

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Electrotechnique

Spécialité : Commandes Electriques

Par :

RAFAA Fethi & YOUB Mohammed

Sujet

Etude et simulation d'un filtre actif de puissance parallèle à commande indirecte associé à un filtre actif de puissance série

Soutenu publiquement, le 21/06/2022, devant le jury composé de :

Mr. Mohamed Haithem LAZREG	M.A.B	Université de Tlemcen	Président
Mme. Sihem BOURI	M.C.A	Université de Tlemcen	Examineur
Mr. Mohamed Choukri BENHABIB	Professeur	Université de Tlemcen	Encadreur
Mr. Mohammed Amine BRIKCI NIGASSA	M.A.A	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

Nous tenons à remercier en premier Allah le tout puissant pour la volonté, la santé, le courage et la patience qu'il nous a donnés durant toutes ces longues années pour arriver au terme de ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreur Pr. Mohamed Choukri BENHABIB pour les efforts qu'il a déployé, pour nous aider, conseiller, encourager et corriger avec une grande gentillesse durant toute cette période.

Nous remercions également les membres du jury, Mr. Mohamed Haithem LAZREG d'avoir l'amabilité de présider le jury de notre mémoire et Mme. Sihem BOURI qui nous a fait l'honneur d'examiner notre modeste travail.

En dernier, nous tenons à remercier l'ensemble des collègues de notre promotion et d'exprimer notre gratitude à toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin durant notre travail.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents pour leur sacrifice et leur soutien tout le long de mon parcours. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Qu'Allah vous protège et vous accorde la santé.

A mes frères

A mes sœurs

A ma grande famille

A tous mes amis.

Fethi.

DEDICACE

Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, que Dieu les gardes et les protèges pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

*A mon meilleur ami **TIWRIRNE SAMIR** pour tout son aide dans mon parcours universitaire.*

A mes oncles et mes chers amis

A tous les amis d'études surtout ceux de la promotion électrotechnique.

Mohammed.

Nomenclature

FAP : Filtre Actif Parallèle.

FAS : Filtre Actif Série.

UPQC : Unified Power Quality Conditioner (condition universel d'énergie électrique).

THD : Taux de distorsion harmonique.

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion.

P-Q : Méthode de la puissance instantanés.

D-Q: Repère de Park.

PLL : Phase Locked Loop ou Boucle à Verrouillage de phase.

FPB : Low Passif Filter (filtre passe bas).

PI : Régulateur proportionnel intégral.

P : Puissance active.

S : Puissance apparente.

Q : Puissance réactive.

F_p : Facteur de puissance.

p : Puissance instantanée réelle.

q : Puissance instantanée imaginaire.

S : Opérateur de Laplace.

R_d : Résistance de la charge.

L_d : Inductance de la charge.

R_s : Résistance de source

L_s : Impédance de source

R_c : Résistance de ligne.

L_e : Impédance de ligne.

P_t : puissance nominale du transformateur.

R_t : Résistances internes du primaire et secondaire du transformateur.

L_t : Inductances internes du primaire et secondaire du transformateur.

R_m, X_m : branche magnétisante du transformateur.

V_s : Courant de source.

i_s : Courant de la source.

i_f : Courant de filtre.

i_{ch} : Courant de charge.

i_{ref} : Courant de référence.

R_f : Résistance de filtre de sortie.

L_f : Inductance de filtre de sortie.

V_{dc} : Tensions alternatives de l'onduleur.

C_{dc} : Condensateur de stockage.

α, β, θ : Les repères homopolaires du système triphasé de courant ou de tension.

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor

MOSFET : Métal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.

GTO : Gate turn off thyristor.

Table de matière

Liste des figures.....	VIII
Introduction générale.....	1
Chapitre I :.....	3
Perturbations des réseaux électriques et leurs solutions.....	3
I Introduction	4
I.1 Perturbations.....	4
I.2 Type de perturbation électrique et leur définition, leur origine et leur conséquence	5
a. Creux de tension.....	5
b. Coupures brèves	5
c. Variation de fréquence	6
d. Variation de la tension.....	6
e. Déséquilibre de système triphasé	7
I.3 Perturbation harmonique.....	7
I.4 Caractéristique des perturbations harmoniques	9
I.5 Solution pour diminuer les effets des perturbations harmoniques.....	10
I.5.1 Solutions traditionnelles.....	11
I.5.2 Solutions modernes.....	11
I.6 Conclusion	14
Chapitre II :	15
Etude des filtres actifs de puissance série et parallèle	15
II Introduction	16
II.1 Principe de fonctionnement.....	16
II.1.1 Filtre Actif de puissance Série.....	16
II.1.2 Filtre Actif de puissance parallèle.....	17
II.2 Etude de la partie puissance du filtre actif de puissance	18
II.3 Présentation des stratégies de commande.....	19
II.3.1 Identification des courants harmoniques.....	19
II.3.2 Identification des tensions harmoniques	26
II.4 Filtre Actif Parallèle Direct.....	27

II.5	Conclusion	33
Chapitre III :	34
Le conditionneur de puissance (UPQC)	34
III	Introduction	35
III.1	Simulation d'un filtre actif de puissance parallèle	35
III.2	Simulation d'un filtre actif de puissance série	40
III.3	Simulation d'un UPQC	43
III.4	Conclusion	51
Conclusion générale	52

Liste des figures

Figure I 1: Creux de tension	5
Figure I 2: Variation de fréquence.....	6
Figure I 3: Variation de tension.....	6
Figure I 4: Exemple de régime triphasé déséquilibré	7
Figure I 5: Exemple de Distorsion harmonique.....	7
Figure I 6: Filtre série placée sur le réseau.....	11
Figure I 7: Filtre passif amorti placée sur le réseau.....	11
Figure I 8: Filtre hybride parallèle.....	12
Figure I 9: Filtre actif série.....	13
Figure I 10: Filtre actif parallèle.....	13
Figure I 11: Conditionneur active de puissance	14
Figure II 1 : Schéma de principe d'un filtre actif de puissance série.	16
Figure II 2: Principe du FAP.	17
Figure II 3: Schéma de principe de commande directe.	18
Figure II 4: Schéma de principe de commande indirecte.	18
Figure II 5: Schéma de principe de la méthode des puissances instantanées.	21
Figure II 6: Commande indirecte méthode des puissances instantanées.	23
Figure II 7: Commande directe d'un filtre actif de puissance par la méthode (SFR).....	25
Figure II 8: Commande indirecte d'un filtre actif de puissance appliquant (SFR).....	26
Figure II 9 : Stratégie du commande filtre actif de puissance série.....	27
Figure II 10: Schéma de filtre actif puissance parallèle(direct).....	27
Figure II 11: commande DQ du filtre actif de puissance parallèle (direct).	28
Figure II 12: Commande hystérésis.....	28
Figure II 13: Tension de source.....	28
Figure II 14: Courant de charge.....	29
Figure II 15: Courant injecté par le FAP de la phase1.	29
Figure II 16: Courant de source après filtrage.....	29
Figure II 17: Tension aux bornes du condensateur.....	29
Figure II 18: Courant de charge phase1 et leur spectre de THD avant filtrage.	29
Figure II 19: Courant de source phase1 et son spectre et le THD après filtrage.	30
Figure II 20: Schéma de filtre actif puissance parallèle (direct).....	30
Figure II 21: commande PQ du filtre actif de puissance parallèle (direct).....	31
Figure II 22: Commande hystérésis.....	31
Figure II 23: Tension de source.....	31
Figure II 24: Courant de charge.....	32
Figure II 25: Courant injecté par le FAP de la phase1.	32
Figure II 26: Courant de source après filtrage.....	32
Figure II 27: Courant de charge phase1 et leur spectre de THD avant filtrage.	32
Figure II 28: Courant de source phase1 et son spectre et le THD après filtrage.	33
Figure III 1: Source et charge connecté au réseau triphasé.	35
Figure III 2: Tension de source des trois phases.	36

Figure III 3: Courant de charge de la phase 1.....	36
Figure III 4: FFT du courant de charge de la phase 1.....	36
Figure III 5: Schéma de filtre actif puissance parallèle.....	37
Figure III 6: Commande indirecte discrète du FAP.....	38
Figure III 7: Filtre passe bas FAP.....	38
Figure III 8: Régulateur PI du FAP.....	38
Figure III 9: Commande MLI.....	38
Figure III 10: Tension de source.....	39
Figure III 11: Courant de charge.....	39
Figure III 12 : Courant injecté par le FAP de la phase1.....	39
Figure III 13: Courant de source après filtrage.....	39
Figure III 14: Tension aux bornes du condensateur.....	40
Figure III 15: Courant de charge phase1 et leur spectre de THD avant filtrage.....	40
Figure III 16: Courant de source phase1 et son spectre et le THD après filtrage.....	40
Figure III 17: Schéma de filtre actif puissance série discrète.....	41
Figure III 18: Commande de la puissance série discrète.....	41
Figure III 19: Commande hystérésis.....	42
Figure III 20: (a) tension de source.(b) tension injecté par le filtre.(c) tension de charge.....	42
Figure III 21: courant de source.....	43
Figure III 22: Schéma d'un UPQC discrète.....	43
Figure III 23: Commande p-q discrète d'un UPQC.....	44
Figure III 24: Commande de la puissance série discrète.....	44
Figure III 25: (a) Tension de source. (b) Tension injecté par le FAP série. (c) Tension de charge.....	45
Figure III 26: Courant de charge.....	45
Figure III 27: Courant injecté par le FAP parallèle.....	45
Figure III 28: Courant de source.....	46
Figure III 29: Tension aux bornes du condensateur.....	46
Figure III 30: Courant de chargephase1 et leur spectre de THD avant filtrage.....	46
Figure III 31: Courant de source phase1 et leur spectre de THD après filtrage.....	47
Figure III 32: Schéma d'un UPQC discrète.....	47
Figure III 33: Commande d-q discrète d'un UPQC.....	48
Figure III 34: Commande de la puissance série discrète.....	48
Figure III 35: (a) Tension de source. (b) Tension injecté par le FAP série. (c) Tension de charge.....	49
Figure III 36: Courant de charge.....	49
Figure III 37: Courant injecté par le FAP parallèle.....	49
Figure III 38: Courant de source.....	50
Figure III 39 : Tension aux bornes du condensateur.....	50
Figure III 40: Courant de chargephase1 et leur spectre de THD avant filtrage.....	50
Figure III 41: Courant de source phase1 et leur spectre de THD après filtrage.....	51

Introduction générale

Aujourd'hui, la situation au niveau des réseaux d'énergie électrique est devenue très préoccupante car la qualité du courant dans les installations électriques se dégrade incontestablement. Elle devient donc une préoccupation importante pour les distributeurs de cette énergie et pour leurs clients. Cette dégradation découle directement de la prolifération des charges qui consomment un courant non sinusoïdal, appelées « charges non linéaires ». Ce type de charge est utilisé pour assurer la conversion, la variation et la régulation du courant électrique dans les installations commerciales, industrielles et résidentielles. D'autre part, la production d'énergie électrique et de distribution sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, contribue à fournir l'énergie nécessaire pour différentes charges sur le réseau électrique. Cependant lorsque l'onde de tension n'est pas sinusoïdale, on rencontre des perturbations qui peuvent affecter le bon fonctionnement de nombreux équipements et de charges raccordés sur le réseau. Dans de telles circonstances, il peut survenir des problèmes de compatibilité électromagnétique qui peuvent survenir entre ces éléments connectés au réseau [27].

Précédemment, les filtres passifs étaient utilisés pour compensation les harmoniques et les distorsions de tension, mais en raison de leurs nombreux inconvénients, ils ne sont de moins en moins utilisés de nos jours car il comporte beaucoup d'inconvénient. Pour contourner ces inconvénients, les chercheurs activant dans le domaine du filtrage de puissance ont développés ces dernières années des systèmes de filtrage moderne communément appelés Filtre active de puissance (APF). Ces dispositifs présentent un moyen efficace pour la dépollution des réseaux électriques. Ils compensent ces perturbations en réinjectant en opposition de phase sur le réseau les harmoniques et le réactif du courant consommé par la charge afin que le réseau n'est plus qu'à fournir un courant sinusoïdal et en phase avec la tension. Parmi ces dispositifs qui répondent le mieux aux contraintes industrielles d'aujourd'hui est le filtre actif de puissance parallèle, série et la combinaison parallèle-série aussi appelés UPQC. Le filtre actif de puissance parallèle peut être utilisé pour compenser les courants harmoniques et les déséquilibres de même que la puissance réactive. Le filtre actif de puissance série peut compenser à la fois les tensions harmoniques et les tensions déséquilibrées, et les creux de tension.

Dans ce mémoire nous nous proposons d'étudier et de présenter la simulation de l'association d'un filtre actif de puissance parallèle avec un filtre actif de puissance série, pour élimination de l'ensemble des perturbations courants et tensions qui peuvent être généré par des charges non linéaires.

Ainsi, dans le premier chapitre nous allons présenter les perturbations du réseau électrique et leurs types, leurs origines et leurs conséquences. Après nous citerons les solutions pour la dépollution des réseaux.

Dans le deuxième chapitre nous parlerons du filtre actif de puissance parallèle et le filtre actif de puissance série séparément et leurs principes de fonctionnement, leurs structures et les stratégies de commande utilisée

Le troisième chapitre présentera la combinaison des filtres actif de puissance parallèle-série et comportera les simulations de filtre actif de puissance parallèle, filtre actif de puissance série et la simulation de cette association, avec les interprétations des résultats obtenues.

Chapitre I :
Perturbations des réseaux
électriques et leurs
solutions

I Introduction

L'énergie électrique est un produit indispensable et très différent de tous les autres produits. Elle parvient aux clients par l'intermédiaire d'un système électrique qui comprend la production et les réseaux de transport et de distribution. Pour maintenir ce système électrique stable, il est nécessaire de disposer d'une capacité de production adaptée, à chaque instant, à la demande.

Garantir la qualité de l'énergie fournie aux clients n'est donc pas une tâche facile et il est très difficile de retirer de la chaîne d'approvisionnement de l'électricité non conforme ou d'imaginer qu'elle puisse être refusée par les clients.

Une alimentation électrique parfaite serait un approvisionnement toujours disponible, toujours situé dans les tolérances de tension et de fréquence, possédant une onde sinusoïdale pure et exempte de bruit. L'ampleur de la déviation tolérée par rapport à cette perfection dépend du type d'équipement et de la façon de l'utiliser.

L'utilisation croissante d'équipements électroniques susceptibles de provoquer des perturbations électromagnétiques, ou susceptibles d'être sensibles à ces phénomènes, ce qui suscite un intérêt accru pour la qualité de l'énergie ces dernières années [1].

Dans ce chapitre nous allons présenter les différentes perturbations existant sur le réseau électrique et les solutions qui existent pour les traiter.

I.1 Perturbations

La qualité de l'énergie peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous la forme de divers troubles affectant le réseau électrique, tel que :

- *Les variations de l'amplitude* : il ne s'agit pas des variations lentes de tension qui sont corrigées par les transformateurs de réglage en charge, mais de variations rapides de tension ou de creux de tension se présentant souvent sous forme d'à-coups brusques. Les creux de tension peuvent être soit isolés, soit plus ou moins répétitifs, de forme régulière ou non ;
- *La modification de la forme d'onde de la tension* : cette onde n'est alors plus sinusoïdale, et peut être considérée comme représentable par une onde fondamentale à 50 Hz, associée soit à des harmoniques de fréquence multiple entier de 50 Hz, soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque ;
- *La dissymétrie du système triphasé* : appelé aussi déséquilibre. On peut aussi mentionner un type particulier de perturbations difficile à classer puisqu'il concerne tout à la fois l'amplitude et la forme d'onde : ce sont les variations transitoires d'amplitudes dont la durée est inférieure à 10 ms.
- *Les fluctuations de la fréquence à 50 Hz* : elles sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles, par exemple certains défauts graves du réseau, au niveau de la production ou du transport ;
- *La modification de la forme d'onde de la tension* : cette onde n'est alors plus sinusoïdale, et peut être considérée comme représentable par une onde fondamentale à 50 Hz, associée soit à des harmoniques de fréquence multiple entier de 50 Hz, soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque [2].

I.2 Type de perturbation électrique et leur définition, leur origine et leur conséquence

Les réseaux électriques sont fortement pollués et soumis à de multiples agressions dues aux perturbations électriques, qui peuvent être définies en cinq catégories, à savoir :

- Creux de tension
- Coupures brèves
- Variation de fréquence
- Variation de la tension
- Déséquilibre de système triphasé

a. Creux de tension

Un creux de tension est une diminution brusque de la tension de fourniture. Cette diminution, située entre 10% et 90% de la tension nominale Un , est suivie d'un établissement de la tension après un court laps de temps. Un creux de tension peut durer de 10ms à 3 mn [3].

Il existe deux types de phénomène à l'origine des creux de tension :

- Celles liées à des phénomènes aléatoires, tels que la foudre ou tout court-circuit ponctuel sur les réseaux de distribution, ou les réseaux internes des clients (défaillance d'isolement, endommagement des câbles, chute de dérivations sur les lignes aériennes).
- Celles résultant du fonctionnement d'appareils à charges variables ou du fonctionnement d'appareils nécessitant un courant élevé au démarrage (moteur, transformateur, etc.).

Le creux de tension provoque l'arrêt d'équipements, les pertes de production et les dégâts.

Dans la basse tension, les creux de tension se distinguent par son amplitude et sa durée. Il est monophasé, biphasé ou triphasé selon le nombre de phases concernées [4].

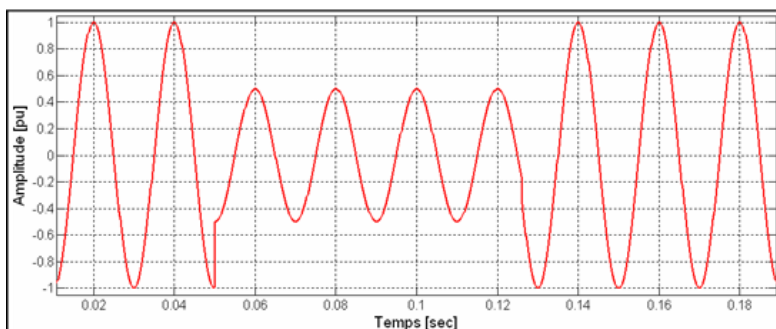


Figure I 1: Creux de tension

b. Coupures brèves

Son amplitude est inférieure à 0,1 pu, leur origine sont les courts circuits qui provoquent une surintensité dans les lignes jusqu'à 50 fois le courant nominal I , et une chute de tension jusqu'à la valeur zéro.

Les conséquences résultantes aux coupures brèves sont par exemple l'arrêt d'équipement et les pertes de production [5].

c. Variation de fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome. Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstance exceptionnelle, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau [6]. La valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50\text{Hz} \pm 1\%$ dans les conditions d'exploitation [7].

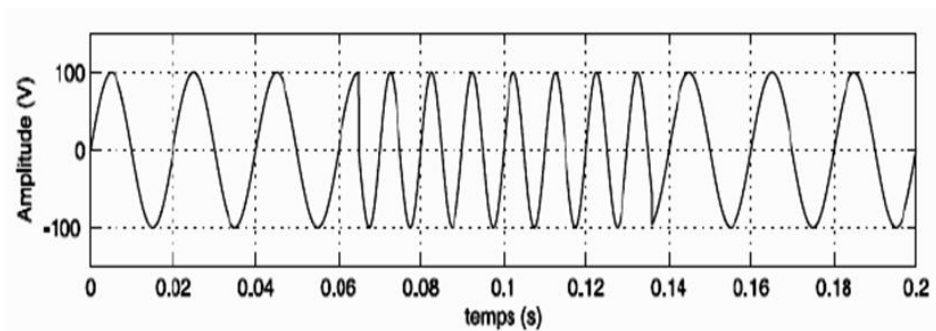


Figure I 2: Variation de fréquence.

d. Variation de la tension

L'allumage ou l'extinction d'appareils électriques et le fonctionnement de certaines charges à puissance variable entraînent des différences de tension qui apparaissent sous deux formes principales [8]:

Des variations rapides de tension conduisant à une composition spectrale de fréquence dans la bande 0,5Hz à 25Hz. Ces variations sont dues aux charges dont la puissance absorbée fluctue de manière rapide, tels que les fours à arc, les machines à souder, les moteurs à démarrages fréquents. Ces fluctuations rapides sont particulièrement ressenties sur le flux lumineux des lampes car elles provoquent un papillotement de la lumière, connu aussi comme flicker et qui est fort désagréable pour les consommateurs [8].

Des variations lentes de tension se produisant à des intervalles de temps supérieurs à quelques secondes. Ces variations sont dues principalement au branchement et débranchement des charges et en général ne dépassent pas les $\pm 10\%$ de la tension nominale. Ils ne causent pas de préjudice pour la plupart des équipements électriques [8].

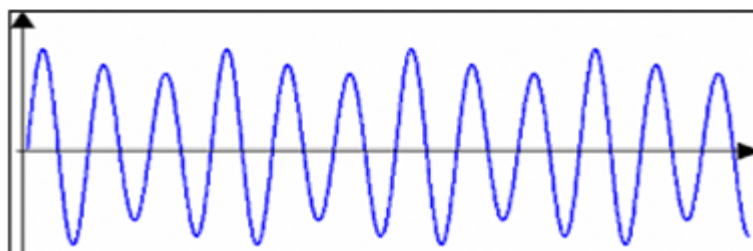


Figure I 3: Variation de tension

e. Déséquilibre de système triphasé

Un système triphasé déséquilibré contient trois grandeurs de même nature et de même pulsation qui forment un système triphasé équilibré lorsqu'elles ont la même amplitude et la même fréquence, déphasées entre elles de $\pm 120^\circ$. Lorsque les grandeurs ne vérifient pas ces conditions de phase, de fréquence et d'amplitude, à cause d'une installation déséquilibrées (traction ferroviaire...) on obtient le déséquilibre du système triphasé.

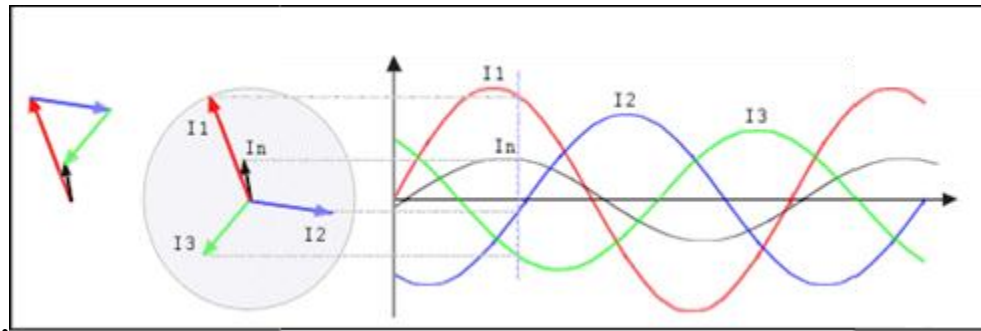


Figure I 4: Exemple de régime triphasé déséquilibré

On parle d'un déséquilibre d'amplitude lorsque les trois tensions n'ont pas la même valeur efficace, et d'un déséquilibre de phase lorsque le déphasage entre les trois phases successives n'est pas de 120° [9].

Lorsque le système triphasé est déséquilibré, les conséquences sont un échauffement des machines tournantes, vibration et dysfonctionnement des protections.

I.3 Perturbation harmonique

Les harmoniques sont des composantes dont la fréquence est un multiple de la fondamentale (50 Hz), qui provoquent une distorsion de l'onde sinusoïdale. Ils sont principalement dus à des installations non linéaires telles que les convertisseurs ou les gradateurs électroniques, les fours à arc, etc. Leur amplitude peut être amplifiée par des phénomènes de résonance, en particulier lorsque des batteries de condensateurs ne sont pas installées avec les précautions nécessaires [9].

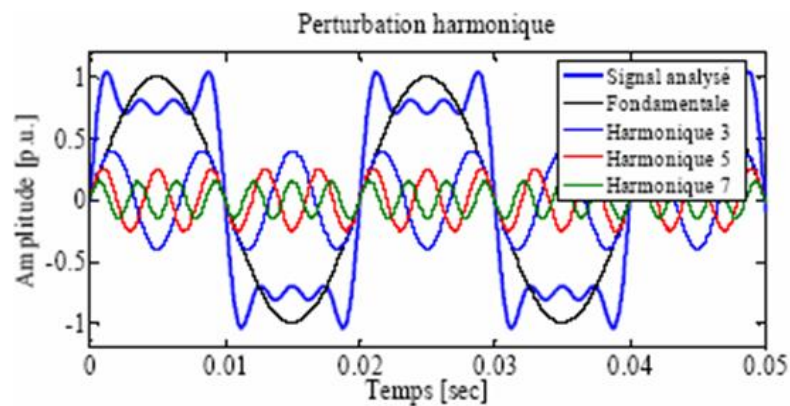


Figure I 5: Exemple de Distorsion harmonique.

