

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE
ELECTRIQUE



DOMAINE : SCIENCE ET
TECHNOLOGIE
FILIERE : ELECTROTECHNIQUE
OPTION : ENERGIE RENOUVELABLE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Intitulé

ETUDE ET SIMULATION D'UN SYSTEME
D'AMELIORATION DE LA QUALITE D'ENERGIE A PARTIR
DES PUISSANCES INSTANTANEEES

Réalisé par :

BELATAR Mohamed

BELLATEUR Amin

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. DJAZIA Kamel	université de m'sila	Rapporteur
Dr. M.DRIF	université de m'sila	Président
Dr. A.BOUCHELAGHEM	université de m'sila	Examineur

Année universitaire : 2018 /2019

Nous dédions ce modeste travail à :

- A nos parents, aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de nous combler.

Que DIEU leurs procure bonne santé et longue vie.

- A nos frères et nos sœurs.

Remerciements

Louange à Dieu le Tout-Puissant pour tout ce qui nous a donné pour que nous puissions terminer ce travail.

Que ce soit d'un point de vue scientifique ou humain, la réalisation de ce projet de fin d'études fut pour nous une expérience d'une valeur immense. Notre première pensée va tout naturellement à l'encadreur Dr. DJAZIA Kamel pour son encadrement ainsi que la confiance qui nous a témoignée et nous confiant ce travail attrayant. Nous avons apprécié sa grande chaleur humaine et sa disponibilité. Merci pour son encouragement, et disponibilité.

Nos remerciements vont également à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Nous n'oublions pas de remercier toute notre promotion du Master 2019, avec qui on a passé des moments difficiles et d'autre agréable grâce à leur sympathie et esprit d'équipe.

Nous voudrions également remercier vivement les membres de jury d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Résumé

Ce mémoire s'inscrit dans un cadre de dépollution des réseaux électriques équilibré et déséquilibré par les filtres actifs de puissances, Cette pollution est due à la prolifération de la connexion au réseau des charges non linaires, ces charges génèrent des harmoniques de courant et consomment de la puissance réactive dans les réseaux électriques.

Le filtrage actif de puissance est l'un des solutions les plus efficaces face à ce problème. Un filtre actif est composé généralement d'un onduleur de tension commandé afin de générer des courants harmoniques de même amplitude et en opposition de phase avec les harmoniques que l'on désire compenser.

La méthode des puissances instantanées (p-q) est utilisée pour calculer, identifier et compenser le courant harmonique. Dans le cas où la tension est déséquilibrée on a appliqué le système à base de PLL pour généraliser la méthode (p-q).

Mots clés : Filtre Actif Parallèle (FAP), La méthode des puissances instantanées (p-q),

Table des matières

Table des matières.....	i
Liste des Figures.....	iii
Liste des Tableaux.....	v
Glossaire.....	vi
Nomenclature	vii
Introduction générale	1
Chapitre I. Perturbations des réseaux électriques	5
I.1 Introduction.....	6
I.2 Qualité d'énergie.....	6
I.3 Définition de perturbation électrique	7
I.4 Les perturbations harmoniques	7
I.4.1 Sources des harmoniques	8
I.4.2 Caractéristiques des perturbations harmoniques	9
I.4.3 Déséquilibre du courant et de la tension	11
I.4.4 Les Creux de tension.....	12
I.5 Effets des harmoniques	12
I.5.1 Aspect économique	12
I.5.2 Effets instantanés	13
I.5.3 Effets à terme	13
I.6 Normes imposées sur le THD	14
I.7 Elimination des harmoniques.....	15
I.7.1 Solutions traditionnelles de la dépollution.....	16
I.7.2 Solutions modernes de dépollution.....	17
I.7.3 Comparaison générale entre le filtre passif et le filtre actif	20
I.8 CONCLUSION.....	21
Chapitre II. Filtre actif parallèle.....	22
II.1 Introduction.....	23
II.2 Réseau Electrique.....	23
II.3 La charge polluante.....	24
II.4 Principe du filtrage actif parallèle	24
II.5 Structure générale du Filtre Actif Parallèle	25
II.5.1 Etudes de la Partie puissance	26
II.5.2 Etudes de la partie commande	29
II.6 CONCLUSION.....	35
Chapitre III. Méthode des puissances instantanées (p-q).....	36
III.1 Introduction.....	37
III.2 Méthode des puissances instantanées (p-q)	37
III.3 Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées (p-q).....	38

III.3.1	Généralités sur les puissances instantanées.....	38
III.3.2	Analyse fréquentielle des puissances instantanées.....	40
III.3.3	Courant harmonique équilibré avec une tension sinusoïdale équilibrée	40
III.3.4	Courant harmonique équilibré avec une tension sinusoïdale déséquilibrée.....	41
III.4	Le système à base de P.L.L.....	44
III.4.1	P.L.L classique.....	44
III.4.2	P.L.L triphasé classique avec un filtre multi-variable (FMV)	46
III.5	Résultats de simulation	48
III.5.1	Paramètres de simulation	48
III.6.2	Avant branchement du FAP au réseau électrique	49
III.6.3	Réseau équilibré.....	50
III.6.4	Comportement du FAP en régime dynamique.....	54
III.6.5	Réseaux déséquilibré.....	55
III.6.6	Réseau équilibré avec distorsion.....	61
III.7	Conclusion	65
Conclusion générale		66
Conclusion générale		67
Références bibliographiques		68
Références bibliographiques		69

Liste des Figures

Figure I.1. Décomposition d'un signal périodique	8
Figure I.2. Diagramme de Fresnel des puissances	10
Figure I.4. Structures de filtres passifs	16
Figure I.5. Filtre actif parallèle	18
Figure I.6. Filtre actif série	19
Figure II.1. Réseau électrique triphasé.	23
Figure II.2. Charge non linéaire à Redresseur à diodes.	24
Figure II.3. Schéma illustratif du principe de filtre actif parallèle.	25
Figure II.4. Structure générale du Filtre Actif Parallèle.	26
Figure II.5. Onduleur triphasé à structure tension.	26
Figure II.6. Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur dans le plan (α , β).	28
Figure II.7. Commande du FAP.	29
Figure II.8. Allure des potentiels de phase lors d'un fonctionnement en pleine onde.	30
Figure II.9. Principe de commande par hystérésis.	31
Figure II.10. Principe de commande des courants par MLI.	31
Figure II.11. Schéma de la commande directe.	32
Figure II.12. Schéma de la commande indirecte.	32
Figure II.11. Boucle de régulation de la tension continue.	33
Figure III.1. Schéma synoptique de l'algorithme (p-q).	38
Figure III.2. Transformation du spectre de la puissance réelle instantanée (Courant harmonique et tension sinusoïdale équilibrée).	41
Figure III.3. Schéma représentant le principe de séparation des puissances.	42
Figure III.4. Algorithme d'identification de la méthode (p-q).	44
Figure III.5. Schéma de PLL classique.	45
Figure III.6. Schéma simplifié de la PLL.	46
Figure III.7. Diagramme bloc du filtre HSF.	47
Figure III.8. Schéma de PLL Modifiée.	47
Figure III.9. Modélisation du réseau électrique connecté à une charge non linéaire.	49
Figure III.10. La Forme d'onde de la tension de la source.	49
Figure III.11. La Forme d'onde du courant de source (courant de la charge).	49
Figure III.12. Tension de la source V_{sabc} .	50
Figure III.13. La forme d'onde de 1éphase de la tension du réseau V_{sa} .	50
Figure III.14. Courant de la source I_{sa} .	50
Figure III.15. Courant de la charge I_{La} .	51
Figure III.16. Courant de filtre I_{Fa} .	51
Figure III.17. Le THD du courant de source.	52

Figure III.19. La tension du bus continu Vdc et Vdcref	53
Figure III.20. Allures des puissances instantanées active et réactive.	53
Figure III.21. Courant de source en régime dynamique.	54
Figure III.24. La tension Vdc et Vdcref en régime dynamique.	55
Figure III.25. Déphasage entre le courant et la tension de source pendant le régime dynamique.	55
Figure III.26. Courants de source avec un réseau déséquilibré.	56
Figure III.27. Courants de source avec un réseau déséquilibré sans PLL.	56
Figure III.28. Courants de filtre avec un réseau déséquilibré sans PLL.	56
Figure III.29. Courants de charge avec un réseau déséquilibré sans PLL.	57
Figure III.30. Le THD du courant de source avant FAP sans PLL.	57
Figure III.31. Le THD du courant de source après FAP sans PLL.	57
Figure III.32. La tension du bus continu Vdc	58
Figure III.33. Allures des puissances instantanées actives et réactives.	58
Figure III.34. Courants de source avec un réseau déséquilibré avec PLL.	59
Figure III.35. Courants de filtre avec un réseau déséquilibré avec PLL.	59
Figure III.36. Courants de charge avec un réseau déséquilibré avec PLL.	59
Figure III.37. Le THD du courant de source avant FAP avec PLL.	60
Figure III.38. Le THD du courant de source après FAP avec PLL.	60
Figure III.39. La tension du bus continu Vdc	60
Figure III.40. Déphasage entre le courant et la tension de source du réseau déséquilibré.	61
Figure III.41. Allures des puissances instantanées actives et réactives.	61
Figure III.42. Tensions de source avec un réseau équilibré et polluant.	62
Figure III.43. Courants de source avec un réseau équilibré et polluant.	62
Figure III.44. Courants de filtre avec un réseau équilibré et polluant.	62
Figure III.45. Courants de charge avec un réseau équilibré et polluant.	63
Figure III.46. Le THD du courant de source avant la mise en service du FAP à $t=0.1s$.	63
Figure III.47. Le THD du courant de source après la mise en service du FAP à $t=0.1s$.	63
Figure III.48. Déphasage entre le courant et la tension de source du réseau équilibré avec distorsion.	64
Figure III.49. Allures des puissances instantanées active et réactive du réseau équilibré avec distorsion.	64

Liste des Tableaux

Tableau I.1. Limites des émissions de courants harmoniques (Normes CEI61000-3-2)	14
(Courant appelé par les appareils $\leq 16 \text{ A}$ par phase de classe A).	14
Tableau I.2. Limites de perturbations définies par EN 50160.	15
Tableau I.3. Comparaison générale entre le filtre passif et le filtre actif.	20
Tableau II.1. Tensions possibles à la sortie de l'onduleur.	27
Tableau III.1. Paramètres de simulations du FAP.	48

Glossaire

IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
PI	Proportionnel Intégral

Nomenclature

BT	Basse Tension
D	Puissance déformante
FAP	Filtre actif parallèle
FAS	Filtre actif Série
FMV	Filtre Multi-Variable
FP	Facteur de puissance
FPB	Filtre Passe Bas
h	Rang d'harmonique
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Courants débités par le réseau
MT	Moyenne Tension
P	Puissance active
$p(t)$	Puissance réelle instantanée
\bar{p}	Puissance continue
\tilde{p}	Puissance ondulée
PI	Régulateur proportionnel intégral
PLL	Boucle a verrouillage de phase (Phase Locked Loop)
p_{ref}, q_{ref}	Référence de la puissance active et réactive
Q	Puissance réactive
$q(t)$	Puissance imaginaire instantanée
QEE	Qualité de l'Energie Electrique
S	Puissance apparente
THD	Taux de distorsion harmonique

UPQC	Combinaison Parallèle-Série Actifs (Unified Power Quality Conditioner)
V_1, V_h	Valeur efficace de la tension fondamentale et de l'harmonique de rang h
V_s	La tension de la source
v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}	Tension instantanées au point de couplage
VOC	Voltage Oriented Control

Introduction générale

Introduction générale

Le problème des pollutions harmoniques devient de plus en plus préoccupant depuis ces dernières décennies. Ceci à cause de l'utilisation accrue des charges dites non linéaires notamment les convertisseurs statiques, les ordinateurs, les fours à arc électriques etc.

L'alimentation de charges non linéaires par une source d'alimentation, dans un réseau électrique, est fréquemment soumise à des perturbations et/ou déséquilibres du courant d'alimentation reçu par la charge. Les perturbations du courant d'alimentation désignent la présence d'harmoniques dans le courant d'alimentation, celui-ci n'étant alors pas sinusoïdal, ainsi que la présence d'une puissance réactive trop importante circulant sur le réseau.

Pour diminuer ou supprimer ces perturbations et ainsi améliorer la qualité de l'énergie distribuée, plusieurs solutions existent :

- La modification du convertisseur statique polluant en termes de la topologie et/ou de la commande afin d'intervenir directement à la source des perturbations harmoniques
- Les dispositifs de filtrage [1].

Depuis quelques années, les Filtres Actifs Parallèles (FAP) se sont révélés être des techniques efficaces pour la compensation des composantes harmoniques. Ces filtres cherchent à identifier les composantes harmoniques afin de les réinjecter efficacement dans le réseau électrique en opposition de phase. Ils sont également capables de corriger le facteur de puissance et de compenser l'éventuel déséquilibre d'un système triphasé. De plus, les FAP peuvent être insérés aisément dans les installations existantes de distribution électrique sans nécessiter de grandes modifications. Reconnus pour leur facilité de mise en œuvre, pour leur robustesse et leur fiabilité, ils représentent aujourd'hui la technique la plus largement employée pour dépolluer les systèmes électriques [2].

L'objet de notre travail est d'introduire un filtre actif parallèle pour éliminer les pollutions créés par les charges non linéaires et la compensation de l'énergie réactive.

Nous avons organisé notre mémoire en trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré à la présentation des perturbations dans les réseaux électriques d'alimentation, en courant et en tension, connectés à des charges polluantes, ainsi que les origines de ces perturbations et leurs conséquences sur les installations électriques. Ensuite, quelques normes d'harmoniques sont présentées. Après, les techniques et les méthodes de dépollution des réseaux électriques sont exposées.

Le deuxième chapitre est dédié à l'étude du filtre actif parallèle triphasé, nous exposerons les différents éléments constitutifs du filtre, les différentes boucles de commande de la tension du bus continu, et la boucle de poursuite des courants harmoniques de référence.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les stratégies les plus répandues de la détection des courants harmoniques, telle que la méthode des puissances active et réactive instantanées, avec PLL classique et modifier.

Chapitre I. **Perturbations des réseaux électriques**

I.1 Introduction

Le distributeur d'énergie doit fournir à l'ensemble de ses clients et utilisateurs une énergie de qualité sous la forme de trois tensions sinusoïdales constituant un réseau triphasé équilibré.

La qualité de cette énergie dépend de celle de la tension aux points de raccordement. Toutefois, cette tension subit généralement des altérations durant son transport jusqu'à son arrivée chez le client, industriel ou particulier. Les origines de ces altérations sont nombreuses ; outre les incidents relatifs à la nature physique et matérielle des organes d'exploitation du réseau, il existe aussi des causes intrinsèques spécifiques au fonctionnement de certains récepteurs particuliers [3].

Dans ce chapitre, nous allons présenter la source des harmoniques et leurs effets et conséquence, ensuite les différentes solutions traditionnelles et modernes permettant la dépollution des réseaux électriques.

I.2 Qualité d'énergie

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants [4]:

- La fréquence ;
- L'amplitude des tensions ;
- La forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde ;
- La symétrie du système triphasé (égalité des amplitudes et des déphasages entre les phases).

La qualité d'énergie peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbations [3] :

a) Les fluctuations de la fréquence à 50 Hz :

Elles sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles, par exemple certains défauts graves du réseau, au niveau de la production ou du transport.

b) Les variations de l'amplitude :

Il ne s'agit pas des variations lentes de tension qui sont corrigées par les transformateurs de réglage en charge, mais de variations rapides de tension ou de creux de tension se présentant souvent sous forme d'à-coups brusques. Les creux de tension peuvent être soit isolés, soit plus ou moins répétitifs, de forme régulière ou non.

c) La modification de la forme d'onde de la tension :

Cette onde n'est alors plus sinusoïdale, et peut être considérée comme représentable par une onde fondamentale à 50 Hz, associée soit à des harmoniques de fréquence multiple entier de 50 Hz, soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque.

d) La dissymétrie du système triphasé :

Que l'on appelle déséquilibre. On peut, en plus, mentionner un type particulier de perturbations difficile à classer puisqu'il concerne tout à la fois l'amplitude et la forme d'onde : ce sont les variations transitoires d'amplitudes dont la durée est inférieure à 10 ms.

I.3 Définition de perturbation électrique

Afin de bien spécifier les pollutions des réseaux électriques en basse tension, on va distinguer deux types de perturbations, à savoir les perturbations de courant et celles de tension.

Les courants perturbateurs comme les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive sont majoritairement émis par des charges non linéaires, à base d'électronique de puissance, et/ou déséquilibrées. La puissance réactive peut être aussi consommée par des charges linéaires inductives comme les moteurs asynchrones qui sont largement présent dans les sites industriels.

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

Ces types de perturbation ont des effets très néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller à des échauffements ou l'arrêt des machines tournantes, et même la destruction totale de ces équipements. Dans ce qui suit, notre étude sera limitée aux perturbations de courant plus précisément les harmoniques de courant engendrées par les redresseurs [5].

I.4 Les perturbations harmoniques

Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale à 50Hz ou 60Hz selon le pays, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental [6]. En général, les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impairs existent [7]. L'harmonique de rang zéro correspond à la composante directe du signal. Par ailleurs l'amplitude de chaque harmonique est inversement proportionnelle à son ordre. Donc, les premiers rangs harmoniques celles qui sont proches de la fondamentale tel que (3, 5 et 7) ont des amplitudes élevées, d'où la raison de les limiter selon les normes. La figure (I.1) présente la décomposition d'un signal périodique [8] :

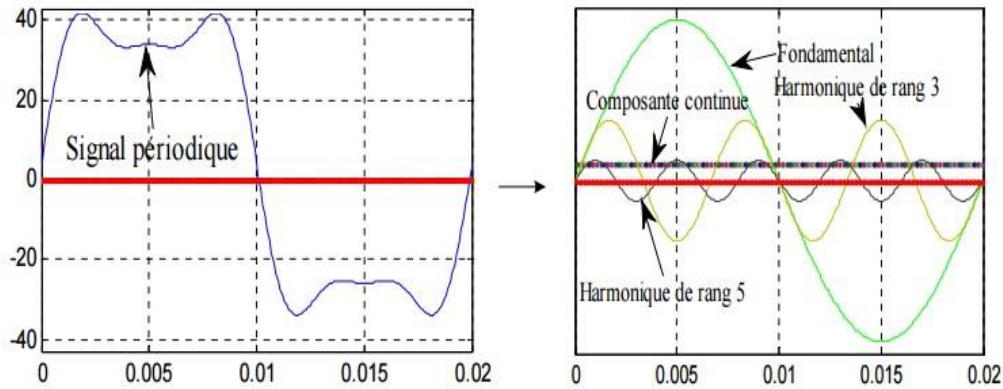


Figure I.1. Décomposition d'un signal périodique

I.4.1 Sources des harmoniques

Le nombre des charges non linéaires produisant les harmoniques a sensiblement augmenté ces dernières années. Les sources d'énergie pour les circuits à courant continu utilisées dans la plupart des appareils électriques monophasés sont la cause des courants harmoniques. Les micros ordinateurs (PC), imprimantes, fax et tout autre dispositif de communication, les équipements médicaux, télévisions, et beaucoup d'autres charges électriques utilisées dans les environnements résidentiels et commerciaux [9].

La cause principale de l'existence des harmoniques de tension, comme on le montrera ultérieurement, est l'injection dans le réseau des courants non sinusoïdaux par des charges non linéaires. Il s'agit alors de sources génératrices de courants harmoniques qui peuvent être classées en deux types :

I.4.1.1 Sources harmoniques identifiables

Les équipements dotés de dispositifs à base d'électronique de puissance, notamment les redresseurs et les cyclo-convertisseurs de puissances importantes, installés sur les réseaux haute et moyenne tension sont typiquement des sources harmoniques identifiables. Avec ce type de charge non linéaire, le distributeur d'énergie est capable d'identifier le point d'injection des harmoniques et de quantifier la perturbation provoquée. Dans ce cas, c'est l'utilisateur qui doit se procurer les moyens nécessaires afin de réduire cette perturbation au-dessous du seuil exigé par le distributeur de l'énergie sous peine d'être pénalisé [10].

I.4.1.2 Sources harmoniques non identifiables

Ce type de générateur de courants harmoniques est principalement représenté par les appareils utilisés dans les domaines électrodomestiques ou tertiaires tels que les téléviseurs et les micro-ordinateurs. Vue leur très large diffusion, ces équipements comportant souvent un redresseur monophasé à diodes avec un condensateur de lissage, prélèvent des courants harmoniques non négligeables. Dans ce cas, il est de la responsabilité du distributeur de l'énergie électrique d'empêcher la propagation de la perturbation harmonique sur le réseau puisque individuellement chaque utilisateur génère un faible taux d'harmonique [10].

I.4.2 Caractéristiques des perturbations harmoniques

La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique (THD) défini pour la tension ou le courant. Ce critère est le plus souvent employé pour quantifier le contenu harmonique d'un signal distordu. Il mesure également le degré de déformation du signal apporté par les harmoniques par rapport à une onde sinusoïdale. Il va de soit-que la répartition spectrale complète généralement l'information sur le THD en indiquant le rang des harmoniques dominants. Pour chiffrer la consommation de puissance réactive le facteur de puissance (FP) est généralement utilisé [6].

Le courant absorbé par une charge non linéaire (convertisseur statique) n'est pas sinusoïdal, mais sa valeur moyenne sur chaque phase est souvent nulle. Dans ce cas, la décomposition en série de Fourier du courant donne :

$$i(t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t + \alpha_1) + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2}I_h \sin(h\omega t + \alpha_h) \quad (1.1)$$

Avec I_1, I_h : Valeur efficace du courant fondamental et du courant harmonique de rang h .

α_1, α_h : Déphasage du courant fondamental et du courant harmonique de Rang h .

ω : Pulsation fondamentale du réseau.

I.4.2.1 Taux de distorsion harmonique

Le taux de distorsion harmonique de ce courant s'exprime sous la forme suivante :

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{I_h^2}{I_1^2}} \quad (1.2)$$

Le taux de distorsion harmonique en tension est un paramètre qui sert à évaluer la déformation de la tension et s'exprime sous la forme suivante :

$$THD_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{V_h^2}{V_1^2}} \quad (1.3)$$

Avec V_1 et V_h Valeur efficace de la tension fondamentale et de l'harmonique de Rang h .

I.4.2.2 Facteur de puissance

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

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (1.4)$$

Avec :

$$S = m \sqrt{\sum_{h=1}^n V_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^n I_h^2} = m \cdot V_{eff} \cdot I_{eff} \quad (1.5)$$

$$P = m \sum_{h=1}^n V_h I_h \cos(\varphi_h) \quad (\text{I.6})$$

$$Q = m \sum_{h=1}^n V_h I_h \sin(\varphi_h) \quad (\text{I.7})$$

Où

Q : représente la puissance réactive.

En présence des harmoniques, la puissance déformante (D) donnée par la relation (I. 8) apparait.

$$D = mV \sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2} \quad (\text{I. 8})$$

Où

V : Valeur efficace de la tension du réseau électrique.

