

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 : Électrotechnique

Spécialité : commandes électriques

Par : BENLEBBAD IMANE et BELMOKHTAR FERIEL

Sujet

Etude et simulation d'un filtre actif de puissance à trois niveaux hybride

Soutenu publiquement, le 09 /06 /2025, devant le jury composé de :

Mme BOURI. S.
M BRIKCI NIGASSA. M.A
M. BENHABIB Mohamed Choukri

MCA
MAA
Professeur

Université de Tlemcen
Université de Tlemcen
Université de Tlemcen

Président
Examineur
Encadreur

Année universitaire :2024 /2025

Dédicace

À mes chers parents, que Allah les préserve, véritables piliers de ma vie,
toujours présents pour me soutenir : c'est grâce à votre aide précieuse et à
vos encouragements constants, que j'ai pu atteindre le niveau d'études que
j'ai aujourd'hui.

À mon cher grand frère Imad Eddine,

À ma chère petite sœur Nour El-Houda,

À ma famille : mon grand-père, mes tantes, mes oncles, mes cousins, mes
cousines, et tous les membres de ma grande famille qui m'ont toujours
soutenue.

À mes meilleurs amis, avec qui j'ai partagé mes plus belles expériences,
mes meilleurs souvenirs, mais aussi mes plus grandes joies et mes plus
grandes peines.

IMANE BENLEBBAD

Dédicace

Je remercie Allah, le Tout-Puissant, de m'avoir insufflé le courage et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail, malgré les nombreuses difficultés rencontrées sur mon chemin.

Je dédie ce modeste travail, fruit de mon engagement personnel, de ma persévérance et de mon amour pour le savoir, à :

☀ Mes très chers parents, que Dieu les préserve et les comble de sa bénédiction. Ils sont ma source d'inspiration, mon refuge dans l'épreuve, et mes piliers dans la vie.

☀ Mes frères bien-aimés : Mohammed, Abdhalim, Abk, Montassir et Bilalah — que Dieu veille sur eux et les guides vers ce qu'il y a de meilleur.

☀ Ma précieuse petite sœur, Fatima, dont l'innocence et la douceur illuminent nos vies.

À travers ces lignes, j'exprime toute ma gratitude et mon amour à ceux qui, de près ou de loin, ont cru en moi et m'ont soutenu dans ce parcours.

FERIEL BELMOKHTAR

Remerciements

Nous tenons tout premièrement à remercier le bon Dieu.

*Notre créateur qui nous a donné la force et le courage nécessaires pour atteindre nos
objectifs,*

et la volonté pour atteindre nos objectifs pour terminer ce travail.

Toute notre gratitude et nos remerciements

à notre encadrant, Mr. BENHABIB Mohamed Choukri.

- Professeur à la Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen

Nous tenons également à remercier les membres du jury

Mr. BRIKCI NIGASSA Mohammed Amine Maitre-Assistant à

l'Université de Tlemcen et Madame BOURI Sihem

*Maitre de conférences à l'Université de Tlemcen pour avoir accepté de juger notre
travail.*

*Nous tenons également à remercier tous les participants, responsables et enseignants
de notre département de génie électrique et électronique.*

Nous tenons également à remercier toutes

les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Table des matières

Liste des figures.....	1
Liste des tableaux	4
Liste des symboles.....	5
Introduction générale.....	6
CHAPITRE 1 : Introduction aux Filtres actif de puissance Parallèle.....	8
Introduction	9
I.1. Perturbations électriques	9
I.2. Solution de dépollution des réseaux électriques.....	10
I.2.1. Filtres passifs.....	10
I.2.2. Filtres actifs de puissance	11
I.2.2.1. Filtre actif de puissance série (FAPS).....	12
I.2.2.2 Filtre actif de puissance parallèle (FAPP)	12
I.2.2.3 Différentes configurations de filtre actif de puissance.....	13
I.3. Stratégie de commande des FAPs	14
I.4. Calcul des filtres passifs.....	15
Calcul du filtre pour éliminer la 5 ^{ième} Harmonique.....	16
Calcule du filtre pour éliminer la 7 ^{ième} harmonique.....	17
I.5. Simulation du filtre passif connecté au réseau électrique	18
I.6. Simulation du FAPP sans l'utilisation de filtre passif	20
Conclusion.....	26
Chapitre 2 : Étude des différents types de FAPP trois niveaux	27
Introduction	27
2.1 Topologie des FAPP trois niveaux	28
2.1.1 FAPP trois niveaux de type NPC (Neutral Point Clamped).....	28
2.1.2 L'onduleur trois niveaux type FC (Flynig capacitor).....	29
2.1.3 FAPP trois niveaux type H-bridge et T-bridge	29
2.2. Etude des MLI utilisé par le FAP 3 niveaux	31
2.3. Etude de deux autres stratégies de commande.....	34
2.3.1 Commande PQ intégrant des Filtres multi-variable	35
2.3.2 Commande de Fryze.....	36
Conclusion.....	37

Chapitre 3 : Simulation des différents FAPP trois niveaux et filtre passif.....	38
Introduction	39
3.1 Résultat de Simulation des FAPP trois niveaux selon les topologies sans utiliser de filtre passif	39
3.1.1 Topologie NPC utilisant la commande PQ	39
3.1.2 Topologie FC utilisant la commande PQ	41
3.1.3 Topologie T-bridge utilisant la commande PQ	42
3.1.4 Topologie H-bridge utilisant la commande PQ.....	43
3.1.5 Topologie NPC utilisant la commande PQ incluant deux FMV	44
3.1.6 Topologie FC utilisant la commande PQ incluant deux FMV	46
3.1.7 Topologie T-bridge utilisant la commande PQ incluant deux FMV	47
3.1.8 Topologie H-bridge utilisant la commande PQ incluant deux FMV	48
3.1.9 Topologie NPC utilisant la commande de Fryze.....	49
3.1.10 Topologie FC utilisant la commande de Fryze	51
3.1.11 Topologie T-Bridge utilisant la commande de Fryze.....	52
3.1.12 Topologie H-bridge utilisant la commande de Fryze	53
3.2 Résultat de Simulation des FAPP trois niveaux selon les topologies en utilisant les filtres passifs	54
3.2.1 Topologie NPC utilisant la commande PQ	54
3.2.2 Topologie FC utilisant la commande PQ	57
3.2.3 Topologie T-bridge utilisant la commande PQ	58
3.2.4 Topologie H-bridge utilisant la commande PQ.....	59
3.2.5 Topologie NPC utilisant la commande PQ incorporant deux FMV	60
3.2.6 Topologie FC utilisant la commande PQ incorporant deux FMV	62
3.2.7 Topologie T-bridge utilisant la commande PQ incorporant deux FMV	63
3.2.8 Topologie H-bridge utilisant la commande PQ incorporant deux FMV	64
3.2.9 Topologie NPC utilisant la commande de Fryze.....	65
3.2.10 Topologie FC utilisant la commande de Fryze	67
3.2.11 Topologie T-Bridge utilisant la commande de Fryze.....	68
3.2.12 Topologie H-bridge utilisant la commande de Fryze	69
3.3 Résultat de Simulation des FAPP trois niveaux selon les topologies en utilisant les filtres passifs 5 ^{ème} et 7 ^{ème} en même temps.....	70
3.3.1 Topologie NPC utilisant la commande de Fryze.....	71
3.3.2 Topologie FC utilisant la commande de Fryze	72
3.3.3 Topologie T-Bridge utilisant la commande de Fryze.....	73
3.3.4 Topologie H-bridge utilisant la commande de Fryze	74
3.4 Simulation du FAPP trois niveaux placé avant le filtre passif parallèle	77

3.4.1 Topologie NPC utilisant la commande PQ incluant deux FMV	78
3.4.2 Topologie FC utilisant la commande PQ incluant deux FMV	79
3.4.3 Topologie T-bridge utilisant la commande PQ incluant deux FMV	80
Conclusion.....	81
Conclusion générale	82
Référence bibliographique.....	84
Annexe	88
Résumé :.....	93

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1 Schéma des filtres passifs	11
Figure 1.2 Schéma d'un FAPS.....	12
Figure 1.3 Schéma d'un FAPP.....	12
Figure 1.4: Combinaison parallèle-série de filtres actifs.	13
Figure 1.5: Association d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.	13
Figure 1.6: Association d'un filtre FAPS et d'un filtre passif.	14
Figure 1.7: Stratégie de commande directe basée sur les puissances instantanées PQ utiliser par un FAPP	14
Figure 1.8 : Stratégie de commande directe basée sur la méthode DQ utiliser par un FAPP	15
Figure 1.9 : Schéma du système complet.....	18
Figure 1.10: Courant de charge et sa FFT.....	19
Figure 1.11 : Courant de source et sa FFT	19
Figure 1.12 : Schéma du système complet simulé sur Matlab SimPower Syste	20
Figure 1.13: Tension de source	21
Figure 1.14: Courant de charge	21
Figure 1.15: Courant injecté par le FAPP	21
Figure 1.16: Courant de source après filtrage	21
Figure 1.17: Tension aux bornes du condensateur du FAPP	22
Figure 1.18: FFT et THD du courant de source de la phase1 avant et après filtrage.....	22
Figure 1.19: Schéma du système complet simulé sur Matlab SimPower System	23
Figure 1.20: Tension de source	24
Figure 1.21 : Courant de charge	24
Figure 1.22 : Courant injecté par le FAPP	24
Figure 1.23 : Courant de source après filtrage	25
Figure 1.24: Tension aux bornes du condensateur du FAPP	25
Figure 1.25: FFT et THD du courant de source de la phase1 avant et après filtrage.....	25

Chapitre 2

Figure 2.1: Schéma simplifié d'un onduleur multi-niveau type NPC.....	28
Figure 2.2: Schéma simplifié d'un onduleur multi-niveau type FC.	29
Figure 2.3: Onduleur multi-niveaux de type H-bridge	30
Figure 2.4: Onduleur multi niveaux de type T-bridge	31
Figure 2.5: MLI pour commander un pont H connecté à une seule phase du réseau	32

Figure 2.6: Signaux des dents de scie comparer à une référence sinusoïdale pour le pont H.	32
Figure 2.7: Signaux des dents de scie comparer à une référence sinusoïdale pour un bras du T-bridge.	33
Figure 2.8: Commande MLI d'un onduleur type T bridge	33
Figure 2.9: MLI pour commander un FAPP de type NPC et FC.....	34
Figure 2.10: Signaux commande MLI sinusoïdale de l'onduleur type NPC et FC	34
Figure 2.11: Schéma du FMV.....	35
Figure 2.12: Commande PQ modifié utilisant deux FMV	36
Figure 2.13: Schéma de la commande de Fryze.	37

Chapitre 3

Figure 3.1: Simulation du FAPP type NPC utilisant la commande PQ.....	39
Figure 3.2: Simulation du FAPP multi-niveaux type NPC utilisant la commande PQ.	40
Figure 3. 3: Simulation du FAPP Trois-niveaux type FC utilisant la commande PQ	41
Figure 3. 4: Simulation du FAPP Trois-niveaux type T-bridge utilisant la commande PQ	42
Figure 3.5: Simulation du FAPP Trois-niveaux type H-bridge utilisant la commande PQ.....	43
Figure 3.6: Commande PQ utilisant deux FMV.	44
Figure 3.7: Simulation du FAPP multi-niveaux type NPC utilisant la commande PQ utilisant deux FMV	45
Figure 3.8: Simulation du FAPP Trois-niveaux type FC utilisant la commande PQ utilisant deux FMV	46
Figure 3.9 : Simulation du FAPP Trois-niveaux type T-bridge utilisant la commande PQ utilisant deux FMV	47
Figure 3.10: Simulation du FAPP Trois-niveaux type H-bridge utilisant la commande PQ utilisant deux FMV	48
Figure 3.11: Commande de Fryze.....	49
Figure 3.12: Simulation du FAPP multi-niveaux type NPC utilisant la commande de Fryze.....	50
Figure 3.13: Simulation du FAPP Trois-niveaux type FC utilisant la commande de Fryze.....	51
Figure 3.14: Simulation du FAPP Trois-niveaux type T-bridge utilisant la commande de Fryze	52
Figure 3.15: Simulation du FAPP Trois-niveaux type H-bridge utilisant la commande de Fryze	53
Figure 3.16 :Simulation du filtre passif éliminant la 5ième harmonique et du FAPP type NPC utilisant commande p-q.....	55
Figure 3.17: Simulation du FAPP multi-niveaux type NPC utilisant la commande PQ.	56
Figure 3.18: Simulation du FAPP Trois-niveaux type FC utilisant la commande PQ	57
Figure 3.19: Simulation du FAPP Trois-niveaux type T-bridge utilisant la commande PQ	58
Figure 3.20 : Simulation du FAPP Trois-niveaux type H-bridge utilisant la commande PQ.....	59
Figure 3.21: Commande PQ utilisant deux FMV.	60

Figure 3.22: Simulation du FAPP multi-niveaux type NPC utilisant la commande PQ utilisant deux FMV	61
Figure 3.23 : Simulation du FAPP Trois-niveaux type FC utilisant la commande PQ utilisant deux FMV	62
Figure 3.24 : Simulation du FAPP Trois-niveaux type T-bridge utilisant la commande PQ utilisant deux FMV	63
Figure 3.25: Simulation du FAPP Trois-niveaux type H-bridge utilisant la commande PQ utilisant deux FMV	64
Figure 3.26: Commande de Fryze.	65
Figure 3.27: Simulation du FAPP multi-niveaux type NPC utilisant la commande de Fryze.....	66
Figure 3.28: Simulation du FAPP Trois-niveaux type FC utilisant la commande de Fryze.....	67
Figure 3.29: Simulation du FAPP Trois-niveaux type T-bridge utilisant la commande de Fryze	68
Figure 3.30: Simulation du FAPP Trois-niveaux type H-bridge utilisant la commande de Fryze	69
Figure 3.31:Simulation du filtre passif éliminant la 5 et 7ième harmonique et du FAPP type NPC utilisant la commande Fryze	71
Figure 3.32: Simulation du FAPP multi-niveaux type NPC utilisant la commande de Fryze.....	72
Figure 3.33: Simulation du FAPP Trois-niveaux type FC utilisant la commande de Fryze.....	73
Figure 3.34 : Simulation du FAPP Trois-niveaux type T-bridge utilisant la commande de Fryze ...	74
Figure 3.35: Simulation du FAPP Trois-niveaux type H-bridge utilisant la commande de Fryze	75
Figure 3.36:Simulation du filtre passif parallèle éliminant la 5ième harmonique et du FAPP trois niveau placé avant le filtre passif.....	77
Figure 3.37: Schéma de contrôle du filtre passif parallèle.....	77
Figure 3.38 : Simulation du FAPP multi-niveaux type NPC utilisant la commande PQ utilisant deux FMV.....	78
Figure 3.39: Simulation du FAPP multi-niveaux type FC utilisant la commande PQ utilisant deux FMV.....	79
Figure 3.40 : Simulation du FAPP multi-niveaux type T-bridge utilisant la commande PQ utilisant deux FMV.	80

Liste des tableaux

Tableau 1.1:Paramètre préliminaire des deux filtres.	15
Tableau 1.2:THD avant et après filtrage.....	22
Tableau 1.3:THD avant et après filtrage.....	26
Tableau 2.1:Etat des interrupteurs d'un onduleur trois niveaux type FC.	29
Tableau 2.2:Etat des interrupteurs du FAP trois niveaux de type H-bridge, pour un seul pont H.....	30
Tableau 2.3:Etat des interrupteurs du FAP trois niveaux de type T-bridge.....	31
Tableau 3.1:Quatre topologies de FAPP 3 niveaux (Avant et Après Filtrage)	44
Tableau 3.2:Quatre topologies de FAPP 3 niveaux (Avant et Après Filtrage)	49
Tableau 3.3 :Quatre topologies de FAPP 3 niveaux (Avant et Après Filtrage)	54
Tableau 3.4 :Quatre topologies de FAPP 3 niveaux (Avant et Après Filtrage)	60
Tableau 3.5 :Quatre topologies de FAPP 3 niveaux (Avant et Après Filtrage)	65
Tableau 3.6 :Quatre topologies de FAPP 3 niveaux (Avant et Après Filtrage)	70
Tableau 3.7 : Quatre topologies de FAPP 3 niveaux (Avant et Après Filtrage)	75
Tableau 3.8 :Quatre topologies de FAPP 3 niveaux (Avant et Après Filtrage)	76
Tableau 3.9:Trois topologies de FAPP 3 niveaux (Avant et Après Filtrage)	81

Liste des symboles

FAPP : Filtre actif de puissance parallèle.

