



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies

Electrotechnique

Commandes électrique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :

Yasmine BERRETIMA et Warda BAHRI

Le : lundi 26 mai 2025

Commande d'un filtre actif parallèle

Jury :

Mme. DERRADJI Belloum .Karima	MAA	Université de Biskra	Rapporteur
Mr. SALHI Souheil	MCB	Université de Biskra	Président
Mme. BEKHOCHA nassima	MCA	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2024/2025



Université Mohamed Khider de Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies

Electrotechnique

Commandes électriques

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté par :

Yasmine BERRETIMA

Ward BAHRI

Avis favorable de l'encadreur :

DERRADJI Belloum Karima

Signature Avis favorable du Président du Jury

Cachet et signature

Résumé

Ce travail porte sur la compensation des harmoniques générés par un pont redresseur triphasé non commandé alimentant une charge RL, à l'aide d'un filtre actif parallèle. La simulation du système complet réseau, filtre actif et charge non linéaire a été réalisée sous MATLAB/Simulink, en appliquant une stratégie de commande par hystérésis.

Trois méthodes d'identification des courants de référence ont été comparées : la méthode des puissances instantanées (p-q) avec un filtre passe-bas (FPB), la méthode du référentiel synchrone (SRF) avec un filtre multi-variable (FMV), et la méthode SRF avec un FPB.

Les résultats montrent une réduction significative du taux de distorsion harmonique (THD) du courant de charge, passant de 28.07 % avant filtrage à 1.45 % côté réseau après filtrage.

La combinaison SRF+FMV a démontré la meilleure performance en termes de robustesse face aux déséquilibres de tension et aux variations de charge, suivie de près par SRF+FPB. La méthode p-q+FPB s'est révélée plus sensible aux perturbations du réseau.

Ces résultats confirment l'efficacité du filtre actif parallèle pour atténuer les harmoniques et améliorer la qualité de l'énergie électrique, en conformité avec les normes internationales.

Mots clé : Filtre Actif Parallèle, puissances instantanées, courants harmoniques, taux de distorsion harmonique, PI, MLI hystérésis.

يتناول هذا العمل تعويض التوافقيات الناتجة عن جسر تقويم ثلاثي الطور غير متحكم فيه يغذي حملاً من نوع RL ، باستخدام مرشح نشط متوازي. تم تنفيذ محاكاة للنظام الكامل الشبكة، المرشح النشط، والحمل غير الخطي باستخدام برنامج MATLAB/Simulink، مع تطبيق استراتيجية تحكم تعتمد على الهسترة.

تمت مقارنة ثلاث طرق لتحديد تيارات المرجع: طريقة القوى اللحظية (p-q) مع مرشح تمرير منخفض (FPB) ، طريقة الإطار المرجعي المتزامن (SRF) مع مرشح متعدد المتغيرات (FMV) ، وطريقة SRF مع FPB. أظهرت النتائج انخفاضاً ملحوظاً في معدل التشوه التوافقي الكلي (THD) لتيار الحمل، من 28.07 % قبل التصفية إلى 1.45 % على جانب الشبكة بعد التصفية.

أظهرت تركيبة SRF+FMV أفضل أداء من حيث المتانة في مواجهة اختلالات الجهد وتغيرات الحمل، تليها تركيبة SRF+FPB. أما طريقة p-q+FPB فقد كانت أكثر حساسية للاضطرابات في الشبكة.

تؤكد هذه النتائج فعالية المرشح النشط المتوازي في تقليل التوافقيات وتحسين جودة الطاقة الكهربائية، بما يتوافق مع المعايير الدولية.

الكلمات المفتاحية: مرشح نشط متوازي، قوى لحظية، تيارات توافقية، معدل التشوه التوافقي، PI، تباطؤ تعديل عرض النبضة.

This work focuses on the compensation of harmonics generated by an uncontrolled three-phase rectifier supplying an RL-type load, using a shunt active filter. The complete system comprising the network, active filter, and nonlinear load was simulated using MATLAB/Simulink, applying a hysteresis control strategy.

Three methods for identifying reference currents were compared: the instantaneous power method (p-q) with a low-pass filter (FPB), the synchronous reference frame method (SRF) with a multi-variable filter (FMV), and the SRF method with an FPB.

The results show a significant reduction in the total harmonic distortion (THD) of the load current, decreasing from 28.07 % before filtering to 1.45% on the network side after filtering.

The SRF+FMV combination demonstrated the best performance in terms of robustness against voltage imbalances and load variations, followed closely by SRF+FPB. The p-q+FPB method proved to be more sensitive to network disturbances.

These results confirm the effectiveness of the shunt active filter in attenuating harmonics and improving power quality, in compliance with international standards.

Keywords: Parallel Active Filter, instantaneous powers, harmonic currents, harmonic distortion rate, PI, PWM hysteresis.

REMERCIEMENT

Avant tout, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Allah, qui m'a donné la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je souhaite adresser mes sincères remerciements à mon encadrant, [DERRADJI Belloum Karima], pour son accompagnement, ses précieux conseils et sa disponibilité tout au long de la réalisation de cette recherche. Son expertise et ses orientations m'ont été d'une aide inestimable.

Je tiens également à remercier les membres du jury, [SALHI Souheil] et [BEKHOCHA nassima], pour avoir accepté d'évaluer mon travail et pour leurs remarques enrichissantes qui contribueront à l'amélioration de ce mémoire.

Je n'oublie pas ma famille, en particulier mes parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien moral et leurs encouragements constants, qui ont été une source de motivation tout au long de mes études.

Enfin, je remercie mes amis et collègues, qui ont partagé avec moi des moments de doute et de succès, et qui ont toujours été là pour m'épauler. À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail, je vous exprime ma reconnaissance la plus sincère.

Merci à tous.

DÉDICACE

À ma chère mère, la lumière de ma vie, dont l'amour inconditionnel, les prières sincères et les sacrifices constants m'ont toujours donné la force d'avancer. Ton soutien, ta patience et ton encouragement sont les piliers de mes réussites.

À mon père, mon modèle de sagesse, de courage et de persévérance. Merci pour tes conseils précieux, ton dévouement et les valeurs que tu m'as transmises, qui me guideront tout au long de ma vie.

À mes frères et sœurs, (Fatima, Aicha, khaoula, abdelmomen, Touhami, Taher) mes premiers complices et mes plus grands soutiens. Votre affection, vos encouragements et votre présence réconfortante ont été une source inestimable de motivation pour moi.

À mes amis, qui ont partagé avec moi les moments de doute, de joie et de travail acharné. Merci pour votre soutien moral, votre bienveillance et votre amitié sincère, qui ont rendu ce parcours plus enrichissant et plus agréable.

Ce travail est le fruit de l'effort collectif, des encouragements et des bénédictions de tous ceux qui ont cru en moi. À chacun d'entre vous, je dédie cette réussite avec toute ma gratitude et mon respect.

Yasmine BERRETIMA.

إهداء

إلى من كانت دعواتها سر نجاحي،

إلى من كانت نظراتها تزرع في قلبي الطمأنينة،

إلى من علمتني أن أواجه الحياة بصبر ورضا...

إلى أمي الحبيبة

نبض قلبي وراحة روحي،

أهديك هذا الإنجاز المتواضع عرفاناً لعطفك وحنانك اللامحدود.

وإلى أبي العزيز،

سندي في هذه الحياة، ومصدر قوتي وإلهامي،

علّ هذا العمل يكون ثمرة بسيطة مما زرعه فيّ من قيم وثبات.

إلى إخوتي وأخواتي،

شركاء الطفولة، وضحكة البيت، ومصدر الدفء في قلبي،

لكم أنتم الذين كنتم النور في كل طريق معتم، أهدي هذا التعب المحمل بحبكم.

وإلى أصدقائي،

من كنتم بجانبني في كل لحظة،

من تقاسمت معي الضغوط، والسهر، والأحلام،

لكم مني كل التقدير، فهذا الإنجاز ليس لي وحدي، بل هو لكم أيضاً.

وردة بحري.

Table des matières

Résumé	I
REMERCIEMENT	III
DÉDICACE	IV
Table des matières	VI
Table des figures.....	VIII
Glossaire	X
Introduction générale :	1
I. Perturbations des réseaux électriques et principe de compensation.....	3
I.1. Introduction	3
I.2. Perturbation des réseaux électriques.....	3
I.2.1. Qualité de l'énergie	3
I.2.2. Les harmoniques	6
I.2.3. Conséquences des harmoniques	8
I.3. Caractéristiques des perturbations électriques :.....	10
I.3.1. Taux de Distorsion Harmonique (THD) :	10
I.3.2. Le facteur de puissance :	13
I.4. Solutions de dépollution des réseaux électriques :	14
I.4.1. Solutions de dépollution traditionnelles :.....	14
I.4.2. Solutions modernes :	18
I.5. Conclusion.....	23
II. Filtre Actif Parallèle et méthodes d'indentification des courants des référence	27
II.1. Introduction	27
II.2. Principe du filtrage actif parallèle de puissance :	27
II.3. Structure du filtre actif parallèle :.....	27
II.3.1. Etude de la partie puissance :	28
II.3.2. Etude de la partie commande	33
II.4. Méthode d'identifications des courants harmoniques :	33
II.4.1. Techniques d'identification des courants harmoniques de référence :.....	33
II.4.2. Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées PQ :.....	34
II.4.3. Méthode de référentiel synchrone (SRF : synchrones référence frame) :.....	38
II.5. La régulation et l'adaptation du filtre actif :	41
II.5.1. Etude de la Commande en courant.....	41
II.5.2. Méthode de régulation par PI :	44
II.6. Modélisation du filtre actif parallèle	45
II.6.1. Modèle du FAP dans le repère triphasé (a, b, c)	45

II.6.2.	Modèle du FAP dans le repère stationnaire (α, β)	46
II.6.3.	Modèle du FAP dans le repère tournant (d, q)	47
II.7.	Commande de l'onduleur :	47
II.7.1.	Commande des courants par hystérésis :	48
II.7.2.	Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) :	49
II.8.	Conclusion :	50
III.	Résultats des simulations	53
III.1.	Introduction	53
III.2.	Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante	53
III.2.1.	Schéma de simulation :	54
III.3.	Modélisation de l'association réseau - Charge polluante	54
III.3.1.	Modélisation du réseau	54
III.3.2.	Paramètres de la simulation	55
III.4.	Description globale de la simulation	56
III.5.	Résultats de Simulation	56
III.5.1.	Méthode de Commande de filtre actif parallèle basée sur la méthode des puissances instantanées avec FPB	58
III.5.2.	Méthode de Commande de filtre actif parallèle basée sur la méthode de référentiel synchrone	59
	 Erreur ! Signet non défini.	
III.5.3.	Avant et après l'injection courant de filtre.	62
III.6.	Variation de la charge	63
III.6.1.	Méthode de La puissance active instantanée avec (FPB)	63
III.6.2.	Méthode de référentiel synchrone avec FMV	65
III.7.	Variation des tensions du réseau :	66
III.7.1.	Méthode de La puissance active instantanée avec (FPB)	67
III.7.2.	Méthode de référentiel synchrone avec un filtre multi-variable FMV	68
III.8.	Conclusion	69
	CONCLUSION GENERALE	71
	Références bibliographié	73

Table des figures

Figure I-1 Creux de tension.....	4
Figure I-2 fluctuations de la tension.....	5
Figure I-3 Déséquilibre du système triphasé.....	5
Figure I-4 Variation de la fréquence	6
Figure I-5 Représentation des inters et infra- harmoniques	7
Figure I-6 Circuits résonnant en parallèle et résonnant en série	10
Figure I-7 Les différents niveaux de perturbation.....	12
Figure I-8 Diagramme vectorielle du facteur de puissance.....	14
Figure I-9 filtre passif parallèle	15
Figure I-10 Filtre bouchon	16
Figure I-11 Filtre passif résonant	16
Figure I-12 Filtre passif amorti	17
Figure I-13 Structure générale du filtre actif parallèle.	19
Figure I-14 Structure d'un Filtre actif série.	19
Figure I-15 Combinaison parallèle série actifs (UPQC).	20
Figure I-16 Classification des filtres hybrides.	22
Figure I-17 Configuration du filtre passif avec filtre passe haut.....	22
Figure I-18 Configuration du filtre passif sans filtre passe haut.	23
Figure II-1 Schéma de principe d'un filtre actif.	27
Figure II-2 Structure générale du filtre actif parallèle.....	28
Figure II-3 Structure d'un onduleur de tension triphasé.	289
Figure II-4 Détermination des courants de référence du filtre actif par la méthode classique des puissances active et réactive instantanées.	34
Figure II-5 a: Filtre passe haut Figure	375
Figure II-5 b : Filtre passe bas.....	375
Figure II-6 Principe du FMV.	377
Figure II-7 Extraction des harmoniques par méthode de référentiel synchrone.	38
Figure II-8 Commande basé sur la méthode de puissance instantanée dans le repère triphasé.....	39
Figure II-9 Schéma de principe de l'onduleur monophasé commandé par MLI sinus-triangle [3].	500
Figure II-10 Boucle de régulation de la tension continue.....	42
Figure II-11 Commande basé sur la méthode de puissance instantanée dans le repère triphasé.....	43
Figure II-12 Schéma de la régulation de Vdc par un régulateur PI.....	44
Figure II-13 Filtre actif parallèle.....	45
Figure II-14 Position du repère biphasé (α, β) relativement au repère triphasé (a,b,c).....	46
Figure II-15 Représentation des repères stationnaire (α, β) et tournant (d, q).....	47
Figure II-16 Commande par hystérésis.....	48
Figure II-17 Commande montrant la bande d'hystérésis	49
Figure II-18 Principe de commande des courants par MLI	49
Figure II-19 Schéma de principe de l'onduleur monophasé commandé par MLI sinus-triangle.....	50
Figure III-1 Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante.....	53
Figure III-2 Schéma de FAP à trois fils-réseaux- charge polluante sous matlab-semulink.....	534
Figure III-3 Schéma synoptique d'un réseau triphasé.....	55
Figure III-4 Schéma synoptique d'un pont redresseur.....	55
Figure III-5 Tensions des trois phases du réseau électrique avant l'insertion du filtre.....	566
Figure III-6 Courants des trois phases du réseau électrique avant l'insertion du filtre.....	57

Figure III-7 Les courants injectés par le filtre.....	57
Figure III-8 I_d : le courant de redresseur ; V_d : la tension de redresseur.....	57
Figure III-9 I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source,	58
Figure III-10 Spectre de courants de source avant et après filtrage.	58
Figure III-11 I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, V_{dc} : Tension aux bornes du condensateur	59
Figure III-12 Spectre de courants de source avant et après filtrage.	60
Figure III-13 I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, V_{dc} : la tension aux bornes condensateur.....	60
Figure III-14 - Spectre de courants de source avant et après filtrage.....	61
Figure III-15 la réponse d'un filtre actif parallèle triphasé	62
Figure III-16 I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, V_{dc} : la tension aux bornes condensateur.....	63
Figure III-17 I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, V_{dc} : la tension aux bornes condensateur.....	65
Figure III-18 les tensions de réseau.....	66
Figure III-19 I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, V_{dc} : la tension aux bornes condensateur.....	67
Figure III-20 I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, V_{dc} : la tension aux bornes condensateur.....	68

Liste des Tableaux

Tableau I-1 Récapitulatif des solutions de d'dépollution.....	21
Tableau I-2 Récapitulatif des solutions de d'dépollution.....	21
Tableau II-1 Tensions de Sortie de l'Onduleur de Tension.	29
Tableau II-2 Tensions de Sortie de l'Onduleur de Tension.	29
Tableau III-1 Les valeurs des éléments construisant la structure étudiée	55
Tableau III-2 Les valeurs des éléments construisant la structure étudiée	55
Tableau III-3 Tableau récapitulatif des performances des méthodes.....	69

Glossaire

PLL:(En anglais: Phase locked loop).

THD:(En anglais: Total harmonic distortion).

IGBT:(En anglais: Insolated gate bipolar transistor).

GTO:(En anglais: Gate turn off thyristor).

PWM:(En anglais : pulse width modulation).

MLI : Modulation de largeurs d'impulsions.

UPQC : (En anglais : Unified power quality conditioner).

SRF : (En anglais : Synchronous Reference Frame).

F.P.B: Filtre passe-bas.

FMV : Filtre multi-variable.

TCD : Transformation de Concordia directe.

F A P : Filtre actif parallèle.

F A S : Filtre actif série.

F.P : Facteur de puissance.

PI : Régulateur proportionnel intégral.

V_s : tension de la source.

V_f : tension imposée par l'onduleur.

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

THD : Taux de Distorsion Harmonique.

i_s : courant de la source.

i_L : courant de la charge.

i_f : courant injecté par le filtre.

Introduction générale :

L'expansion croissante de l'utilisation des récepteurs électriques dans l'industrie s'accompagne de l'introduction massive de charges déformantes (non linéaires), principalement issues de l'électronique de puissance. Ces charges apparaissent dans diverses applications telles que la commande électrique des moteurs, les alimentations de secours, le chauffage par induction, la traction électrique, ou encore la compensation des harmoniques. Ces équipements absorbent des courants non sinusoïdaux, lesquels en raison des impédances des circuits engendrent une déformation des ondes sinusoïdales de courant et de tension : il s'agit du phénomène de perturbation harmonique des réseaux. Ce phénomène touche l'ensemble des secteurs, aussi bien industriels à travers les redresseurs et les gradateurs que domestiques, via l'usage d'équipements informatiques, de systèmes de climatisation ou d'éclairages à tubes fluorescents.

Pour remédier à ces problèmes, les filtres passifs ont longtemps constitué une solution courante. En particulier, les filtres LC sont utilisés pour la réduction du taux d'harmoniques, tandis que les condensateurs seuls permettent la correction du facteur de puissance. Cependant, ces dispositifs présentent plusieurs limitations, telles qu'une compensation fixe, un encombrement important, des risques de résonance, ainsi qu'une dépendance vis-à-vis des caractéristiques du réseau [39].

Face à la croissance importante de la pollution harmonique, la recherche en électronique de puissance et en automatique s'est orientée vers le développement de solutions plus performantes et adaptatives. C'est dans ce contexte que les filtres actifs de puissance (FAP), ou Active Power Filters (APF), ont vu le jour. Ces dispositifs modernes offrent une réponse dynamique et s'ajustent automatiquement aux perturbations engendrées par les charges non linéaires [24].

Parmi ces solutions, les filtres actifs parallèles (FAP) sont actuellement les plus avancés en matière de dépollution harmonique [1], tant au niveau de la production que de la distribution. Ils sont capables d'injecter dans le réseau des courants de compensation, égaux et opposés à ceux générés par la charge perturbatrice, permettant ainsi d'obtenir un courant sinusoïdal du côté réseau. L'objectif principal de ces filtres est donc d'empêcher la propagation des harmoniques à travers l'impédance du réseau, en amont du point de connexion du filtre.

Dans ce mémoire, notre étude porte sur l'ensemble du système constitué du réseau électrique, d'une charge non linéaire (un pont triphasé non commandé), d'un filtre actif parallèle, et d'un schéma de commande associé.

Ce travail est structuré en trois chapitres

Le premier chapitre est consacré à l'analyse de la génération des harmoniques et de leurs effets sur le réseau d'alimentation. Il traite également des différentes solutions de filtrage, traditionnelles et modernes, visant à réduire ces perturbations, tout en exposant leurs avantages et leurs limites.

Dans le deuxième chapitre, nous abordons le filtre actif parallèle à base d'onduleur de tension, en s'appuyant sur une commande par hystérésis, ensuite nous étudierons les méthodes d'identifications des courants harmoniques les plus utilisées dans la littérature à savoir, la méthode des puissances réelles et imaginaires et la méthode du référentiel synchrone, choisie pour notre étude. Ce chapitre inclut également une présentation de techniques alternatives, notamment l'introduction d'un filtre multi variable (FMV) hautement sélectif, en remplacement des filtres classiques passe-haut ou passe-bas.

Le troisième chapitre est dédié à la modélisation complète du système (réseau – charge polluante – filtre actif), suivie d'une simulation sous l'environnement MATLAB/Simulink (PowerSystems).

Nous terminons par une conclusion générale sur l'ensemble de cette étude.

I. Perturbations des réseaux électriques et principe de compensation

I.1. Introduction

Les réseaux électriques modernes jouent un rôle crucial dans le fonctionnement des infrastructures et des équipements, mais ils sont confrontés à de nombreuses perturbations qui compromettent la qualité de l'énergie distribuée. Ces perturbations, telles que les harmoniques, les chutes de tension, les surtensions et les déséquilibres, affectent non seulement la stabilité du réseau, mais également la performance et la durabilité des équipements connectés.

Pour garantir une alimentation énergétique fiable, l'identification et l'analyse de ces phénomènes sont essentielles. Des outils comme le Taux de Distorsion Harmonique (THD), encadré par les normes internationales comme la CEI 61000, permettent de surveiller ces perturbations, tandis que des solutions technologiques, telles que les filtres passifs et actifs, offrent des moyens efficaces pour les atténuer.

Dans la première partie de ce chapitre, nous examinerons les caractéristiques générales des perturbations électriques. Dans la deuxième partie, nous présenterons la définition des harmoniques et leurs effets, ainsi que les types de charges et les normes imposées au THD par la CEI et l'IEEE. La dernière partie de ce chapitre sera consacrée à la présentation de différentes solutions pour éliminer les harmoniques du réseau.

I.2. Perturbation des réseaux électriques

I.2.1. Qualité de l'énergie

La qualité de l'énergie électrique dépend principalement de la qualité de la tension aux points de raccordement. Cependant, cette tension est souvent affectée par différentes perturbations provenant de deux sources principales. D'une part, on trouve les perturbations de courant, qui sont causées par la circulation dans les réseaux électriques de courants perturbateurs tels que les courants harmoniques, déséquilibrés ou réactifs. D'autre part, il y a les perturbations de tension, provoquées par des tensions perturbatrices comme les tensions harmoniques, les déséquilibres ou encore les creux de tension.

L'énergie électrique est délivrée sous forme de tension dans un système sinusoïdal triphasé, caractérisé par plusieurs paramètres principaux :

- La fréquence,
- L'amplitude des trois tensions,
- La forme d'onde,

- Le déséquilibre.

La mesure de ces paramètres permet d'évaluer la qualité de la tension. Toute altération d'un ou plusieurs de ces paramètres peut indiquer la présence d'une anomalie dans le réseau électrique. Pour identifier certaines perturbations et garantir la conformité de l'énergie fournie, des normes spécifiques ont été mises en place [1].

I.2.1.1. Dégradation de la qualité l'énergie électrique

La qualité de la tension peut être affectée pour plusieurs raisons, notamment en raison d'incidents liés à la nature physique du réseau ou aux contraintes d'exploitation. Par ailleurs, certains équipements sensibles, en particulier les charges non linéaires, contribuent à la dégradation de la qualité du courant et, par conséquent, de la tension dans le réseau [2]. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbations :

- Creux de tension ;
- Déséquilibre du système triphasé ;
- Fluctuations de tension (ou flicker)
- Harmoniques et inter-harmoniques.

I.2.1.2. Creux de tension

Le creux de tension correspond à une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10 % et 90 % de la tension nominale, pendant une durée allant de 10 ms à quelques secondes. Les creux de tension sont provoqués par des phénomènes naturels tels que la foudre, ou par des défauts dans l'installation ou dans les réseaux publics ou d'usagers. Elles se produisent également lors d'opérations de commutation impliquant des courants élevés (moteurs, transformateurs, etc.) [3].

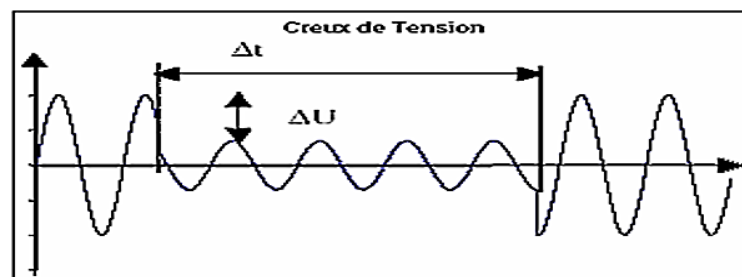


Figure I-1 Creux de tension

I.2.1.3. Les fluctuations rapides de la tension « le flicker »

Elles sont définies par des amplitudes inférieures à 10 % de la tension nominale et par la durée séparant deux variations successives inférieures à une heure. Elles peuvent être aléatoires ou périodiques [4].

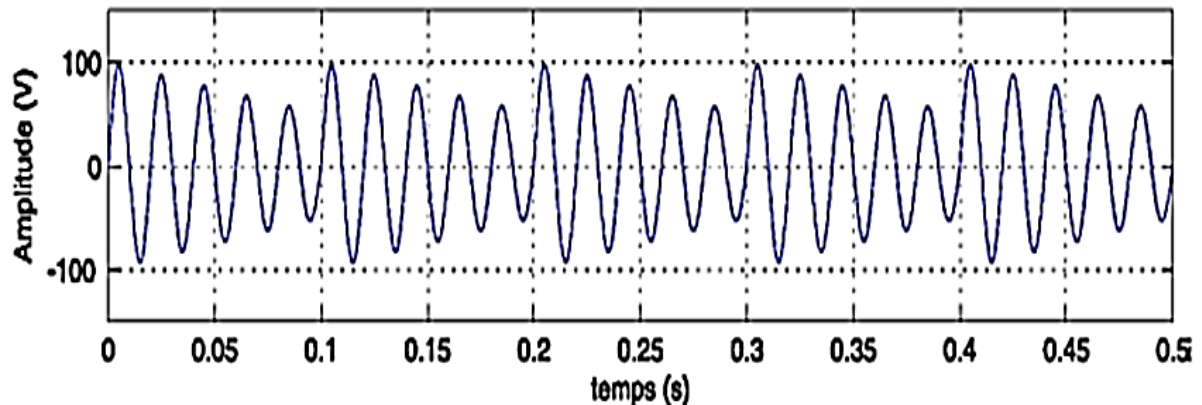


Figure I-2 fluctuations de la tension

I.2.1.4. Déséquilibre du système triphasé

Le déséquilibre de tension est une situation dans laquelle les trois tensions d'un système triphasé sont d'amplitude inégale et/ou ne s'équilibrent pas normalement entre elles de 120 degrés.