Finalement, le facteur de puissance s'exprime comme suit :

$$FP = \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=1}^n V_h I_h \cos(\varphi_h)}{\sqrt{\sum_{h=1}^n V_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^n I_h^2}} \quad (\text{I. 9})$$

On constate que le facteur de puissance est dégradé par la présence des harmoniques. Dans le cas d'un système triphasé alimentant une charge non linéaire équilibrée (cas du redresseur à diodes), les fondamentaux des courants absorbés composent un système direct (c'est-à-dire de même séquence que les tensions du réseau), les harmoniques multiples de 3 composent un système homopolaire (ils sont en phase), l'harmonique 5 un système inverse (la séquence des phases est inverse par rapport à celle du réseau), l'harmonique 7 un système direct,....etc [10].

La figure (I.2), illustre le diagramme de Fresnel en présence d'harmoniques :

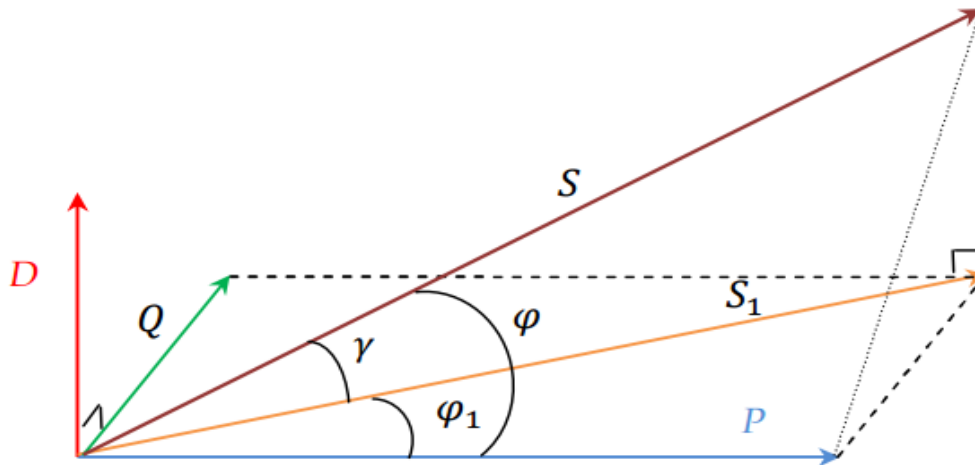


Figure I.2. Diagramme de Fresnel des puissances

I.4.3 Déséquilibre du courant et de la tension

I.4.3.1 Origine du déséquilibre

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé comme le montre la figure (I.3). Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau [11].

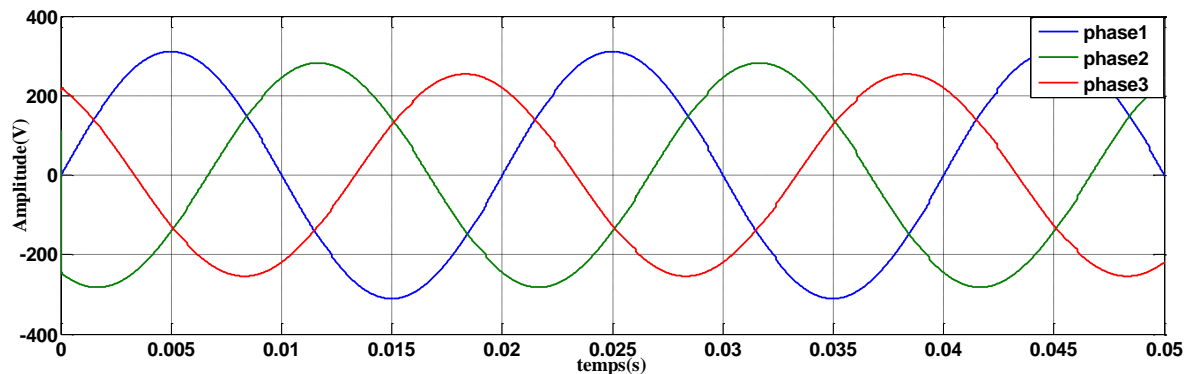


Figure I.3. Cas particulier de déséquilibre du système triphasé de tension.

I.4.3.2 Conséquences du déséquilibre

En général le déséquilibre engendre des dégradations des performances des machines électriques, un vieillissement accéléré des isolants, la production de courants de ligne ayant des fréquences non caractéristiques.

Il est plus intéressant d'aborder le problème du déséquilibre par type d'équipement. Le déséquilibre d'une installation triphasée peut entraîner un dysfonctionnement des appareils de basses tensions connectés [12] :

- 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.4.4 Les Creux de tension

Un creux de tension (sag ou dip en anglais), est une baisse brutale de la tension en un point du réseau électrique à une valeur comprise (par convention) entre 90% et 10% par rapport à la tension de référence U_{ref} , suivie d'un rétablissement de cette tension après un court laps de temps compris entre la demi-période fondamentale du réseau (8 ms à 16ms) et une minute. La tension de référence est généralement la tension nominale pour les réseaux BT et la tension déclarée ou avant perturbation pour les réseaux MT et HT.

Les coupures brèves sont un cas particulier des creux de tension de profondeur supérieure à 90 (IEEE1159) et de durée allant jusqu'à une minute.

Les creux de tension ont pour principale origine les court-circuits affectant le réseau électrique ou les installations raccordées, et le démarrage des moteurs de forte puissance. Toutefois, les court-circuits restent la principale cause de creux de tension et de coupures brèves. Ils engendrent des variations brusques de l'amplitude de la tension et pour cette raison, les creux de tension correspondants se caractérisent par une forme rectangulaire en fonction de temps. Les court-circuits peuvent affecter une, deux ou trois des phases et peuvent engendrer des déphasages supplémentaires entre elles [11].

I.5 Effets des harmoniques

Leurs effets sont liés à l'augmentation des valeurs crêtes (claquage diélectrique) et efficaces (échauffement supplémentaire), ainsi qu'au spectre en fréquence (vibration et fatigue mécanique) des tensions et des courants. On distingue trois catégories [13-14] :

I.5.1 Aspect économique

Dégradation du rendement énergétique de l'installation (pertes d'énergie) ;

-Surdimensionnement des équipements.

-Perte de productivité (vieillesse accélérée des équipements déclenchements intempestifs).

-Influence sur les transformateurs du réseau (augmentation des pertes à vide à cause de l'effet particulier des courants harmoniques).

-Influence sur les câbles de HT (diminution de la durée de vie du câble, dégradation du matériel isolant).

-Pertes supplémentaires dans les condensateurs, les transformateurs etc... ;

-Bruit additionnel des moteurs et d'autres appareils.

- Influence sur le fonctionnement des redresseurs.
- Influence sur la télécommande dans les réseaux.
- Influence sur les condensateurs des réseaux.

I.5.2 Effets instantanés

Déclenchements intempestifs des protections ;

- Perturbations induites des systèmes à courants faibles (télécommande, télécommunication, écran d'ordinateur, téléviseur, etc...);
- Vibrations et bruits acoustiques anormaux (tableaux BT, moteurs, transformateurs) ;
- Destruction par surcharge thermique de condensateurs ;
- Perte de précision des appareils de mesure.

I.5.3 Effets à terme

Les effets à terme se manifestent après une exposition longue aux perturbations harmoniques.

L'effet d'échauffement est le plus important car il cause une fatigue prématurée du matériel des lignes et amènent à 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 dû au sur échauffement du neutre et les éléments bobinés (transformateurs, moteurs, etc..).

➤ **Echauffement des condensateurs :**

Peuvent conduire au claquage, il est causé par les pertes dues au phénomène d'hystérésis dans le diélectrique.

➤ **Echauffements des pertes supplémentaires des machines et des transformateurs :**

Ces échauffements sont causés par les pertes aux stators des machines et surtout au niveau des circuits rotoriques (cages, amortisseurs, circuits magnétisants) à cause des différences importantes de vitesses entre les champs tournants inducteurs 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 courant de Foucault dans les circuits magnétiques.

I.6 Normes imposées sur le THD

Afin de limiter l'influence d'une charge polluante sur les autres charges connectées au réseau et en même temps éviter la modification des caractéristiques de ce dernier, les distributeurs d'énergie électrique ont été amenés à émettre des recommandations. Ces recommandations concernent les exigences au point de raccordement de l'utilisateur sur le réseau électrique. Un exemple de ces recommandations (les plus anciennes) stipule que chaque utilisateur pris séparément, doit, à son point de raccordement, respecter les limites de perturbations en tension suivantes [10] :

- harmoniques pairs : $\frac{V_h}{V_I} < 0.6\%$
- harmoniques impairs : $\frac{V_h}{V_I} < 1\%$
- taux de distorsion harmonique en tension : $THD < 1.6\%$

Au-delà de ces valeurs, il est nécessaire d'installer des dispositifs de filtrage ou bien dans certains cas extrêmes augmenter la puissance de court-circuit du réseau. Ces limites sont destinées à minimiser le risque de voir le réseau d'alimentation général atteindre un taux de distorsion harmonique en tension supérieur à 5%.

	Rang harmonique	Courant harmonique maximale autorisé (A)
Impaires	3	2.3
	5	1.14
	7	0.77
	9	0.4
	11	0.33
	13	0.21
	$15 < h < 39$	$0.15 * 15 / h$
Paires	2	1.08
	4	0.43
	6	0.33
	$15 < h < 39$	$0.23 * 8 / h$

Tableau I.1. Limites des émissions de courants harmoniques (Normes CEI61000-3-2)

(Courant appelé par les appareils ≤ 16 A par phase de classe A).

D'autre part, pour assurer la compatibilité entre les installations sensibles alimentées par le Réseau, il faut imposer des limites d'émission et donner des niveaux d'immunité suffisants. Les caractéristiques principales de la tension fournie par un réseau de distribution (*MT* ou *BT*), définies par la norme Européenne *EN 50160*, précisent les tolérances qui doivent être garanties pour la tension et la fréquence ainsi que les niveaux des perturbations habituellement rencontrées. Le tableau I.2. Suivant précise les valeurs adoptées [6].

Amplitude de la tension	Pour chaque période d'une semaine 95% des valeurs efficaces moyennes sur 10 minutes doivent être dans la plage $V_n \pm 10\%$
Variations rapides de la tension	De 5% à 10% de V_n (4 à 6% en moyenne tension)
Creux de tension	<ul style="list-style-type: none"> • Profondeur : entre 10% à 99% de V_n • Durée : entre 10 ms et 1 minute • Nombre : quelques dizaines à 1 millier par an
Coupures brèves	<ul style="list-style-type: none"> • Durée : jusqu'à 3 minutes • Nombre : quelques dizaines à plusieurs centaines par an
Coupures longues	<ul style="list-style-type: none"> • Durée : supérieure à 3 minutes • Nombre : entre 10 et 50 par an
Fréquence	<ul style="list-style-type: none"> • 50 Hz $\pm 1\%$ pendant 95% d'une semaine • 50Hz + 4%, 6% pendant 100% d'une semaine

Tableau I.2. Limites de perturbations définies par EN 50160.

I.7 Elimination des harmoniques

Afin de compenser les perturbations, deux groupes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne sont présentés.

I.7.1 Solutions traditionnelles de la dépollution

Afin de dépolluer les réseaux électriques, plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature, dont le but est de limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques [5-15].

-L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation des convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique.

a) L'utilisation de dispositif du filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par les charges non-linéaires.

b) Le pont dodécaphasé : La structure dodécaphasée présente des caractéristiques très intéressantes par rapport à celle hexaphasée. Cependant, le nombre de semi-conducteurs utilisés et le transformateur à deux enroulements au secondaire rendent cette solution onéreuse.

-Les filtres passifs : La deuxième solution de dépollution consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance 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.

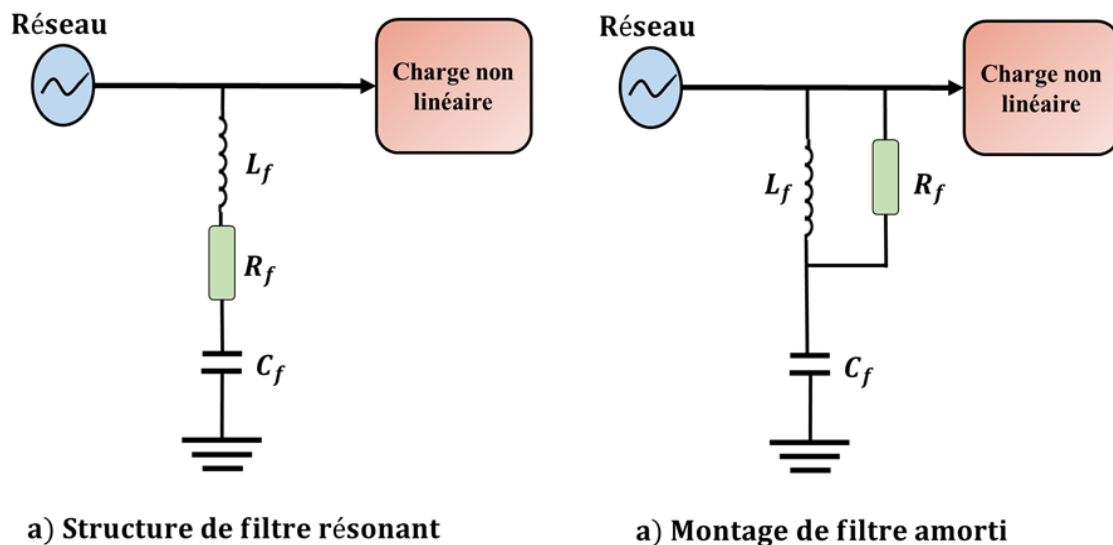


Figure I.4. Structures de filtres passifs

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.
- Equipements volumineux.
- Problème de résonance avec l'impédance du réseau.

I.7.2 Solutions modernes de dépollution

Les solutions de dépollution traditionnelle ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger, comme nous venons de le décrire précédemment, d'autres solutions modernes ont été proposées appelées filtres actifs. Il vient se rajouter à des structures déjà existantes de convertisseurs. Il peut également être utilisé comme complément aux solutions traditionnelles de réjection des harmoniques. Le principe du filtrage actif est l'injection de courants (ou des tensions) harmoniques en opposition de phase avec les harmoniques que l'on désire compenser : courants harmoniques absorbés par la charge et/ou de tensions harmoniques présentes sur le réseau. [3].

I.7.2.1 Topologies de filtres actifs

Différentes topologies de filtres actifs sont proposées dans la littérature ; quelques-unes d'entre elles sont décrites ci-après. Pour chaque topologie interviennent des problèmes de caractéristiques nominales requises des composants, et de méthode de détermination des caractéristiques du compensateur pour les charges à compenser [3].

I.7.2.2 Principe de fonctionnement du filtre actif

Les filtres actifs sont composés d'onduleurs qui sont des convertisseurs statiques de puissance alimenté par une source de courant ou de tension continue, l'onduleur peut délivrer un courant ou une tension dont le contenu harmonique dépend uniquement de la loi de commande des interrupteurs [16].

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 [17].

I.7.2.3 Classification des filtres actifs

Les filtres actifs peuvent être classifiés à partir du type de convertisseur qu'ils utilisent, de leur topologie ou encore de leur nombre de phases. Nous nous limiterons ici à la classification selon leurs différentes topologies. Suivant leurs topologies, les FA peuvent être en série, en parallèle ou mixtes [18].

a) Filtre actif parallèle (FAP)

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la figure (I.7) est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci [19], à fin de rendre le courant du réseau électrique à la forme sinusoïdale. Il empêche les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion

du filtre actif. Laquelle se présente sous forme de deux blocs : la partie puissance et la partie contrôle commande.

La partie puissance est constituée :

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

La partie contrôle-commande quant à elle est constituée :

- de la méthode d'identification des courants perturbés.
- de la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
- de la régulation des courants injectés sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.
- de la commande de l'onduleur de tension.

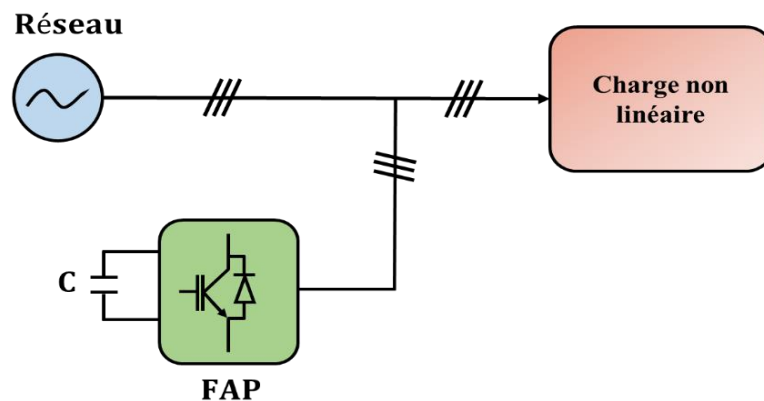


Figure I.5.Filtre actif parallèle

Avantage :

- Amélioration du taux de distorsion harmonique en courant THD_i ;
- Adaptabilité aux variations de la charge du réseau.

b) Filtre actif série (FAS) :

Le rôle d'un FAS est de modifier localement l'impédance du réseau. Il se comporte comme une source de tension harmonique qui annule les tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et celles générées par la circulation de courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi, la tension aux bornes de la charge peut être rendue sinusoïdale. Cependant, le FAS ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge [20].

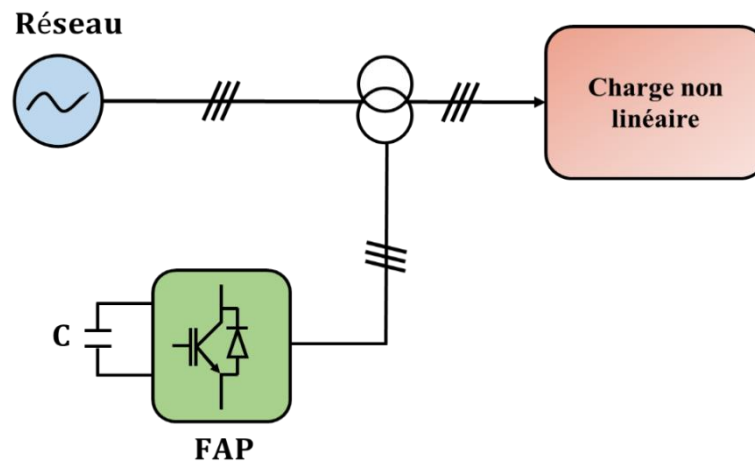


Figure I.6. Filtre actif série

Avantage :

- Amélioration du taux de distorsion harmonique en tension THD_v ;
- Adaptabilité aux variations de la charge du réseau.

Inconvénient :

- Pas d'amélioration de la forme du courant.

c) Combinaison parallèle-série actif

La combinaison parallèle-série actifs, aussi appelée « Unified Power Quality Conditioner » (UPQC), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, comme le montre sur Figure (I.7). Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci.

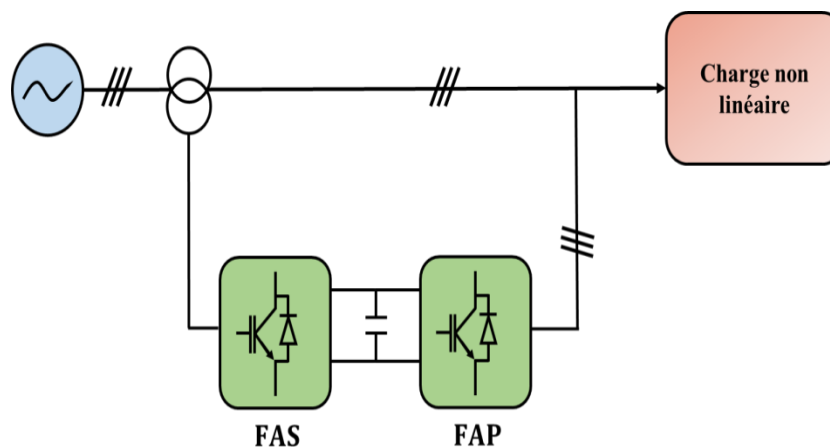


Figure I.7. Filtre actif série-parallèle.

I.7.3 Comparaison générale entre le filtre passif et le filtre actif

Caractéristiques	Filtre actif	Filtre passif
Limite de compensation de rang harmonique	Compense dans la limite de sa bande passante qui est déterminée par la fréquence de commutation maximale des semi-conducteurs de son onduleur.	Le filtre résonant ne compense qu'un rang harmonique à la fois. -Le filtre amorti compense dans la limite de sa bande passante.
Risque de résonance entre le filtre et le réseau	Non	Oui
Compensation de puissance réactive	Oui, mais à coût plus élevé que pour le filtre passif.	Oui
Possibilité de surcharge lorsque le courant harmonique dépasse le dimensionnement du filtre	Non	Oui
Compensation dans les réseaux haute puissance	Oui, mais à coût très élevé	Oui

Tableau I.3. Comparaison générale entre le filtre passif et le filtre actif.

I.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté différents types de perturbations affectant l'onde de courant du réseau électrique. Comme nous avons pu le constater, les harmoniques ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements. Alors que pour éliminer ces effets, plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance, de plus elles ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes, Contrairement que les filtres actifs parallèle et/ou série ont un objet de s'adapter et dépollué le réseau de tous types de perturbations.

Chapitre II. **Filtre actif parallèle**

II.1 Introduction

Le filtrage actif, comme moyen de compensation des harmoniques, est de plus en plus utilisé pour réaliser des interfaces de dépollution entre les réseaux électriques et les récepteurs polluants. Le rendement économique des filtres actifs est important pour le fournisseur d'énergie qui éprouve à cause des harmoniques des pertes considérables dans les transformateurs et les lignes et de l'interaction entre la source et les charges [21].

Dans ce chapitre, après la Modélisation du réseau électrique, nous présenterons le principe du filtrage actif parallèle utilisé pour la compensation du courant harmonique. Commençant par la présentation des différentes structures du filtre actif parallèle à savoir, les structures courant tension, suivie par des différentes techniques de modulation utilisées dans la commande de l'onduleur du filtre, en fin nous ferons également le point sur quelques aspects liés à la conception des éléments réactifs du Filtre actif parallèle.

II.2 Réseau Electrique

Le réseau est modélisé par trois sources de tensions sinusoïdales parfaites en série avec une inductance L_s et une résistance R_s représenté par la figure II.1 :

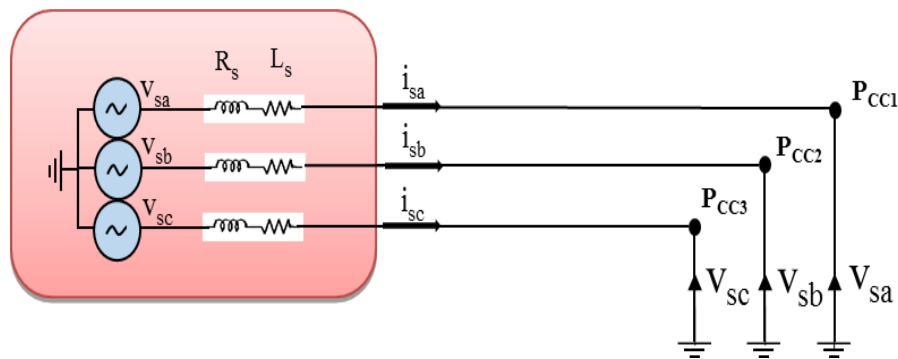


Figure II.1. Réseau électrique triphasé.