FAP : filtre actif de puissance.

FMV : Filtre multi-variable.

V_{dc} : Tension a la borne du condensateur.

V_{source} : Tension de la source.

$V_{injectée}$: Tension de sortie du filtre actif de puissance.

V_s : Tension de sortie du filtre actif de puissance.

I_{source} : Courant de la source.

I_{charge} : Courant de la charge.

$I_{injecté}$: Courant injecté par le filtre actif de puissance.

$\bar{P}, \bar{Q}$: Puissances actives et réactives instantanées continues.

$\tilde{P}, \tilde{Q}$: Puissances actives et réactives instantanées alternatives.

IGBT : Transistor bipolaire à grille isolée (Insulated Gate Bipolar Transistor).

GTO : Thyristor à extinction par la gâchette (Gate Turn-Off Thyristor).

f : Fréquence.

R : Résistance.

L : Inductance.

C : Condensateur.

PLL : Boucle à verrouillage de phase.

THD : Taux de Distorsions Harmoniques.

Onduleur NPC : Onduleur clampé par le neutre (Neutral Point Clamped).

Onduleur FC : Onduleur à capacités flottantes (Flying Capacitor).

Onduleur H-bridge : Onduleur a ponts en H

MLI : Modulation de Largeur d'impulsion.

PWM : Pulse Width Modulation.

Introduction générale

Un réseau électrique est un ensemble interconnecté de composants électriques (sources, charges, lignes, etc.) permettant la génération, la transmission, la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique. Lorsqu'un tel réseau comprend une source (générateur de tension ou de courant) et une charge non linéaire, on parle d'un réseau non linéaire. Une charge non linéaire est un élément dont la relation courant-tension n'est pas proportionnelle, c'est-à-dire qu'elle ne suit pas la loi d'Ohm de façon constante. Cela signifie que l'impédance de la charge dépend du niveau ou de la forme de la tension ou du courant. Diverses solutions ont été suggérées dans la littérature pour remédier au problème de la pollution harmonique dans les réseaux électriques. Parmi ces approches, l'une des plus courantes consiste à utiliser des filtres actifs de puissance (FAP), qui permettent à la fois d'éliminer les courants harmoniques et de compenser la puissance réactive [1]. Les filtres actifs de puissance (FAP) sont classés en fonction du type de réseau électrique auquel ils sont connectés, qu'il s'agisse d'un réseau monophasé ou triphasé, avec trois ou quatre conducteurs. Ces réseaux sont fréquemment sollicités par des charges non linéaires, notamment les équipements électroménagers ou industriels, qui sont à l'origine de la production d'harmoniques [2]. De nombreuses topologies d'onduleurs multiniveaux sont décrites dans la littérature. Parmi les plus répandues figurent les structures FC, NPC, T-bridge et H-bridge. Ces architectures seront analysées et comparées dans le cadre de notre projet de fin d'études.

Ainsi, nous avons divisé notre mémoire en trois chapitres à savoir :

- ✓ Dans le premier chapitre, nous étudierons les filtres actifs de puissance parallèles (FAPP) basés sur un onduleur triphasé à trois bras. Ce chapitre débutera par une présentation des filtres passifs et de leurs différents types. Nous aborderons ensuite le calcul des harmoniques de courant engendrés par les charges non linéaires. Enfin, nous présenterons et analyserons les résultats de simulation obtenus à l'aide du FAPP à trois bras.
- ✓ Le deuxième chapitre, sera consacré aux FAPP utilisant un onduleur multiniveau. Nous présenterons les différentes topologies de ces onduleurs, ainsi que les techniques de commande associées, telles que la commande PQ utilisant le FMV, et une nouvelle commande dénommée commande utilisant la théorie de Fryze.

- ✓ Dans le troisième et dernier chapitre, nous présenterons une étude comparative détaillée des résultats de simulation des différentes topologies abordées dans les deux premiers chapitres. Une analyse approfondie sera réalisée afin d'évaluer les performances respectives des filtres actifs de puissance basés sur les différentes structures d'onduleurs multiniveau.

CHAPITRE 1 : Introduction aux Filtres Actif de puissance Parallèle

Introduction

Les réseaux de distribution permettent de transmettre de l'énergie aux consommateurs. Cependant, plusieurs types de charges sont la cause de graves perturbations au sein de ce même réseau électrique, tel que les perturbations du courant due à la génération des courants harmoniques, les courants déséquilibrés, ou encore la génération de la puissance réactive [3]. Dans cette partie, nous allons étudier les harmoniques de courant générées par les charges non linéaires puis les différentes solutions de dépollution de ce type de perturbation.

I.1. Perturbations électriques

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

- Une forme d'onde parfaitement sinusoïdale.
- Un équilibre et une symétrie parfaite des phases en amplitude et en phases.
- Des valeurs efficaces dans les limites tolérées.
- Une stabilité de la fréquence.

D'un autre côté, les perturbations sont l'ensemble des phénomènes ayant un pouvoir de modifier l'amplitude et/ou la forme des grandeurs électriques du réseau (courant, tension et fréquence) [4]. Parmi les perturbations les plus importante nous avons les harmoniques de courant et/ou de tension. Une harmonique est une composante d'un signal périodique dont la fréquence correspond à un multiple entier de la fréquence fondamentale. Si un signal possède une fréquence de base f_0 , ses harmoniques apparaitront aux fréquences $2f_0$, $3f_0$, $4f_0$, etc.

Les harmoniques peuvent être classés en plusieurs catégories en fonction des critères suivants :

- ✓ De leur ordre :
 - Harmoniques de rang pair ($2f_0$, $4f_0$, $6f_0$,...)
 - Harmoniques de rang impair ($3f_0$, $5f_0$, $7f_0$, ...)
- ✓ De leurs influences sur le signal :
 - Harmoniques prédominants : ils possèdent une amplitude plus importante et ont un impact significatif sur la forme du signal.
 - Harmoniques de faible influence : leur amplitude étant très réduite et leur effet sur le signal étant limité.

Nous pouvons d'un autre coté observer l'apparition des harmoniques soit au niveau du courant ou au niveau de la tension. Ainsi, concernant :

- ✓ Les harmoniques de courant : Ils désignent les composantes du courant électrique dont la fréquence est un multiple de la fréquence de base du réseau. Dans un système en courant alternatif (AC), cette fréquence de référence est généralement de 50 Hz ou 60 Hz, selon les régions. Ces harmoniques sont principalement générées par les charges non linéaires, qui altèrent la forme sinusoïdale du courant.
- ✓ Les harmoniques de tension : Ils correspondent à des composantes d'une tension alternative dont la fréquence est un multiple de celle du réseau électrique, généralement de 50 Hz ou de 60 Hz. Elle est causée par des perturbations engendrées par certains dispositifs électriques [3].

Parmi les moyens de réduction des harmoniques, il y a [3] :

- L'installation des filtres, qu'ils soient passifs ou actifs.
- L'utilisation d'équipement à faible émission d'harmoniques.
- L'amélioration du facteur de puissance.
- L'équilibrage des charges dans les réseaux triphasés afin d'éliminer l'apparition des harmoniques au niveau du neutre.

I.2. Solution de dépollution des réseaux électriques

Parmi les solutions que nous pouvons utiliser afin de diminuer les harmoniques de courant et/ou de tension, sont :

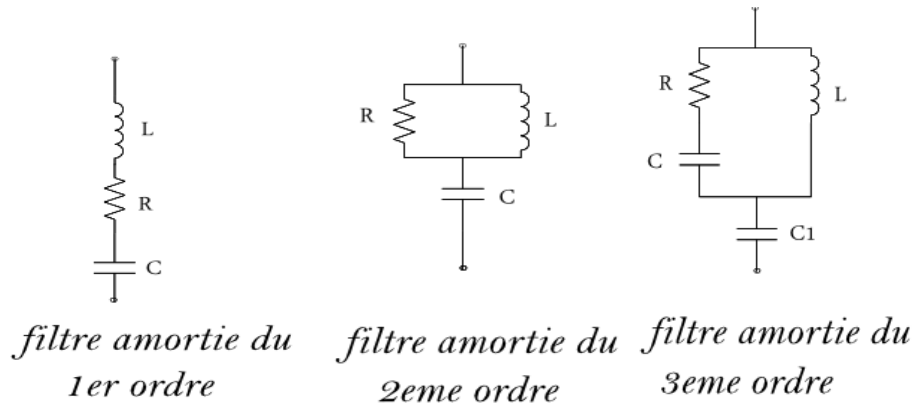
I.2.1. Filtres passifs

Le filtre passif est l'une des solutions les plus utilisées, afin de réduire les harmoniques dans le réseau électrique. Un tel filtre passif est constitué d'une réactance capacitive et inductive. Il y a plusieurs configurations possibles de filtre passif que nous pouvons classer comme suite :

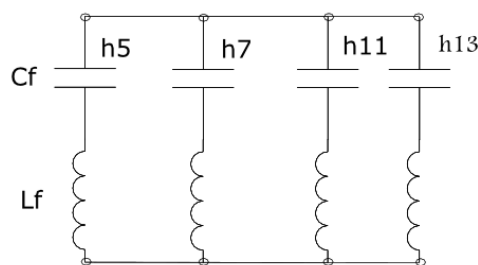
- ✓ Un filtre amorti est un circuit composé de composants passifs (résistances, condensateurs, bobines) qui est utilisé pour atténuer ou supprimer certaines fréquences indésirables dans un signal, tout en dissipant de l'énergie. Il est dit "amorti" car il contient des éléments dissipatifs (généralement des résistances) qui empêchent une résonance excessive et permettent un filtrage plus doux.

- ✓ Un filtre passif sélectif, est un circuit qui laisse passer une plage de fréquences spécifique tout en atténuant les fréquences en dehors de cette plage.
- ✓ Filtre passe haut, est un circuit qui laisse passer les fréquences supérieures à une certaine fréquence de coupure, tout en atténuant les fréquences inférieures.

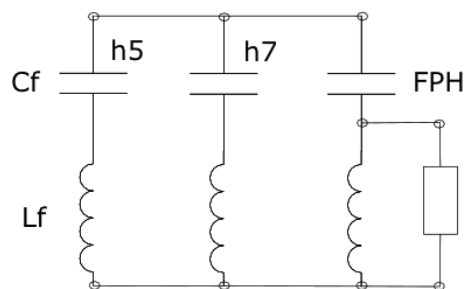
La figure 1.1 représente les classes de ces filtres.



a) Filtre passif amortie



b) Filtre passif sélectif.



c) Filtre passif sélectif avec en plus un filtre passe haut.

Figure 1.1 : Schéma des filtres passifs

I.2.2. Filtres actifs de puissance

Les filtres actifs de puissance (FAP) sont des dispositifs à base d'électroniques qui permettent de produire des courants et/ou des tensions harmoniques en opposition de phase, afin de les éliminer et

ainsi de compenser les courants et/ou les tensions harmoniques du réseau électrique. Nous observons deux types de FAP, à savoir les FAP parallèle et les FAP série [5].

I.2.2.1. Filtre actif de puissance série (FAPS)

Un FAPS est un dispositif électrique qui utilise des dispositifs à base d'électroniques de puissance de type onduleur. Ces onduleurs sont connectés en série au réseau électrique afin de compenser les harmoniques de tension.

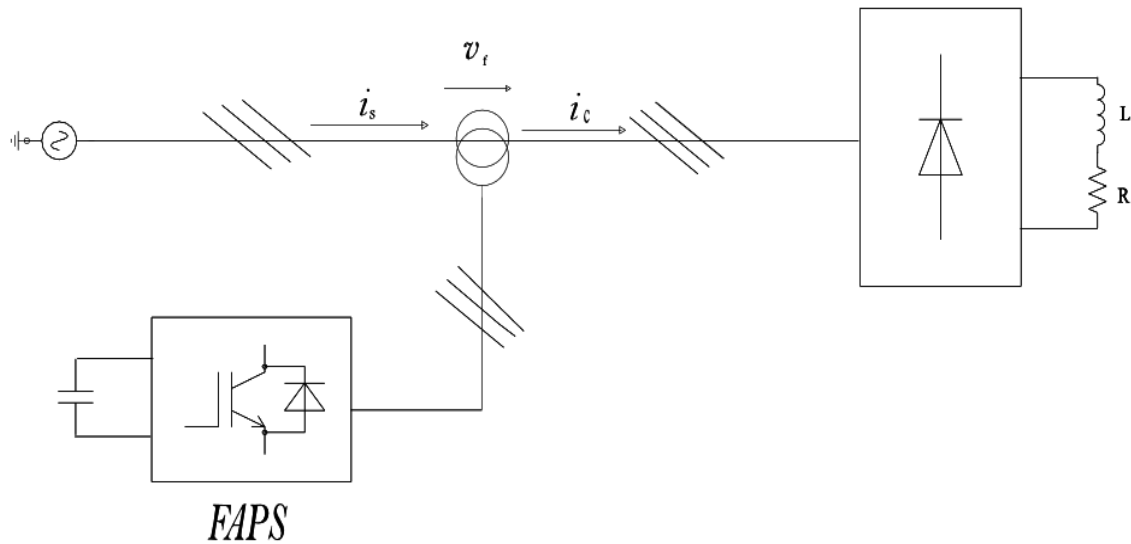


Figure 1.2 : Schéma d'un FAPS

1.2.2.2 Filtre actif de puissance parallèle (FAPP)

Un FAPP est un dispositif à base d'électronique de puissance de type onduleur qui est connecté en parallèle au réseau électrique afin de compenser les harmoniques de courant. Le principe des FAPP est d'injecter les courant harmoniques (générer par des charges non linéaire) obtenu par une commande appropriée afin de les compenser [6].