Des niveaux élevés d'harmoniques peuvent causer un échauffement excessif de certains équipements, par exemple : de condensateur soude machines tournantes, et peuvent perturber le fonctionnement des systèmes électroniques. Dans les immeubles de bureaux, avec un grand nombre d'ordinateurs, un éclairage fluorescent, la surcharge du neutre par courants harmoniques homopolaires (principalement h3) est devenue courante (courant de valeur efficace supérieure à celle des courants de phase, alors que la section de cuivre est moindre). D'autres phénomènes moins fréquents ont déjà été observés, par exemple la destruction de disjoncteurs (augmentation du dv/dt) [10].

Les inter-harmoniques sont les composantes dont la fréquence n'est pas un multiple entier de la fondamentale. Ils sont le plus souvent dus à des installations produisant des harmoniques rapidement variables, tels que les cyclo-convertisseurs, fours à arc, variateurs de vitesse employés dans certaines conditions (la « modulation » des harmoniques provoque l'apparition de « bandes latérales » à des fréquences intermédiaires); la présence de filtres d'harmoniques peut considérablement aggraver le phénomène (amplification de fréquences intermédiaires ; phénomènes d'instabilité dans les convertisseurs...).

Ses conséquences sont des variations de la valeur crête de la sinusoïde et des déplacements de son point de passage par zéro ; ils sont de ce fait plus gênants que les harmoniques ordinaires et justifient des limitations plus sévères [10].

Les charges non linéaires sont des sources d'émission des harmoniques, par exemple les convertisseurs statiques, les fours à arc et à induction, les téléviseurs, les lampes fluorescentes et les alimentations à découpage. Les effets des harmoniques sont de trois catégories, à savoir :

- **Effets à terme**

Les effets à terme se manifestent après une exposition longue aux perturbations harmoniques. L'effet d'échauffement est le plus important car il cause une fatigue prématurée du matériel des lignes et amènent à un déclassement des équipements. Nous trouvons de plus un [11] :

- *Echauffement des câbles et des équipements* : Ces effets peuvent être à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (de quelques heures à quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être, le siège dû au sur échauffement du neutre et les éléments bobinés (transformateurs, moteurs, etc..).
- *Echauffements des pertes supplémentaires des machines et des transformateurs* : Ils sont causés par les pertes aux stators des machines et surtout au niveau des circuits du rotor (amortisseurs, cages, circuits magnétisants) à cause des différences importantes de vitesses entre les champs tournants inducteurs et le rotor. Les harmoniques génèrent aussi des pertes supplémentaires dans les transformateurs, par effet joule dans les enroulements, accentuées par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courant de Foucault dans les circuits magnétiques.
- *Echauffement des condensateurs* : à cause des pertes dues au phénomène d'hystérésis dans le diélectrique, qui peuvent conduire au claquage.
- *Echauffement des câbles et des équipements* : Ces effets peuvent être à long terme (de quelques heures à quelques années) ou à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) et concernent les câbles qui peuvent être, le siège dû au sur échauffement du neutre et des éléments bobinés (moteurs, transformateurs, etc...).

- **Effets instantanés**

Les effets instantanés apparaissent immédiatement dans certains appareillages, tel que :

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

- **Autres effets**

- ❖ Influence sur les condensateurs des réseaux.
- ❖ Bruit additionnel des moteurs et d'autres appareils ;
- ❖ Influence sur le fonctionnement des redresseurs ;
- ❖ Pertes supplémentaires dans les condensateurs, les transformateurs ;
- ❖ Influence sur les câbles de HT (dégradation du matériel isolant, diminution de la durée de vie du câble) ;
- ❖ Influence sur la télécommande dans les réseaux ;
- ❖ Influence sur les transformateurs du réseau (augmentation des pertes à vide à cause de l'effet particulier des courants harmoniques) ;
- ❖ Dégradation du rendement énergétique de l'installation (pertes d'énergie) [11].

I.4 Caractéristique des perturbations harmoniques

Différentes grandeurs sont définies pour caractériser la distorsion. Le facteur de puissance et le taux global de distorsion harmonique (THD) et le facteur de crête, sont les plus employés pour quantifier respectivement la consommation de puissance réactive et les perturbations harmoniques.

- **Taux de distorsion harmoniques (THD)**

L'étude se limite au cas où le courant absorbé par la charge est entaché de composantes harmoniques et où la source de tension est sinusoïdale. Dans ces conditions, le taux global de distorsion harmonique est bien adapté pour quantifier le degré de pollution harmonique sur les réseaux électriques. Le THD caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de courant qui le déforme et s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale. Il est donné par l'expression suivante [12] :

$$\text{THD}(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n (X_i)^2}}{X_1} \quad \text{I-1}$$

Avec :

X_1 : Valeur efficace du courant fondamental ;

X_i : Valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant ;

Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 et 2000 Hz. Soit de l'harmonique de rang 2 jusqu'à l'harmonique de rang 40 [12].

- **Facteur de puissance**

Le facteur de puissance $\cos \varphi$ est exprimé par une relation entre la puissance apparente S et la puissance active P . Les équipements électriques sont dimensionnés, généralement, pour les valeurs nominales de la tension et du courant. Un faible facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements [11].

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

Où Q : c'est la puissance réactive

Dans le cas de la présence des harmoniques, la puissance déformante D est due aux harmoniques de courant. L'expression du facteur de puissance devient alors comme suit :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{(P^2+Q^2+D^2)}} \quad \text{I-3}$$

- **Facteur de crête**

Le facteur de crête est la relation entre la valeur de crête du courant ou de la tension avec la valeur efficace.

$$F_c = \frac{X_{max}}{X_{eff}} \quad \text{I-4}$$

Ce facteur est égal à $\sqrt{2}$ si le signal est sinusoïdal.

Ce facteur peut être supérieur ou inférieur à $\sqrt{2}$ Si le signal est non sinusoïdal. Ce facteur est plus particulièrement utile pour attirer l'attention sur la présence de valeurs de crête exceptionnelles par rapport à la valeur efficace. Un facteur de crête très élevé signifie des surintensités ponctuelles importantes. Ces surintensités, détectées par les dispositifs de protections, peuvent être à l'origine de déclenchements intempestifs [13].

I.5 Solution pour diminuer les effets des perturbations harmoniques

On peut regrouper les solutions visant à réduire les perturbations harmoniques en deux groupes : les solutions traditionnelles et les solutions modernes.

I.5.1 Solutions traditionnelles

Le filtre passif, est une des solutions. Son principe consiste à insérer en amont de la charge, un ou plusieurs circuits accordés sur les harmoniques à rejeter. Ainsi, pour filtrer un courant à une fréquence particulière, un filtre résonnant est placé en parallèle sur le réseau, figure (I-6). Pour atténuer toute une bande de fréquences, on utilise un filtre passif amorti, comme le montre la figure (I-7). Le dimensionnement de ces filtres dépend des harmoniques à éliminer, des performances exigées, de la structure du réseau et de la nature des récepteurs. Il est en général plus aisé de rejeter les harmoniques de rang élevé que celles de rang faible [14] et [15].

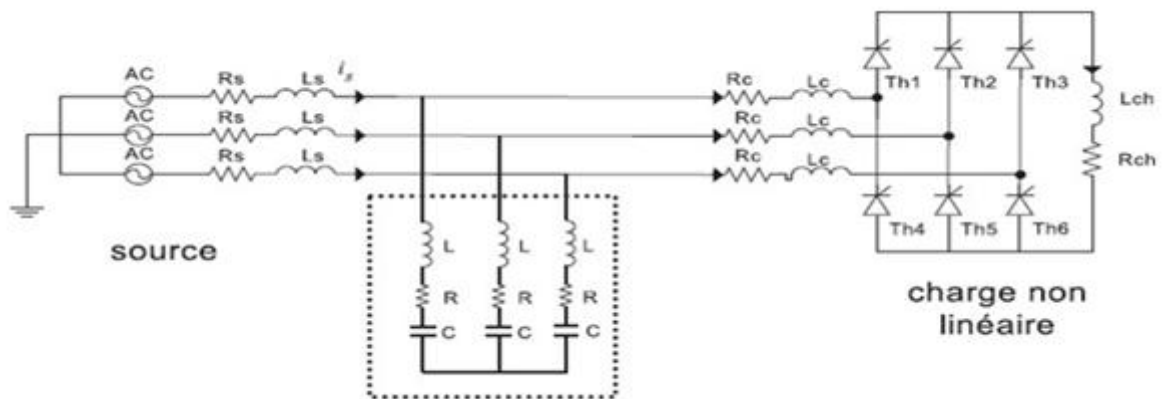


Figure I 6: Filtre passif résonnant placée sur le réseau.

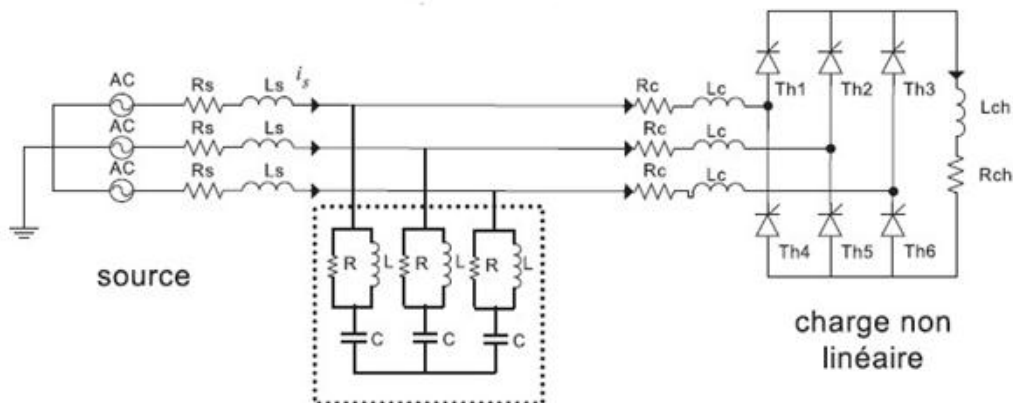


Figure I 7: Filtre passif amorti placée sur le réseau.

I.5.2 Solutions modernes

Les progrès remarquables réalisés dans le domaine des composants semi-conducteurs, tels que les IGBTs, les GTOs et les MOSFETs, ainsi que la maîtrise de leur mise en œuvre, et l'existence de nouvelles méthodes de traitement du signal analogique et numérique, ont permis l'émergence de

solutions modernes et efficaces pour traiter les différentes perturbations (puissance réactive, harmoniques, fluctuations, creux de tension) affectant les systèmes électriques.

Les filtres actifs de puissance constituent une alternative intéressante aux solutions classiques. Flexibles et auto-adaptables, ils peuvent être ajoutés aux structures existantes des convertisseurs et peuvent également être utilisés en complément des solutions traditionnelles de dépollution. Le rôle d'un filtre actif de puissance est de compenser en temps réel les perturbations, totales ou partielles, présentes dans les réseaux électriques. Il existe :

1.5.2.1 Le filtre hybride parallèle

Utilisé pour réduire le dimensionnement et donc le prix des filtres actifs de puissance. Connecté avec ou sans transformateurs au réseau, le filtre actif hybride (Figure I-8) est constitué d'un filtre passif connecté directement en parallèle avec le filtre actif [16].

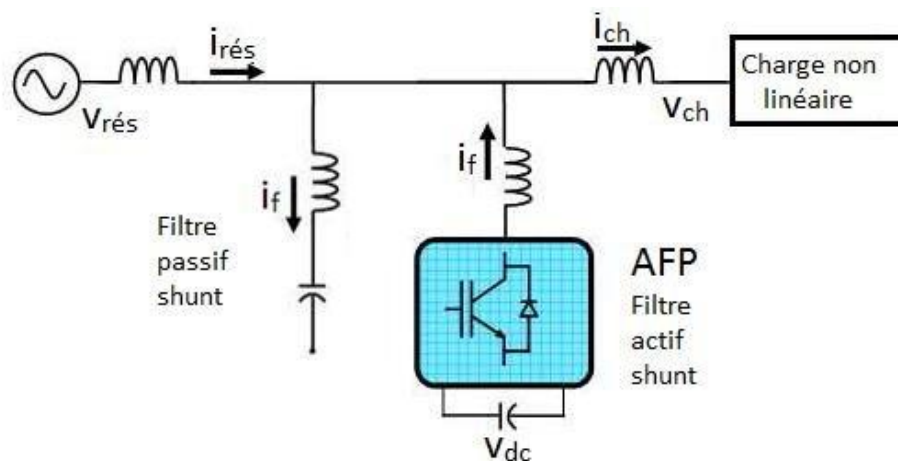


Figure I 8: Filtre hybride parallèle.

1.5.2.2 Le filtre actif de puissance série (FAS)

Conçu pour compenser toutes les perturbations de la tension telles que déséquilibres, les creux de tension et les harmoniques. Il s'agit d'une solution pour protéger les charges sensibles contre les perturbations de tension du réseau électrique. Ainsi il a comme premier objectif (compensateur de tension harmonique) de jouer le rôle d'une source de tension, qui fournit la tension harmonique qui sera ajoutée à la tension du réseau, le résultat sera sinusoïdal, et pour le second cas (compensateur de courant harmonique) il se comporte comme une impédance infinie aux fréquences harmoniques et comme une impédance nulle à la fréquence fondamentale qui joue le rôle d'un isolateur qui empêche les courants harmoniques de retourner au réseau. Le fonctionnement principal du filtre actif de puissance série est basé sur l'isolation des harmoniques entre la charge et la source [17].

Ce type de configuration est indiqué sur la figure (I-9):

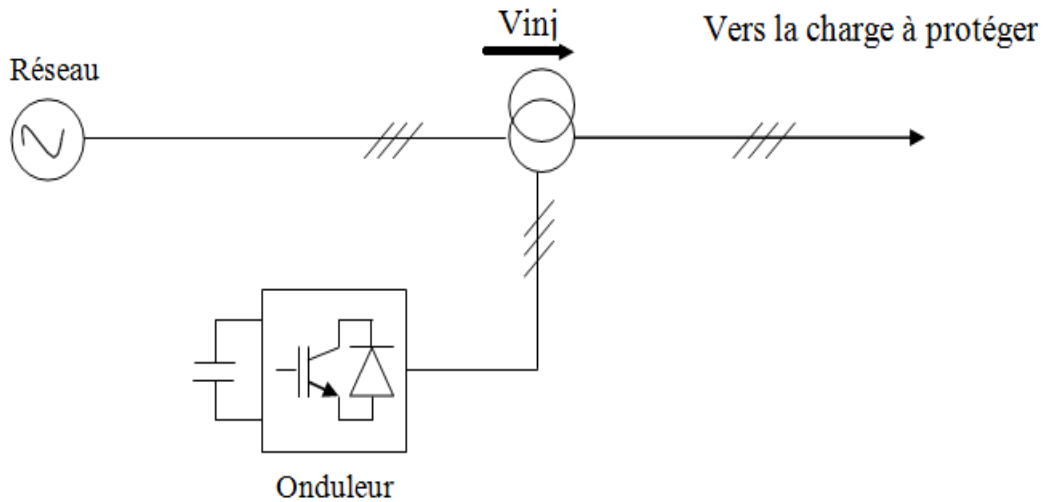


Figure I 9: Filtre actif série

1.5.2.3 Le filtre actif de puissance parallèle (FAP)

Conçu pour compenser toutes les perturbations de courant telles que les harmoniques, la puissance réactive et les déséquilibres. Sur la (figure I-10) apparaît le schéma d'un filtre actif de puissance parallèle. Il est constitué d'un onduleur de tension et d'un filtre inductif en sortie. Ainsi, l'inductance en sortie de l'onduleur fait du filtre actif de puissance une source de courant. Si le réseau alimente plusieurs charges polluantes, il est préférable d'utiliser un seul filtre actif de puissance pour toutes les charges car, dans ce cas, le coût du filtrage est plus faible.

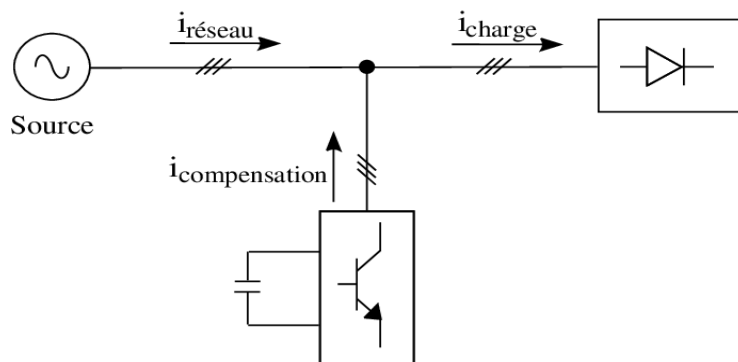


Figure I 10: Filtre actif parallèle

Cependant, lorsque la puissance des charges polluantes est élevée, la solution d'un filtre actif de puissance par charge est nécessaire. Cette dernière méthode est bien sûr plus coûteuse mais elle a l'avantage d'éviter que les harmoniques ne perturbent le réseau dans le cas où un filtre actif de puissance est défectueux [18].

I.5.2.4 Combinaison parallèle-série (UPQC)

Solution universelle pour compenser toutes les perturbations de courant et de tension [15]. Il est basé sur le fonctionnement simultané de filtres actifs de puissance parallèles et d'un filtre actif de puissance série (figure (I-11)). Cette nouvelle topologie est appelée conditionneur active de puissance ou UPQC. Elle présente les avantages combinés des filtres actifs de puissance parallèle et des filtres actifs de puissance série. Le filtre actif de puissance série, lorsqu'il est placé en amont du filtre actif de puissance parallèle, permet de nettoyer la source des tensions perturbatrices. Lorsqu'il est placé en aval, il isole la charge de la source perturbée

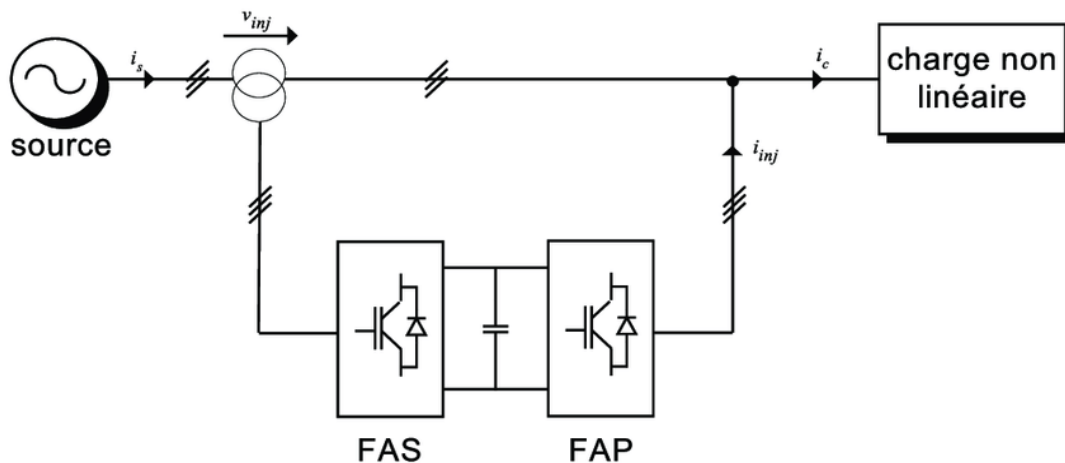


Figure I 11: Conditionneur active de puissance

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types de perturbations affectant la forme d'onde de la tension du réseau électrique. Comme nous l'avons vu, les creux et interruptions de tension, les variations et fluctuations de tension, le déséquilibre et les harmoniques de tension ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ces perturbations ont des conséquences différentes selon le domaine d'application : de l'inconfort à la perte de l'outil de production, à la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements, voire à la mise en danger des personnes. Nous avons également présenté des solutions pour diminuer ces perturbations et plus particulièrement les harmoniques et nous avons donné l'état de l'art de certains filtres actifs de puissance pour améliorer la qualité de l'énergie électrique des réseaux électrique.

Chapitre II :

Etude des filtres actifs de puissance série et parallèle

II Introduction

La qualité d'énergie dépend des charges et de leurs sensibilités aux variations de la tension. Les charges étant de plus en plus sophistiquées, les perturbations de tension deviennent très coûteuses pour les industriels en termes de perte de production, de frais de mains d'œuvres, de pertes en matières premières et d'avarie de matériels. Ce chapitre est consacré à une étude détaillée à savoir, la structure, le dimensionnement, la modélisation, les boucles de contrôles et l'analyse des performances d'un filtre actif de puissance à structure tension connecté en série avec le réseau puis en parallèle avec celui-ci.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier ces filtres actifs de puissance série «FAS» et parallèle «FAP» en vue de dépolluer les réseaux électriques des perturbations de type tension ou courant.

II.1 Principe de fonctionnement

Nous allons dans cette partie montrer le principe de fonctionnement du filtre actif de puissance série et du filtre actif de puissance parallèle.

II.1.1 Filtre Actif de puissance Série

Le filtre actif de puissance série (F.A.S) est une solution adaptée à la compensation des tensions perturbatrices, harmoniques, déséquilibrées et creux de tension. Il s'insère entre le réseau perturbé et la charge à protéger par l'intermédiaire d'un transformateur d'injection de tension. Le filtre actif de puissance se compose de deux parties distinctes: la partie puissance et la partie commande. Le bloc de puissance est constitué le plus souvent d'un convertisseur de tension triphasé, d'un système d'alimentation en tension continue, d'un filtre de sortie et de trois transformateurs monophasés d'injection de tension. Le bloc commande consiste en l'identification des tensions perturbatrices et du commande (contrôle) des tensions injectées au réseau [19].

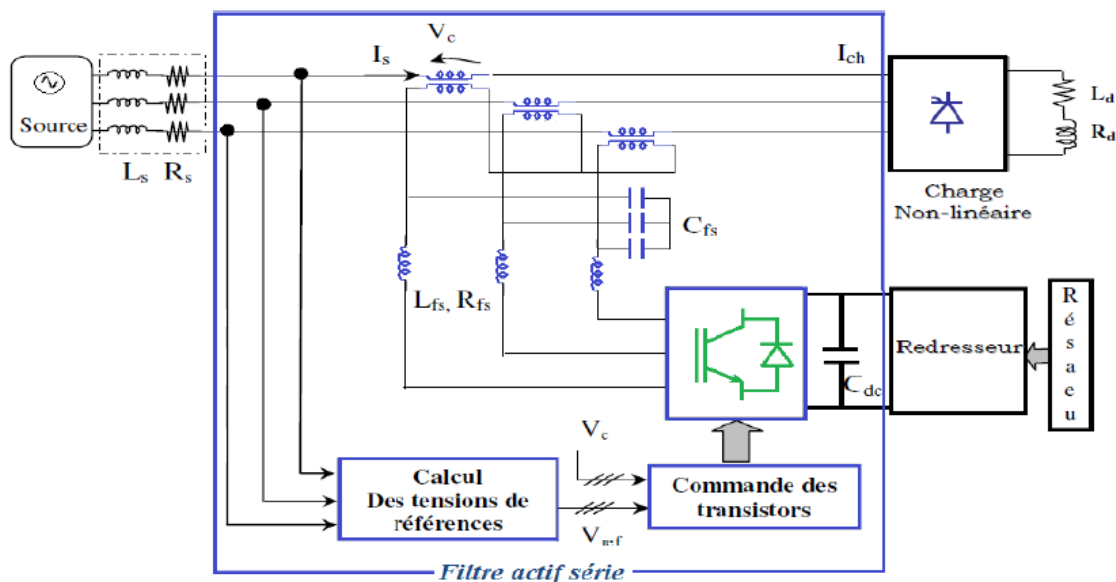


Figure II 1 : Schéma de principe d'un filtre actif de puissance série.