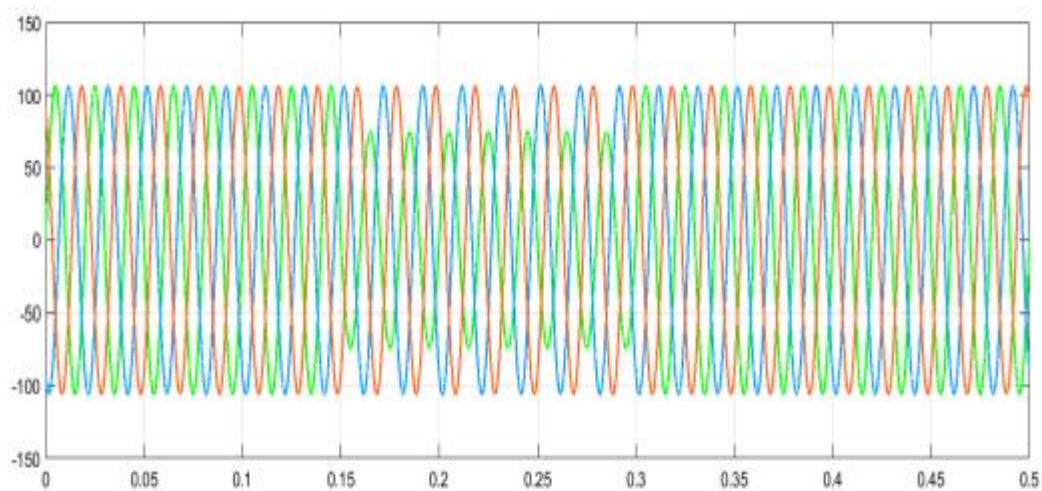


Figure I-3 Déséquilibre du système triphasé

La cause principale de ce déséquilibre est liée à la présence de charges monophasées réparties de manière déséquilibrée sur les trois phases du réseau, ce qui est particulièrement fréquent dans les réseaux basse tension.

I.2.1.5. Variation de la fréquence

Une variation importante de la fréquence du réseau peut se produire sur des réseaux d'utilisateurs non connectés ou alimentés par une source de chaleur indépendante, comme le montre la figure. Dans les réseaux de distribution ou de transport, une telle variation de fréquence est très rare et ne se produit que dans des circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certaines défaillances graves du réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit se situer à l'intérieur de $50 \text{ Hz} \pm 1 \%$ [17].

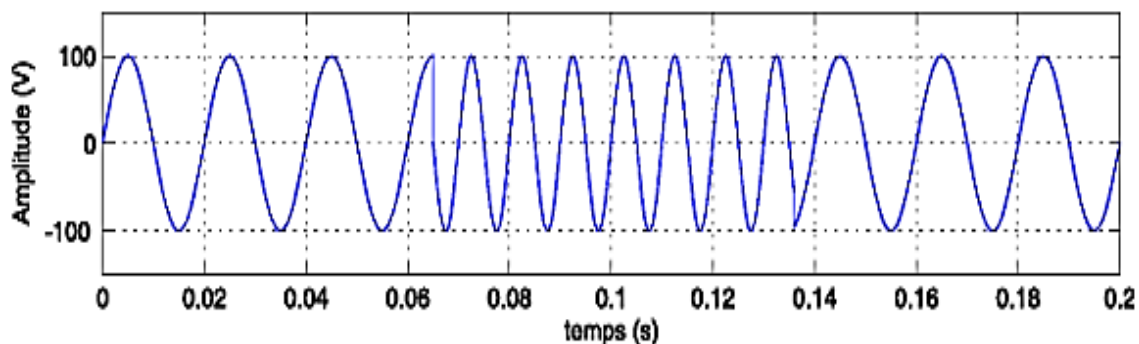


Figure I-4 Variation de la fréquence

I.2.2. Les harmoniques

I.2.2.1. Définition

Un harmonique est une composante sinusoïdale d'un signal périodique. Sa fréquence est un multiple de celle de l'onde fondamentale. Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 Hz et 2000 Hz (entre les harmoniques de rangs $h=2$ et $h=40$). Il peut exister des sous-harmoniques dans la tension des réseaux.

L'amplitude de rang 1 est la composante fondamentale du signal électrique périodique (50 ou 60 Hz dans notre cas). L'harmonique d'ordre zéro est la composante directe du signal. Plus l'ordre est élevé, plus l'amplitude est petite

Les premières harmoniques, comme (5,7), ont de grandes amplitudes. Cela souligne l'importance des courants injectés, c'est pourquoi il faut limiter ces harmoniques selon les normes. L'amplitude de l'harmonique de rang h du côté de la source est donnée par :

$$I_h = I_1/h \quad (\text{I-1})$$

h : harmonique d'ordre h

I_1 : amplitude du courant fondamentale

I_h : amplitude de l'harmonique de rang (h) [5].

I.2.2.2. Types des harmoniques

En général, on distingue les harmoniques de rangs pairs (2, 4, 6, 8, etc.) et les harmoniques de rangs impairs (3, 5, 7, etc.). Ces dernières ont plus d'influence dans les réseaux industriels. Il existe aussi d'autres types d'harmoniques tel que :

- **Inter harmoniques** : Il s'agit de composantes sinusoïdales d'une grandeur qui n'est pas une fréquence multiple entière de celle du fondamental.
- **Infra harmoniques** : Ce sont des composantes de fréquences inférieures à celle du fondamental [6].

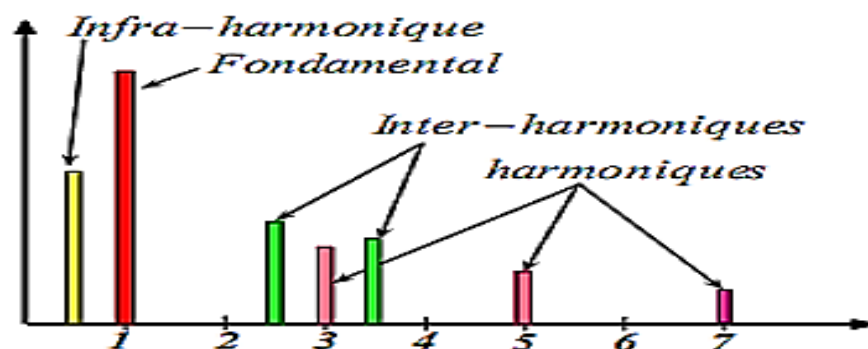


Figure I-5 Représentation des inters et infra- harmoniques [24]

I.2.2.3. Notion des charges

I.2.2.3.1. Charge linéaires

Une charge linéaire est alimentée par une tension et consomme un courant sinusoïdal. Le courant et la tension peuvent être déphasés. Les charges linéaires les plus couramment utilisées sont les résistances, les condensateurs et les inductances [6].

I.2.2.3.2. Charge non linéaire

On parle de charge non linéaire quand la relation entre tension et courant n'est plus linéaire. Un récepteur alimenté par une tension sinusoïdale consomme un courant qui n'est pas sinusoïdal. Ensuite, on va se concentrer sur les charges non linéaires triphasées. Ce sont des charges qui consomment un courant à une fréquence égale à celle de la tension [5].

I.2.2.4. Origines des harmoniques

Au cours des dernières années, l'utilisation croissante d'équipements électriques intégrant des convertisseurs statiques a entraîné une augmentation significative de la pollution harmonique dans les réseaux électriques. Ces équipements, considérés comme des charges non linéaires, génèrent des

courants harmoniques dont les fréquences sont soit des multiples entiers de la fréquence fondamentale, soit parfois des fréquences quelconques. Lorsque ces courants harmoniques traversent les impédances du réseau électrique, ils provoquent l'apparition de tensions harmoniques aux points de raccordement, ce qui peut affecter négativement les autres consommateurs connectés au même réseau [7].

I.2.3. Conséquences des harmoniques

Les courants harmoniques se propagent dans le réseau électrique, déforment le courant fourni par la source et perturbent les consommateurs connectés. Cela peut engendrer des dysfonctionnements au niveau des équipements du client, entraînant ainsi des coûts supplémentaires dans la production d'énergie. Les effets des harmoniques peuvent être classés en deux catégories :

- ✓ Effets instantanés, qui impactent directement le fonctionnement des appareils.
- ✓ Effets à long terme, qui peut détériorer les équipements sur la durée.

I.2.3.1. Effets instantanés

Les effets instantanés apparaissent immédiatement dans certains appareillages :

- **Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques** : En présence d'harmoniques, la tension et le courant peuvent changer plusieurs fois de signe au cours d'une demi-période, ce qui peut perturber le fonctionnement des appareils utilisant le passage à zéro des grandeurs électriques.
- **Troubles fonctionnels des micro-ordinateurs** : Les harmoniques peuvent entraîner une dégradation de la qualité de l'image et provoquer des couples pulsatiles dans les moteurs des disques d'entraînement.
- **Erreurs dans les appareils de mesure** : Certains dispositifs, comme les compteurs d'énergie à induction et les appareils de mesure, peuvent présenter des erreurs de lecture ou des mesures incorrectes à cause des harmoniques.
- **Vibrations et bruits** : Les courants harmoniques peuvent produire des vibrations et des bruits, notamment dans les appareils électromagnétiques tels que les transformateurs, les inductances et les machines tournantes.

I.2.3.2. Effets à terme :

Les effets à long terme des harmoniques apparaissent après une exposition prolongée à ces perturbations. Le principal effet observé est de nature thermique, se traduisant par un échauffement

qui peut provoquer une usure prématurée des équipements, des lignes et entraîner une dégradation de leur performance.

- **Echauffement des câbles et des équipements** : L'échauffement peut se produire à moyen terme (quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (quelques heures à plusieurs années). Les câbles, notamment, subissent un surchauffage du neutre, tandis que les enroulements des transformateurs ou des moteurs sont également affectés.

- **Echauffement des condensateurs** : Cet échauffement est dû aux pertes causées par le phénomène d'hystérésis dans le diélectrique. Les condensateurs sont particulièrement sensibles aux surcharges, qu'elles soient liées à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques. Une surchauffe excessive peut conduire à leur claquage.

- **Echauffement due aux pertes supplémentaires des machines électriques et des transformateurs** : Les harmoniques provoquent des pertes supplémentaires dans les machines électriques, en particulier dans le stator et les circuits rotoriques. Cela est dû aux différences de vitesse entre les champs tournants harmoniques et le rotor. Dans les transformateurs, les pertes supplémentaires sont causées par l'effet Joule dans les enroulements, accentué par l'effet de peau, ainsi que par les pertes magnétiques dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault dans les circuits magnétiques [6].

I.2.3.3. Le phénomène de résonnance :

L'apparition de ce phénomène est attribuable à la présence d'éléments capacitifs et inductifs au sein des réseaux.

Le risque associé à ce phénomène est qu'il peut générer des valeurs élevées d'impédances Z_h , de tensions V_h et de courants I_h aux bornes des différents éléments constituant le réseau. Lorsque ces valeurs de tension et de courant atteignent des niveaux extrêmement élevés, elles peuvent causer des dommages voire la destruction des équipements exposés [8].

On distingue deux types de résonance, selon la configuration des éléments capacitifs et inductifs, série et parallèle comme montré dans la figure suivante :

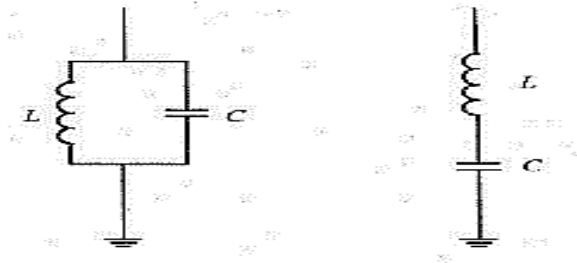


Figure I-6 Circuits résonnant en parallèle et résonnant en série

a. Résonance parallèle :

L'inductance et la capacité en parallèle donnent l'impédance suivante :

$$Z_h = \frac{jLh\omega}{1 - LC h^2 \omega^2} \quad (\text{I-2})$$

Il y a résonance si $X_L = X_C$, c'est-à-dire, lorsque le dénominateur $1 - LC h^2 \omega^2$ est nul. Dans ce cas l'impédance est infinie, la fréquence de résonance est donnée par :

$$f_r = \frac{1}{2\pi h \sqrt{LC}} \quad (\text{I-3})$$

b. Résonance série :

L'inductance en série avec une capacité donne une impédance de forme :

$$Z_h = \frac{1 - LC h^2 \omega^2}{jLh\omega} \quad (\text{I-4})$$

Il y a résonance si $X_L = X_C$, c'est-à-dire, le numérateur $1 - LC h^2 \omega^2$ est égal à zéro. Dans ce cas l'impédance est nulle et la fréquence de résonance est données par :

$$f_r = \frac{1}{2\pi h \sqrt{LC}}$$

I.3. Caractéristiques des perturbations électriques :

I.3.1. Taux de Distorsion Harmonique (THD) :

I.3.1.1. Présentation :

Le facteur de distorsion harmonique, noté THD, permet d'estimer l'ampleur de la perturbation harmonique. Cette unité de contrôle calcule la distorsion harmonique totale par rapport à la

valeur fondamentale THD, ainsi que la distorsion harmonique totale par rapport aux valeurs efficaces THD-R des tensions et des courants. Il est exprimé par la formule suivante :

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{V_h}{V_1}\right)^2} \quad (\text{I-5})$$

V_1 : Valeur efficace de la tension fondamentale.

V_h : Valeur efficace de la tension harmonique du rang h.

Ou par :

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (\text{I-6})$$

I_1 : Valeur efficace du courant fondamental.

I_h : Valeur efficace du courant harmonique du rang h.

I.3.1.2. Les Normes Imposées Sur Le THD

Les deux principaux organismes internationaux de normalisation dans le domaine électrotechnique sont la CEI (Commission Électrotechnique Internationale) et l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Ces entités jouent un rôle clé dans l'élaboration des normes relatives aux perturbations électriques à l'échelle mondiale. Cependant, leurs critères ne sont pas uniformes concernant la définition des interactions entre le réseau électrique et les charges connectées.

L'objectif principal des normes et réglementations est de réduire les dysfonctionnements causés par les harmoniques. La CEI, à travers sa série de normes de compatibilité électromagnétique (CEI 61000), établit des limites aux niveaux des courants et des tensions harmoniques, afin d'assurer une meilleure qualité de l'énergie électrique [3]. Parmi les principales normes, on cite

- **EN50 006** : "Limitation des perturbations dans les réseaux électriques causées par des appareils domestiques et semblables équipés de dispositifs électroniques" norme européenne du Comité Européen de Normalisation Electronique (CENELEC).
- **Norme IEC555-3** : préparée par la Commission Electrotechnique Internationale (CEI).
- **Normes allemandes** :
 - ✓ VDE 0838 : pour les appareils électroménagers ;
 - ✓ VDE 0160 : pour les convertisseurs ;
 - ✓ VDE 0712 : pour les ballasts de lampes fluorescentes.

- **Norme IEEE :** L'IEEE définit les exigences et les recommandations pratiques pour le contrôle des harmoniques dans les systèmes électriques de puissance. Cette norme s'applique aussi bien aux fournisseurs qu'aux utilisateurs et couvrent toutes les plages de puissance.

Dans ce standard, les limites sont données par rapport au quotient des courants de court-circuit au point de raccordement du réseau et du courant de charge fondamental. La norme IEEE 519-1992 recommande notamment une distorsion harmonique totale de tension inférieure à 5% pour les systèmes de moins de 69 kV et une distorsion harmonique individuelle de tension inférieure à 3%.

- **BSI-5406(UK) :** Ces normes indiquent les limites strictes de distorsion de courant, très difficiles à respecter pour les industriels de garantir une bonne qualité de puissance.

Alternativement, la limite maximale permise pour les différents harmoniques dominants est également parfois employée comme mesure de la qualité de l'énergie, une limite pratique de moins de 5% du THD doit être utilisée par tous les concepteurs de système et/ou les utilisateurs pour assurer la conformité aux normes établies [9].

Afin d'assurer le fonctionnement optimal des appareils, il est impératif qu'ils soient conçus pour tolérer des niveaux de perturbation supérieurs aux niveaux de compatibilité établis [23].

Les différents niveaux de perturbation qui ont été définis sont :

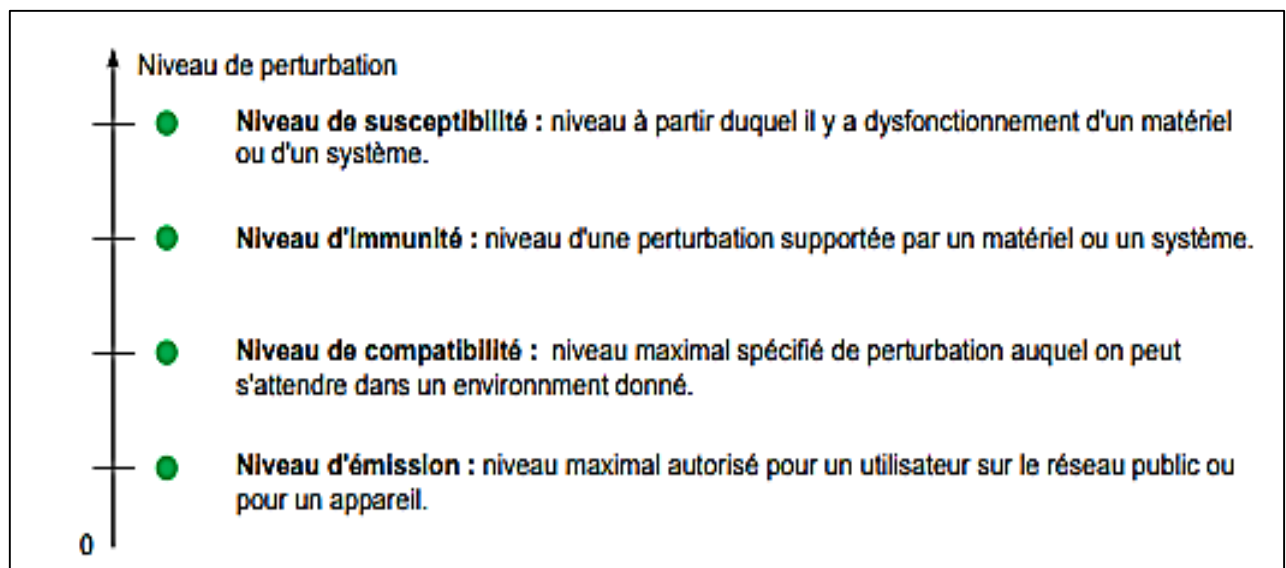


Figure I-7 Les différents niveaux de perturbation [23]

I.3.2. Le facteur de puissance :

Le facteur de puissance, dans sa définition la plus générale, correspond à la relation entre la puissance active et la puissance apparente.

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \cos s(\Phi_n)}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} \quad (I-7)$$

Avec

$$\Phi_n = \alpha_n - \beta_n \quad (I-8)$$

Dans le cadre de cette étude, il est important de noter que, en présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties. Cette assertion est étayée par l'équation suivante

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (I-9)$$

Avec

Q : La puissance réactive associée au courant fondamental ;

D : La puissance déformante induite par les harmoniques du courant.

Où

$$P = 3 \cdot U \cdot I_{cl} \cdot \cos(\phi) = F_{dis} \cdot \cos(\phi) \quad (I-10)$$

F_{dis} : présente le facteur de distorsion. Il vaut « 1 » lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal, et, il décroît lorsque la déformation de l'onde s'accroît.

ϕ : représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension entre P et S .

Par ailleurs :

$$Q = 3 \cdot U \cdot I_{cl} \cdot \sin \phi \quad (I-11)$$

Et

$$D = 3 \cdot U \cdot \sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2} \quad (I-12)$$

D'après le diagramme de Fresnel des puissances représentées sur la figure (I.8), le facteur de puissance peut être écrit sous une forme :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \varphi_1 \cdot \cos Y \quad (\text{I-13})$$

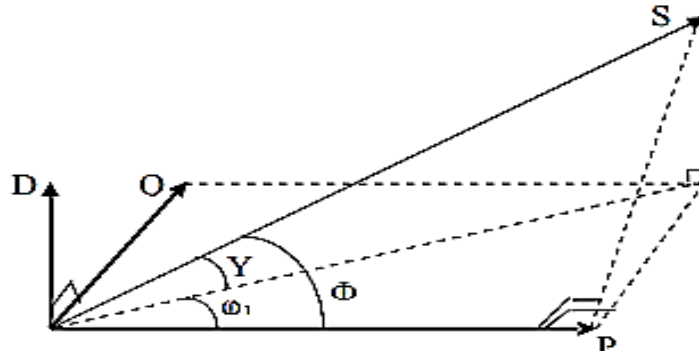


Figure I-8 Diagramme vectorielle du facteur de puissance

φ_1 : Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente.

γ : Le déphasage entre la puissance apparente dans le cas d'un système équilibré linéaire S1 et la puissance apparente dans le cas déséquilibré non linéaire S.

φ : Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente S.

I.4. Solutions de dépollution des réseaux électriques :

Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques moins ou peu polluants, tandis que la seconde consiste en la mise en œuvre d'un filtrage des composantes harmoniques. La première classe de solutions s'intéresse à la conception tandis que la seconde consiste à compenser les courants ou les tensions harmoniques.

Il y a deux solutions pour compenser les problèmes de courant et de tension :

- ❖ Solutions classiques (traditionnelles méthodes) ;
- ❖ Solutions modernes (méthodes récentes à base d'électronique de puissance).

I.4.1. Solutions de dépollution traditionnelles :

Les moyens de dépollution traditionnels sont nombreux et se résument dans les points suivants :

- Utilisation des Inductance anti-harmonique de protection des condensateurs ;
- Changement de la structure de l'installation
- Confinement des harmoniques ;
- Réduction de l'impédance harmonique de la source
- Réduction des courants harmoniques des charges déformantes

- Filtres passifs d'harmoniques [10].

Cela comprend la mise en œuvre des mesures suivantes :

- ❖ **Stat compensateur** : il s'agit d'une méthode de compensation utilisée pour relever le facteur de puissance,
- ❖ **Filtre passif** : Les filtres passifs représentent les premières solutions développées pour éliminer les harmoniques dans les réseaux électriques. Ils sont constitués de composants passifs tels que des inductances, des condensateurs et des résistances. Ces filtres sont généralement installés en parallèle avec les charges responsables de la génération d'harmoniques, telles que les redresseurs à diodes ou à thyristors, les fours à arcs électriques, et d'autres équipements similaires. Parmi les configurations les plus courantes de filtres passifs, on peut citer le filtre résonant et le filtre amorti, également connu sous le nom de filtre passe-haut [13] [12] [19].

I.4.1.1. Filtre passif parallèle

Une très faible impédance accordée à la fréquence de l'harmonique à piéger est placée en parallèle avec le réseau d'alimentation.

On a alors cette structure :

$$Z_{\text{éq}} = \frac{1 - jLC\omega^2}{jC\omega} \quad (\text{I-14})$$

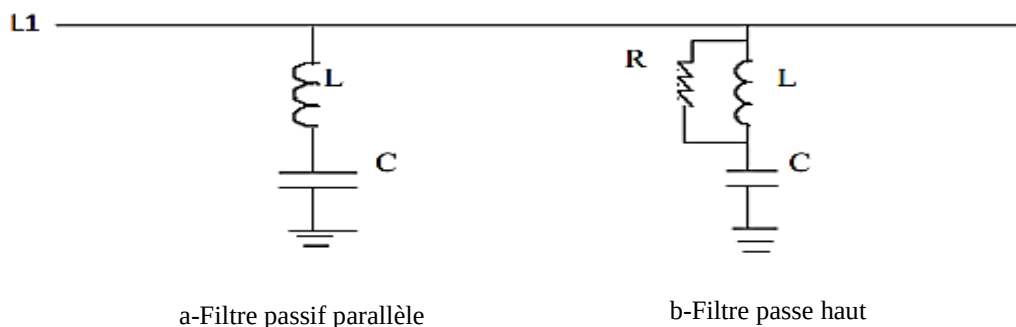


Figure I-9 filtre passif parallèle

Vous pouvez également utiliser un filtre passe-haut pour les harmoniques supérieures à h11, ce qui réduit le nombre de filtres.

En ajustant la valeur R, vous pouvez rendre le filtre plus ou moins sélectif.

I.4.1.2. Filtre passif série :

Le principe de ce filtre est le même que le précédent, mais au lieu de piéger les harmoniques, on les empêche de retourner à la source.

Un exemple de filtre passif série est le circuit bouchon.

$$Z_{\text{éq}} = \frac{jLC\omega}{1-LC\omega^2} \quad (\text{I-15})$$

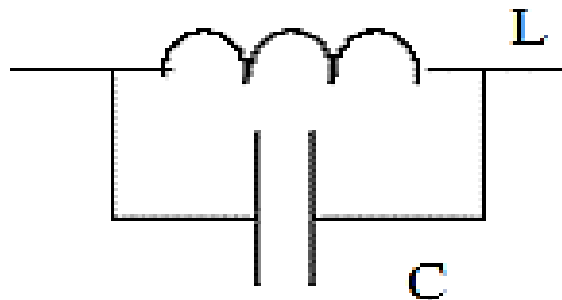


Figure I-10 Filtre bouchon

Où, on peut empêcher les harmoniques de passer pour $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ [11].

I.4.1.3. Filtre passif résonant [12] :

Il s'agit d'un filtre sélectif composé respectivement d'une résistance, d'un condensateur et d'une bobine en série. Comme décrit sur la figure (I.11). Son impédance équivalente est :

$$Z_{\text{éq}} = \frac{1-LC\omega^2+jRC\omega}{jC\omega} \quad (\text{I-16})$$

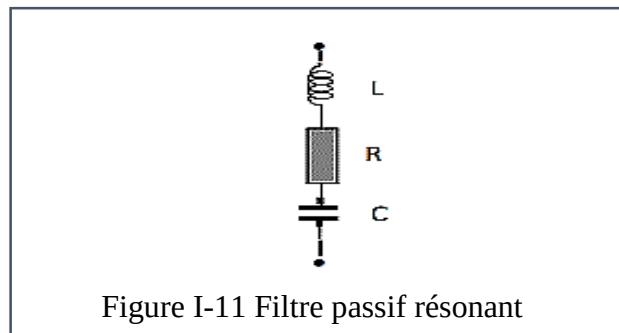
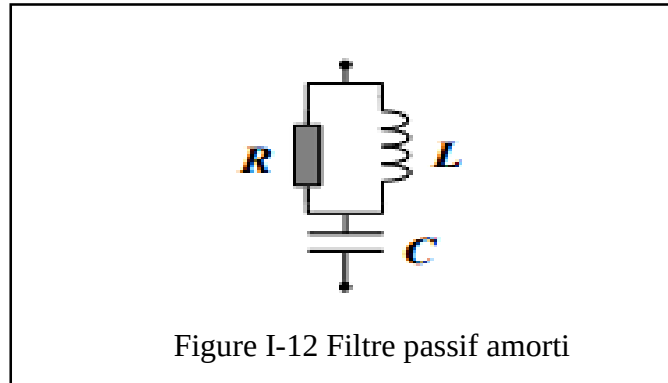


Figure I-11 Filtre passif résonant

I.4.1.4. Filtre passif amorti

Il s'agit d'un filtre passe-haut composé d'une inductance en parallèle avec une résistance, le tout en série avec un condensateur, comme illustré sur la figure I.12. Son impédance équivalente est :

$$Z_{\text{éq}} = \frac{1 - LC\omega^2 + j\frac{L}{R}\omega}{-\frac{L}{R}C\omega^2 + jC\omega} \quad (\text{I-17})$$



I.4.1.5. Avantages et inconvénients des filtres passifs.