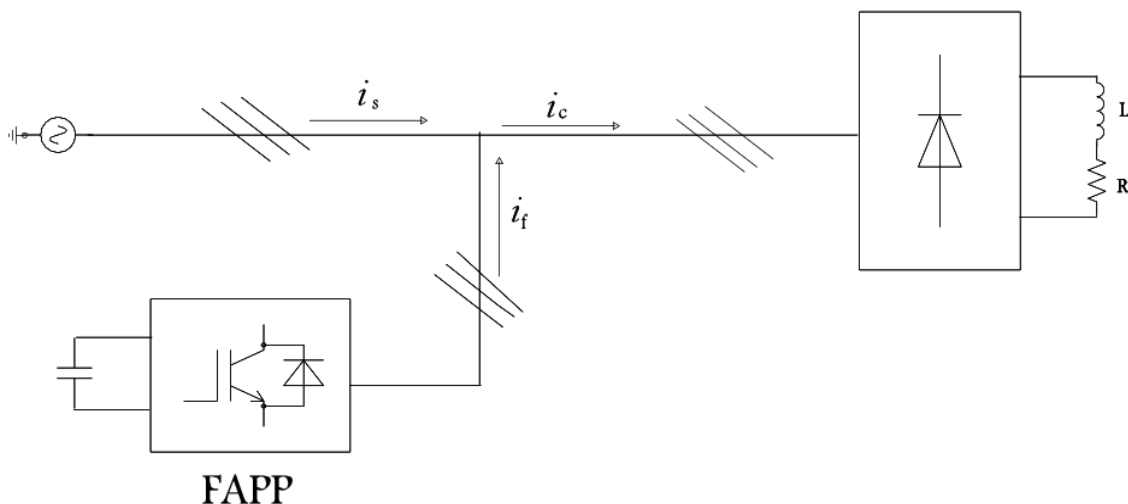


Figure 1.3 : Schéma d'un FAPP

I.2.2.3 Différentes configurations de filtre actif de puissance

Il existe différentes configurations de FAP selon leurs associations avec d'autres filtres passifs ou avec d'autre FAP, nous avons ainsi :

- **Combinaison parallèle-série de filtre actif de puissance**

Cette configuration consiste à l'intégration de deux FAP, une en série et l'autre en parallèle, ce partageant côté continue le même condensateur, comme le montre la figure 1.4.

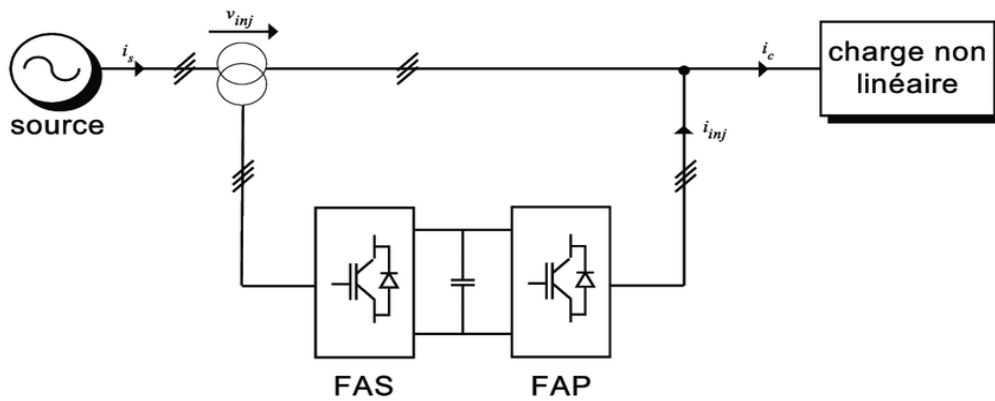


Figure 1.4 : Combinaison parallèle-série de filtres actifs.

- **Filtre actif de puissance hybride (FAPH)**

Un FAPH est une solution qui associe les FAP soit en série ou en parallèle à des filtres passifs. Cette approche est souvent utilisée pour améliorer les performances de filtrage. De plus, cela permet de réduire le dimensionnement des FAP et par conséquent leurs prix, car une partie des harmoniques sera compenser par les filtres passifs. Les filtres passifs ont pour rôle dans ce cas d'éliminer les harmoniques prépondérants. Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature [7]. Parmi les FAPH nous avons l'association d'un FAPP connecté à un filtre passif, comme l'illustre la figure 1.5

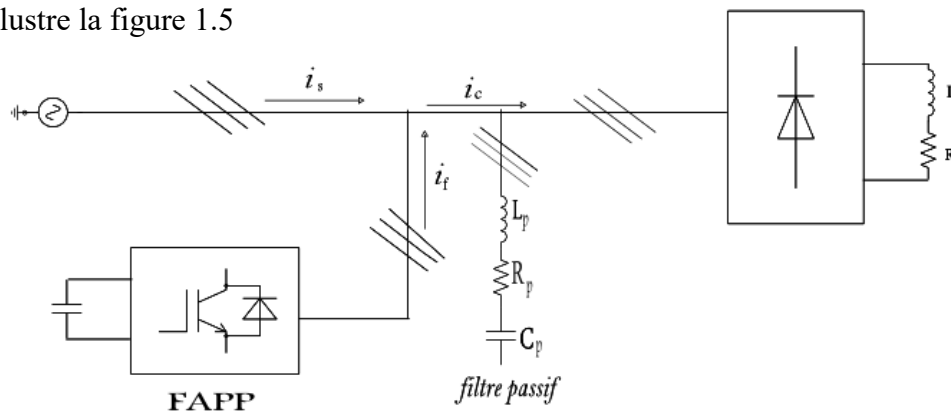


Figure 1.5: Association d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.

Nous pouvons également trouver une association d'un FAP connecté en série au filtre passif, comme le montre la figure 1.6. Ce FAP qui est connecté en série agit comme une résistance vis-à-vis des courants harmoniques et les oblige à circuler dans le filtre passif, tout en restant transparent à la fréquence fondamentale.

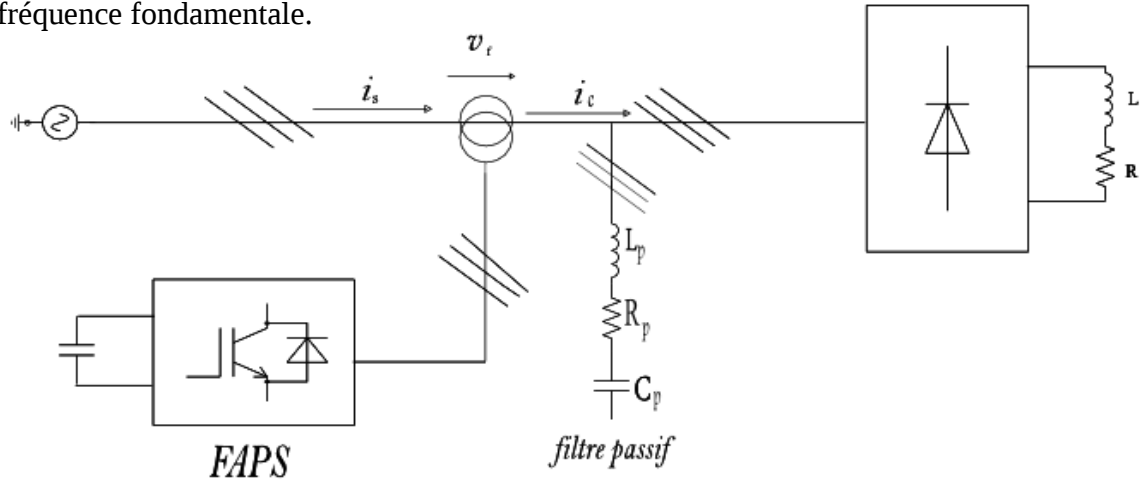


Figure 1.6 : Association d'un filtre FAPS et d'un filtre passif.

I.3. Stratégie de commande des FAPs

Il existe plusieurs stratégies de commande pour les filtres actifs de puissance parallèle ou série. Les deux stratégies de commande les plus utilisées sont celles basées sur les puissances instantanées, nommée méthode PQ, qui a été proposée par H. Akagi [8] et les autres sont basées sur l'utilisation d'une P.L.L dans la commande, cette méthode nommée SRF a été introduite par S. Bhattacharya. Le principe de commande PQ utilisé par les FAPP a été développé dans plusieurs articles et mémoires de fin d'étude [9], [10], [11], [12] et [13]. La figure 1.7 illustre la commande directe du FAPP basée sur la commande PQ.

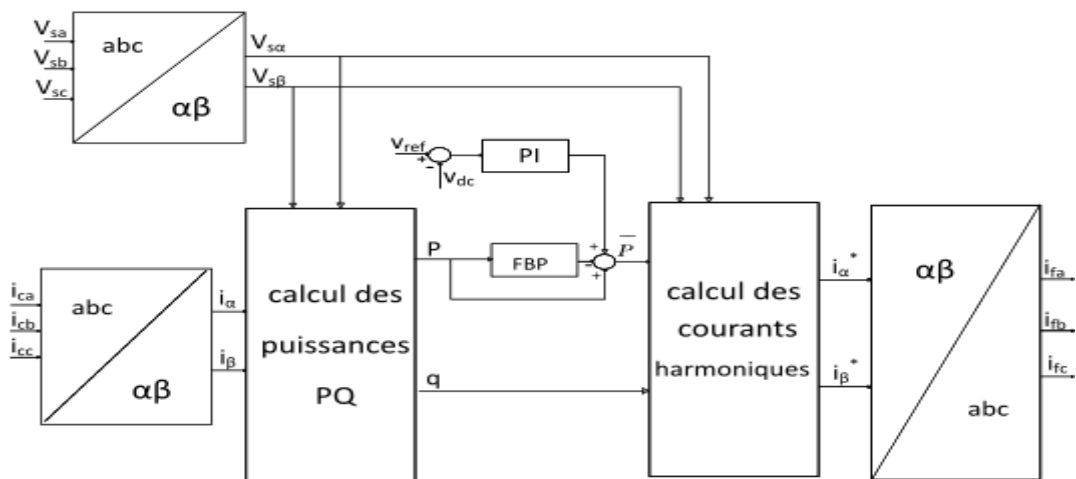


Figure 1.7 : Stratégie de commande directe basée sur les puissances instantanées PQ utilisée par un FAPP

Concernant la stratégie de commande directe nommée SRF, qui est basée sur l'utilisation de la P.L.L et qui est placé au niveau de la tension, permet de rendre insensible les harmoniques de tensions sur la commande. Ceci dépend de la qualité et la robustesse de la P.L.L a rejeté les harmoniques de tensions. La figure 1.8 illustre la commande directe du FAPP basée sur la méthode SRF.

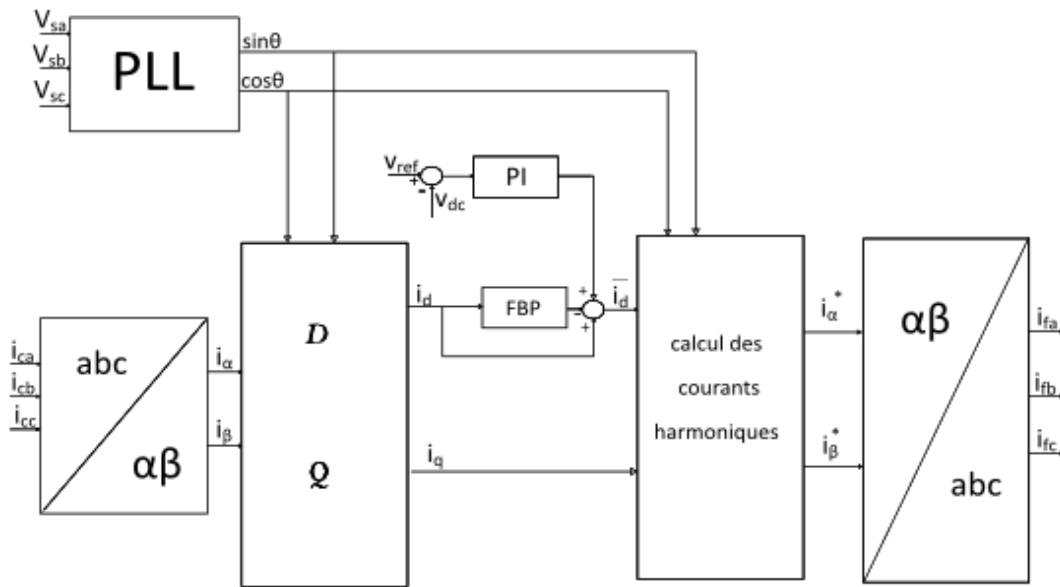


Figure 1.8 : Stratégie de commande directe basée sur la méthode DQ utiliser par un FAPP

I.4. Calcul des filtres passifs

Dans cette partie nous allons montrer par un exemple comment calculer un filtre passif afin d'éliminer la 5^{ème} harmonique puis la 7^{ème} harmonique.

Soit la tension du réseau égale à $U = 400$ V et les caractéristiques initial pour calculer les filtres passifs présenté dans le tableau suivant :

	Filtre 1	Filtre 2
Q_c (KVar)	20	20
h_n	5	7
Q	50	50

Tableau 1.1 : Paramètres préliminaires des deux filtres.

Avec

Q_c étant la puissance réactive que le filtre et appelés à compenser.

h étant le (s) rang (s) d'harmonique (s) auquel (s) ce filtre est accordé.

Q étant le facteur de qualité du filtre.

Maintenant nous allons calculer les trois paramètres du filtre passif, pour la 5^{ème} et la 7^{ème} harmonique, à savoir L, C et R selon les équations qui ont été présenté dans [14] et [15].

Calcul du filtre pour éliminer la 5^{ème} Harmonique

Afin de concevoir un filtre anti-résonant (LCR parallèle) qui sera accordé à la 5^e harmonique (250 Hz) pour l'éliminer du réseau, nous partons des spécifications suivantes :

- Tension efficace $U = 400 \text{ V}$
- Fréquence fondamentale $f = 50 \text{ Hz}$
- Harmonique ciblée : $5^e \rightarrow f_5 = 250 \text{ Hz}$
- Puissance réactive à 50 Hz : $Q_c = 20 \text{ kVAr}$
- Facteur de qualité : $Q = 50$

1. Réactance du condensateur à 50 Hz

On utilise la formule de base :

$$x_c = \frac{U^2}{Q_c} = \frac{400^2}{20 \cdot 10^3} = 8$$

Le condensateur devra présenter une réactance de 8Ω à 50 Hz.

2. Capacité du condensateur

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot x_c} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 8} = 397.84 \mu\text{F} \approx 398 \mu\text{F}$$

Il faut un condensateur de capacité 398 μF .

3. Inductance pour accorder le filtre à la 5^e harmonique (250 Hz)

Pour créer une résonance à 250 Hz avec ce condensateur :

$$L = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_5)^2 \cdot C} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 250)^2 \cdot 398 \cdot 10^{-6}} \approx 1,0185 \text{ mH}$$

Il faut donc une inductance de 1.02 mH.