II.1.2 Filtre Actif de puissance parallèle

Le FAP, appelé aussi compensateur shunt, est connecté parallèlement avec le réseau électrique. Il est constitué d'un onduleur à base de semi-conducteurs de puissance, associés à un dispositif de contrôle et de commande adapté. Il peut être assimilé à des sources de courant qui compensent en temps réel les

courants harmoniques en injectant au niveau du réseau des courants en opposition de phase avec les perturbations harmoniques identifiées. Selon le type de stockage de l'énergie le FAP est dit à structure courant ou à structure tension, réalisé par une inductance ou un condensateur. Cependant, les FAP à structure tension sont plus fréquemment mis en œuvre dans les applications industrielles pour leurs simplicités de leurs coûts limités, leurs tailles physiques réduites, leurs commandes [20].

Le filtre actif de puissance parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. Son impédance totale vis à vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec des performances appréciables.

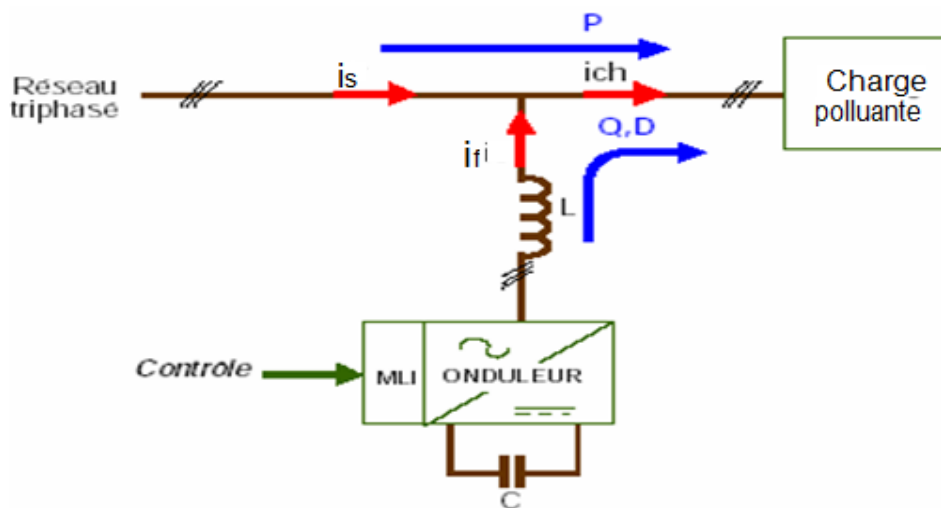


Figure II 2: Principe du FAP.

Pour compenser les courants harmoniques en utilisant un filtre actif de puissance parallèle, il y a principalement deux stratégies de commande, à savoir : [20]

➤ Méthode directe

Cette méthode basée sur l'extraction des composantes harmoniques de courant de charge polluante et sa mesure. Le FAP injecte les courants de compensation, en comparant au niveau de la MLI le courant de référence au courant injecté par le filtre actif de puissance. La figure suivante représente le schéma de la stratégie de commande directe du FAP :

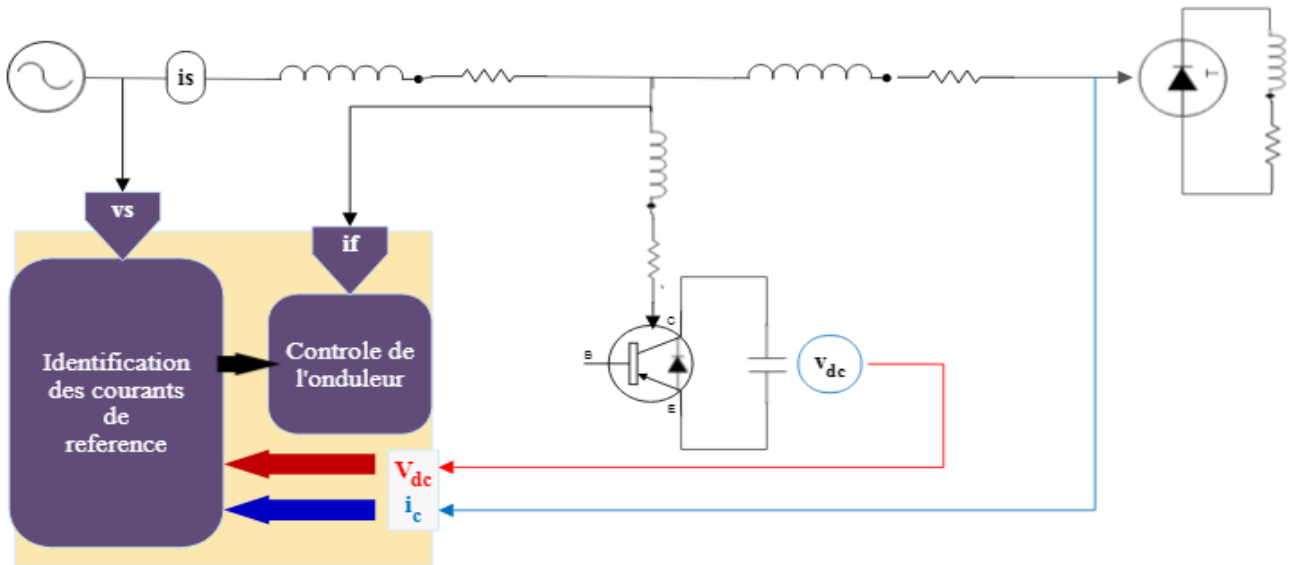


Figure II 3: Schéma de principe de commande directe.

➤ **Méthode indirecte**

Cette méthode basée également sur l'extraction des composantes harmoniques de courant de charge polluante et sa mesure. Le FAP injecte les courants de compensation, en comparant cette fois-ci au niveau de la MLI le courant de référence au courant de source. Sur la figure suivante on donne le principe de la méthode indirecte de FAP :

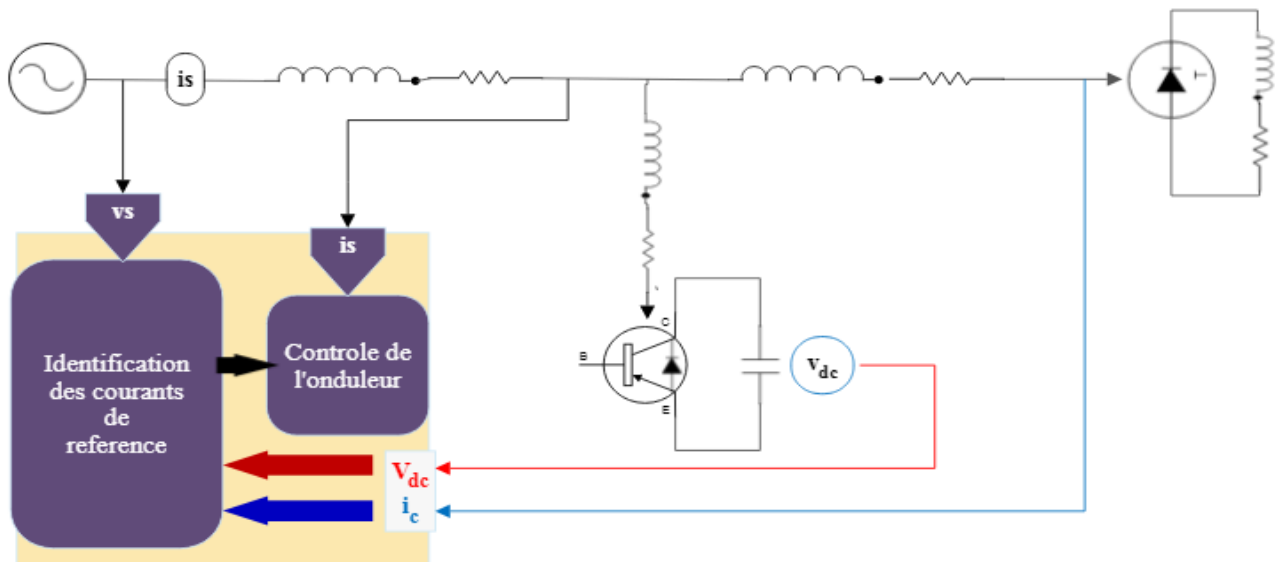


Figure II 4: Schéma de principe de commande indirecte.

II.2 Etude de la partie puissance du filtre actif de puissance

L'onduleur de tension fait l'interface entre deux types de source : une source de courant côté alternatif et une source de tension côté continu. La présence de ces deux sources implique de respecter certaines règles de fonctionnement :

- ❖ la source de tension aux bornes de l'onduleur ne doit jamais être court-circuitée, les deux interrupteurs d'un même bras doivent donc avoir deux commandes complémentaires,
- ❖ la source de courant côté alternatif ne doit jamais être en circuit ouvert, le courant circulant doit toujours trouver un chemin libre d'où la mise en antiparallèle de diodes avec les interrupteurs.

Le stockage de l'énergie est réalisé côté continu à l'aide d'un système de stockage capacitif, donne la possibilité de mesurer, aux bornes des condensateurs, une tension continue V_{dc} sans fluctuation. Le choix des paramètres du système de stockage (V_{dc} et C_{dc}) a une influence directe sur la dynamique du filtre actif de puissance et sur ses performances de compensation [21].

Nous avons également les transformateurs d'injection de tension pour les filtres actif de puissance série, qui permettent d'injecter en série avec le réseau électrique et avec le taux de transformation souhaité la tension produite par l'onduleur. Les désavantages de l'emploi de ces transformateurs sont leurs coûts élevés et une chute de tension occasionnée par leurs inductances de fuite (L , R) pour les systèmes de grande puissance. Le filtre actif de puissance série est protégé contre les courts-circuits en aval côté charge par un système by-pass, constitué par une impédance variante, par deux thyristors en antiparallèle en série avec une petite résistance, et par des transformateurs à circuit magnétique saturable [22].

Le filtre de sortie d'un filtre actif de puissance série est généralement un filtre passif du deuxième ordre ($L_{sf},,$), et pour l'actif de puissance parallèle nous avons un filtre passif du premier ordre.

II.3 Présentation des stratégies de commande

Dans cette partie, nous allons présenter les principaux éléments de la partie contrôle commande du filtre actif de puissance série et du filtre actif de puissance parallèle afin d'identifier les courants harmoniques ou les tensions harmoniques. Ainsi nous avons :

II.3.1 Identification des courants harmoniques

Concernant les méthodes d'identification des courants harmoniques utilisés par les filtres actifs de puissance parallèle, nous avons :

II.3.1.1 Méthodes des puissances active et réactive instantanées (PQ) par la commande directe :

En 1983, H. Akagi à proposer « La théorie généralisée de la puissance réactive instantanée en circuits triphasés » également connu comme la théorie (p-q). Elle est basée sur le calcul des valeurs instantanées pour les systèmes triphasés avec ou sans neutre. En plus elle est valable pour les opérations en régime permanent ou transitoire. Elle est illustrée sur la figure I.10. La théorie p-q est basée sur la transformation $\alpha\beta$, qui consiste en une matrice réelle pour transformer les tensions et les courants triphasés équilibrés (abc) à un système biphasé ($\alpha\beta$) en

appliquant la transformation de Concordia, ce qui permet d'écrire la relation des tensions et des courants suivants [25 et 26] :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{II. 13})$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{II. 14})$$

A partir des vecteurs $[V_\alpha, V_\beta]t [I_\alpha, I_\beta]$ décrivant le système des tensions et des courants dans le repère (α, β) . Les puissances réelles et imaginaires instantanées, sont alors définies par la relation suivante :

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

L'expression des puissances réelle et imaginaire s'expriment alors 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 \bar{p} et \bar{q} représentant les composantes continues de p et q liées au fondamental et \tilde{p} et \tilde{q} représentant les composantes alternatives des p et q liées aux harmoniques.

De l'équation (II. 15) on peut déduire les composantes des courants comme suit :

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

En introduisant (II. 16) dans (II. 17) les courants dans les axe $\alpha - \beta$ deviennent :

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

En filtrant la composante continue de la puissance active pour compenser les harmoniques de courant et l'énergie réactive, lorsque nous utilisons la commande directe, nous obtenons les courants de références par la transformation inverse de Concordia :

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

Ce qui nous donne comme courant de référence dans les trois phases :

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

La figure suivante montre le *principe* de la commande directe utilisant la méthode des puissances instantanées.

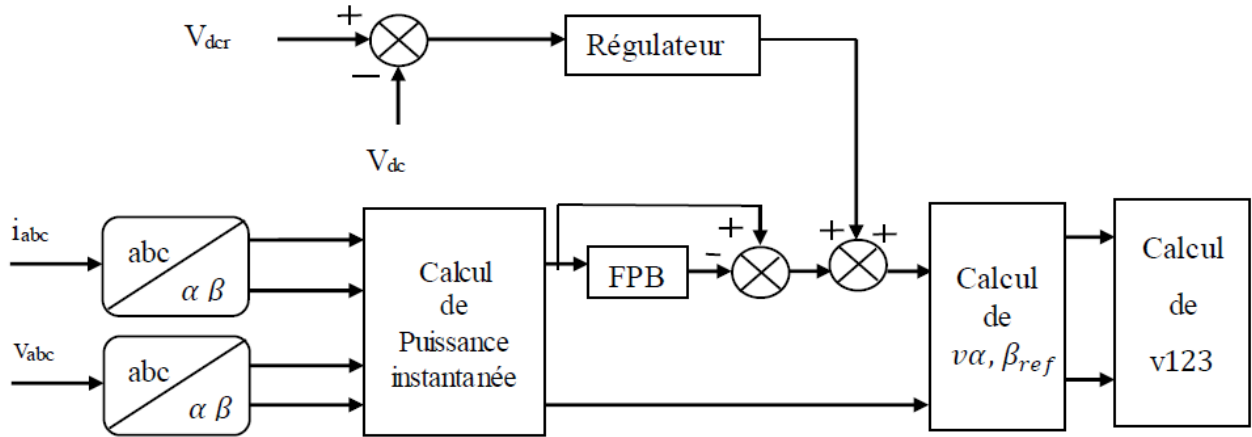


Figure II 5: Schéma de principe de la méthode des puissances instantanées.

II.3.1.2 Méthodes des puissances active et réactive instantanées (PQ) par la commande indirecte:

Cette méthode permet de compenser les harmoniques de courant indirectement. La différence de la stratégie directe, est le fait que le calcul se fait uniquement pour la puissance réelle instantanée. De plus, à l'inverse de la théorie directe, les composantes alternatives de la puissance instantanée seront éliminées afin de ne laisser que la composante continue. Son principe est énoncé comme suit :

Soient respectivement les tensions simples et les courants de ligne d'un système triphasé sans homopolaire, $V_{s1}(t)$, $V_{s2}(t)$, $V_{s3}(t)$ et $i_{s1}(t)$, $i_{s2}(t)$, $i_{s3}(t)$. La transformation de Concordia permet d'obtenir [23] :

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 20})$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 21})$$

A partir des vecteurs $[V_{\alpha}, V_{\beta}]$ et $[I_{\alpha}, I_{\beta}]$ décrivant le système des tensions et courants en négligeant les harmoniques de tension, la puissance réelle s'expriment alors comme suit :

$$P = V_{\alpha}i_{\alpha} + V_{\beta}i_{\beta} \quad (\text{II. 22})$$

La puissance réelle instantanée est égal la somme d'une composante continue et alternative, alors définies par la relation suivante :

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (\text{II. 23})$$

Avec \bar{p} représentant les composantes continues de p liées au fondamental et \tilde{p} représentant les composantes alternatives de p liées aux harmoniques.

On peut ainsi déduire les composantes des courants de la manière suivants :

$$i_{\alpha} = \frac{V_{\alpha}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} p \quad (\text{II. 24})$$

$$i_{\beta} = \frac{V_{\beta}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} p \quad (\text{II. 25})$$

D'après les équations (II. 23) , (II. 24) et (II. 25) les courants dans le repère α, β deviennent :

$$i_{\alpha} = \frac{V_{\alpha}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \bar{p} + \frac{V_{\alpha}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \tilde{p} \quad (\text{II. 26})$$

$$i_{\beta} = \frac{V_{\beta}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \bar{p} + \frac{V_{\beta}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \tilde{p} \quad (\text{II. 27})$$

Pour compenser les harmoniques de courant, il faut cette fois ci utiliser un filtre passe bas pour garder la composante continue, ce qui nous donne $p_f = \bar{p}$ et donc :

$$i_{ref\alpha} = \frac{V_{\alpha}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} p_f \quad (\text{II. 28})$$

$$i_{ref\beta} = \frac{V_{\beta}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} p_f \quad (\text{II. 29})$$

Ce qui nous donne comme courant de référence après utilisation de la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} i_{ref1} \\ i_{ref2} \\ i_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -1 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 30})$$

La figure suivante montre le principe de la commande indirecte utilisant la méthode des puissances instantanées.

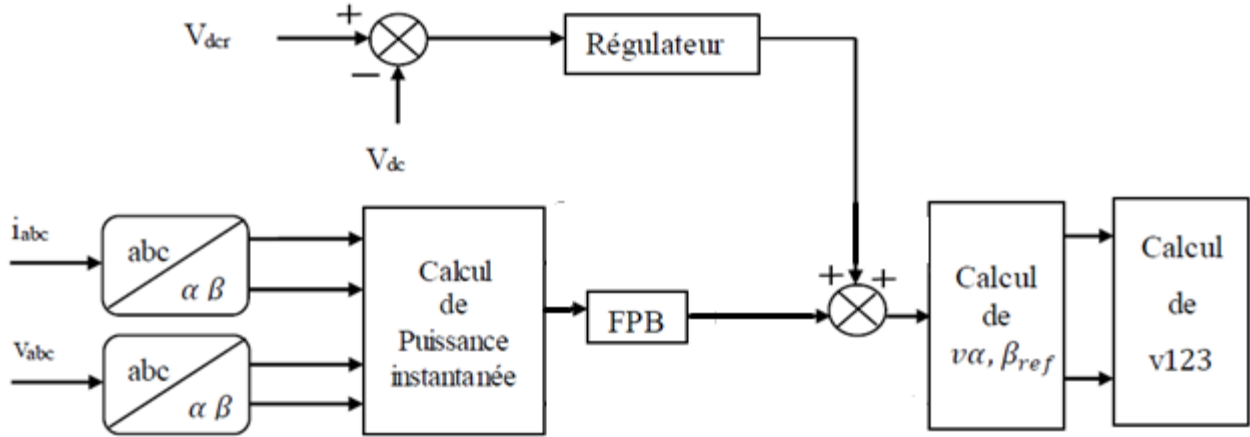


Figure II 6: Commande indirecte méthode des puissances instantanées.

II.3.1.3 Méthode du référentiel lié au synchronisme (SFR) par la commande directe :

Bhattacharyaa introduit cette méthode [23] et [24]. Il exploite également la transformation de Concordia mais appliqué aux courants de ligne $i_{c1}(t)$, $i_{c2}(t)$, $i_{c3}(t)$ uniquement. Après cela une deuxième transformation est opérée pour passer ces courants dans le repère d-q, ce qui permet de transformer les composantes harmoniques du courant en des composantes alternatives et la composante fondamentale du courant en une composante continue, cela nous permet d'éliminer la composante continue du courant à l'aide d'un filtre passe haut. L'avantage de cette méthode, à la méthode basée sur les puissances réelles et imaginaires instantanées, est que les éventuelles tensions harmoniques n'ont plus d'influence sur les courants identifiés donc le filtrage est meilleur.

Soit les courants de ligne d'un système triphasé sans composantes homopolaires, $i_{c1}(t)$, $i_{c2}(t)$, $i_{c3}(t)$. La transformation de Concordia permet de ramener ce système à un système diphasé ; comme le montre la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{c1} \\ I_{c2} \\ I_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 42})$$

En utilisant une P.L.L qui est insensible aux perturbations, les signaux $\cos(\hat{\theta})$ et $\sin(\hat{\theta})$ tirés de la tension fondamentale du réseau, nous obtenons les relations des courants du système dans les repères d-q :

$$\begin{bmatrix} Id \\ Iq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II. 43})$$

Ces composants peuvent être exprimés comme la somme d'une composante alternative et d'une

composante continue :

$$\begin{cases} Id = \bar{I}d + \tilde{I}d \\ Iq = \bar{I}q + \tilde{I}q \end{cases} \quad (\text{II. 44})$$

Avec : $\bar{I}d$ et $\bar{I}q$ sont les composantes continue du Id et Iq ;

Et : $\tilde{I}d$ et $\tilde{I}q$ sont les composantes alternative du Id et Iq .

A partir de l'équation II-43 on peut déduire I_α et I_β comme suite :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Id \\ Iq \end{bmatrix} \quad (\text{II. 45})$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}d \\ \bar{I}q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{I}d \\ \tilde{I}q \end{bmatrix} \quad (\text{II. 46})$$

En compensant les harmoniques de courant nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha ref} \\ I_{\beta ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}d \\ \bar{I}q \end{bmatrix} \quad (\text{II. 47})$$

La transformation inverse de Concordia permet de remonter aux courants de référence :

$$\begin{bmatrix} Is1ref \\ Is2ref \\ Is3ref \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & \sqrt{3} \\ 2 & 2 \\ -1 & -\sqrt{3} \\ 2 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha ref} \\ I_{\beta ref} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 48})$$

La figure suivante montre le principe de la commande directe utilisant la méthode du référentiel lié au synchronisme.

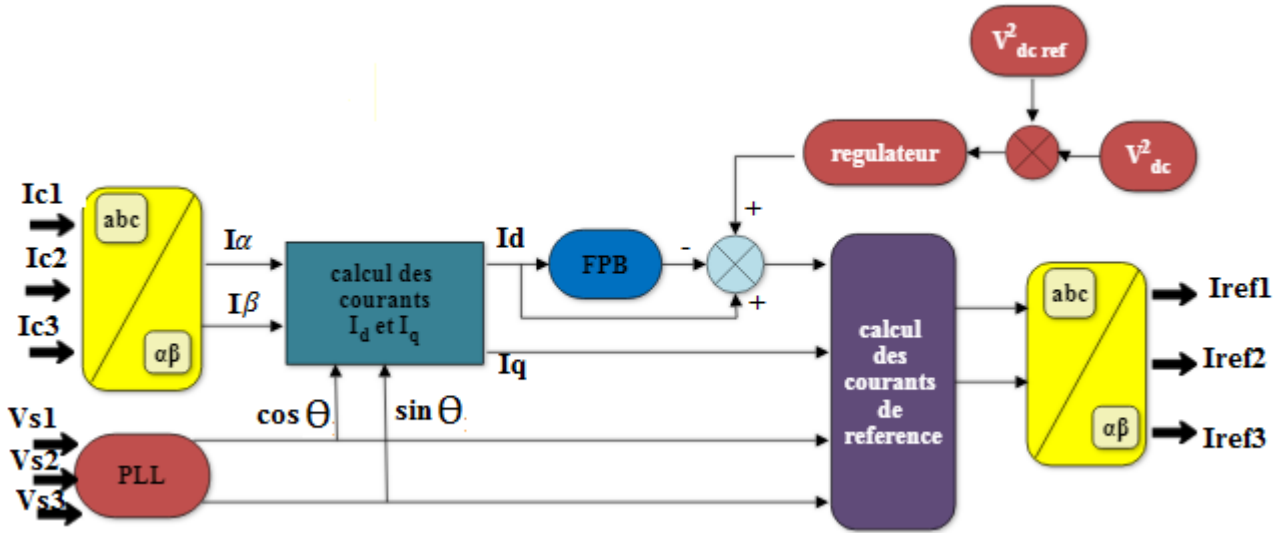


Figure II 7: Commande directe d'un filtre actif de puissance par la méthode (SFR).

II.3.1.4 Méthode du référentiel lié au synchronisme (SFR) par la commande indirecte :

Cette méthode exploite la théorie du référentiel liée au synchronisme décrite précédemment mais pour la commande indirecte. Nous avons ainsi :

$$\begin{bmatrix} I\alpha \\ I\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ic1 \\ Ic2 \\ Ic3 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 49})$$

Avec une P.L.L insensible aux perturbations, les signaux $\sin(\hat{\theta})$ et $\cos(\hat{\theta})$ sont liés à la tension du réseau (composant fondamentale), on donne alors l'expression suivante :

$$I_d = \sin(\hat{\theta})I_\alpha - \cos(\hat{\theta})I_\beta \quad (\text{II. 50})$$

Sachant que I_d est la somme des composants continue et alternative, nous obtenons alors :

$$I_d = \bar{I}d + \tilde{I}d \quad (\text{II. 51})$$

Avec :

$\bar{I}d$ La composante continue.

$\tilde{I}d$ La composante alternative.