Le filtrage passif est déjà utilisé dans l'industrie grâce à son faible coût et son efficacité. Ses autres avantages sont les suivants :

Ses performances sont moins sensibles aux variations de température, aux écarts de fréquence et aux tolérances des composants.

Ils ont une faible valeur d'impédance sur une large gamme de fréquences harmoniques.

Cependant les filtres passifs présentent les inconvénients suivant :

Leur efficacité est fonction de l'impédance du réseau, dont les valeurs sont mal connues et peuvent varier.

Le fait d'avoir deux filtres passifs accordés sur le même réseau que deux filtres passifs accordés sur un ordre théoriquement égal, mais en pratique légèrement différent, fait circuler entre eux des courants harmoniques très importants qui les détruisent rapidement. Il faut absolument éviter de connecter des filtres harmoniques de même ordre sur le même réseau.

La mise en parallèle d'un filtre anti-harmonique et d'une batterie de condensateur provoque une contrainte pouvant amener la destruction des condensateurs.

Enfin, l'amortissement des résonances dans les réseaux électriques par des filtres passifs peut introduire des résonances supplémentaires non désirées qui peuvent conduire à la destruction de ces filtres [12].

I.4.2. Solutions modernes :

Ces solutions sont considérées comme efficaces pour dépolluer les réseaux électriques et remédier aux limites des solutions traditionnelles, telles que les filtres passifs, qui présentent des inconvénients comme leur incapacité à s'adapter aux variations de charge et de réseau, ainsi que les risques de résonance. Parmi les solutions modernes, on distingue principalement deux types de structures couramment utilisées.

- Le filtre actif (série, parallèle ou bien encore associant les deux)
- Le filtre actif hybride.

I.4.2.1. Le principe de filtrage actif

Les filtres actifs ont pour objectif de produire des courants ou des tensions harmoniques afin de rendre le courant ou la tension à nouveau sinusoïdal. Selon leur conception, ils peuvent être connectés au réseau soit en série (FAS) pour compenser les tensions harmoniques, soit en parallèle (FAP) pour compenser les courants harmoniques. Ils peuvent également être combinés avec des filtres passifs. Ces filtres actifs sont proposés comme des solutions efficaces pour dépolluer les réseaux électriques et garantir une énergie de qualité aux consommateurs, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées. Différentes topologies de filtres actifs standards sont ainsi présentées [16].

I.4.2.1.1. Le Filtre Actif Parallèle (F.A.P) :

I.4.2.1.1.1. Structure d'un filtre actif parallèle :

La figure suivante montre la structure générale d'un FAP triphasé de type tension, où l'on peut distinguer l'onduleur et le filtre de sortie de la section de puissance des différents blocs de la section de contrôle. La section de puissance consiste généralement en un onduleur de tension basé sur des interrupteurs de puissance dont les états de commutation de l'onduleur sont contrôlés par un régulateur à hystérésis [15].

La section de contrôle se compose d'un premier étage dont le rôle est de déterminer les harmoniques, la qualité du filtrage dépendant largement de la méthode utilisée pour déterminer les harmoniques de référence, et d'un deuxième étage qui régule la tension continue. Le troisième et dernier étage génère la commande de l'onduleur [13].

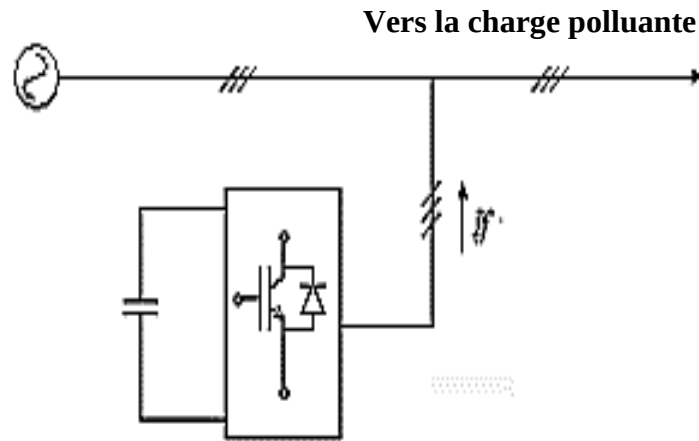


Figure I-13 Structure générale du filtre actif parallèle.

L'objectif d'un filtre actif parallèle (F.A.P.) est d'empêcher les courants nuisibles (harmoniques et déséquilibres) causés par des charges contaminées de circuler à travers l'impédance du réseau au sommet du point de connexion du filtre actif [10].

I.4.2.1.2. Filtre actif série (FAS)

Le rôle d'un FAS est de modifier l'impédance du réseau localement. Il agit comme une source de tension qui annule les tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et celles générées par la circulation de courants perturbateurs à travers le 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.

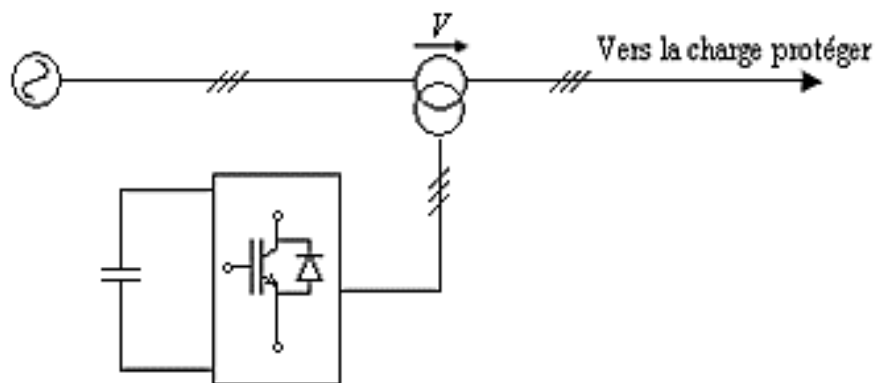


Figure I-14 Structure d'un Filtre actif série.

I.4.2.1.3. Combinaison parallèle-série de filtres actifs (UPQC)

La figure (I-15) montre deux filtres actifs associés, l'un en parallèle et l'autre en série. Cette configuration, appelée « Unified Power Quality Conditioner » (UPQC), combine les avantages de ces deux types de filtres. Elle garantit à la fois un courant sinusoïdal et une tension du réseau électrique de même nature [11].

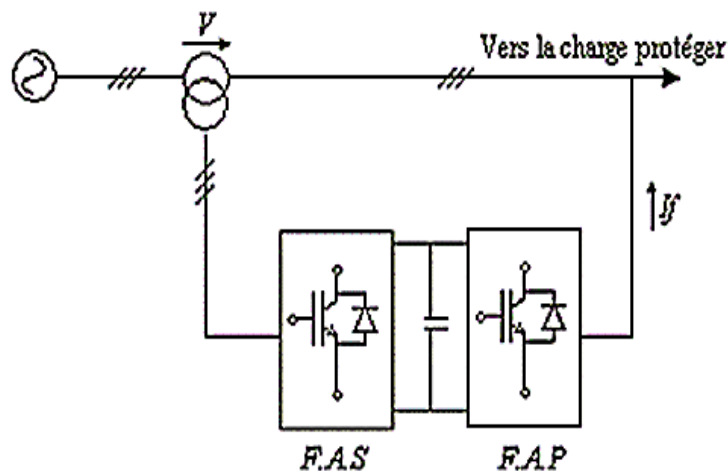


Figure I-15 Combinaison parallèle série actifs (UPQC).

I.4.2.1.4. Avantages et inconvénients du filtrage actif :

Le filtre actif offre de nombreux avantages :

- S'adapte automatiquement aux changements de charge et de réseau.
- Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques (dans la limite de sa bande passante).
- Il peut protéger les condensateurs de compensation en éliminant les courants harmoniques causés par la charge.

Cependant, le filtre actif présente un certain nombre d'inconvénients :

- Le filtrage actif n'est possible qu'à de faibles niveaux de puissance
- Il coûte beaucoup plus cher qu'un filtre passif [16].

Le tableau (I.1) montre un récapitulatif des avantages et inconvénients de quatre schémas de dépollution : filtrage passif, filtrage actif série, filtrage actif parallèle et le filtrage parallèle série actifs.

Principes	avantages	inconvénients
filtrage passif	amélioration de la forme du courant	risque de résonance, pas d'adaptabilité
filtrage actif série	amélioration de la forme de la tension, adaptabilité aux variations de charge et du réseau	pas d'amélioration de la forme du courant
filtrage actif parallèle	amélioration de la forme du courant, adaptabilité aux variations de charge et du réseau	amélioration de la forme de la tension pas toujours évidente
la combinaison parallèle-série actifs	amélioration de la forme du courant, amélioration de la forme de la tension, adaptabilité aux variations de charge et du réseau	réalisation difficile.
Tableau I-1 Récapitulatif des solutions de dépollution [1]		

I.4.2.2. Filtre hybride :

Le filtre hybride combine les avantages des filtres passifs et actifs. C'est l'une des meilleures solutions pour filtrer les harmoniques de courant des réseaux de distribution. Il est utilisé surtout pour les semi-conducteurs de puissance comme les transistors de puissance de types MOSFET ou IGBT.

Le filtre hybride présente un avantage majeur : Il réduit le coût du filtre actif, qui est actuellement le principal obstacle à l'utilisation des filtres actifs [4].

I.4.2.2.1. Configuration des filtres hybrides :

Ces dernières années, de nombreuses topologies de filtres hybrides associées à différentes stratégies de contrôle ont été présentées dans la littérature scientifique afin d'améliorer la qualité de l'énergie mais surtout de réduire la taille du filtre de puissance actif et donc son coût. Les filtres hybrides peuvent être classés en fonction du nombre d'éléments mis en œuvre dans la topologie étudiée (filtres actifs et passifs), du système traité (monophasé, triphasé tri filaire, triphasé quadri

filaire) et du type d'onduleur utilisé (structure de tension ou de courant). La figure (I-16) ci-dessous présente quelques configurations de filtres hybrides en fonction du type de système étudié et de ses composants associés [17].

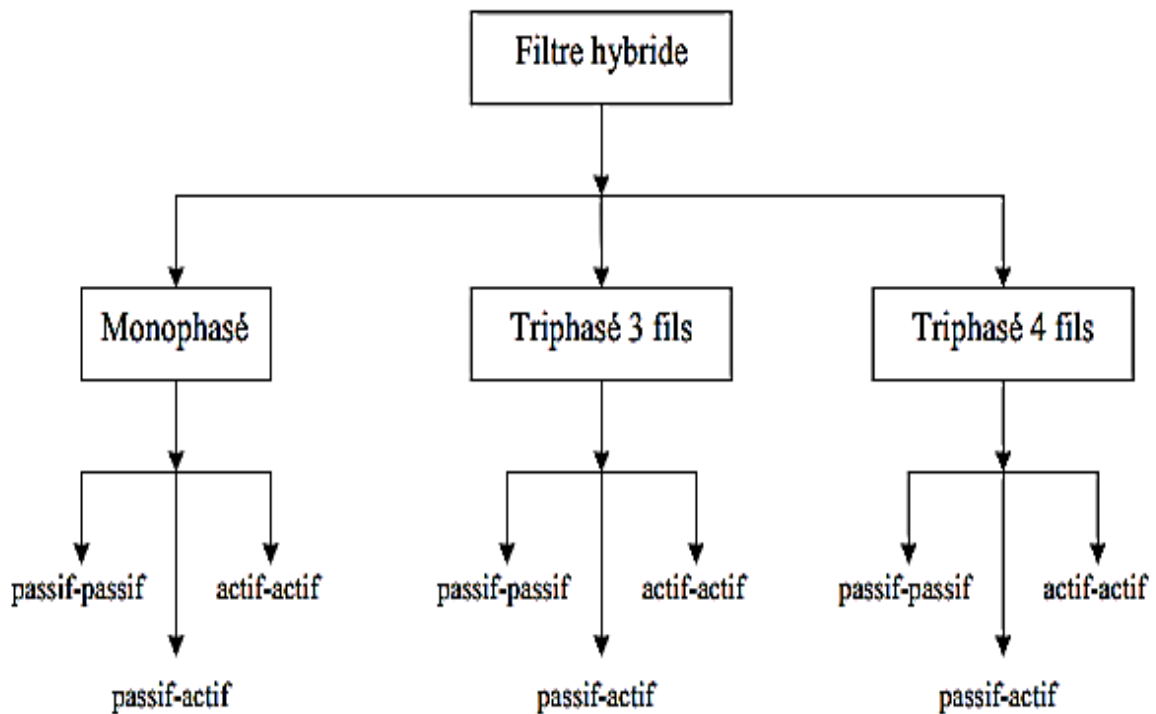


Figure I-16 Classification des filtres hybrides.

La configuration traditionnelle du filtre hybride a deux filtres : actif et passif. Le passif doit avoir une impédance aussi faible que possible pour les harmoniques 5, 7, 11 et 13 pour bien filtrer. En

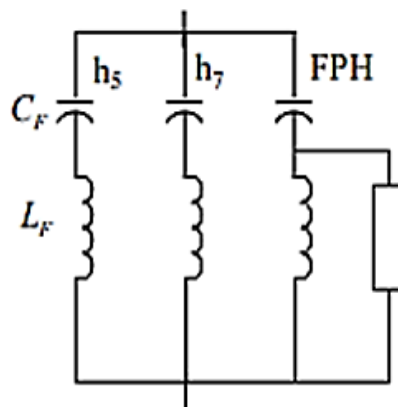


Figure I-17 Configuration du filtre passif avec filtre passe haut.

général, le filtre passif a trois parties : un premier accordé sur l'harmonique 5, un second sur l'harmonique 7 et un troisième pour les hautes fréquences. La figure (I-17) montre comment il est fait.

La figure (I-18) ci-dessous montre une autre configuration de filtre passif utilisant des filtres passifs accordés sur l'harmonique 11 et l'harmonique 13 à la place du filtre passe-haut.

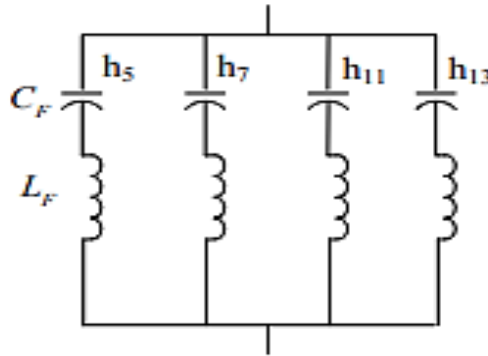


Figure I-18 Configuration du filtre passif sans filtre passe haut.

Dans chacune des configurations de filtres passifs décrits ci-dessus, le coût et la complexité sont des inconvénients majeurs [4].

I.4.2.2.2. Combinaison hybride active et passive

Pour minimiser la taille et donc le coût des filtres actifs, des filtres actifs à faible consommation d'énergie peuvent être combinés avec des filtres passifs. Dans ce cas, le rôle des filtres passifs est d'éliminer les harmoniques dominantes, réduisant ainsi la taille des filtres actifs, qui ne font que compenser les perturbations résiduelles. Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature, dont les plus étudiées sont les suivantes :

- le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles
- le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles
- le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle [12].

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini les concepts essentiels pour comprendre les perturbations affectant les réseaux électriques et leur impact négatif sur la qualité et la conformité de l'énergie distribuée. Les principales perturbations, telles que les harmoniques, les chutes de tension, les surtensions et les déséquilibres, nuisent à la stabilité et à la fiabilité des systèmes électriques. Leur

identification et leur analyse, notamment via des indicateurs comme le Taux de Distorsion Harmonique (THD) encadré par les normes CEI 61000, sont cruciales pour limiter leurs effets.

Nous avons également présenté les solutions clés pour améliorer la qualité de l'énergie, notamment les filtres passifs et actifs, qui permettent de réduire ou d'éliminer ces perturbations tout en assurant une alimentation stable et durable. Une gestion proactive et efficace des réseaux reste indispensable pour répondre aux exigences croissantes en matière de performance énergétique et de fiabilité des infrastructures.

Le chapitre suivant sera consacré à la structure du filtre actif parallèle

II. Filtre Actif Parallèle et méthodes d'identification des courants des référence

II.1. Introduction

Les charges non linéaires présentes dans les réseaux électriques modernes engendrent des courants harmoniques qui détériorent la qualité de l'énergie et perturbent le fonctionnement des équipements. Pour y remédier, le filtre actif parallèle constitue une solution performante, capable de compenser dynamiquement ces harmoniques.

Son principe repose sur l'injection de courants de compensation via un onduleur de tension, piloté par des stratégies de commande telles que la modulation de largeur d'impulsion (MLI) ou la commande par hystérésis.

Ce chapitre est dédié à l'étude du filtre actif parallèle triphasé, en abordant ses composants matériels essentiels (onduleur, circuit de stockage, filtre de sortie), ainsi que les méthodes de génération des courants de référence, comme la théorie des puissances instantanées. Le rôle du système PLL et les techniques de régulation du courant et de la tension y sont également présentés.

II.2. Principe du filtrage actif parallèle de puissance :

Le filtre actif, branché en parallèle sur le réseau, il est connecté en parallèle avec la charge. Il injecte un courant qui est égal et en opposition de phase au courant harmonique. Il agit comme une source de courant injectant des harmoniques et convient à tout type de charge. Il contribue également à améliorer le facteur de puissance, et où le schéma synoptique est montré à la Figure (II.1) [25].

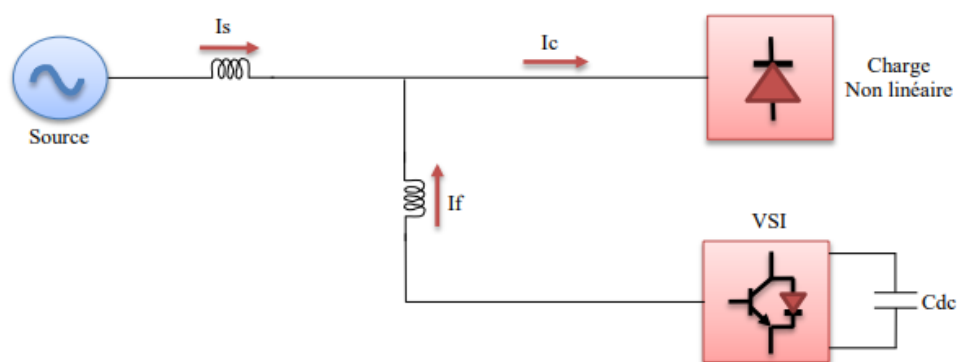


Figure II-1 Schéma de principe d'un filtre actif.

II.3. Structure du filtre actif parallèle :

La Fig. (II.2) illustre l'architecture globale du filtre actif parallèle, qui s'articule autour de deux modules distincts : le bloc de puissance et le bloc de commande.

- **Le bloc de puissance comprend :**
 - Un onduleur de tension équipé d'interrupteurs de puissance pilotables à l'activation et à la désactivation (GTO, IGBT, etc.) et munis de diodes en antiparallèle.
 - Un circuit de stockage d'énergie, fréquemment capacitif.
 - Un filtre de sortie.
- **Le bloc de commande se compose de :**
 - La méthode d'identification des courants perturbés.
 - Le système à base de PLL qui sera intégré dans la méthode d'identification des courants.
 - La régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
 - La régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.
 - La commande de l'onduleur de tension [7].

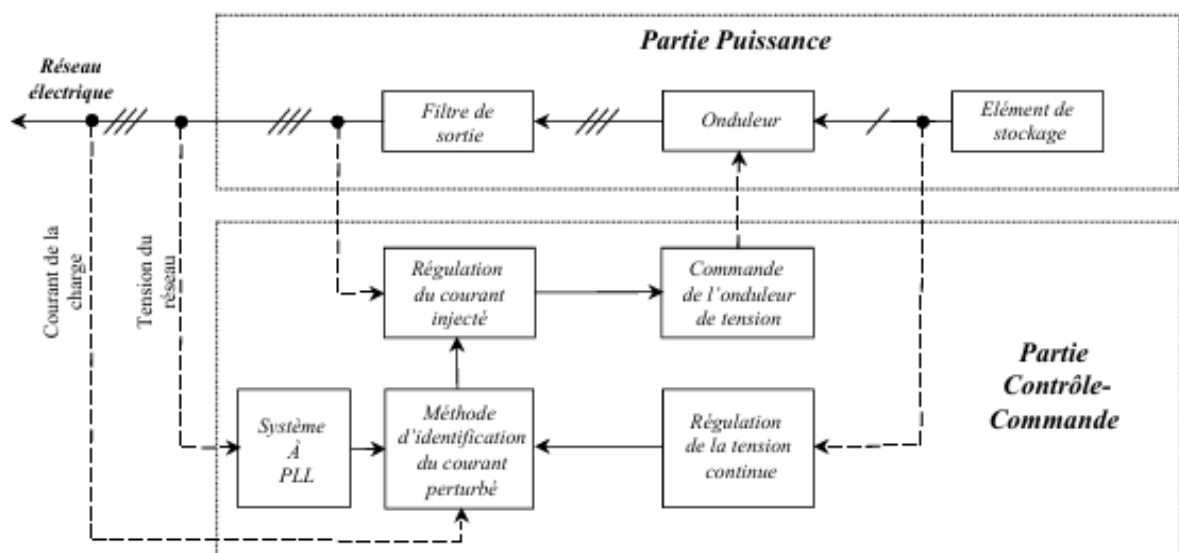


Figure II-2 Structure générale du filtre actif parallèle [7].

II.3.1. Etude de la partie puissance :

II.3.1.1. Onduleur d'un filtre actif parallèle :

La figure (III-6) illustre l'onduleur de tension branché en parallèle au réseau. Le condensateur C_{dc} assume la fonction d'une source de tension à courant continu. La tension aux bornes V_{dc} doit être positive et maintenue pratiquement stable. Ses variations doivent être minimales.

D'une part pour ne pas excéder la limite de tension des semi-conducteurs qui composent les interrupteurs, d'autre part afin de préserver l'efficacité du filtre actif.

Le réseau est connecté à l'onduleur de tension via un filtre. Ce filtre a deux fonctions principales : d'une part, convertir les variations de tension V_f en variations de courant, et d'autre part, filtrer les fréquences de commutation des bras de l'onduleur. Les commutateurs de l'onduleur sont inversibles en courant. Ces dispositifs utilisent des semi-conducteurs qui sont contrôlés pour l'ouverture et la fermeture en configuration anti-parallèle avec une diode. [3] ; [26] ; [5].

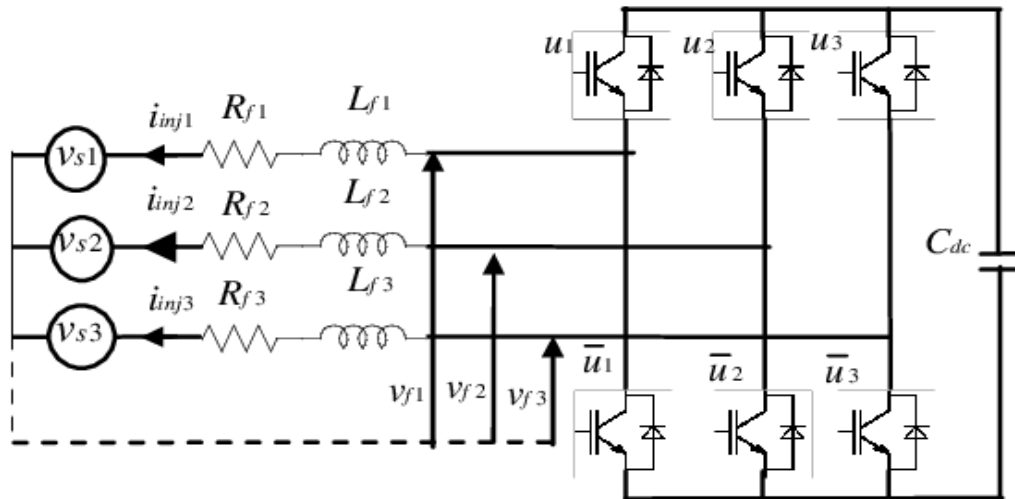


Figure II-3 Structure d'un onduleur de tension triphasé.

Par conséquent, en se basant sur les états des commutateurs exprimés par les variables S_1 , S_2 et S_3 , on déduit huit configurations distinctes pour les trois tensions de sortie du filtre actif V_{fk} , tel qu'illustré dans le tableau ci-dessous :

Cas N°	S_1	S_2	S_3	V_{f1}	V_{f2}	V_{f3}
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
2	0	1	0	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
3	0	1	1	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
4	1	0	0	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
5	1	0	1	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
6	1	1	0	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
7	1	1	1	0	0	0

Tableau II-1 Tensions de Sortie de l'Onduleur de Tension.

II.3.1.2. Système de stockage de l'énergie :

L'emploi de batteries de condensateurs est en vigueur dans les puissances réduites et moyennes. Pour les grandes puissances, on recourt à des bobines supraconductrices [26], [27].

La détermination de la tension continue V_{dc} et de la capacité du condensateur C_{dc} influence la performance dynamique et la qualité de compensation du filtre actif en parallèle. Effectivement, une tension V_{dc} élevée améliore la dynamique du filtre actif. Par ailleurs, les fluctuations de la tension continue V_{dc} provoquées par les courants générés par le filtre actif et restreints par la sélection de C_{dc} [26] ; [27] peuvent diminuer l'efficacité de la compensation fournie par le filtre actif en parallèle. Ces variations sont d'autant plus cruciales que l'intensité du courant du filtre est élevée et que sa fréquence est basse. C'est pourquoi nous pouvons supposer que seuls les premiers harmoniques sont considérés lors de la sélection des paramètres du système de stockage. Pour illustrer cela, on peut recourir à deux techniques [24] ; [27] :

Le calcul de l'énergie fournie par le filtre actif pendant une demi-période de la pulsation de puissance liée aux deux premiers harmoniques (5 et 7 pour un pont redresseur de Graëtz), est la base de la première méthode. On choisit un taux d'ondulation ΔV_{dc} acceptable, généralement de l'ordre de 2% V_{dc} . On peut calculer C_{dc} à partir de la relation suivante :

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

Avec :

V_s : la tension simple du réseau

I_h : l'intensité du courant harmonique de rang h et α l'angle d'activation des thyristors du pont Graëtz, qui est nul dans le cas d'un redresseur à diodes.