Les tensions du réseau électrique sont données par :

$$\begin{cases} V_{sa} = \sqrt{2}V \sin(\omega t) \\ V_{sb} = \sqrt{2}V \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{sc} = \sqrt{2}V \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

$$\begin{cases} i_{sa} = \sqrt{2}i \sin(\omega t) \\ i_{sb} = \sqrt{2}i \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_{sc} = \sqrt{2}i \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Où : $\omega = 2\pi f_s$

Pcc : Point de raccordement.

II.3 La charge polluante

La charge polluante est un redresseur de tension triphasé à diodes (pont de Graëtz), connectée au réseau par l'intermédiaire d'une impédance de ligne (L_l, R_l), et alimentant une charge inductive (L_d, R_d) côté continu, comme l'illustre la figure II.2.

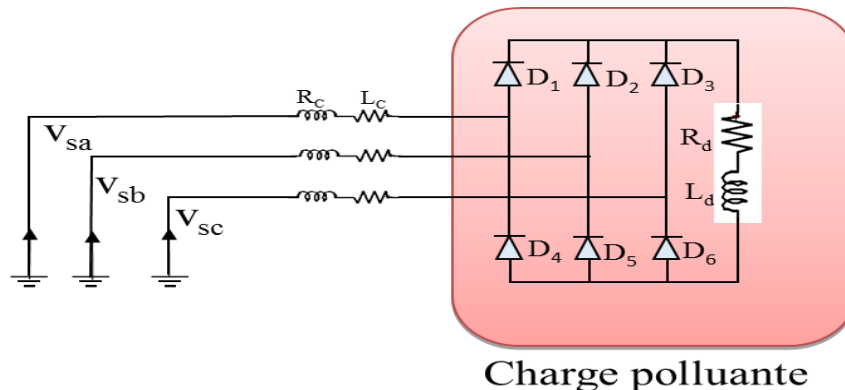


Figure II.2. Charge non linéaire à Redresseur à diodes.

On sait qu'une charge non linéaire produit des harmoniques et les transmet sur le réseau. Ces harmoniques en courant et en tension au côté alternatif peuvent avoir des répercussions néfastes sur le réseau d'alimentation, pour cela il est intéressant d'utiliser un FAP pour améliorer les performances du réseau d'alimentation. Les performances du filtre actif parallèle sont déterminées à partir du taux global de distorsion harmonique (THD) qui doit être dans la norme IEEE 519 avec :

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{I_h^2}{I_1^2}} \quad (\text{II.3})$$

I_1 La valeur efficace du courant fondamental et I_h les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant [21].

II.4 Principe du filtrage actif parallèle

Le principe du filtrage actif parallèle des harmoniques consiste à connecter en parallèle avec la charge non linéaire, une autre source d'énergie capable d'injecter, via un pont d'onduleur, un courant au point de connexion commun des usagers du réseau. Le courant injecté i_f doit être égal en amplitude et en opposition de phase avec la composante à éliminer du courant de la charge i_{ch} , de telle sorte le courant du réseau i_s doit être sinusoïdal. En générale, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT [22].

La Figure II.3 représente le principe de connexion d'un filtre actif parallèle. Les allures des courants illustrent un filtrage de toutes les harmoniques présentes dans le courant de la charge.

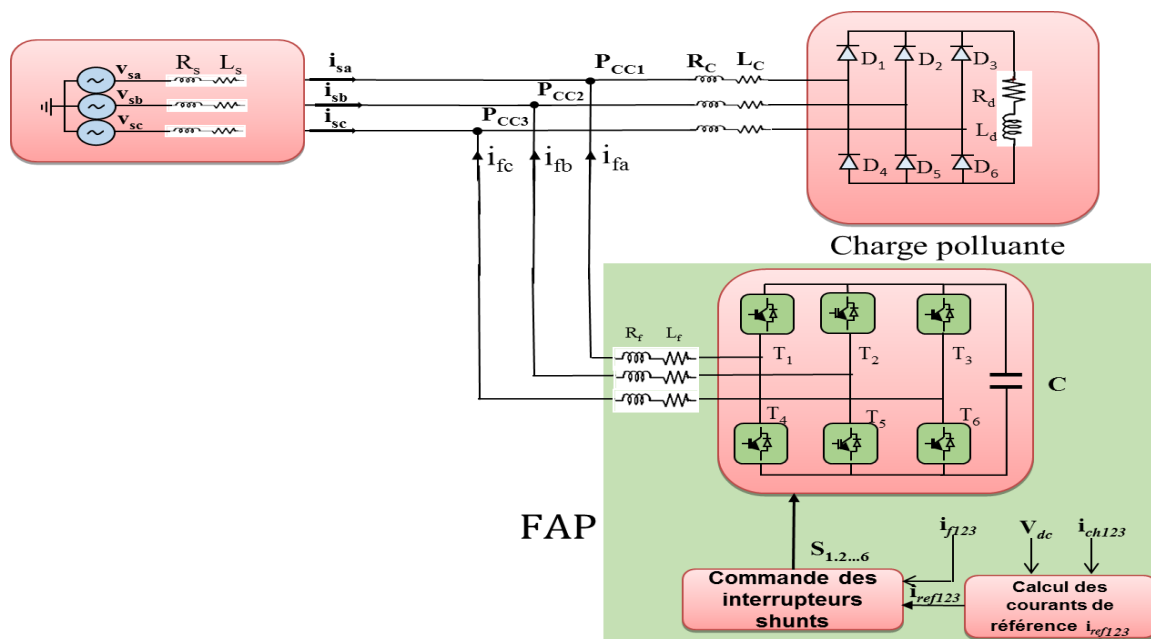


Figure II.3. Schéma illustratif du principe de filtre actif parallèle.

II.5 Structure générale du Filtre Actif Parallèle

La structure des filtres actifs se compose essentiellement de deux parties, une partie puissance et une partie commande Figure II.4. La partie puissance se compose d'un onduleur, d'un filtre de couplage et d'un élément passif lui servant de source d'énergie. La partie commande, sert à contrôler la commutation des semi-conducteurs formant l'onduleur [23].

La partie puissance est constituée :

- D'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, ...etc.) avec des diodes en antiparallèle,
- D'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif,
- D'un filtre de sortie [6].

La partie commande est constitué :

- De la méthode d'identification des courants perturbés,
- Du système à base de PLL qui sera intégré dans la méthode d'identification des courants,
- De la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie,
- De la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension,
- De la commande de l'onduleur de tension [6].

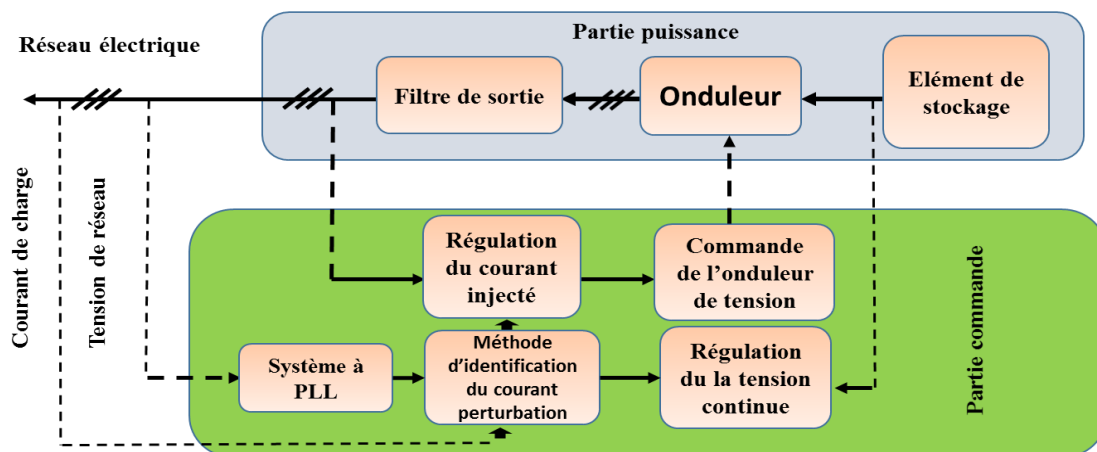


Figure II.4. Structure générale du Filtre Actif Parallèle.

II.5.1 Études de la Partie puissance

a) Onduleur de tension

Un onduleur est un convertisseur de puissance destiné à convertir une tension continue en une tension alternative par un jeu de commutations. Dans notre travail nous avons choisi un onduleur à deux niveaux. Celle-ci a l'avantage de présenter un nombre minimum d'interrupteurs et un seul élément de stockage d'énergie (condensateur) [6].

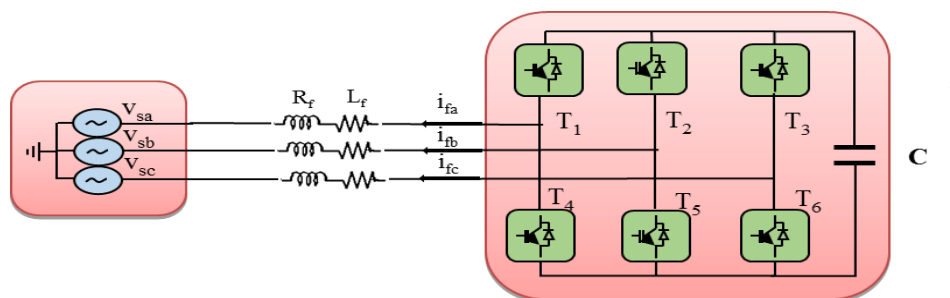


Figure II.5. Onduleur triphasé à structure tension.

Cet onduleur est composé de six interrupteurs, bidirectionnels en courant et unidirectionnels en tension, commandés de manière à délivrer des tensions simples alternatives (V_{f1}, V_{f2}, V_{f3}) équilibrées à la sortie de l'onduleur.

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension V_{dc} . Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (L_f, R_f) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique.

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la dépendent de l'état des signaux de commande (s_1, s_2, s_3), par conséquent, comme défini ci-dessous :

$$S_a = \begin{cases} 1 & T_1 \text{ fermé } T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & T_1 \text{ ouvert } T_4 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_b = \begin{cases} 1 & T_2 \text{ fermé } T_5 \text{ ouvert} \\ 0 & T_2 \text{ ouvert } T_5 \text{ fermé} \end{cases} \quad (II.4)$$

$$S_c = \begin{cases} 1 & T_3 \text{ fermé } T_6 \text{ ouvert} \\ 0 & T_3 \text{ ouvert } T_6 \text{ fermé} \end{cases}$$

Ainsi, on pourra exprimer huit cas possibles de tension de sortie du filtre actif V_f (par rapport au neutre n de la source), comme le montre le tableau II.1 [6]

Dans le plan biphasé (α, β) , en considérant \vec{v}_f le vecteur correspondant aux tensions de l'onduleur, les huit cas possibles du vecteur \vec{v}_f sont donnés par la figure II.6.

Vecteur	S_{a1}	S_{b1}	S_{c1}	v_{fa}	v_{fb}	v_{fc}
v_0	0	0	0	0	0	0
v_1	1	0	0	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
v_2	1	1	0	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
v_3	0	1	0	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
v_4	0	1	1	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
v_5	0	0	1	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
v_6	1	0	1	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
v_7	1	1	1	0	0	0

Tableau II.1. Tensions possibles à la sortie de l'onduleur.

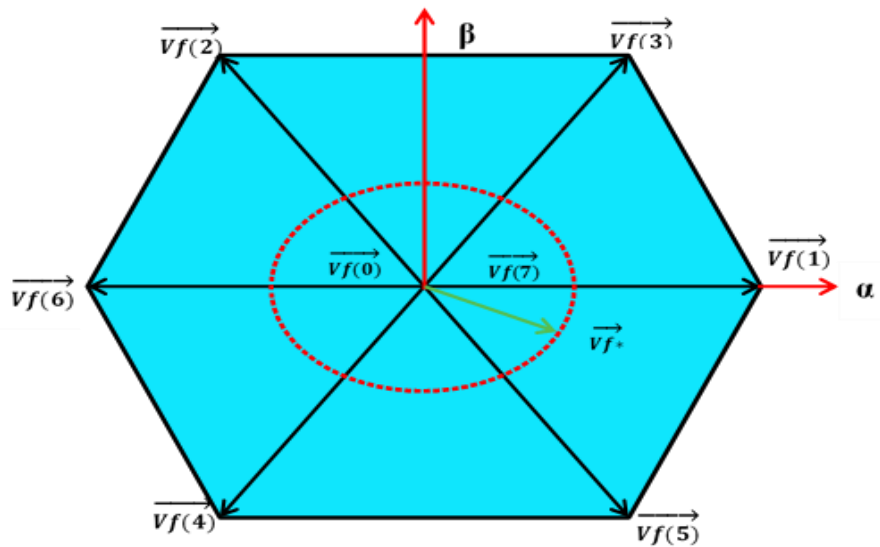


Figure II.6. Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur dans le plan (α, β) .

Où \vec{v}_f^* représente la tension de référence que doit produire l'onduleur pour pouvoir créer les courants perturbateurs identifiés. Ceci signifie que l'onduleur n'est capable de fournir des tensions égales aux tensions de référence que si le vecteur formé par ces derniers reste à l'intérieur de l'hexagone montré dans la figure (II.5) [6].

Source d'énergie de filtre actif

La source d'énergie pour un filtre actif à base d'onduleur de tension est un condensateur, jouant le rôle d'une source de tension continue [6]. Le choix de sa capacité se fait pratiquement en tenant en considération deux aspects importants :

Une faible ondulation de la tension aux bornes du condensateur.

Une bonne dynamique convenable, permettant la compensation des pertes actives survenant entre la source et le réseau [6].

La capacité du condensateur est donnée par :

$$C_f = \frac{I_h}{\varepsilon V_{dc} \omega_h} \quad (\text{II.4})$$

Où :

I_h : L'amplitude du courant harmonique le plus faible à compenser.

ε : Le taux d'ondulation de la tension, généralement égal à 5%.

ω_h : La pulsation de l'harmonique du rang le plus élevé à compenser.

La tension redressée par le redresseur constituée des diodes mis en antiparallèle avec les IGBTs est donnée par :

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{6}V_{eff}}{\pi} \quad (II.5)$$

La tension de référence doit être légèrement supérieure à V_{dc} que le filtre puisse débiter sur le réseau.

b) Filtre de sortie

Le filtre entre l'onduleur et le réseau est appelé filtre de couplage, c'est un filtre passif de premier ordre qui est en réalité une simple inductance avec une résistance interne. Il a deux objectifs, le premier est de générer des courants harmoniques à partir de la différence des tensions entre la sortie du pont onduleur et le réseau. L'inductance L_f intervient dans la commandabilité du courant du filtre. Le deuxième est de réduire au point de raccordement au réseau (PCC) [24].

Dans ce travail, nous avons utilisé un filtre entre l'onduleur et le réseau électrique qui se compose d'une inductance L_f de résistance interne R_f . Dans notre étude, nous emploierons ce filtre du premier ordre.

II.5.2 Etudes de la partie commande

La commande est mise en œuvre en trois étapes : Dans la première étape, la tension de réseau et le courant de la charge sont détectés à l'aide de transformateurs de mesures. Dans la deuxième étape, on détermine le courant de référence à partir des méthodes d'identifications approuvées. Dans la troisième étape de commande, les signaux de commutation de semi-conducteur de l'onduleur de l'FAP sont générés en utilisant, l'hystérésis, MLI classique ou vectorielle, en mode glissant, ou des techniques de contrôle à base de logique floue [21].

Donc la commande d'un filtre actif parallèle triphasé est basée sur la division du système en deux boucles [7]. Le premier sert à générer les courants de références, que l'onduleur doit injecter dans le point de raccordement, quant au deuxième, il sert à contrôler les courants injectés par l'onduleur de sorte qu'ils suivent le plus fidèlement possible ceux de la référence comme présenté dans la Figure II.7 :

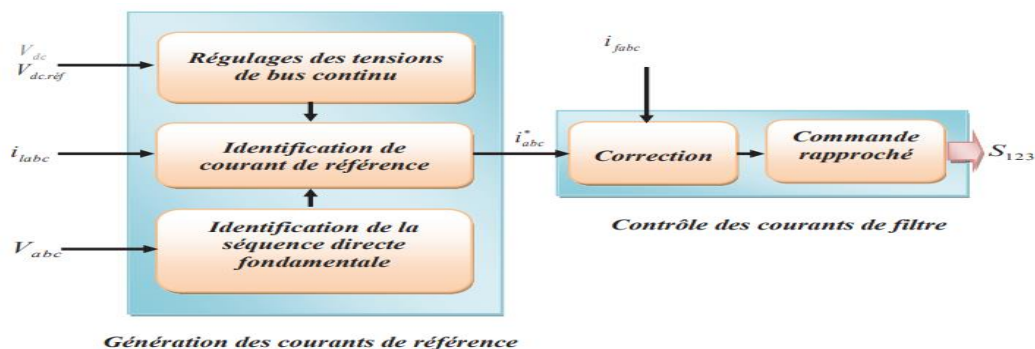


Figure II.7. Commande du FAP.

La commande du filtre actif parallèle est basée sur :

- la nature de l'onduleur qui produit le courant à injecter dans le réseau

- la commande choisie pour contrôler cet onduleur.

II.5.2.1 Les différentes commandes choisies pour le contrôle de l'onduleur :

a) Commande en pleine onde :

C'est la stratégie de commande la plus simple à mettre en œuvre. Par contre la tension de sortie est très riche en harmoniques de rang faible et donc de fréquence basse. Le filtrage est difficile dans ce mode de commande, les interrupteurs travaillent à la fréquence des grandeurs électriques de sortie. Pour un convertisseur à deux états, un seul point de fonctionnement est possible en pleine onde, la durée de conduction est égale à une demi-période [25].

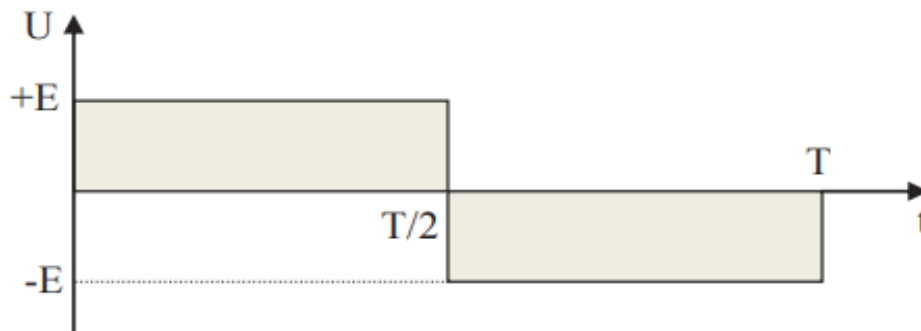


Figure II.8. Allure des potentiels de phase lors d'un fonctionnement en pleine onde.

T1 est commandé entre 0 et π , non commandé entre π et 2π .

Les commandes de T2 et T3 sont respectivement décalées de $2\pi/3$ et $4\pi/3$ en arrière. Les commandes de T4, T5 et T6 : sont respectivement complémentaires de celles de T1, T2 et T3.

b) Commande par hystérésis :

L'objectif de la commande par hystérésis, encore connue sous la dénomination de commande en tout ou rien, est de contrôler les courants de compensation en les forçant à suivre ceux de référence. Un système de base pour le contrôle de la bande d'hystérésis est représenté sur la Figure II.9 [25] :

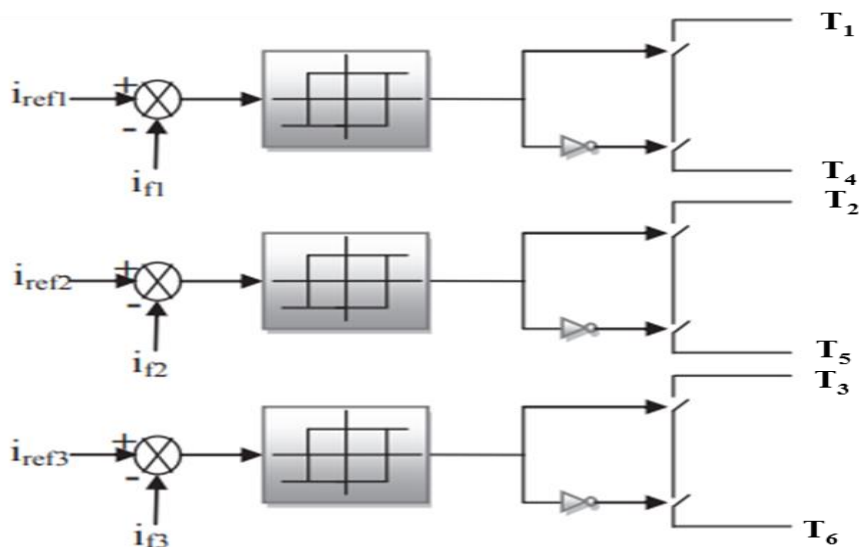


Figure II.9. Principe de commande par hystérésis.

c) **Commande par modulation de largeur d’impulsion (MLI) :**

Le schéma de principe de la MLI est donné par la Figure II.10 La commande par modulation de largeur d’impulsion (MLI) est le technique de commande la plus utilisé, elle résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l’onduleur. La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d’impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, Cette technique de commande met en œuvre d’abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l’onduleur (modulatrice) à partir de l’écart entre le courant mesuré et sa référence [25].

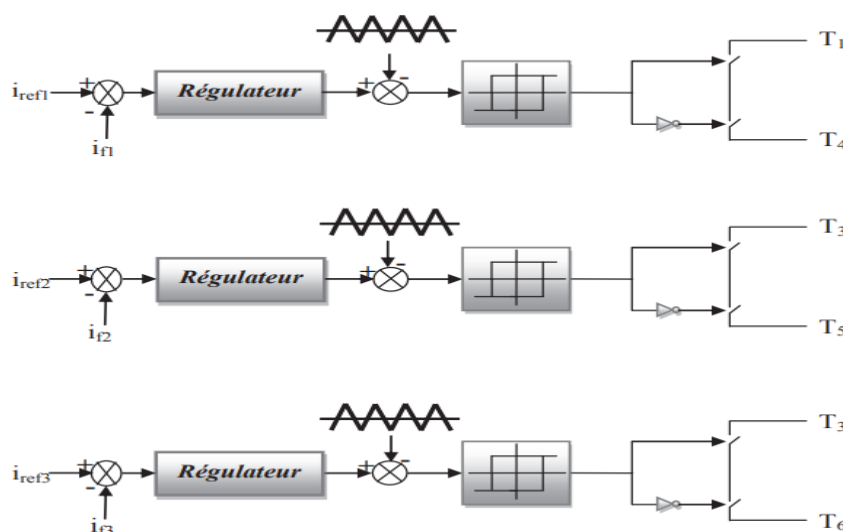


Figure II.10.Principe de commande des courants par MLI.

II.5.2.2 Stratégies de commande du filtre actif parallèle

Il existe principalement deux stratégies de commande pour supprimer les courants harmoniques du réseau dépendant du courant mesuré

a) Méthode directe

Cette méthode est basée sur la mesure du courant de la charge polluante puis, de l'extraction des composantes harmoniques de ce courant. La figure (II.11) représente le schéma de la stratégie de commande directe. De cette manière, le filtre actif injecte les courants de compensation sans information sur les courants du réseau. Toutes les erreurs dans le système comme l'incertitude des paramètres, les erreurs de mesure ou de commande apparaîtront dans le réseau sous formes des harmoniques non-filtrés [26].