4. Résistance équivalente pour le facteur de qualité $Q = 50$

Calculons maintenant l'impédance de résonance à 250 Hz :

$$X_n = \sqrt{x_{c(250\text{Hz})} \cdot x_{L(250\text{Hz})}}$$

Sachant que

$$X_{C(250\text{Hz})} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_5 \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 250 \cdot 398 \cdot 10^{-6}} \approx 1,6 \Omega$$

$$X_{L(250\text{Hz})} = 2 \cdot \pi \cdot f_5 \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 250 \cdot 1,02 \cdot 10^{-3} \approx 1,6 \Omega$$

Ce qui nous donne

$$X_n = \sqrt{1,6 \cdot 1,6} \approx 1,6 \Omega$$

Donc la résistance sera égale à :

$$R = \frac{X_n}{Q} = \frac{1,6}{50} = 0,032 \Omega$$

Il faut ainsi une résistance de 32 mΩ pour obtenir un filtre sélectif.

Calcule du filtre pour éliminer la 7^{ième} harmonique

Afin de concevoir maintenant un filtre anti-résonant (LCR parallèle) qui sera accordé à la 7^{ième} harmonique (350 Hz) pour l'éliminer du réseau, nous partons des spécifications suivantes :

- Tension efficace U=400 V
- Fréquence fondamentale f = 50 Hz
- Harmonique ciblée : 7^e → f₇ = 350 Hz
- Puissance réactive à 50 Hz : Q_c = 20 kVAr
- Facteur de qualité : Q = 50

1. Réactance du condensateur à 50 Hz

On utilise la formule de base :

$$X_c = \frac{U^2}{Q_c} = \frac{400^2}{20 \cdot 10^3} = 8$$

Cela signifie que le condensateur devra présenter une réactance de 8 Ω à 50 Hz.

2. Capacité du condensateur

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_c} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 8} = 397.84 \mu\text{F} \approx 398 \mu\text{F}$$

Il faut donc un condensateur de capacité 398 μF.

3. Inductance pour accorder le filtre à la 7^e harmonique (350 Hz)

Pour créer une résonance à 50 Hz avec ce condensateur :

$$L = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_7)^2 \cdot C} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 350)^2 \cdot 398 \cdot 10^{-6}} \approx 0,520 \text{ mH}$$

Il faut une inductance de ≈ 1.02 mH.

4. Résistance équivalente pour le facteur de qualité $Q = 50$

Calculons maintenant l'impédance de résonance à 350 Hz :

$$X_n = \sqrt{X_{C(350Hz)} \cdot X_{L(350Hz)}}$$

Sachant que

$$X_{C(250Hz)} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_7 \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 350 \cdot 398 \cdot 10^{-6}} \approx 1,14 \Omega$$

$$X_{L(250Hz)} = 2 \cdot \pi \cdot f_7 \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 350 \cdot 0,52 \cdot 10^{-3} \approx 1,14 \Omega$$

Ce qui nous donne

$$X_n = \sqrt{1,14 \cdot 1,14} \approx 1,14 \Omega$$

Donc la résistance sera égale à :

$$R = \frac{X_n}{Q} = \frac{1,14}{50} = 0,0228 \Omega$$

Il faut ainsi une résistance de 22.8 mΩ pour obtenir un filtre sélectif.

I.5. Simulation du filtre passif connecté au réseau électrique

Nous allons maintenant faire la simulation du filtre passif afin d'éliminer uniquement la 5^{ème} harmoniques. La figure 1.9 illustre un réseau électrique alimentant une charge non linéaire. Le filtre passif est placé entre la source et la charge. Les paramètres du réseau, du filtre passif et de la charge non linéaire sont donnés en Annexe A.

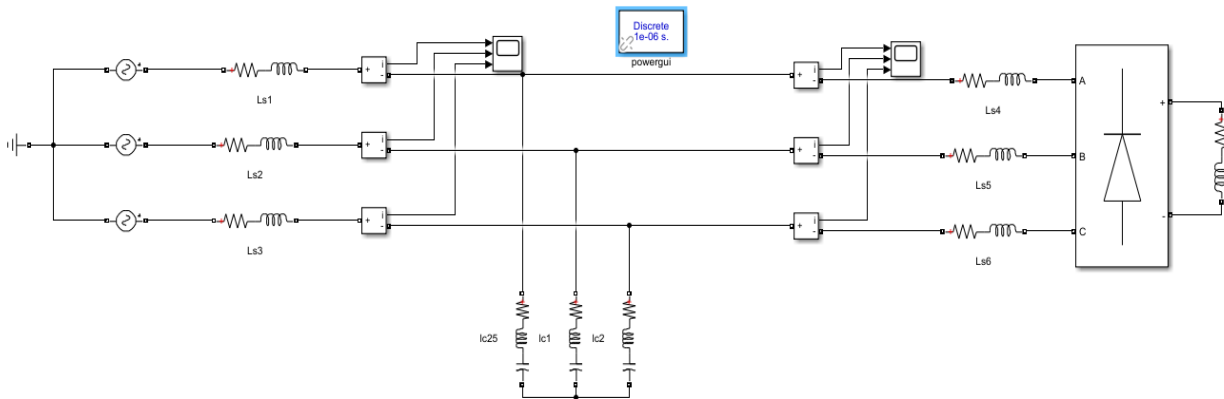


Figure 1.9 : Schéma du système complet.

Les résultats de simulation obtenue sont illustrés sur les figures 1.10 à 1.1

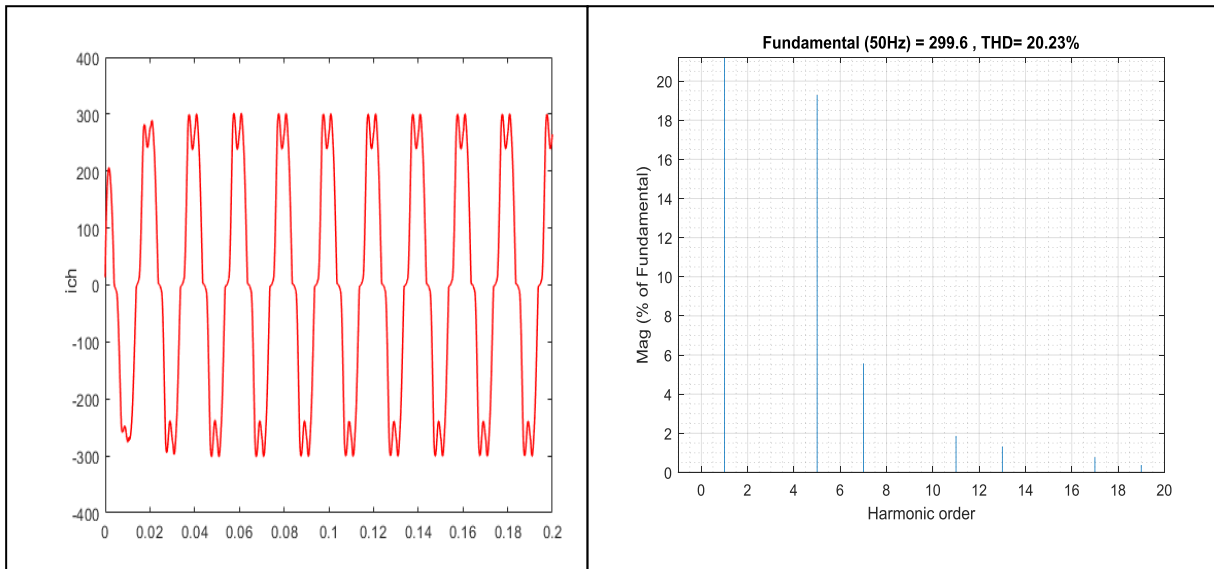


Figure 1.10 : Courant de charge et sa FFT

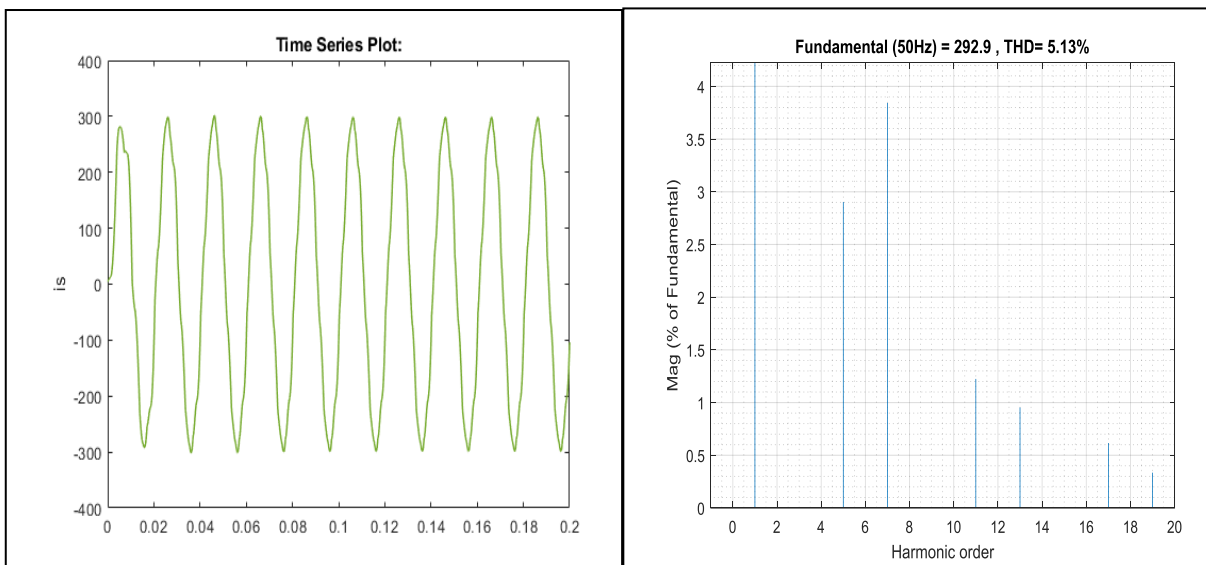


Figure 1.11 : Courant de source et sa FFT

Interprétation de résultats

La figure (1.10) montre le courant de source et sa FFT. D'un autre coté la figure (1.11) montre le courant après filtrage et sa FFT. Nous remarquons de ces figures que la 5^{ème} harmonique après filtrage a diminué considérablement.

I.6. Simulation du FAPP sans l'utilisation de filtre passif

Nous allons maintenant présenter les résultats de simulation du FAPP pour une commande directe utilisant les puissance instantanées PQ. Au début nous utiliserons l'hystérésis pour commander les interrupteurs et ensuite nous utiliserons une MLI. Le schéma suivant montre le système complet simulé en utilisant Matlab SimPower System, illustré sur la figure 1.12. Le tableau comportant les paramètres du réseaux électriques et du FAPP sont donnée en Annexe A. Pour cette simulation le FAPP utilisera une hystérésis pour la commande des interrupteurs.

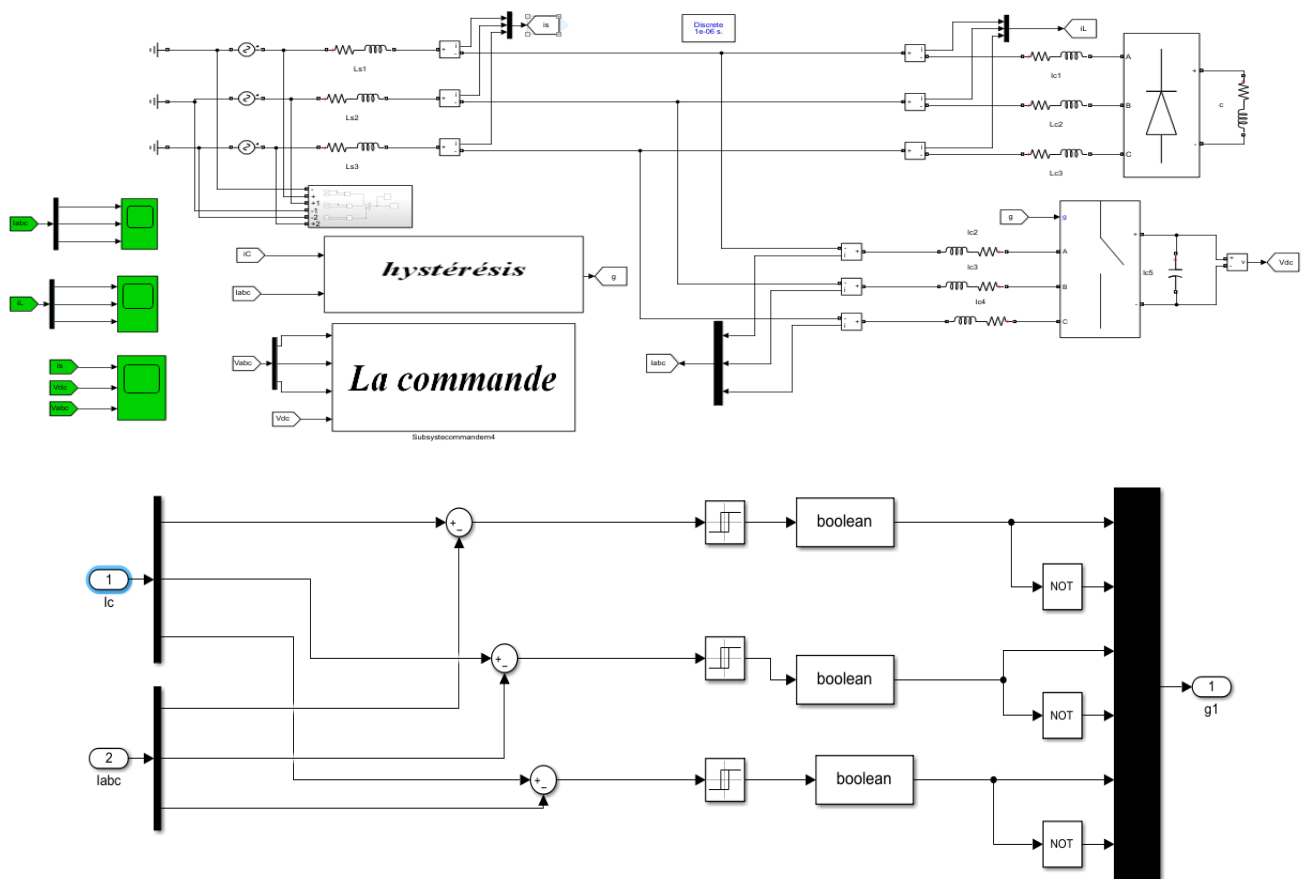


Figure 1.12 : Schéma du système complet simulé sur Matlab SimPower System

Les résultats de simulation sont illustrés sur les figures suivantes :