On sélectionne la tension V_{dc} comme étant la plus élevée qui respecte les limites imposées par les commutateurs.

La tension V_{dc} a une valeur minimale qui est deux fois supérieure à la tension maximale simple du réseau, afin de garantir le contrôle du courant du filtre de sortie en permanence. La seconde technique, plus facile, repose sur l'évaluation du courant harmonique I_h du rang le plus bas. Le calcul de la capacité C_{dc} se fait de la manière suivante [24] ; [9] ; [11].

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

Avec :

ω_h : la fréquence fondamentale la plus basse à corriger.

Une troisième approche se fonde sur le calcul de l'énergie délivrée par le filtre actif et celle Selon une source [28] ; [11] de la pollution est chargée comme suit :

La valeur efficace du courant de la charge cotée alternatif dans les trois phases est :

$$I_{Leff} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \quad (II.3)$$

Où représente le courant de charge coté continu. I_d

Le fondamental du courant de la charge est donné par :

$$I_{Leff} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \quad (II.4)$$

Les courants harmoniques produits par la charge représente la différence entre le fondamentale et la valeur efficace du courant coté alternatif de la charge. Ces courants sont donnés par :

$$I_{Lhar} = \sqrt{I_{Leff}^2 - I_{Loneff}^2} = \sqrt{\frac{2}{3} - \frac{6}{\pi^2}} I_d = 0.2423 I_d \quad (II.5)$$

Le filtre actif doit fournir la puissance correspondante aux harmoniques produite par la charge. En choisissant la période de l'ondulation de la tension aux bornes du condensateur six fois inférieure à celle de la tension du réseau électrique, on peut trouver :

$$C_{dc} \geq \frac{0.43 I_s}{6 f_s (V_{dc \max}^2 - V_{dc \min}^2)} \quad (II-6)$$

Avec :

f_s : la fréquence fondamentale du réseau électrique.

Si on fixe l'ondulation de la tension continue à $\Delta V_{dc} = 2\% V_{dc}$, on peut écrire :

$$V_{dc \max((\min))} = V_{dc} \pm \frac{\Delta V_{dc}}{2} \quad (II-7)$$

II.3.1.3. Filtre de couplage :

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique.

Le filtre de sortie est dimensionné afin de satisfaire à deux critères :

Garantir la dynamique en courant, qui se définit par :

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{di_{ref}}{dt} \quad (II-8)$$

i_f : Courant du filtre.

i_{ref} : Courant harmonique de la charge.

Empêcher la propagation sur le réseau électrique des harmoniques générés par les commutations.

Un filtre de sortie du premier ordre est le plus souvent employé dans la littérature.

Il est constitué d'une inductance L_f comportant une résistance interne R_f . Une valeur relativement basse de L_f permet d'obtenir une bonne dynamique du FAP en satisfaisant l'égalité (II. 6). Cependant, une faible valeur de L_f autorise à la majorité des harmoniques, induits par les commutations, de passer du côté réseau et d'affecter ainsi les installations et les équipements électriques. À l'inverse, une valeur relativement haute de L_f empêche ces harmoniques de se propager sur le réseau électrique mais requiert une tension v_{dc} plus élevée afin de garantir les performances du filtre actif [1].

Dans ce qui suit on présente deux approches qui permettent de déterminer L_f . En n'négligeant la résistance de ce filtre de couplage on obtient :

$$\left(\frac{di_f}{dt}\right)_{max} = \frac{V_{fmax} - V_{smax}}{L_f} \quad (II-9)$$

V_{fmax} : La valeur maximale de la tension à l'entrée de l'onduleur

V_{smax} : La valeur maximale de la tension simple au point de raccordement du filtre. Pour des petites variations du courant du filtre, on obtient :

$$\frac{\Delta i_f}{\Delta T} = \frac{V_{fmax} - V_{smax}}{L_f} \quad (II-10)$$

$\Delta T = \frac{1}{f_{ond}}$: La période de variation du courant du filtre. En supposant la variation maximale du courant du filtre égale à 25 % de la valeur maximale du courant du réseau, la valeur de l'inductance de couplage est donnée par :

$$L_f = \frac{V_{fmax} - V_{smax}}{0.25 i_{smax} f_{ond}} \quad (II-11)$$

D'où une valeur de L_f estimée à :

$$L_f = \frac{0.5V_{dc} - V_{smax}}{4.\epsilon.f_c} \quad (II-12)$$

II.3.2. Etude de la partie commande

II.3.2.1. Stratégie de commande du filtre actif parallèle

Actuellement, les travaux de recherche se poursuivent afin d'optimiser les techniques de commande des filtres actifs parallèles. L'objectif principal est d'améliorer la qualité du filtrage des perturbations, d'augmenter la rapidité de réponse dynamique, de réduire le taux de distorsion harmonique total (THD), ainsi que de concevoir de nouvelles approches de commande plus adaptatives et robustes face à la diversité des charges non linéaires. On distingue principalement deux grandes familles de stratégies de commande, reposant sur le courant mesuré, pour atténuer les courants harmoniques injectés dans le réseau [26] ; [11].

II.4. Méthode d'identifications des courants harmoniques :

II.4.1. Techniques d'identification des courants harmoniques de référence :

Cette identification est utilisée pour générer les courants de référence indispensables à la compensation. Les déséquilibres et la distorsion de la forme d'onde sont les anomalies les plus courantes qui perturbent les courants dans un système triphasé. Plusieurs techniques décrivant divers algorithmes d'identification sont présentées dans la littérature. Certaines d'entre elles mettent en avant une comparaison entre diverses techniques, en soulignant les avantages et inconvénients de chaque approche. On distingue deux catégories de ces méthodes en fonction du domaine temporel ou fréquentiel de l'instrument mathématique conçu.

II.4.1.1. Domaine fréquentiel :

Les techniques en domaine fréquentiel se servent de l'analyse de Fourier (comme la transformée discrète, la transformée rapide, la transformée discrète récursive, etc.) afin de déterminer les harmoniques du courant. Ces techniques sont parfaitement appropriées. Dans les charges où le contenu harmonique fluctue lentement. De plus, ils ont le bénéfice de pouvoir identifier les harmoniques de manière individuelle. Ainsi, elles offrent une compensation sélective. Toutefois, ces méthodes présentent des désavantages majeurs tels que des performances moyennes en état de transition et un volume important de calcul et d'allocation mémoire [29], [12].

II.4.1.2. Domaine temporel :

Plusieurs techniques pour déterminer les courants de référence sur le plan temporel ont été publiées dans des revues scientifiques [30], [31], [32], [33], [12].

Elles offrent une réponse plus prompte et nécessitent moins de ressources. D'opérations que les méthodes antérieures. Elles reposent sur la distinction du fondamental ou de certains harmoniques par rapport aux autres grâce à l'utilisation d'un filtrage. Les paragraphes suivants se concentreront sur les éléments les plus significatifs.

II.4.2.Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées PQ :

II.4.2.1. Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées PQ :

La méthode des puissances instantanées est une méthode temporelle. Elle a été utilisée pour éviter les difficultés liées au grand nombre de calculs lors de l'implémentation des méthodes fréquentielle, comme la méthode de Fourier (Transformées de Fourier rapide ou discrète). Cette méthode a été introduite par H. Akagi [4]. Son principe repose sur la transformation de systèmes triphasés (tensions simples et courants de ligne) en un système diphasé (repère $\alpha\beta$) via la transformation de Concordia, afin de calculer les puissances réelle et imaginaire instantanées. Ensuite, pour déterminer les courants harmoniques de la charge, la composante fondamentale est transformée en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives.

Dans la méthode classique des puissances instantanées [4], on utilise généralement, soit un filtre passe-haut, soit un filtre passe-bas pour ne conserver que la composante harmonique du signal. La figure suivante II.4 illustre le principe de cette méthode.

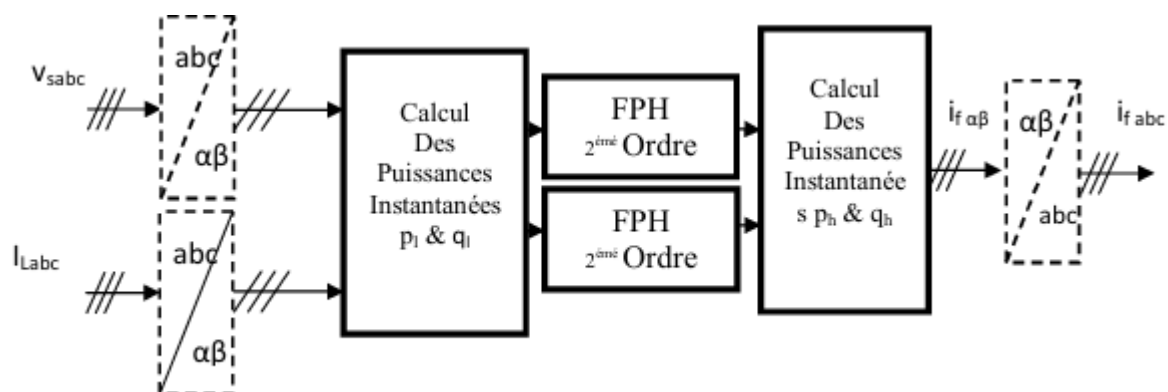


Figure II-4 Détermination des courants de référence du filtre actif par la méthode classique des puissances active et réactive instantanées [11].

Les deux types de filtre d'extraction sont présentés à la figure suivante :



Figure II-5 a: Filtre passe haut



Figure II-5 b : Filtre passe bas

Soient les tensions simples d'un réseau triphasé sans composante homopolaire (connecté à une charge non linéaire) notées v_{s1} , v_{s2} , v_{s3} , et les courants de charge correspondants notés i_{c1} , i_{c2} , i_{c3} [33] ; [11]. La transformation de Concordia permet alors de ramener ce système triphasé équilibré à un système diphasé dont les axes sont en quadrature :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{II-13})$$

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II-14})$$

La puissance active instantanée p et la puissance réactive instantanée q sont définies par :

$$\begin{bmatrix} p \\ -q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II-15})$$

Les puissances active et réactive instantanées peuvent s'écrire comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II-16})$$

Avec p et q les composantes continues de $\bar{p}$ et $\bar{q}$, et $\tilde{p}$ et $\tilde{q}$ les composantes alternatives de p et q . A partir de l'équation (4.24), nous pouvons déduire les expressions des composantes du courant de charge selon les axes $\alpha\beta$:

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

En remplaçant (4.3.25) dans (4.3.26), ces courants s'expriment selon les axes $\alpha\beta$ par :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II-18})$$

En fonction de l'usage souhaité du filtre actif parallèle (FAP), il est possible de compenser à la fois les harmoniques de courant et l'énergie réactive, ou seulement l'un des deux. Par exemple, pour une compensation simultanée des harmoniques et de l'énergie réactive, on élimine la composante continue de la puissance instantanée p à l'aide d'un filtre passe-bas (FPB). Dans cette situation, après avoir ajouté à la composante alternative de la puissance active instantanée, la puissance active p_c nécessaire à la régulation de la tension continue v_{dc} , les courants de référence, notés $i_{ref\alpha}$ et $i_{ref\beta}$, s'expriment selon les axes $\alpha\beta$ par :

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} + p_c \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II-19})$$

Enfin, il est aisé d'obtenir les courants de référence selon les axes abc par la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} i_{ref1} \\ i_{ref2} \\ i_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II-20})$$

D'après plusieurs travaux présentés dans la littérature, les filtres d'extraction permettent généralement de réduire la composante continue avec un certain degré d'efficacité. Toutefois, leurs performances varient en fonction de leurs caractéristiques vis-à-vis du résidu harmonique. Ces filtres présentent certaines limitations :

Une extraction plus précise nécessite en général un régime dynamique lent. Cela conduit souvent à choisir une fréquence de coupure relativement basse (entre 5 Hz et 35 Hz), ce qui peut entraîner une instabilité du filtre actif de puissance en présence de variations rapides de la charge.

À l'inverse, une fréquence de coupure plus élevée permet une réponse plus rapide mais compromet la précision de l'identification de la composante alternative, qui peut alors s'avérer insuffisante.

Pour répondre à ces limites, un nouveau type de filtre d'extraction, désigné ici sous le nom de Filtre Multi Variable (FMV), a été développé. Ce filtre repose sur les travaux de Song Hong-Scok [11], et propose une approche basée sur l'extraction de la composante fondamentale des signaux directement dans le repère $\alpha\beta$, comme illustré à la figure (II.6).

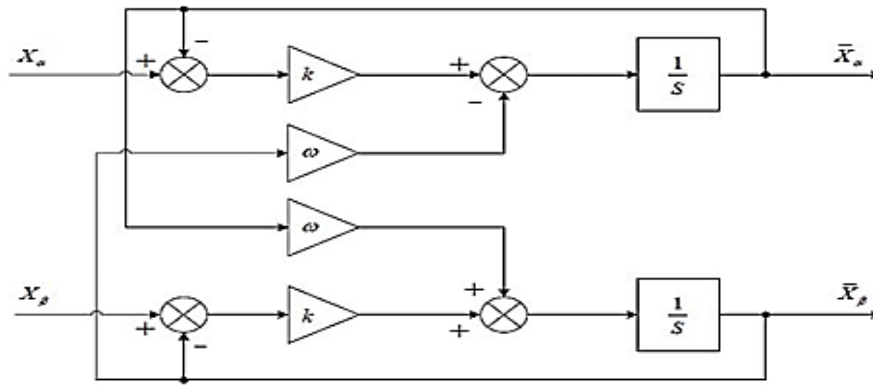


Figure II-6 Principe du FMV.

Selon les axes $\alpha - \beta$, les expressions liant les composantes $\hat{x}_{\alpha\beta}$ en sortie du FMV aux composantes d'entrée $x_{\alpha\beta}$ sont les suivantes :

$$\hat{x}_\alpha = \left(\frac{K}{s}\right)[x_\alpha(s) - \hat{x}_\alpha(s)] - \frac{\omega_c}{s} \hat{x}_\beta(s) \quad (\text{II-21})$$

$$\hat{x}_\beta = \left(\frac{K}{s}\right)[x_\beta(s) - \hat{x}_\beta(s)] - \frac{\omega_c}{s} \hat{x}_\alpha(s) \quad (\text{II-22})$$

Sont représentés par :

$x_{\alpha\beta}$: le signal électrique d'entrée selon les axes $\alpha-\beta$, de nature tension ou courant

$\hat{x}_{\alpha\beta}$: les composantes fondamentales de $x_{\alpha\beta}$

K : constante à fixer

$\omega_c = 2\pi f$: pulsation fondamentale du réseau

Le filtre multi-variable (FMV) sera intégré de manière systématique dans l'ensemble des stratégies de commande examinées dans ce travail. La figure (II.7) présente une version modifiée du schéma d'identification des courants de référence basée sur la méthode des puissances instantanées, dans laquelle l'utilisation de FMV est mise en œuvre pour améliorer la qualité de l'extraction des composantes harmoniques [11], [27].

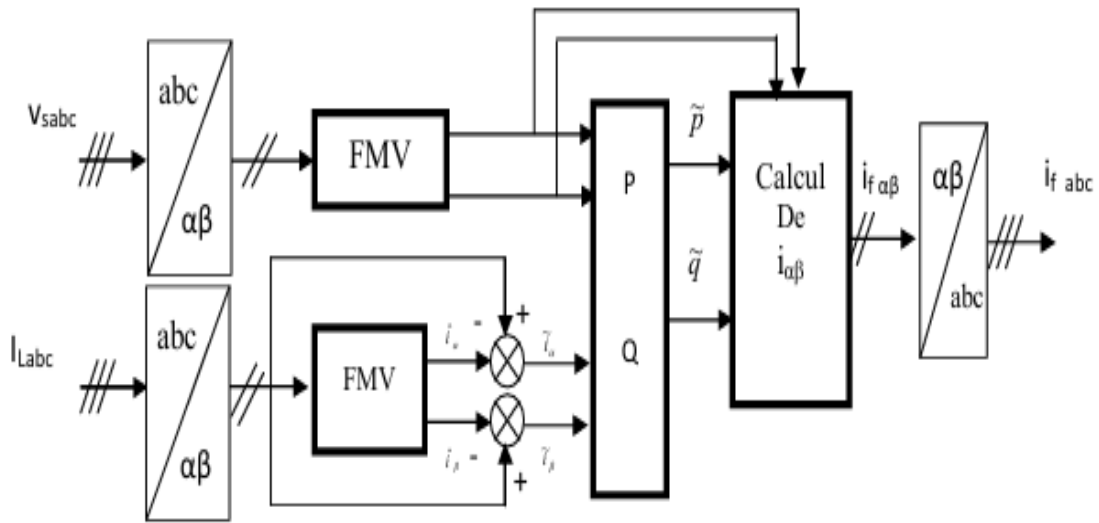


Figure II-7 Détermination des courants de référence à l'aide de FMV

II.4.3.Méthode de référentiel synchrone (SRF : synchrones référence frame) :

➤ Système PLL

Cette méthode est sensible aux variations de la fréquence, Ce qui signifie le besoin d'une boucle de verrouillage de phase (PLL). La méthode montre des meilleures performances dans des conditions imparfaites du système de tensions [11]. Une autre méthode également utilisée pour déterminer l'angle θ repose sur la transformation de Concordia.

II.4.3.1. Méthode de référentiel synchrone avec FBP

La méthode de référentiel synchrone, est appelée aussi méthode des courants instantanés d et q. Elle permet d'obtenir des meilleures performances même si la tension du réseau est perturbée ou déséquilibré. La figure (II.6) représente le Schéma de principe de cette méthode. Dans cette méthode les courants de la charge sont transformés dans le repère $\alpha\beta$ de Concordia avec la transformation Clark, puis dans le repère dq de Park $P(\theta)$ de l'équation (II.23) pour obtenir $i_d(t)$ et $i_q(t)$ [18].

$$p(\theta) = \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & \cos(\theta) \\ \cos(\theta) & \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II-23})$$

$\theta = \omega t$ Représente la position angulaire du repère tournant qui est une fonction linéaire de la pulsation angulaire. Ce repère de référence tourne à une vitesse constante en synchronisme avec les tensions triphasées [18] ; [34]. Le courant dans ce repère peut être exprimé de la façon suivante :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{II-24})$$

L'angle θ , représentant la position angulaire du repère tournant, est défini comme une fonction linéaire de la pulsation angulaire. Ce repère de référence est en rotation à vitesse constante, en synchronisme avec les tensions triphasées du réseau [26] ; [18].

$$i_d(t) = i_{dh}(t) + i_{df}(t) \quad (\text{II-25})$$

$$i_q(t) = i_{qh}(t) + i_{qf}(t) \quad (\text{II-26})$$

Réactive dans le repère dq , $i_{dh}(t)$ et $i_{qh}(t)$ représentent successivement les courants harmoniques sur l'axe d et l'axe q dans le même repère.

Le courant de référence $i_{dh}(t)$ sera extrait dans ce repère à l'aide d'un FPB avec une boucle de retour. Avec la transformation inverse de Park $P - 1(\omega t)$ appliquée sur i_d et i_q on obtient les courants $i_{ref\alpha}$ et $i_{ref\beta}$. Ensuite la transformation inverse de Concordia $C - 1$ est appliquée sur $i_{ref\alpha}$, $i_{ref\beta}$ et $i_{ref0} = i_0$ pour retrouver les courants de référence i_{refa} , i_{refb} et i_{refc} dans le repère triphasé.

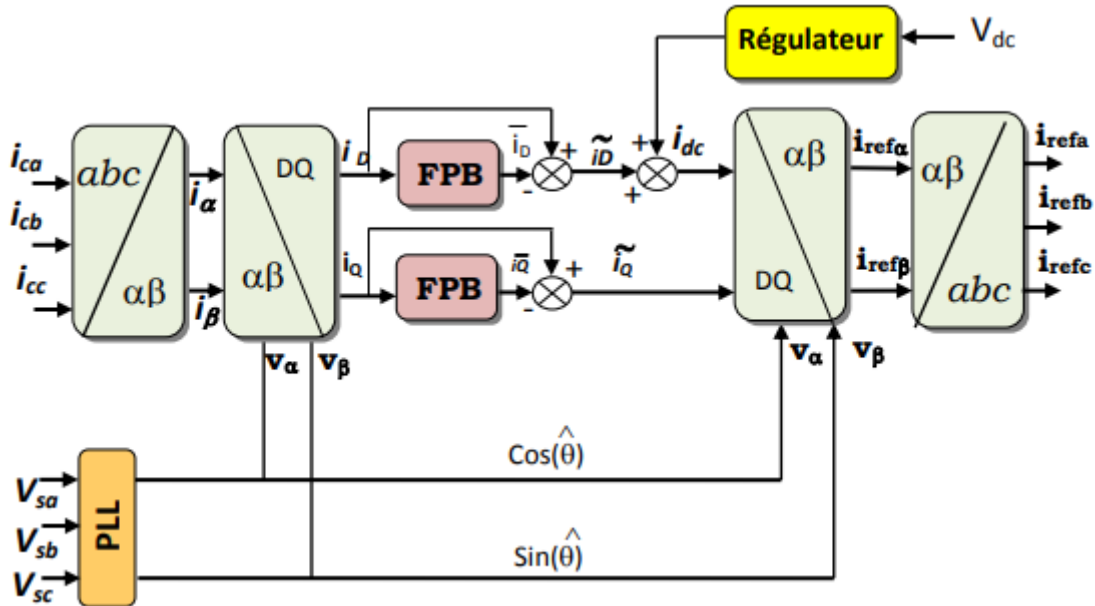


Figure II-8 Identification par la méthode de référentiel synchrone avec FPB [12].

II.4.3.2. Méthode de référentiel synchrone avec FMV

L'extraction de la composante harmonique de référence est ensuite réalisée dans le repère stationnaire, en utilisant un filtre multi-variable (FMV). La figure (II.9) suivante illustre le principe de cette méthode :

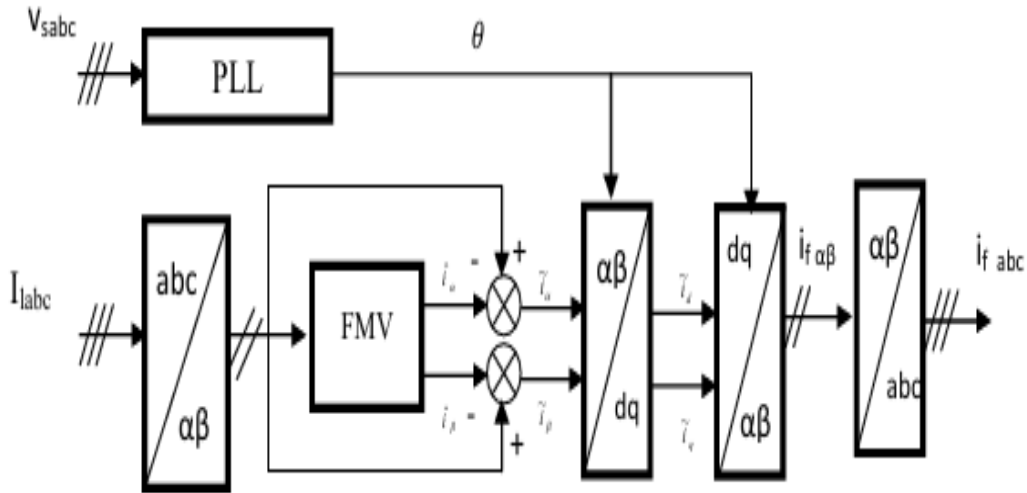


Figure II-9 Extraction des harmoniques par méthode de référentiel synchrone [11].

Dans le repère synchronisé, les courants projetés sur les axes d et q peuvent être décomposés en deux composantes distinctes, comme suit :

$$\begin{cases} i_{Ld} = \bar{i}_{Ld} + \tilde{i}_{Ld} \\ i_{Lq} = \bar{i}_{Lq} + \tilde{i}_{Lq} \end{cases} \quad (\text{II-28})$$

En l'absence du neutre, seule les composantes alternatives seront présentées à la sortie du système filtre-soustracteur. En plus, en insérant ce système-là uniquement sur l'axe d , tout le courant sur l'axe q sera disponible comme référence [11]. Par conséquent, la puissance réactive de la charge sera compensée en plus des harmoniques, les courants de référence deviennent alors :

$$\begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_{Ld} \\ \tilde{i}_{Lq} \end{bmatrix} \quad (\text{II-29})$$

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

$$\begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \\ \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} \quad (\text{II-30})$$

Après la transformation des courants de la charge polluante dans le repère stationnaire, ces derniers sont définis dans le repère synchrone par :

$$\begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} \quad (\text{II-31})$$

II.5. La régulation et l'adaptation du filtre actif :

II.5.1. Etude de la Commande en courant

II.5.1.1. Méthode de commande basée sur la méthode de puissance instantanée :

II.5.1.1.1. Régulation de la tension continue V_{dc}

Si les paramètres de charge évoluent, la tension V_{dc} aux bornes du condensateur qui alimente l'onduleur s'écarte de sa valeur de consigne. Ceci est dû à la nécessité pour le condensateur de pallier les variations d'énergie. De plus, des pertes dans le filtre de sortie et les interrupteurs, en cas de mauvaise commutation, provoquent des fluctuations de cette tension.

Ces fluctuations nuisent aux performances du filtre, qui requiert une tension stable et toujours positive. Un régulateur PI s'avère donc indispensable pour la tension afin de respecter ces contraintes [35].

Le régulateur PI est largement utilisé pour le contrôle de la tension V_{dc} grâce à sa simplicité et son efficacité. En combinant une action proportionnelle et une action intégrale, il permet non seulement de corriger l'erreur statique, mais aussi d'assurer une bonne stabilité du système. Cette combinaison permet d'équilibrer la réponse transitoire et les performances en régime permanent, à condition que les paramètres du régulateur soient bien ajustés [35], [36]. La relation entre la puissance absorbée par le condensateur et la tension à ses bornes peut s'écrire sous la forme suivante

$$P_{dc} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2 \right) \quad (\text{II-32})$$

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

$$P_{dc}(s) = \frac{1}{2} s C_{dc} V_{dc}^2(s) \quad (\text{II-33})$$

La tension aux bornes du condensateur est donnée par :

$$V_{dc}^2(s) = \frac{2P_{dc}(s)}{C_{dc}s} \quad (\text{II-34})$$

A partir de la relation (II.42), et en tenant compte du régulateur (PI), la boucle de régulation de tension continue peut-être représentée par la figure (II.10). 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.