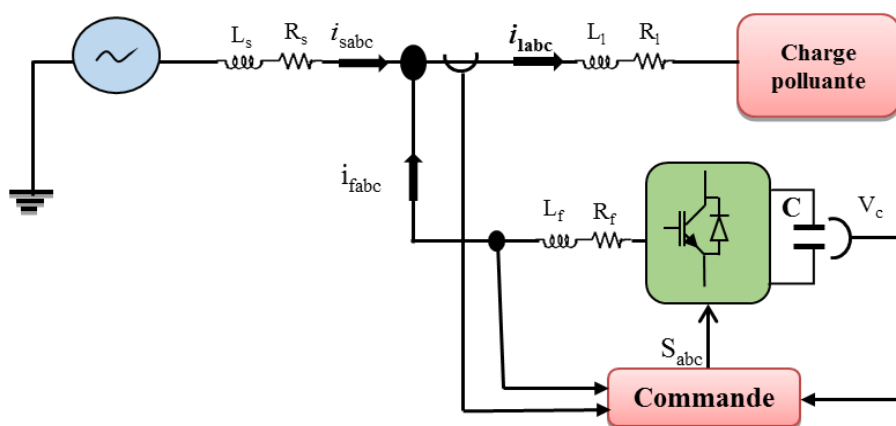


Figure II.11. Schéma de la commande directe.

a) Méthode indirecte

Cette méthode consiste à mesurer les courants du côté source, et d'imposer la forme sinusoïdale sur ces courants. La figure (II.12) montre le schéma de la commande indirecte du filtre actif [26].

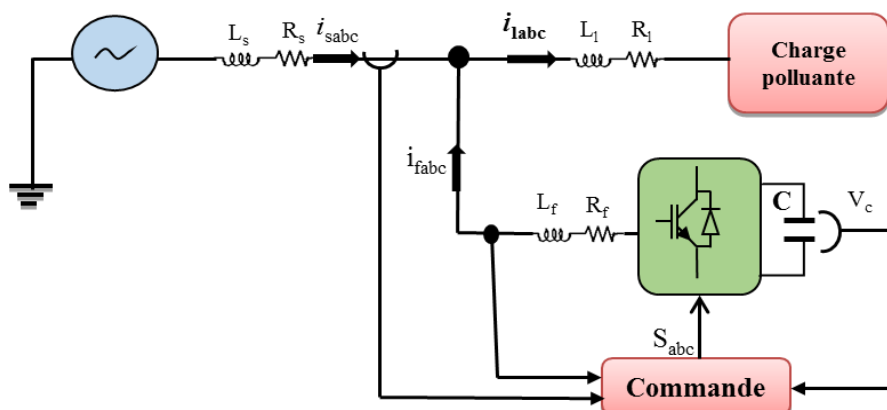


Figure II.12. Schéma de la commande indirecte.

II.5.2.3 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. Si aucun échange de puissance active n'existe entre la capacité et le réseau, cette dernière sera considérée comme un réservoir pour la circulation des harmoniques. Les principales causes d'échange de puissance et qui sont susceptibles de modifier cette tension sont [27]:

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

Afin d'assurer le rôle de source de tension continue, une régulation de cette tension est nécessaire. 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 [28] :

$$P_{dc} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2 \right) \quad (\text{II.6})$$

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

$$P_{dc}(s) = \frac{1}{2} s C_{dc} V_{dc}^2(s) \quad (\text{II.7})$$

La tension aux bornes du condensateur est donnée par :

$$V_{dc}^2 = \frac{2P_{dc}(s)}{C_{dc}s} \quad (\text{II.8})$$

A partir de la relation (II.9) et en tenant compte du régulateur PI, la boucle de régulation de la tension continue peut être représentée par la figure II.11 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.

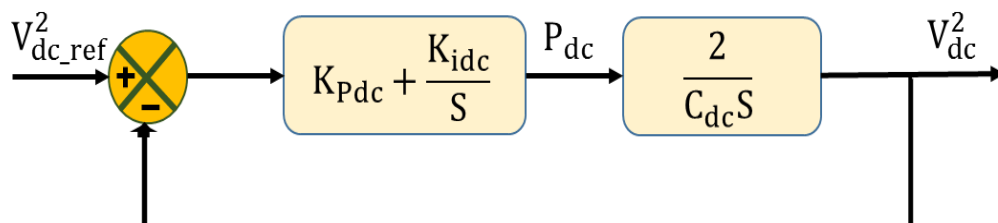


Figure II.11. Boucle de régulation de la tension continue.

A partir de la figure II.11 la fonction de transfert représentant la régulation en boucle fermée de la tension continue est donnée par :

$$G_{BF} = \frac{(1 + \frac{K_{pdc}}{K_{idc}}s)}{s^2 + 2\frac{K_{pdc}}{C_{dc}}s + 2\frac{K_{idc}}{C_{dc}}} \quad (II.9)$$

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

$$K_{idc} = \frac{1}{2}C_{dc}\omega_c^2 \text{ Tel que : } \omega_c = 2\pi f_c \text{ et } K_{pdc} = \xi\sqrt{2C_{dc}K_{idc}} \quad (II.10)$$

II.5.2.4 Identification du courant pollué

La charge polluante absorbe un courant constitué d'une composante fondamentale et de composantes harmoniques. Le but du filtrage actif est la génération de courants harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase avec ceux absorbés par la charge. Ainsi, le courant absorbé au réseau sera sinusoïdal. Il est donc nécessaire d'identifier avec précision les courants harmoniques de la charge polluante [23].

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour l'extraction des courants de références pour un filtre actif ; parmi elle, la méthode basée sur le principe du courant actif, la méthode tri-monophasé, la méthode basée sur la régulation de la tension continue et la méthode des puissances instantanées.

Cette dernière est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Elle permet de calculer les puissances harmoniques de la charge non linéaire .comme on peut l'utiliser pour compenser à la fois les courants harmoniques et les courants réactifs, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant total.

C'est la méthode d'identification la plus utilisée est aussi appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées. Elle offre l'avantage de choisir les perturbations à compenser avec précision, de rapidité et de facilité d'implantation. En effet, afin de pouvoir compenser les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive conjointement ou individuellement, cette méthode est la mieux appropriée [29].

II.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe du filtre actif parallèle comme une solution de dépollution des réseaux électriques des courants perturbateurs comme le courant harmonique, la partie puissance et la partie commande ont été présentés d'une manière détaillée. Nous avons présenté successivement l'onduleur de tension deux niveaux ainsi que la source d'énergie de filtre actif et le filtre de sortie pour la partie puissance et les techniques de commandes de l'onduleur pour la partie commande. Dans le chapitre qui suit on va étudier les principaux algorithmes de commande du filtre actif parallèle en utilisant un onduleur tension deux niveaux.

Chapitre III. Méthode des puissances instantanées (p-q)

III.1 Introduction

La compensation des harmoniques avec FAP dans le réseau d'alimentation électrique se fait en deux étapes. La première étape découvre les composantes harmoniques des courants et la seconde étape injecte ces harmoniques dans le réseau électrique (en opposition de phase), ayant la même amplitude mais en opposition de phase avec les courants harmoniques engendrés par la charge non-linéaire [11].

Dans ce chapitre nous étudierons la théorie généralisée de l'énergie électrique, qui va être la base des calculs des équations gérant le principe de fonctionnement de la méthode des puissances instantanées (pq). Afin de contrôler les échanges de puissance, l'onduleur doit être toujours synchronisé avec le réseau.

Pour améliorer la qualité de l'énergie au niveau du réseau tout en assurant un facteur de puissance quasi-unitaire, la génération d'un signal sinusoïdal en phase avec la tension d'alimentation est nécessaire pour la détermination des courants des références, c'est pour cette raison qu'une partie de ce chapitre sera consacrée à l'étude de la PLL (Phase Locked Loop).

III.2 Méthode des puissances instantanées (p-q)

En 1983, Akagi et al, ont proposé La méthode des puissances instantanées également connu comme la théorie (pq) [18], cette méthode est représentée sur la figure (III.1), exploite la transformation de Concordia des tensions simples et des courants de ligne, afin de calculer les puissances réelle et imaginaire instantanées. La composante fondamentale est transformée en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. Cette transformation est nécessaire si nous voulons que l'élimination de la composante continue soit facile à mettre en œuvre. Son principe est énoncé comme suit : Soient respectivement les tensions simples au point de raccordement et les courants de charge d'un système triphasé sans homopolaire [3].

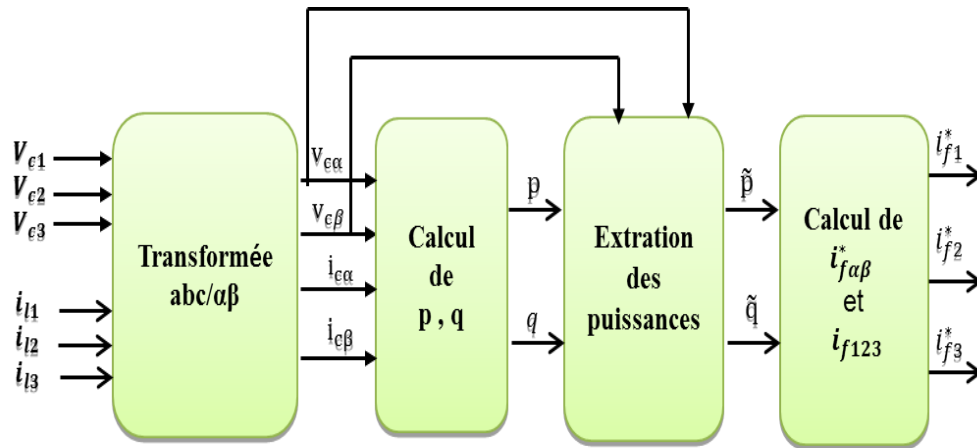


Figure III.1. Schéma synoptique de l'algorithme (p-q).

III.3 Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées (p-q)

III.3.1 Généralités sur les puissances instantanées

En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties : active (P), réactive (Q) et déformante (D) comme le montre la relation (III.1).

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (III.1)$$

Le comportement des grandeurs triphasées peut être représenté de manière condensée en utilisant le phaseur spatial complexe (transformation de Concordia) [6].

Cette méthode exploite la transformation α - β pour obtenir les puissances réelles et imaginaires. Notons par (v_α, v_β) et (i_α, i_β) les composantes orthogonales du repère α - β associées respectivement aux tensions de raccordement du filtre actif parallèle (v_s) et aux courants absorbés par les charges polluantes (i_s).

La transformation triphasée α - β -0 permet d'exprimer les tensions par la relation suivante :

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

Et les courants par la relation :

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix} \quad (III.3)$$

Les composantes indicées (0) représentent les séquences homopolaires du système de courant et de tension triphasé [20]. Dans un repère a, b, c, la puissance instantanée active est donnée par :

$$p(t) = v_{sa} \cdot i_{sa} + v_{sb} \cdot i_{sb} + v_{sc} \cdot i_{sc} = p_s(t) + p_0(t) \quad (\text{III.4})$$

De même, dans le repère $\alpha, \beta, 0$:

$$p_{\alpha\beta 0}(t) = v_{\alpha} \cdot i_{\alpha} + v_{\beta} \cdot i_{\beta} + v_0 \cdot i_0 = p_s + p_0 \quad (\text{III.5})$$

Il est à noter que la transformation utilisée est orthogonale. Elle garde la puissance invariante dans les deux repères, c'est-à-dire :

$$p(t) = p_{\alpha\beta 0} \quad (\text{III.6})$$

Où :

La puissance instantanée réelle :

$$p_s = v_{\alpha} \cdot i_{\alpha} + v_{\beta} \cdot i_{\beta} = p_{\alpha} + p_{\beta} \quad (\text{III.7})$$

La puissance instantanée de la séquence homopolaire :

$$p_0 = v_0 \cdot i_0 \quad (\text{III.8})$$

Un des avantages issus de cette transformation est la séparation des séquences homopolaires de courant ou de tension, Akagi propose la définition suivante de la puissance imaginaire instantanée :

$$q_s = v_{\alpha} \cdot i_{\beta} - v_{\beta} \cdot i_{\alpha} \quad (\text{III.9})$$

De la même manière, la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante [4] :

$$q_s(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} ((v_{sb} - v_{sc})i_{sa} + (v_{sc} - v_{sa})i_{sb} + (v_{sa} - v_{sb})i_{sc}) \quad (\text{III.10})$$

Cette expression est bien connue pour la mesure de la puissance réactive conventionnelle dans le système triphasé.

A partir des relations (III.7) et (III.9), nous pouvons établir la relation matricielle suivante:

$$\begin{bmatrix} p_s \\ q_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ -v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

Dans le cas général, chacune des puissances p_s et q_s comporte une partie continue et une partie alternative, ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous :

$$\begin{cases} p_s = \bar{p} + \tilde{p} \\ q_s = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

Avec :

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

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

\tilde{p} et \tilde{q} : Des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension [6].

III.3.2 Analyse fréquentielle des puissances instantanées

Nous effectuons cette analyse en prenant l'exemple d'un pont redresseur triphasé (pont de Graetz). Cette analyse va permettre par la suite, d'une part de définir la dynamique du filtre de puissance chargé d'isoler les puissances actives et réactives conventionnelles et d'autre part de connaître la limite des applications de cette méthode d'identification. Le courant i_c consommé par ce pont redresseur peut être décomposé en série de Fourier, comme le décrit l'équation suivante [28] :

$$i_c = \sqrt{2}I_1 \left[\begin{array}{l} \sin(\omega t - \alpha) - \frac{1}{5}\sin[5(\omega t - \alpha)] - \frac{1}{7}\sin[7(\omega t - \alpha)] + \frac{1}{11}[11\sin(\omega t - \alpha)] \\ + \frac{1}{13}[13\sin(\omega t - \alpha)] - \frac{1}{17}\sin[17(\omega t - \alpha)] - \frac{1}{19}\sin[19(\omega t - \alpha)] + \dots \end{array} \right] \quad (\text{III.13})$$

III.3.3 Courant harmonique équilibré avec une tension sinusoïdale équilibrée

La tension du réseau électrique, dans ce cas, est une tension sinusoïdale équilibrée donnée par une des relations suivantes [23] :

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{2}V_s \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (\text{III.14})$$

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{2}V_s \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ -\cos(\omega t) \end{bmatrix} \quad (\text{III.15})$$

Le courant de la charge polluante est celui représenté par l'équation (III.16). En faisant la transformation $\alpha - \beta$, nous obtenons les courants et les tensions suivants :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \left(\sqrt{3}I_1 \begin{bmatrix} \sin(\omega t - \alpha) \\ -\cos(\omega t - \alpha) \end{bmatrix} - \frac{1}{5} \begin{bmatrix} \sin 5(\omega t - \alpha) \\ -\cos 5(\omega t - \alpha) \end{bmatrix} - \frac{1}{7} \begin{bmatrix} \sin 7(\omega t - \alpha) \\ -\cos 7(\omega t - \alpha) \end{bmatrix} + \dots \right) \quad (\text{III.16})$$

Dans ce calcul, nous allons analyser la puissance réelle $p_s(t)$ puis généraliser les résultats pour la puissance imaginaire $q_s(t)$. La puissance réelle peut être calculée à partir des équations (III.15) et (III.16) comme le montre la relation (III.18):

$$p(t) = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \quad (\text{III.17})$$

$$p(t) = \underbrace{3V_S I_1 \cos \alpha}_{\bar{p}} + \underbrace{\frac{3V_S I_1}{5} \cos(6\omega t - 5\alpha) - \frac{3V_S I_1}{7} \cos(6\omega t - 7\alpha)}_{\tilde{p}} \quad (\text{III.18})$$

Le premier terme (continu) de cette relation représente la puissance active moyenne, notée \bar{p} , liée au fondamental tandis que les autres termes représentent la puissance alternative, notée \tilde{p} causée par les courants harmoniques.

A partir de cette relation, nous pouvons tracer la transformation du spectre de la puissance active instantanée (Figure. III.2) [6] :

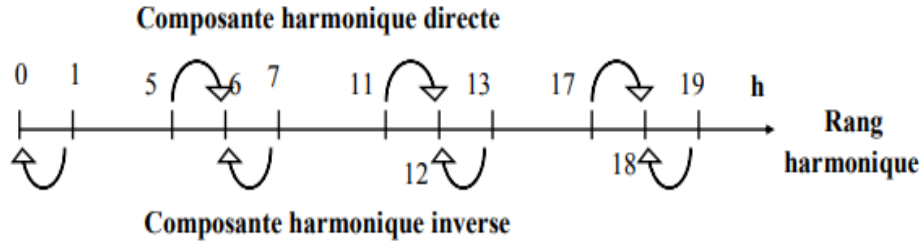


Figure III.2. Transformation du spectre de la puissance réelle instantanée (Courant harmonique et tension sinusoïdale équilibrée).

A partir de la Figure 3.3, nous constatons que la puissance conventionnelle active devient une composante continue, alors que les courants harmoniques (5,7), (11,13), (17,19),... causent des puissances perturbatrices aux pulsations respectives (6, 12, 18...). Le même spectre peut être obtenu pour la puissance imaginaire instantanée. Notons que le réseau étudié est composé de trois fils ce qui empêche les composantes homopolaires d'y circuler.

III.3.4 Courant harmonique équilibré avec une tension sinusoïdale déséquilibrée

La tension du réseau électrique, sans maintenant déséquilibrée et définies par la relation matricielle suivante [30] :

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{2} \left\{ V_S^{(d)} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} + V_S^{(inv)} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) \end{bmatrix} \right\} \quad (\text{III.19})$$

$V_S^{(d)}$ Et $V_S^{(inv)}$ représentent respectivement les composantes efficaces directe et inverse de la tension réseau. Dans le repère (α, β) le système de tension réseau devient :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{2} \left\{ V_S^{(d)} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ -\cos(\omega t) \end{bmatrix} + V_S^{(inv)} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \cos(\omega t) \end{bmatrix} \right\} \quad (\text{III.20})$$

III.3.4.1 Séparation des puissances perturbatrices

Après avoir identifié les pulsations des puissances instantanées, le filtre de puissance chargé d'isoler les puissances active et réactive conventionnelles peut être dimensionné.

Pour avoir la composante alternative [31], on utilise un filtre passe bas avec un soustracteur peut être employé comme le présente (Figure. III.3) suivant :

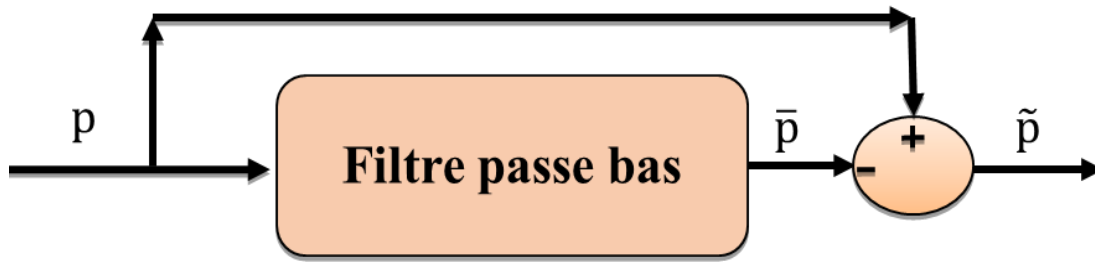


Figure III.3. Schéma représentant le principe de séparation des puissances.

La fréquence de coupure du filtre est choisie, selon que la charge soit équilibrée ou déséquilibrée, de manière à ce qu'il puisse bloquer le passage des composantes harmoniques instantanées, et de permettre uniquement le passage des composantes continues représentant les puissances active et réactive à la fréquence fondamentale[22].

L'ordre de ce filtre passe-bas définit la dynamique et l'efficacité de la méthode d'identification. Dans notre étude, nous avons choisi un filtre passe-bas du deuxième ordre. La relation suivante donne l'expression générale d'un filtre passe-bas du deuxième ordre [4] :

$$\text{FBP} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (\text{III.20})$$

La fréquence de coupure $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$, est choisie de telle sorte que le filtre de puissance puisse bloquer toute composante perturbatrice des puissances instantanées (\tilde{X}). Elle doit aussi permettre le passage des composantes continues représentant les puissances active et réactive à la fréquence fondamentale (\bar{X}). Cette fréquence est donc choisie selon le type de la charge, soit :

60 Hz pour un courant de charge équilibré avec un temps de réponse du filtre de 20 ms

20 Hz pour un courant de charge déséquilibré avec un temps de réponse du filtre de 60 ms.

III.3.4.2 Calcul des courants perturbateurs

En inversant la relation (III.11), nous pouvons recalculer les courants dans le repère α - β comme le montre l'équation (III.21) [6] :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_s \\ q_s \end{bmatrix} \quad (\text{III.21})$$

En considérant les équations (III.11) et (III.21), nous pouvons séparer le courant dans le repère (α - β) en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant harmonique}} \quad (\text{III.22})$$

$$\text{Avec } \Delta = v_\alpha^2 + v_\beta^2$$

Supposé constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale équilibrée du réseau électrique. Le calcul des courants perturbateurs dans le repère biphasé (α, β) est finalement donné par :

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{III.23})$$

Cette expression montre donc que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère (α - β) revient à séparer des termes continus des puissances réelle et imaginaire instantanées. Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, dits courants de référence (*Iref*), sont calculés à partir de la transformation α - β inverse [4] :

$$\begin{bmatrix} i_{\text{ref1}} \\ i_{\text{ref2}} \\ i_{\text{ref3}} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{III.24})$$

Avec $i_{p\alpha}, i_{p\beta}$ courants perturbateurs calculés dans le repère α - β à partir des courants réactifs et harmoniques de la relation (III.22).

III.3.4.3 Algorithme d'identification

Le schéma de la figure (III.4) illustre les différentes étapes permettant l'obtention des composantes harmoniques du courant d'une charge non linéaire [32] :

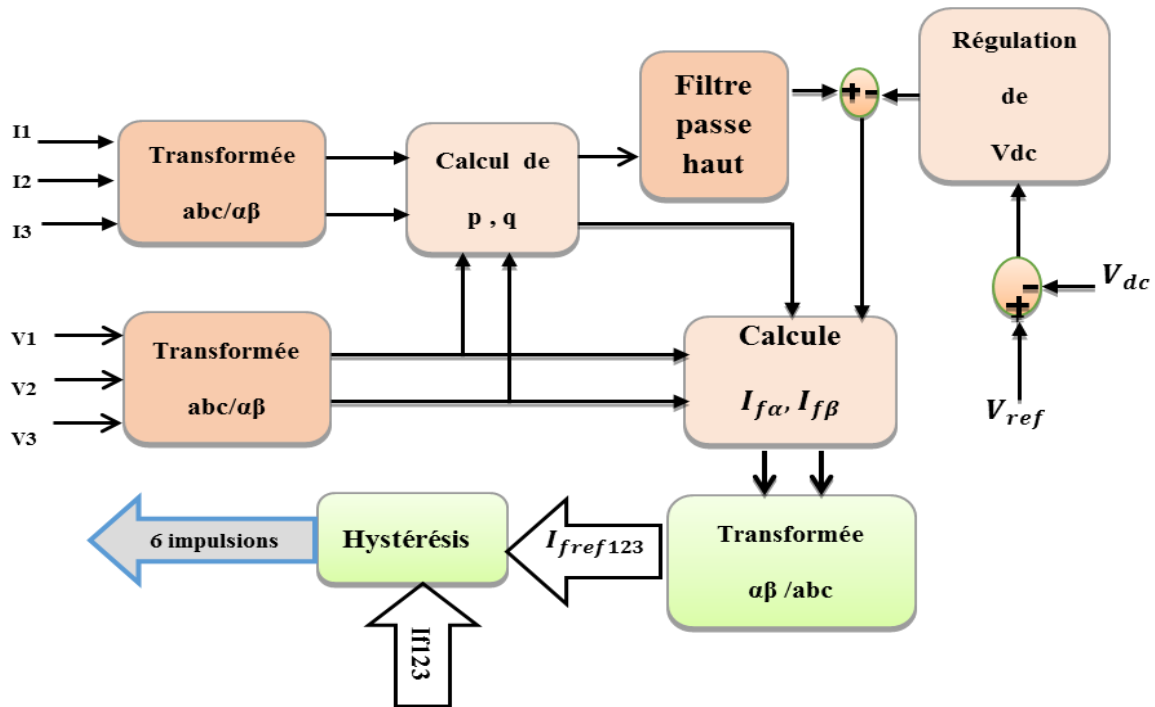


Figure III.4. Algorithme d'identification de la méthode (p-q).