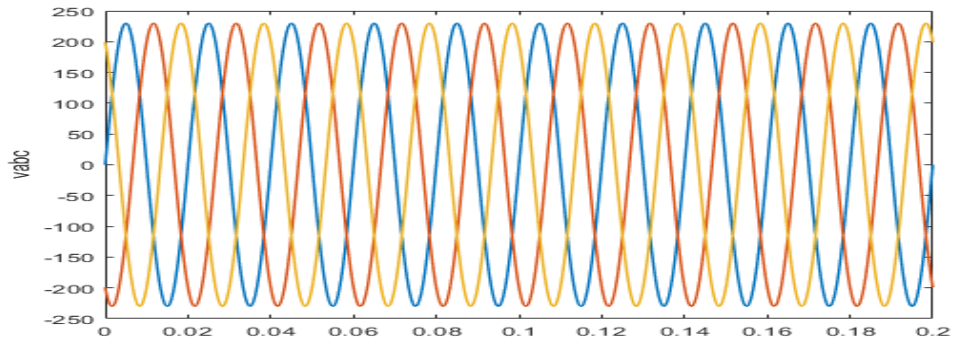


Figure 1.13: Tension de source

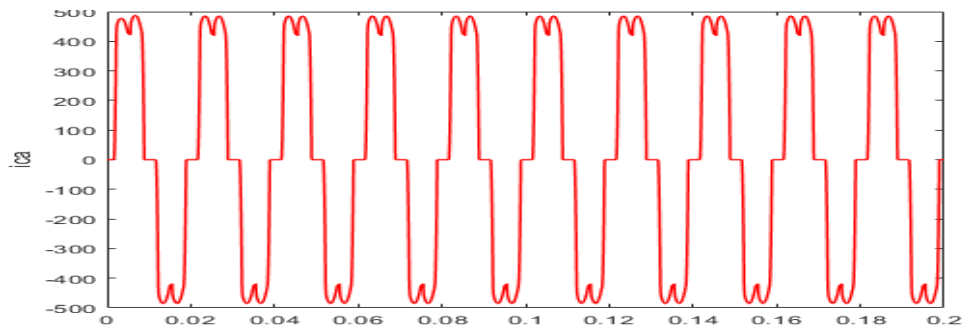


Figure 1.14: Courant de charge

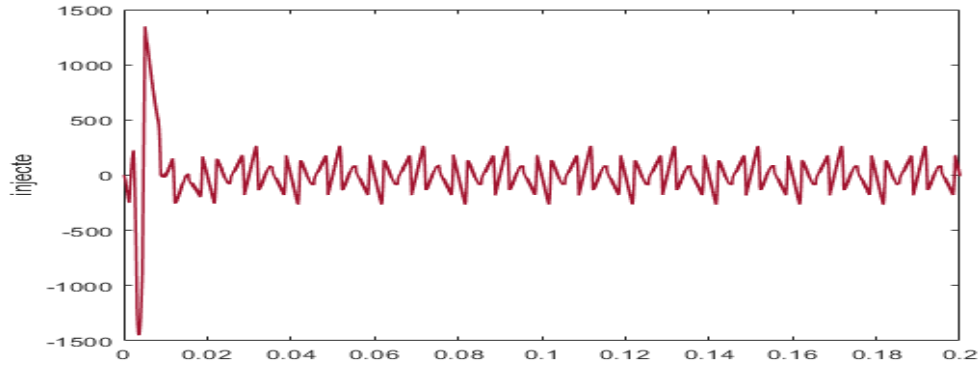


Figure 1.15: Courant injecté par le FAPP

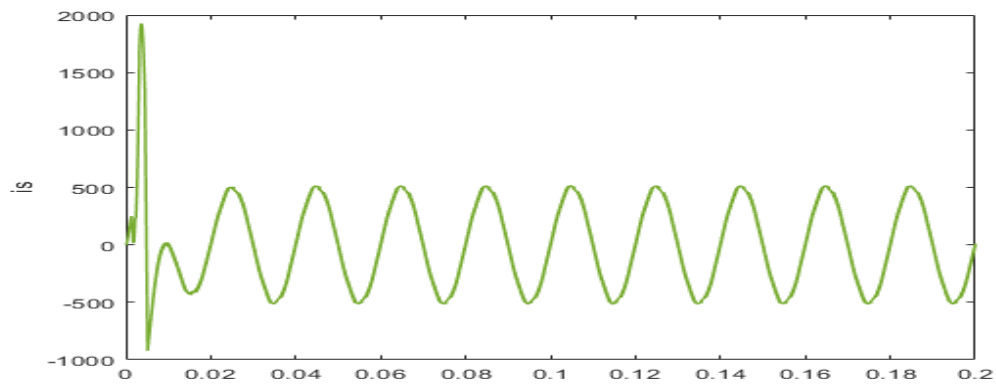


Figure 1.16: Courant de source après filtrage

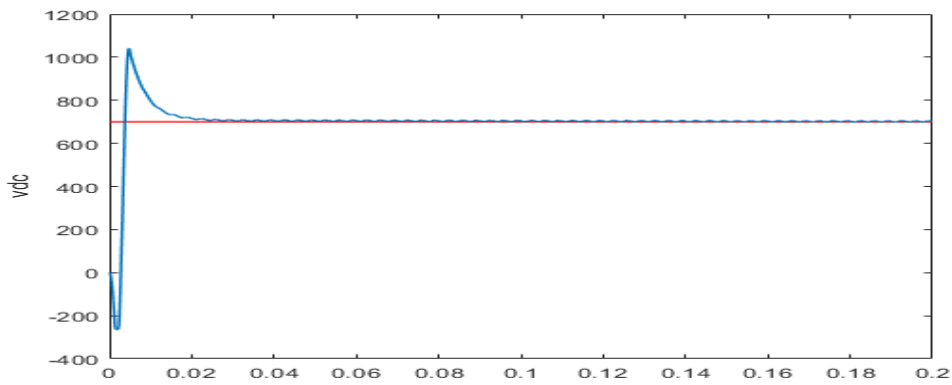
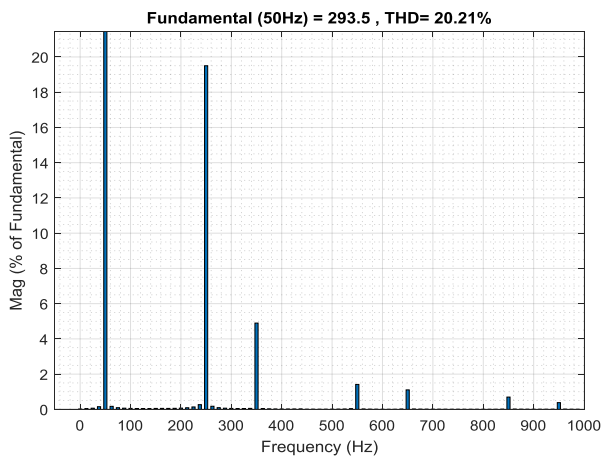
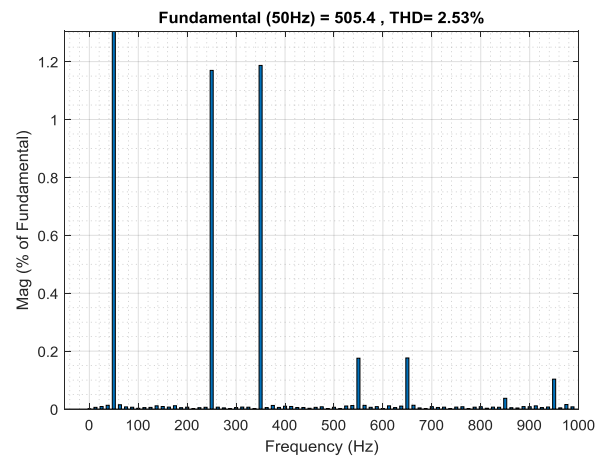


Figure 1.17: Tension aux bornes du condensateur du FAPP



Avant filtrage



après filtrage

Figure 1.18: FFT et THD du courant de source de la phase1 avant et après filtrage.

Interprétation de résultats de simulation

Nous remarquons que la tension de source est sinusoïdale, mais que le courant de charge contient des harmoniques et que le courant de source après filtrage redevient sinusoïdal. D'un autre côté nous remarquons que la tension aux bornes du condensateur est égale à 700V. Cette tension est stable et continue. Les THD qui se trouvent sur la figure 1.18 sont regroupés dans le tableau ci-dessous:

THD du courant de source	2.53%	Après
THD du courant de charge	20.21%	Avant

Tableau 1.2: THD avant et après filtrage.

Nous remarquons de ce tableau que le THD à diminuer et est égale après filtrage à 2.53%.

Maintenant nous allons faire la simulation du système complet avec Matlab SimPower System, mais cette fois ci en utilisant une MLI pour contrôler les interrupteurs du FAPP. La commande utilisée est identique que précédemment, à savoir l'utilisation de la commande PQ.

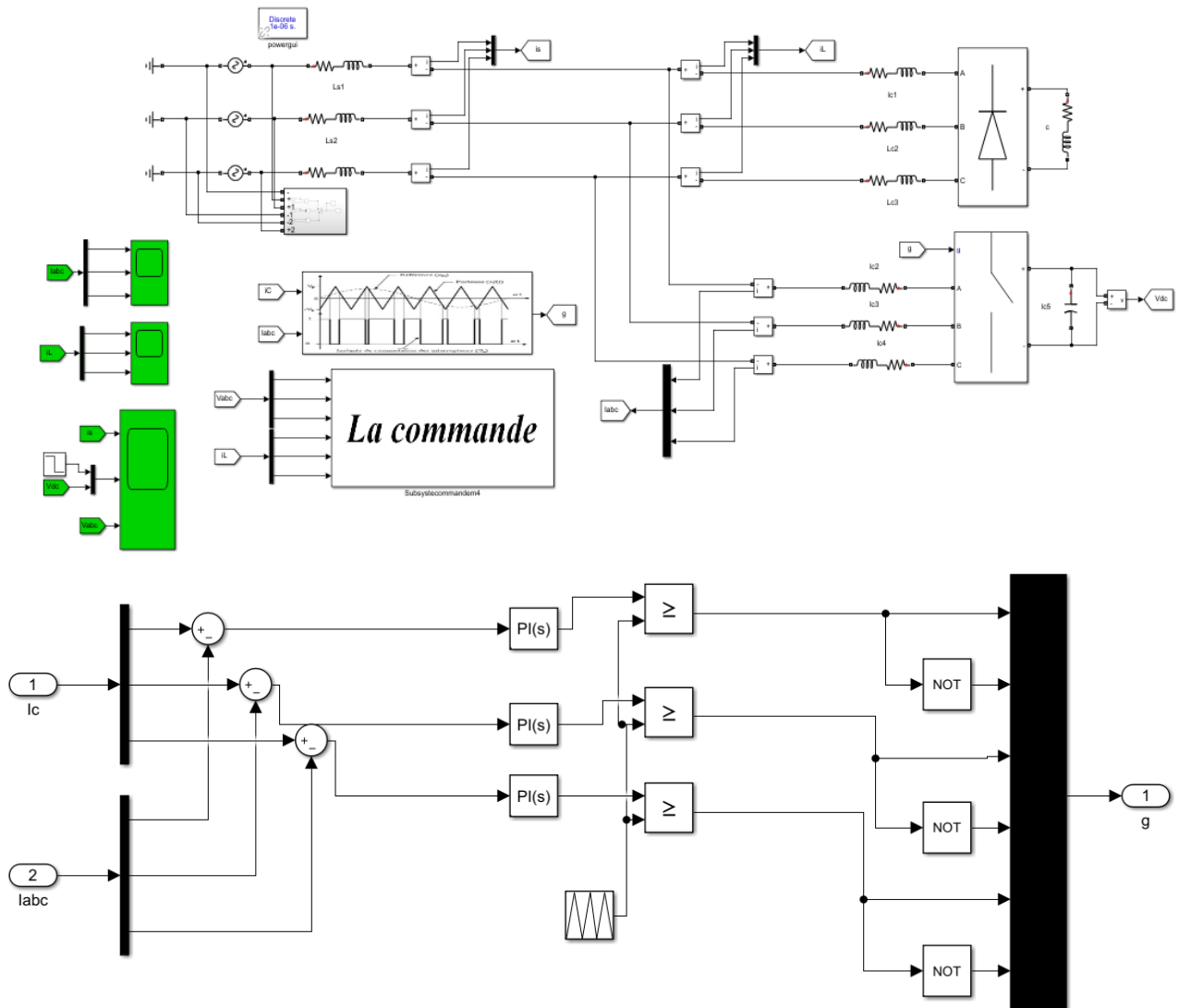


Figure 1.19: Schéma du système complet simulé sur Matlab SimPower System

Les résultats de simulation sont illustrés sur les figures suivantes :

