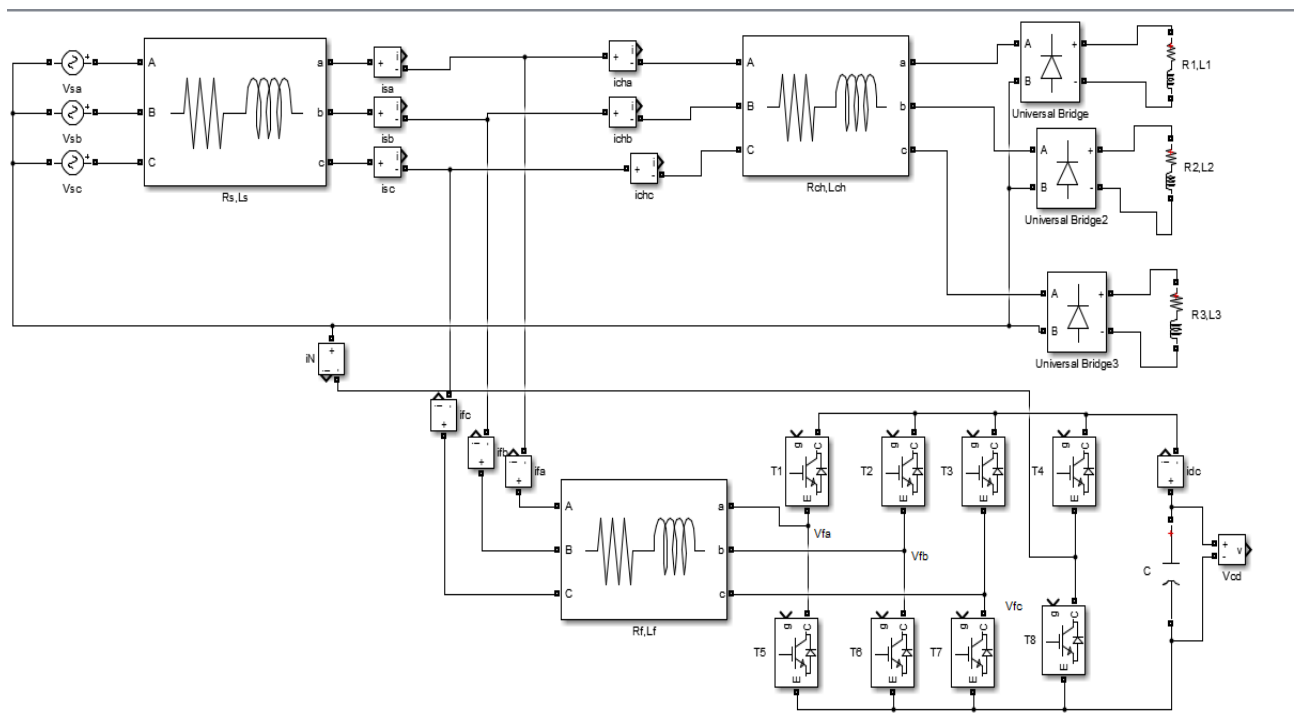


FIGURE II.2 – Filtre actif parallèle à quatre bras pour un réseau triphasé à quatre fils

ce type d'onduleur sont présentés par Les états de commutation dans qui trouve dans le tableau(II.1) Ils sont remplis le tableau grâce aux expressions suivantes :

$$V_{fa} = (T_1 - T_4)V_{dc} \quad (\text{II.1})$$

$$V_{fb} = (T_2 - T_4)V_{dc} \quad (\text{II.2})$$

$$V_{fc} = (T_3 - T_4)V_{dc} \quad (\text{II.3})$$

et

$$i_{dc} = T_1 i_1 + T_2 i_2 + T_3 i_3 - T_4 i_n \quad (\text{II.4})$$

Avec : $T_i = 1$ si T_{i+4} est fermé,

$T_i = 0$ si T_{i+4} est ouvert

$i = 1$ à 4 .

k	T_1	T_2	T_3	T_4	V_{fa}	V_{fb}	V_{fc}
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	V_{dc}	0	0
2		1	0	0	0	V_{dc}	0
3	1	1	0	0	V_{dc}	V_{dc}	0
4	0	0	1	0	0	0	V_{dc}
5	1	0	1	0	V_{dc}	0	V_{dc}
6	0	1	1	0	0	V_{dc}	V_{dc}
7	1	1	1	0	V_{dc}	V_{dc}	V_{dc}
8	0	0	0	1	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$
9	0	0	0	1	0	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$
10	0	1	0	1	$-V_{dc}$	0	$-V_{dc}$
11	1	1	0	1	0	0	$-V_{dc}$
12	0	0	1	1	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	0
13	1	0	1	1	0	$-V_{dc}$	0
14	0	1	1	1	$-V_{dc}$	0	0
15	1	1	1	1	0	0	0

TABLE II.1 – tension générées par l'onduleur de tension à quatre bras

II.3.2 Filtre de couplage

Le filtre de couplage est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau. Il est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants [20] :

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

Pour satisfaire ces deux conditions, on utilise un filtre de premier ordre, composé d'une inductance L_f avec une résistance interne R_f , une petite valeur de cette inductance assure la dynamique du courant [20].

II.3.3 système de stockage d'énergie

Le choix de la tension V_{dc} et de la capacité de condensateur C_{dc} affecte la dynamique et la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension V_{dc} élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue V_{dc} causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de C_{dc} , peuvent dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible[20].

II.4 Étude de la partie commande- contrôle

II.4.1 Identification des courants de référence

Une charge contaminée absorbe un courant composé d'une composante fondamentale et des composantes harmoniques. L'objectif de la filtration active est de générer des courants harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase avec ceux absorbés par la charge. Ainsi, le courant absorbé du réseau sera sinusoïdal. Il faut donc préciser Courants harmoniques de charge pollués.

Plusieurs algorithmes de détermination des grandeurs harmoniques de référence et de nombreuses techniques de contrôle et de régulation ont été développés depuis la mise en place des premiers filtres actifs de génération de référence. Afin de générer les signaux de référence utilisés pour contrôler le filtre actif.

II.4.2 Régulation de la tension continue

La source d'alimentation du filtre n'est pas une source de tension autonome mais une capacité qui se charge et se décharge. La tension aux bornes de cette dernière n'est pas constante, à cause de sa sensibilité aux échanges de puissance active entre la charge polluante et le réseau. Les pertes dans les composantes de puissance font aussi varier la tension aux bornes de la capacité, d'où la nécessité de réguler cette tension de la maintenir à un niveau constant.

Les principales causes susceptibles de modifier cette tension sont [9]-[10] :

- Les pertes dans le filtre actif.
- L'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante.
- Les pertes de commutation et par conduction des interrupteurs de puissance.

Afin d'assurer le rôle de source de tension continue, une régulation de cette tension est nécessaire [8]. Pour cela, nous pouvons utiliser un régulateur PI. Si nous négligeons les pertes au niveau de l'onduleur et dans le filtre de sortie, la relation entre la puissance absorbée par le condensateur et la tension à ses bornes peut s'écrire sous la forme suivante :

$$p_{dc} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} v_{dc}^2 \right) \quad (\text{II.5})$$

Appliquons la transformation de Laplace sur cette relation, nous obtenons :

$$p_{dc}(p) = \frac{1}{2} p c_{dc} v_{dc}^2(p) \quad (\text{II.6})$$

La tension aux bornes du condensateur est donnée par :

$$v_{dc}^2(p) = \frac{2p_{dc}(p)}{c_{dc}(p)} \quad (\text{II.7})$$

A partir de la relation (II.7), et en tenant compte du régulateur PI, la boucle de régulation de tension continue peut être représentée par la figure(II.3) Le choix des paramètres k_{pdc} et k_{idc} aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal afin de ne pas nuire la dynamique du filtre actif. A partir de la figure (II.3) , la fonction de transfert représentant

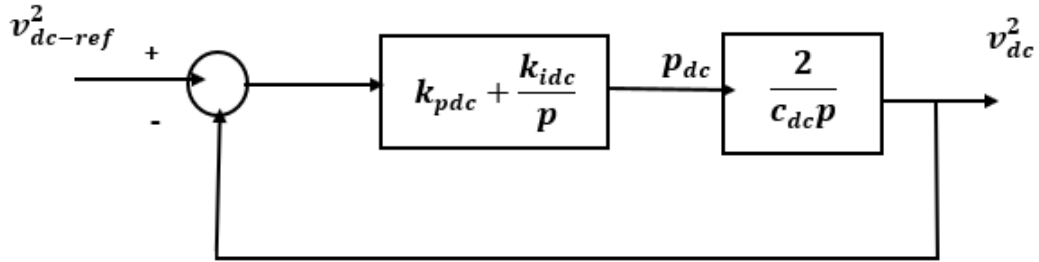


FIGURE II.3 – Boucle de régulation de la tension continue

la régulation en boucle fermée de la tension continue est donnée par :

$$G_{BF} = \frac{(1 + \frac{k_{pdc}}{k_{idc}}p)}{p^2 + 2\frac{k_{pdc}}{c_{dc}}p + 2\frac{k_{idc}}{c_{dc}}p} \quad (\text{II.8})$$

Comparant cette équation avec la forme générale d'une fonction de transfert de deuxième ordre, on trouve [8] :

$$k_{idc} = \frac{1}{2} c_{dc} w_c^2 \quad (\text{II.9})$$

tel que $w_c = 2\pi f_c$ et $k_{pdc} = \xi \sqrt{2c_{dc}k_{idc}}$

II.4.3 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.4) expose son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence i_f^* 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 [20].

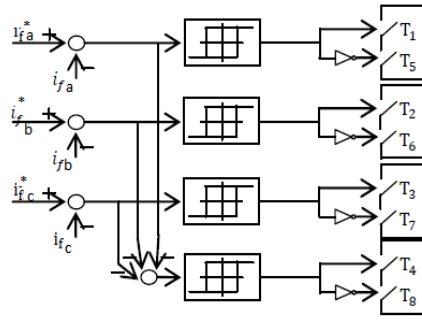


FIGURE II.4 – Principe de la commande par hystérésis d'un cas d'onduleur à quatre bras

II.5 Présentation des stratégies de commande

II.5.1 Méthode des puissances instantanées réelle, imaginaire et homopolaire avec proposition de simplifications

Cette méthode exploite la transformation de concordia des tensions simples et des courants de ligne, afin de calculer les puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées. Elle permet aussi de transformer la composante fondamentale en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. Cette transformation est nécessaire si nous voulons éliminer facilement la composante continue. Nous allons tout d'abord présenter cette méthode (de manière générale). La théorie de $p-q-o$ emploie la transformation $(\alpha\beta 0)$ connue sous le nom de transformation de Concordia. Les tensions ou les courants triphasés sont transformés du repère abc au repère $(\alpha\beta 0)$ stationnaire [12] [13].

La transformation de concordia des tensions du point de raccordement et des courants de charge est réalisée en utilisation les deux relations suivantes :

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

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

en négligeant les harmoniques de tension, p la puissance réelle, q la puissance imaginaire et p_o la puissance homopolaire sont données par la matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ p_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta & 0 \\ -v_\beta & v_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & v_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_o \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

les composants des puissances peut être donnés comme la somme d'une composante conti-

nue et d'une composante harmonique :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ p_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \\ \bar{p}_o + \tilde{p}_o \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Avec : \bar{p} , \bar{q} , \bar{p}_o les composantes continues de p et q liées au fondamental et $\tilde{p}, \tilde{q}, \tilde{p}_o$ les composantes alternatives de p et q liées aux harmoniques.

à partir d'équation(II.12), nous permet de définir les composantes de courant comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta & 0 \\ -v_\beta & v_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & v_o \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \\ p_o \end{bmatrix} = \frac{1}{v_o(v_\alpha^2 + v_\beta^2)} \begin{bmatrix} v_\alpha v_o & -v_\beta v_o & 0 \\ v_\beta v_o & v_\alpha v_o & 0 \\ 0 & 0 & (v_\alpha^2 + v_\beta^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ p_o \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

soit :

$$i_\alpha = \frac{v_\alpha}{(v_\alpha^2 + v_\beta^2)} p - \frac{v_\beta}{(v_\alpha^2 + v_\beta^2)} q \quad (\text{II.15})$$

$$i_\beta = \frac{v_\beta}{(v_\alpha^2 + v_\beta^2)} p + \frac{v_\alpha}{(v_\alpha^2 + v_\beta^2)} q \quad (\text{II.16})$$

$$i_o = (v_\alpha^2 + v_\beta^2) \frac{p_o}{v_o(v_\alpha^2 + v_\beta^2)} = i_o \quad (\text{II.17})$$

Dans les expressions pour i_α et i_β , la puissance homopolaire et la tension homopolaire sont absentes. Les tensions appliquées à l'entrée de l'identificateur sont équilibrées.