Dans l'axe α - β les courants auront alors comme expression après utilisation d'un filtre passe bas :

$$I_{s\alpha}^{\text{ref}} = \sin(\hat{\theta}) \bar{I}_d \quad (\text{II. 52})$$

$$I_{s\beta}^{\text{ref}} = -\cos(\hat{\theta}) \bar{I}_d \quad (\text{II. 53})$$

Les courants de référence deviennent alors égal à :

$$\begin{bmatrix} I_{s1\text{ref}} \\ I_{s2\text{ref}} \\ I_{s3\text{ref}} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -1 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s\alpha\text{ref}} \\ I_{s\beta\text{ref}} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 54})$$

La figure suivante montre le principe de la commande indirecte utilisant la méthode du référentiel lié au synchronisme.

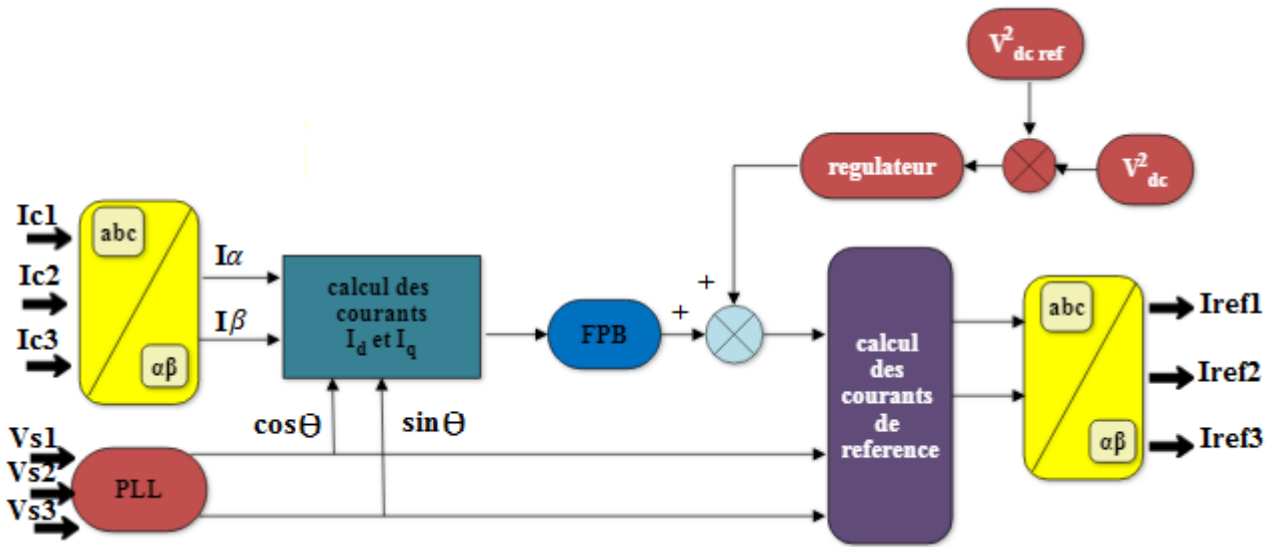


Figure II 8: Commande indirecte d'un filtre actif de puissance appliquant (SFR).

II.3.2 Identification des tensions harmoniques

Concernant les méthodes d'identification des tensions harmoniques utilisées par les filtres actifs de puissance série, nous avons utilisé une méthode qui porte sur l'utilisation d'un PLL qui va identifier $\hat{\theta}$ afin de générer trois signaux sinusoïdaux d'amplitude unitaire. Ensuite nous avons multiplié chaque signal avec la valeur nominale de la tension qui est connue. Par la suite nous allons comparer ces trois signaux aux tensions de source. La différence de ces deux signaux pour chaque phase a permis de déterminer les chutes de tension, surtension et les harmoniques de tensions afin de les compensés.

La figure suivante montre le principe de la commande pour compenser les chutes de tension, surtension et les harmoniques de tensions.

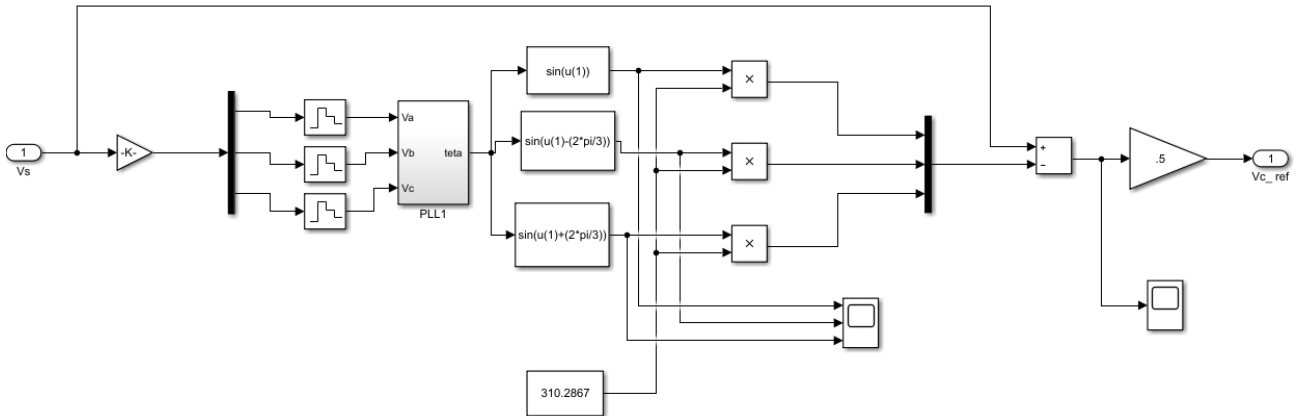


Figure II 9 : Stratégie du commande filtre actif de puissance série

II.4 Filtre Actif Parallèle Direct

Nous allons maintenant présenter le filtre actif de puissance parallèle direct par la commande DQ qui est illustré sur la figure suivante :

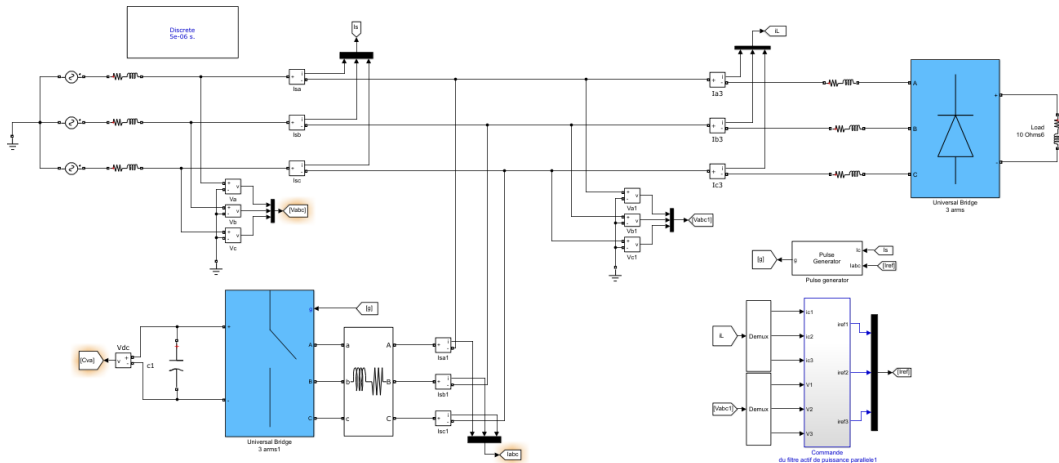


Figure II 10: Schéma de filtre actif puissance parallèle(direct).

V_s (v)	R_s (Ω)	L_s (H)	R_c (Ω)	L_c (H)	R_d (Ω)	L_d (H)
400	1e-3	1e-6	2.73e-3	23.19e-6	0.79	2.6e-6
R_f (Ω)	L_f (H)	C_{dc} (F)				
10e-6	0.1e-3	60e-3				

Tableau II-1 : Paramètre du réseau électrique connecté au filtre actif de puissance parallèle (direct).

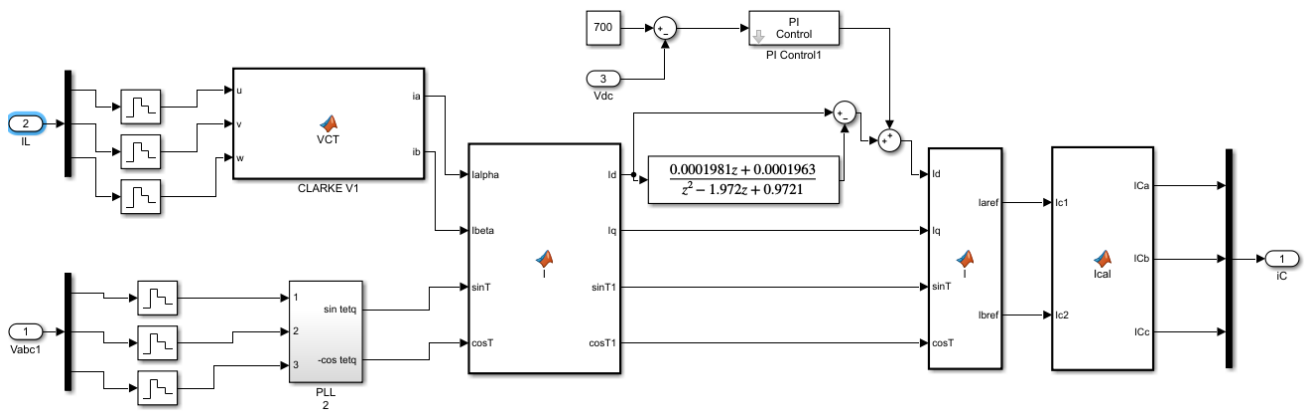


Figure II 11: commande DQ du filtre actif de puissance parallèle (direct).

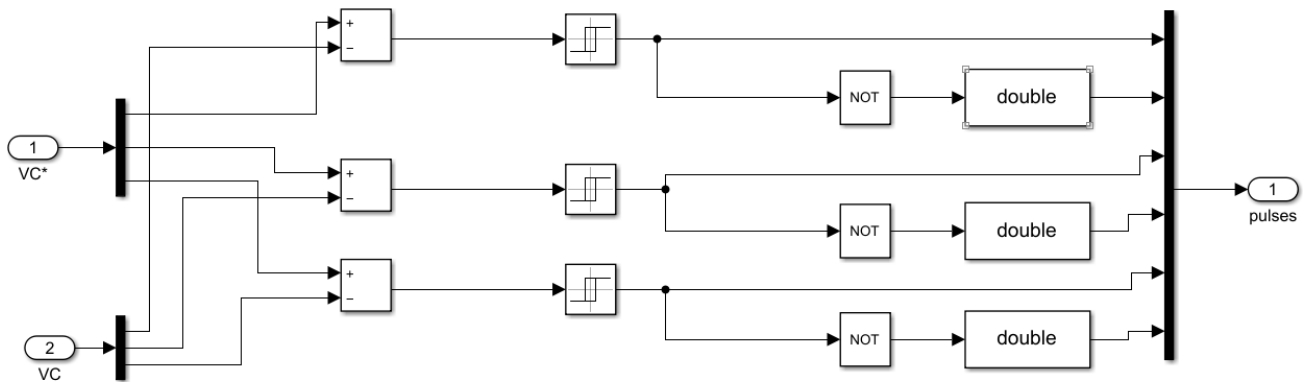


Figure II 12: Commande hystérésis.

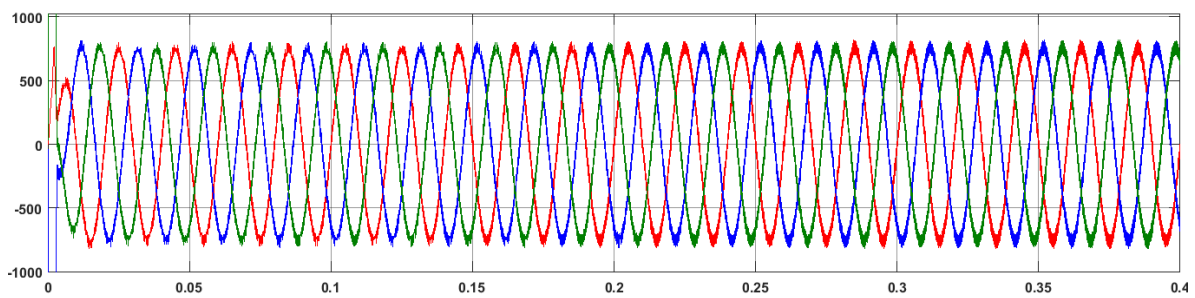


Figure II 13: Tension de source.

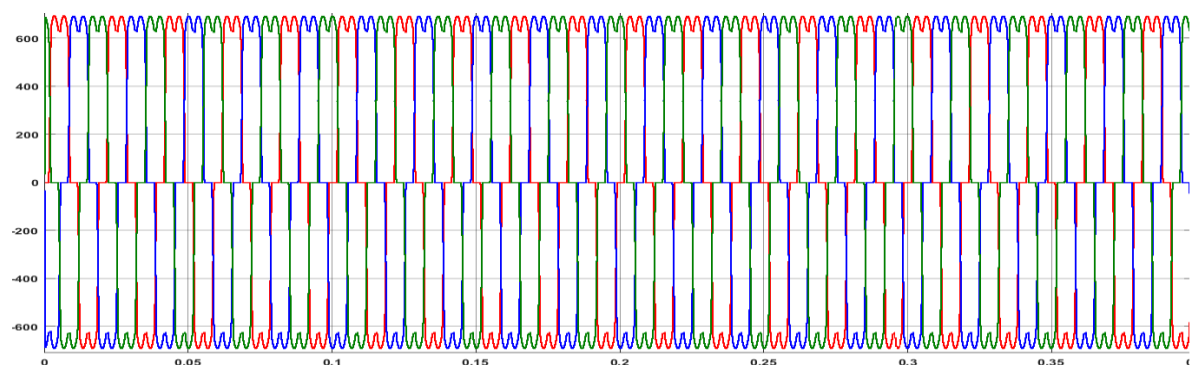


Figure II 14: Courant de charge.

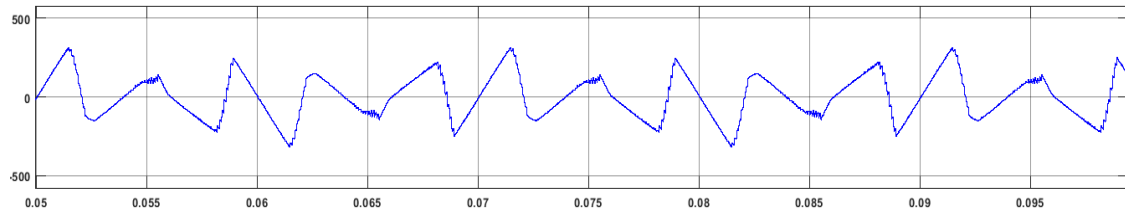


Figure II 15: Courant injecté par le FAP de la phase1.

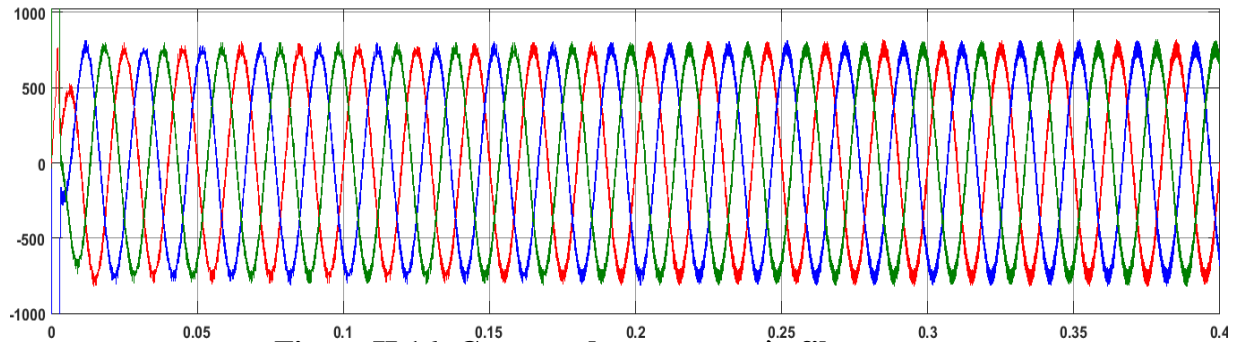


Figure II 16: Courant de source après filtrage.

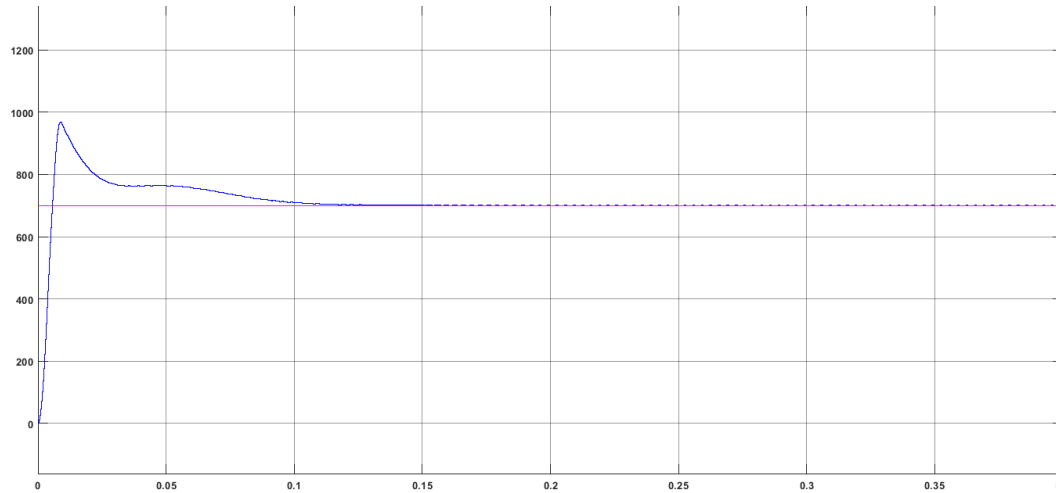


Figure II 17: Tension aux bornes du condensateur.

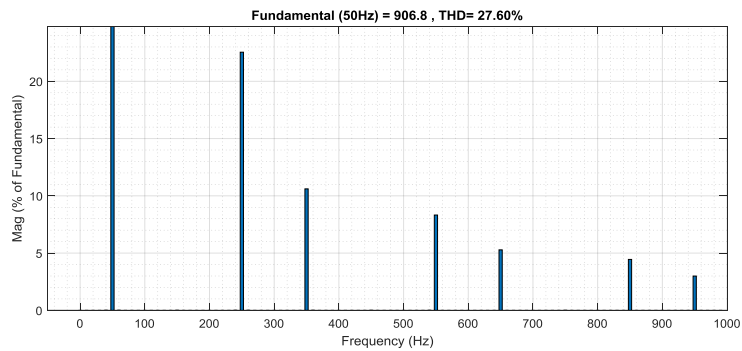


Figure II 18: Courant de charge phase1 et leur spectre de THD avant filtrage.

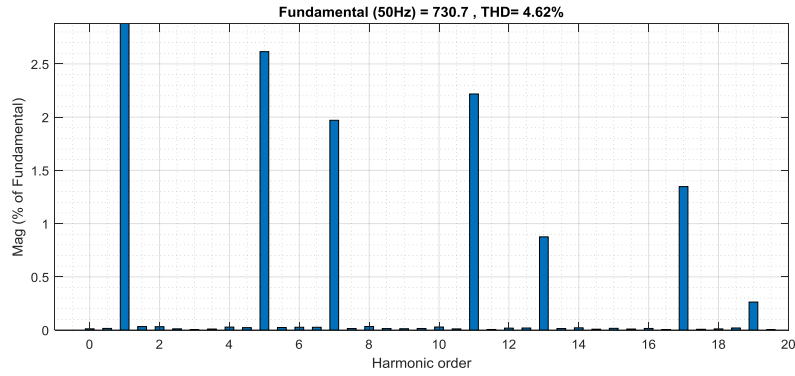


Figure II 19: Courant de source phase1 et son spectre et le THD après filtrage.

Les figures II.18 et II.19 montrent les courants de la charge et la source respectivement avec leurs analyses spectrales. On remarque que ce filtre permet une réduction des harmoniques de courant. La valeur du THD est réduite à 4.62 % après filtrage. Nous remarquons que le filtre actif de puissance parallèle élimine très bien les harmoniques de courant.

Nous allons maintenant présenter le filtre actif de puissance parallèle direct par la commande PQ qui est illustré sur la figure suivante :

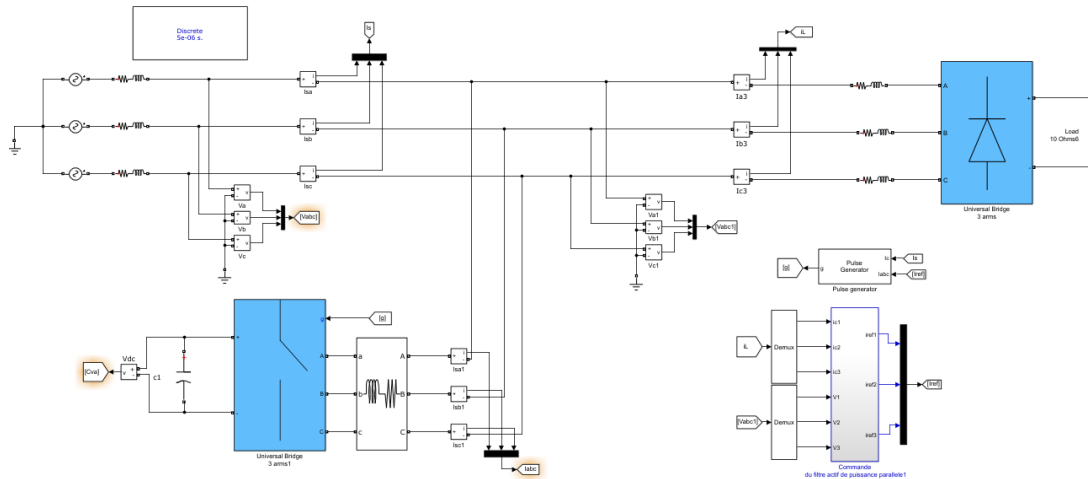


Figure II 20: Schéma de filtre actif puissance parallèle (direct).

Vs (v)	Rs (Ω)	Ls (H)	Rc (Ω)	Lc (H)	Rd (Ω)	Ld(H)
400	1e-3	1e-6	2.73e-3	23.19e-6	0.79	2.6e-6
Rf (Ω)	Lf (H)	Cdc (F)				
10e-6	0.1e-3	60e-3				

Tableau II-2 : Paramètre du réseau électrique connecté au filtre actif de puissance parallèle (direct).

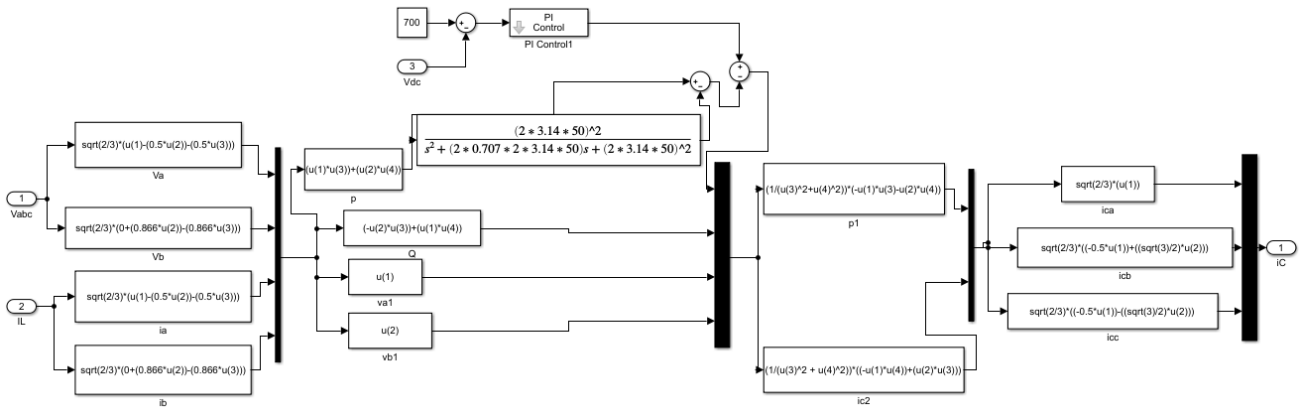


Figure II 21: commande PQ du filtre actif de puissance parallèle (direct).