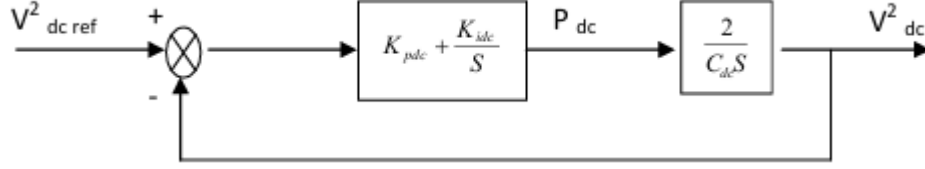


Figure II-10 Boucle de régulation de la tension continue [11].

A partir de la figure (II.16), la fonction de transfert représentant la régulation en boucle fermée de la tension continue est donnée par :

$$G_{BF} = \frac{(1 + \frac{K_{pdc}}{K_{idc}}S)}{S^2 + 2\frac{K_{pdc}}{C_{dc}}S + 2\frac{K_{idc}}{C_{dc}}} \quad (II-35)$$

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

$$K_{idc} = \frac{1}{2}C_{dc}\omega_c^2 \quad (II-36)$$

$$\omega_c = 2\pi f_c \quad (II-37)$$

$$K_{pdc} = \xi\sqrt{2C_{dc}K_{idc}} \quad (II-38)$$

On choisit la valeur de $\xi = 0.707$ pour un bon coefficient d'amortissement du système. Pour un bon filtrage on peut choisir la fréquence de coupure $f_c = 18$ HZ. La commande par hystérésis est présentée par le schéma suivant :

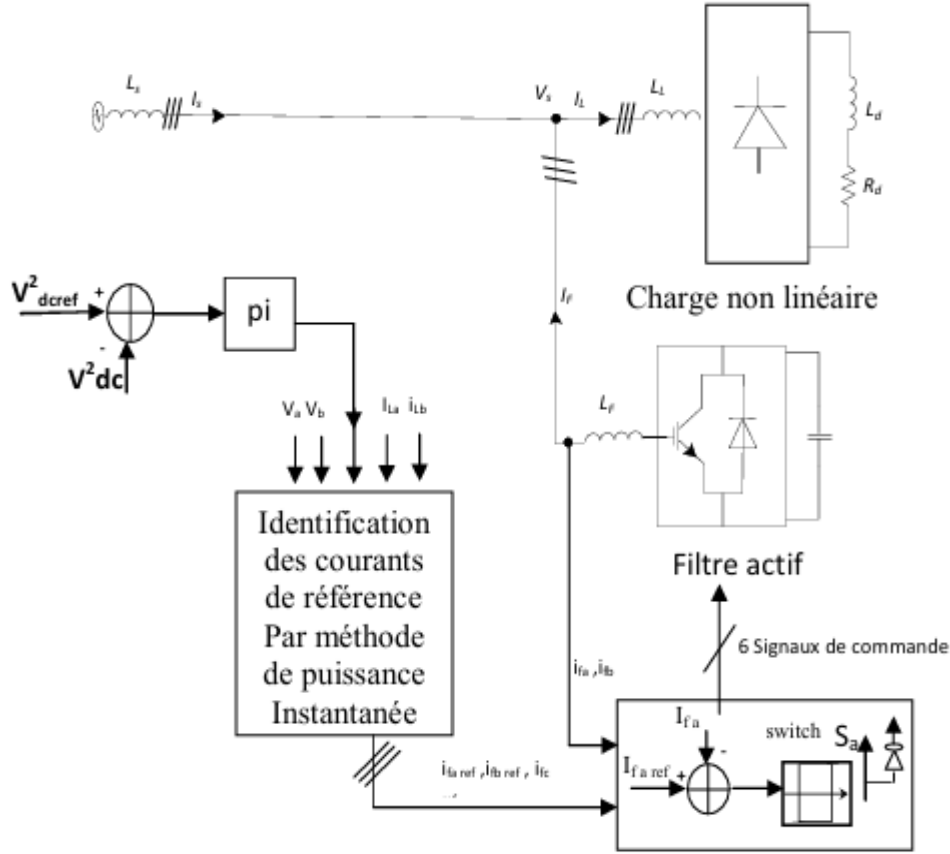


Figure II-11 Commande basé sur la méthode de puissance instantanée dans le repère triphasé [11].

II.5.1.2. Commande par l'utilisation de la méthode référentielle synchrone SRF :

II.5.1.2.1. Régulateur de la tension continue

Nous avons utilisé un régulateur proportionnel intégral (PI) pour que la tension moyenne aux bornes du condensateur soit maintenue à une valeur quasi-constante. La valeur de la tension mesurée V_{dc} est comparée à sa référence V_{dcref} . Le signal d'erreur est ensuite appliqué à l'entrée du régulateur PI [11].

La relation suivante donne l'expression générale du régulateur PI utilisé dans notre étude :

$$K(S) = K_p + \frac{K_i}{S} \quad (II-39)$$

Avec :

K_p : Gain proportionnel du régulateur

K_i : Gain intégral du régulateur La figure (II.12) présente le schéma de la régulation de V_{dc} . Le bloc $G(s)$ est défini par :

$$G(S) = \frac{1}{cS} \quad (\text{II-40})$$

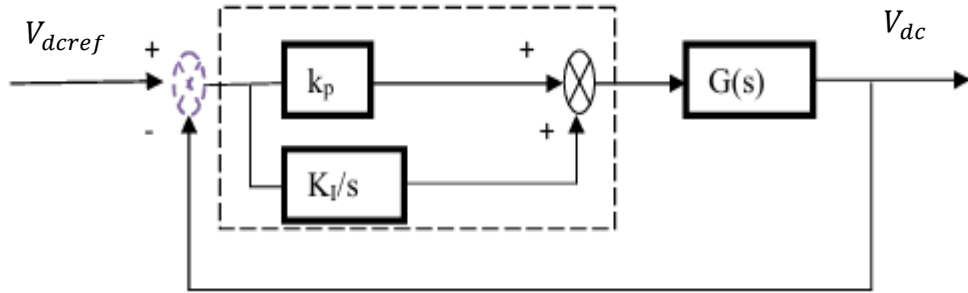


Figure II-12 Schéma de la régulation de V_{dc} par un régulateur PI.

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

$$F(S) = \frac{(1 + \frac{K_p}{K_i}S)\frac{K_i}{c}}{S^2 + \frac{K_p}{c}S + \frac{K_i}{c}} \quad (\text{II-41})$$

Après identification avec l'équation (II.50), on obtient :

$$K_{pdc} = \xi \sqrt{2C_{dc}K_{idc}} \quad (\text{II-42})$$

et $K_{idc} = 2C_{dc}\omega_c^2 \quad (\text{II-43})$

Nous avons choisi : $\omega_c^2 = 2\pi \times 18 \text{ rad/s}$ et $\xi_c = 0,6$.

II.5.2.Méthode de régulation par PI :

Le régulateur PI se compose d'un terme proportionnel K_p , qui contribue à l'amélioration du temps de réponse, et d'un terme intégral K_i , destiné à éliminer l'erreur statique à long terme. Le choix de ce type de régulateur est justifié par plusieurs atouts :

- L'amélioration de la stabilité du système en boucle fermée.
- La simplicité de mise en œuvre, grâce à un algorithme de commande peu complexe.
- Une bonne connaissance théorique et pratique de ce régulateur, ainsi que sa large adoption dans les systèmes industriels.
- Sa robustesse face aux variations de certaines conditions de fonctionnement.

Le signal de commande est obtenu par la combinaison d'une action proportionnelle et d'une action intégrale [36].

La fonction de transfert du régulateur PI est :

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (\text{II-44})$$

Avec :

K_p : Gain proportionnel du régulateur.

K_i : Gain intégral du régulateur.

II.6. Modélisation du filtre actif parallèle

Le FAP est une structure de tension connectée en parallèle au réseau est représenté sur la figure (I.13) [37].

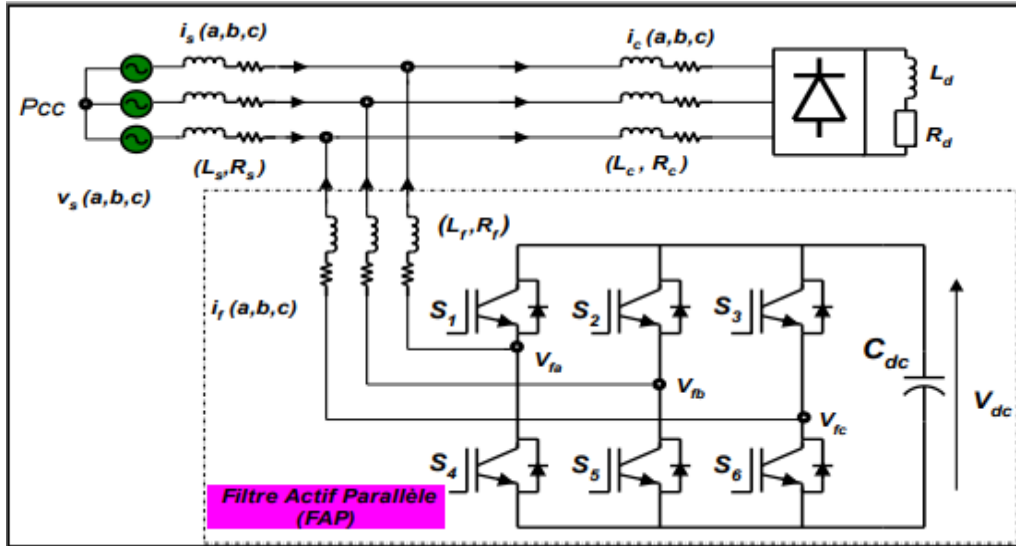


Figure II-13 Filtre actif parallèle

II.6.1. Modèle du FAP dans le repère triphasé (a, b, c)

Les équations des tensions de trois phases du filtre actif parallèle illustrés par la figure I.26 sont données par :

$$L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} = -R_f \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \\ v_{fc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-45})$$

Pour le coté continu :

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_{fa} + S_b i_{fb} + S_c i_{fc} \quad (\text{II-46})$$

Le système d'équation définissant le filtre actif dans le repère triphasé est donné par :

$$\begin{cases} L_f \frac{dV_{dc}}{dt} = -R_f i_{fa} + v_{fa} - v_{sa} \\ L_f \frac{dV_{dc}}{dt} = -R_f i_{fb} + v_{fb} - v_{sb} \\ L_f \frac{dV_{dc}}{dt} = -R_f i_{fc} + v_{fc} - v_{sc} \\ C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_{fa} + S_b i_{fb} - S_c i_{fc} \end{cases} \quad (\text{II-57})$$

II.6.2. Modèle du FAP dans le repère stationnaire (α, β)

Le repère stationnaire est un repère biphasé fixe peut être obtenu au moyen d'une transformation dite transformation de Concordia, le repère stationnaire (α, β) et son orientation, relativement au système triphasé (a, b, c) est présenté dans la figure (I.14):

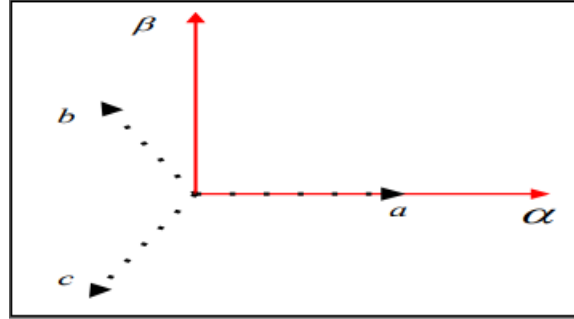


Figure II-14 Position du repère biphasé (α, β) relativement au repère triphasé (a, b, c).

À partir du modèle du filtre actif dans le repère triphasé, et en appliquant la transformée de Concordia sur ce modèle, le modèle triphasé précédent peut être réaménagé dans une représentation biphasée comme suit :

$$\begin{cases} L_f \frac{dV_{dc}}{dt} = -R_f i_{f\alpha} + v_{f\alpha} - v_{s\alpha} \\ L_f \frac{dV_{dc}}{dt} = -R_f i_{f\beta} + v_{f\beta} - v_{s\beta} \\ C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = S_\alpha i_{f\alpha} + S_\beta i_{f\beta} \end{cases} \quad (\text{II-48})$$

Où les tensions du réseau, les courants et les tensions du filtre sont donnés par :

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-49})$$

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_\alpha \\ S_\beta \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{II-50})$$

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

$$\begin{cases} S_\alpha = \frac{1}{\sqrt{6}}(2S_a - S_b - S_c) \\ S_\beta = \frac{1}{\sqrt{2}}(S_b - S_c) \end{cases} \quad (\text{II-52})$$

II.6.3. Modèle du FAP dans le repère tournant (d, q)

Ce repère tournant est obtenu en appliquant une rotation sur le repère stationnaire (α, β) d'un angle ωt où ω c'est la vitesse angulaire de la source (Fig. I.15).

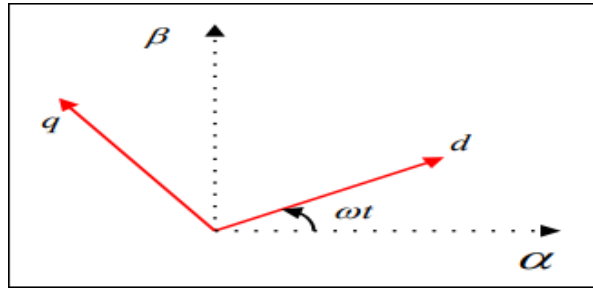


Figure II-15 Représentation des repères stationnaire (α, β) et tournant (d, q).

Les quantités sinusoïdales tournant à la même fréquence angulaire deviennent des constantes dans ce repère et les variables exprimés dans ce repère sont liées respectivement à l'écoulement de la puissance active et réactive dans le système. Appliquons-la transforme de Park sur le système, nous obtiendrons le modèle de l'onduleur dans le repères synchrone (d, q) :

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{fd}}{dt} = -R_f i_{fd} + L_f \omega i_{fq} + v_{fd} - v_{sd} \\ L_f \frac{di_{fq}}{dt} = -R_f i_{fq} + L_f \omega i_{fd} + v_{fq} - v_{sq} \\ c_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = S_d i_{fd} + S_q i_{fq} \end{cases} \quad (\text{II-53})$$

$$\begin{cases} S_d = S_\alpha \cos \omega t + S_\beta \sin \omega t \\ S_q = -S_\alpha \sin \omega t + S_\beta \cos \omega t \end{cases} \quad (\text{II-54})$$

II.7. Commande de l'onduleur :

La finalité de la commande de l'onduleur est d'ajuster les courants délivrés par le filtre actif de manière à ce qu'ils suivent précisément leurs valeurs de référence. Le principe de fonctionnement repose sur une comparaison continue entre les courants mesurés en sortie du filtre et les courants de

référence, déterminés à partir de méthodes d'extraction des composantes harmoniques et de régulation de la tension du condensateur de stockage d'énergie.

Cette commande permet de générer une tension alternative en sortie, par un pilotage adéquat des interrupteurs de puissance (thyristors ou transistors avec diodes en antiparallèle), selon une séquence de commutation rigoureusement définie.

Pour assurer un suivi fidèle des courants de référence, deux techniques de commande sont principalement utilisées :

- La commande par hystérésis ;
- La modulation de largeur d'impulsions (MLI).

Ces stratégies permettent de générer différentes formes d'onde selon la méthode adoptée. Par ailleurs, une tension triphasée peut être obtenue par la combinaison de trois demi-ponts monophasés, comme illustré dans la figure (III-6), représentant un onduleur de tension triphasé [3], [5].

II.7.1. Commande des courants par hystérésis :

La commande par hystérésis, aussi appelée commande en tout ou rien, est une stratégie non linéaire à fréquence de commutation variable. Elle repose sur le maintien de la tension de sortie de l'onduleur à l'intérieur d'une bande prédéfinie centrée autour de la tension de référence, en agissant directement sur l'erreur entre la tension de référence et celle produite. Cette méthode, illustrée par la Figure (II.16), permet un bon contrôle du courant sans nécessiter une connaissance approfondie du modèle du système.

Le principe consiste à comparer l'erreur à une bande d'hystérésis (voir Figure II.17) : dès que l'erreur dépasse l'une des bornes de cette bande, un signal de commande est généré pour la ramener à l'intérieur. Le dimensionnement se limite généralement au choix de la largeur de la bande, souvent fixée à 5 % de la tension nominale. Contrairement aux techniques classiques avec modulateur, cette commande s'appuie sur l'ondulation triangulaire naturelle des tensions générées par l'onduleur pour réaliser l'auto-commutation. Elle impose ainsi la pente des tensions de phase à partir de l'état de

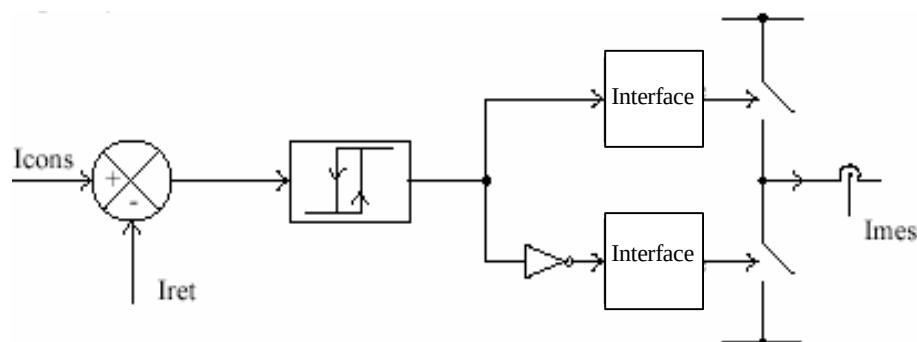


Figure II-16 Commande par hystérésis [3].

l'erreur détectée, en appliquant directement la combinaison de commande triphasée correspondante [38].

Ce problème peut être résolu par une autre stratégie de commande qui peut être proposé à savoir la commande par hystérésis modulée. Mais dans cette stratégie de commande, il est difficile de définir la largeur de la bande de l'hystérésis [7].

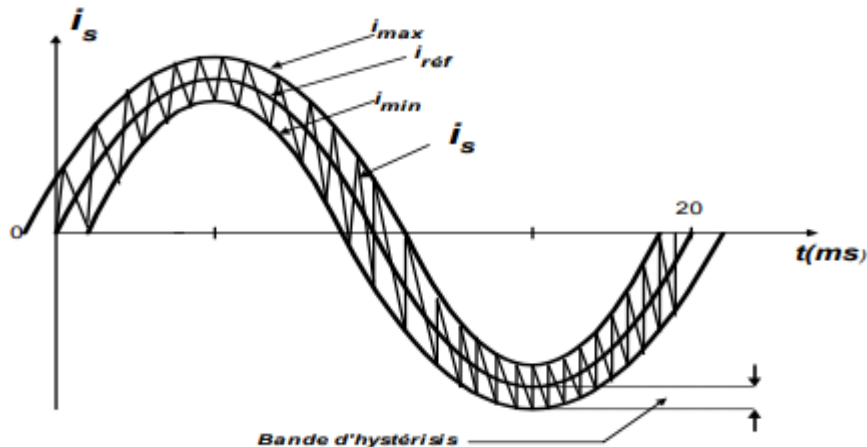


Figure II-17 Commande montrant la bande d'hystérésis [38].

II.7.2. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) :

Afin de surmonter les défis évoqués précédemment, une deuxième approche de commande de l'onduleur est proposée : la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI). Cette méthode permet de maîtriser efficacement la fréquence de commutation, comme illustré par le schéma de principe présenté à la figure (II.18).

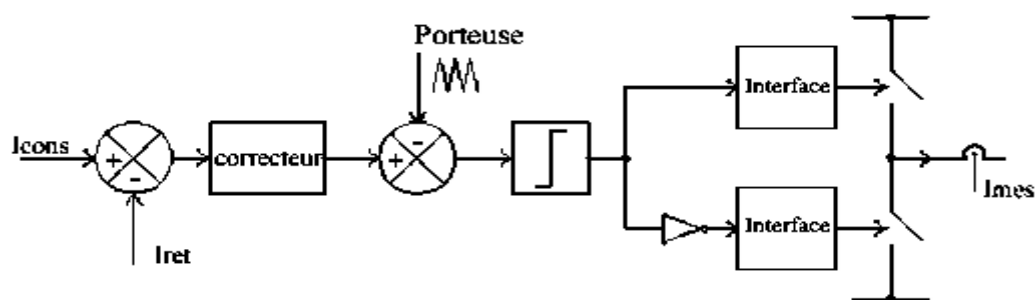


Figure II-18 Principe de commande des courants par MLI

La modulation de largeur d'impulsion à échantillonnage naturel, illustrée par la figure 3.9, est sans doute la plus simple et la plus couramment reconnue des modulations de largeur d'impulsion. Cette méthode de contrôle implique d'abord un régulateur qui fixe la tension de référence de l'onduleur en fonction de la différence entre le courant observé et sa valeur de référence. On compare ensuite ce

dernier avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée déterminant la fréquence de commutation). Le comparateur délivre l'ordre de commande des interrupteurs [3].

D'autres techniques de MLI sont aussi présentes dans la littérature, telles que la MLI à échantillonnage périodique. On peut y distinguer deux approches :

- La MLI à échantillonnage périodique symétrique, où le signal de référence est échantillonné à chaque période de la porteuse.
- La MLI à échantillonnage périodique asymétrique, où le signal de référence est échantillonné à la demi-période de la porteuse.

II.7.2.1. Principe de MLI sinus-triangle :

Le signal de commande des interrupteurs est généré à partir de la comparaison du signal de référence sinusoïdal de fréquence $f_r = 1/T_r$ et du signal de modulation triangulaire ou porteuse de fréquence $f_p = 1/T_p$ (figure 3.10).

Deux paramètres principaux caractérisent la commande à MLI :

- L'indice de modulation : $m = f_p/f_r$, avec $m \gg 1$.
- Le coefficient de réglage : $r = V_{rmax}/V_{pmax}$, Généralement r est compris entre zéro et un.

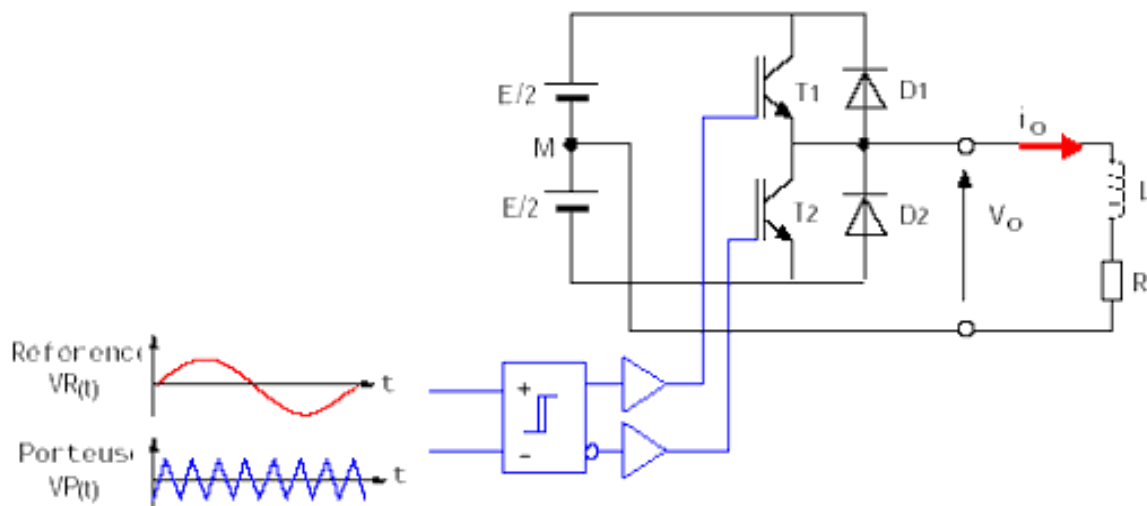


Figure II-19 Schéma de principe de l'onduleur monophasé commandé par MLI sinus-triangle [3].

II.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté de manière détaillée la structure, le fonctionnement et les techniques de commande associées au filtre actif parallèle triphasé. Cette solution s'est révélée particulièrement adaptée pour la compensation des perturbations harmoniques engendrées par les charges non linéaires, en raison de sa flexibilité et de sa capacité à suivre dynamiquement les variations des conditions de charge.

L'analyse a commencé par le principe du filtrage actif, suivi de l'étude de la partie puissance, incluant l'onduleur de tension, le système de stockage d'énergie et le filtre de couplage. Nous avons ensuite exploré la partie commande, en présentant les principales stratégies de régulation des courants injectés et de la tension continue, notamment par l'usage du régulateur PI.

Une attention particulière a été portée aux méthodes d'identification des courants de référence, car elles constituent la base des signaux de commande à injecter dans le réseau. Une nouvelle commande utilisant un filtre hautement sélectif, appelé filtre multi variable (FMV), au lieu des filtres d'extractions classiques de types passe-haut ou passe-bas.

Parmi ces méthodes, la stratégie fondée sur les puissances instantanées s'est distinguée par sa rapidité, sa simplicité de mise en œuvre et son efficacité. Nous avons également évoqué l'importance du référentiel synchrone (SRF) et l'intégration du système PLL pour garantir la synchronisation avec le réseau électrique.

Enfin, nous avons abordé la technique de commande de l'onduleur, la commande par hystérésis, simple et rapide, qui permet une meilleure maîtrise de la fréquence de commutation.

Le chapitre suivant sera ainsi consacré à la simulation d'un filtre actif parallèle triphasé, afin d'évaluer ses performances dans divers scénarios de perturbation.

III. Résultats des simulations

III.1. Introduction

Les équipements tels que les redresseurs, les convertisseurs statiques et les variateurs de vitesse génèrent des harmoniques qui perturbent les réseaux électriques, réduisent l'efficacité énergétique et peuvent entraîner des dysfonctionnements ou des dommages aux équipements sensibles. Pour remédier à ces problèmes, les filtres actifs parallèles triphasés se présentent comme une solution efficace et flexible. Permettent une compensation dynamique des harmoniques et une amélioration significative de la qualité de l'énergie en temps réel.