Si la tension du réseau est polluée, un système basé sur PLL est ajouté après avoir mesuré les tensions au point de contact du filtre actif pour calculer v_α et v_β comme suit :

$$v_\alpha = \sqrt{3}V_S \sin(\theta) \quad (\text{II.18})$$

$$v_\beta = -\sqrt{3}V_S \cos(\theta) \quad (\text{II.19})$$

à partir de l'équation(II.11),(II.18),(II.19), Nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

à partir de l'équation(II.20), Nous obtenons les expressions des courant dans le réere α - β :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

Grâce à l'équation (II.11), la matrice (II.22) peut être réécrite sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_o \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta & 0 \\ v_\beta & v_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & (v_\alpha^2 + v_\beta^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ i_o \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

Le tableau suivant résume les modes de compensation possible :

Type de compensation	Paramètre de contrôle
courant harmoniques	$p_f = \tilde{p}$ et $q_f = \tilde{q}$
l'énergie réactive	$p_f = 0$ et $q_f = \bar{q}$
courant harmoniques + l'énergie réactive	$p_f = \tilde{p}$ et $q_f = q$

TABLE II.2 – les modes de compensation de la commande des puissances instantanées

Si nous voulons compenser en même temps harmoniques de courant et l'énergie réactive l'équation (II.23) deviendra :

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha}^* \\ i_{f\beta}^* \\ i_{fo}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta & 0 \\ v_\beta & v_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & (v_\alpha^2 + v_\beta^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q \\ i_o \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

après le choix des paramètres de commande, il est aisé d'obtenir les courants de référence selon les axes a-b-c par la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} i_{fa}^* \\ i_{fb}^* \\ i_{fc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^* \\ i_{f\beta}^* \\ i_{fo}^* \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

la figure(II.5) illustre la procédure de commande :

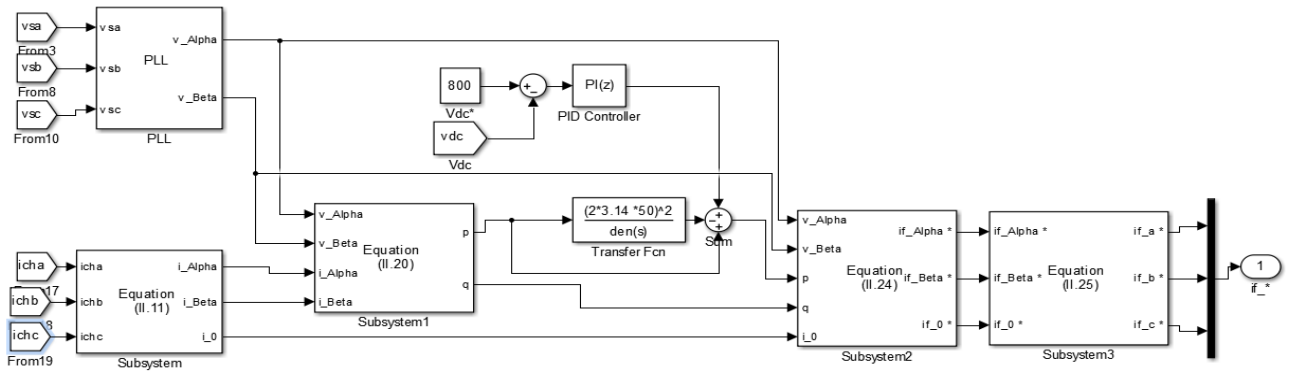


FIGURE II.5 – commande d'un filtre actif de puissance par la méthode des puissances instantanées simplifiée

II.5.2 Principe d'une P.L.L [11]

La boucle à verrouillage de phase (Phase Locked Loop :PLL) est utilisée pour détecter la phase et la fréquence du réseau électrique. La figure (II.6) représente le schéma détaillé de la PLL utilisée. Supposons que les trois tensions du réseau au point de raccordement

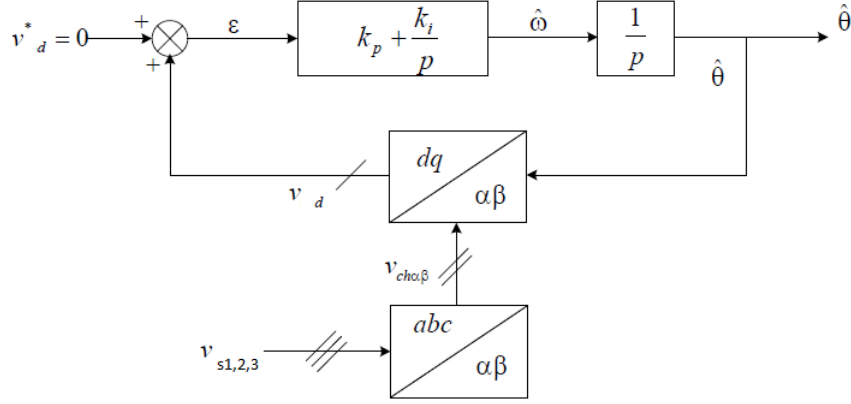


FIGURE II.6 – Schéma de principe d'une P.L.L classique

sont sinusoïdales, définies par :

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = v_{max} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

L'application de la transformation de Concordia sur l'équation (II.30), conduit à :

$$\begin{cases} v_{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} v_{max} (\sin(\omega t) - \frac{1}{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - \frac{1}{2} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})) \\ v_{\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} v_{max} (\frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})) \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Après simplification des relations précédentes, on trouve :

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{2}{3}} v_{max} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ -\cos(\omega t) \end{bmatrix} = \sqrt{3} v_{eff} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ -\cos(\omega t) \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Ces grandeurs peuvent être obtenues dans le repère dq en application la matrice de rotation suivante :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \\ -\sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

Avec $\hat{\theta}$ est la position angulaire estimée du vecteur de tension. La composante directe du vecteur tension est donc :

$$v_d = \sqrt{3} v_{eff} \sin(\omega t - \hat{\theta}) \quad (\text{II.30})$$

En supposant que l'angle de phase $\omega t - \hat{\theta}$ est très petit, alors, l'expression (II.30) peut être simplifié à :

$$v_d = \sqrt{3} v_{eff} (\omega t - \hat{\theta}) \quad (\text{II.31})$$

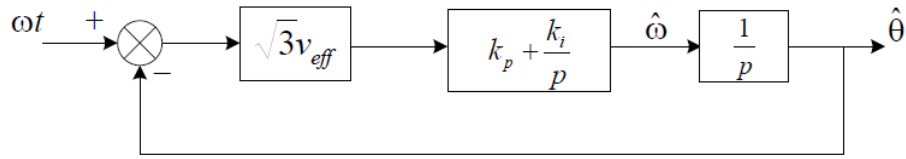


FIGURE II.7 – Boucle de régulation de la pulsation angulaire

La pulsation angulaire estimée est donnée par :

$$\hat{w} = H\sqrt{3}v_{eff}(wt - \hat{\theta}) \quad (\text{II.32})$$

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

$$H_p = k_p + \frac{k_i}{p} \quad (\text{II.33})$$

La position angulaire est donnée par :

$$\hat{\theta} = \hat{w} \frac{1}{p} \quad (\text{II.34})$$

Le remplacement des relations (II.34) dans (II.32) nous donne :

$$\hat{\theta}_p = \left(k_p + \frac{k_i}{p}\right)\sqrt{3}v_{eff}(wt - \hat{\theta}) \quad (\text{II.35})$$

La fonction de transfert en boucle fermée du système est :

$$G(p) = \frac{\sqrt{3}v_{eff}(k_p p + k_i)}{p^2 + \sqrt{3}v_{eff}k_p p + \sqrt{3}v_{eff}k_i} \quad (\text{II.36})$$

Ce qui nous permettons d'en déterminer :

$$k_p = \frac{2\xi w_c}{\sqrt{3}v_{eff}}, k_i = \frac{w_c^2}{\sqrt{3}v_{eff}} \quad (\text{II.37})$$

A fin d'obtenir un bon compromis entre la stabilité et la réponse dynamique, on a choisit $\xi = 0.707$, et une fréquence de coupure $f_c = 5000\text{Hz}$.

II.5.3 Méthode directe dite vecteur croisé "cross-vector"

La méthode des vecteurs croisés présentée par [14], [15], [16] est basée sur le même principe que la méthode p-q-o mais ses auteurs proposent une nouvelle définition des puissances instantanées.

Les tensions ou les courants triphasés sont transformés du repère abc au repère $(\alpha\beta 0)$.

La transformation de concordia des tensions du point de raccordement et des courants de charge est réalisée en utilisation les deux relations suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ 0 & \frac{2}{\sqrt{3}} & -\frac{2}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ 0 & \frac{2}{\sqrt{3}} & -\frac{2}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cha} \\ i_{chb} \\ i_{chc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

Les puissances instantanées sont calculées différemment, à savoir :

$$\begin{bmatrix} p \\ q_o \\ q_\alpha \\ q_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_o & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & -v_\beta & v_\alpha \\ v_\beta & 0 & -v_o \\ -v_\alpha & v_o & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_o \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

à partir de equation(II.40), nous obtenons les expressions les courants comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_o \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{(v_\alpha^2 + v_\beta^2 + v_o^2)} \begin{bmatrix} v_o & 0 & v_\beta & v_\alpha \\ v_\alpha & -v_\beta & 0 & v_o \\ v_\beta & v_\alpha & -v_o & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q_o \\ q_\alpha \\ q_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.41})$$

Le tableau suivant résume les modes de compensation :

Type de compensation	Paramètre de contrôle
courant harmoniques	$p_f = \tilde{p}$ et $q_{fo} = \tilde{q}_0$ $q_{f\alpha} = \tilde{q}_\alpha$ $q_{f\beta} = \tilde{q}_\beta$
l'énergie réactive	$p_f = 0$ et $q_{fo} = \bar{q}$
courant harmoniques + l'énergie réactive	$p_f = \tilde{p}$ et $q_{fo} = q_o$ $q_{f\alpha} = q_\alpha$ $q_{f\beta} = q_\beta$

TABLE II.3 – les modes de compensation de la commande dite cross à vector

Si nous voulons compenser simultanément les harmoniques de courant et l'énergie réactive, l'équation (II.41) deviendra donc :

$$\begin{bmatrix} i_{fo}^* \\ i_{f\alpha}^* \\ i_{f\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{(v_\alpha^2 + v_\beta^2 + v_o^2)} \begin{bmatrix} v_o & 0 & v_\beta & v_\alpha \\ v_\alpha & -v_\beta & 0 & v_o \\ v_\beta & v_\alpha & -v_o & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q_o \\ q_\alpha \\ q_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.42})$$

après le choix des paramètres de commande, il est aisé d'obtenir les courants de référence selon les axes 1-2-3 par la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} i_{fa}^* \\ i_{fb}^* \\ i_{fc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^* \\ i_{f\beta}^* \\ i_{fo}^* \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

la figure(II.8) illustre la procédure de commande :

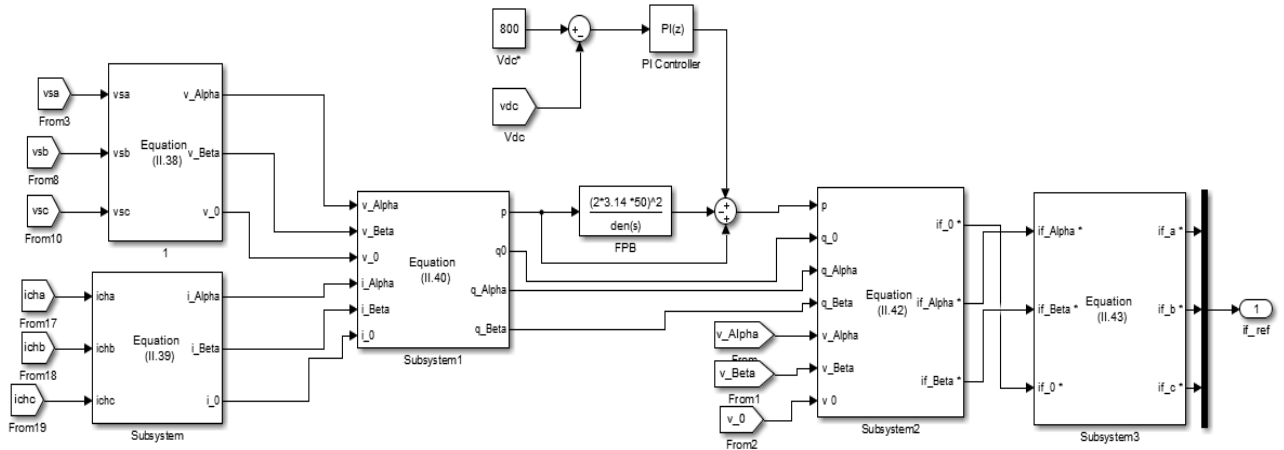


FIGURE II.8 – commande d'un filtre actif de puissance par la méthode directe dite Vecteur Croisé

II.5.4 Méthode directe dite théorie p-q-r

La théorie p-q-r introduite par [17], [18] et [19], réalise une double transformation, à savoir une première transformation des tensions simples et des courants de ligne des axes a - b - c aux axes α - β - 0 puis une seconde transformation des axes α - β - 0 aux axes p-q-r[13].

Les tensions ou les courants triphasés sont transformés du repère abc au repère $(\alpha\beta 0)$.

La transformation de concordia des tensions du point de raccordement et des courants de charge est réalisée en utilisation les deux relations suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.44})$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cha} \\ i_{chb} \\ i_{chc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.45})$$

nous réalisons une deuxième transformation qui donne les expressions des courants sui-

vante :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_p \\ \dot{i}_q \\ \dot{i}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta o}} & \frac{v_\beta}{v_\alpha} & \frac{v_o}{v_{\alpha\beta o}} \\ \frac{v_{\alpha\beta o}}{v_\beta} & \frac{v_{\alpha\beta o}}{v_\alpha} & 0 \\ \frac{v_{\alpha\beta}}{v_\alpha v_o} & \frac{v_{\alpha\beta}}{v_\beta v_o} & \frac{v_\alpha v_\beta}{v_{\alpha\beta o}} \\ \frac{v_{\alpha\beta} v_{\alpha\beta o}}{v_{\alpha\beta} v_{\alpha\beta o}} & \frac{v_{\alpha\beta} v_{\alpha\beta o}}{v_{\alpha\beta} v_{\alpha\beta o}} & \frac{v_\alpha v_\beta}{v_{\alpha\beta o}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_o \end{bmatrix} \quad (\text{II.46})$$

Les expressions des puissances active et réactive instantanées donné comme suit :

$$\begin{bmatrix} p \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix} = v_{\alpha\beta o} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.47})$$

à partir de équation II.46 ,nous obtenons les expressions des courants comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha\beta o}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.48})$$

Le tableau suivant résume les modes de compensations possibles.