Cette méthode possède les quelques caractéristiques suivantes [22] :

- Elle est une théorie inhérente aux systèmes triphasés.
- Elle peut être appliquée à tout type de systèmes triphasés (équilibré ou déséquilibré), avec ou sans harmoniques.
- Elle est basée sur des valeurs instantanées, ce qui lui donne de bons temps de réponse dynamique.
- Méthode de calcul simple (elle n'est composée que d'expression algébrique et peut être implémentée à l'aide d'un processeur standard).

III.4 Le système à base de P.L.L

Dans le cas où la tension du réseau est déséquilibrée, la méthode des puissances instantanées n'est pas applicable, le système à base de PLL (Phase Locked Loop ou Boucle à Verrouillage de Phase) est proposé pour extraire la composante fondamentale directe de la tension du réseau [33].

III.4.1 P.L.L classique

Le système à base de PLL est proposé pour extraire la composante fondamentale directe de la tension du réseau [6].

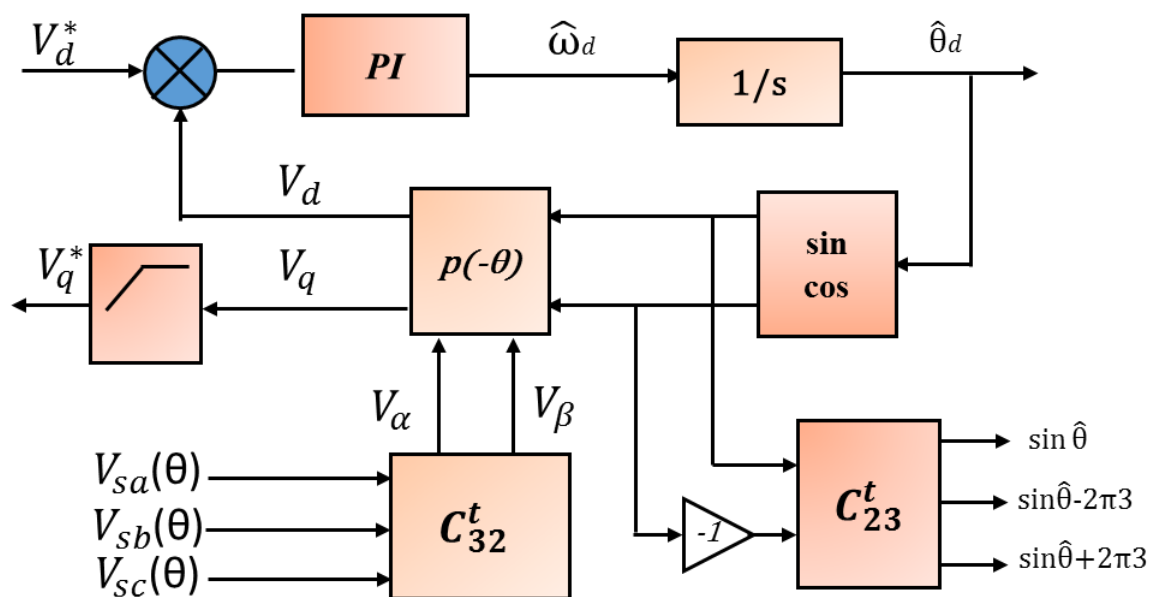


Figure III.5. Schéma de PLL classique.

A partir de la Figure III.5, Les tensions simples mesurées au point de raccordement dans le repère α - β sont données par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha}(\theta) \\ v_{s\beta}(\theta) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1}(\theta) \\ v_{s2}(\theta) \\ v_{s3}(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{III.25})$$

Puis en appliquant la transformée de Park (d,q) avec un angle de rotation $\hat{\theta}$ donnée par :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \\ -\sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{III.26})$$

Nous obtenons alors la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{3}V_m \begin{bmatrix} \sin(\theta - \hat{\theta}) \\ -\cos(\theta - \hat{\theta}) \end{bmatrix} \quad (\text{III.27})$$

Où V_m est la valeur efficace la tension du réseau.

La PLL sera verrouillée lorsque l'angle estimé $\hat{\theta}$ sera égal à l'angle θ du réseau, ce qui implique que $\Delta\theta = 0$, nous pouvons ainsi écrire [6] :

$$\begin{cases} v_{sd} = 0 \\ v_{sq} = -\sqrt{3}V_m \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

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

$$\hat{\omega} = F_{PI}(s) \cdot \sqrt{3}V_m(\theta - \hat{\theta}) \quad (\text{III.29})$$

Où $F_{PI}(s)$ représente le filtre de la boucle (régulateur PI), qui est exprimé dans ce cas par la fonction de transfert suivante :

$$F_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (\text{III.30})$$

Alors la position angulaire $\hat{\theta}$ à la sortie du VCO sera :

$$\hat{\theta} = \frac{1}{s} \hat{\omega} \quad (\text{III.31})$$

La fonction de transfert en boucle fermée de ce système est donnée par :

$$\frac{\hat{\theta}(s)}{\theta(s)} = \frac{\sqrt{3}V_m(K_p + \frac{K_i}{s})\frac{1}{s}}{1 + \sqrt{3}V_m(K_p + \frac{K_i}{s})\frac{1}{s}} \quad (\text{III.32})$$

La fonction de transfert trouvée peut s'identifier avec le système général du deuxième ordre donné par [32] :

$$F(s) = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{III.33})$$

Ce qui nous permet d'en déterminer :

$$K_p = \frac{2\xi\omega_n}{\sqrt{3}V_m} \text{ et } K_i = \frac{\omega_n}{\sqrt{3}V_m} \quad (\text{III.34})$$

Afin de réaliser un bon compromis entre la stabilité et les performances dynamiques, les valeurs suivantes sont retenues :

$$\xi = 0.707 \text{ et } f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = 50\text{Hz} \quad (\text{III.35})$$

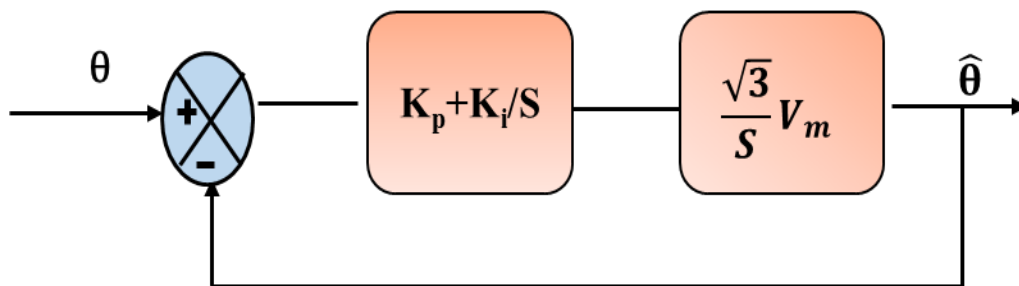


Figure III.6. Schéma simplifié de la PLL.

III.4.2 P.L.L triphasé classique avec un filtre multi-variable (FMV)

Pour améliorer les performances de la P.L.L classique, un filtre très sélectif HSF (High Selective Filter) a été mis en œuvre.

Le rôle du HSF est d'extraire la composante fondamentale de la tension ou du courant directement, sans aucun décalage de phase ou un changement d'amplitude. La fonction de transfert du filtre HSF peut être exprimée par l'équation suivante [35] :

$$H(s) = \frac{\hat{x}_{\alpha\beta}(s)}{x_{\alpha\beta}(s)} = k \frac{(s+K)+j\omega_c}{(s+K)^2+j\omega_c} \tag{III.36}$$

Avec :

ω_c : Représente la pulsation fondamentale ($f_c = 50\text{Hz}$).

K: Est une constante positive.

x: Le signal électrique d'entrée du FMV (courant ou tension).

\hat{x} : Est le signal correspondant à x en sortie du FMV.

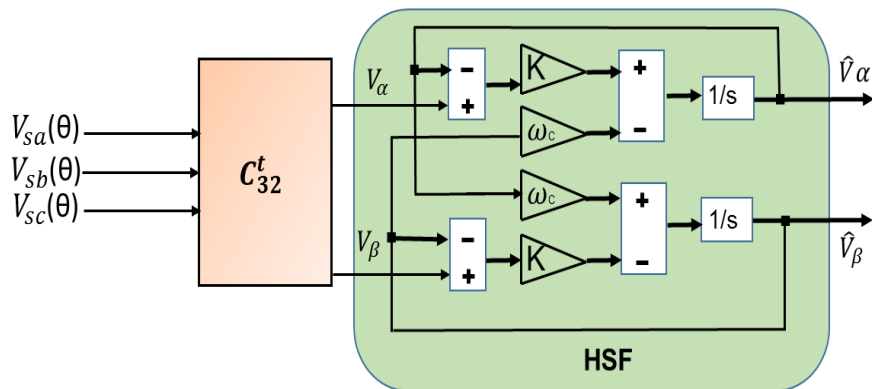


Figure III.7. Diagramme bloc du filtre HSF.

la PLL modifiée après l'addition de HSF à la PLL classique est représentée par La Figure III.8.

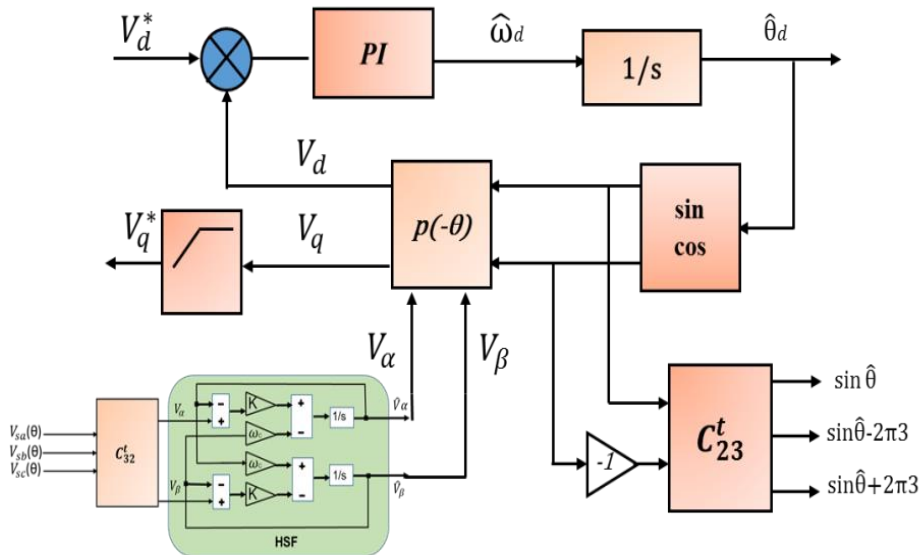


Figure III.8. Schéma de PLL Modifiée.

III.5 Résultats de simulation

Les études en simulation présentées dans ce travail ont été menées sous MATLAB / TM SMULINK.

III.5.1 Paramètres de simulation

Tous ces paramètres de simulation sont récapitulés dans le tableau suivant :

Partie du système	Désignations	Valeurs
Réseau électrique	<ul style="list-style-type: none"> - Tension efficace. - Fréquence. - Impédance interne. 	<ul style="list-style-type: none"> - $V_s = \sqrt{2} * 220 V$ - $f = 50 Hz$ - $R_s = 0.01 \Omega$ - $L_s = 0.5 mH$
Charge non linéaire	<ul style="list-style-type: none"> - Pont Redresseur triphasé (PD3) débitant sur une charge inductive (RD en série avec LD). - Impédance de filtrage à l'entrée du pont (PD3). 	<ul style="list-style-type: none"> - $RD1 = 30 \Omega$, - $RD2 = 30 \Omega$ - $LD = 1 mH$ - $RC = 0.01 \Omega$, - $LC = 0.566 mH$
FAP	<ul style="list-style-type: none"> - Condensateur de stockage - Filtre de couplage - Tension de référence 	<ul style="list-style-type: none"> - $CDC = 1100 \mu F$ - $RF = 0.1 \Omega$ - $LF = 4.8 mH$ - $Vdc_{ref} = 2 * \sqrt{2} * 220V$
Paramètres de simulation	<ul style="list-style-type: none"> - Temps d'échantillonnage - Type de pas - Méthode de résolution - Bande d'hystérésis 	<ul style="list-style-type: none"> - $Te = 0.6 \mu s$ - Pas fixe - Algorithme : Euler (Ode1)

Tableau III.1. Paramètres de simulations du FAP.

III.5.2 Avant branchement du FAP au réseau électrique

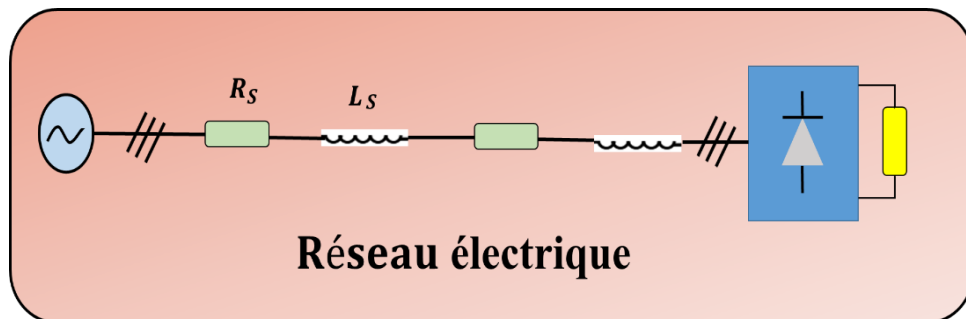


Figure III.9. Modélisation du réseau électrique connecté à une charge non linéaire.

Les figures III.10 et III.11 représentent la Forme d'onde de la tension de source et le courant de charge avant la mise en service du FAP.

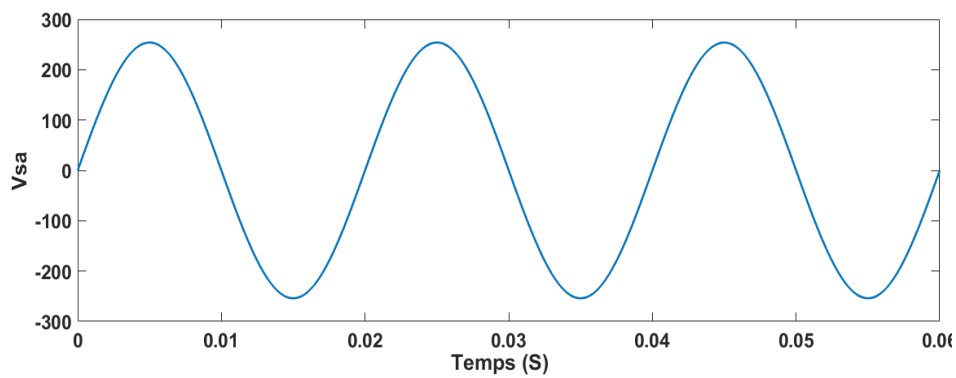


Figure III.10. La Forme d'onde de la tension de la source.

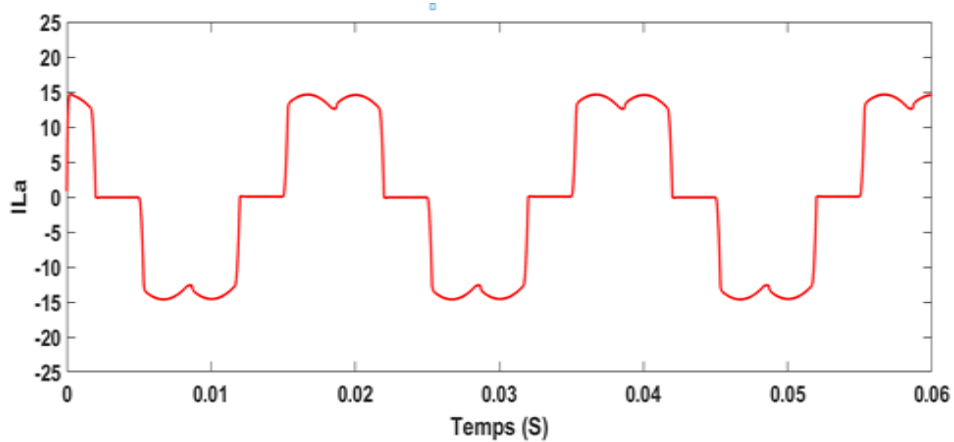


Figure III.11. La Forme d'onde du courant de source (courant de la charge).

III.5.3 Réseau équilibré

La Figure III.12 représente les signaux sinusoïdaux des tensions de réseaux équilibrés

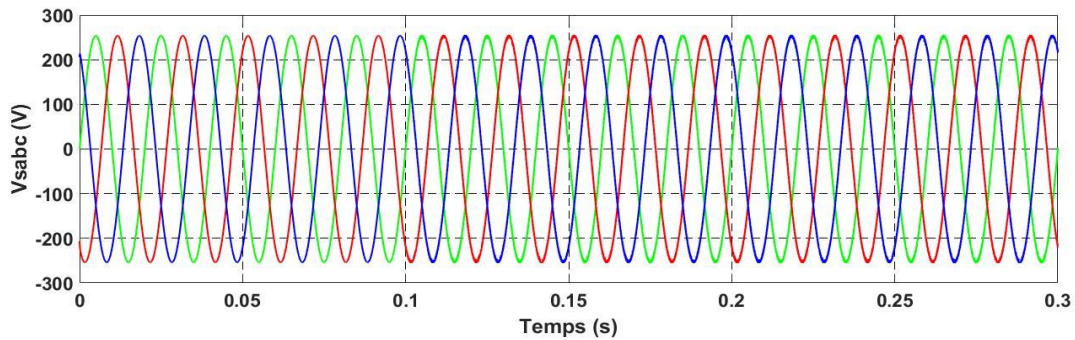


Figure III.12. Tension de la source V_{sabc} .

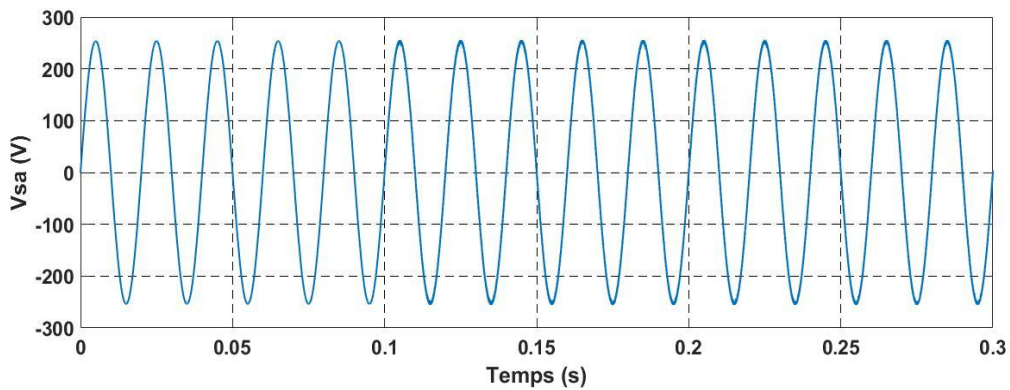


Figure III.13. La forme d'onde de la 1^{ère} phase de la tension du réseau V_{sa} .

Les Figures III.14, III.15 et III.16 schématisent les différentes formes d'onde avant et après la mise en service du FAP au 0.1(s) :

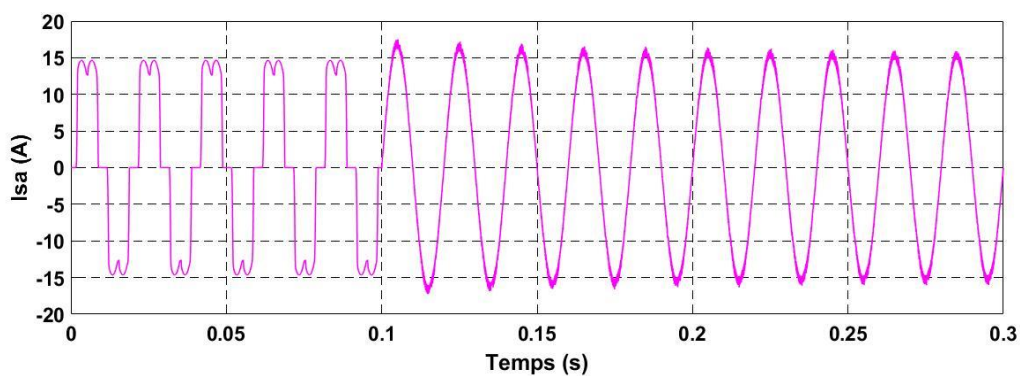


Figure III.14. Courant de source I_{sa} .

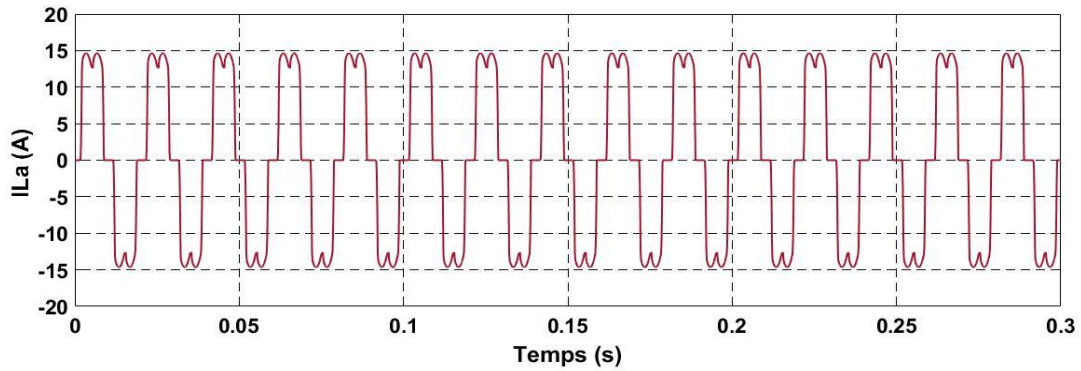


Figure III.15. Courant de charge I_{La} .

Dans les Figures III.14 et III.15 nous remarquons que :

Avant $t=0.1(s)$ le courant de charge I_{La} et le courant de source I_{sa} ont la même forme.

Après $t=0.1(s)$ amélioration de la forme de courant de sources I_{sa} (presque sinusoïdale).