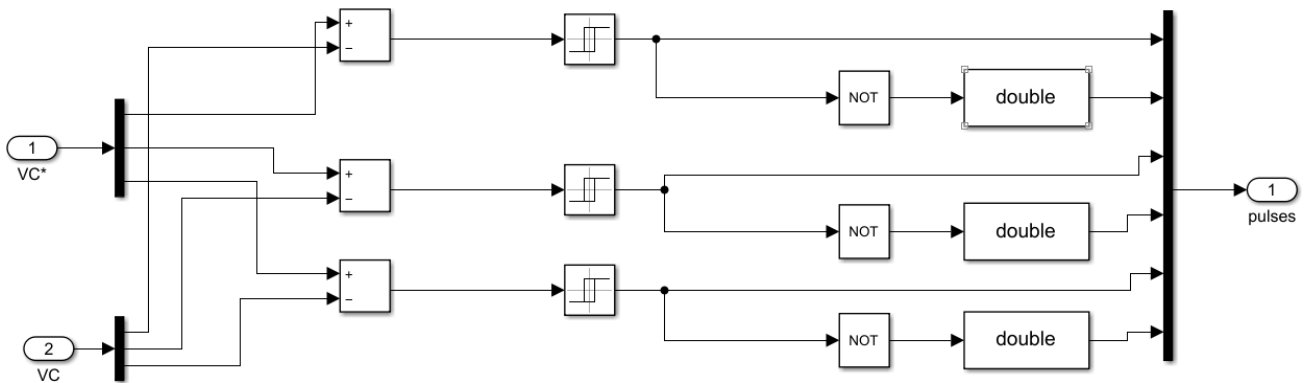


Figure II 22: Commande hystérésis.

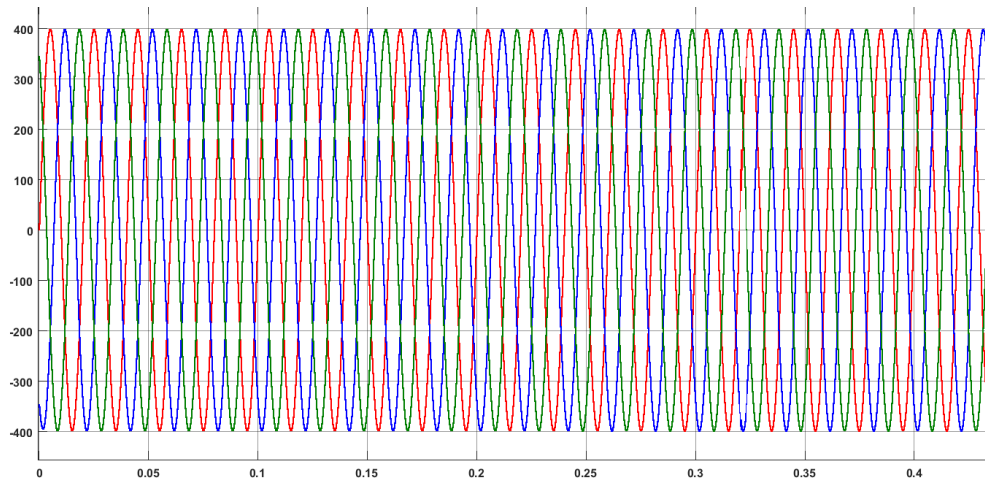


Figure II 23: Tension de source.

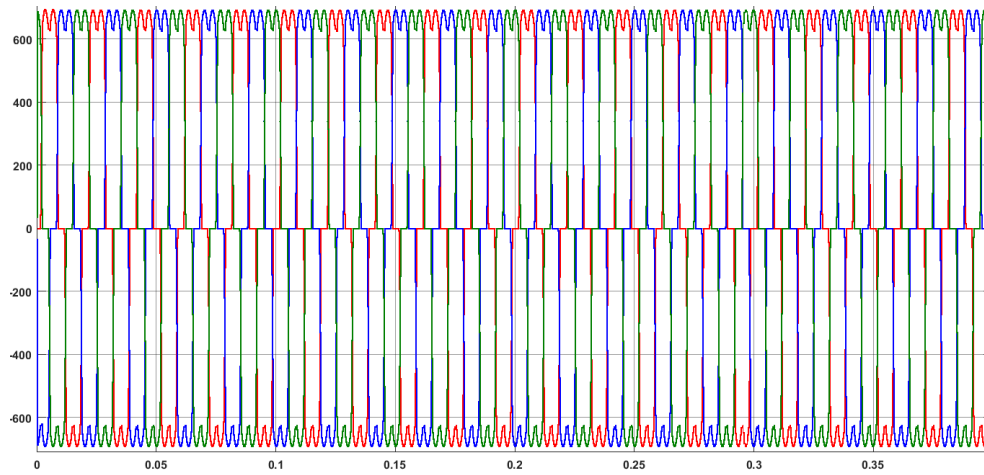


Figure II 24: Courant de charge.

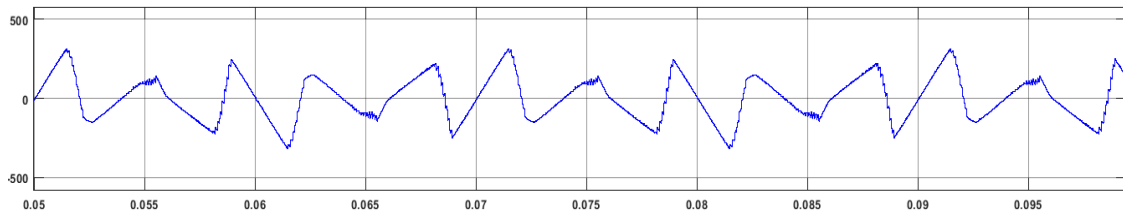


Figure II 25: Courant injecté par le FAP de la phase1.

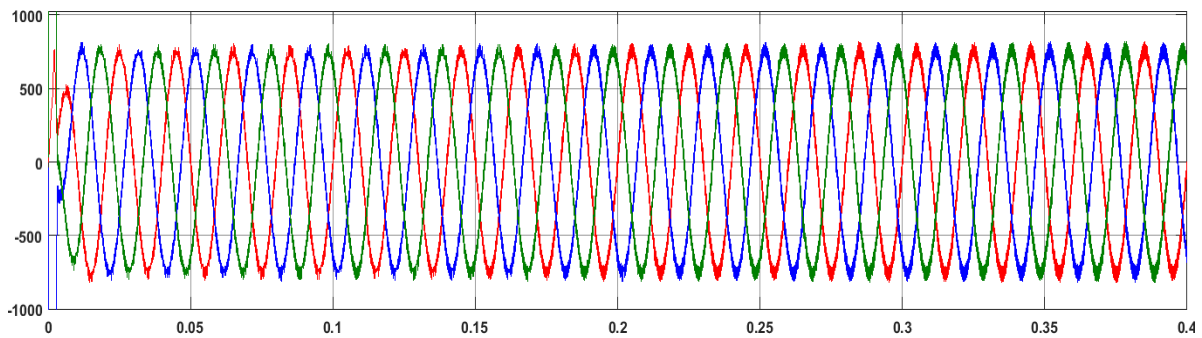


Figure II 26: Courant de source après filtrage.

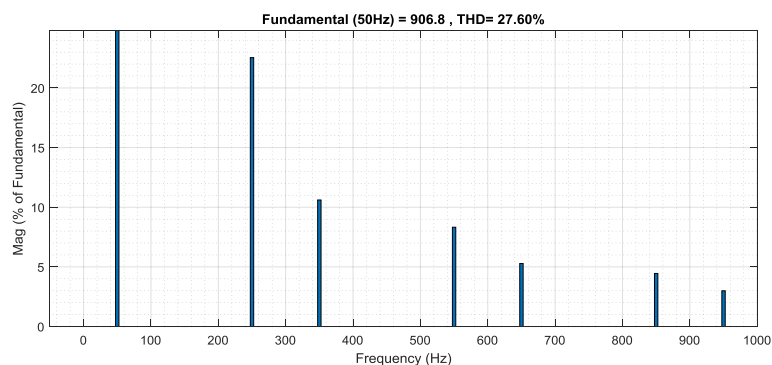


Figure II 27: Courant de charge phase1 et leur spectre de THD avant filtrage.

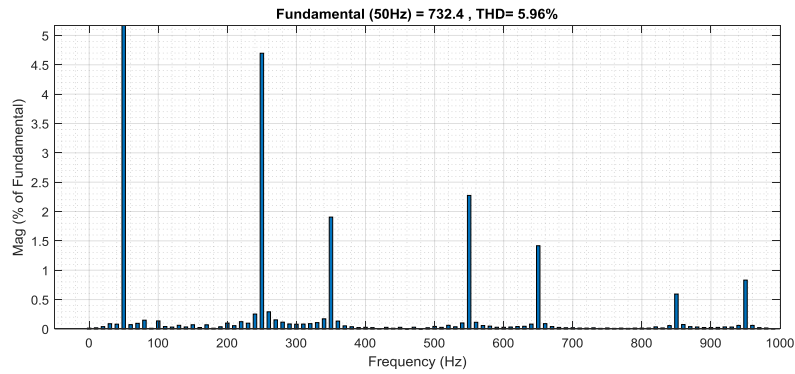


Figure II 28: Courant de source phase1 et son spectre et le THD après filtrage.

Les figures II.27 et II.28 montrent les courants de la charge et la source respectivement avec leurs analyses spectrales. On remarque que ce filtre permet une réduction des harmoniques de courant. La valeur du THD est réduite à 5.96 % après filtrage. Nous remarquons que le filtre actif de puissance parallèle élimine très bien les harmoniques de courant.

II.5 Conclusion

L'utilisation d'équipements électriques en plus de l'emploi croissant de convertisseurs électriques, engendre des perturbations sur le réseau électrique comme les surtensions, les creux de tension, les chutes des tensions, des harmoniques. D'où la nécessité d'étudier les éliminer grâce aux filtre actif de puissance série ou parallèle. Ce qui nous a permis de montrer les différentes stratégies de commande qui existe. Le chapitres 3 montrera les résultats de simulation des différentes commandes pour les filtres actifs de puissance série, parallèle et UPQC.

Chapitre III :
Le conditionneur de
puissance (UPQC)

III Introduction

Parmi les solutions qui améliorent les perturbations du réseau électrique, nous citons une solution qui est la combinaison des filtres actifs de puissance parallèle et des filtres actifs de puissance série, appelé UPQC. Fondamentalement, cette structure est utilisée pour compenser la distorsion de tension et le déséquilibre de tension dans un réseau électrique de sorte que la tension côté charge soit complètement équilibrée et sinusoïdale. De plus cette structure est utilisée pour compenser les harmoniques du courant de charge afin que le courant du côté de la source soit parfaitement sinusoïdal et exempt d'harmoniques.

Ainsi d'une part, le filtre de puissance actif parallèle (FAP) est utilisé pour compenser les harmoniques du courant de charge et rendre le courant de source complètement sinusoïdal et exempt d'harmoniques. Le FAP est connecté en parallèle à la ligne de transmission. D'autre part, le FAS est utilisé pour atténuer les distorsions et le déséquilibre de tension présents du côté de l'alimentation et rendre la tension côté charge parfaitement équilibrée, régulée et sinusoïdale. Le FAS est connecté en série avec ligne de transmission.

L'UPQC consiste en deux onduleurs de source de tension connectés dos à dos par l'intermédiaire d'un condensateur de liaison C_{dc} . L'onduleur dans le FAP est commandé comme un onduleur à source de courant variable et dans le FAS, il est commandé comme un onduleur à source de tension variable. [21 22]

III.1 Simulation d'un filtre actif de puissance parallèle

Tout d'abord nous allons présenter le réseau électrique illustré par la figure suivante :

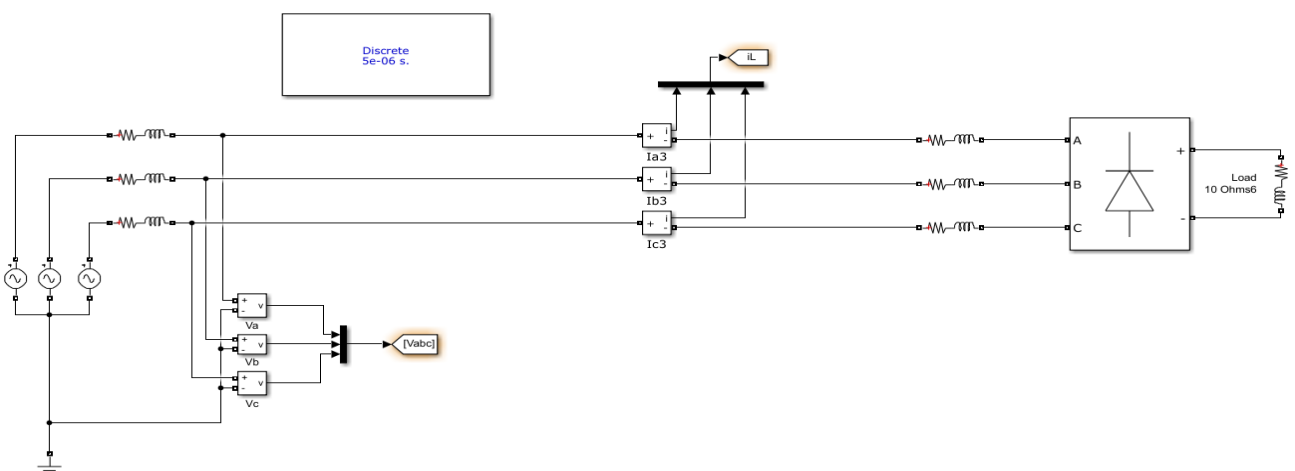


Figure III 1: Source et charge connecté au réseau triphasé.

Les paramètres de ce réseau électrique sont donnés dans le tableau suivant :

V_s (v)	R_s (Ω)	L_s (H)	R_c (Ω)	L_c (H)	R_d (Ω)	L_d (H)
400	1e-3	1e-6	2.73e-3	23.19e-6	0.79	2.6e-6

Tableau III 1 : Paramètre du réseau électrique

Lorsque nous simulons ce réseau électrique, nous obtenons les figures suivantes :

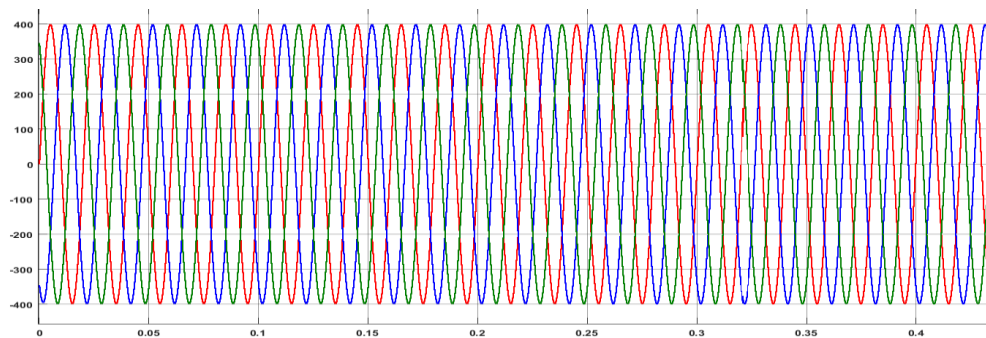


Figure III 2: Tension de source des trois phases.

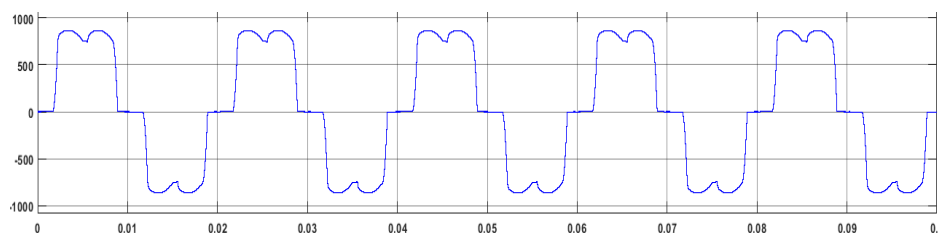


Figure III 3: Courant de charge de la phase 1.

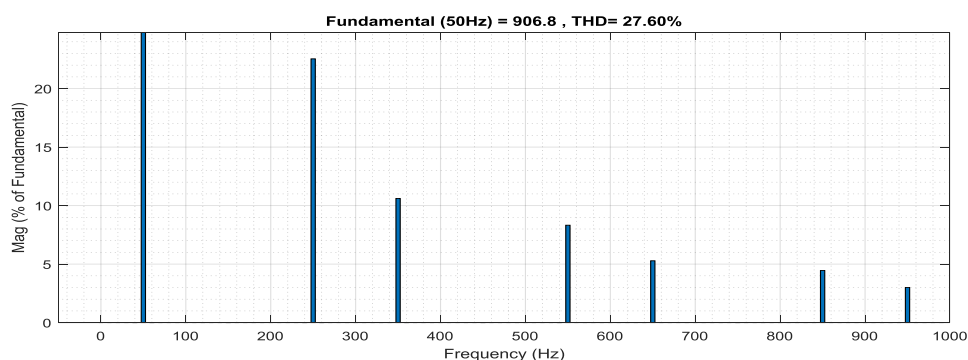


Figure III 4: FFT du courant de charge de la phase 1.

Nous remarquons de ces simulations que le courant de charge a un THD élevé qui a comme valeur 27.6%. Ce THD à une valeur supérieure ce qui ne respecte pas la norme IEC qui impose un THD

inférieur à 5%. Pour résoudre ce problème, nous allons utiliser un filtre actif de puissance parallèle comme le montre la figure suivante :

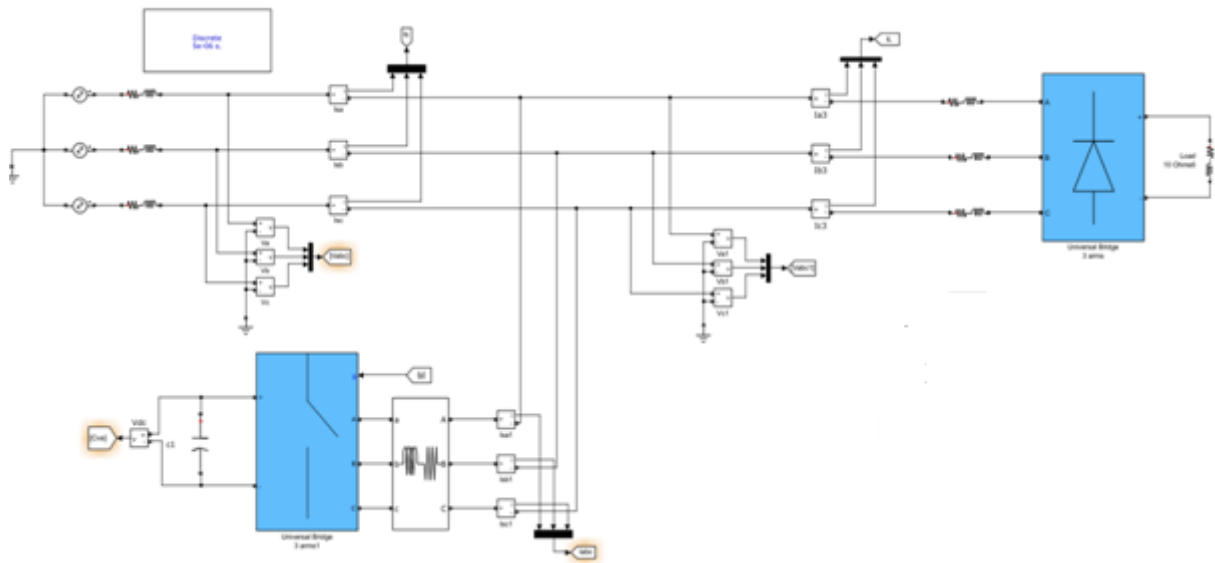


Figure III 5: Schéma de filtre actif puissance parallèle.

Les paramètres de ce réseau électrique connecté au filtre actif de puissance série sont donnés dans le tableau suivant :

V_s (v)	R_s (Ω)	L_s (H)	R_c (Ω)	L_c (H)	R_d (Ω)	L_d (H)
400	1e-3	1e-6	2.73e-3	23.19e-6	0.79	2.6e-6
R_f (Ω)	L_f (H)	C_{dc} (F)				
10e-6	0.1e-3	8e-3				

Tableau III-2 : Paramètre du réseau électrique connecté au filtre actif de puissance parallèle.

La commande de ce filtre actif de puissance parallèle qui est basé sur la commande p-q indirecte est illustrée sur la figure III.6.

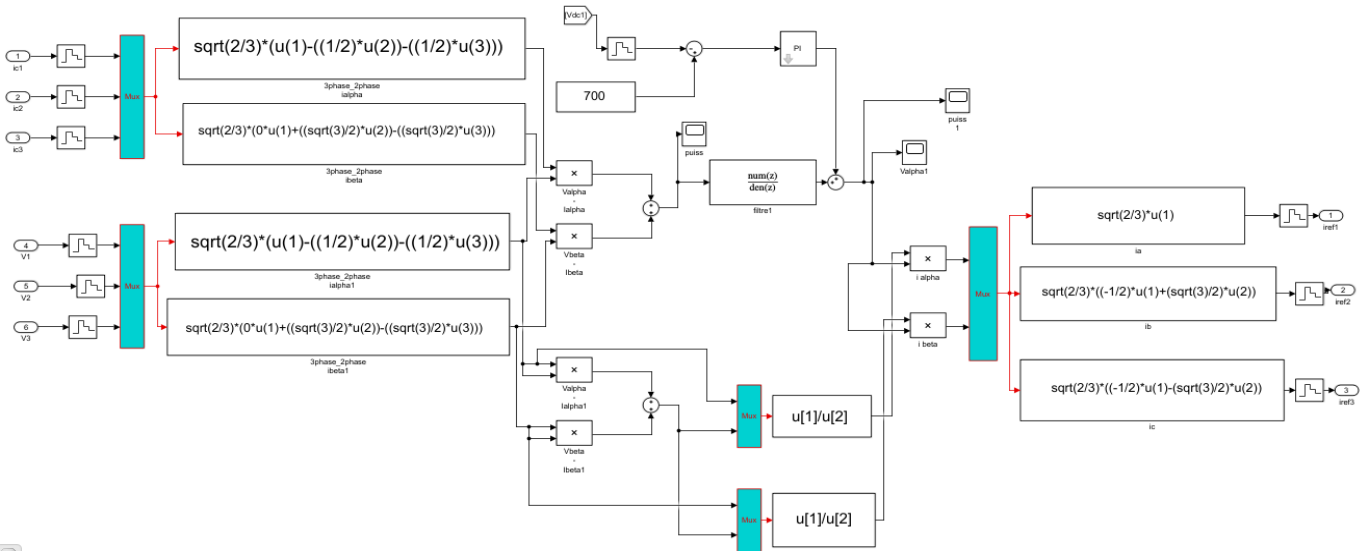


Figure III 6: Commande indirecte discrète du FAP.

Les trois figures suivantes montrent respectivement le filtre passe bas utiliser, le régulateur PI qui régule la tension au borne du condensateur et la commande MLI utilisé pour ce filtre actif de puissance parallèle.

$$\frac{0.000000000000000z^2 + 0.000486212556349z + 0.000479064865372}{1.000000000000000z^2 - 1.955578398054313z + 0.956543675476034}$$

Figure III 7: Filtre passe bas FAP.

$$\frac{0.853033524126406z - 0.840905754238348}{1.000000000000000z - 1.000000000000000}$$

Transfer Fcn

Figure III 8: Régulateur PI du FAP.

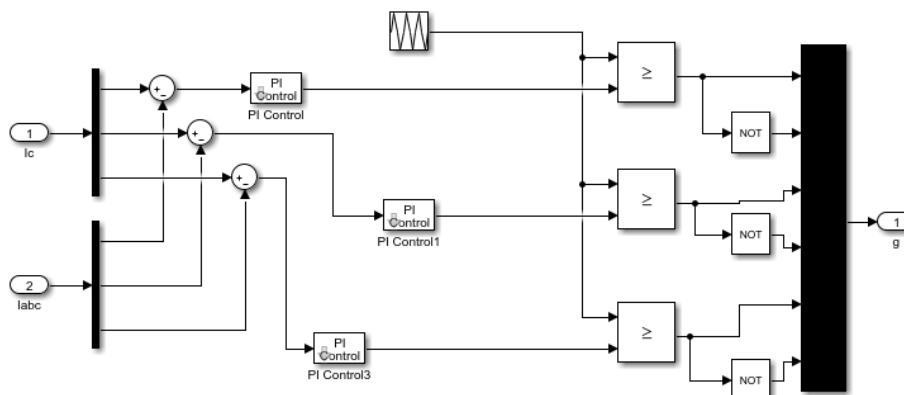


Figure III 9: Commande MLI.