Type de compensation	Paramètre de contrôle
courant harmoniques	$p_f = \tilde{p}$ $q_{fr} = \tilde{q}_r$ $q_{fq} = \tilde{q}_q$
courant harmoniques + de l'énergie réactive	$p_f = \tilde{p}$ et $q_{fr} = q_r$ $q_{fq} = q_q$

TABLE II.4 – les modes de compensation de la commande p-q-r

Si nous voulons compenser simultanément les harmoniques de courant et l'énergie réactive, l'équation (II.48) deviendra :

$$\begin{bmatrix} l_p^* \\ l_q^* \\ l_r^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha\beta o}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.49})$$

l'expression des courants dans le repère $-\beta-o$:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \\ i_o^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta o}} & -\frac{v_\beta}{v_\alpha} & -\frac{v_\alpha v_o}{v_{\alpha\beta} v_{\alpha\beta o}} \\ \frac{v_{\alpha\beta o}}{v_\beta} & \frac{v_{\alpha\beta}}{v_\alpha} & -\frac{v_{\alpha\beta} v_{\alpha\beta o}}{v_\beta v_o} \\ \frac{v_{\alpha\beta o}}{v_o} & 0 & \frac{v_{\alpha\beta} v_{\alpha\beta o}}{v_{\alpha\beta}} \\ \frac{v_{\alpha\beta} v_{\alpha\beta o}}{v_{\alpha\beta} v_{\alpha\beta o}} & \frac{v_{\alpha\beta} v_{\alpha\beta o}}{v_{\alpha\beta} v_{\alpha\beta o}} & \frac{v_\alpha v_\beta}{v_{\alpha\beta o}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p^* \\ i_q^* \\ i_r^* \end{bmatrix} \quad (\text{II.50})$$

après le choix des paramètres de commande, il est aisé d'obtenir les courants de référence par la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} i_{fa}^* \\ i_{fb}^* \\ i_{fc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^* \\ i_{f\beta}^* \\ i_{fo}^* \end{bmatrix} \quad (\text{II.51})$$

la figure(II.9) illustre la procédure de commande :

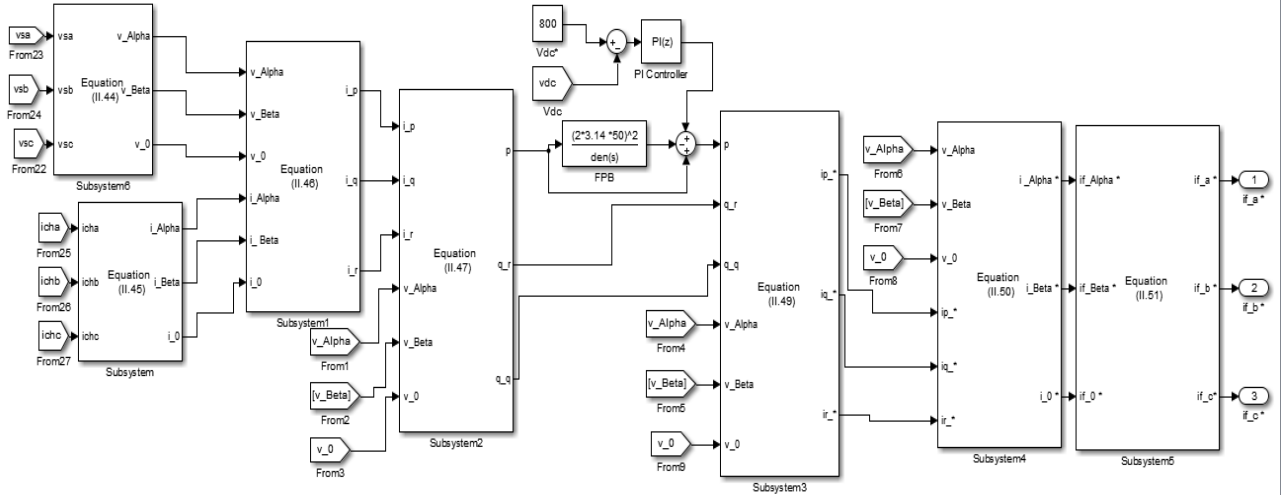


FIGURE II.9 – commande d'un filtre actif de puissance par la méthode directe dite théorie p-q-r

II.5.5 méthode directe utilisant la théorie du référentiel lié au synchronisme(SRF) :

La théorie du référentiel lié au synchronisme a donné de très bons résultats pour le réseau électrique triphasé. En modifiant la théorie du cross-vector, une théorie basée sur le référentiel lié au synchronisme a été proposée pour compenser les réseaux électriques à quatre fils [13].

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cha} \\ i_{chb} \\ i_{chc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.52})$$

Les deux signaux $\sin(\hat{\theta})$ et $\cos(\hat{\theta})$ tirés de la tension fondamentale du réseau à partir d'une P.L.L nous donne alors l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_{q\alpha} \\ i_{q\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ 0 & \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & 0 & 0 \\ -\sin(\hat{\theta}) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_o \\ i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.53})$$

Les courants harmoniques sont exprimés comme la somme d'une composante continue et une composante alternative :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_d + \tilde{i}_d \\ \bar{i}_q + \tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.54})$$

\bar{i}_d et \bar{i}_q les composantes continue de i_d , i_q . Et \tilde{i}_d , \tilde{i}_q les composantes harmoniques de i_d , i_q .

Le tableau suivant résume les modes de compensation :

Type de compensation	Paramètre de contrôle
courant harmoniques	$i_{dc} = \tilde{i}_d$ et $i_{qc} = \tilde{i}_q$
l'énergie réactive	$i_{dc} = 0$ et $i_{qc} = \bar{i}_q$
courant harmoniques + l'énergie réactive	$i_{dc} = \tilde{i}_d$ et $i_{qc} = \bar{i}_q$

TABLE II.5 – les modes de compensation de la commande dite du synchronisme lié au référentiel

Si l'objectif est de compenser les harmoniques de courant et l'énergie réactive en même temps, l'équation (II.53) devient :

$$\begin{bmatrix} i_{fo}^* \\ i_{f\alpha}^* \\ i_{f\beta}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\cos(\hat{\theta}) & -\sin(\hat{\theta}) \\ \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) & 0 & 0 \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ i_q \\ i_{q\alpha} \\ i_{q\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.55})$$

Les courants de référence sont alors calculés à partir de la transformation inverse de Concordia, soit :

$$\begin{bmatrix} i_{fa}^* \\ i_{fb}^* \\ i_{fc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^* \\ i_{f\beta}^* \\ i_{fo}^* \end{bmatrix} \quad (\text{II.56})$$

la figure(II.10) illustre la procédure de commande :

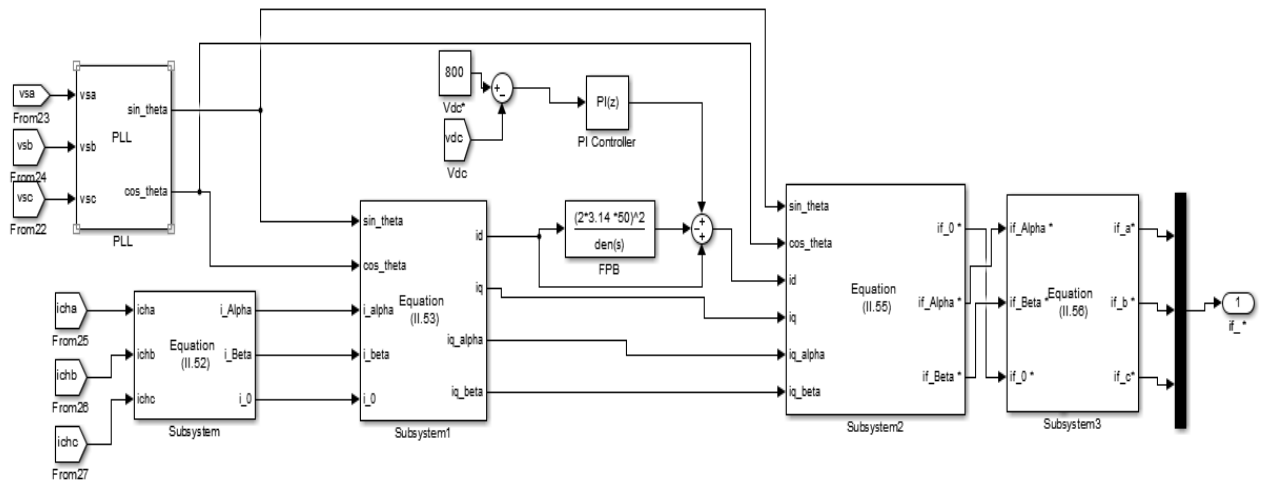


FIGURE II.10 – commande d'un filtre actif de puissance par la méthode directe dite théorie SRF

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure du filtre actif à quatre fils parallèles, et cette structure partage deux parties : la partie puissance et la partie commande d'entraînement, la partie puissance est représentée par l'onduleur de tension, le système de stockage d'énergie et le filtre de sortie, et la deuxième partie est le contrôle de commande qui est représenté par une commande L'onduleur, la régulation de la tension continue, l'identification des courants pèrtubés, et plusieurs méthodes de commandent sur l'onduleur.

Ansi,l'utilisation d'un système de détection de la tension directe du réseau (PLL) permet de simplifier les méthodes de commande et rendre ces méthodes universelles et pour n'importe quelle forme de tension.

la théorie de quatre techniques d'extraction des courants harmonique a été présenté pour être appliqué dans le chapitre suivant :

- Méthode des puissances instantanées réelle, imaginaire et homopolaire
- Méthode directe dite vecteur croisé "cross-vector"
- Méthode directe dite théorie p-q-r
- Méthode directe utilisant la théorie du référentiel lié au synchronisme (SRF)

SOMMAIRE

III.1 INTRODUCTION	31
III.2 LA SIMULATION DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE SANS FILTRE ACTIF	31
III.2.1 cas de charge identique	31
III.2.2 Cas de charge non-identique	33
III.2.3 Interprétations des résultats	34
III.3 LA SIMULATION DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE AVEC FILTRE ACTIF DE PUISSANCE	35
III.3.1 Méthode des puissances instantanées réelle, imaginaire et homopolaire mo- difié (p-q-o)	35
III.3.2 méthode directe utilisant la théorie du référentiel lié au synchronisme (SRF)	40
III.4 CONCLUSION	45

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats des simulations de réseau électrique sans filtre et avec le filtre actif de puissance à quatre bras en mode équilibré et déséquilibré .ainsi,les quatre méthodes puis nous allons faire un comparaison . Nous n'avons pu avoir les resultats probant uniquement que pour présentant ci-dessous :

III.2 La simulation du réseau électrique sans filtre actif

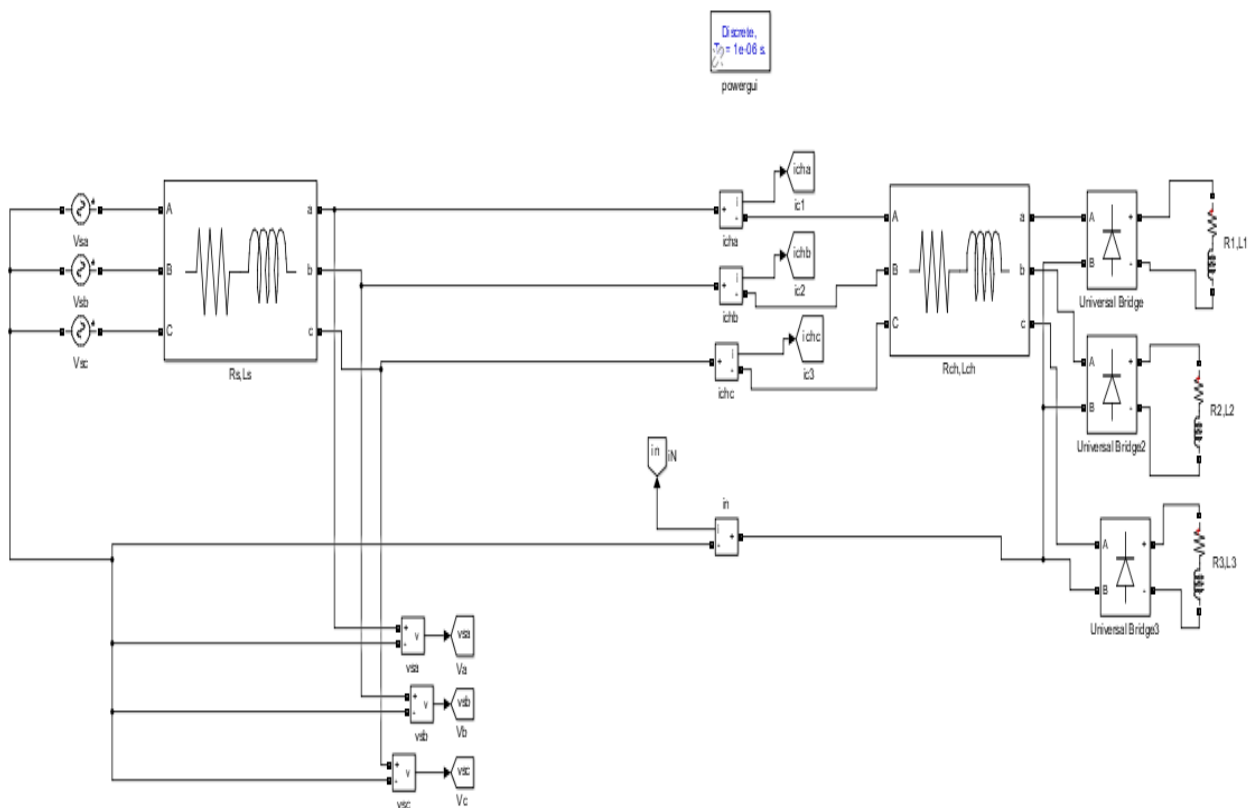


FIGURE III.1 – schéma d'un réseau triphasé à quatre fils alimentant trois charges mono-phasé non-linéaires

III.2.1 cas de charge identique

Les valeurs paramètres du système étudié sont présenté ci dessous :

$$V_{seff} = 220V, f = 50Hz, R_s = R_{ch} = 2m\Omega, L_s = L_{ch} = 2mH, R_{123} = 6\Omega, L_{123} = 10mH$$

Les résultats de simulation que nous obtenons sont les suivants :

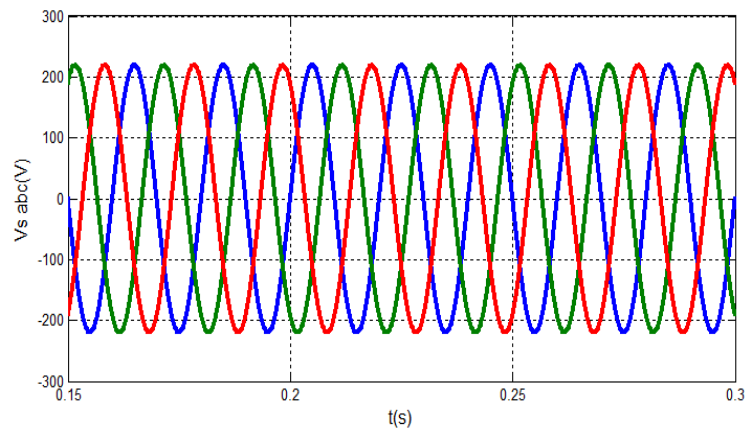
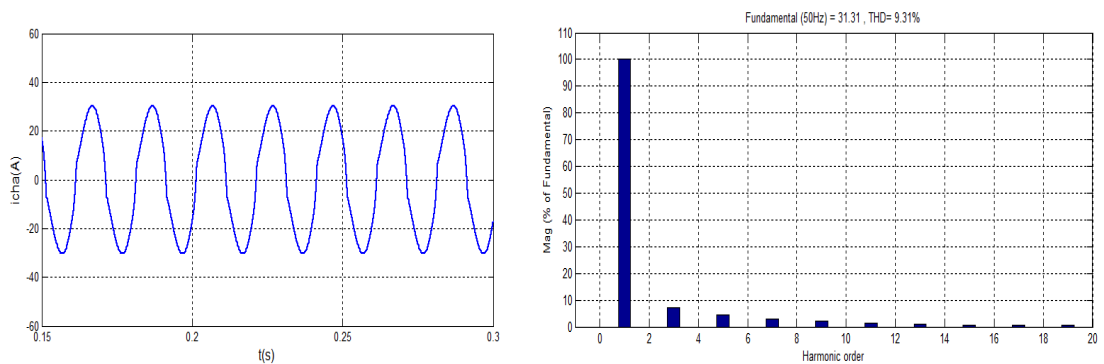


FIGURE III.2 – Tension de la source triphasé



le courant de charge

FFT de courant de charge

FIGURE III.3 – Courant de chage et son spectre d'harmonique du la phase (a)

Le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée entre l'instant 0.15 et 0.3 s, nous observons que $\text{THD} = 9.31\%$.