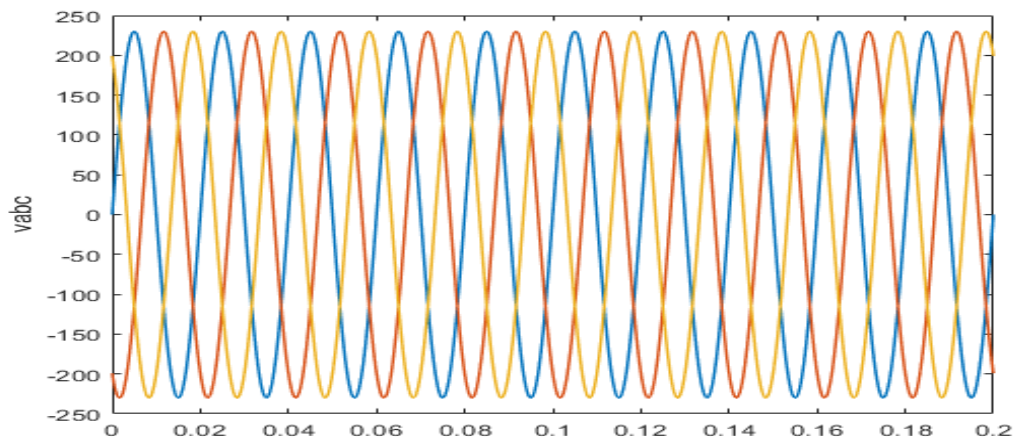


Figure 1.20: Tension de source

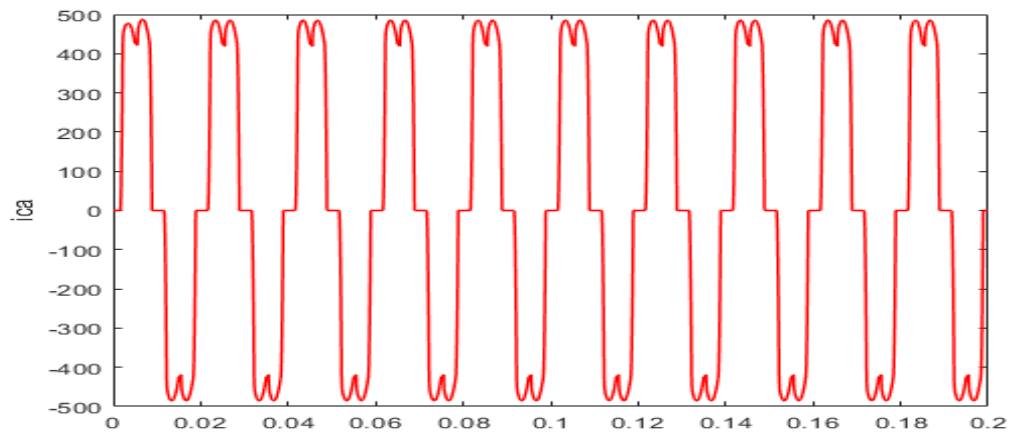


Figure 1.21 : Courant de charge

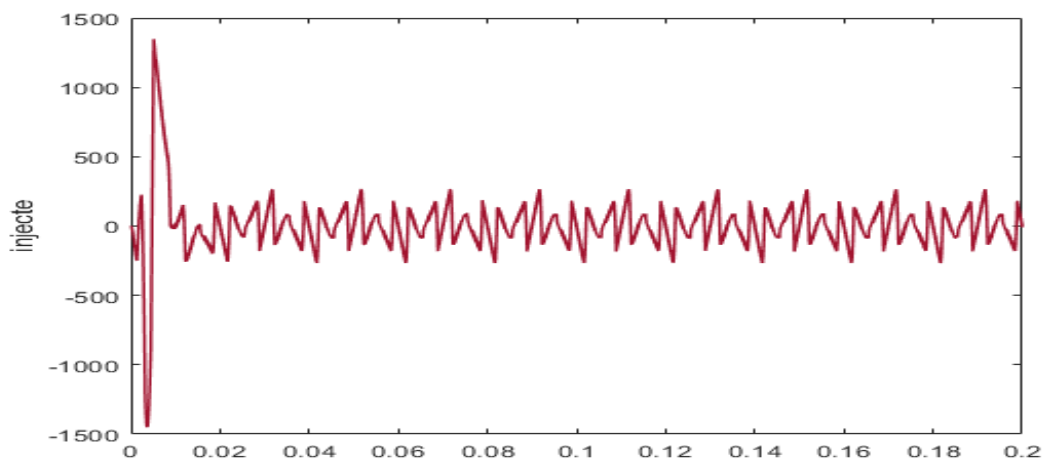


Figure 1.22 : Courant injecté par le FAPP

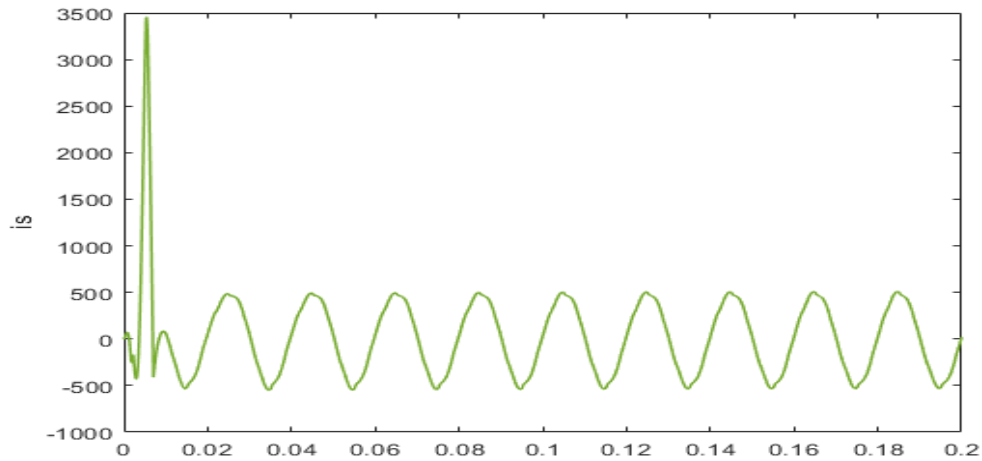


Figure 1.23 : Courant de source après filtrage

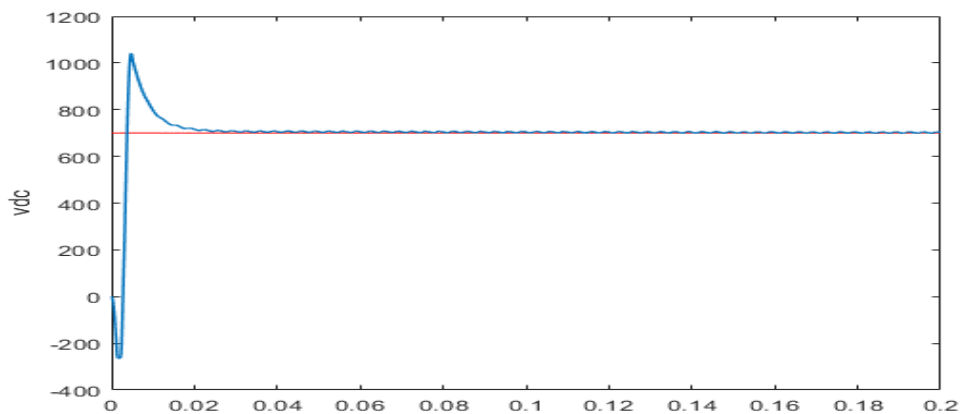


Figure 1.24: Tension aux bornes du condensateur du FAPP

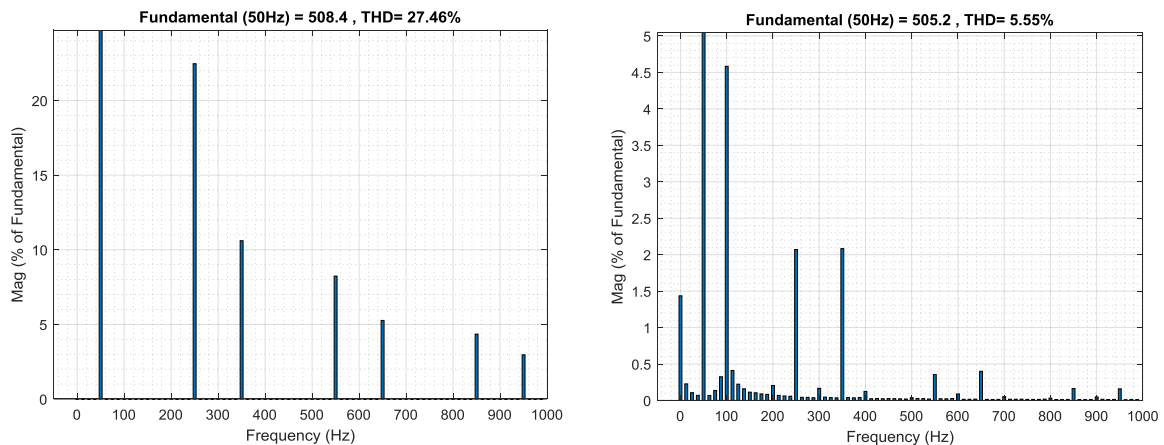


Figure 1.25: FFT et THD du courant de source de la phase1 avant et après filtrage.

Interprétation des résultats de simulation

Nous remarquons que la tension de source est sinusoïdale, mais que le courant de charge contient des harmoniques et que le courant de source après filtrage redevient sinusoïdal.

D'un autre coté nous remarquons que la tension aux bornes du condensateur est égale à 700V. Cette tension est stable et continue. Les THD qui se trouve sur la figure 1.25 sont regroupé dans le tableau ci-dessous :

THD du courant de source	5.55%	Après
THD du courant de charge	27.46%	Avant

Tableau 1.3:THD avant et après filtrage.

Nous remarquons de ce tableau que le THD à diminuer et est égale après filtrage à 5.55% au lieu des 27.46% avant filtrage.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons montré que les charges non-linéaires engendrent dans le réseau électrique des harmoniques de courant. Pour les éliminer nous avons montré qu'il été possible d'utiliser le filtre passif et le FAPP. Au passage nous avons montré deux types de commandes pour le FAP qui sont les plus utilisées, à savoir la commande PQ et la commande SFR. Nous avons ensuite fait quelque simulation qui ont montré qu'après filtrage, il été possible d'avoir un THD inférieur à 5% lorsque nous utilisons les filtres actifs de puissance parallèle.

Chapitre 2 : Étude des différents types de FAPP trois niveaux

Introduction

Dans ce chapitre, nous mettons en évidence les différentes topologies existant des filtres actifs de puissance parallèle trois niveaux en matière de compensation des harmoniques de courant et de l'énergie réactive. Nous allons également concentrer sur l'études de deux autres approches différentes pour l'identification des courants de référence. Nous débuterons par une description de l'architecture générale du filtre actif de puissance parallèle à trois niveaux, puis nous montrerons les différentes topologies existantes. Pour terminer nous aborderons les principales méthodes utilisées pour déterminer les courants de référence [16].

2.1 Topologie des FAPP trois niveaux

Il existe plusieurs topologies de FAPP trois niveaux à savoir le Neutral Point Clamped (NPC), le Flying Capacitor (FC), le T-bridge et le H-bridge. Chacune de ces topologies à des avantages et des inconvénients. Nous allons maintenant présenter chacune de ces topologies.

2.1.1 FAPP trois niveaux de type NPC (Neutral Point Clamped)

Cette topologie a déjà été abordée dans des mémoires de fin d'études précédents, et pour éviter les répétitions nous allons la présenter de manière concise et claire. Si vous voulez des détails supplémentaires concernant les équations vous pouvez les trouver dans les références suivantes [17], [18] et [19]. Voici la figure qui représente le NPC (Neutral Point Clamped).

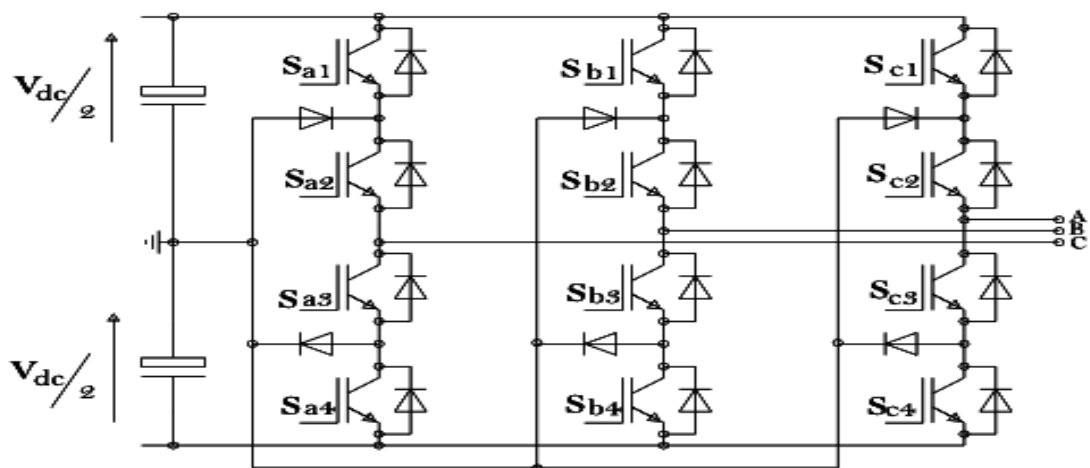


Figure 2.1 Schéma simplifié d'un onduleur multi-niveau type NPC.

L'Architecture de ce type d'onduleur est constituée de 12 interrupteurs et est alimentée coté continu par une tension continue, reparti équitablement entre les deux condensateurs de même capacité, générant ainsi deux sources de tension distinctes de $V_{dc}/2$.

2.1.2 L'onduleur trois niveaux type FC (Flynig capacitor)

Cette topologie, illustré sur la figure 2.2, a également été abordée dans des mémoires de fin d'études précédents, les détails de cette topologie peuvent être trouvés dans [20] et [21].

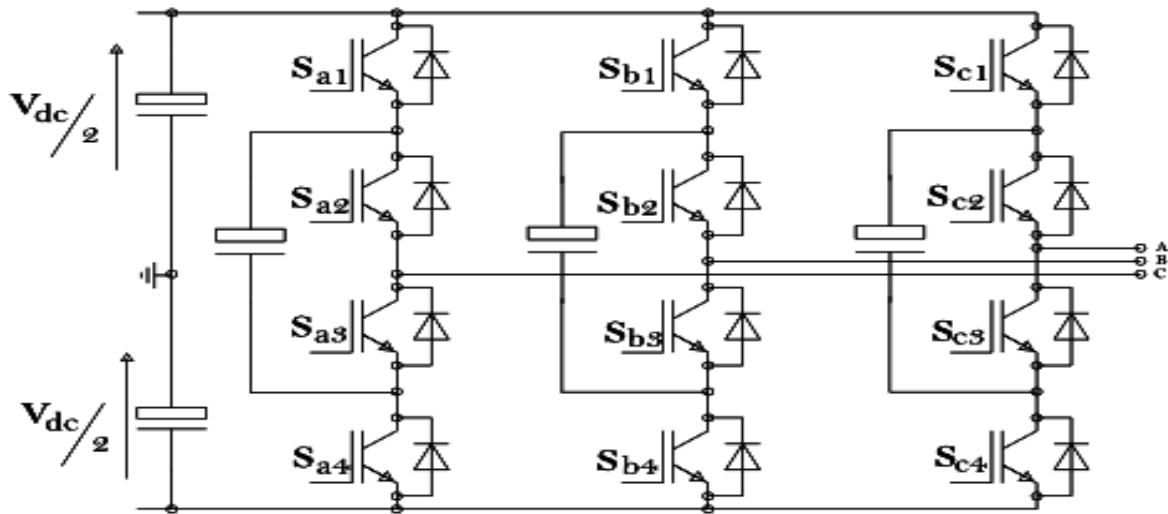


Figure 2.2 : Schéma simplifié d'un onduleur multi-niveau type FC.

Le tableau suivant montre l'état des interrupteurs pour un seul bras.

L'état des interrupteurs d'un seul bras	S_{1a}	1	0	0
	S_{2a}	1	1	0
	S_{3a}	0	1	1
	S_{4a}	0	0	1
Valeur de la tension sortie		$\frac{V_{dc}}{2}$	0	$-\frac{V_{dc}}{2}$

Tableau 2.1 : Etat des interrupteurs d'un onduleur trois niveaux type FC.

2.1.3 FAPP trois niveaux type H-bridge et T-bridge

Les FAPP de type H-bridge et T-bridge sont des topologies qui ont été développées récemment. L'onduleur trois niveaux de type H-bridge, utilise trois ponts en H connectés en série. Chaque pont utilise 4 interrupteurs de puissance. Le schéma de la figure suivante illustre cette structure.