Les résultats de simulation que nous avons obtenus sont illustrés sur les figures suivantes :

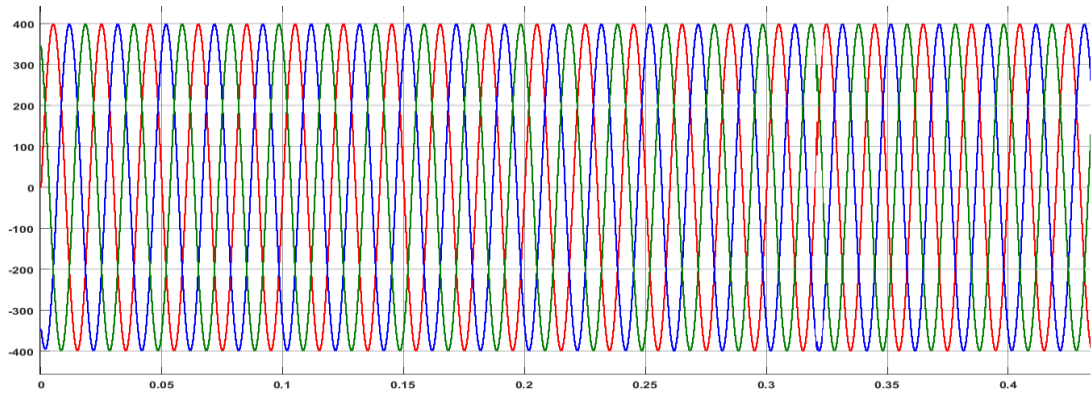


Figure III 10: Tension de source.

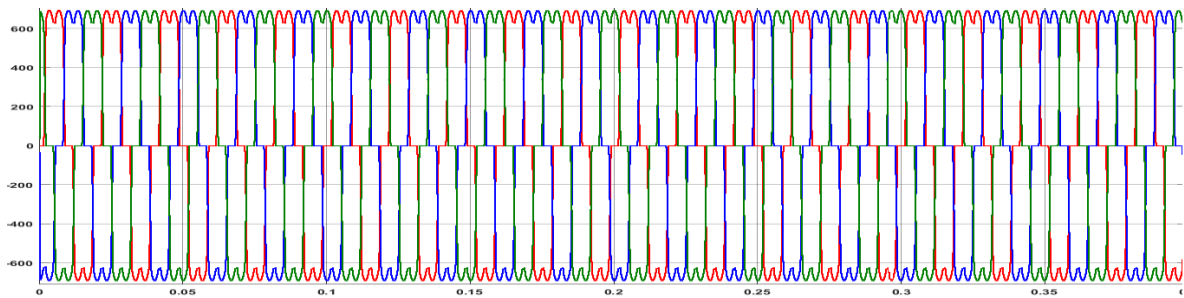


Figure III 11: Courant de charge.

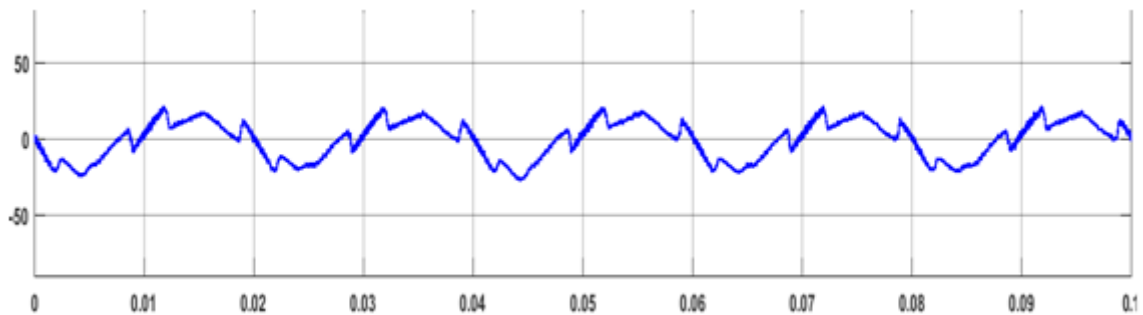


Figure III 12 : Courant injecté par le FAP de la phase1.

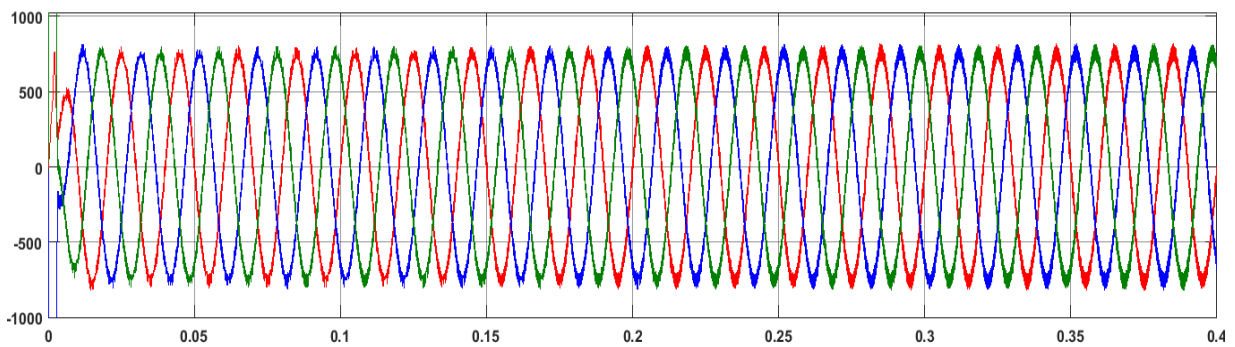


Figure III 13: Courant de source après filtrage.

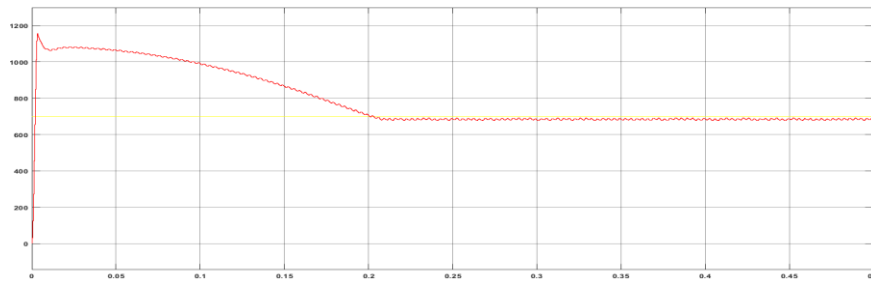


Figure III 14: Tension aux bornes du condensateur.

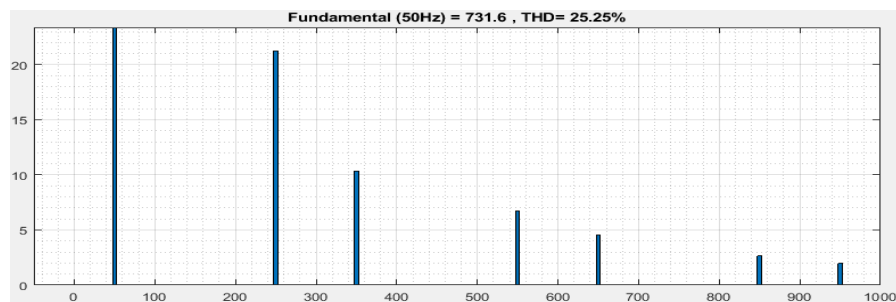


Figure III 15: Courant de charge phase1 et leur spectre de THD avant filtrage.

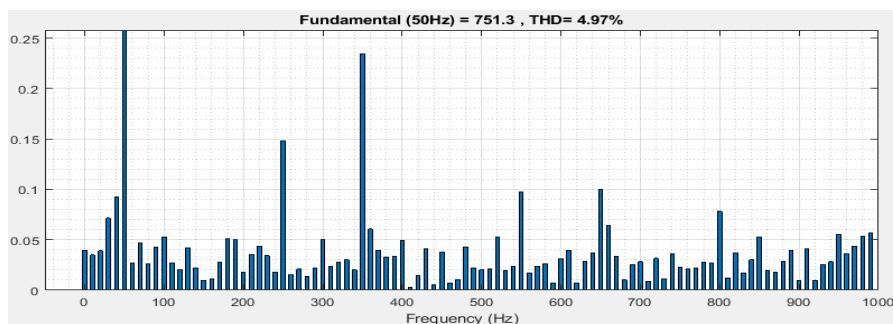


Figure III 16: Courant de source phase1 et son spectre et le THD après filtrage.

Les figures III.15 et III.16 montrent les courants de la charge et la source respectivement avec leurs analyses spectrales. On remarque que ce filtre permet une réduction des harmoniques de courant. La valeur du THD est réduite à 4.97 % après filtrage. Nous remarquons que le filtre actif de puissance parallèle élimine très bien les harmoniques de courant.

III.2 Simulation d'un filtre actif de puissance série

Nous allons maintenant présenter le filtre actif de puissance série qui est illustré sur la figure suivante :

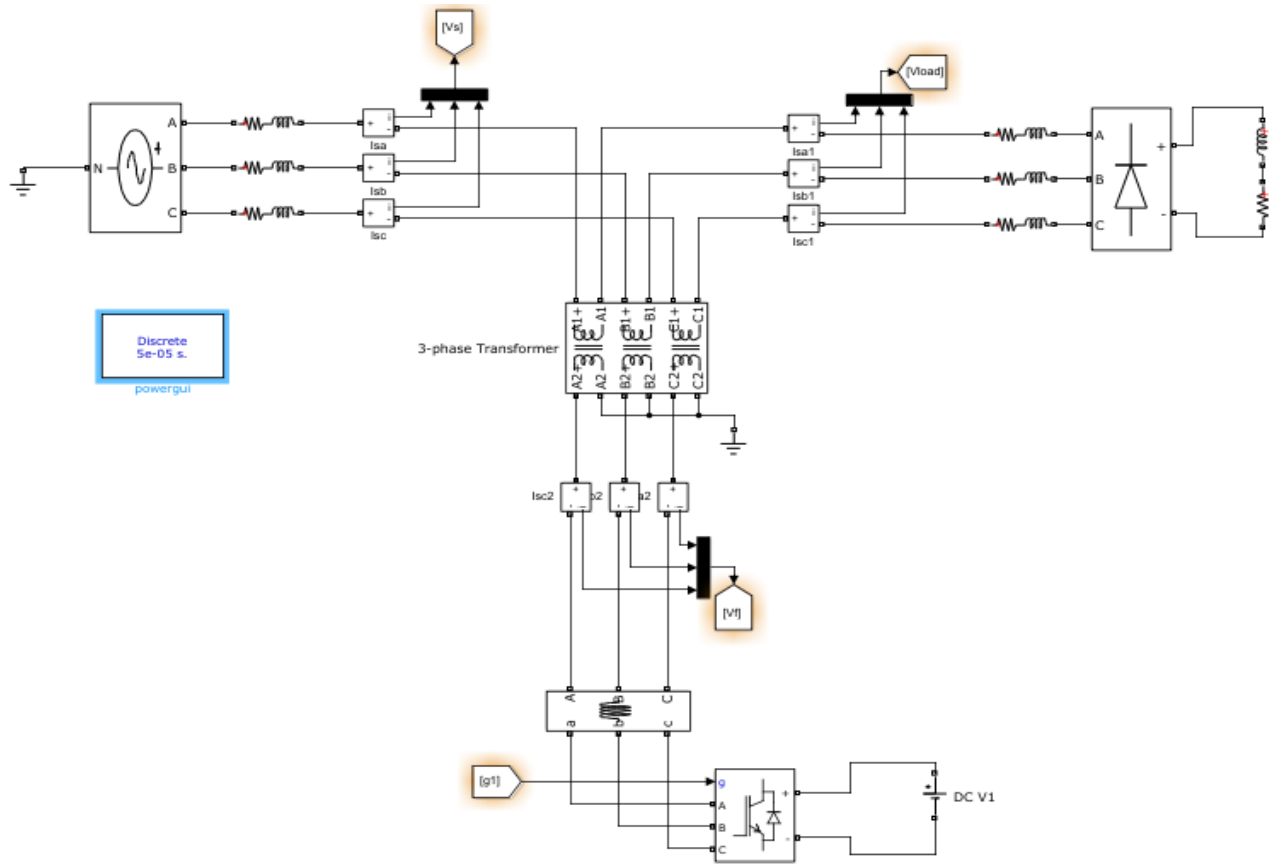


Figure III 17: Schéma de filtre actif puissance série discrète.

Les deux figures suivantes montrent respectivement la commande du filtre actif de puissance série et de la commande à hystérésis utilisé.

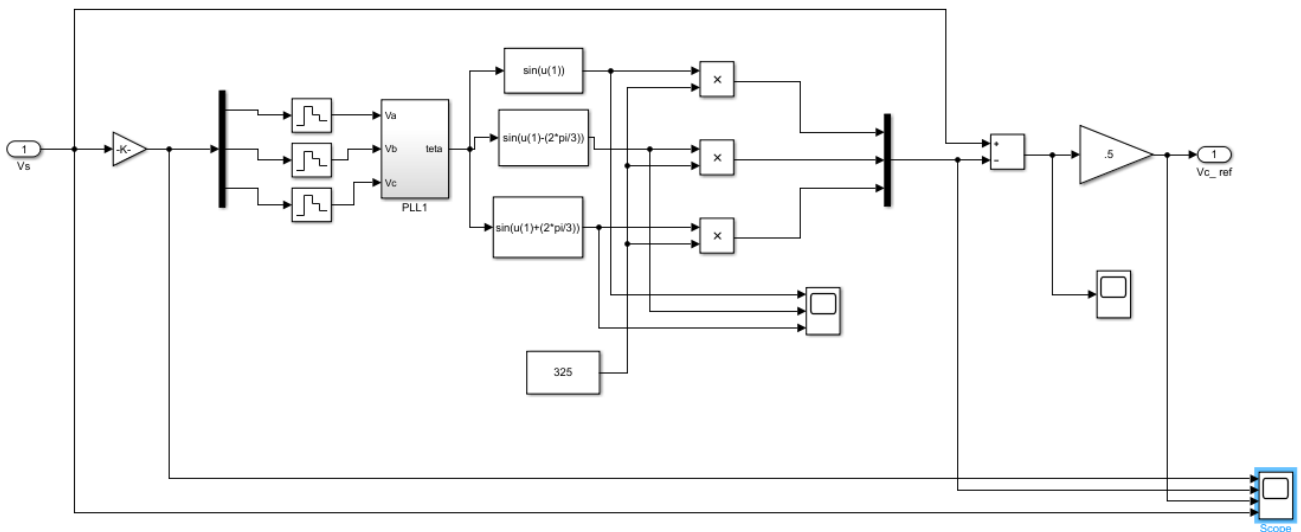


Figure III 18: Commande de la puissance série discrète.

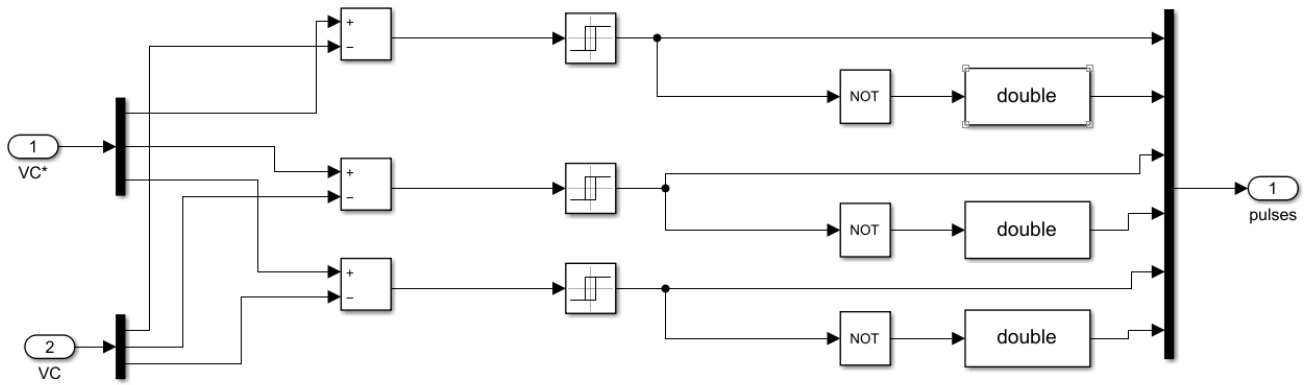


Figure III 19: Commande hystérésis.

Les paramètres de ce réseau électrique connecté au filtre actif de puissance série sont donnés dans le tableau suivant :

Vs (v)	Rs (Ω)	Ls (H)	Rc (Ω)	Lc (H)	Ra (Ω)	Ld(H)
380	1e-3	19.26e-7	1e-3	0.5e-3	30	10e-3
Lf (v)	Pt (VA)	Xt (pu)	Rt (pu)	Rm (pu)	Xm (pu)	
6e-3	10e-6	0.05	0.002	200	200	

Tableau III-3 : Paramètre du réseau électrique connecté au filtre actif de puissance série.

Les résultats de simulation que nous avons obtenus sont illustrés sur les figures suivantes :

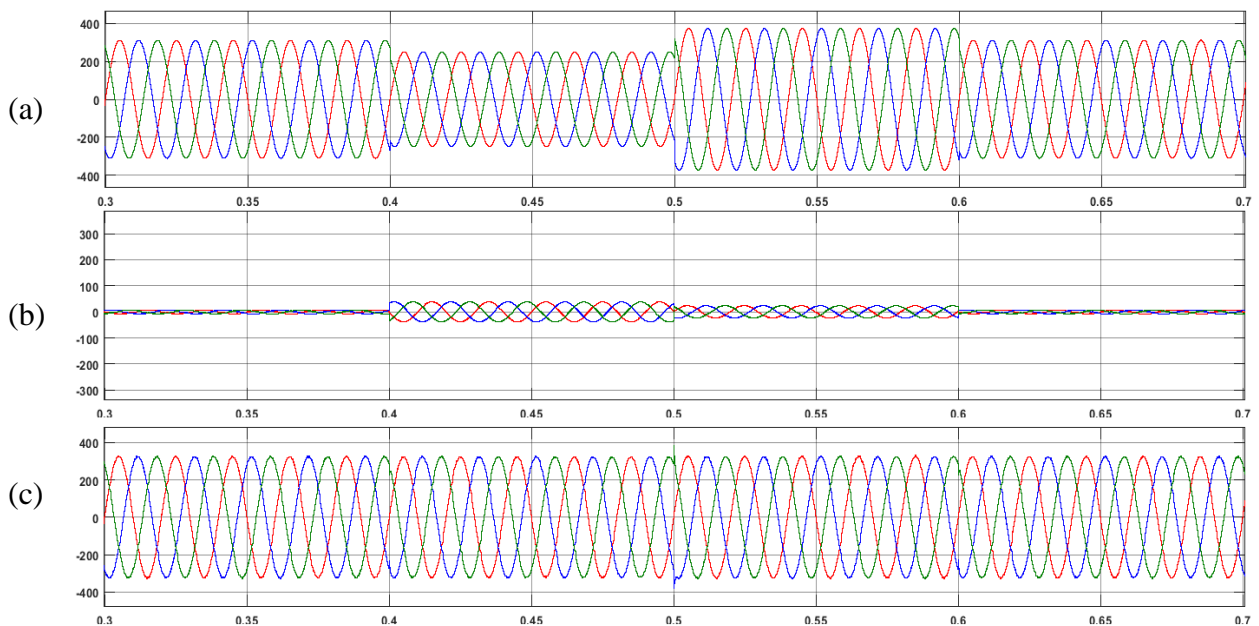


Figure III 20: (a) Tension de source. (b) Tension injecté par le filtre. (c) Tension de charge.

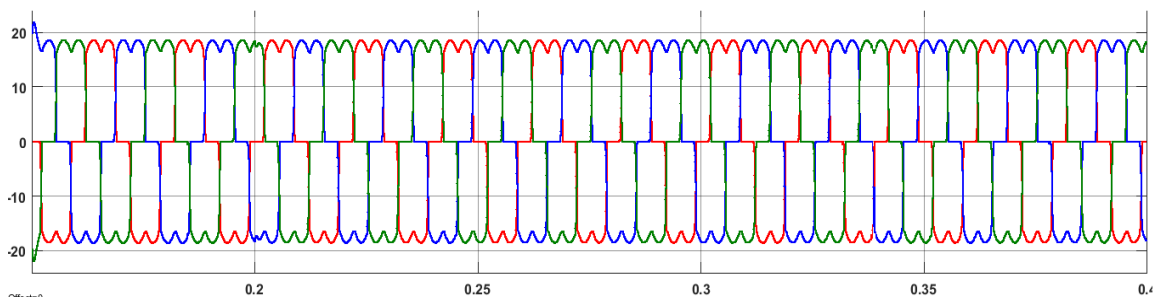


Figure III 21: courant de source.

On remarque dans la Figure III.20 des perturbations : sous-tension entre [0.4-0.5s] et surtension entre [0.5-0.6s] dans la source, mais ces perturbation sont été éliminé par le filtre actif de puissance série qu'on a utilisée.

III.3 Simulation d'un UPQC

- Nous allons maintenant présenter l'UPQC par la commande P-Q qui est illustré sur la figure suivante :

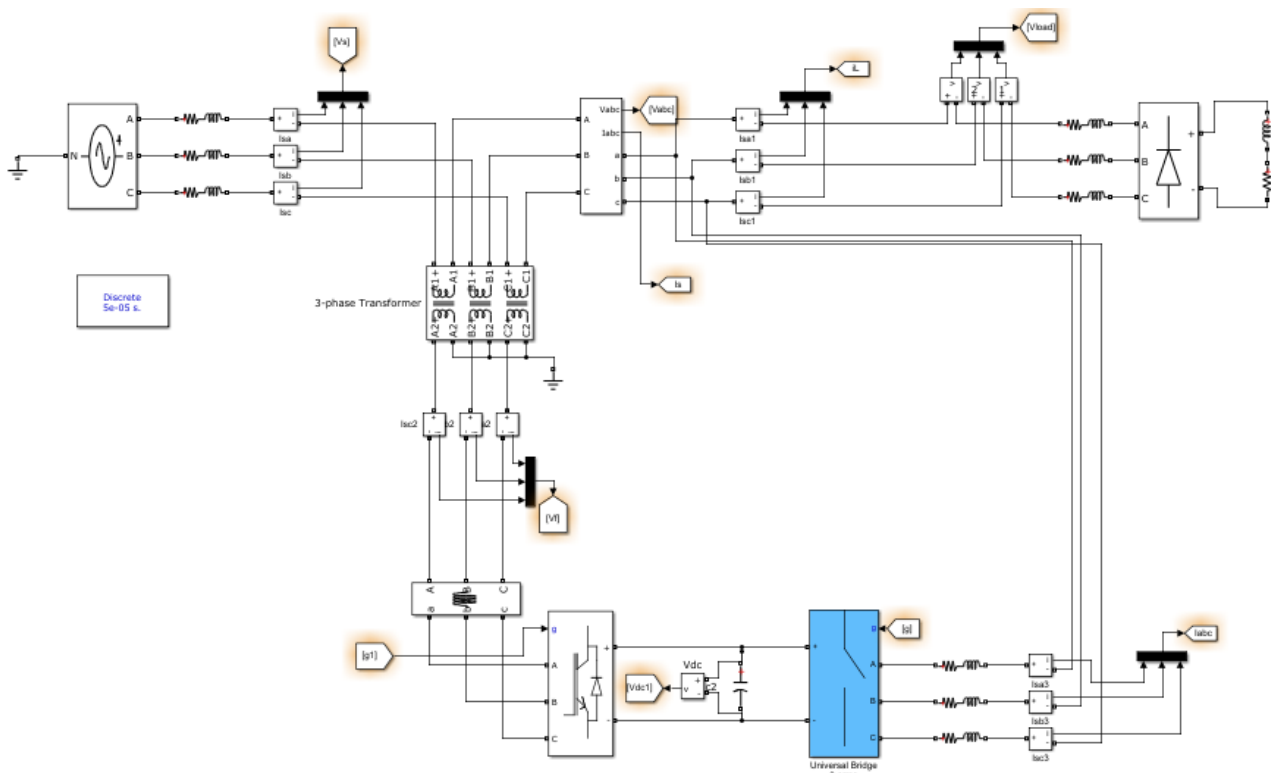


Figure III 22: Schéma d'un UPQC discrète.