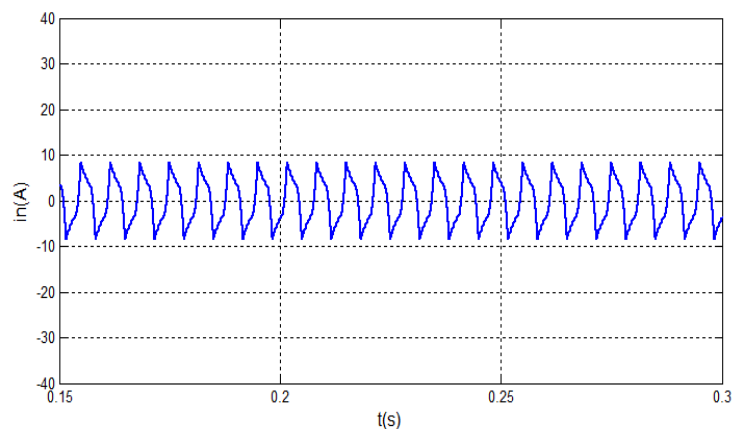


FIGURE III.4 – courant du neutre

III.2.2 Cas de charge non-identique

Les valeurs des paramètres du système étudié sont présentés ci-dessous :

$$V_{seff} = 220V, f = 50Hz, R_s = R_{ch} = 2m\Omega, L_s = L_{ch} = 2mH, R_1 = 26\Omega, R_2 = 30\Omega, R_3 = 60\Omega, L_1 = 60mH, L_2 = 85mH, L_3 = 100mH$$

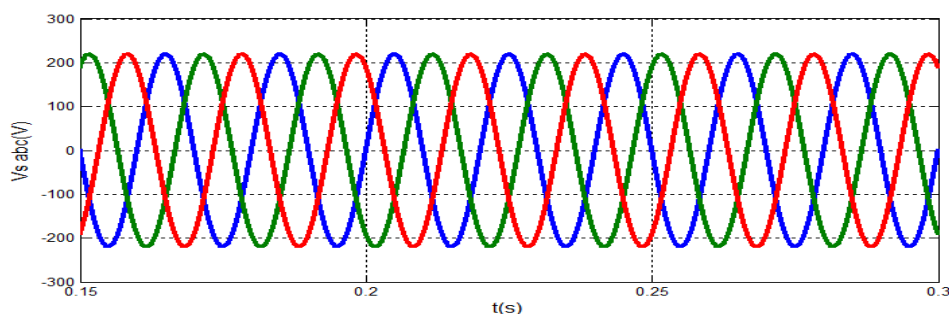
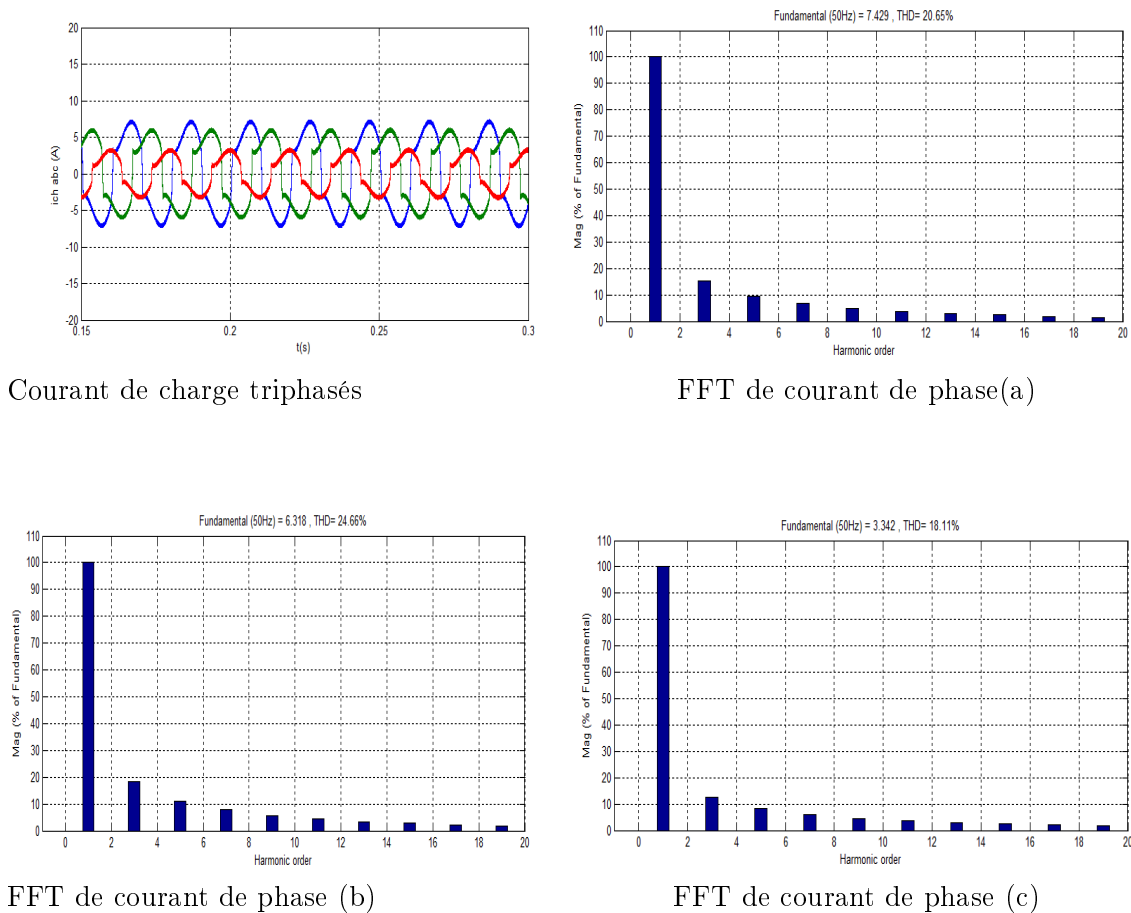


FIGURE III.5 – Tension de source triphasé



Courant de charge triphasés

FFT de courant de phase(a)

FFT de courant de phase (b)

FFT de courant de phase (c)

FIGURE III.6 – Courant de trois charge (abc) et spectres d'harmonique du chaque phase

- Le taux de distorsion d'harmonique de courant de la phase a a été mesurée entre l'instant 0.15 et 0.3 s, nous observons que $\text{THD} = 20.65 \%$.
- .
- Le taux de distorsion d'harmonique de courant de la phase b a été mesurée entre l'instant 0.15 et 0.3 s, nous observons que $\text{THD} = 24.66 \%$.
- .
- Le taux de distorsion d'harmonique de courant de la phase c a été mesurée entre l'instant 0.15 et 0.3 s, nous observons que $\text{THD} = 18.11 \%$.
- .

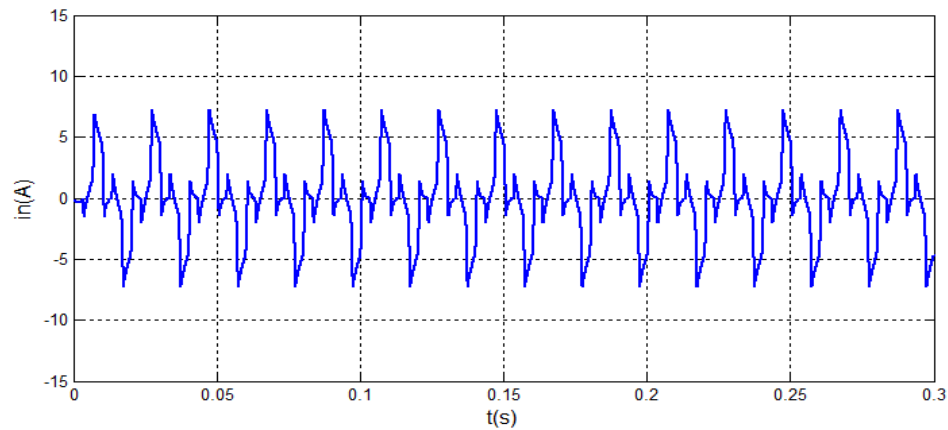


FIGURE III.7 – Courant du neutre

III.2.3 Interprétations des résultats

Avec des charges identiques et non identique, nous observons que le courant de charge est contaminé et déformé par le THD, et le courant de neutre inclut une surintensité due à une surcharge importante due à la présence de courants harmoniques.

III.3 La simulation du réseau électrique avec filtre actif de puissance

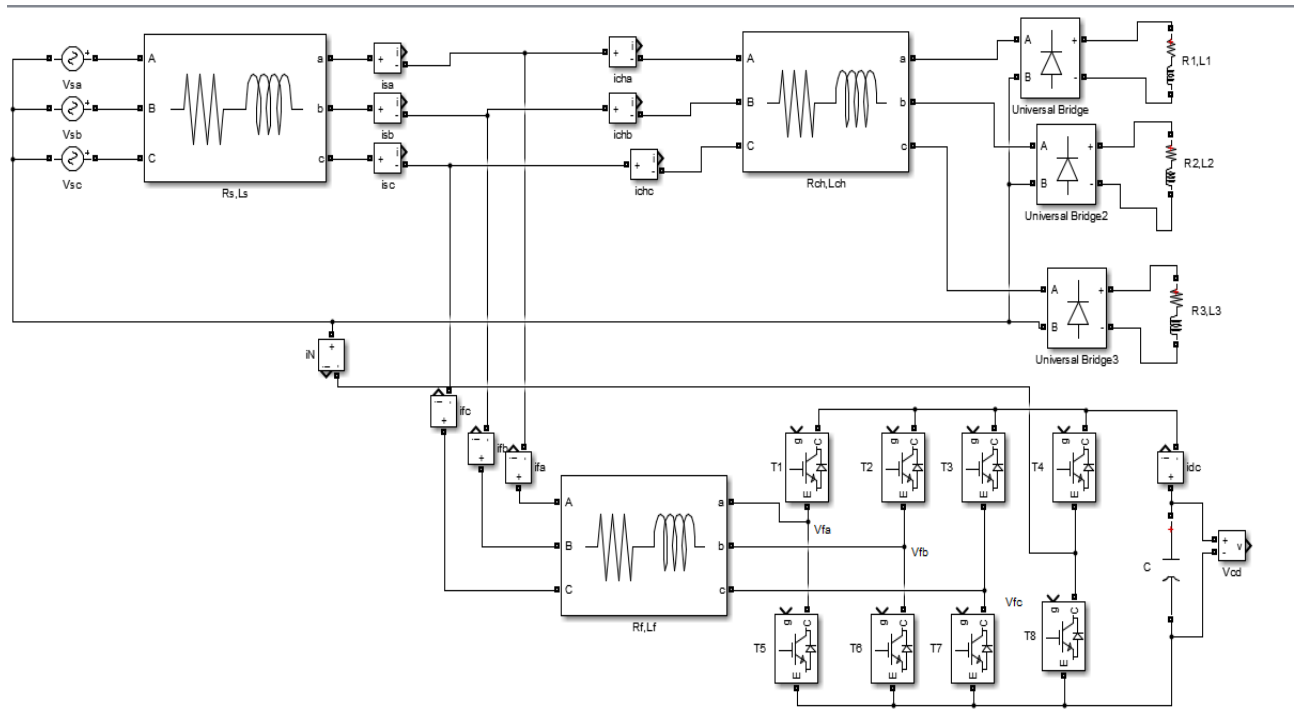


FIGURE III.8 – Model de réseau électrique triphasé à quatre bras avec un Filtre actif parallèle à quatre bras

On ajoute sur les paramètres précédant qui trouve donne la partie de reseau électrique sans filtre les informations suivantes :

$$R_f = 0.2\Omega , L_f = 0.2mH , C_{dc} = 5mF , V_{dc}^* = 800V$$

III.3.1 Méthode des puissances instantanées réelle, imaginaire et homopolaire modifié (p-q-o)

III.3.1-a cas de la charge identique

Dans ce premier cas nous avons pris un système de charges identique , c'est la raison pour laquelle nous ne tracerons la tension source triphasé , le courant de charge et le courant injecté par le filtre actif de puissance pour la phase a, puis le courant le source après le filtrage et son spectre d'harmonique et le courant de neutre avant et après le filtrage.