Dans ce chapitre, on se propose d'étudier la simulation de l'ensemble réseau, redresseur, filtre actif sous l'environnement Matlab Simulink 2015a.

L'objectif de ce travail est de mettre en évidence l'efficacité des filtres actifs parallèles dans la compensation des harmoniques et d'apporter une contribution à l'amélioration de la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques modernes.

III.2. Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante

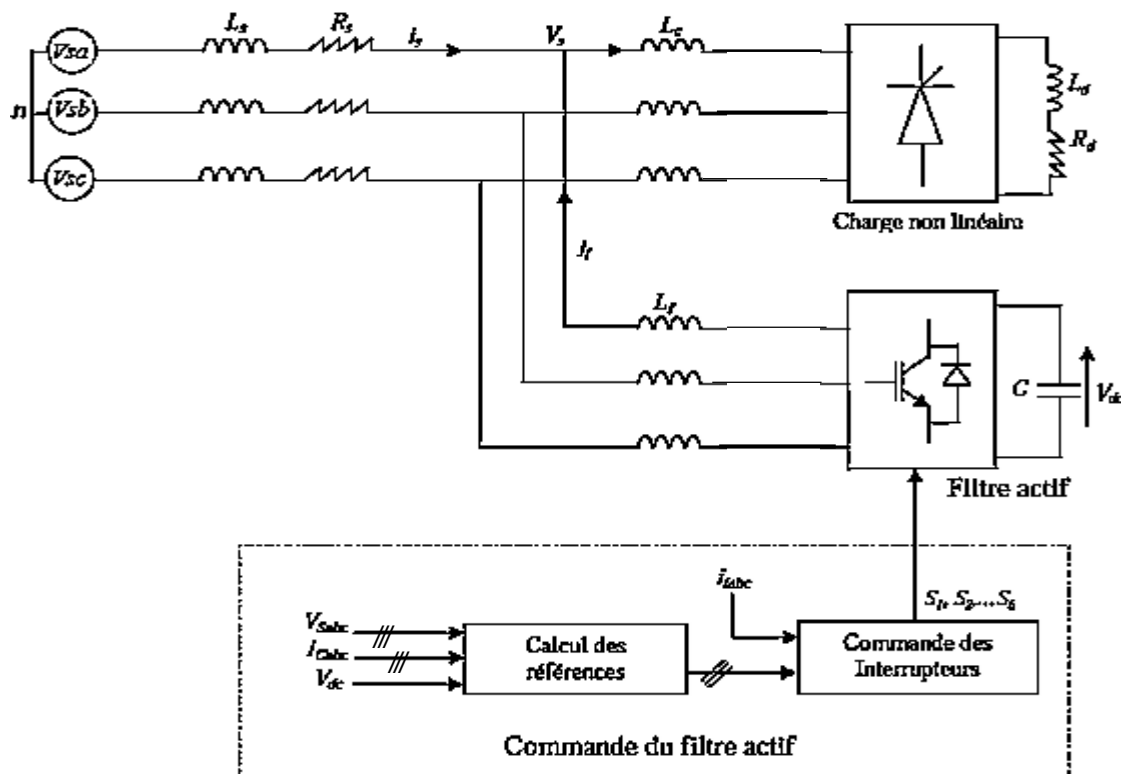


Figure III-1 Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante.

III.2.1. Schéma de simulation :

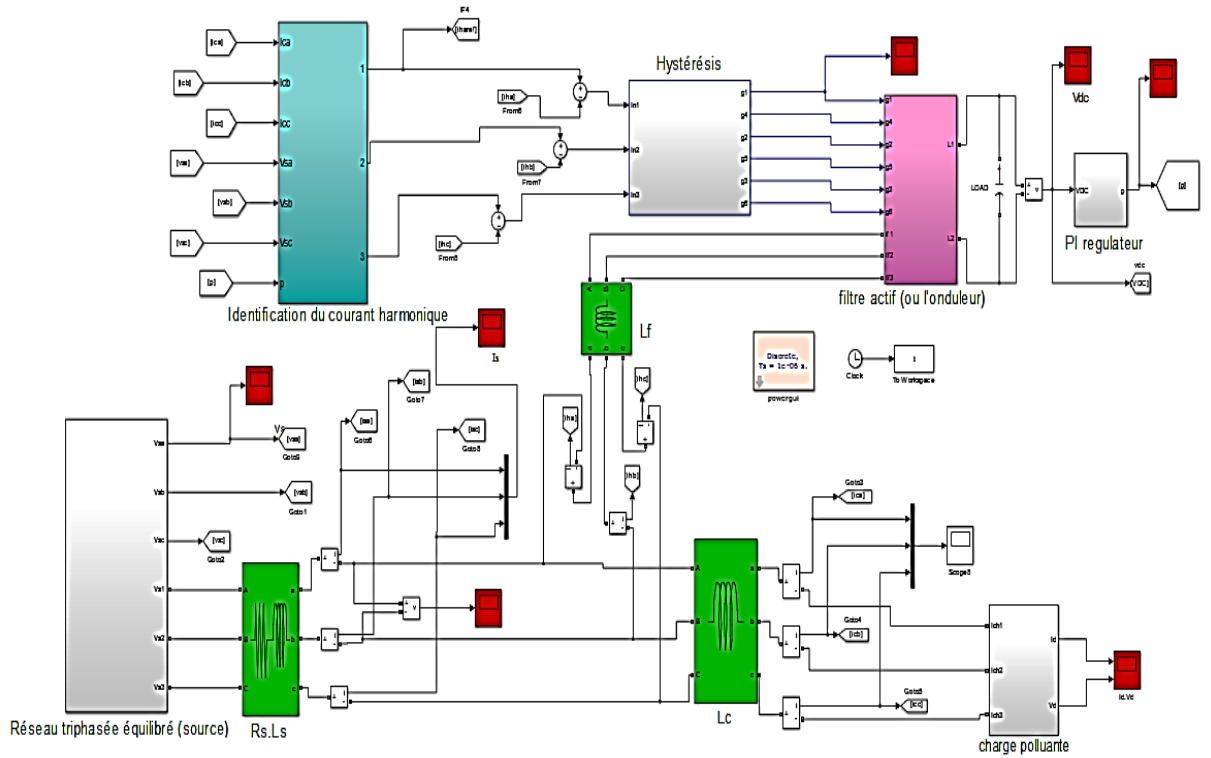


Figure III-2 : Schéma de FAP à trois fils-réseaux- charge polluante sous matlab-semulink.

III.3.Modélisation de l'association réseau - Charge polluante

Le processus de modélisation d'un système implique de trouver des équations mathématiques qui décrivent son fonctionnement [8].

III.3.1. Modélisation du réseau

Le réseau est assimilable à une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance, dite de court-circuit, d'où la représentation du réseau par un système de F.E.M triphasées équilibrées en série avec une impédance [7].

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{2} \cdot E \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{III-1})$$

$$Z_s = R_s + jL_s\omega \quad (\text{III-2})$$

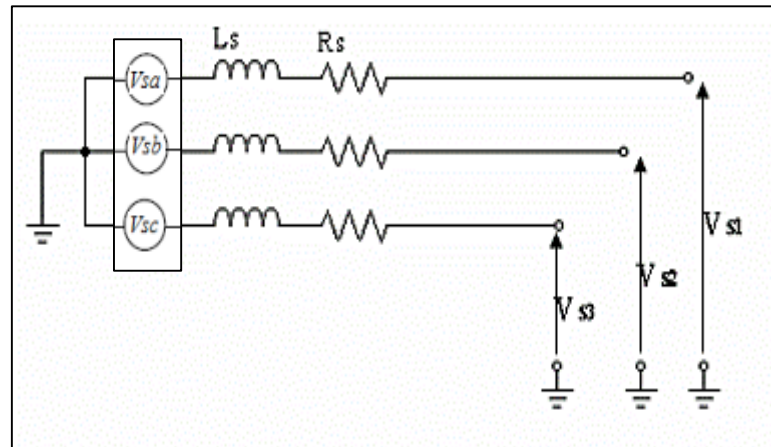


Figure III-3 Schéma synoptique d'un réseau.

III.3.1.1. Modélisation de la charge polluante (Redresseur triphasé)

Pour tester le filtre actif, on a choisi la charge contaminée, qui est un pont redresseur triphasé, comme le montre la figure (III.3), qui génère des harmoniques de courant de l'ordre de $6k \pm 1$. Cette charge a été conçue comme une source de courant idéale (les semi-conducteurs sont considérés parfaits) [22], [23], [7].

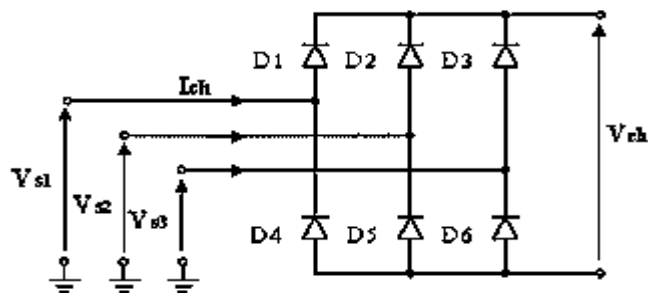


Figure III-4 Schéma synoptique d'un pont redresseur.

III.3.2. Paramètres de la simulation

Réseau électrique
$V_s = 130 \text{ V}$; $f = 50 \text{ Hz}$; $(R_s = 0.42 \Omega ; L_s = 2.3 \text{ mH})$
Charge polluante
$L_c = 1 \text{ mH}$; $(R_d = 44 \Omega , L_d = 1.5 \text{ mH})$
Filtre parallèle
$V_{dc} = 260 \text{ V}$; $C_{dc} = 1100 \mu\text{F}$; $L_f = 3 \text{ mH}$
Commande hystérésis
$\Delta I = 0.1 \text{ A}$
Tableau III-1 Les valeurs des éléments construisant la structure étudiée

III.4.Description globale de la simulation

Les logiciels de simulation avancés offrent la possibilité d'analyser l'évolution des courants et des tensions dans les différentes branches du circuit illustré à la Figure (1) sur une période temporelle prédéfinie. Ils simulent également la commande du filtre actif en mettant en œuvre deux approches principales : la Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) et la commande par hystérésis [7]. Ce travail se concentre spécifiquement sur l'étude du principe de l'hystérésis, cette principe commandée par diverses algorithmes d'identification du courant, dans le but d'évaluer et d'améliorer la performance du courant.

Pour cela on a opté pour les algorithmes de commande suivants :

- Puissances instantanées
- Référentiel synchrone

III.5.Résultats de Simulation

Les résultats suivants représentent la réponse du filtre actif commandé par hystérésis le repère triphasé, basée sur deux méthode Identification des courants, appliquée à un pont de diodes alimentant une charge de type RL, sont présentés. Les performances du filtre actif sous cette stratégie de commande sont intrinsèquement liées à l'inductance de découplage (L_f), à la tension aux bornes du condensateur (V_{dc}),

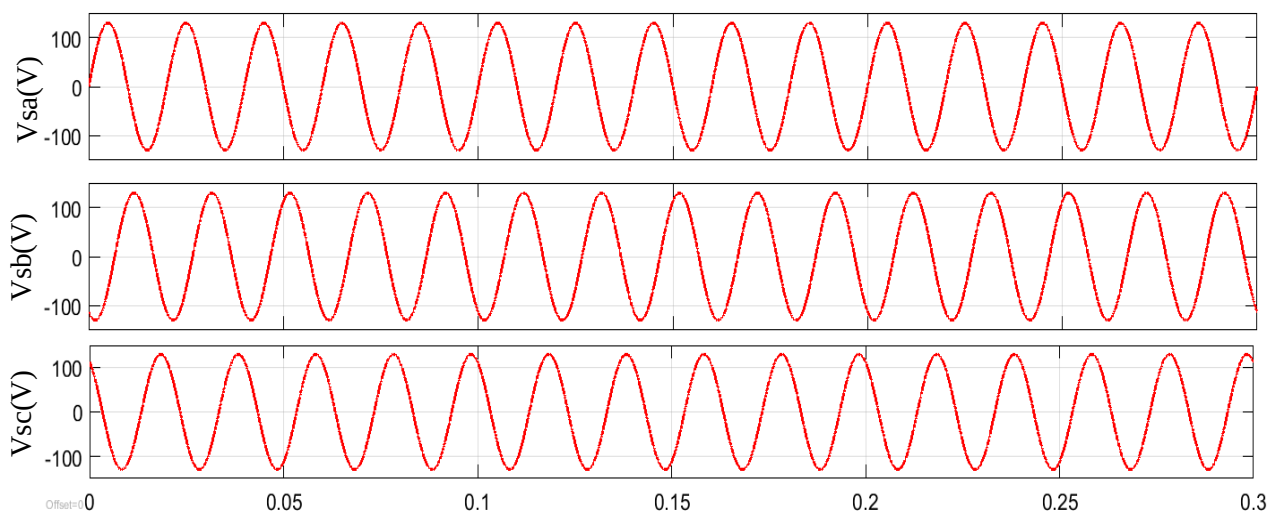


Figure III-5 Tensions des trois phases du réseau électrique avant l'insertion du filtre.

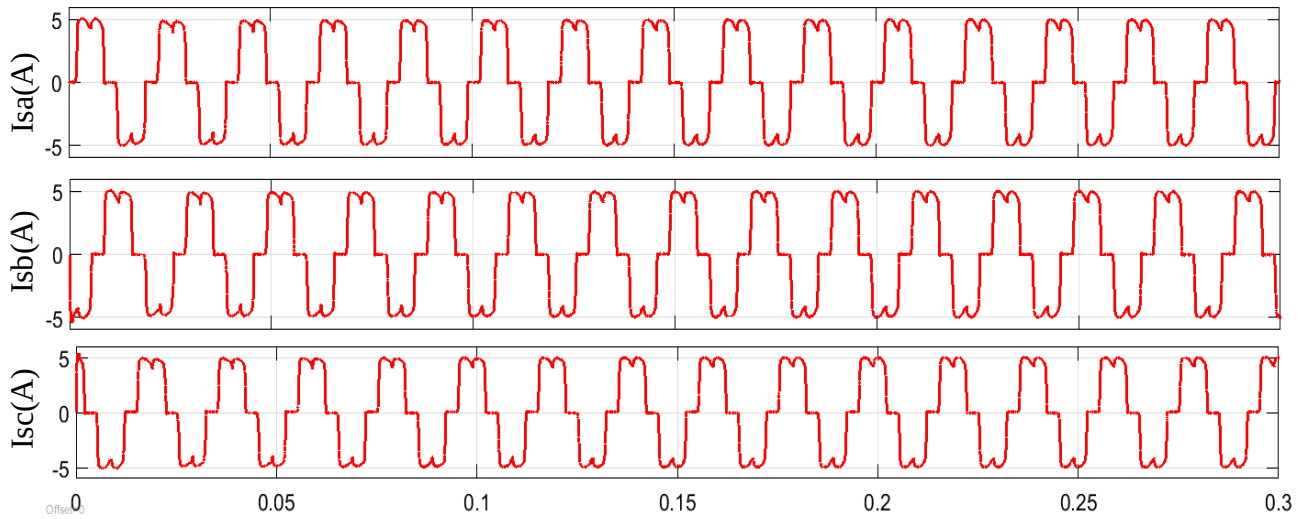


Figure III-6 Courants des trois phases du réseau électrique avant l'insertion du filtre.

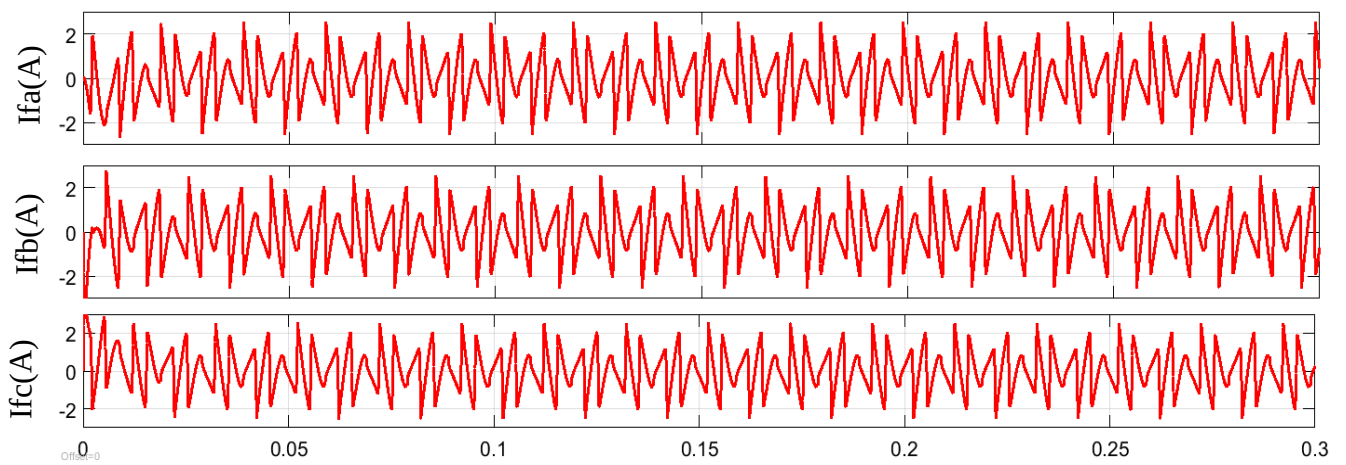


Figure III-7 Les courants injectés par le filtre.

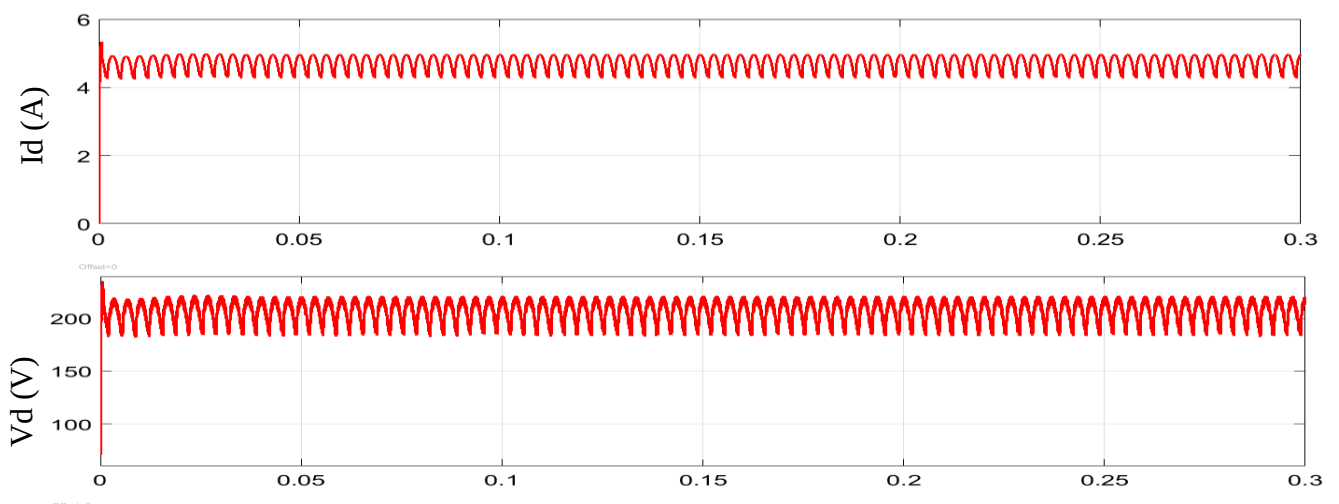


Figure III-8 I_d : le courant de sortie du redresseur ; V_d : la tension de sortie du redresseur.

III.5.1. Méthode de Commande de filtre actif parallèle basée sur la méthode des puissances instantanées avec FPB

Les résultats présentés ci-dessous illustrent la réponse du filtre actif contrôlé par un régulateur PI dans le repère triphasé, en utilisant la méthode de la puissance active instantanée avec un filtre passe-bas (FPB). Les paramètres du système sont les suivants :

- La fréquence de coupure : $f_c = 18\text{Hz}$
- Régulateur PI : $K_i = 0.0879$; $K_p = 7.03$

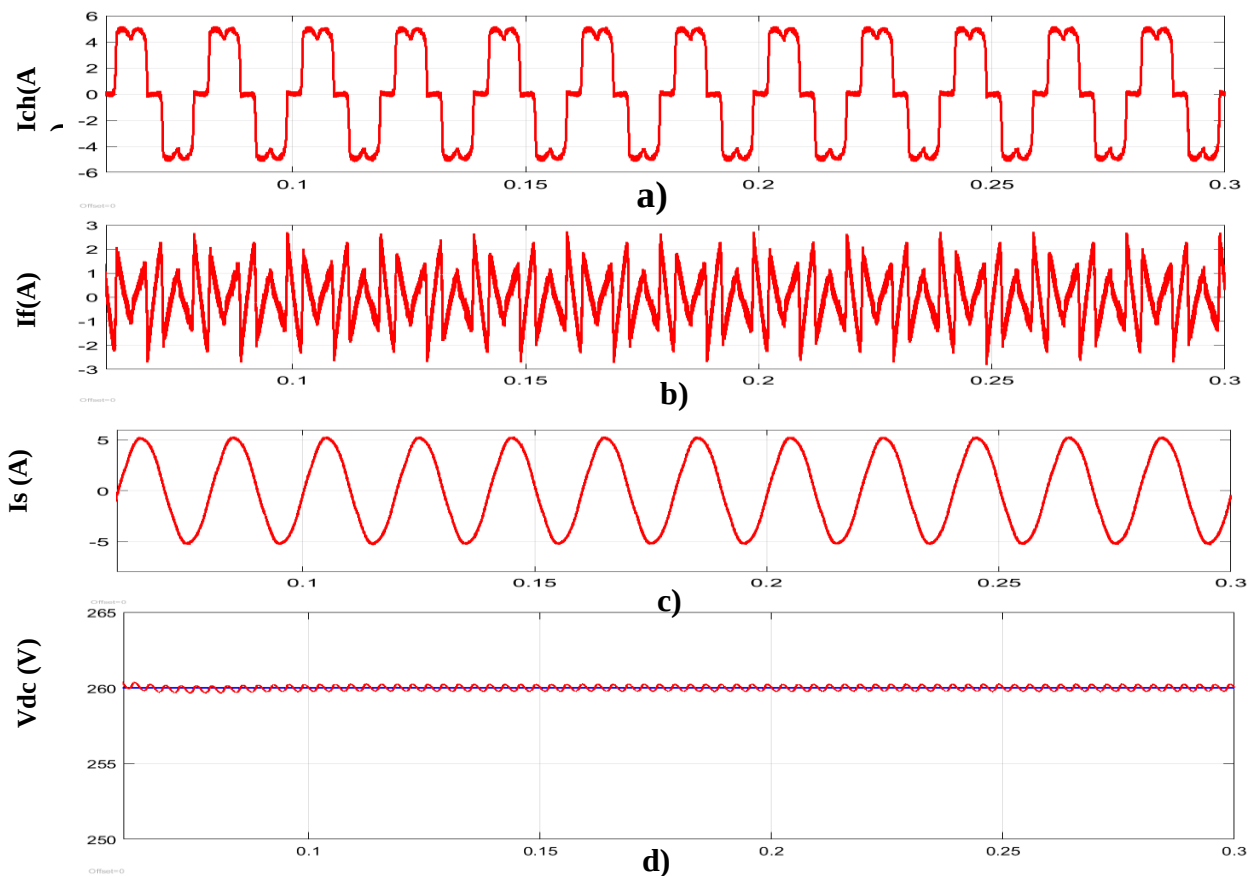


Figure III-9 I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, V_{dc} : Tension aux bornes du condensateur.

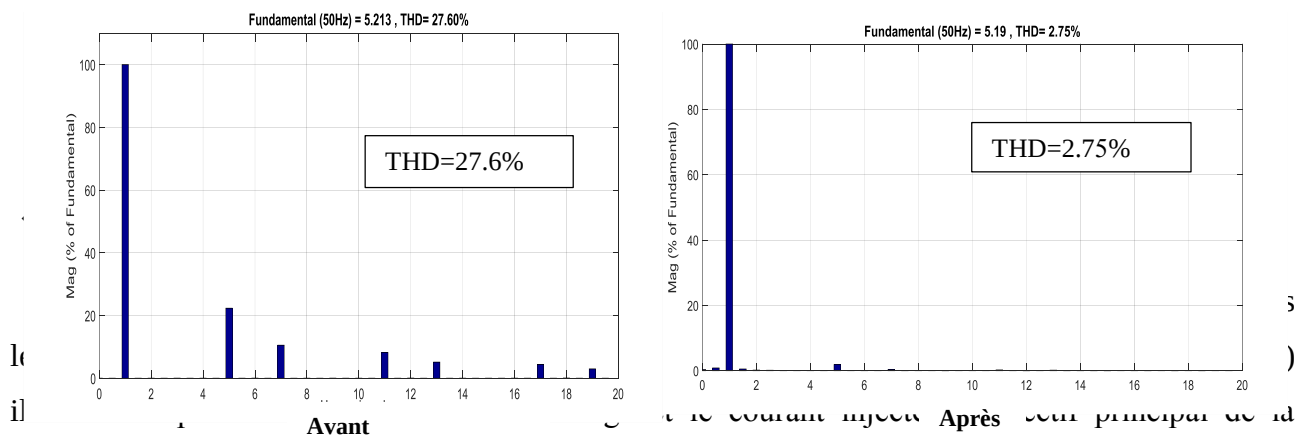


Figure III-10 Spectre de courants de source avant et après filtrage.

commande proposée est de maintenir la tension aux bornes du condensateur aussi proche que possible de sa valeur de référence, comme le montre la figure (III 9-d). Méthode de Commande de filtre actif parallèle basée sur la méthode de référentiel synchrone.