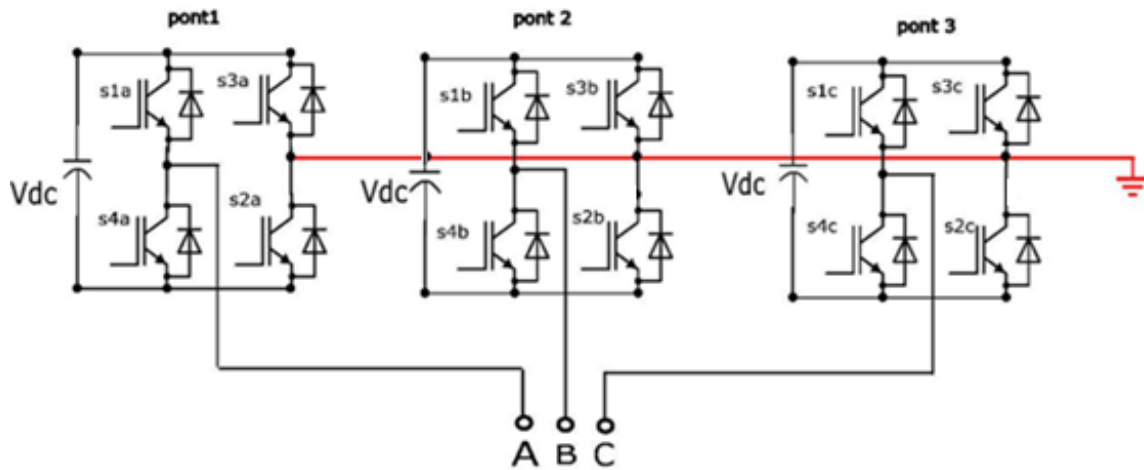


Figure 2.3 : Onduleur multi-niveaux de type H-bridge

Le tableau suivant présent le principe de fonctionnement du point H.

Etat des interrupteurs d'un seul pont	S_{1a}	1	1	0	0
	S_{2a}	1	0	1	0
	S_{3a}	0	1	0	1
	S_{4a}	0	0	1	1
Valeur de la tension sortie		Vdc	0	0	-Vdc

Tableau 2.2 : Etat des interrupteurs du FAP trois niveaux de type H-bridge, pour un seul pont H.

Maintenant nous allons présenter le T-bridge qui se distingue par un repositionnement de deux interrupteurs par branche et la suppression de six diodes qui existe dans la topologie NPC, ce qui engendre une diminution du coût global [22].

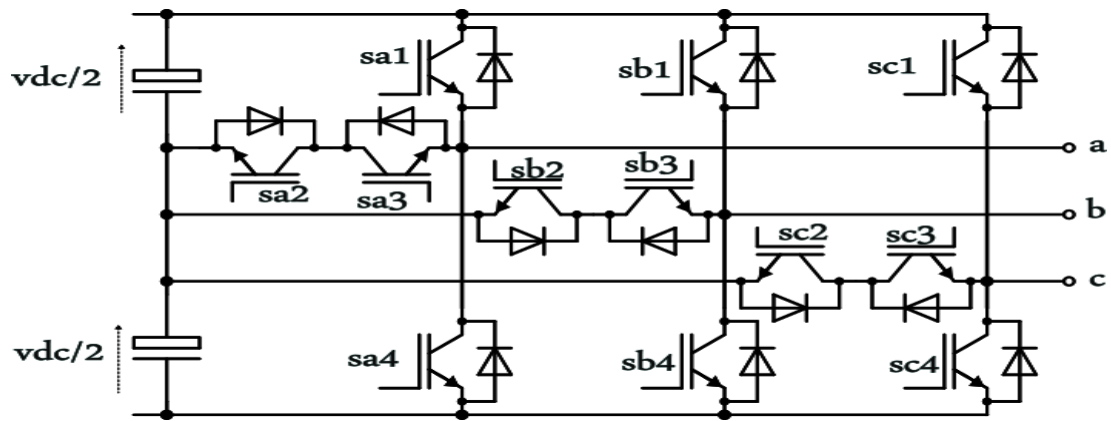


Figure 2.4 : Onduleur multi niveaux de type T-bridge

Voilà le tableau qui son présent le principe du fonctionnement

Etat des interrupteurs D'un seul bras	S_{a1}	1	0	0
	S_{a2}	1	1	0
	S_{a3}	0	1	1
	S_{a4}	0	0	1
La valeur de la tension sortie		$V_{dc}/2$	0	$-V_{dc}/2$

Tableau 2.3 : Etat des interrupteurs du FAP trois niveaux de type T-bridge.

2.2. Etude des MLI utilisé par le FAP 3 niveaux

Il est important de décrire ici les MLI utiliser par les FAPP trois niveaux, car chaque topologie à sa propre MLI. Ainsi, pour :

- FAPP utilisant la topologie H-bridge

Le pont en H à trois niveaux est constitué de trois pont H, dont chacun est connecté à une phase du réseau électrique. Chaque pont H est constitué de 4 bras. Le schéma suivant montre comment brancher le courant de référence d'un pont H du FAPP qui est connecté à une seule phase [23].

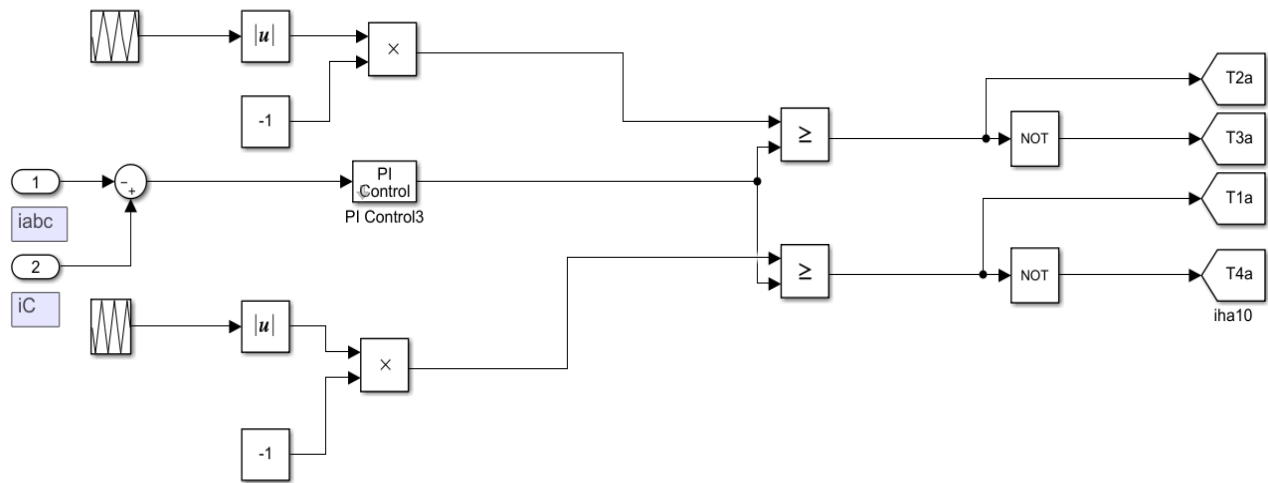


Figure 2.5 :MLI pour commander un pont H connecté à une seule phase du réseau

Nous remarquons de cette figure que deux signaux à dent de scie sont utilisés qui sont illustrées sur la figure suivante :

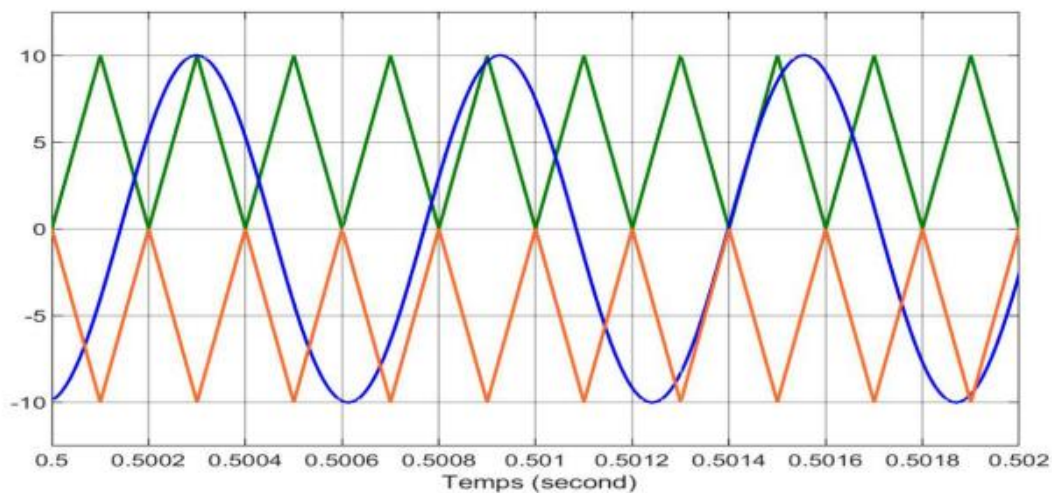


Figure 2.6 : Signaux des dents de scie comparer à une référence sinusoïdale pour le pont H.

- FAPP utilisant la topologie T-bridge

L'onduleur T-bridge est une topologie à trois niveaux, conçue pour améliorer les performances des onduleurs classiques à trois niveaux. Parmi les avantages de la commande T-bridge avec MLI par rapport aux autres topologie trois niveaux, nous avons :

- ✓ Moins des pertes de commutation.
- ✓ Réduction des contraintes sur les composants.

La commande MLI pour le T-bridge est illustré sur la figure suivante :

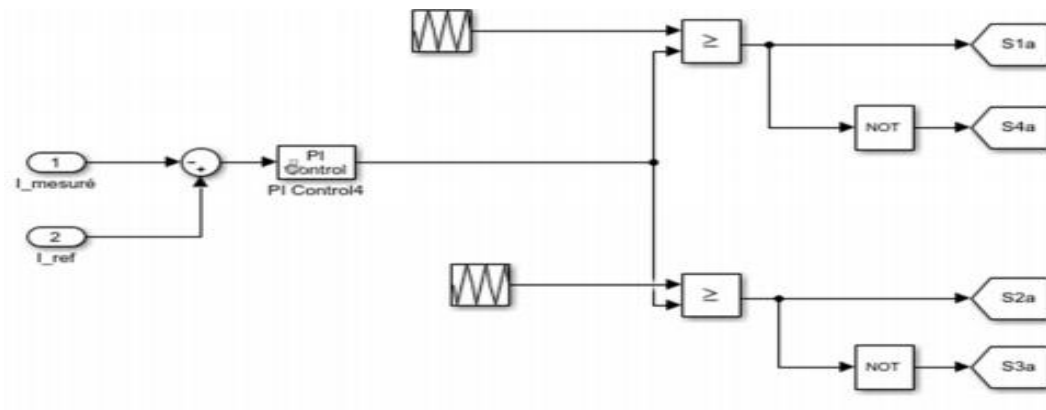


Figure 2.7 : Commande MLI d'un onduleur type T bridge

Nous remarquons de cette figure que deux signaux à dent de scie sont également utilisés, mais que leur décalage diffère de ceux présenté pour le pont H. Ces deux dents de scies sont illustrées sur la figure suivante :

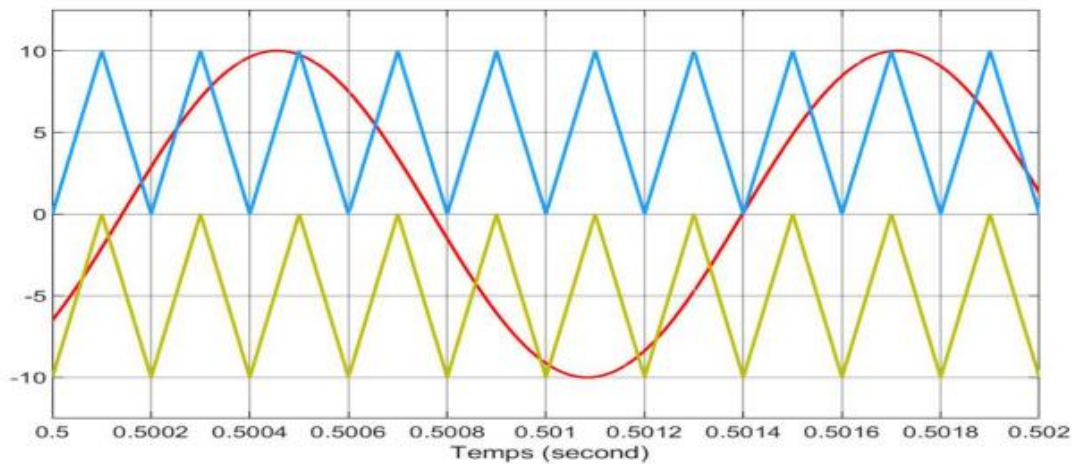


Figure 2.8 : Signaux des dents de scie comparer à une référence sinusoïdale pour un bras du T-bridge.

- FAPP utilisant la topologie NPC et FC :

La MLI de l'onduleur NPC est identique à celle de l'onduleur FC. La modulation sinusoïdale à double triangle est une forme d'onde porteuse à haute fréquence. Lorsque le signal de référence est supérieur à la forme d'onde porteuse, les interrupteurs S_{1a} et S_{1b} sont activés, et les interrupteurs S_{1e} et S_{1f} sont désactivés (Voir figure 2.9).

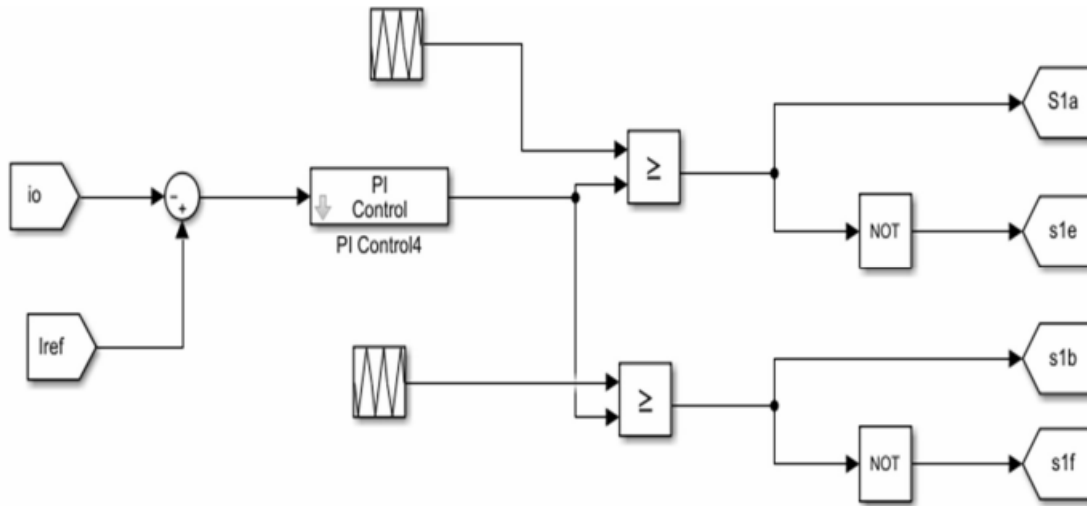


Figure 2.9 : MLI pour commander un FAPP de type NPC et FC.