Les deux figures suivantes montrent respectivement la commande du filtre actif de puissance parallèle et de la commande du filtre actif de puissance série.

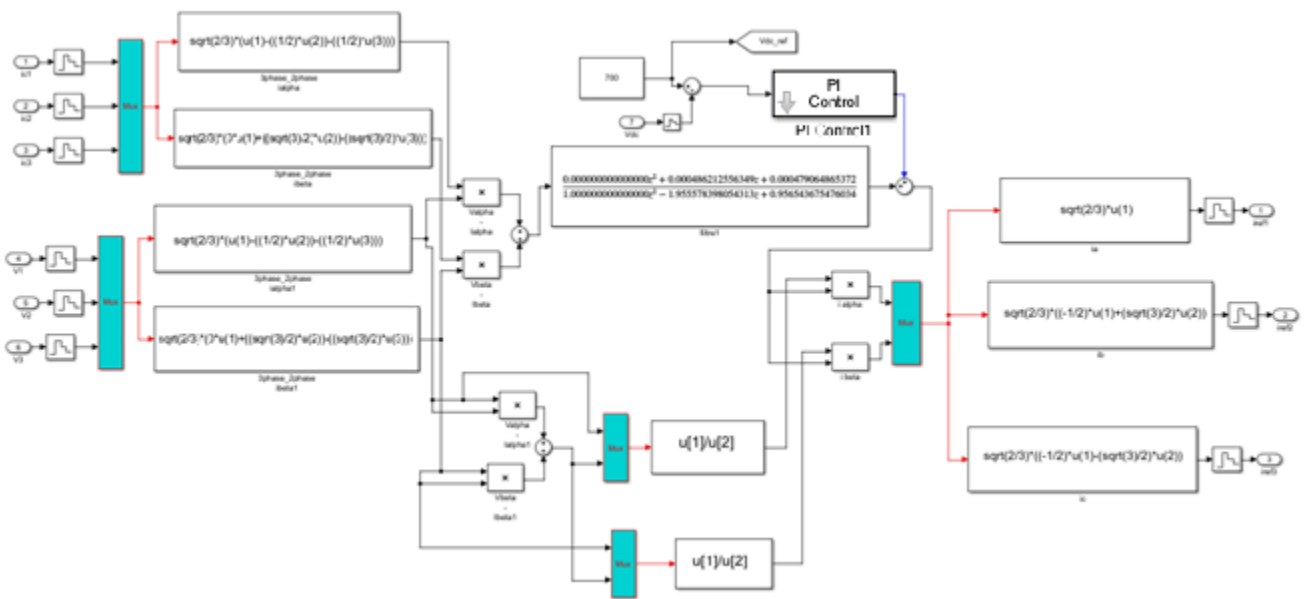


Figure III 23: Commande p-q discrète d'un UPQC (partie FAP).

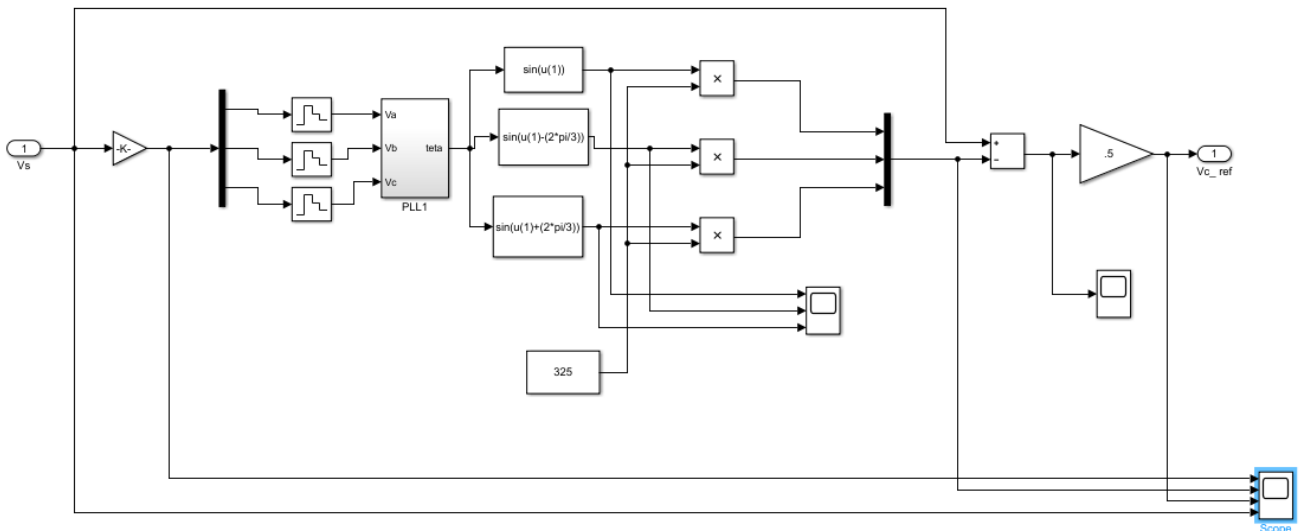


Figure III 24: Commande de la puissance série discrète (partie FAS).

Les résultats de simulation que nous avons obtenus sont illustrés sur les figures suivantes :

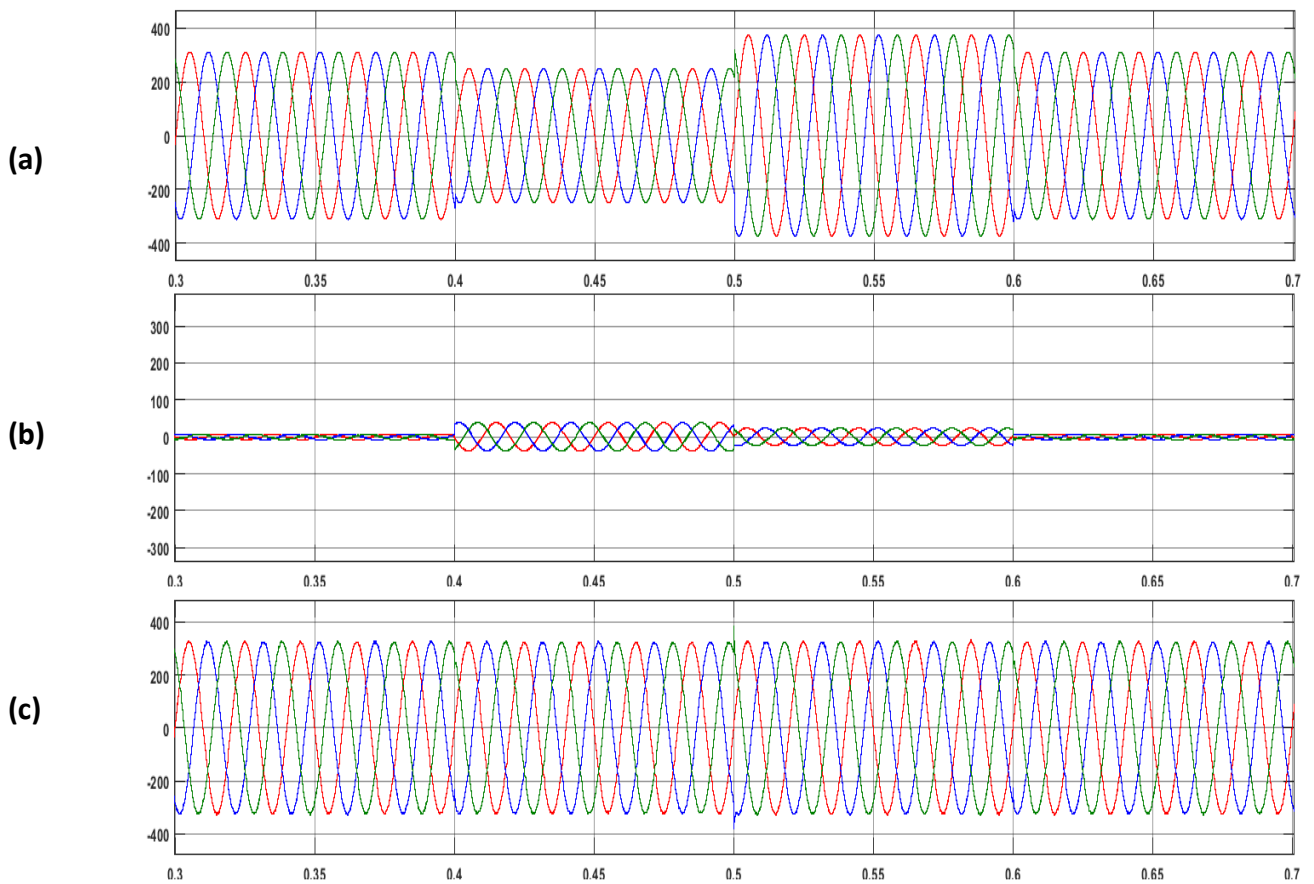


Figure III 25: (a) Tension de source. (b) Tension injecté par le FAP série. (c) Tension de charge

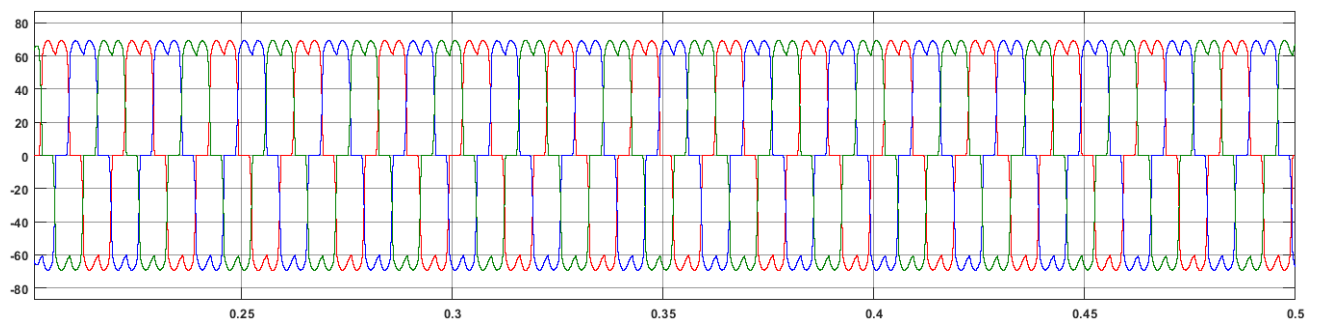


Figure III 26: Courant de charge.

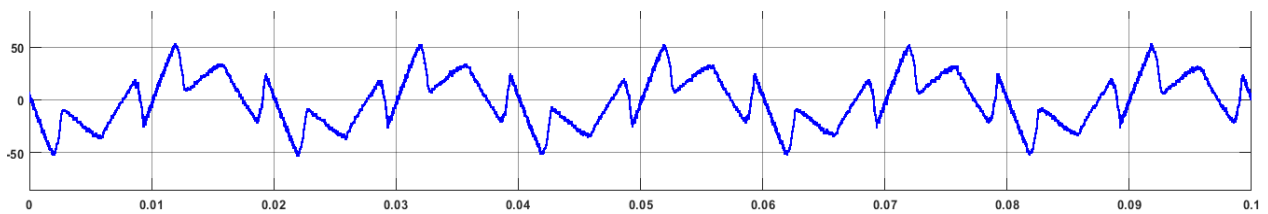


Figure III 27: Courant injecté par le FAP parallèle.

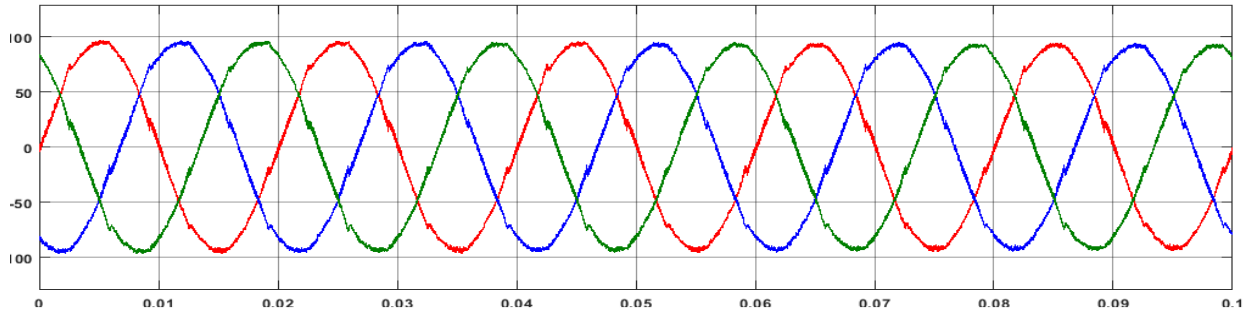


Figure III 28: Courant de source.

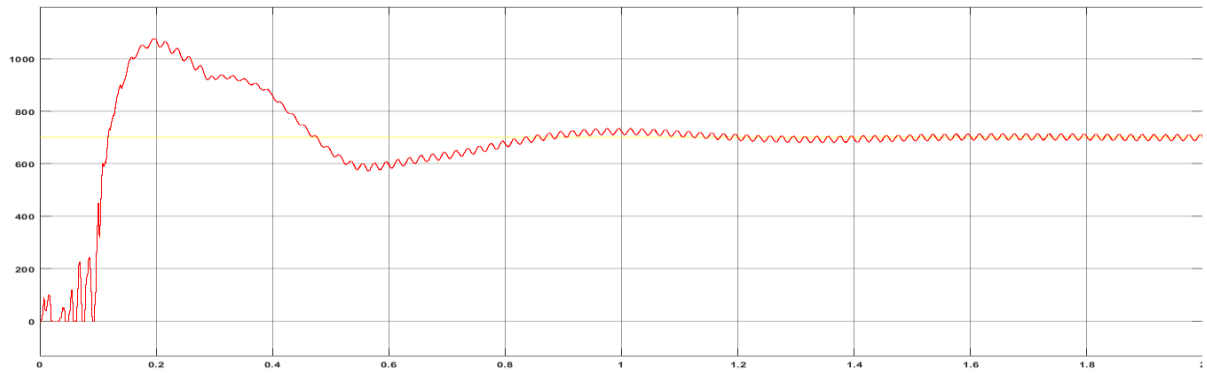


Figure III 29: Tension aux bornes du condensateur.

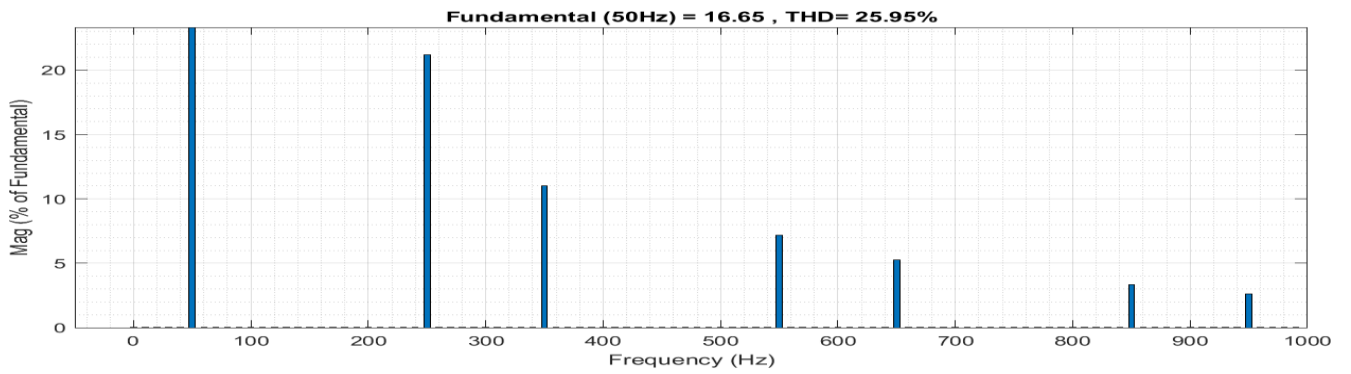


Figure III 30: Courant de chargephase1 et leur spectre de THD avant filtrage.

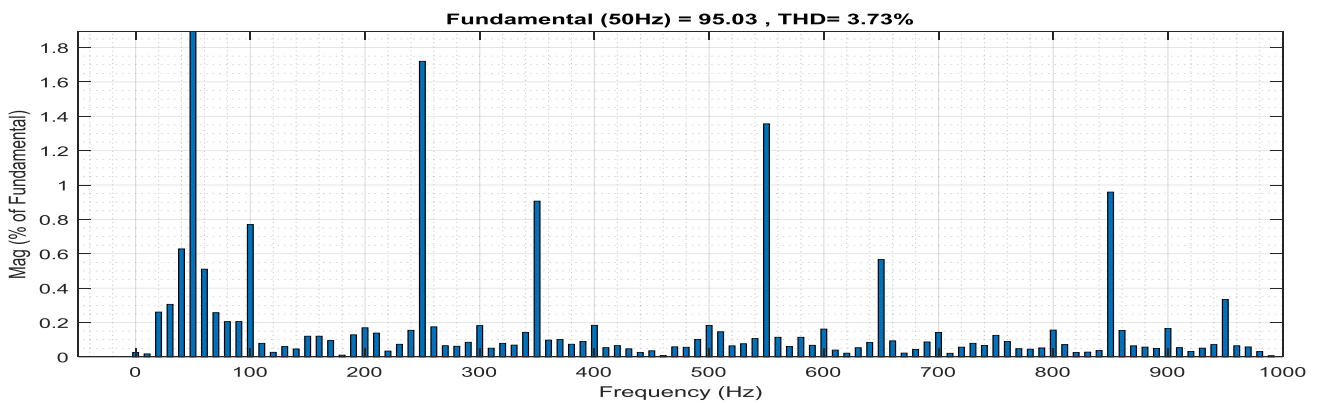


Figure III 31: Courant de source phase1 et leur spectre de THD après filtrage.

Nous remarquons des résultats de simulations de notre UPQC et plus exactement le filtre actif de puissance série détecte puis injecte en opposition de phase la chute de tension et la surtension généré coté source pour l'éliminer côté charges et que le filtre actif de puissance parallèle élimine les harmoniques de courant généré coté charge pour que le courant coté source soit sinusoïdal. De plus nous voyons bien que le THD avant filtrage était de 25.95% pour le courant de charge ; après filtrage le THD du courant de source devient 3.73%. Ainsi, nous constatons que notre système compense bien.

- Nous allons maintenant présenter l'UPQC par la commande D-Q qui est illustré sur la figure suivante :

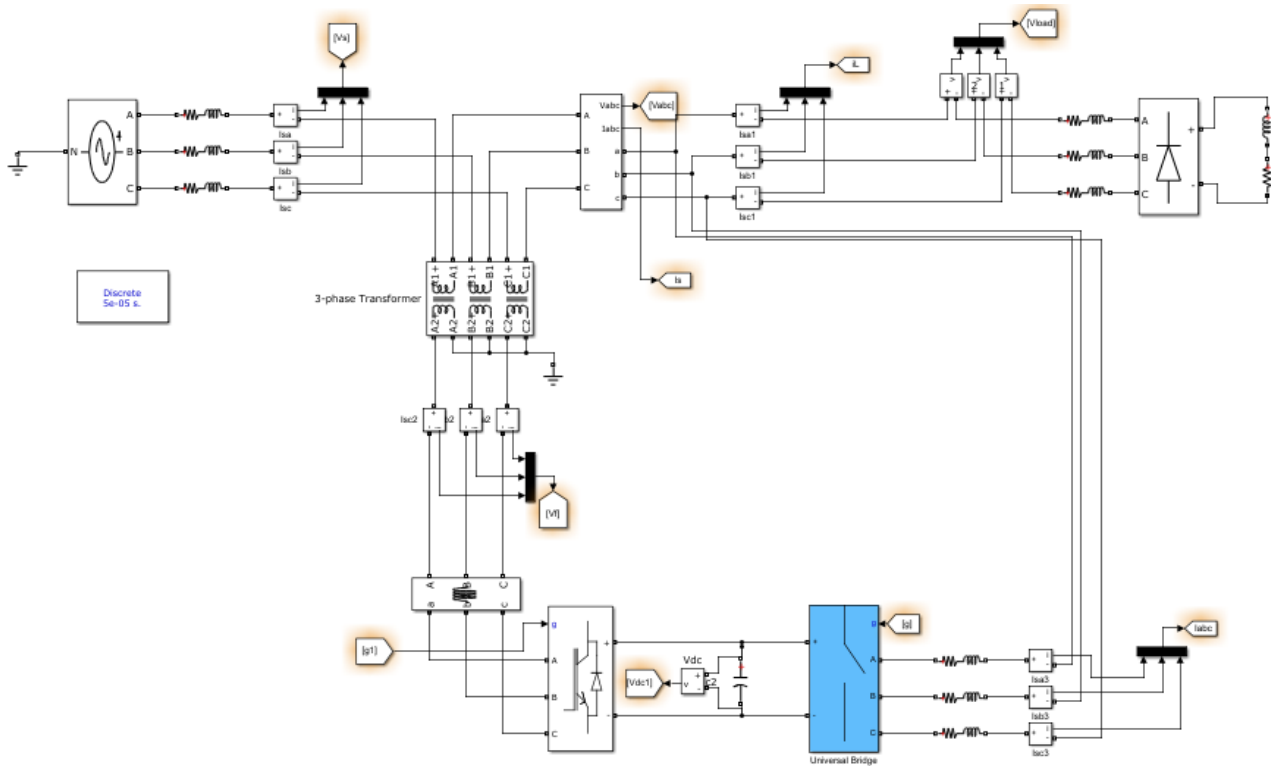


Figure III 32: Schéma d'un UPQC discrète.

Les deux figures suivantes montrent respectivement la commande du filtre actif de puissance parallèle et de la commande du filtre actif de puissance série.

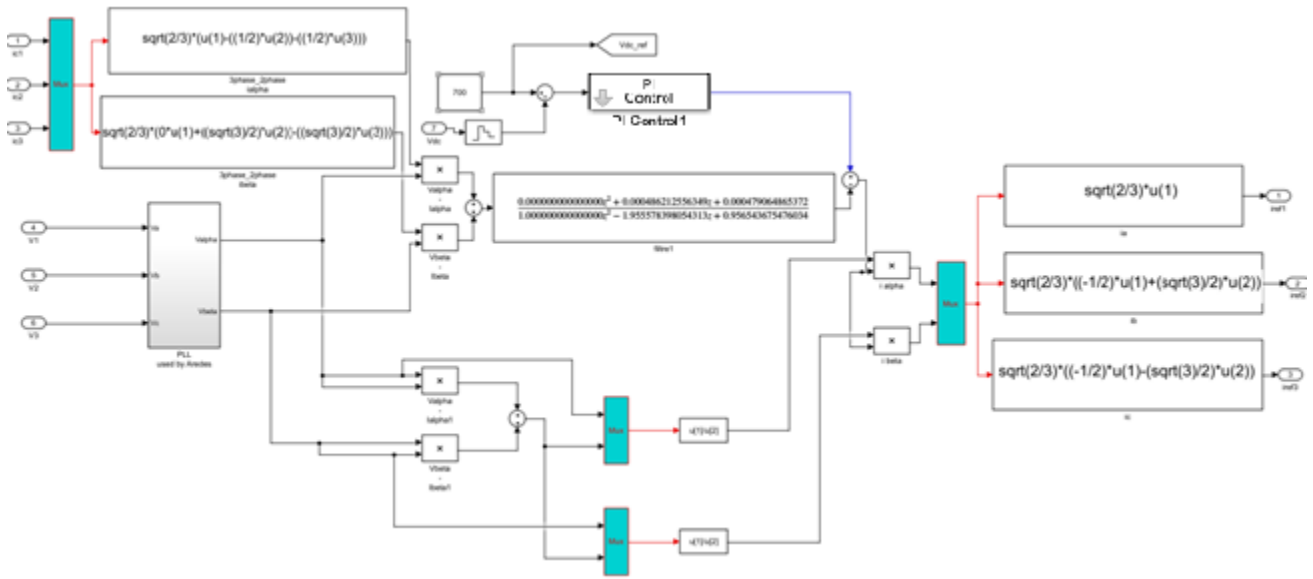


Figure III 33: Commande d-q discrète d'un UPQC (partie FAP).