Les résultats des simulations du système étudié sont présentés sur les figures suivantes :

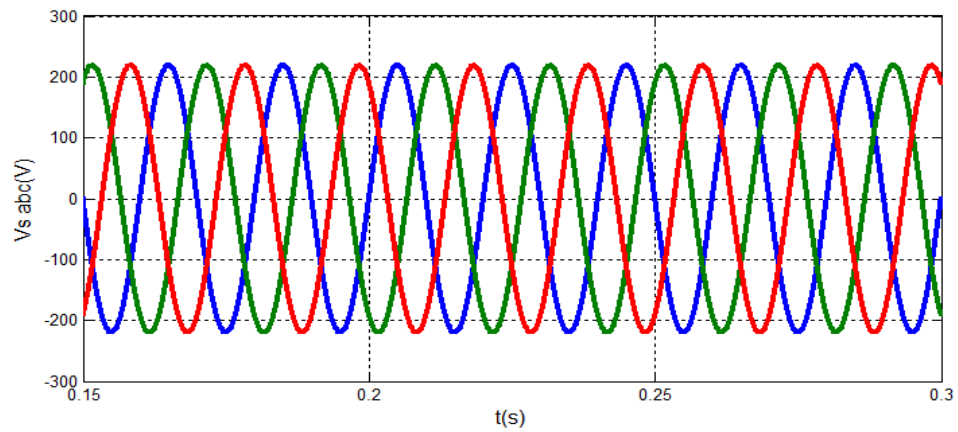


FIGURE III.9 – Tension de source triphasé

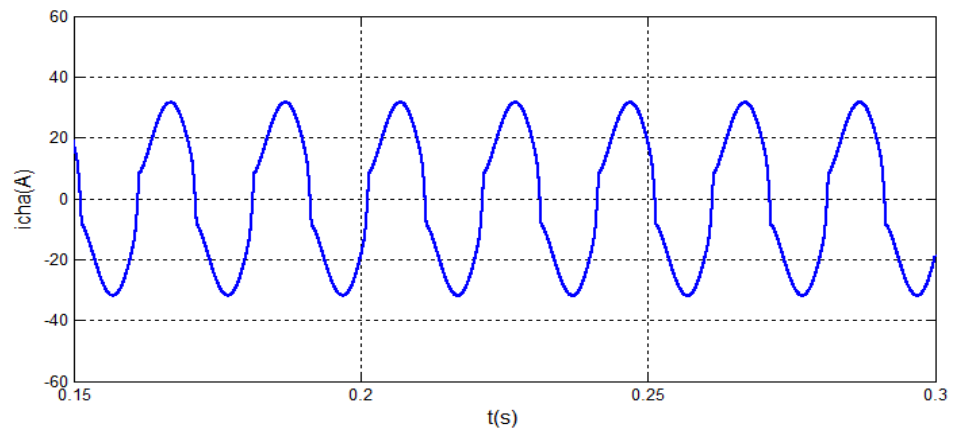


FIGURE III.10 – Courant de charge de phase (a)

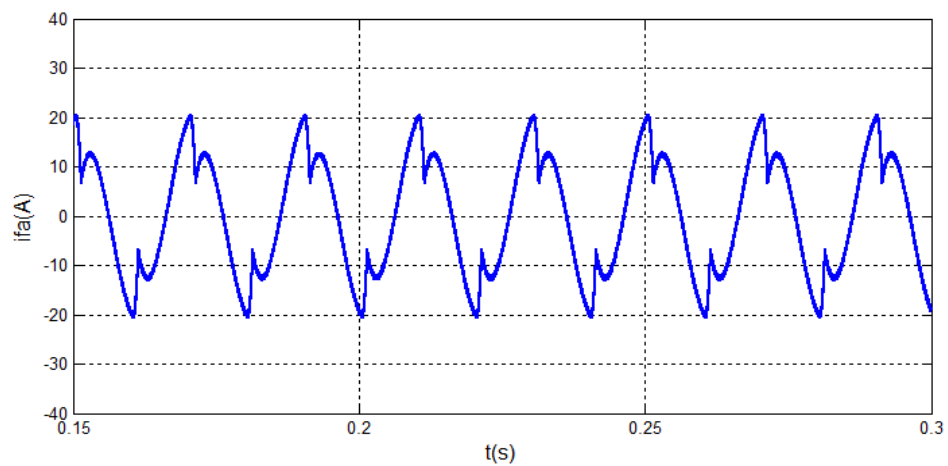


FIGURE III.11 – Courant injecté par le filtre actif de puissance de phase (a)

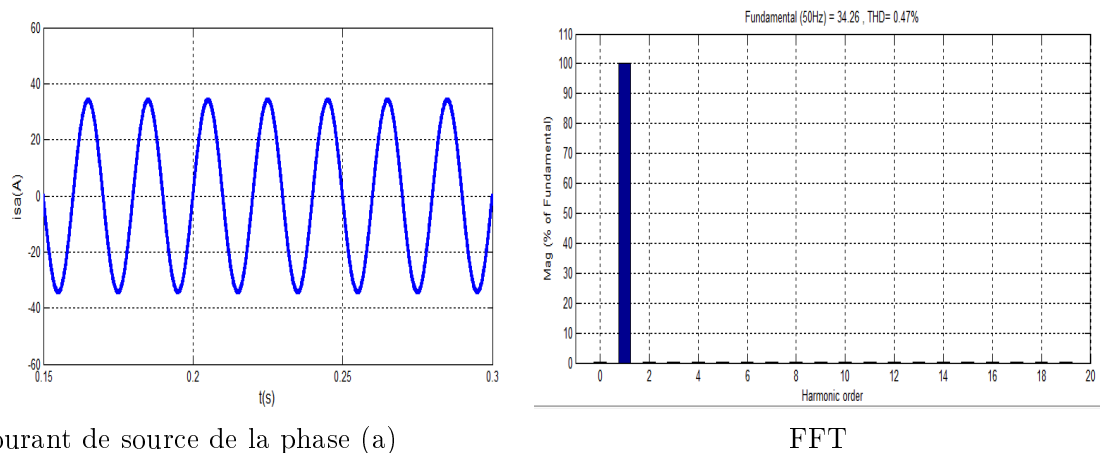


FIGURE III.12 – Courant de source après le filtrage de phase (a) et son spectre d'harmonique

Le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée entre l'instant 0.15 et 0.3 s, nous observons que $THD = 0.47\%$.

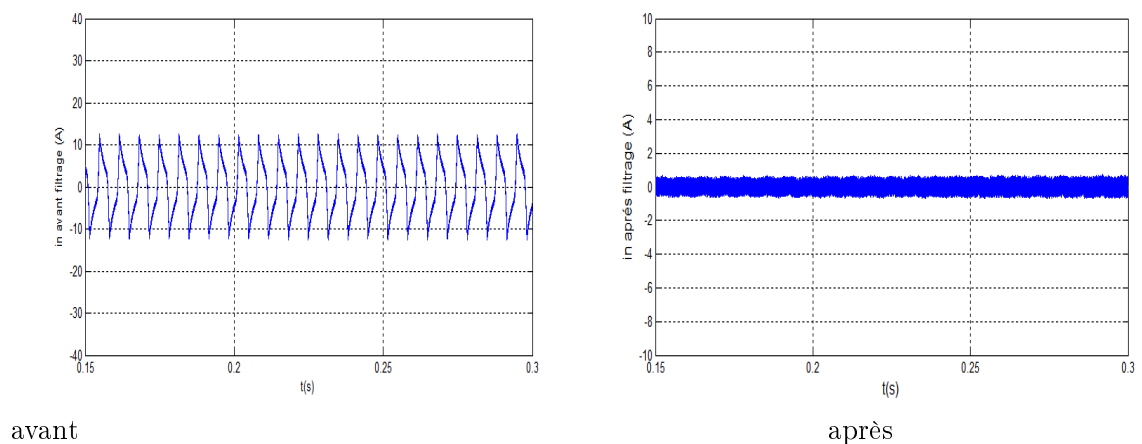


FIGURE III.13 – Courant de neutre avant et après le filtrage

III.3.1-b cas de la charge non identique

Dans ce deuxième cas nous avons pris un système de charges non identique, c'est la raison pour laquelle nous ne tracerons la tension de source triphasé, le courant des trois charges et le courant injecté par le filtre actif de puissance des trois phases (abc), puis le courant de source après le filtrage et son spectre d'harmonique et le courant de neutre avant et après le filtrage. Les résultats des simulations du système étudié sont présentés sur les figures suivantes :

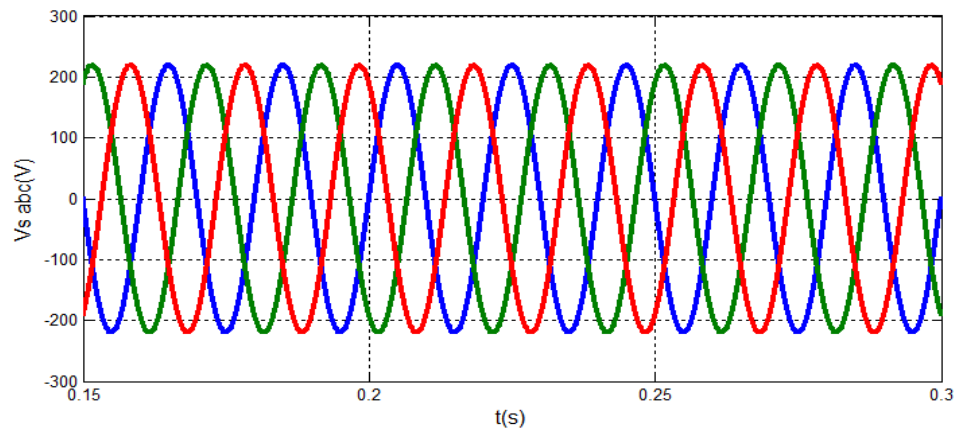


FIGURE III.14 – Tension du source triphasé

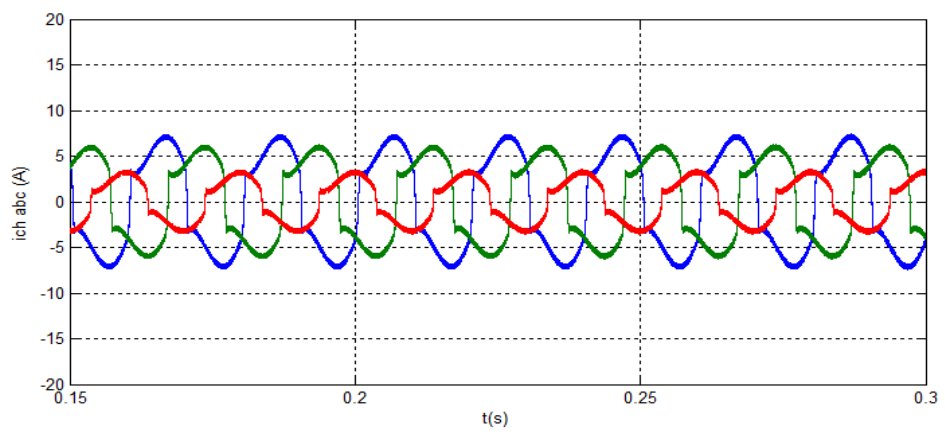


FIGURE III.15 – Courant triphasé de charge

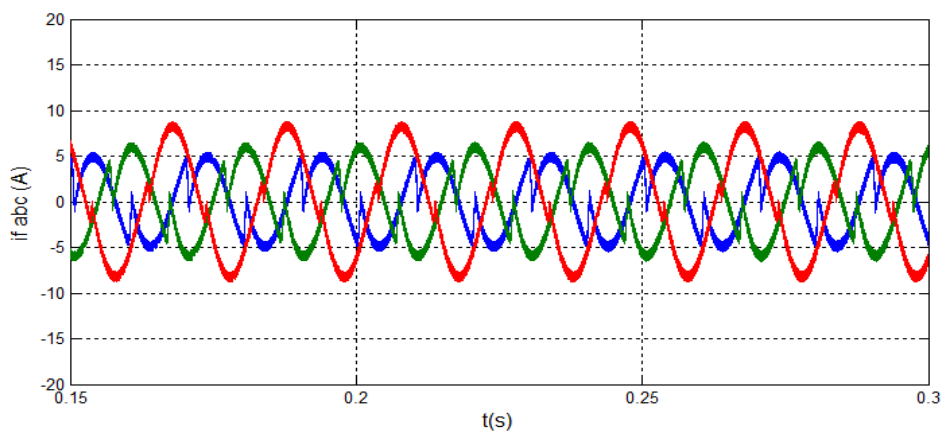
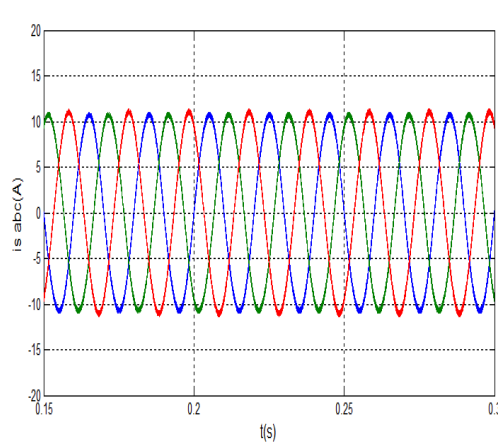
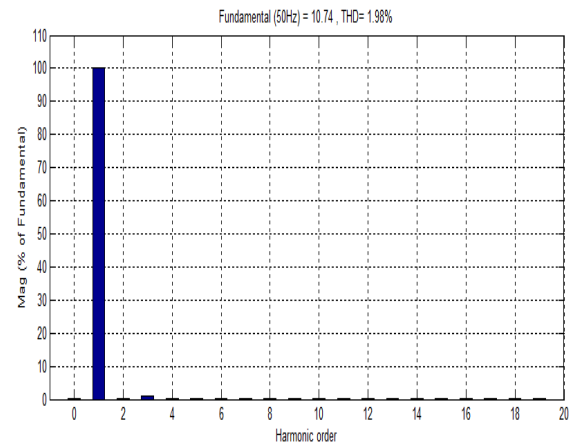