III.5.2. Méthode de Commande de filtre actif parallèle basée sur la méthode de référentiel synchrone

Les résultats présentés ci-dessous illustrent la réponse du filtre actif contrôlé par un régulateur PI dans le repère triphasé, en utilisant la méthode de référentiel synchrone avec un filtre passe-bas (FPB) et filtre multi-variable (FMV). Les paramètres du système sont les suivants :

- La fréquence de coupure : $f_c = 18\text{Hz}$
- Régulateur PI : $K_p = 0.1492$; $K_i = 14.0701$

III.5.2.1.1. Méthode de référentiel synchrone avec FPB

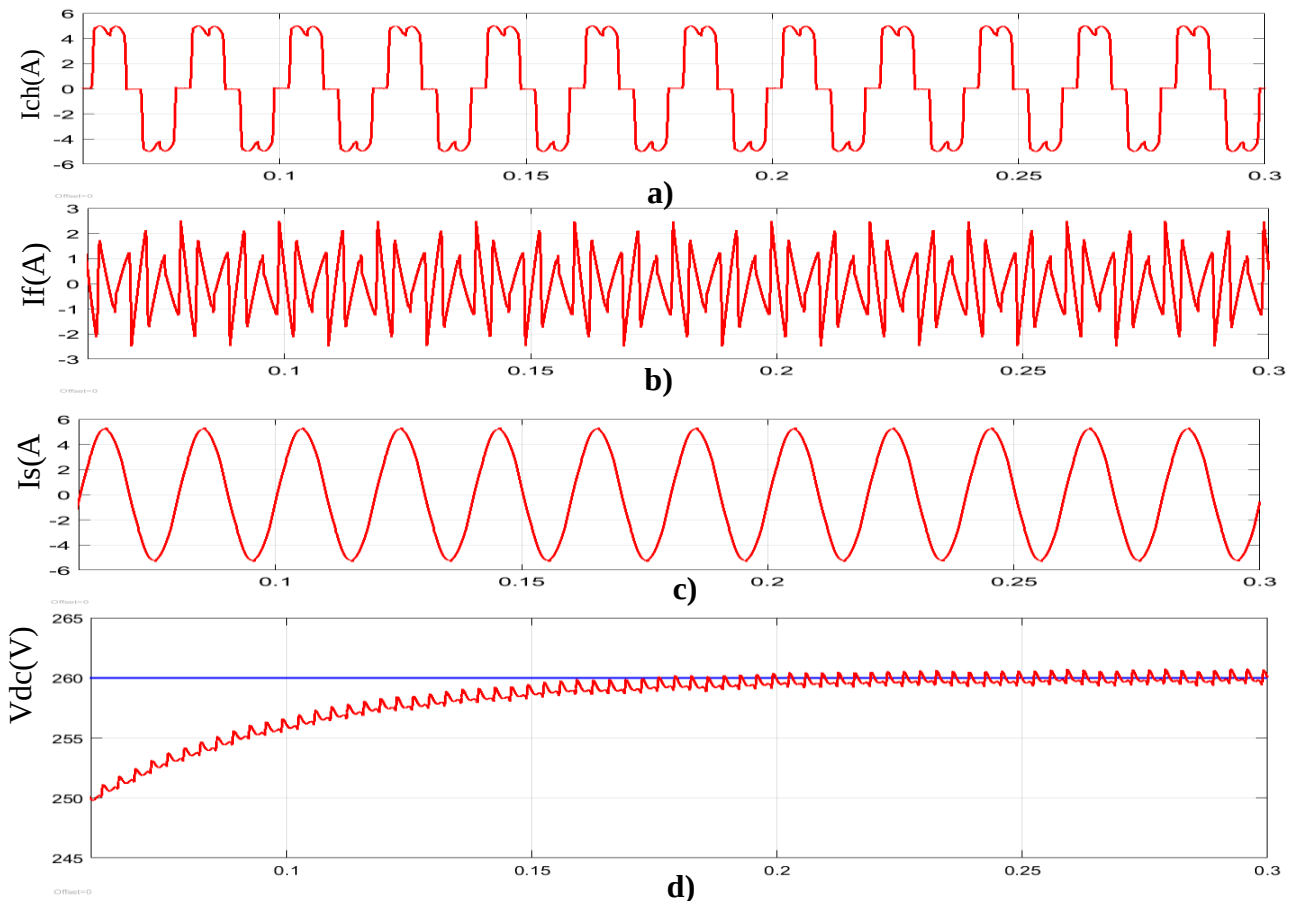


Figure III-11 I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, V_{dc} : Tension aux bornes du condensateur.

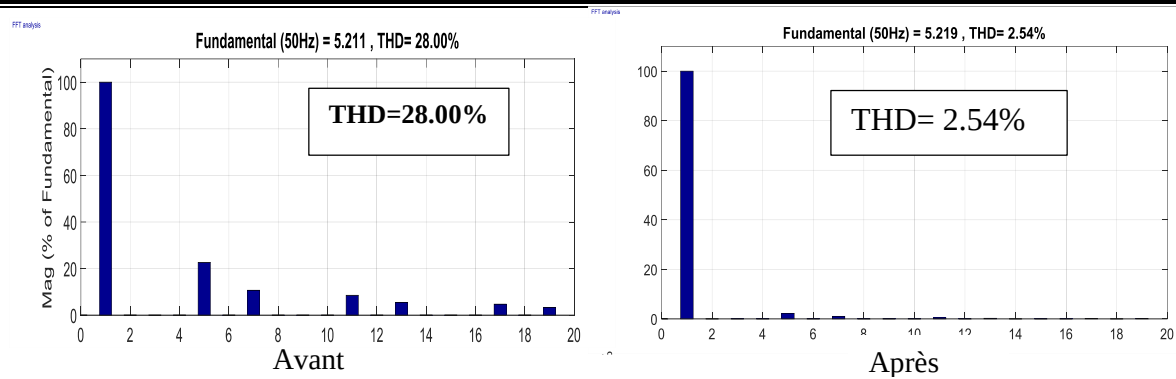


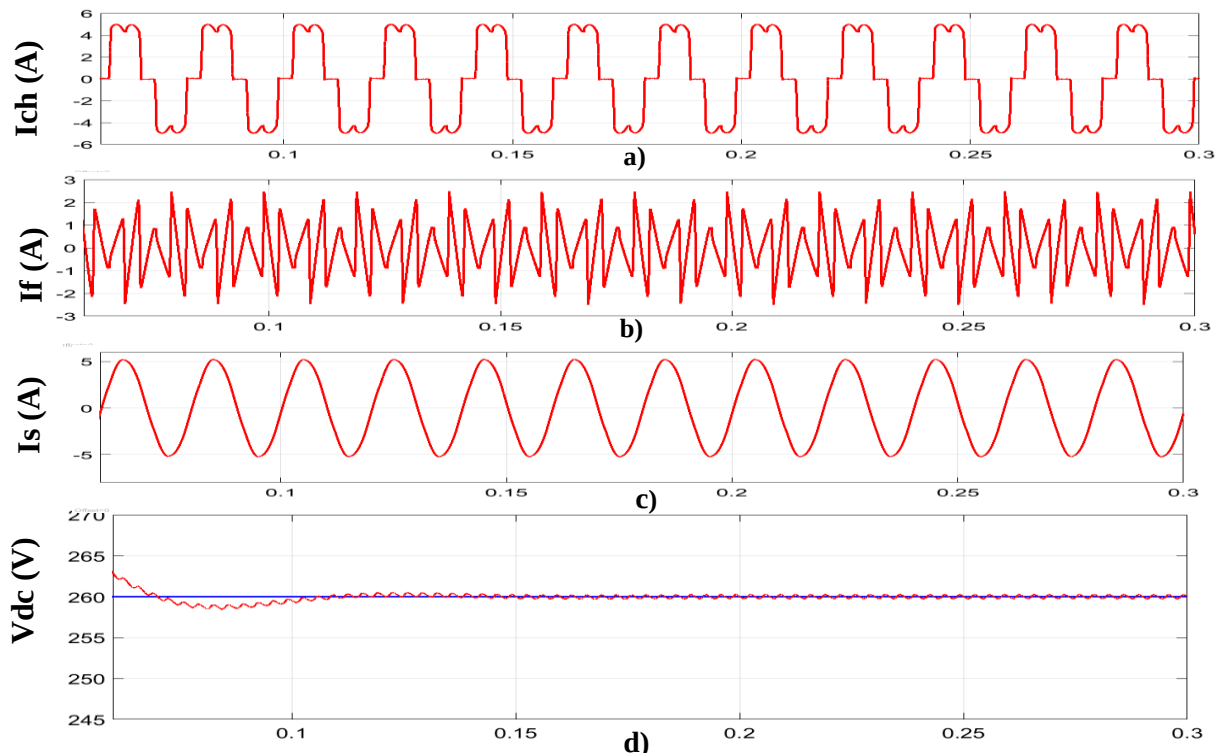
Figure III-12 Spectre de courants de source avant et après filtrage.

❖ Interprétations des résultats

Les figures (III 11-a) et (III 11-b) illustrent respectivement le courant de charge et le courant injecté. L'objectif principal de la commande proposée est de maintenir la tension aux bornes du condensateur aussi proche que possible de sa valeur de référence, comme le montre la figure (III 11-d).

En outre, les figures (III 11-c) ; (III-12) présentent le courant de phase a ainsi que son spectre harmonique. On observe que la forme du courant est quasi sinusoïdale. La valeur du THD est diminuée de 2.75% avec les commandes utilisant la méthode de puissance instantanée avec FPB à 2.54% qui utilisent méthode de référentiel synchrone avec FPB. Aux niveaux de la tension, il y a un dépassement et temps de repense long que la méthode précédente mais avec une valeur d'ondulation réduite qu'explique la diminution de terme THD.

III.5.2.1.2. Méthode de référentiel synchrone avec FMV

Figure III-13 I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, V_{dc} : la tension aux bornes condensateur.

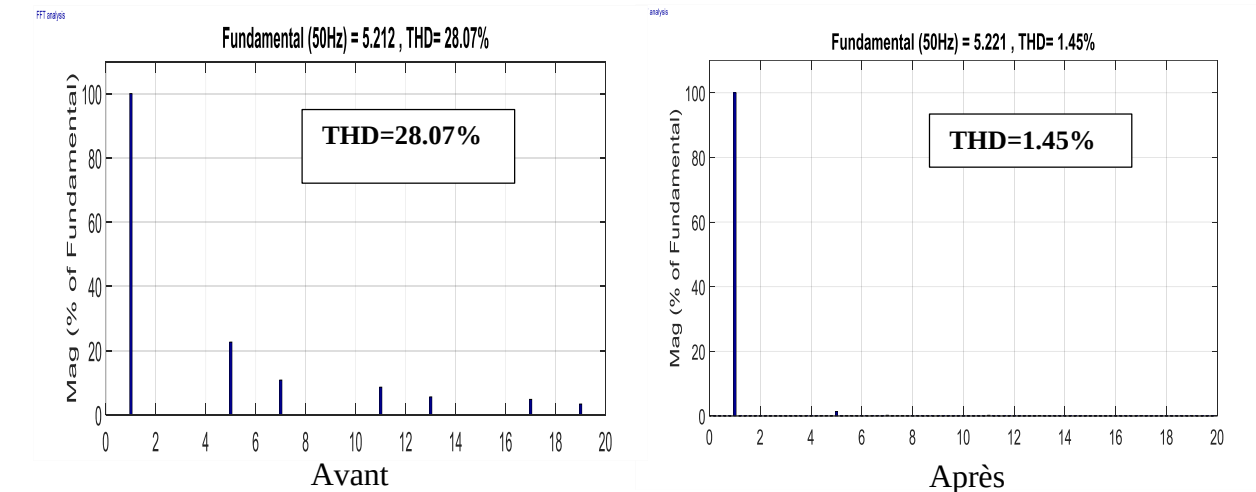


Figure III-14- Spectre de courants de source avant et après filtrage.

❖ Interprétations des résultats

Les figures (III.13.a) et (III.13.b) montrent respectivement le courant de charge et le courant injecté. On observe que ce dernier est quasiment sinusoïdal, avec un THD réduit à 1.45%, ce qui constitue une amélioration notable par rapport à la méthode (p-q) + (FPB) (2.75%) et même à (SRF) + (FPB) (2.54%).

Concernant la régulation de la tension aux bornes du condensateur, la figure (III.13.c) indique que la commande (SRF) + (FMV) permet de maintenir la tension autour de sa valeur de référence avec une ondulation plus faible et un temps de réponse plus rapide que ceux obtenus avec les deux méthodes précédentes.

III.5.3. Avant et après l'injection courant de filtre.

Les résultats suivants illustrent la réponse d'un filtre actif parallèle triphasé, commandé par des régulateurs PI dans le repère triphasé, basé sur la méthode du référentiel synchrone (SRF) avec un filtre multi-variable (FMV). À l'instant $t = 0,15$ s, le filtre a été réactivé, ce qui permet d'observer le comportement du système avant et après la mise en service du filtre.

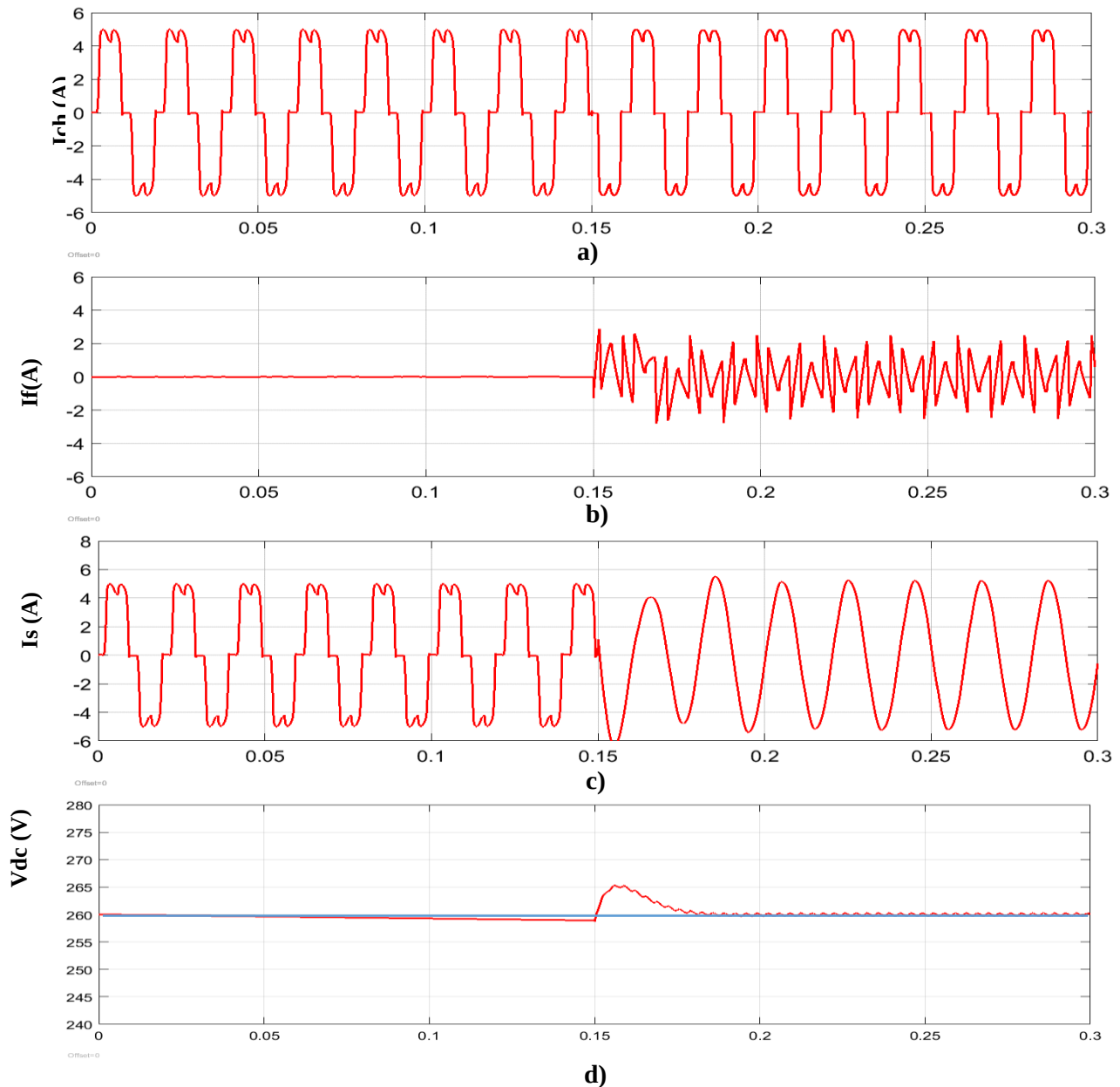


Figure III-15 la réponse d'un filtre actif parallèle triphasé

❖ Interprétations des résultats

Les figures (III-15-a) et (III-15-b) illustrent respectivement le courant de charge $I_{ch}(t)$ et le courant injecté par le filtre actif $I_f(t)$, tandis que les figures (III-15-c) et (III-15-d) présentent le courant de la source $I_s(t)$ et la tension continue $V_{dc}(t)$.

Avant l'activation du filtre actif, le courant de charge $I_{ch}(t)$ présente des distorsions notables, et le courant de la source $I_s(t)$ reflète ces déformations, indiquant une pollution harmonique significative.

À l'instant $t = 0.15$ s, Après l'activation du filtre actif parallèle utilisant la méthode (SRF) +(FMV), on observe une amélioration notable : le courant de la source $I_s(t)$ devient quasi sinusoïdal, le courant injecté $I_f(t)$ compense efficacement les harmoniques, et la tension $V_{dc}(t)$ se stabilise autour de sa valeur de référence. Ces résultats confirment l'efficacité du filtre actif dans l'atténuation des harmoniques et l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique

III.6. Variation de la charge

III.6.1. Méthode de La puissance active instantanée avec (FPB)

Les résultats suivants représentent la réponse du filtre actif commandé par des régulateurs PI, dans le repère triphasé et basée sur la méthode de la puissance active instantanée avec un filtre passe-bas (FPB). Lors d'une variation de la résistance à la sortie de redresseur triphasée moitié de sa valeur initiale à $t=0.15$ s ($R_{c1}=44\Omega$ $R_{c2}=44/2\Omega$).

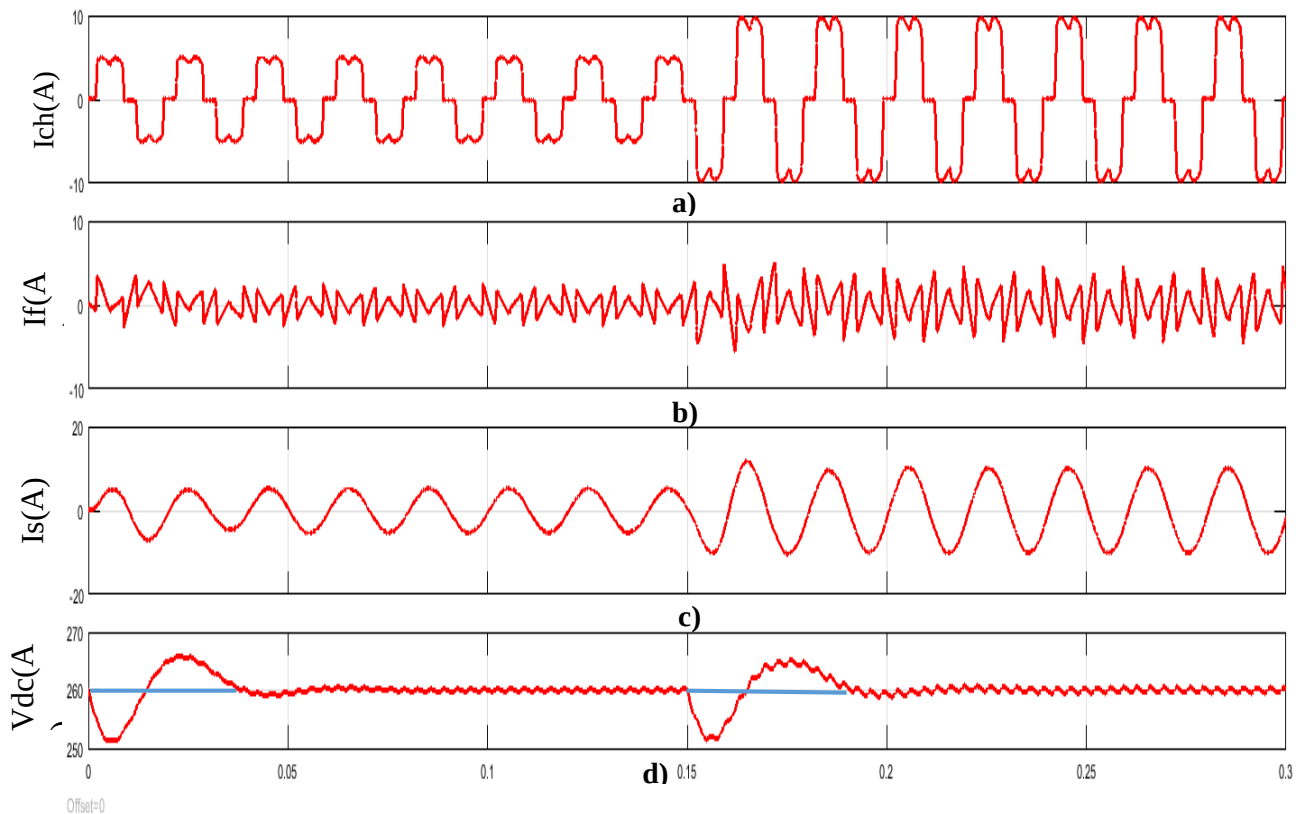


Figure III-16 I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, V_{dc} : la tension aux bornes condensateur.

❖ Interprétations des résultats

La figure (III.16) illustre la réponse dynamique d'un filtre actif parallèle triphasé utilisant la méthode de la puissance active instantanée avec un filtre passe-bas (FPB), en présence d'une variation de la charge au temps $t=0,15s$

- **La courbe (a)** représente le courant de charge $I_{ch}(t)$. On y observe une forme d'onde fortement déformée, typique d'une charge non linéaire. Après la variation de charge, l'amplitude du courant augmente sensiblement, ce qui est cohérent avec la réduction de la résistance de la charge à la moitié de sa valeur initiale. Cependant, la forme d'onde reste similaire, indiquant que la nature harmonique de la charge n'a pas changé, mais s'est intensifiée.
- **La courbe (b)** montre le courant injecté $I_f(t)$ par le filtre actif. Avant $t=0$, ce courant est stable bien que non parfaitement lisse, traduisant une compensation acceptable. Toutefois, après la variation, le courant injecté devient plus irrégulier, et une latence dans l'adaptation est clairement visible, ce qui souligne une limitation dans la réactivité de la méthode FPB.
- **La courbe (c)** correspond au courant de la source $I_s(t)$. Avant la variation, il est presque sinusoïdal, ce qui confirme l'efficacité du filtre en régime stable. Néanmoins, suite au changement de charge, le courant devient temporairement déformé, preuve que la compensation instantanée n'est pas assurée, et que le filtre ne parvient pas à suivre immédiatement la nouvelle référence.
- **La courbe (d)** illustre l'évolution de la tension continue $V_{dc}(t)$ aux bornes du condensateur. Elle est relativement stable avant la variation, avec de faibles ondulations. En revanche, à partir de $t=0,15s$, on observe une chute transitoire suivie d'un régime oscillant, traduisant un manque de régulation rapide au niveau du bus continu.

Ces résultats confirment que la méthode $(p-q) + (FPB)$ offre une bonne performance en régime permanent, mais présente une réponse dynamique limitée lors de variations rapides de la charge.

III.6.2. Méthode de référentiel synchrone avec FMV

Les résultats suivants représentent la réponse du filtre actif commandé par des régulateurs PI, dans le repère triphasé et basée sur la méthode de référentiel synchrone avec un filtre multi-variable FMV. Lors d'une variation de la résistance à la sortie de redresseur triphasée moitié de sa valeur initiale à $t=0.15s$ ($R_{c1}=44\Omega$ $R_{c2}=44/2\Omega$).

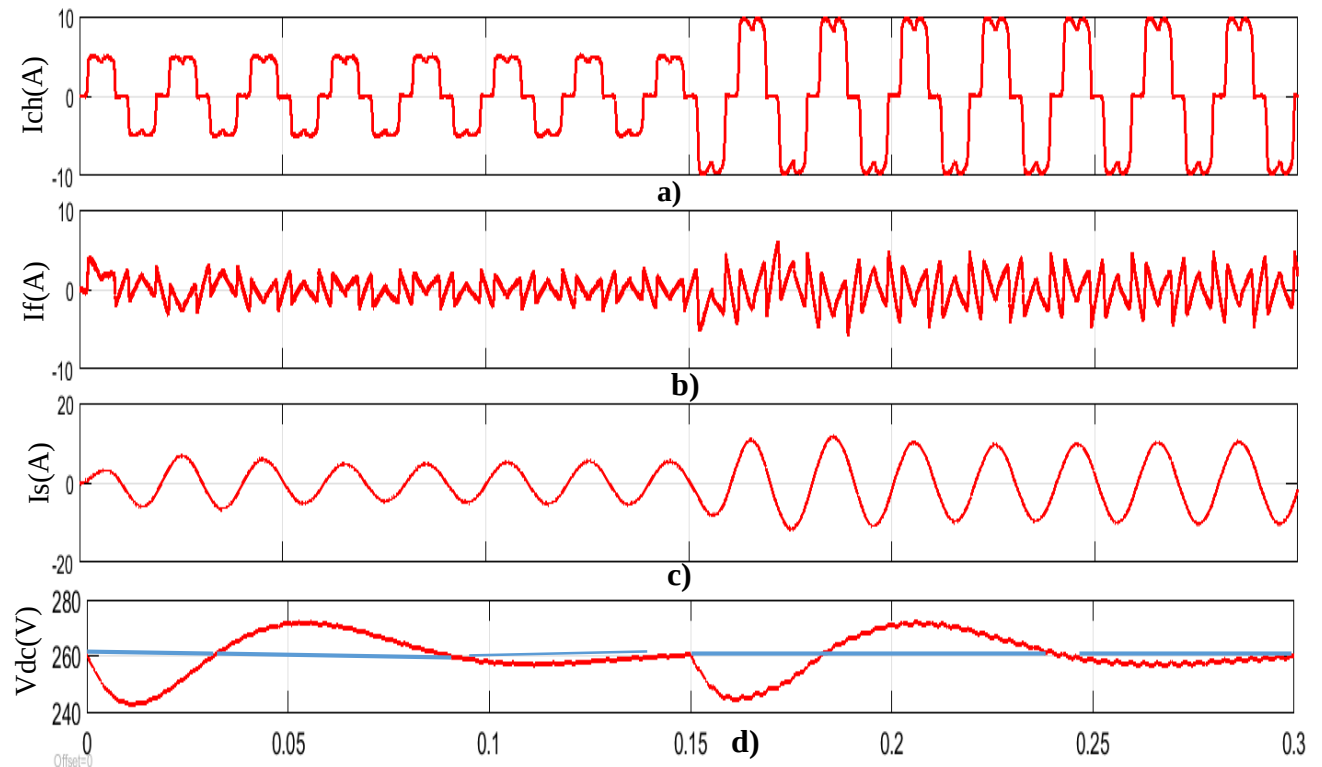


Figure III-17 Ich : Courant de charge, If : Courant de filtre actif, Is : Courant de source, Vdc : la tension aux bornes condensateur.