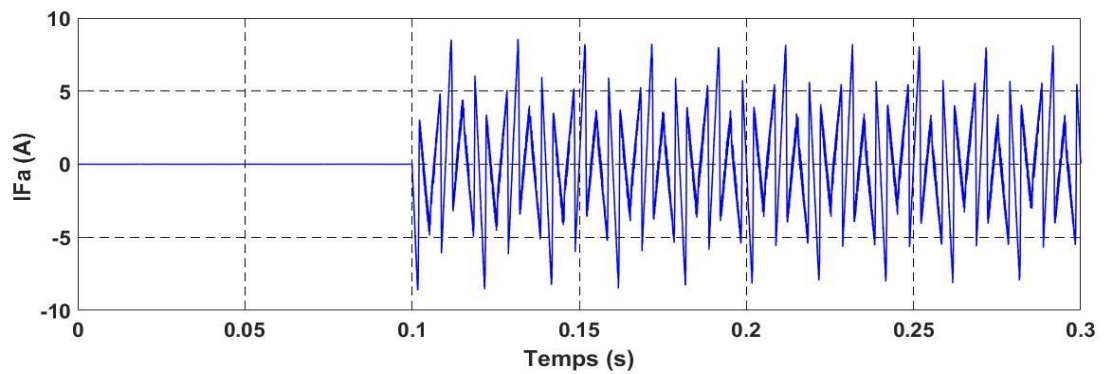


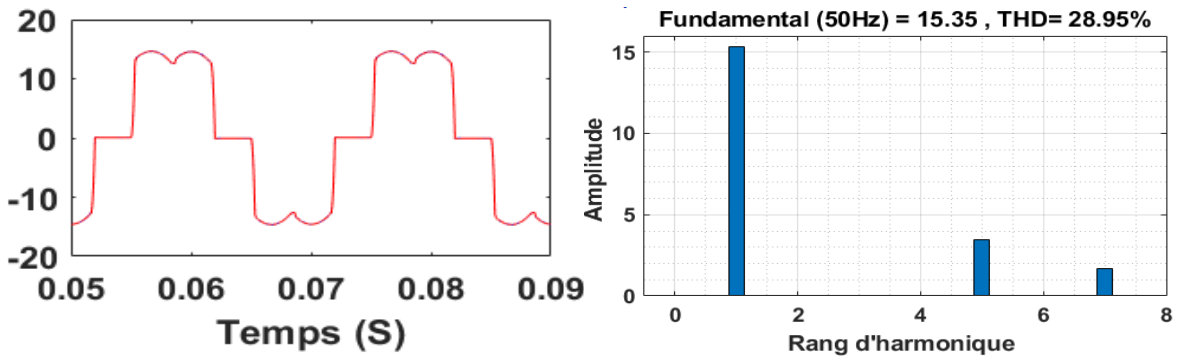
Figure III.16. Courant du filtre I_{Fa} .

Dans la Figure III.16 nous remarquons que :

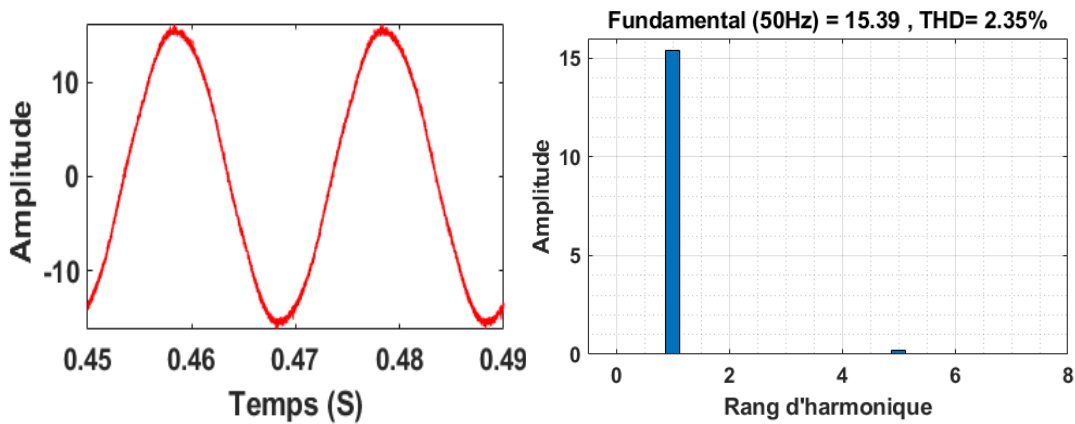
Avant $t=0.1(s)$ Le courant du filtre I_{Fa} est nul.

Après $t=0.1(s)$ Le FAP est mis en service il commence à injecter les courants de compensation.

La Figure III.17 représente le THD avant (a) et après (b) la mise en service du FAP à l'instant 0.1(s).



(a) avant la mise en service du FAP.



(b) après la mise en service du FAP.

Figure III.17. Le THD du courant de source.

Nous remarquons qu'à l'instant $t=0.1(s)$, le FAP est mis en service, comme précédemment il commence à injecter des courants (i_f) pour compenser les courants de source. Le THD du courant de source décroît de $THD_{is}=28.95\%$ à $THD_{is}=2.35\%$, la qualité du courant de source est améliorée.

La Figure III.18 représente le déphasage entre le courant et la tension de source pour la 1^{ère} phase (réseau équilibré). La mise en service du FAP à l'instant $t=0.1(s)$, le courant I_{sa} et la tension V_{sa} du réseau deviennent instantanément en phase. On a divisé la tension de source V_{sa} par 6 pour la visualiser avec le courant de source I_{sa} sur le même axe.

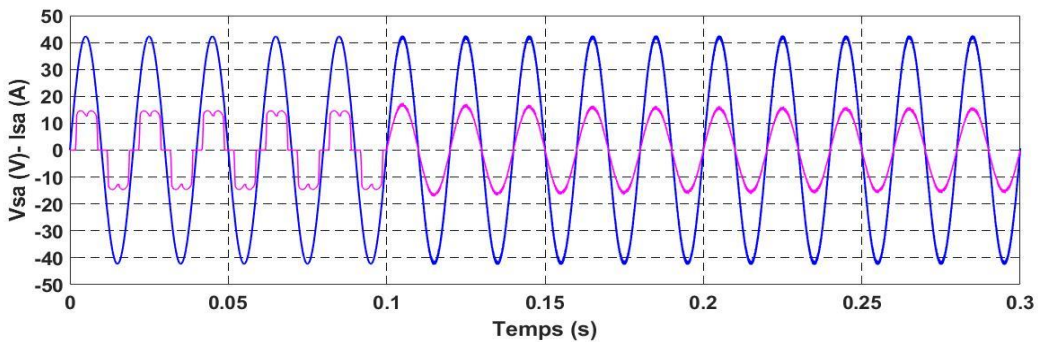


Figure III.18. Déphasage entre le courant et la tension de source.

La figure III.19 représente La tension du bus continu V_{dc} avec la tension de référence V_{dcref} .

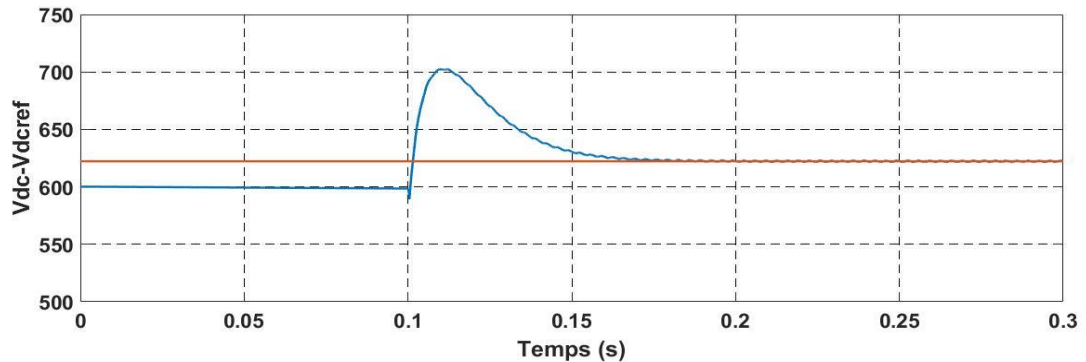
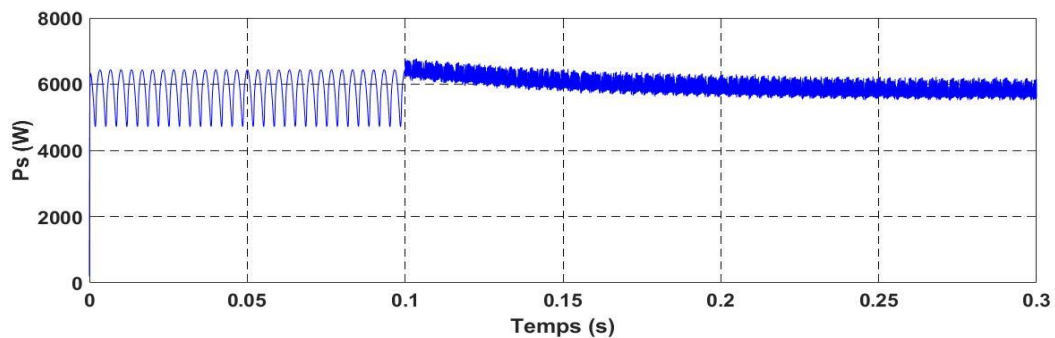
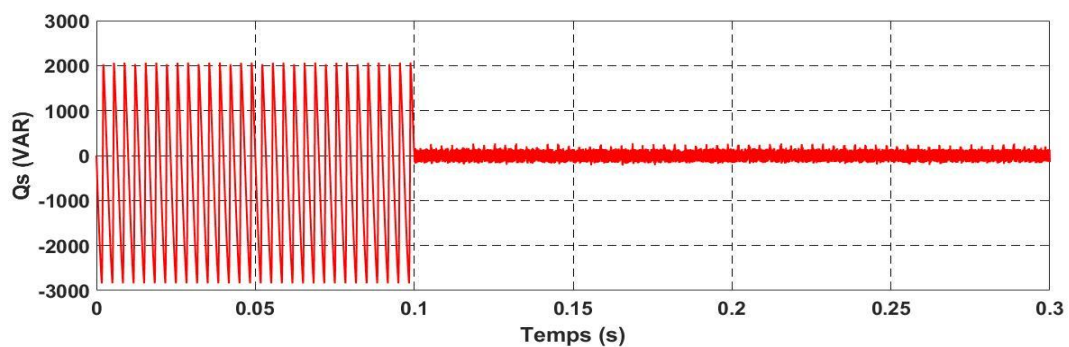


Figure III.19. La tension du bus continu V_{dc} et V_{dcref}

Nous remarquons que La tension du bus continu V_{dc} atteint sa tension de référence V_{dcref} après temps de 85(ms).



(a) puissance instantanée active



(b) puissance instantanée réactive.

Figure III.20. Allures des puissances instantanées active et réactive.

A partir l'instant 0.1(s) après la mise en service de FAP nous remarquons le début de la compensation de la puissance instantané réactif.

III.5.4 Comportement du FAP en régime dynamique

Pour étudier le comportement du FAP en régime dynamique et la robustesse de la commande, nous avons pratiqué à une variation de la charge non linéaire.

Les Figures (III.21, III.22, III.23, III.24 et III.25) représentent le fonctionnement de FAP en régime dynamique :

- avant et après la mise en service du FAP à $t=0.1s$.
- avant et après la variation de la charge à $t=0.3s$.

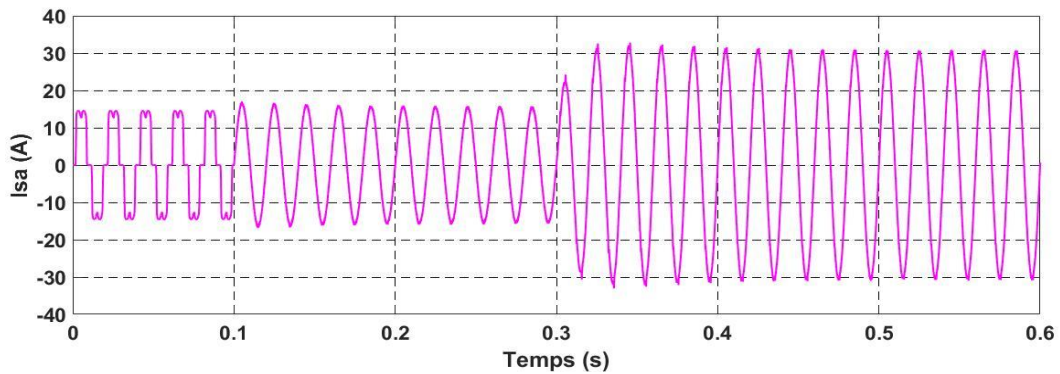


Figure III.21. Courant de source en régime dynamique.

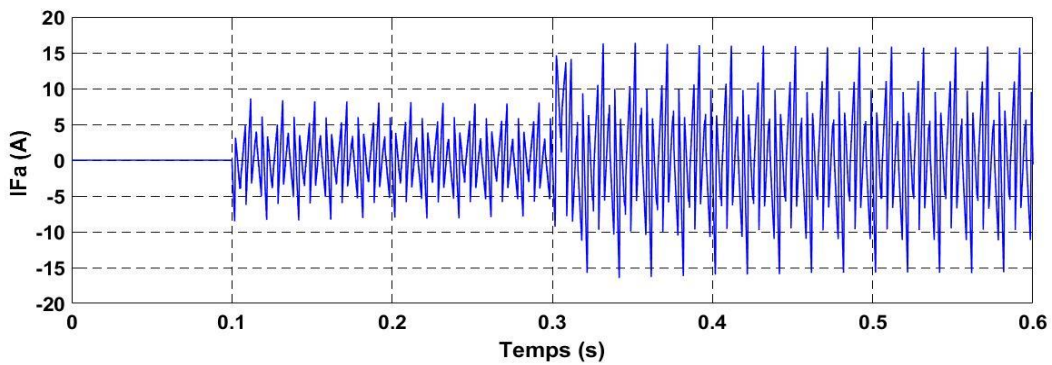


Figure III.22. Courant de filtre en régime dynamique.

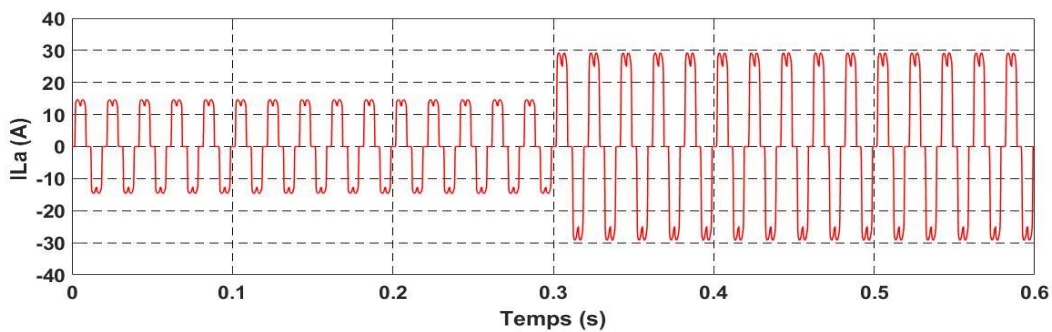


Figure III.23. Courant de charge en régime dynamique.

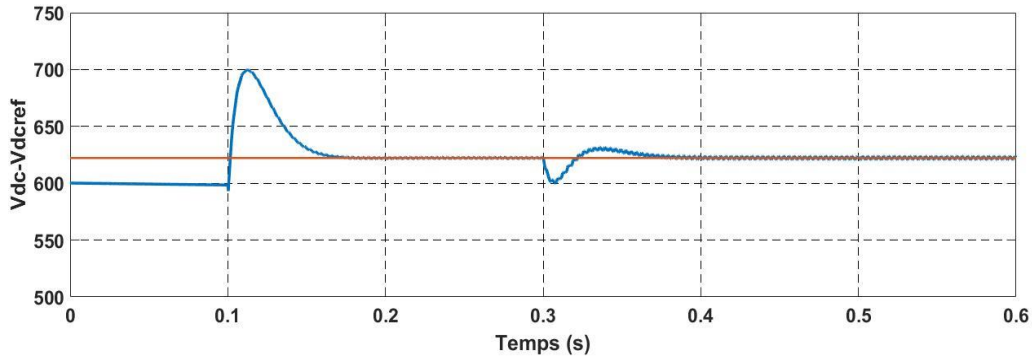


Figure III.24. La tension V_{dc} et V_{dcref} en régime dynamique.

Dans les quatre Figures précédents (III.21, III.22, III.23 et III.24) nous remarquons que :

Les courants de charge subissent une augmentation brusque alors que ceux de la source conservent leur dynamique et leurs formes sinusoïdales, sans aucune perturbation au niveau des tensions de la source. Tandis que la tension du bus continu diminue temporairement de $\Delta V_{dc} \approx 10\%$ (700V à 630) et atteint sa valeur de référence après un transitoire de $\Delta t = 85ms$.

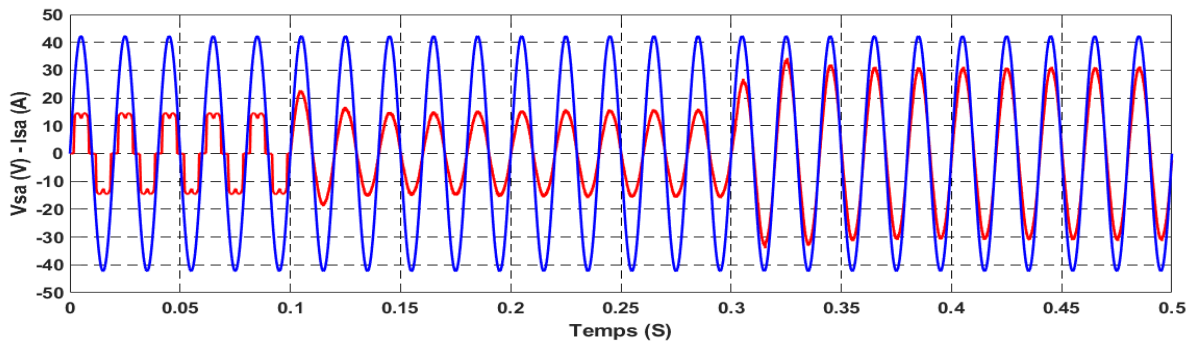


Figure III.25. Déphasage entre le courant et la tension de source pendant le régime dynamique.

La Figure III.25 montre que le courant de source et la tension de source sont toujours en phase, malgré la variation de la charge.

III.5.5 Réseaux déséquilibrés

Dans ce cas nous avons considéré une source déséquilibrée avec des valeurs efficaces différentes ($V_{sa}=200$ V, $V_{sb}=250$ V et $V_{sc}=230$ V).

La Figure III.26 représente les signaux des tensions de source en triphasé de réseau déséquilibré :

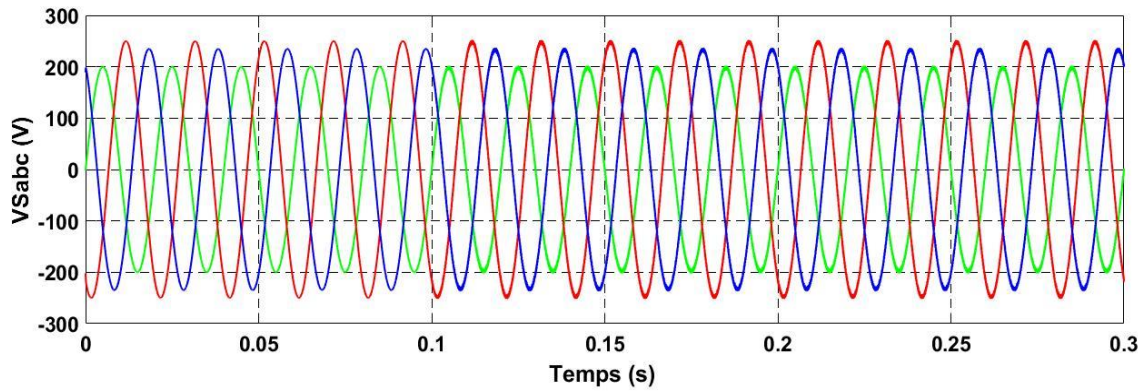


Figure III.26. Tensions de source avec un réseau déséquilibré.

a) **Résultat sans PLL**

Dans les Figures (III.27, III.28 et III.29) nous représentons les différentes allures des courants (du filtre, de charge et de source) avant et après la mise en service du FAP à $t=0.1s$:

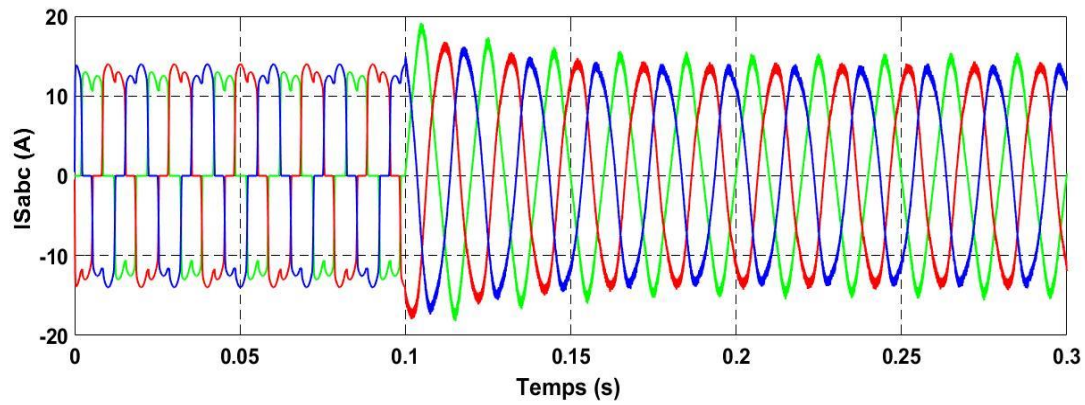


Figure III.27. Courants de source avec un réseau déséquilibré sans PLL.

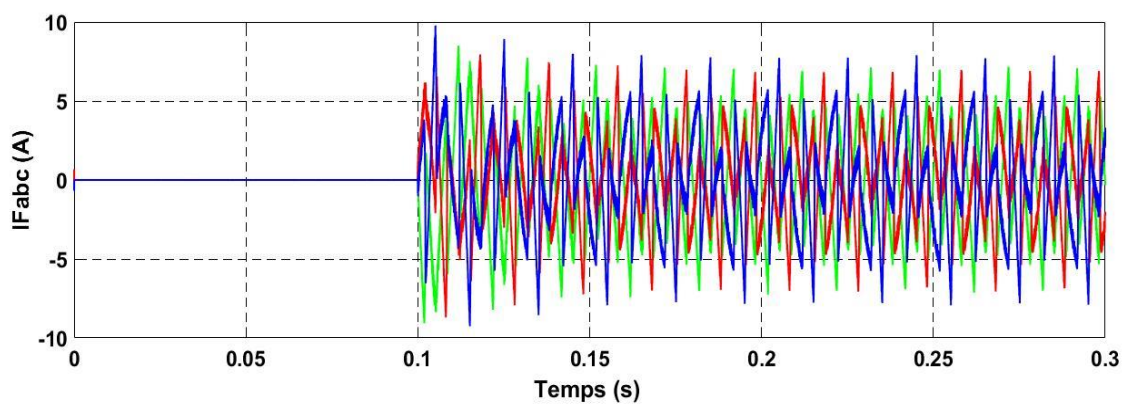


Figure III.28. Courants de filtre avec un réseau déséquilibré sans PLL.