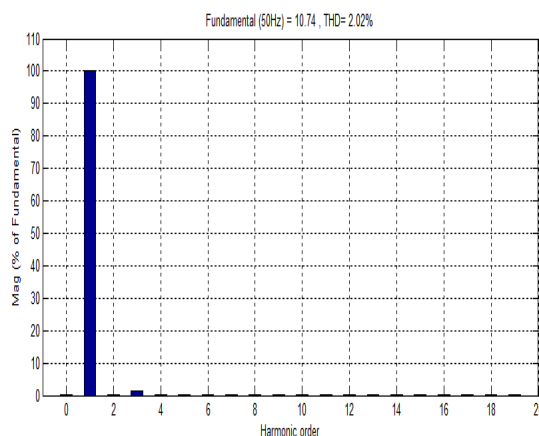
FIGURE III.16 – Courant injecté par le filtre actif de puissance (abc)



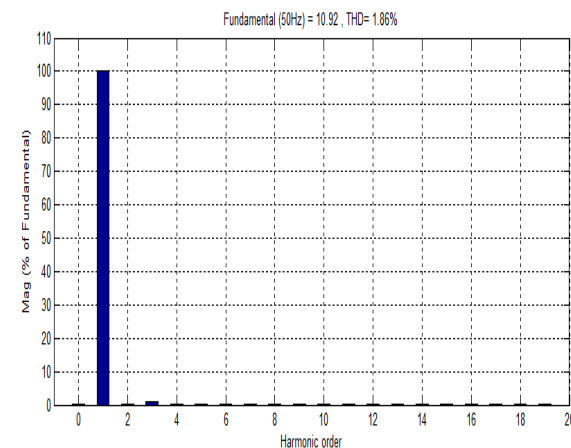
Courant de source triphasés



FFT de courant de phase (a)



FFT de courant de phase (b)



FFT de courant de phase (c)

FIGURE III.17 – Courant de source des trois phases (abc) et son spectre d'harmonique du chaque phase

- Le taux de distorsion d'harmonique de courant de la phase a a été mesurée entre l'instant 0.15 et 0.3 s, nous observons que $THD = 1.98 \%$.
- .
- Le taux de distorsion d'harmonique de courant de la phase b a été mesurée entre l'instant 0.15 et 0.3 s, nous observons que $THD = 2.02 \%$.
- .
- Le taux de distorsion d'harmonique de courant de la phase c a été mesurée entre l'instant 0.15 et 0.3 s, nous observons que $THD = 1.86 \%$.
- .

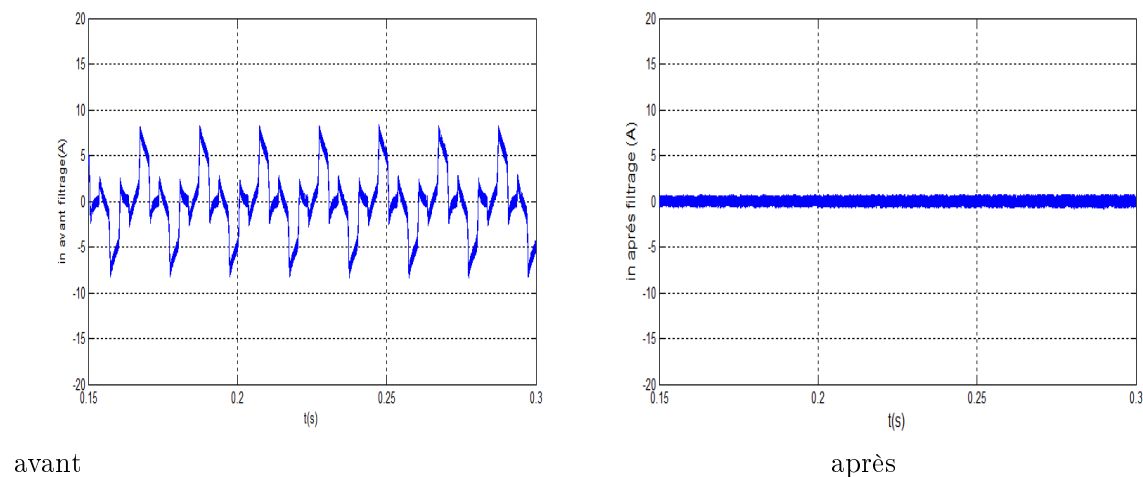


FIGURE III.18 – Courant de neutre avant et après le filtrage

III.3.1-c Interprétations des résultats

Avec des charges identiques, nous observons avant le filtrage que le courant de source (courant de charge) est contaminé et déformé par le $\text{THD}=9.31\%$, et après le filtrage le courant de source est déformé par $\text{THD}=0.47\%$ donc elle prend la forme de sinusoïdale.

partie de charge non identique :

Avant filtrage, on observe dans la figures (abc) que le courant de la source (de charge) sont pollués et déformé avec un THD phase (a) égale 20.65% , et phase (b) égale 24.66% , et phase (c) égale 18.11% . Et après le filtrage, La figures (abc) montre que les forme des courants est sinusoïdale (coté source), avec un THD phase(a) égale 1.98% , et phase (b) égale 2.02% , et phase (c) égale 1.86% . Donc nous avons utilisé le filtrage pour éliminer les harmonique.

III.3.2 méthode directe utilisant la théorie du référentiel lié au synchronisme (SRF)

III.3.2-a cas de la charge identique

Nous avons pris un système de charges équilibré pour nous ne tracerons la tension de source et triphasé, le courant de charge et le courant injecté par le filtre actif de puissance pour la phase a, puis le courant le source après le filtrage et son spectre d'harmonique et le courant de neutre avant et après le filtrage.

du système étudié sont présentés sur les figures suivantes :

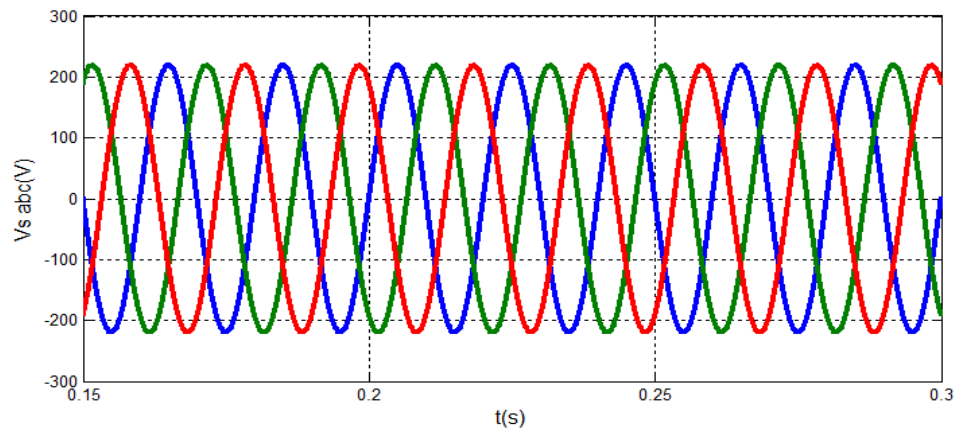


FIGURE III.19 – Tension du source triphasé

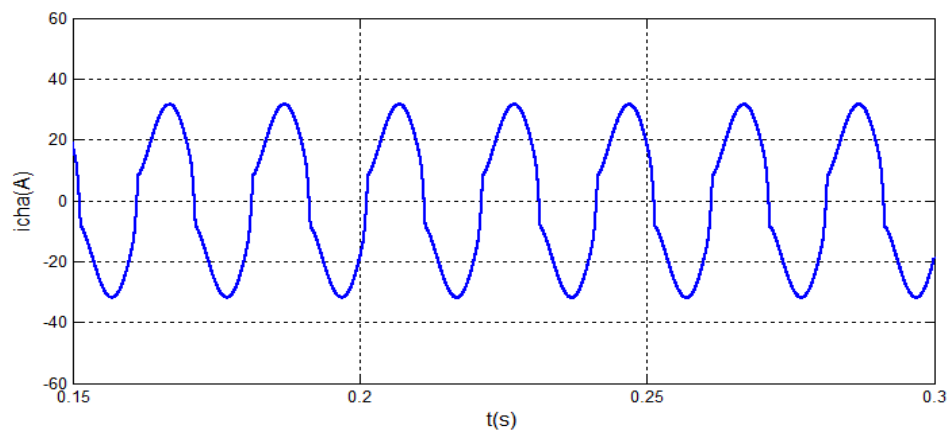


FIGURE III.20 – Courant de charge de phase (a)

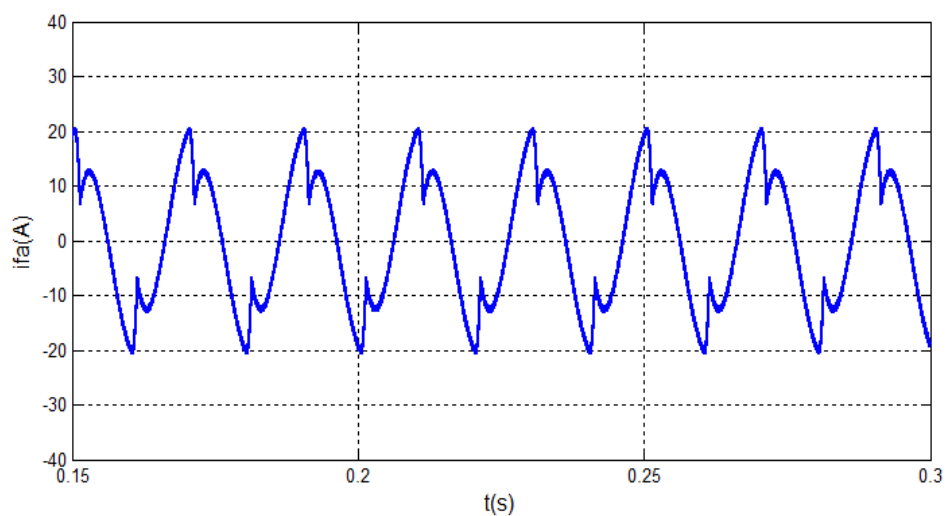


FIGURE III.21 – Courant injecté par le filtre actif de puissance de phase (a)

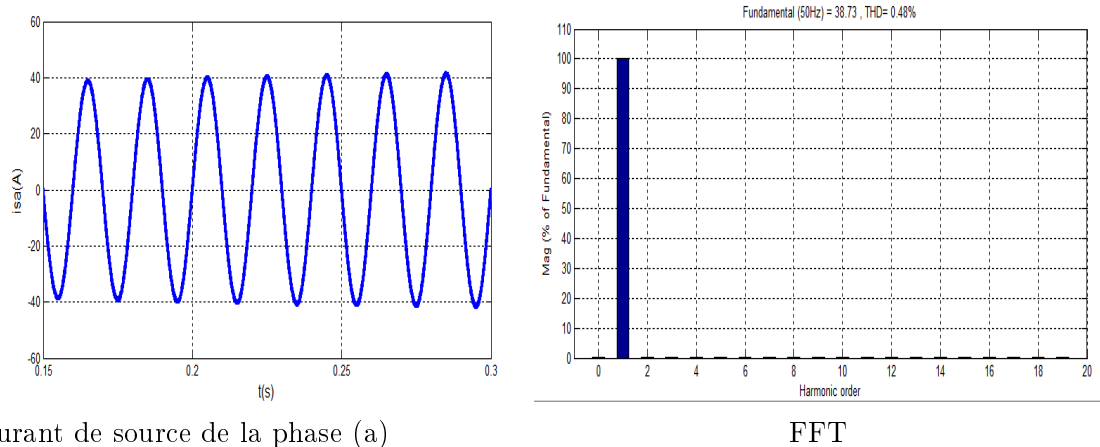


FIGURE III.22 – Courant de source après le filtrage de phase a et son spectre d'harmonique

Le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée entre l'instant 0.15 et 0.3 s, nous observons que $THD = 0.48\%$.

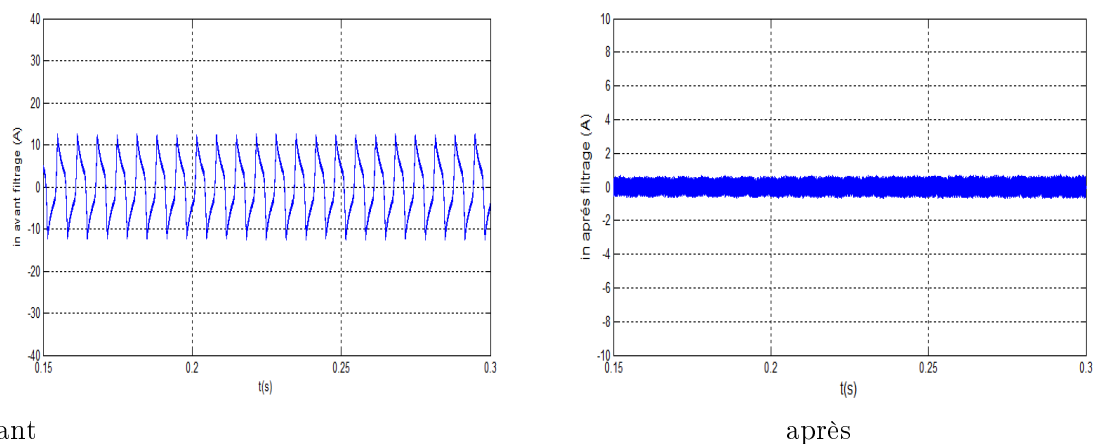


FIGURE III.23 – Courant de neutre avant et après le filtrage

III.3.2-b cas de la charge non identique

nous avons pris un système de charges non identique pournous ne tracerons la tension de source triphasé , le courant des tois charge et le courant injercté par le filtre actif de puissance des trois phases (abc) , puis le courant le source après le filtrage et son spectre d'harmonique et le courant de neutre avant et après le filtrage.