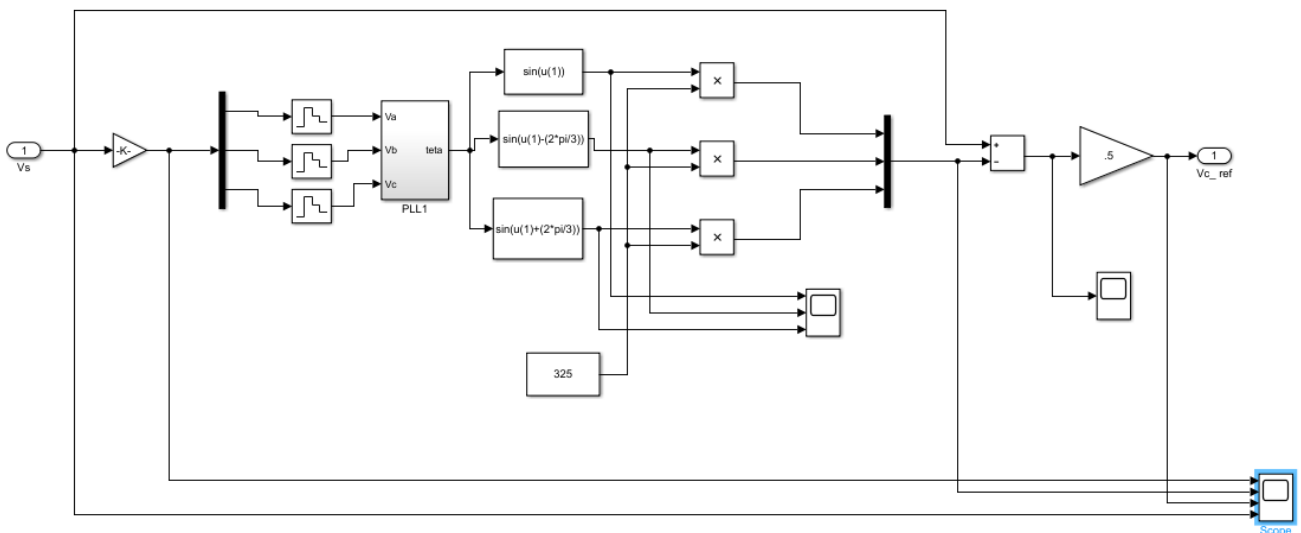


Figure III 34: Commande de la puissance série discrète (partie FAS).

Les résultats de simulation que nous avons obtenus sont illustrés sur les figures suivantes :

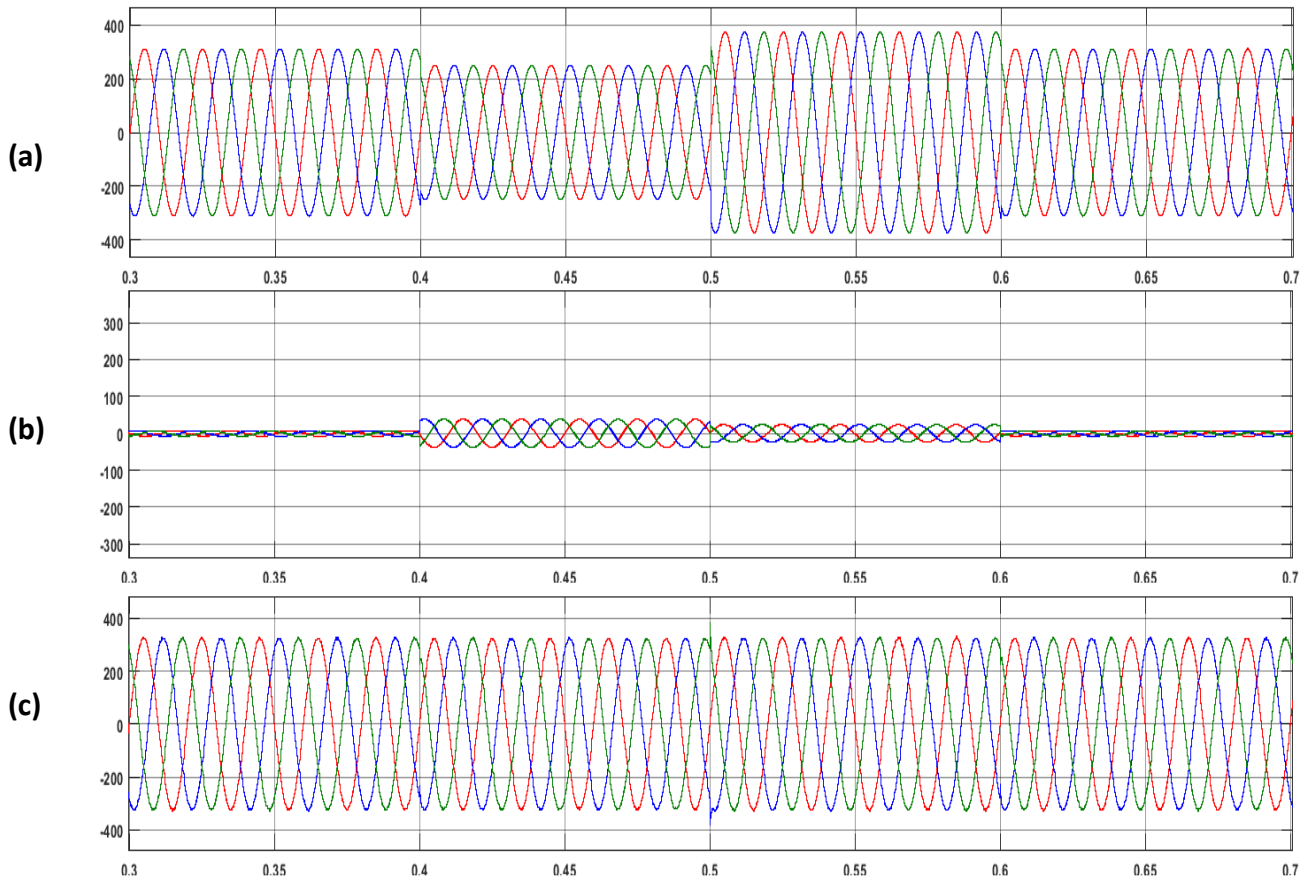


Figure III 35: (a) Tension de source. (b) Tension injecté par le FAP série. (c) Tension de charge.

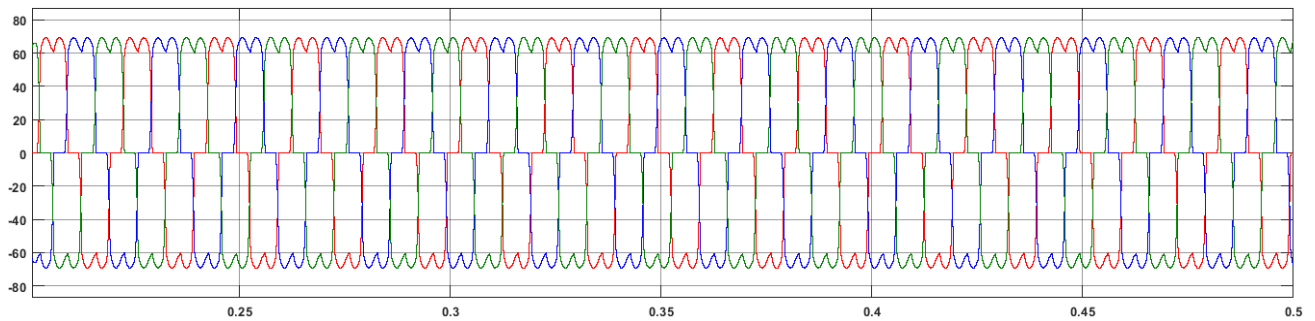


Figure III 36: Courant de charge.

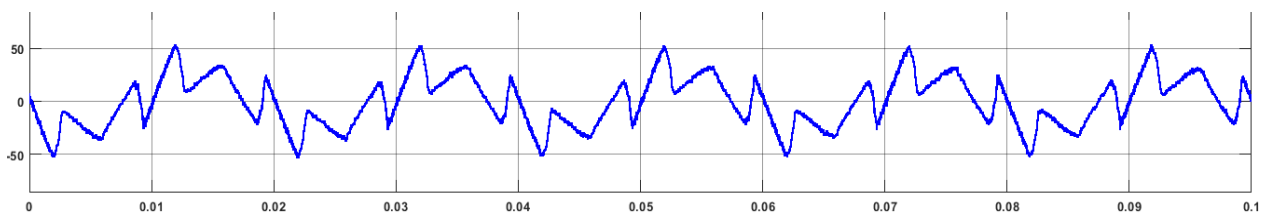


Figure III 37: Courant injecté par le FAP parallèle.

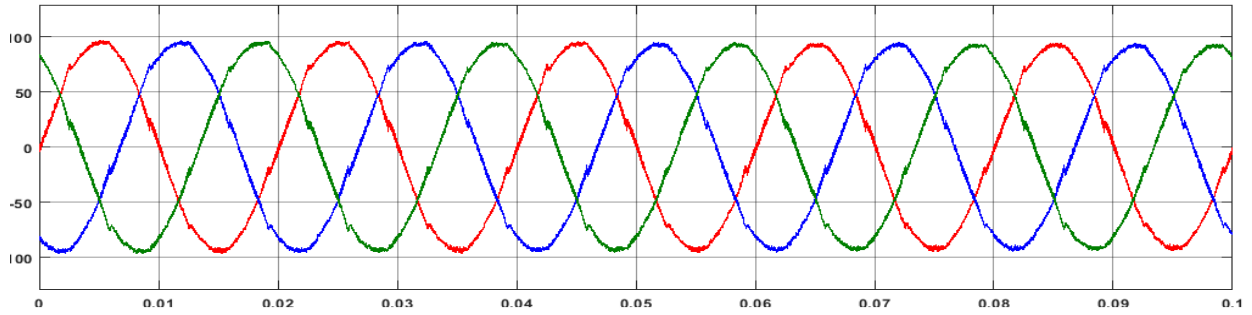


Figure III 38: Courant de source.

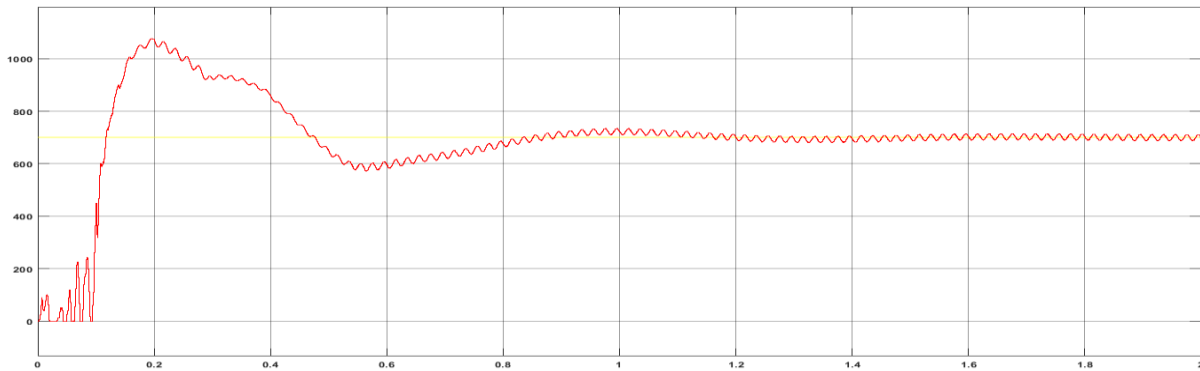


Figure III 39 : Tension aux bornes du condensateur.

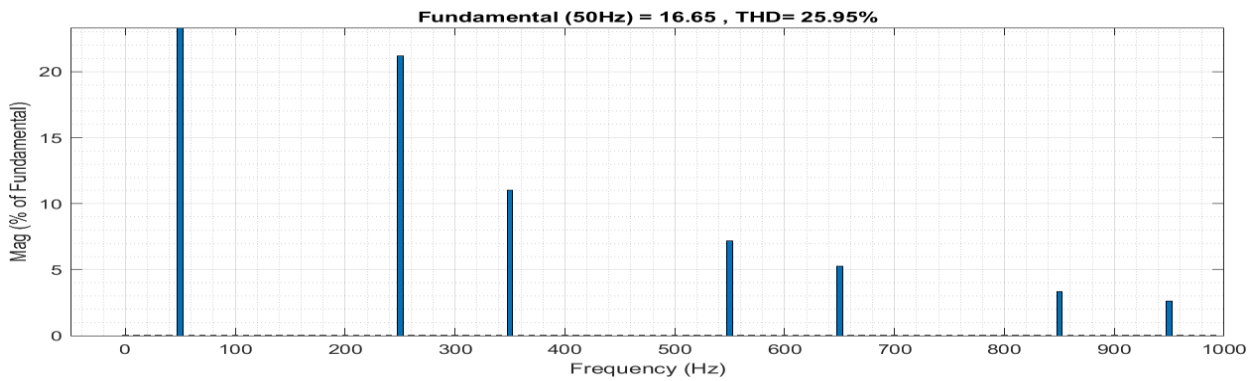


Figure III 40: Courant de charge phase1 et leur spectre de THD avant filtrage.

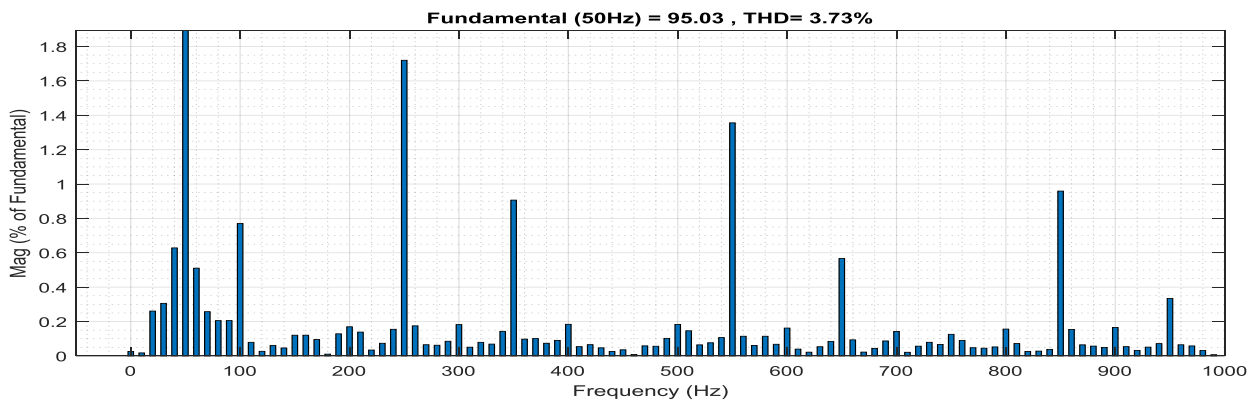


Figure III 41: Courant de source phase1 et leur spectre de THD après filtrage.

Nous remarquons des résultats de simulations de notre UPQC et plus exactement le filtre actif de puissance série détecte puis injecte en opposition de phase la chute de tension et la surtension générée côté source pour l'éliminer côté charges et que le filtre actif de puissance parallèle élimine les harmoniques de courant générés côté charge pour que le courant côté source soit sinusoïdal. De plus nous voyons bien que le THD avant filtrage était de 25.95% pour le courant de charge ; après filtrage le THD du courant de source devient 3.73%. Ainsi, nous constatons que notre système compense bien.

III.4 Conclusion

Après avoir étudié d'une manière détaillée le fonctionnement des filtres actifs parallèle et série dans les chapitres précédents, nous nous sommes intéressés à l'étude du conditionneur actif de puissance UPQC (série-parallèle).

Ce dispositif nous a permis de compenser à la fois les perturbations de type courant et tension générées par les charges non linéaires, ce qui a préservé notre source. Les résultats des différents THD en tensions et courants ont été conformes aux normes internationales.

Conclusion générale

Après avoir recensé les origines, les conséquences des perturbations électriques et présentées les solutions de dépollution, le choix d'une solution basée sur les principes de filtrage actif type (UPQC) a été retenu. Notre étude a porté sur l'étude conjointe de l'identification des harmoniques, chute de tension et surtension.

Dans ce mémoire de fin d'étude, nous avons confirmé que l'UPQC représente une solution universelle pour la compensation de plusieurs types de perturbation. Ainsi, nous avons proposé de faire l'étude des différentes stratégies de commande appliquée à la fois aux deux types de filtres actifs de puissance (FAP et FAS) pour constituer notre UPQC.

Nous avons montré que notre FAP à la suite d'une série de simulation a permis d'améliorer de façon sensible la qualité des courants de source avec des THD inférieurs à 5% après filtrage.

Nous nous sommes également intéressés à la structure d'un FAS où nous avons travaillé sur une commande afin d'éliminer les perturbations produites par la source.

Ainsi le FAP a amélioré la forme du courant de source et le FAS a amélioré la forme de la tension de charge. Enfin, nous avons montré que en les utilisant ensemble pour obtenir un UPQC comme étant une solution générale pour la compensation de toutes les perturbations de courants et de tensions. Les résultats de simulation ont montré la prise en charge de ce type de structure (UPQC) pour la compensation simultanée des perturbations courant et tension au niveau des réseaux électriques.

Références bibliographiques

- [1] **BOUCHAKOUR Salim** « Qualité de l'énergie » Bulletin des Energies Renouvelables N°43-2017
- [2] **GATTAL BOULAARES** «Méthodes d'analyse des perturbations électriques dans la qualité de l'énergie électrique en utilisant des nouvelles techniques pour l'application de creux de tension » mémoire de fin d'étude, l'université de Batna 2012.
- [3] **KAAZZAOUIABDELKADIR** «Amélioration des performances d'un filtre actif parallèle : application des réseaux de neurone adaptatifs» mémoire de fin d'étude, l'université de LARBI BEN M'HIDI de OUMELBOUAGHI 2015.
- [4] **MOHAMMEDALAA EDDINE ALALI** «Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension» Thèse Doctorat de l'université de Strasbourg 2002.
- [5] **D. Ould Abdeslam** “techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension” thèse doctorat Université de Haute-Alsace.08 décembre 2005.
- [6]**DJAFFAR OULD ABDESLAM** «Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension », Thèse de doctorat de l'université de Haute-Alsace 2005.
- [7] **AZZOUZ SAID, GHOBNI ALI, NISSE SALEM** «étude et simulation d'un filtre actif parallèle commandé par un mode glissant», mémoire de fin d'étude, université Echahidhamma Lakhdar d'el oued, 2021
- [8] **VANYALGNATOVA** «Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique. », Thèse de doctorat de Ingénieur Université Technique de Sofia le 20 Octobre 2006.
- [9] **HADDAD SALIM** «Gestion de la qualité de l'énergie électrique dans un réseau de transmission». Thèse de doctorat de l'université de BADJI MOKHTAR – ANNABA 2010.
- [10] **C. Collonobet & J.M.Lupin & J. Shcnoek**, « Perturbation harmoniques dans les réseaux pollués et leur traitement I », Cahier technique de Schneider Electric CT 152, édition février 2001.
- [11] **MOSTEFA TOUNSI Mahmoud** «Compensation des harmoniques et des perturbations du réseau connecté à une charge non linéaire utilisant les convertisseurs statiques avancés », thèse de doctorat de l'université d'ORAN 2021.
- [12] **ABDELMALEK BOULAHIA** «Etude des convertisseurs statiques destinés à la qualité de l'énergie électrique» mémoire de fin d'étude de l'université de Constantine 2009.
- [13] **KEBBAL Med RACIM et BAKIR KARIM** «Paramètres de la qualité de la tension d'un réseau électrique Etude et Analyse» Mémoire d'ingénieur d'état en Électrotechnique ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE, Juin 2008.

- [14] **M. Fatiha**, “Etude et Commande d’un Filtre Actif Parallèle à Structure de Tension”, *Mémoire de Magister, Univ. Oran*, Octobre 2001.
- [15] **M.A. Alali**, “Contribution à l’Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension”, *Thèse Doctorat de l’Université Louis Pasteur, Strasbourg I*, 2002.
- [16] **SAHLI ABDESALAM** « Filtrage actif et contrôle de puissance : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau », Mémoire de fin d’étude de l’université de FERHAT ABBAS de SETIF 2012.
- [17] **GAOUARFATEH, CHOUIDIRA Ibrahim, OULDDJE SIDI** « Commande d’un filtre actif série », mémoire de fin d’études de l’université de M’SILA 2010.
- [18] **BERGERAS François** « Etude de nouvelles structures de filtres actifs intégrées en Hyperfréquences », thèse de Doctorat de l’université de limoges, Spécialité : "Electronique des Hautes Fréquences, Photonique et systèmes", Université de limoges, 2010..
- [19] **S. CHENNAI**, « Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs : Apport des Techniques de l’Intelligence Artificielle », Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2013.
- [20] **Rezzig Maroua -Laib Lina** « Amélioration de la qualité d’énergie par filtrage actif utilisant la commande DPC », *mémoire master 2020-2021*
- [21] **Meriem AZMANI & Nerimane BENBACHIR** « Etude et simulation d’un conditionneur de puissance (UPQC) », *mémoire master 2016-2017*
- [22] **Bouabibsa Messaoud- Hafirassou Ayyoub** « Amélioration de la qualité d’énergie dans le réseau électrique par la technique UPQC et identification des courants harmoniques », *mémoire master 2019-2020*
- [23] **Mohamed Choukri BENHABIB** « Contribution à l’étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension : Modélisation, simulation et validation expérimentale de la commande » Thèse à l’université Henri Poincaré, Nancy-I en 17 décembre 2004
- [24] **BHATTACHARYA, S.; DIVAN, D. M. ; BANERJEE, B.**, « Synchronous frame harmonic isolator using active series filter » " *EPE’91*, pp.3.030-3.35, 1991
- [25] **H. AKAGI, Y. KANAZAWA, and A. NABAE** "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits " Proceeding International power electronics conference. Tokyo, Japan, PP. 1375-1386, 1983.
- [26] **AKAGI, H.; OGASAWARA, S.; KIM, H.**, " The theory of instantaneous power in three-phase four-wire systems and its applications " *Electrical engineering in Japan*, vol.135, n°.3, pp. 74-86, 2001.
- [27] **OMEIRI Amar**, « Simulation d’un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant », thèse de doctorat, université d'Annaba, 2007.

Résumé

Les perturbations de types courants ou tension dans les réseaux électriques sont de plus en plus présente du fait de phénomènes naturels (foudre, ...) ou dû à l'accroissement de l'usage de charges non-linéaires et l'interconnexion avec les réseaux décentralisés, sans oublier les effets pouvant survenir lors des perturbations des sources de productions d'énergie.

Pour résoudre ce problème nous avons étudié le conditionneur Universel (UPQC). Il s'agit d'un système de filtrage actif de puissance, qui associe deux filtres actifs de puissance l'un raccordé en parallèle (FAP) pour compenser les harmoniques de courant et l'autre en série (FAS) chargé de compenser les tensions perturbatrices.

Suites à nos simulations de nos filtres actifs de puissances (FAP, FAS, UPQC) sous environnement Matlab/SimPower System cela nous a permis d'aboutir à de bons résultats avec des THDs de signaux conformes aux normes en vigueur.

ملخص

تتزايد الاضطرابات في أنواع التيار أو الجهد في الشبكات الكهربائية بسبب الظواهر الطبيعية (البرق ، وما إلى ذلك) أو بسبب الزيادة في استخدام الأحمال غير الخطية والترابط مع الشبكات اللامركزية دون نسيان الآثار التي قد تحدث أثناء اضطرابات مصادر إنتاج الطاقة.

لحل هذه المشكلة قمنا بمعالجة المكيف العالمي (UPQC). هذا هو نظام ترشيح طاقة نشط ، والذي يجمع بين مرشحين طاقة فعالين ، أحدهما متصل بالتوازي (FAP) للتعويض عن التوافقيات الحالية والآخر في سلسلة (FAS) مسؤول عن تعويض الفولتية المعطلة.

بعد عمليات المحاكاة الخاصة بنا لمرشحات الطاقة النشطة (UPQC ، FAS ، FAP) في بيئة نظام Matlab / SimPower ، سمح لنا ذلك بتحقيق نتائج جيدة باستخدام إشارات THDs التي تتوافق مع المعايير السارية

Abstract

Disturbances of current types or voltage in electrical networks are increasingly present as a result of using non- linear loads and the interconnection with the decentralized networks without forget the effects that can occur during disturbances of sources of energy production.

To solve this problem we have approached the universal conditioner (UPQC). It is an active filtering system, which associates twos filters, one connected in parallel (FAP) to compensate for current harmonics and the other in series (FAS) to compensate for disturbing voltages.

Following our simulations of our active power filters (FAP, FAS, UPQC) under a Matlab / SimPower System environment, whether in balanced or unbalanced conditions, we achieved good results with THDs that respect the norms.