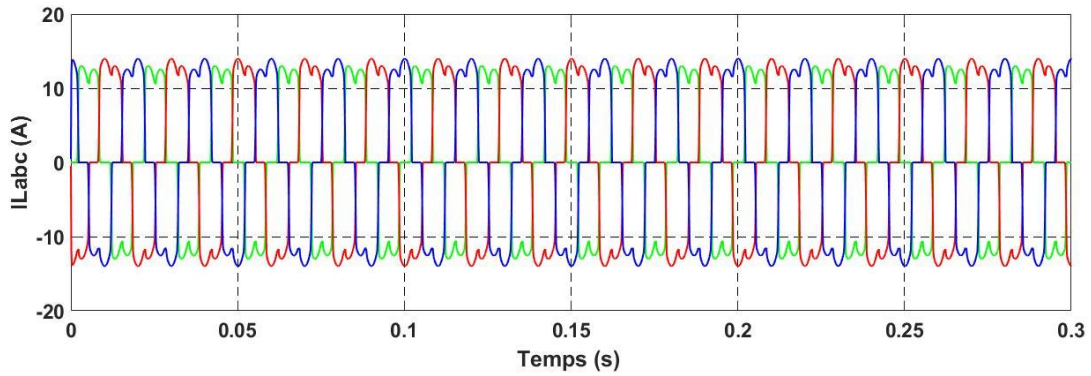


Figure III.29. Courants de charge avec un réseau déséquilibré sans PLL.

Nous remarquons qu'à l'instant $t=0.1(s)$, le temps de branchement du FAP, il commence à injecter des courants (I_f), mais les courants de source résultants n'ont pas la même forme.

Les Figures (III.30 et III.31) Le THD du courant de source après la mise en service du FAP à $t=0.1(s)$ est diminué de $THDis= 30.79\%$ à $THDis= 7.69\%$.

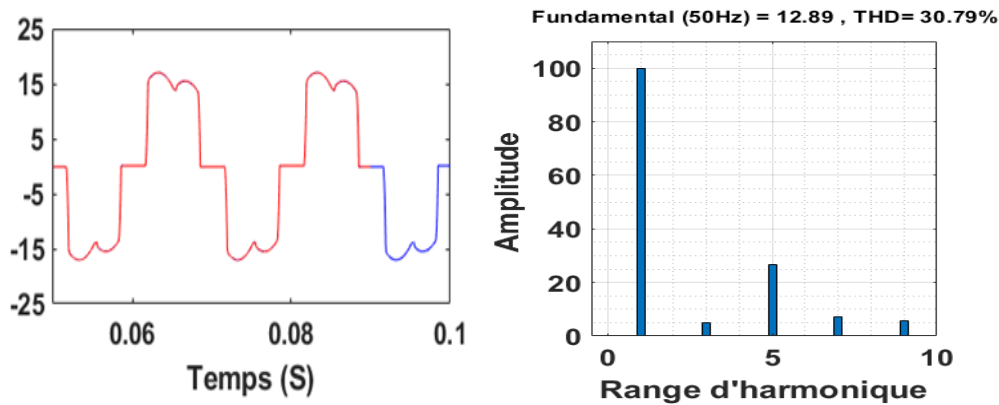


Figure III.30. Le THD du courant de source avant FAP sans PLL.

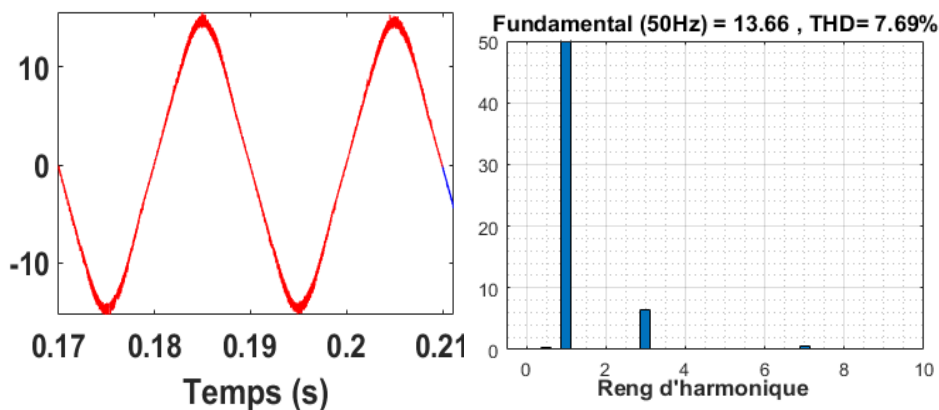


Figure III.31. Le THD du courant de source après FAP sans PLL.

La figure III.32 représente La tension du bus continu V_{dc} avec la tension de référence $V_{dc\text{ref}}$.

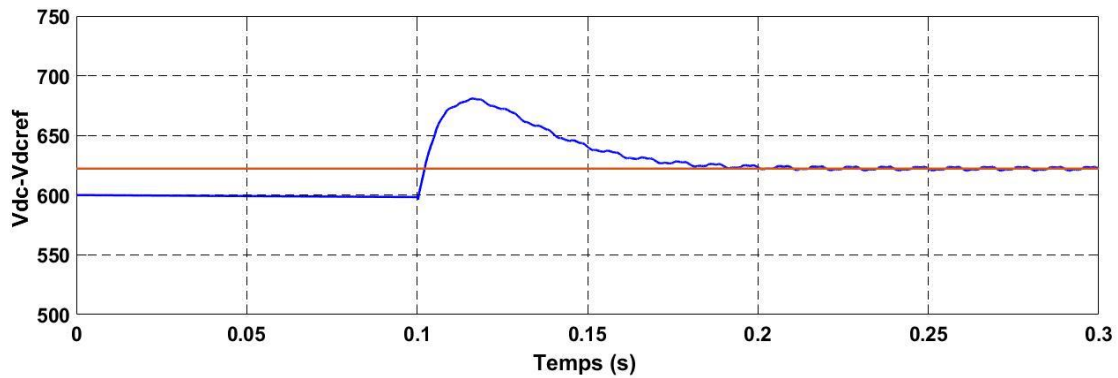
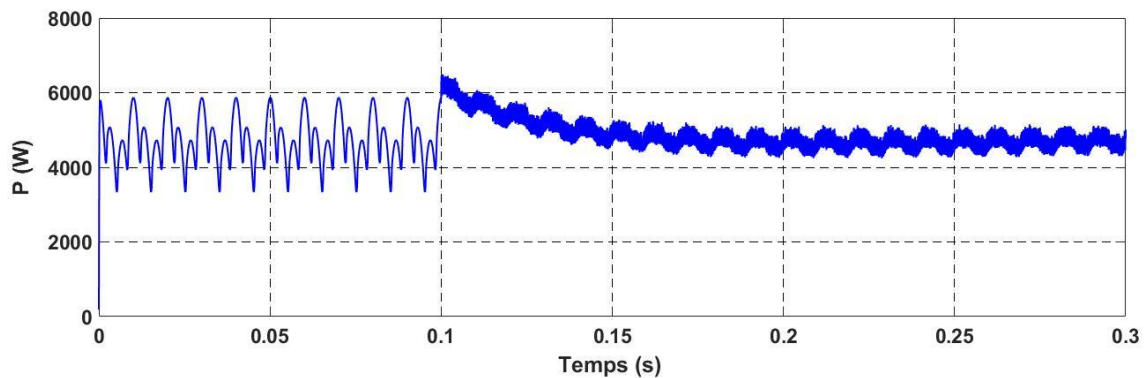
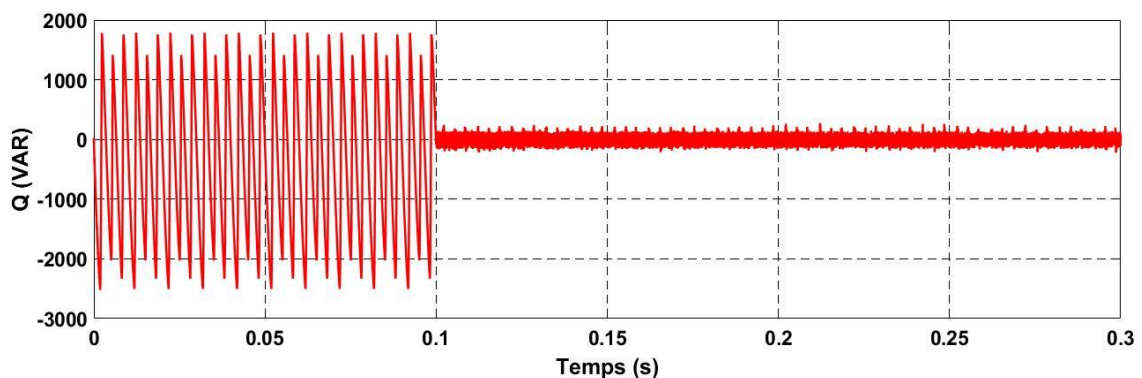


Figure III.32. La tension du bus continu V_{dc}

La figure III.33 représente L'effet de réseau déséquilibré sur les allures des puissances instantanées (a) actives et (b) réactives avant la mise en service de FAP et la compensation de ces puissances après la mise en service de FAP sans PLL.



(a) puissance instantanée active



(b) puissance instantanée réactive.

Figure III.33. Allures des puissances instantanées actives et réactives.

b) Résultat avec PLL

Dans les Figures (III.34, III.35 et III.36) nous représentons les différentes allures des courants (du filtre, de charge et de source) avant et après la mise en service du FAP avec PLL à $t=0.1(s)$:

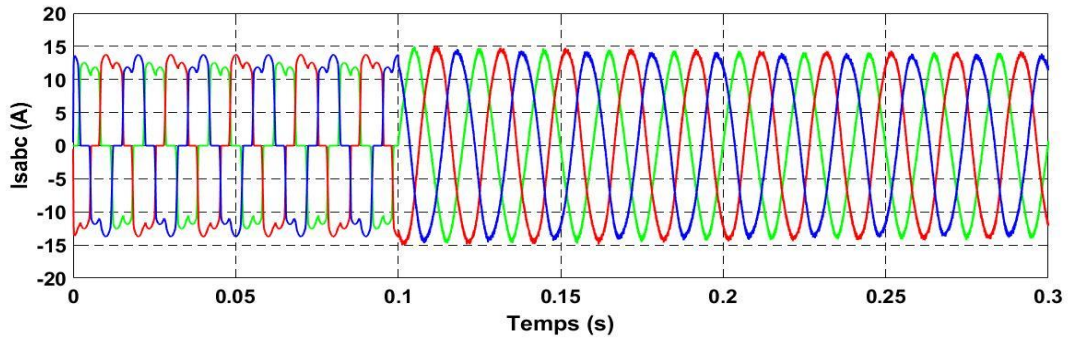


Figure III.34. Courants de source avec un réseau déséquilibré avec PLL.

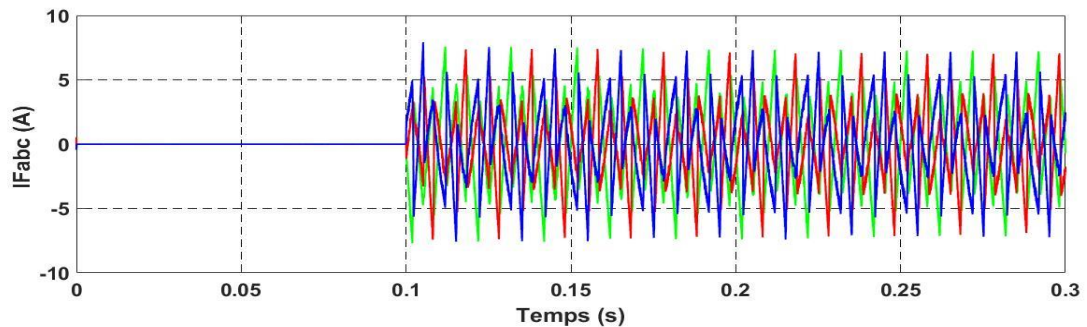


Figure III.35. Courants de filtre avec un réseau déséquilibré avec PLL.

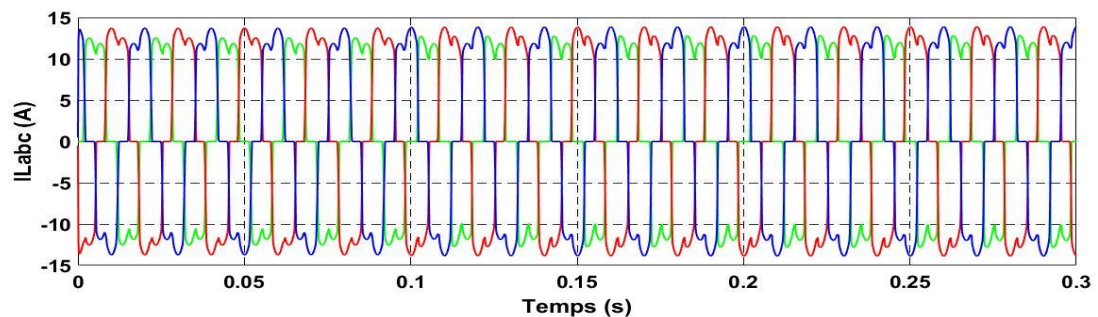


Figure III.36. Courants de charge avec un réseau déséquilibré avec PLL.

Nous remarquons qu'à l'instant $t=0.1(s)$, le temps de branchement du FAP avec PLL, il commence à injecter des courants (I_f) pour compenser les courants de source, ces courants sont sinusoïdaux et de même forme.

Les Figures (III.37 et III.38) Le THD du courant de source après la mise en service du FAP avec PLL à $t=0.1(s)$ est diminué de $THD_{is} = 29.66\%$ à $THD_{is} = 5.69\%$.

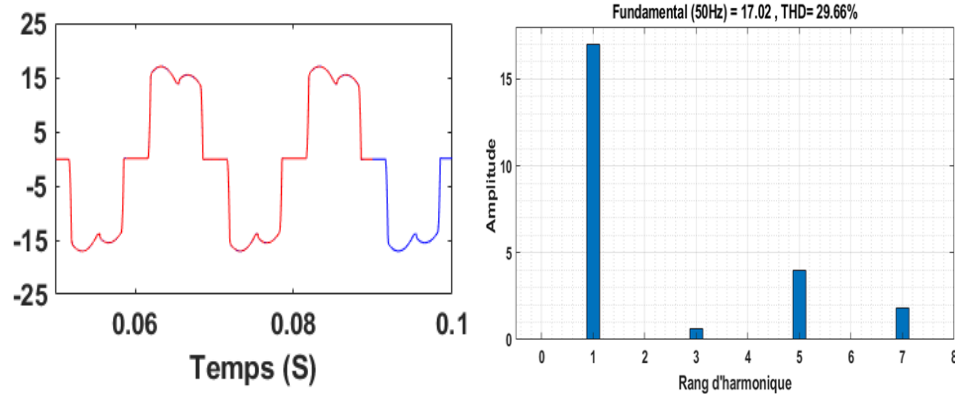


Figure III.37. Le THD du courant de source avant FAP avec PLL.

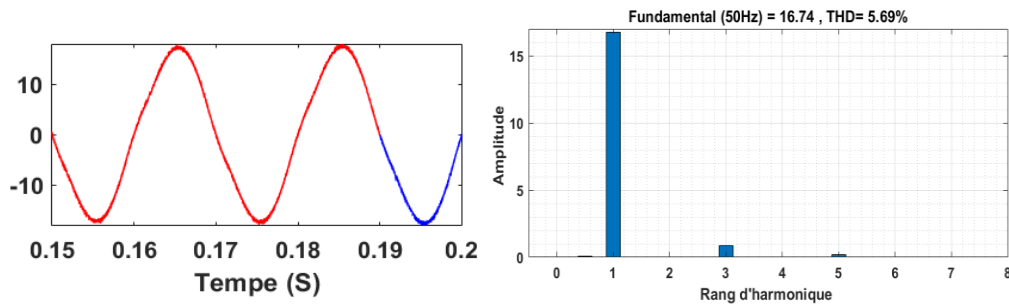


Figure III.38. Le THD du courant de source après FAP avec PLL.

La figure III.39 représente La tension du bus continu V_{dc} avec la tension de référence $V_{dc\text{ref}}$.

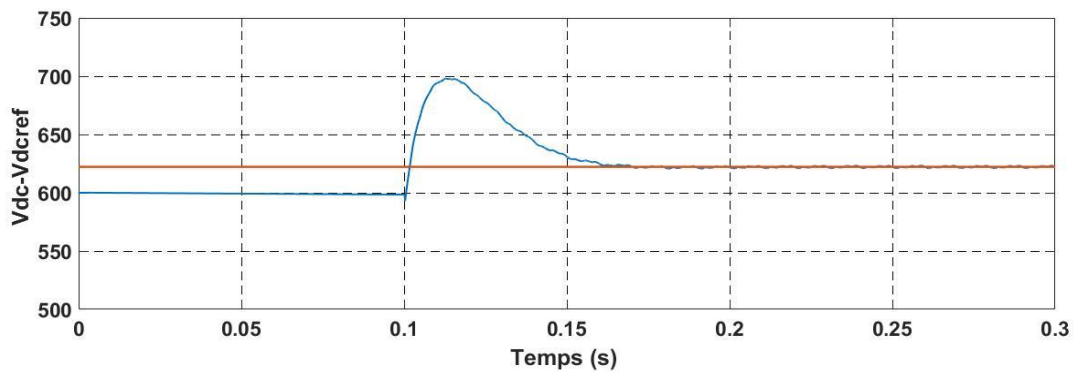


Figure III.39. La tension du bus continu V_{dc}

La Figure III.40 montre que le courant de source et la tension de source sont toujours en phase, malgré le déséquilibre dans la tension de source du réseau.

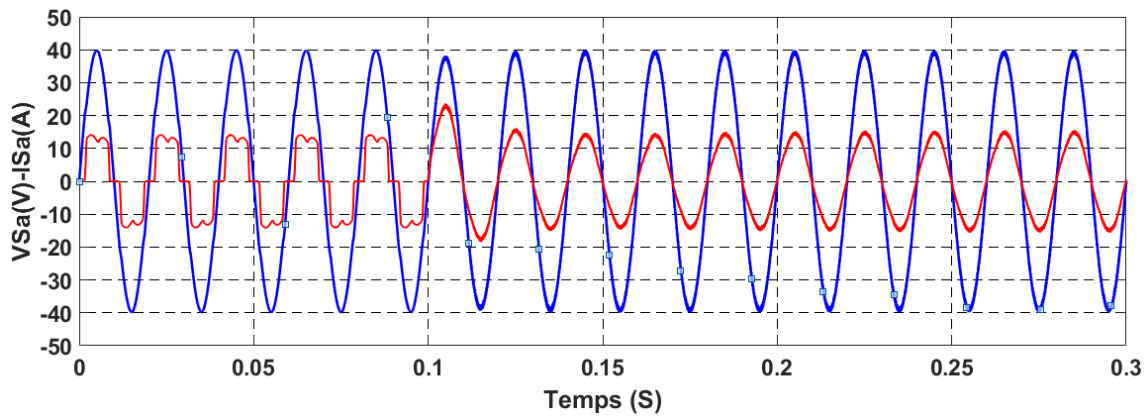
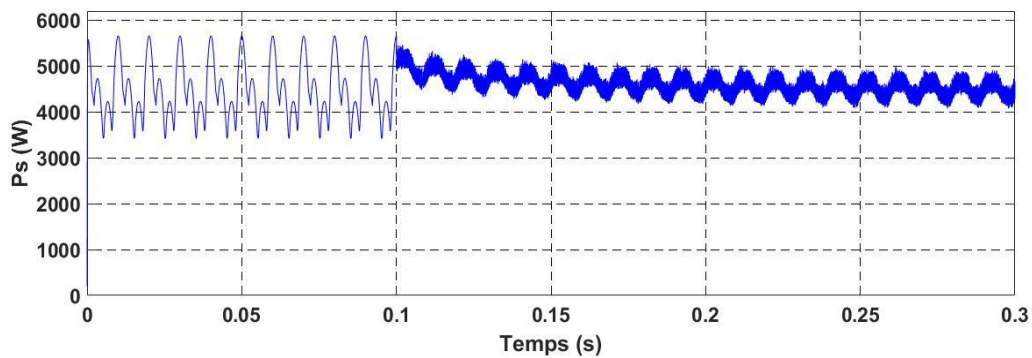
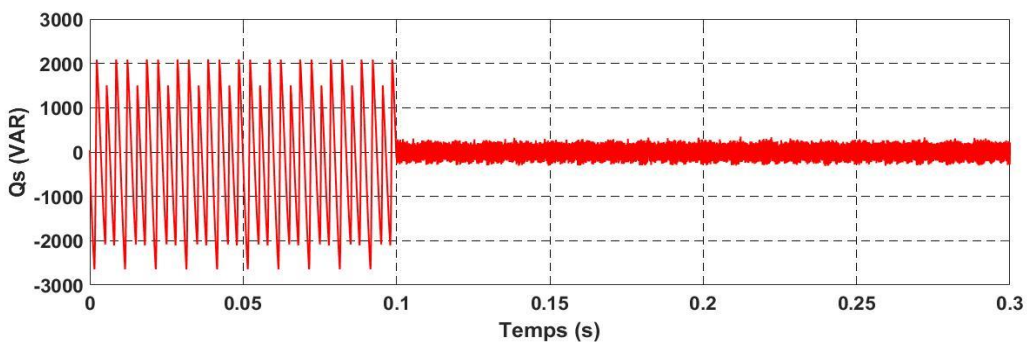


Figure III.40. Déphasage entre le courant et la tension de source du réseau déséquilibré.

La figure III.41 représente l'effet de réseau déséquilibré sur les allures des puissances instantanées (a) actives et (b) réactives avant la mise en service de FAP et la compensation des puissances après la mise en service de FAP avec PLL.



(a) puissance instantanée active



(b) puissance instantanée réactive.

Figure III.41. Allures des puissances instantanées actives et réactives.

III.5.6 Réseau équilibré avec distorsion

Dans ce cas nous avons utilisé une source équilibrée mais riche en harmonique, Les Figures (III.42, III.43 et III.44) visualise les différentes allures des courants (du filtre, de charge

et de source) et de la tension de source en triphasé avant et après la mise en service du FAP à $t=0.1(s)$.

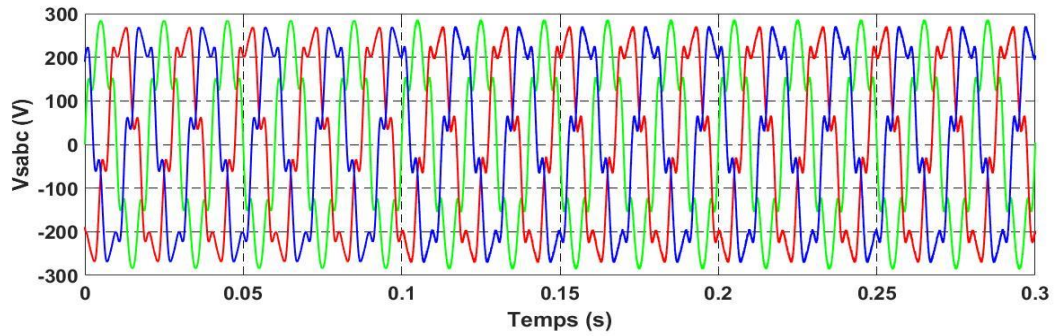


Figure III.42. Tensions de source avec un réseau équilibré et distordu.