Les résultats des simulations du système étudié sont présentés sur les figures suivantes :

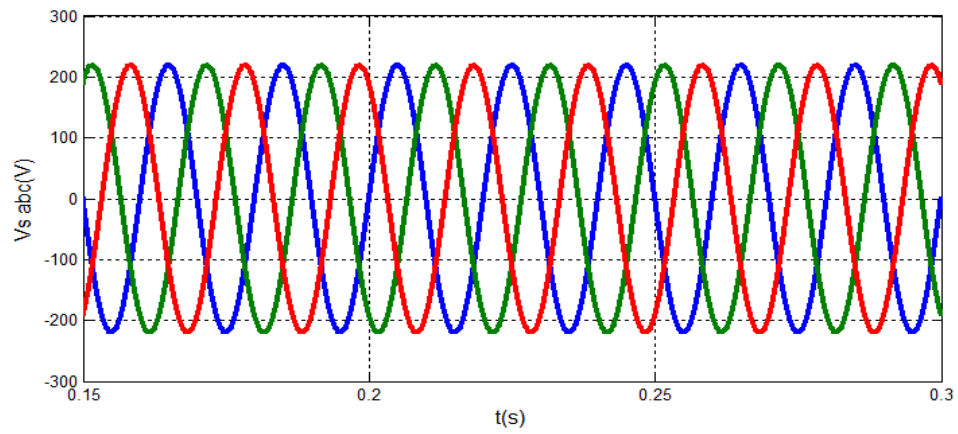


FIGURE III.24 – Tension de source triphasé

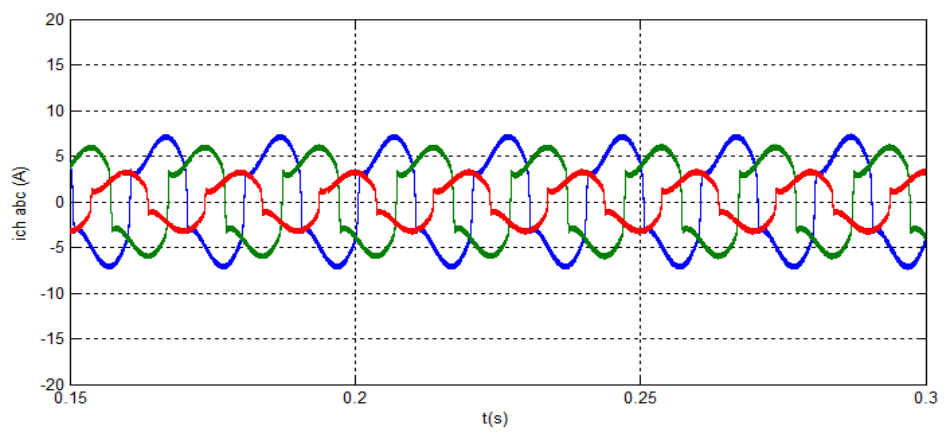


FIGURE III.25 – Courant triphasé de charge

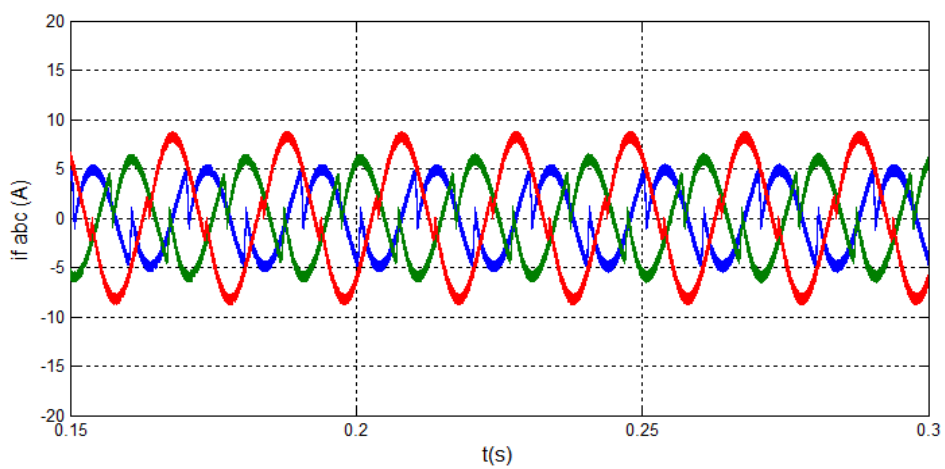


FIGURE III.26 – Courant injecté par le filtre actif de puissance (abc)

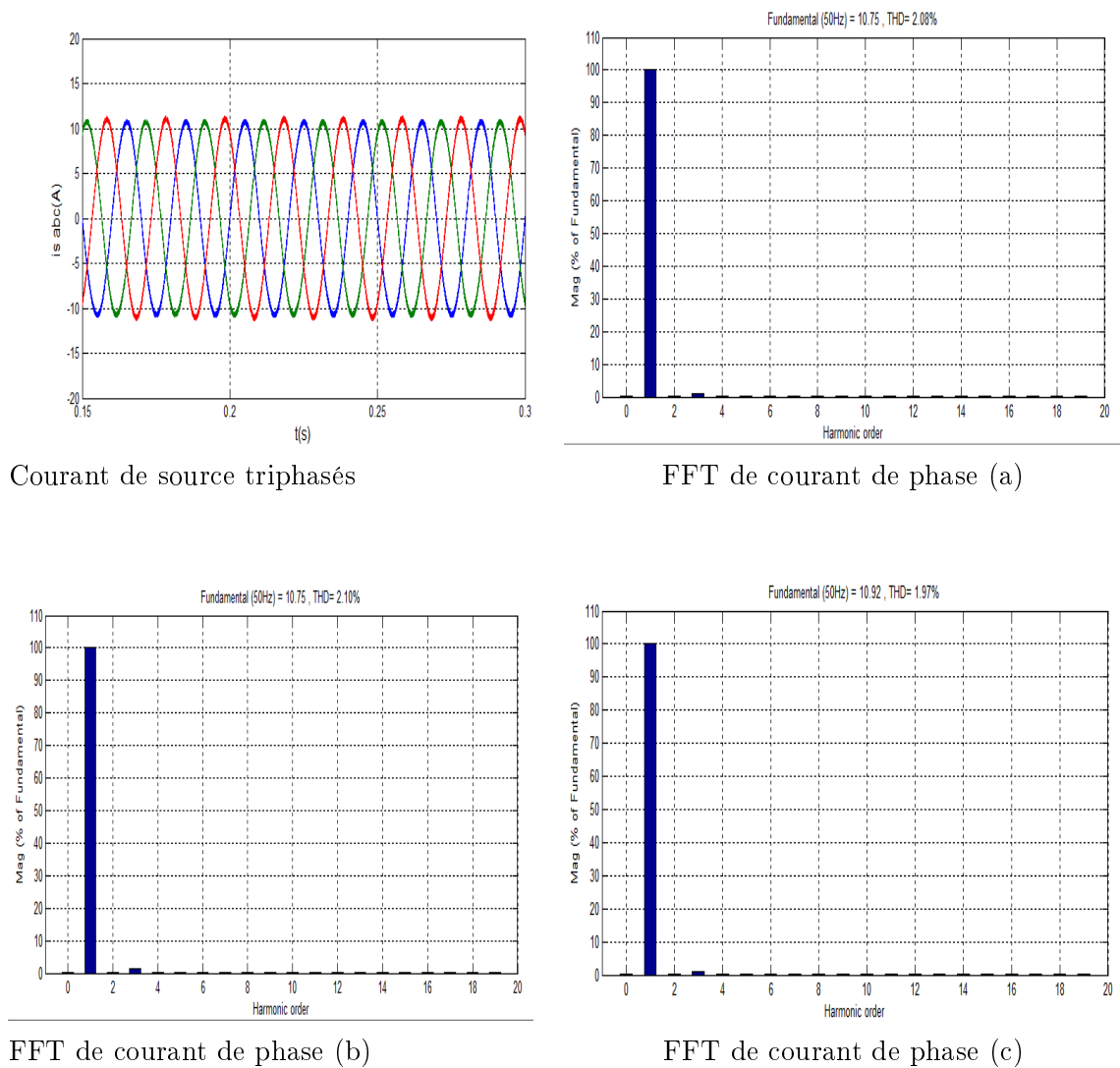


FIGURE III.27 – Courant de source des trois phases (abc) et son spectre d'harmonique du chaque phase

- Le taux de distorsion d'harmonique de courant de la phase a a été mesurée entre l'instant 0.15 et 0.3 s, nous observons que $THD = 2.08 \%$.
- .
- Le taux de distorsion d'harmonique de courant de la phase b a été mesurée entre l'instant 0.15 et 0.3 s, nous observons que $THD = 2.01 \%$.
- .
- Le taux de distorsion d'harmonique de courant de la phase c a été mesurée entre l'instant 0.15 et 0.3 s, nous observons que $THD = 1.97 \%$.
- .

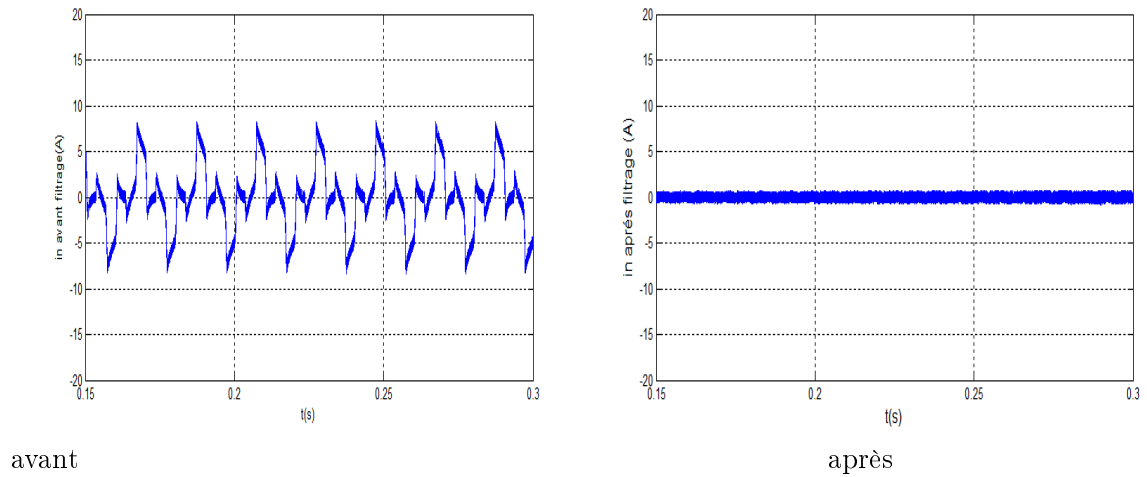


FIGURE III.28 – Courant de neutre avant et après le filtrage

III.3.2-c Interprétations des résultats

- Dans les deux cas de charge équilibré et déséquilibré, on observe que le courant de source après le filtrage c'est un sinusoïdal par ce que le spectre h'armonique est très diminué.
- On observe que les résultats de simulation après le filtrage de méthode des puissances instantanées réelle, imaginaire et homo-polaire modifié (p-q-o) sont parfaite que les autres methodes parce que elle donne un bon THD.

III.4 Conclusion

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté des résultats de simulation de resau électrique sans filtre actif et avec le filtre par les deux méthodes en mode identique et non identique et faire une comparaison qui conduit à l'identification de la technique modifie p-q-o qui nous a donné les meilleurs résultats par papport à l'autre methodes parce elle donne un THD très faibles.

Conclusion générale

Ce travail est consacré à l'application et à l'amélioration des performances d'un filtre actif à quatre bras pour améliorer la qualité de l'alimentation électrique dans un réseau électrique basse tension avec distribution à fil neutre. Le but du filtre actif parallèle était de compenser les courants perturbateurs harmoniques, réactifs et déséquilibrés afin de maintenir un régime de courant triphasé sinusoïdal et équilibré côté source ou en d'autres termes, de séparer les perturbations causées par des charges non linéaires dans le réseau en amont.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les principales perturbations affectant les réseaux électriques, leurs origines et leurs conséquences sur les charges connectées. Diverses solutions telles que des filtres passifs et actifs utilisés pour compenser les perturbations ont été introduites.

Notre objectif était filtrer les perturbations de type courant dues aux charges non linéaires, notre choix s'est porté sur le filtre parallèle à 4 bras pour résoudre cette problématique.

Dans le deuxième chapitre, nous avons détaillé le fonctionnement du filtre actif à quatre bras, car ce filtre nous a donné des résultats satisfaisants.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté des résultats de simulation avec deux méthodes d'extraction de courants de référence en appliquant différentes conditions de perturbation pour des charges monophasées identiques et différentes afin de faire une comparaison qui conduit à l'identification de la technique modifiée (pqo) qui nous a donné les meilleurs résultats en termes THD.

Comme perspective, il serait intéressant de développer les deux autres méthodes d'extraction qu'on a pas pu mener à terme en plus de l'utilisation de commande intelligente pour une meilleure prise en charge des perturbations dans les réseaux électriques.