❖ Interprétations des résultats

La figure (III.16) illustre la réponse dynamique d'un filtre actif parallèle triphasé utilisant la méthode de référentiel synchrone (SRF) avec un filtre multi-variable (FMV), en présence d'une variation de la charge au temps $t = 0,15$ s.

- La courbe (a) représente le courant de charge $I_{ch}(t)$. On y observe une forme d'onde fortement déformée, caractéristique d'une charge non linéaire. Après la variation de charge, l'amplitude du courant augmente nettement, ce qui est cohérent avec la diminution de la résistance de la charge à la moitié de sa valeur initiale. La forme d'onde reste similaire, indiquant une intensification du contenu harmonique sans changement de nature.

- La courbe (b) montre le courant injecté $I_f(t)$ par le filtre actif. Avant $t = 0.15s$, ce courant est bien régulé, signe d'une bonne compensation. Après la variation, le courant s'ajuste rapidement avec peu d'irrégularités, ce qui reflète une excellente capacité d'adaptation de la méthode SRF combinée au filtre multi-variable.
- La courbe (c) correspond au courant de la source $I_s(t)$. Avant la variation, il est quasi sinusoïdal, traduisant un filtrage efficace. Après la variation de charge, la distorsion reste faible et temporaire, ce qui témoigne d'une réponse dynamique rapide et d'un bon maintien de la qualité du courant injecté au réseau.
- La courbe (d) illustre l'évolution de la tension continue $V_{dc}(t)$ aux bornes du condensateur. Elle reste relativement stable avant la variation avec de faibles ondulations. À partir de $t = 0,15 s$, une légère chute transitoire est observée, rapidement compensée, ce qui indique un bon comportement du système de régulation de la tension continue.

Ces résultats confirment que la méthode SRF combinée au filtre multi-variable (FMV) offre une excellente performance dynamique ainsi qu'un très bon comportement en régime permanent, assurant une compensation rapide et efficace face aux variations brusques de la charge

III.7.Variation des tensions du réseau :

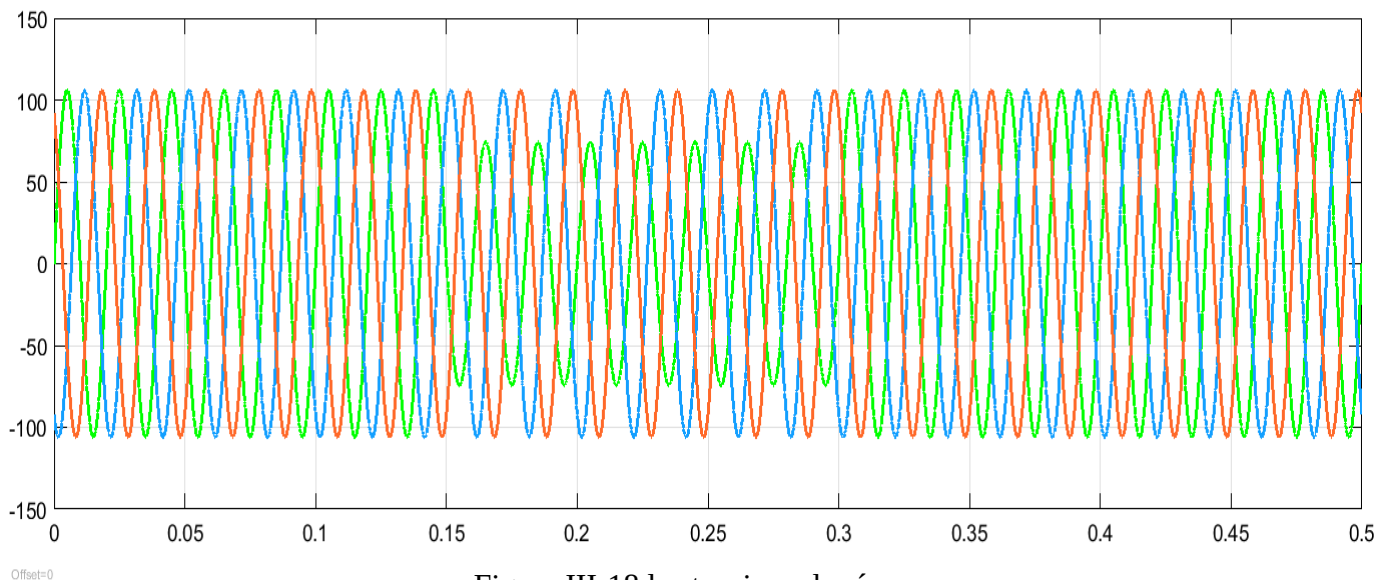


Figure III-18 les tensions de réseau

III.7.1. Méthode de La puissance active instantanée avec (FPB)

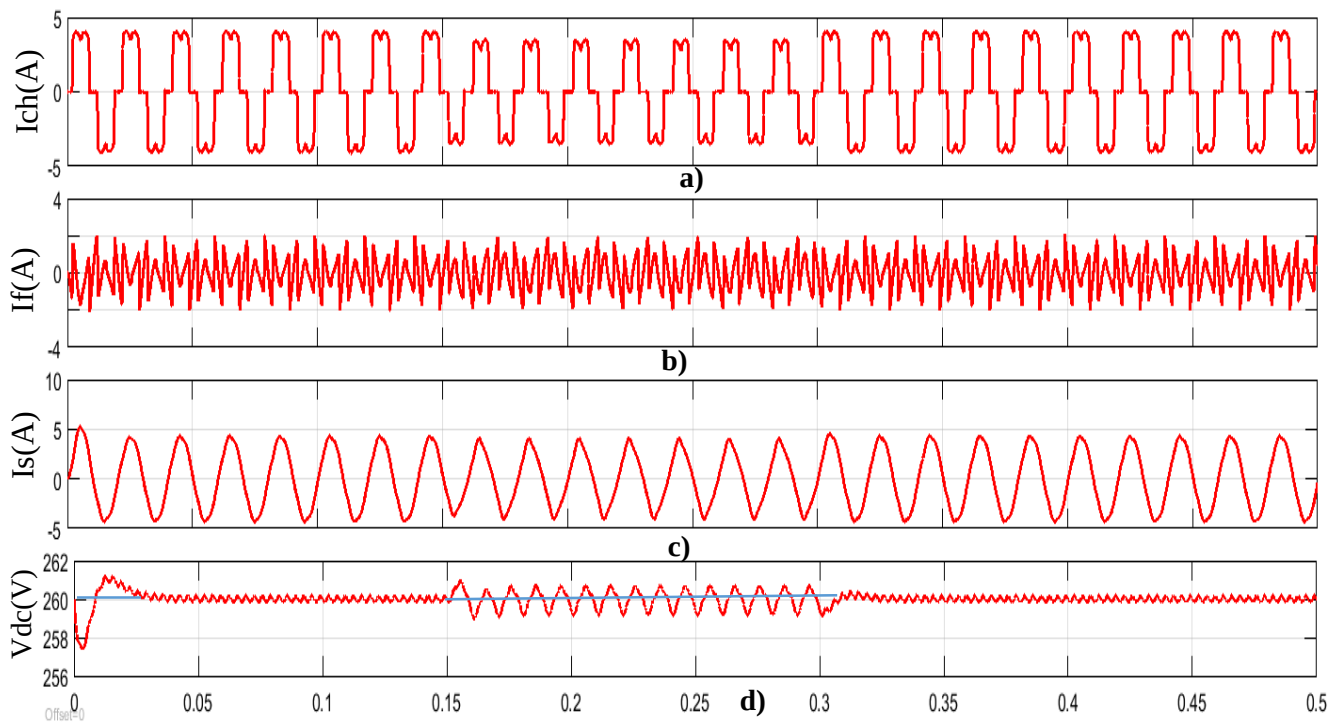


Figure III-19 Ich : Courant de charge, If : Courant de filtre actif, Is : Courant de source, Vdc : la tension aux bornes condensateur.

❖ Interprétations des résultats

La figure (III.19) présente le comportement d'un filtre actif parallèle triphasé basé sur la méthode de la puissance instantanée avec un filtre passe-bas (FPB), soumis à une variation partielle et temporaire des tensions de réseau. La figure (III.18) montre une modification de deux tensions de phase à $t = 0,15$ s, ce qui crée une situation de déséquilibre momentané, suivie d'un retour à l'état normal à $t = 0,3$ s. Cette perturbation a un impact direct sur la performance du système, comme on le voit dans la figure (III.19). Le courant de charge $I_{ch}(t)$ (la figure (III.19.a)), reste déformé, car il dépend de la nature non linéaire de la charge, mais son amplitude peut légèrement varier en réponse à la variation des tensions. Le courant injecté $I_f(t)$ (la figure (III.19.b)), devient instable entre $t = 0,15$ s et $t = 0,3$ s, traduisant une réponse limitée de la méthode $p-q + \text{FPB}$ aux déséquilibres transitoires. Le courant de source $I_s(t)$ (la figure (III.19.c)), qui était quasi sinusoïdal au départ, devient temporairement déformé pendant la perturbation, puis retrouve une forme plus régulière après $t = 0,3$ s. Enfin, la tension continue $V_{dc}(t)$ (la figure (III.19.d)), subit une baisse suivie d'oscillations pendant la perturbation, avec un retour progressif à la stabilité après le rétablissement des tensions.

III.7.2. Méthode de référentiel synchrone avec un filtre multi-variable FMV

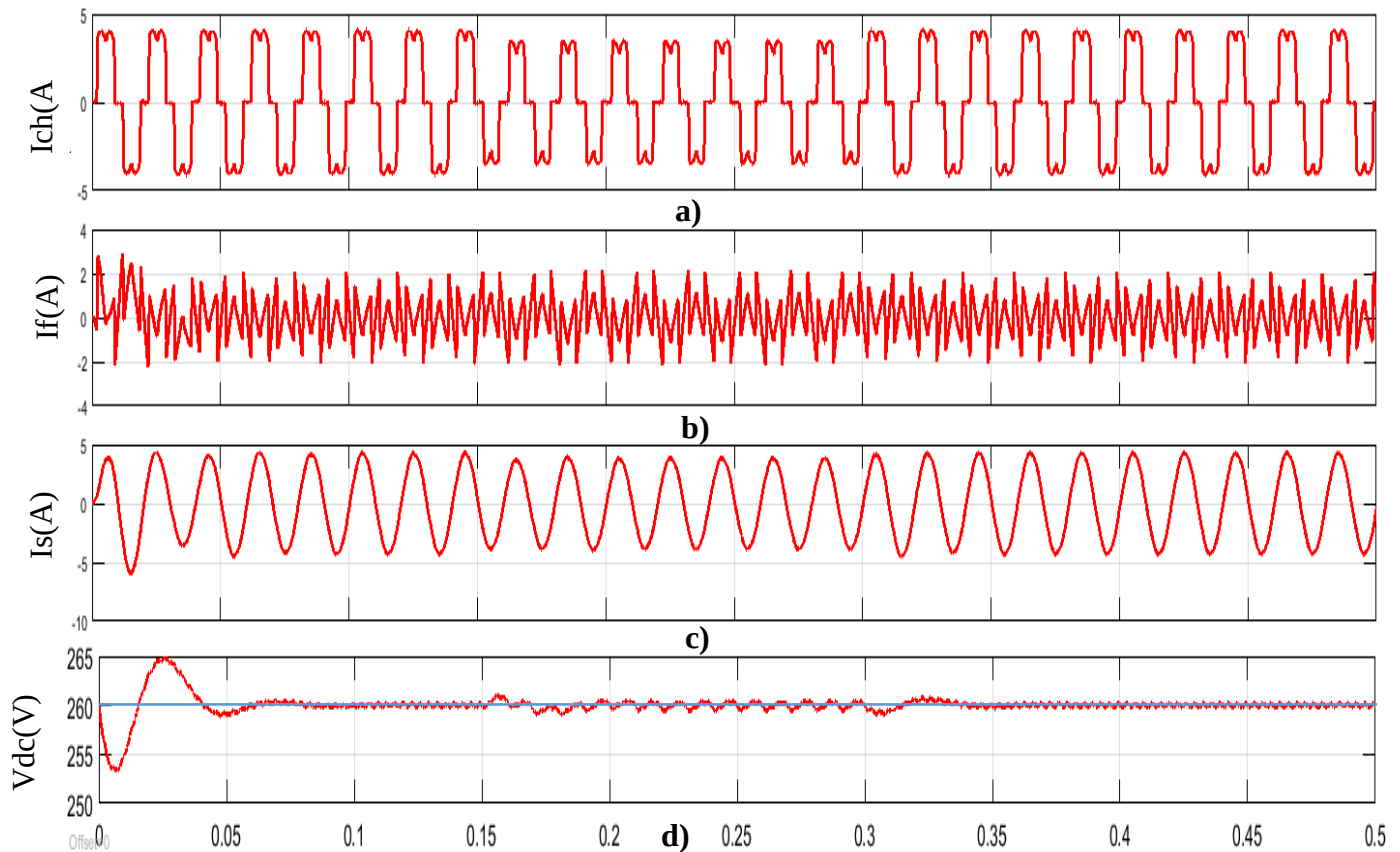


Figure III-20 I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, V_{dc} : la tension aux bornes condensateur.

❖ Interprétations des résultats

La figure (III.20) présente le comportement d'un filtre actif parallèle triphasé basé sur la méthode du référentiel synchrone avec un filtre multi-variable (FMV), soumis à une variation partielle et temporaire des tensions de réseau

Le courant de charge $I_{ch}(t)$ (la figure (III.20.a)), reste déformé en raison de la nature non linéaire de la charge, mais son amplitude répond de manière plus stable par rapport à la méthode précédente.

Le courant injecté $I_f(t)$ (la figure (III.20.b)), conserve une meilleure stabilité durant la perturbation, entre $t = 0,15$ s et $t = 0,3$ s, traduisant une capacité accrue de compensation des déséquilibres et des distorsions transitoires.

Le courant de source $I_s(t)$ (la figure (III.20.c)), reste quasi sinusoïdal pendant la perturbation, avec une récupération plus rapide et plus nette de sa forme après la perturbation.

Enfin, la tension continue $V_{dc}(t)$ (la figure (III.20.d), présente moins de fluctuations et d'oscillations pendant la perturbation, indiquant une régulation plus stable du bus DC.

Le tableau (III-2) complète et regroupe les résultats des simulations

Méthode	THD (%)	Ondulation V_{dc}	Temps de réponse	Stabilité	Commentaire
Puissances instantanées + FPB	2,75	Moyenne	Moyen	Bonne	Réduction correcte des harmoniques
SRF + FPB	2,54	Faible	Rapide	Bonne	Meilleure régulation tension
SRF + FMV	1,45	Très faible	Très rapide	Excellente	Meilleure compensation et stabilité

Tableau III-3 Tableau récapitulatif des performances des méthodes

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation et la simulation d'un système constitué d'un réseau triphasé, d'une charge non linéaire, et d'un filtre actif parallèle, en utilisant l'environnement Matlab Simulink. L'objectif principal est d'évaluer l'efficacité de différentes stratégies de commande pour compenser les harmoniques et améliorer la qualité de l'énergie électrique. Trois techniques ont été comparées : la méthode des puissances instantanées avec filtre passe-bas (FPB), celle du référentiel synchrone avec FPB, et enfin la méthode du référentiel synchrone combinée à un filtre multi-variable (FMV).

L'analyse des simulations montre que la méthode SRF + FMV présente la meilleure performance globale, avec un taux de distorsion harmonique (THD) réduit à 1,45%, une ondulation de la tension continue très faible, ainsi qu'un temps de réponse très rapide. Cette méthode assure également une excellente stabilité même lors de variations brusques de la charge ou de perturbations temporaires sur les tensions du réseau.

En comparaison, la méthode des puissances instantanées avec FPB, bien qu'efficace en régime stable avec un THD de 2,75%, montre une réponse dynamique limitée face aux variations rapides et déséquilibres transitoires, ce qui entraîne des fluctuations plus importantes de la tension continue et une compensation moins optimale.

La méthode SRF + FPB offre un compromis intéressant avec une meilleure régulation de la tension et un THD intermédiaire (2,54%), mais demeure moins performante que la combinaison SRF + FMV en termes de rapidité et d'adaptation aux perturbations.

Enfin, l'étude dynamique lors des variations de charge et des déséquilibres de réseau confirme la robustesse supérieure de la méthode SRF + FMV, qui garantit un maintien efficace de la qualité du courant injecté et une stabilisation rapide de la tension continue.

Ces résultats valident l'intérêt d'utiliser des filtres actifs parallèles commandés par des algorithmes avancés comme la méthode du référentiel synchrone avec filtre multi-variable pour répondre aux exigences croissantes de qualité de l'énergie dans les réseaux électriques modernes.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire nous nous sommes intéressés à l'étude des différentes stratégies de filtrage actif des harmoniques des réseaux électriques.

Nous avons structuré le contenu de notre travail en trois chapitres :

Le premier chapitre a été consacré à la problématique des perturbations ou distorsions harmoniques générés par les charges non linéaires connectées aux réseaux électriques. En outre, les origines et les effets néfastes de ces perturbations ont été abordés les normes en vigueur ont été présentées. Ces normes, notamment imposées aux distributeurs d'énergie, autorisent cependant la génération d'harmoniques dans certaines limites. En outre, le respect de ces normes motive l'étude et le développement de méthodes efficaces pour dépolluer les réseaux électriques, Après avoir recensé les origines et les conséquences des perturbations électriques des solutions de dépollution ont été présentées et le choix d'une solution basée sur les principes de filtrage actif type parallèle (FAP) a été retenu.

Dans le second chapitre, nous avons ensuite étudié des stratégies d'analyse et d'amélioration de commande du filtre actif parallèle. La performance de ce filtre dépend non seulement de la conception de son circuit de puissance, mais également de l'approche de contrôle adoptée pour la commande des courants. L'extraction des courants harmoniques a principalement été réalisée à l'aide de plusieurs méthodes, notamment la technique des puissances active et réactive instantanées, la méthode basée sur le référentiel synchrone avec des filtres multi-variables FMV et des filtres passe bas. Ces différentes stratégies visent à optimiser le filtrage harmonique et à garantir une meilleure qualité du réseau électrique.

Pour atteindre ces objectifs, il existe différentes stratégies de commande de l'onduleur de tension à deux niveaux, tels que la commande par hystérésis, la commande MLI sinusoïdale, la commande MLI vectorielle. Dans notre travail, nous avons opté pour la commande par hystérésis, cette technique est robuste et simple à mettre en œuvre, mais sa fréquence de commutation est variable et incontrôlable.

Dans le troisième chapitre, Les résultats de simulation montrent que le filtre actif parallèle dépollue efficacement le réseau électrique des harmoniques générées par la charge non linéaire.

Pour conclure, nous pouvons affirmer que les résultats obtenus, en particulier le taux de distorsion harmonique THD, sont satisfaisants et répondent bien aux limites imposées par les normes

internationales CEI et IEEE. Ainsi on voit bien l'efficacité des méthodes d'identifications des courants de références dans l'amélioration des performances du FAP proposé : La méthode des puissances instantanées réelles et imaginaires, la méthode du référentiel synchrone en utilisant des filtres multi-variables FMV pour l'extraction de la composante continue et des filtres passe bas.

Les résultats de simulation obtenus dans les différents cas sont satisfaisants et confirment l'étude théorique, et notamment l'efficacité et la robustesse du système proposé.

Références bibliographié

- [1] Abdeslam, D. O. (2005). Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension (Doctoral dissertation, Université de Haute Alsace-Mulhouse).
- [2] Kouzou, A. (2004). Compensation active des perturbations dans un réseau bas tension (Doctoral dissertation).
- [3] Omerir amar « simulation d'un filtre active parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant» Doctorat en Commande électrique universite de annaba 2007
- [4] Mohamed Muftah Abdusalam, « Structures et Stratégies de Commande des Filtres Actifs Parallèle et Hybride avec Validations Expérimentales », Thèse de Doctorat, Univ. H. Poincaré, Nancy-I, Mai 2008.
- [5] ZELLOUMA, L. (2006). *Filtrage actif parallele des harmoniques du courant genere par un pont redresseur triphase non commande* (Doctoral dissertation, Université de Annaba-Badji Mokhtar).
- [6] zellouma laid «compensation d'harmonique et de la puissance réactive à l'aide de filtre active parallèle» mémoire d'ingénieur El-Oued 2015
- [7] Alali, M. A. E. (2002). Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension :(Automatisation des systèmes de puissance électriques) | Thèses. Fr (Doctoral dissertation, Université Louis Pasteur (Strasbourg) (1971-2008)).
- [8] Steve BEAULIEU « Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique » Thèse de doctorat présenté à l'université de QUEBEC à CHICOUTIMI mai 2007.
- [9] BELHAOUCHET, N. (2019). Fonctionnement a fréquence de commutation constante des convertisseurs de puissance en utilisant des techniques de commande avancées application : amélioration de la qualité de l'énergie (Doctoral dissertation)
- [10] T. GOURAUD, « Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique ». Thèse, Nantes, France, (1997).
- [11] GHADBANE, I. (2016). Etude Et Réalisation D'un Filtre Actif Parallèle En Utilisant Différentes Stratégies De Contrôle (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).

- [12] ALLOUI, N. (2017). Contribution à l'amélioration de la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques en utilisant les Filtres Hybrides (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [13] H. Fujita, T. Yamasaki, et al, "A hybrid active filter for damping of harmonic resonance in industrial power systems ", IEEE Transactions on power Electronics, vol.15, No2, p.215- 222, (2000).
- [14] Steve BEAULIEU « Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique » Thèse de doctorat présenté à l'université de QUEBEC à CHICOUTIMI mai 2007.
- [15] M. Abdusalam, P. Poure and S. Saadate, "Hardware implementation of a three-phase active filter system with harmonic isolation based on SelfTuning-Filter". PESC, 39th IEEE Power Electronics Specialists Conference, Island of Rhodes, Greece, (2008).
- [16] Lounes, A. (2014). Etude et simulation d'un filtre actif parallèle (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [17] B. Singh, V. Verma, A. Chandra and K. Al-Haddad, « Hybrid filters for power improvement ». IEE, Proc-Gener. Transm. Distrib, Vol. 152, no. 3, (2005).
- [18] Mahni, T. (2017). Etude et Conception d'un Filtre Actif Parallèle Triphasé à Quatre Fils en vue de sa Commande par des Méthodes d'Intelligence Artificielle (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
- [19] H.Akagi "Active harmonic filters " Proceedings of the IEEE, vol. 93, No. 12, December 2005
- [20] Zellouma, L., Saad, S., Debbache, N., & Omeiri, A. (2008). Etude de l'auto-adaptivité du filtre actif parallèle aux variations de la charge. *Synthèse : Revue des Sciences et de la Technologie*, 17, 64-72
- [21] Boutraa Leila, « Filtrage actif des harmoniques des réseaux électriques », Thèse de Magister de l'Université de Batna, 2005.
- [22] Ould-Ouali Samy Hassani, « Etude et réalisation d'un filtre actif parallèle commandé par Logique Floue », Thèse de Magister de l'Ecole Militaire Polytechnique, 9 Janvier 2002.
- [23] Bettega, E., & Fiorina, J. N. (1996). *Harmoniques: convertisseurs propres et compensateurs actifs*. Schneider Electric España SA.
- [24] Chaoui, A. (2018). Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires (Doctoral dissertation).

-
- [25] Ouchen, S. (2017). Contribution à la commande directe de puissance dédiée au filtrage actif, associée à une source photovoltaïque (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
- [26] I. ETXEBERRIA, « Actionneurs réseaux dédiés à la qualité d'énergie ». Thèse de doctorat de l'INPG, Grenoble, France, (2003).
- [27] Ghadbane, I., & Benchouia, M. T. (2017). Experimental Comparative Study of Feedback Linearized Controller and Proportional Integral Controller of the DC Bus Voltage of Three-phase Shunt Active Power Filter. *Int. J. Pow. Electron. Drive Syst. IJPEDS*, 8, 1481-1493.
- [28] Ab. Hamadi, S. Rahmani and K. Al-Haddad, Fellow, « A Hybrid Passive Filter Configuration for VAR Control and Harmonic Compensation » International Symposium on Industrial Electronics, TIE-0235-2009.
- [29] H. Abdelhamid, "Contribution à l'étude des filtres de puissance utilisés pour améliorer la qualité de l'énergie dans le réseau électrique de distribution", Thèse de Doctorat, université de Québec, Septembre 2010.
- [30] B.Sing, K. Alhaddad, A. Chandra "A review of active filters for power quality improvement" ,IEEE transactions on industrial Electronics, vol 46 no 5, pp 960-971, October 1999.
- [31] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits" Proceeding 1983 international power electronics conference. Tokyo, Japon, pp. 1375-1386. 1983.
- [32] G.W. Chang, S. Tai-Chang, "A comparative study of active power filter reference compensation approaches", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 2, pp. 1017-1022, July 2002.
- [33] R. Ordonez, C. Karimi, M. Oueidat, D. Sadarnac, "Comparison of reference current generation techniques for non-active power compensation under distorted and unbalanced conditions", IECON'06, pp. 2297-2302, Nov. 2006.
- [33] Karimi, Shahram. "Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage" FPGA in the loop": application au filtre actif parallèle." H. Poincaré, Nancy-I (2009).
- [34] J. BALCELLS, M. LAMICH et G. CAPELLA. < LC Coupled Shunt Active Power Filter (APF): New Topology and Control Method >. Electrical Power Quality and Utilisation, 2007.

- [35] Riane, C. H. I. H. E. B., & ZEMIRLINE, N. (2019). Contribution à l'étude d'un filtre actif parallèle (Doctoral dissertation, Directeur : M. BELAROUCI Salim/Co-directeur : Mr Tahour Ahmed).
- [36] Abdeldj, K. M. (2017). Techniques de commande avancées d'un filtre actif parallèle pour améliorer la qualité d'énergie fournie au réseau autonome hybride (Doctoral dissertation, Université Ibn Khaldoun-Tiaret-).
- [37] Sahara, A. (2019). Étude et amélioration d'un filtre actif triphasé pour des charges non linéaires (Doctoral dissertation).
- [38] Mustapha, S. (2018). Contribution à l'étude des filtres actifs hybrides (Doctoral dissertation).
- [39] Electriques, R. (2014). Contribution à l'Etude des Performances des Onduleurs Multiniveaux sur les Réseaux de Distribution. UNIVERSITE DE BISKRA.