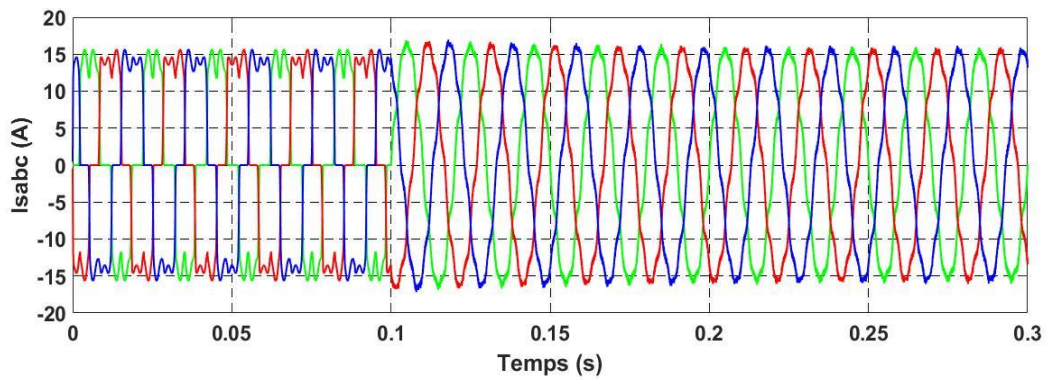


Figure III.43. Courants de source avec un réseau équilibré et distordu.

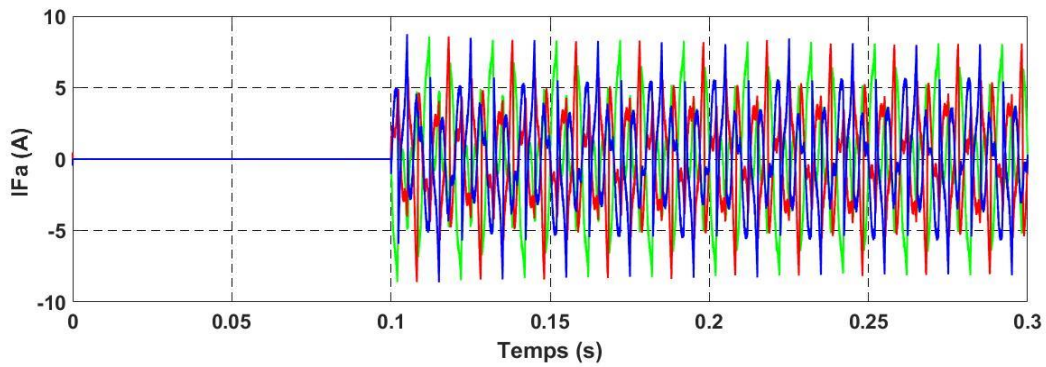


Figure III.44. Courants de filtre avec un réseau équilibré et distordu.

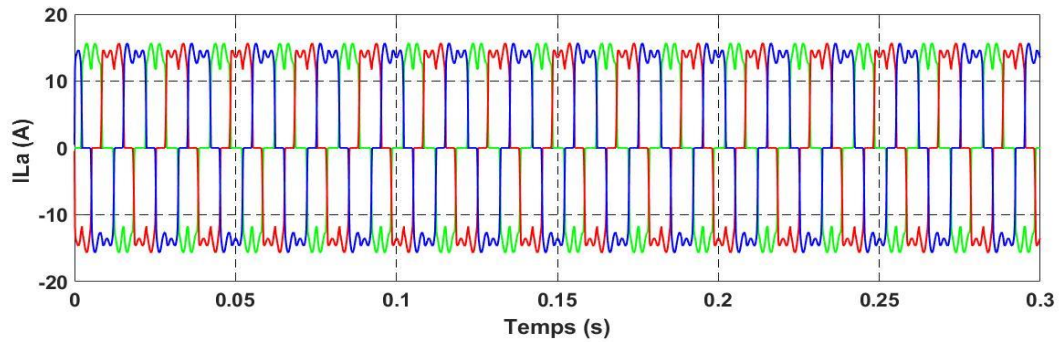


Figure III.45. Courants de charge avec un réseau équilibré et distordu.

Dans les trois figures précédentes nous remarquons qu'à l'instant $t=0.1(s)$, le FAP est mis en service, il injecte des courants (I_f) pour compenser les courants de source.

Les Figures (III.46 et III.47) représentent le THD du courant de source avant (a) et après (b) la mise en service du FAP à l'instant 0.1(s).

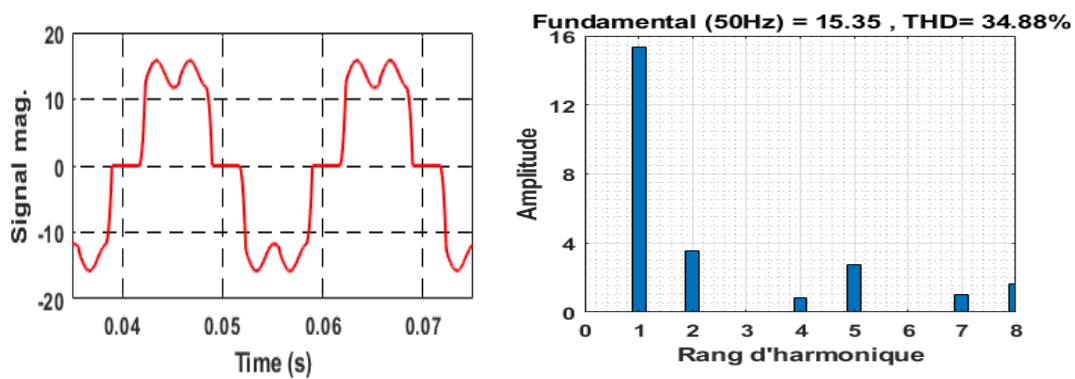


Figure III.46. Le THD du courant de source avant la mise en service du FAP à $t=0.1s$.

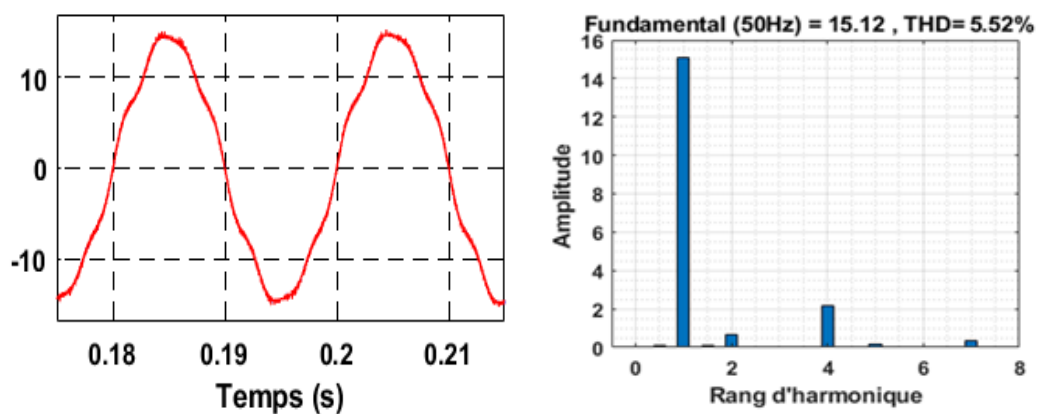


Figure III.47. Le THD du courant de source après la mise en service du FAP à $t=0.1s$.

Nous remarquons que Le THD du courant de source décroît de $THD_{is}=34.88\%$ à $THD_{is}=5.52\%$.

La Figure III.48 représente que le courant de source et la tension de source sont toujours en phase, malgré la distorsion dans la tension de source du réseau.

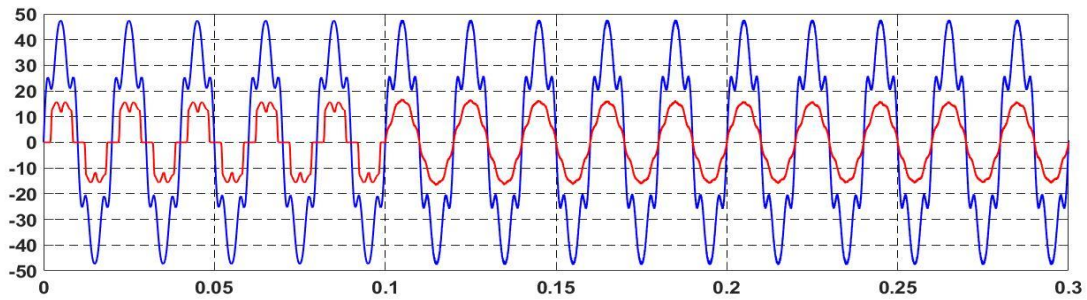
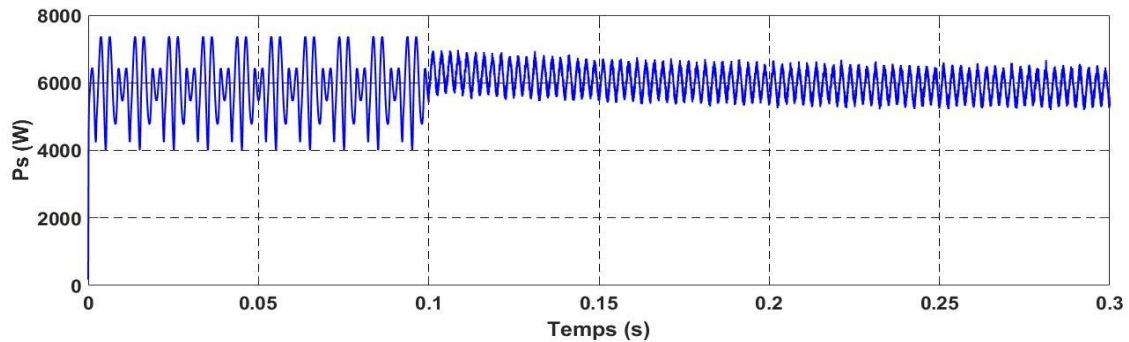
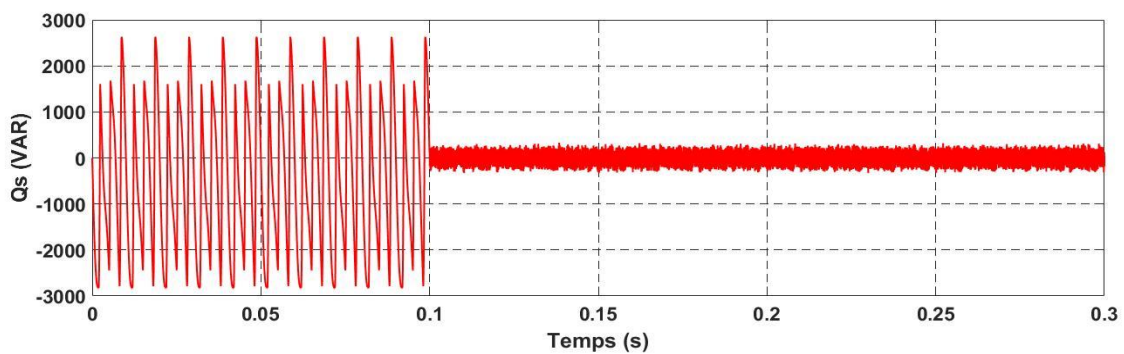


Figure III.48. Déphasage entre le courant et la tension de source du réseau équilibré avec distorsion.

La figure III.49 représente l'effet de la distorsion dans le réseau équilibré sur les allures des puissances instantanées (a) actives et (b) réactives avant la mise en service de FAP et la compensation de cette puissance après la mise en service de FAP.



(a) Puissance instantanée active.



(b) Puissance instantanée réactive.

Figure III.49. Allures des puissances instantanées active et réactive du réseau équilibré avec distorsion.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la méthode des puissances instantanées active et réactive (p-q), selon plusieurs configurations.

L'efficacité de cette méthode est exigée par une bonne compensation à base de filtre actif. En effet, le système de commande, même très efficace, ne pourra pas à lui seul effectuer des corrections suffisantes si les harmoniques parasites sont mal identifiées.

Nous avons développé, testé et analysé chaque stratégie de commande suivant deux types de régimes de fonctionnement à savoir le régime statique et le régime dynamique (mise en service du FAP, variation brusque de la charge non linéaire).

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail présente l'étude d'un système de compensation d'harmoniques à l'aide d'un filtre actif parallèle pour réseaux équilibrés et déséquilibrés.

L'objectif de ce travail est de compenser en même temps les courants harmoniques et la puissance réactive consommée par les charges non-linéaires connectées aux réseaux électriques

Le premier chapitre a été consacré à la problématique des perturbations harmoniques générées par les charges non linéaires connectées aux réseaux électriques,

Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté la structure générale d'un filtre actif parallèle, dont laquelle, nous distinguons deux parties essentielles : la partie commande incluant l'identification du courant harmonique et la partie puissance constituée de l'onduleur de tension à deux niveaux, la source de tension continue et le filtre de sortie. D'autre part, La commande hystérésis est très simple à mettre en œuvre.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté la partie contrôle-commande, nous avons expliqué la méthode de la puissance active et réactive instantanées pour identifier les courants harmoniques. Cette méthode exige une tension de réseau sans perturbation, pour pouvoir fournir uniquement les perturbations en courant émises, par la charge polluante.

Dans le cas où la tension est déséquilibrée, le système à base de PLL (Phase Locked Loop ou Boucle à Verrouillage de Phase) a été proposé pour généraliser l'application de la méthode de la puissance active et réactive instantanées. Les résultats de simulation ont montré que la nouvelle P.L.L était robuste et pouvait fonctionner en présence des perturbations de tension (harmoniques et déséquilibre).

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1] : M. ANTOINE HANNA NOHRA, «COMMANDE DE FILTRES ACTIFS PARALLELES SUR UN RESEAU FORTEMENT PERTURBE», THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE DE TOULOUSE, FRANCE, 2017.

[2] : HAMOUDA NOUREDDINE, «ETUDE COMPARATIVE DES TECHNIQUES DE FILTRAGE DES HARMONIQUES DE COURANT», MEMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF (UFAS), ALGERIE, 2010.

[3] : M. BENGOURINA, «ETUDE ET MISE AU POINT D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE D'HARMONIQUES EN VUE D'AMELIORER LA QUALITE DE L'ALIMENTATION ÉLECTRIQUE», MEMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-ORAN ALGERIE, 2012.

[4] : O.A. DJAFFAR, « TECHNIQUES NEUROMIMETIQUES POUR LA COMMANDE DANS LES SYSTEMES ELECTRIQUES : APPLICATION AU FILTRAGE ACTIF PARALLELE DANS LES RESEAUX ELECTRIQUES BASSE TENSION », THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE DE HAUTE ALSACE U.F.R. DES SCIENCES ET TECHNIQUES, 2005.

[5] : A.ALALI, «CONTRIBUTION A L'ETUDE DES COMPENSATEURS ACTIFS DES RESEAUX ELECTRIQUES BASSE TENSION », THESE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE LOUIS PASTEUR, STRASBOURG, 2002.

[6] : K.DJAZIA, «ETUDE DES FILTRES ACTIFS POUR RESEAUX DESEQUILIBRES ET DISTORDUS», THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF, ALGERIE, 2015.

[7] : M.ABDUSSALAM, «STRUCTURES ET STRATEGIES DE COMMANDE DES FILTRES ACTIFS PARALLELE ET HYBRIDE AVEC VALIDATIONS EXPERIMENTALES», THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE HENRI POINCARÉ, NANCY-I, FRANCE, 2008.

[8] : A.TALBI «ÉVALUATION DE L'INFLUENCE DE LA PRESENCE DES HARMONIQUES SUR LA QUALITE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE DANS LES NŒUDS A CHARGE NON-LINEAIRE DU RESEAU ELECTRIQUE», MEMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITE DE BATNA, ALGERIE, 2013.

[9] : D.NAOUSSI, «IMPLANTATION DE RESEAUX NEUROMIMETIQUES SUR CIBLE FBGA- APPLICATION A L'INTEGRATION D'UN SYSTEME DE FILTRAGE ACTIF», THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE DE STRASBOURG, FRANCE, 2011.

- [10] : A.BOUAFIA, «TECHNIQUES DE COMMANDE PREDICTIVE ET FLOUE POUR LES SYSTEMES D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE : APPLICATION AUX REDRESSEURS A MLI», THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE SETIF, ALGERIE, 2010.
- [11] : A. OMEIRI, «SIMULATION D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE DE PUISSANCE POUR LA COMPENSATION DES HARMONIQUES DE COURANT», THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, ALGERIE, 2007.
- [12] : S.HAFSIA, «COMMANDE D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE A QUATRE BRAS PAR DES TECHNIQUES AVANCEES», MEMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER, BISKRA, ALGERIE, 2015.
- [13] : M.BOUZIDI «STRATEGIES DE CONTROLE DIRECT DE PUISSANCE ASSOCIEES DES COMMANDES NON LINEAIRES D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE MULTINIVEAUX », MEMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITE DJILALI LIABES, SIDI-BEL-ABBES ALGERIE 2007.
- [14] : S.MUSTAPHA «CONTRIBUTION A L'ETUDE DES FILTRES ACTIFS HYBRIDES», THESE DE DOCTORAT EN SCIENCES, L'UNIVERSITE DE SETIF, ALGERIE.
- [15] : M.FATIHA, «ETUDE ET COMMANDE D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE A STRUCTURE DE TENSION», MEMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITE ORAN, 2001.
- [16] : F.LABRIQUE, « LES CONVERTISSEURS DE L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE », TECHNIQUE ET DOCUMENTATION-LAVOISIER, PARIS, FRANCE, 2004.
- [17] : S. BEAULIEU " ETUDE MISE AU POINT D'UN FILTRE ACTIF D'HARMONIQUES EN VUE D'AMELIORER LA QUALITE DE L'ALIMENTATION ELECTRIQUE " THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE DE QUEBEC, CANADA, 2007.
- [18] : D. OULD ABDESLAM, «TECHNIQUES NEUROMIMETIQUES POUR LA COMMANDE DANS LES SYSTEMES ELECTRIQUES : APPLICATION AU FILTRAGE ACTIF PARALLELE DANS LES RESEAUX ELECTRIQUES BASSE TENSION», THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE DE HAUTE ALSACE - MULHOUSE, FRANCE, 2005.
- [19] : A.E.ZERGUIN, «CONCEPTION D'UN SYSTEME DE COMMANDE POUR LA COMPENSATION AUTOMATIQUE DES HARMONIQUES», MEMOIRE DE FIN D'ETUDES, UNIVERSITE DE SETIF, ALGERIE, 2004.
- [20] : N.HAMOUDA, «ETUDE COMPARATIVE DES TECHNIQUES DE FILTRAGE DES HARMONIQUES DE COURANT», MEMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF (UFAS), ALGERIE, 2010.

- [21] : D.NEKKAR, «CONTRIBUTION A L'ETUDE DES STRATEGIES DE COMMANDE DES FILTRES ACTIFS TRIPHASES», MEMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITE DE SOUK-AHRAS, ALGERIE, 2012.
- [22] : A.SAHRAOUI «ETUDE ET SIMULATION DU FILTRAGE ACTIF PARALLELE POUR RESEAUX ELECTRIQUES», MEMOIRE DE MASTER ACADEMIQUE UNIVERSITE DE M'SILA, ALGERIE, 2018.
- [23] : T. MAHNI, «ETUDE ET CONCEPTION D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE TRIPHASE A QUATRE FILS EN VUE DE SA COMMANDE PAR DES METHODES D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE», THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER, BISKRA, ALGERIE, 2017.
- [24] : S. BEAULIEU « ETUDE ET MISE AU POINT D'UN FILTRE ACTIF D'HARMONIQUES EN VUE D'AMELIORER LA QUALITE DE L'ALIMENTATION ELECTRIQUE », MEMOIRE PRESENTE COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA MAITRISE EN INGENIERIE. UNIVERSITE DU QUEBEC A CHICOUTIMI, CANADA 2007.
- [25] : O. BOUAKAZ « CONTRIBUTION A L'ANALYSE DES ONDULEURS MULTI NIVEAUX FONCTIONNEMENT SYMETRIQUE ET ASYMETRIQUE », MEMOIRE DE MAGISTER. UNIVERSITE D'ALGER, 2005.
- [26] : I.GHADBANE, «ETUDE ET REALISATION D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE EN UTILISANT DIFFERENTES STRATEGIES DE CONTROLE», THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA, ALGERIE, 2016.
- [27] : S.A.TADJER, «ETUDE D'UN SYSTEME DE COMPENSATION D'HARMONIQUE EN UTILISANT UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE (GPV) » MEMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITE M'HAMED BOUGUERRA BOUMERDES, ALGERIE, 2008.
- [28] : S.HAFSIA, «COMMANDE D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE A QUATRE BRAS PAR DES TECHNIQUES AVANCEES», MEMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER, BISKRA, ALGERIE, 2015.
- [29] : R. KIFOUCHE, « IDENTIFICATION DES HARMONIQUES ET GENERATION DU COURANT DE REFERENCE ''APPLICATION AU CONVERTISSEUR STATIQUE'' » MEMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITE M'HAMED BOUGUERRA BOUMERDES, ALGERIE, 2005.
- [30] : R.SERGE, «IMPLANTATION DES RESEAUX NEUROMIMETIQUE SUR CIBLE FPGA APPLICATION A L'INTEGRATION D'UN SYSTEME DE FAP», MEMOIRE DE DOCTORAT, UNIVERSITE DE STRASBOURG, 2011.

[31] : Z.BADACHE, «ETUDE ET SIMULATION D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE EN UTILISANT UN ONDULEUR A TROIS NIVEAUX A STRUCTURE NPC POUR LA COMPENSATION DES COURANTS HARMONIQUES», MEMOIRE D'INGENIEUR, UNIVERSITE DE M'SILA, ALGERIE, 2006.

[32] : A.MORSLI, «DEPOLLUTION DES RESEAUX ELECTRIQUES BASSE TENSION UTILISANT UN FILTRE ACTIF PARALLELE A DEUX NIVEAUX CONTROLE PAR L'ALGORITHME P-Q», ACTA ELECTROTEHNICA, VOLUME 53, 2012.

[33] : A.CHAOUI, «FILTRAGE ACTIF TRIPHASE POUR CHARGES NON LINEAIRES», THESE DE DOCTORAT, L'UNIVERSITE DE SETIF, ALGERIE, 2010.

[34] : H .HAMDAOUI, «ELABORATION D'UNE TABLE DE COMMUTATION FLOUE POUR LA COMMANDE D'UN FILTRE ACTIF DE PUISSANCE», REVUE SCIENCE ÉLECTROTECHNIQUE.ET ÉNERGIE, 58, 4, P. 405–414, BUCAREST, 2010.

[35] : A.CHEBABHI, «COMMANDE D'UN FILTRE ACTIF SHUNT PAR LA TECHNIQUE DE CONTROL DIRECTE DE PUISSANCE BASEE SUR LE FLUX VIRTUEL», CGE'07, EMP, ALGERIE 12-13 APRIL, 2011.