Bibliographie

- [1] Kamel AL HADDAD, « La qualité de l'énergie électrique », Montreal Canada, 2005
- [2] Hanane KHOUARA, « application d'un filtre actif série au control de la tension à réseau à basse tension », Mémoire d'ingénieur d'Etat, Université de BATNA, 2006
- [3] Chapman DAVID, « Guide power quality », Juillet 2002
- [4] F.EMMERI Z.GHEMBAZA, Etude et simulation d'un circuit de commande pour filtre actif de puissance à quatre bras pour un réseau à quatre fils, Memoire de fin d'étude pour l'obtention du diplome de master, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 25 Juin 2015
- [5] M. M. Abdusalam, "Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales", Thèse de Doctorat, Université, H. Poincaré, Nancy-I, Mai 2008.
- [6] M. Kamil et S. Nouiri, "Commandes non linéaires d'un filtre actif parallèle", Mémoire de Fin d'Etudes, Université de M'sila, 2010.
- [7] S. Mouttou, "Nouvelles approches de commande d'un filtre actif parallèle à source de courant", Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Trois- Rivières, Octobre 2002.
- [8] M Tidjani, "Stratégies de Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Quatre Fils", Thèse de magistère, CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED, 2012.
- [9] T. BENSLIMANE, " Commande Numérique d'un Filtre Actif Parallèle Autonome ", Thèse de Magister, Ecole Militaire Polytechnique-Alger, 2004.
- [10] S. A, TADJER, " Etude d'un Système de Compensation d'Harmonique en Utilisant un Générateur Photovoltaïque, GPV ", thèse de magistère, Université M'Hamed BougarBoumerdès, 2008

-
- [11] B. Mohamed Saleh et D.Zinelaabidine et D.Adel , "Commande par mode glissant d'un filtre actif parallèle à quatre bras",Mémoire de Fin d'Etudes,université de M'SILA,2011/2012
- [12] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits", Proceeding of International Power Electronics Conference. Tokyo, Japan, pp. 1375-1386, 1983.
- [13] M. C. Benhabib, "Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension : Modélisation simulation et validation expérimentale de la commande", Thèse Doctorat, Université H. Poincaré, Nancy I, 2004.
- [14] H. Akagi, S. Ogasawara, H. kim, "The theory of instantaneous power in three-phase four-wire systems and its applications", Electrical Engineering in Japan, vol.135, N°3, pp. 74-86, 2001 .
- [15] F. Z. Peng, G. W. Ott, D. J. Adams, "Harmonic and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive theory for three-phase four wire systems", IEEE Trans. on Power Electronic, Vol. 13, N°6, pp. 1174-1181, 1998.
- [16] F. Z. Peng, J. S. LAI, "Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems", IEEE Trans. On I.M, Vol. 45, N°1, pp. 293-297, 1996.
- [17] H. Kim, H. Akagi, "The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames", Proceedings of the IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS '99. 1999 , Vol. 1 , 1999.
- [18] H. Kim, F. Blaabjerg, B. Bak-Jensen, J. Choi, "Instantaneous power compensation in three-phase systems by using p-q-r theory", IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference , PESC'01 , Vol. 2 , pp. 478 -485, 2001.
- [19] H. Kim, F. Blaabjerg, B. Bak-Jensen, "Spectral analysis of instantaneous powers in single-phase and three-phase systems with use of p-q-r theory", IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC'01 , Vol. 1 , pp. 54 -61, 2001.
- [20] M . Tidjani "Étude 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 Kheider-Biskra , 2017.
- [21] Yousfi Abdelkader " amélioration de la qualité d'énergie électrique en utilisant un onduleur de tension a cinq niveaux ", Mémoire, 27mai2008,p7.

-
- [22] AMARA Asma BENGANA Adil Yassine « Etude et simulation d'un circuit de commande pour un filtre actif de puissance parallèle à deux bras à point milieu pour un réseau électrique à trois fils, Mémoire, 25juin2015

Annexe A : Les harmoniques de tension et de courant

Les harmoniques de tension et de courant

harmoniques en tension

Harmoniques impairs		Harmoniques pairs	
Rangs	Courant harmonique	rangs	Courant harmonique admissible maximale
3	0.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	8<n<40	0.23*8/n
11	0.33		
13	0.21		
15<n<39	0.15*15/n		

FIGURE 29 – Niveaux de compatibilite des harmoniques en tension

harmoniques en courant

Harmoniques impairs		Harmoniques pairs	
Rangs	Courant harmonique	rangs	Courant harmonique admissible maximale
3	0.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	8<n<40	0.23*8/n
11	0.33		
13	0.21		
15<n<39	0.15*15/n		

FIGURE 30 – Limite des composantes harmoniques en courant

Annexe B : simulation de la méthode de puissance instantanée modifiée p-q-o

la méthode de puissance instantanée modifiée p-q-o

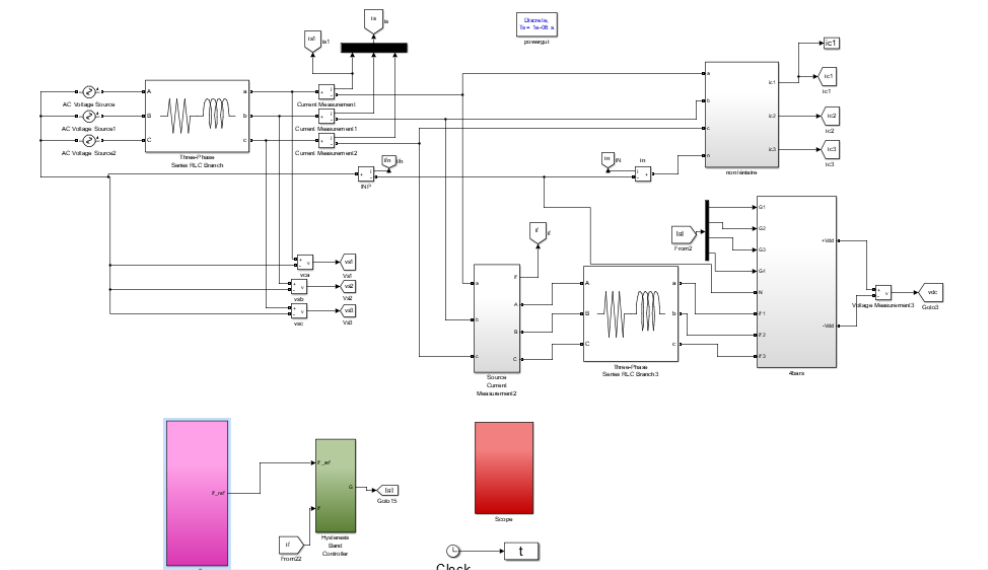


FIGURE 31 – Schéma bloc Simulink de la méthode pq0

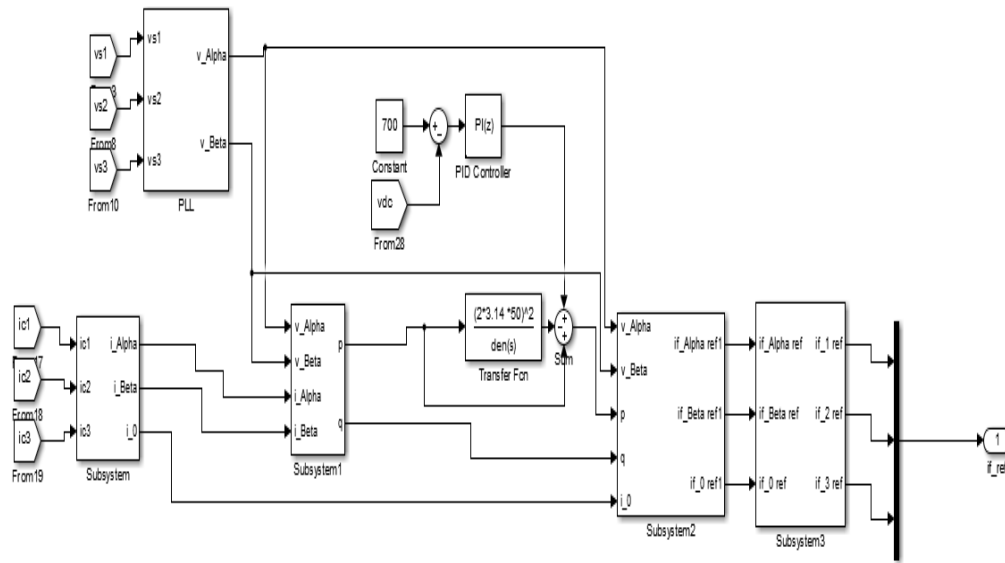


FIGURE 32 – Schéma de la partie commande par la méthode pq0

Annexe C : méthode directe utilisant la théorie du référentiel lié au synchronisme (SRF)

méthode directe utilisant la théorie du référentiel lié au synchronisme (SRF)

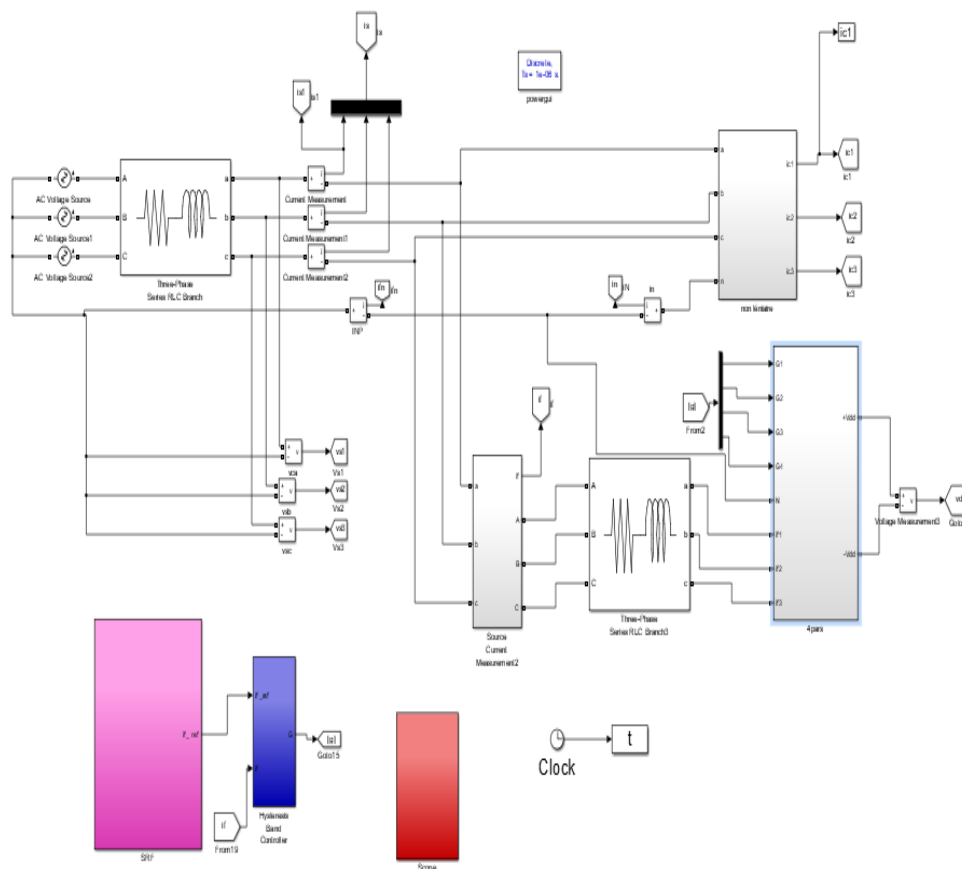


FIGURE 33 – Schéma de la méthode SRF

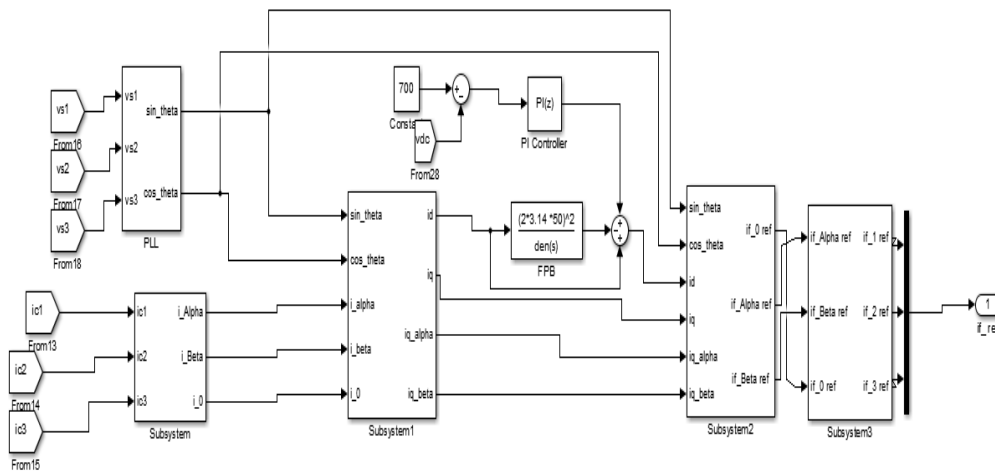


FIGURE 34 – Schéma de la partie commande de la méthode SRF

Résumé

Le problème de la pollution harmonique dans les réseaux de distribution électrique devient de plus en plus préoccupant avec l'utilisation croissante de charges non linéaires qui génèrent des harmoniques de courant et consomment de la puissance réactive. Dans notre travail, nous présentons une étude comparative de la stratégie de commande d'un filtre actif de puissance shunt triphasé à quatre bras en charge équilibré et déséquilibré qui permet de compenser les harmoniques et les puissances réactives. Par conséquent, nous proposons quatre méthodes pour extraire les courants de référence telles que la méthode de p-q-o, "vecteur croisé", p-q-r, d-q (SRF) et nous présentons chaque méthode en théorie puis la simulation deux deux méthodes (pqo,SRF) suivie d'une étude comparative.

Abstract

The problem of harmonic pollution in electrical distribution networks is becoming more and more of a concern with the increasing use of non-linear loads which generate current harmonics and consume reactive power. In our work, we present a comparative study of the control strategy of a balanced and unbalanced load-balanced and unbalanced three-phase four-arm shunt power active filter that compensates for harmonics and reactive powers. Therefore, we propose four methods to extract the reference currents such as p-q-o, "cross vector", p-q-r, d-q (SRF) method and we present each method in theory then the simulation two two methods (pqo,SRF) followed of a comparative study.

ملخص

أصبحت مشكلة التلوث التوافقي في شبكات التوزيع الكهربائي مصدر قلق متزايد مع الاستخدام المتزايد للأحمال غير الخطية التي تولد التوافقات الحالية وتستهلك الطاقة التفاعلية . في هذا العمل، نقدم دراسة مقارنة لاستراتيجية التحكم لمرشح طاقة تحويلية الفعالة ثلاثية الاطوار بأربعة أذرع من الأحمال المختلف (المتوازنة وغير متوازنة) مما يجعل من الممكن التعويض عن توافقيات التيارات والقوى التفاعلية. لذلك اقترحنا أربعة طرق لاستخراج التيارات المرجعية وهي طريقة القوى اللحظية الحقيقية والخيالية والمتجانسة، طريقة مباشرة تسمى ناقل متقاطع، وكذلك طريقة مباشرة أخرى ونظرية الإطار المرجعي المرتبط بالتزامن. ودرسنا هذه الإستراتيجية على النظرية. تم تقديم سلسلة من عمليات المحاكاة لقياس أداء الطريقتين القوى اللحظية الحقيقية والخيالية والمتجانسة ونظرية الإطار المرجعي المرتبط بالتزامن متبوعة بدراسة مقارنة مما يؤدي إلى ان تقنية القوى اللحظية الحقيقية والخيالية والمتجانسة اعطتنا أفضل النتائج.