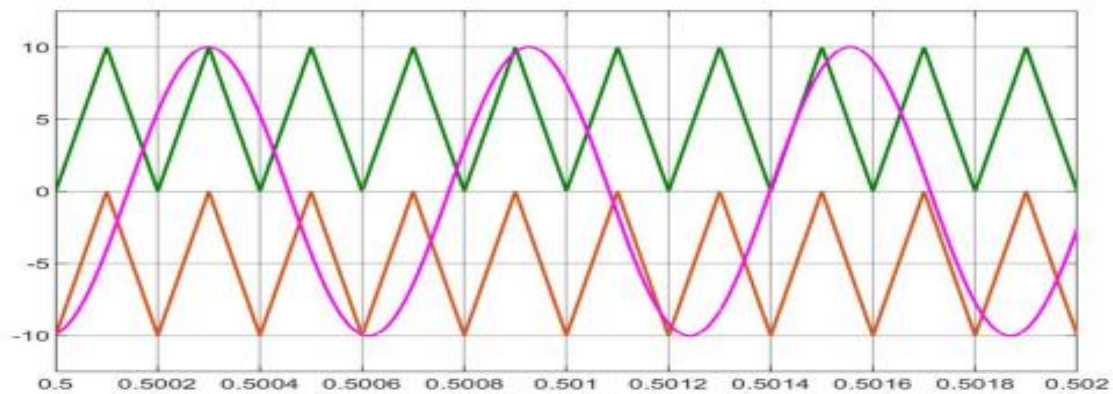


Figure 2.10 : Signaux commande MLI sinusoïdale de l'onduleur type NPC et FC

2.3. Etude de deux autres stratégies de commande

Nous avons présenté dans le chapitre 1 deux stratégies de commande classique qui étaient basées sur les puissances instantanées, la première commande appelée commande PQ et la deuxième dite commande SFR et qui s'appelle aussi commande basée sur référentiel lié au synchronisme. Cette dernière commande utilise une PLL au niveau de la tension afin d'éliminer l'influence des harmoniques de tension sur la commande elle-même. C'est deux commandes qui utilisent un filtre passe haut de premier ordre afin d'éliminer la composante continue de la puissance instantanée. Nous proposons maintenant de présenter une troisième commande qui modifie la méthode PQ par l'utilisation d'un filtre multi-variable au niveau de la tension et du courant et d'éliminer le filtre passe haut de cette commande. Nous allons ensuite présenter une quatrième commande qui s'appelle commande Fryze généralisée [24][25].

2.3.1 Commande PQ intégrant des Filtres multi-variable

Le principe du filtre multivariable (FMV) est basée sur l'extraction de la composante fondamentale des signaux (courant/tension) directement sur l'axe α - β . La figure (2.11) illustre le schéma du filtre multivariable [25]. L'expression générale de ce filtre est donnée par les deux équations :

$$\hat{v}_\alpha(s) = \frac{k}{s} [v_\alpha(s) - \hat{v}_\alpha(s)] - \frac{\omega_c}{s} \hat{v}_\beta(s) \quad \text{eq. 2.1}$$

$$\hat{v}_\beta(s) = \frac{k}{s} [v_\beta(s) - \hat{v}_\beta(s)] + \frac{\omega_c}{s} \hat{v}_\alpha(s) \quad \text{eq. 2.2}$$

Avec

- v_α et v_β : Les signaux d'entrées selon l'axe α - β .
- $\hat{v}_\alpha$ et $\hat{v}_\beta$: Les signaux de sorties selon l'axe α - β .
- K : Constante à fixer.
- $\omega_c = 2\pi f$: Pulsation fondamentale du réseau électrique.

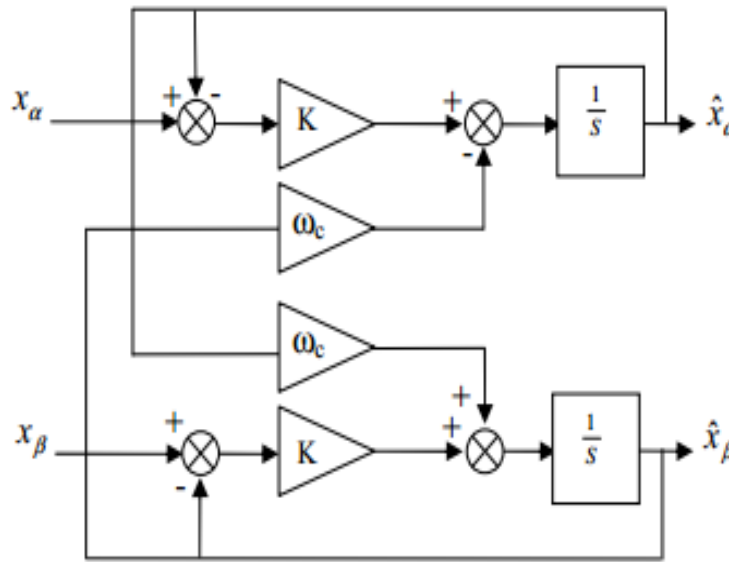


Figure 2.11 : Schéma du FMV

Ce filtre FMV sera appliqué de façon systématique dans toutes les stratégies de commande analysées dans ce travail. La figure (2.12) présente une version modifiée du schéma d'identification des courants de référence, fondée sur la méthode des puissances instantanées, dans laquelle les FMV seront intégrés [26], [27] et [28].

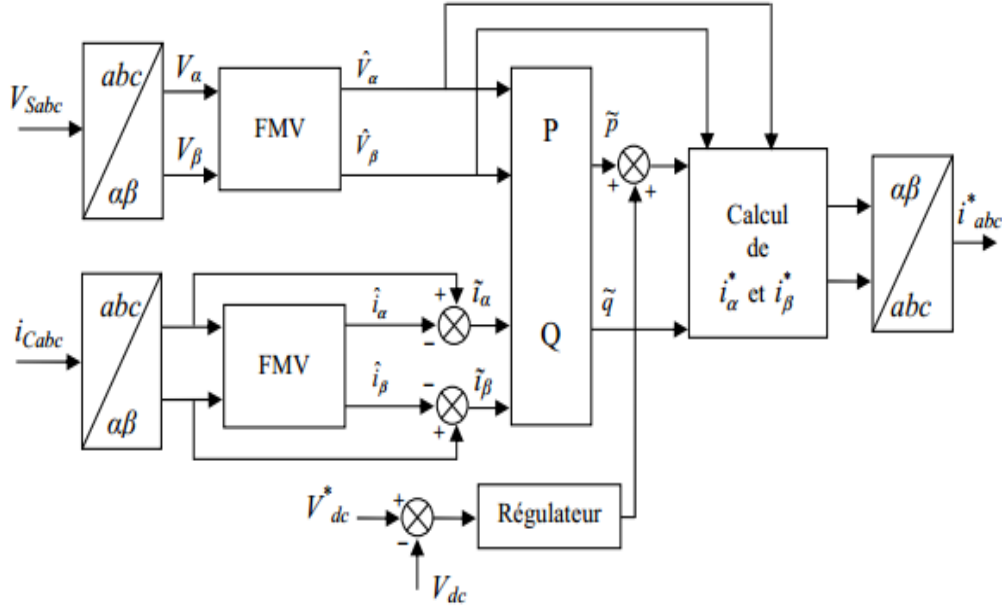


Figure 2.12 : Commande PQ modifié utilisant deux FMV

2.3.2 Commande de Fryze

Les courants de référence pour cette commande sont déterminés à l'aide de l'algorithme de minimisation du courant par la méthode du courant généralisé de Fryze. Cette commande calcule une composante qui s'appelle la conductance équivalente instantanée de Fryze. Cette conductance G_e est déterminée à partir de la puissance active triphasée instantanée, divisée par le carré de la tension globale instantanée, comme indiqué dans l'équation (2.3). La conductance moyenne est ensuite obtenue en appliquant un filtre passe-bas à cette grandeur. Les composantes actives instantanées du courant de charge, notées i_{wa} , i_{wb} et i_{wc} , sont calculées en multipliant G_e par les tensions de phase respectives v_a , v_b et v_c conformément à l'équation (2.4). Enfin, le courant injecté est obtenu en soustrayant i_{wa} , i_{wb} et i_{wc} des courants de charge i_{ca} , i_{cb} et i_{cc} , comme il est montré dans l'équation (2.5). Ces équations ont été décrit dans les références [29] et [30].

$$G_e = \frac{v_a i_{ca} + v_b i_{cb} + v_c i_{cc}}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \quad \text{eq.2.3}$$

$$\begin{aligned} i_{wa} &= (G_e + G_{perte}) v_a \\ i_{wb} &= (G_e + G_{perte}) v_b \end{aligned} \quad \text{eq.2.4}$$

$$i_{wc} = (G_e + G_{perte}) v_c$$

$$\begin{aligned} i_{ha} &= (i_{wa} - i_{ca}) \\ i_{hb} &= (i_{wb} - i_{cb}) \\ i_{hc} &= (i_{wc} - i_{cc}) \end{aligned} \quad \text{eq.2.5}$$

La figure suivante illustre la commande généralisée du courant de Fryze complète.

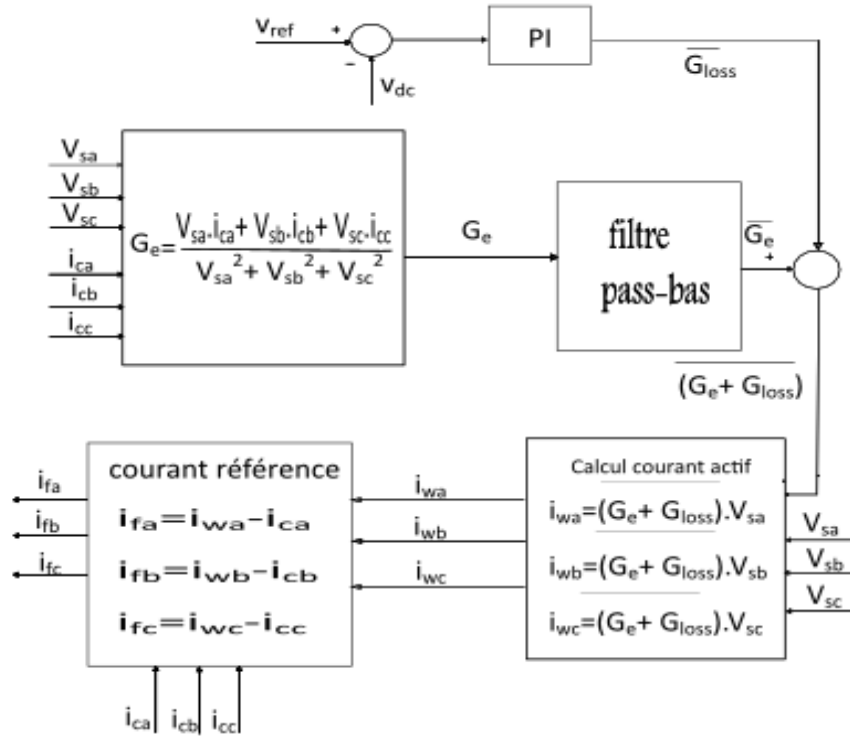


Figure 2.13 : Schéma de la commande de Fryze.

Conclusion

Les topologies trois-niveaux des FAPP, telles que NPC, FC, T-bridge et H-bridge, permettent de compenser les harmoniques de courant pour un réseau électrique moyenne tension. Ces FAPP utilisent les mêmes commandes que ceux présentés dans le chapitre 1, mais également deux autres commandes qui ont été présentées dans ce chapitre afin de compenser les harmoniques de courants. Différentes MLI sont appliquées selon la topologie trois niveaux utilisée. Nous allons dans le chapitre 3 montrer les résultats de simulation pour chacune des topologies et chacune des commandes présentées.

Chapitre 3 : Simulation des différents FAPP trois niveaux et filtre passif

Introduction

Dans ce chapitre nous proposons de présenter les résultats de simulation avec une analyse comparative approfondie de quatre topologies principales de FAP trois niveaux. Chaque structure est évaluée selon les stratégies de commande : la théorie des puissances instantanées PQ, la commande PQ utilisant le FMV et la commande basée sur la théorie de fryze. La tension appliquée sur le réseau électrique est de 5,5 kV.

3.1 Résultat de Simulation des FAPP trois niveaux selon les topologies sans utiliser de filtre passif

Nous commencerons par présenter les résultats de simulation de chacune des topologies de FAPP sans utiliser de filtre passif. Puis nous présenterons les résultats de simulation en fixant la topologie mais en changeant les commandes. Pour terminer nous introduisons le filtre passif et nous appliquerons différentes topologies et commande.

3.1.1 Topologie NPC utilisant la commande PQ

Pour commencer nous allons présenter les résultats de simulation d'un FAPP de type NPC utilisant la commande PQ. Les paramètres du réseau électrique et du filtre actif de puissance sont présentés en Annexe.

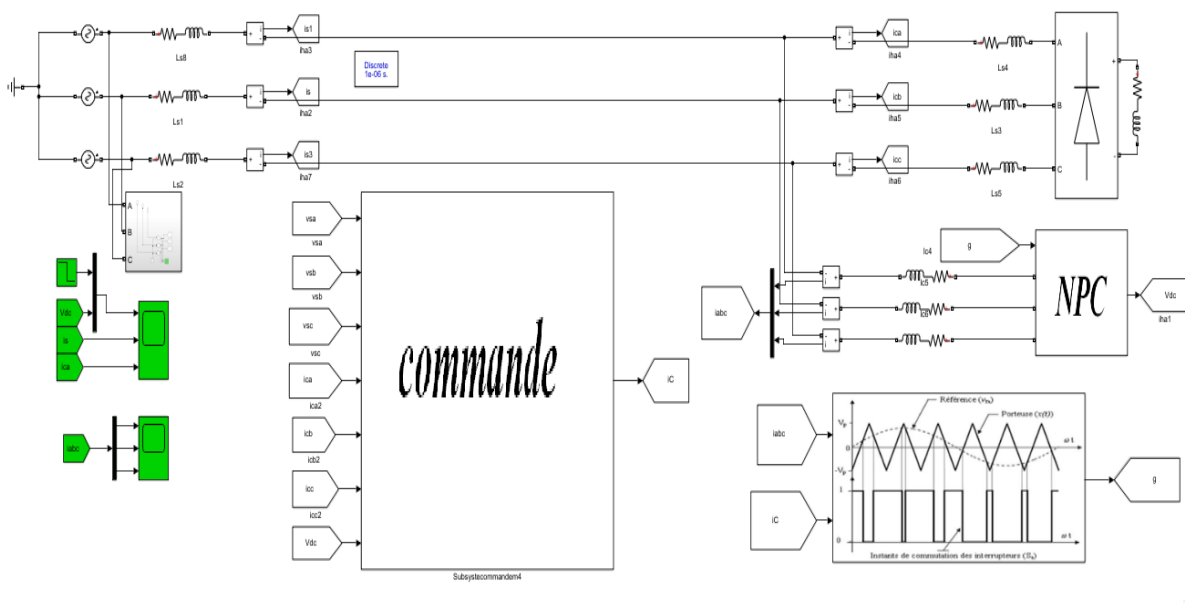


Figure 3.1 : Simulation du FAPP type NPC utilisant la commande PQ.

Remarque 1 : Sur la figure les deux seuls blocs qui changeront sont le block NPC et le bloc commande lorsque nous utiliserons les autres topologies et/ou commande, c'est pour cela nous n'allons plus répéter le schéma.

Remarque 2 : Pour toutes les simulations vous trouverez en Annexe les paramètres de simulation.

Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :

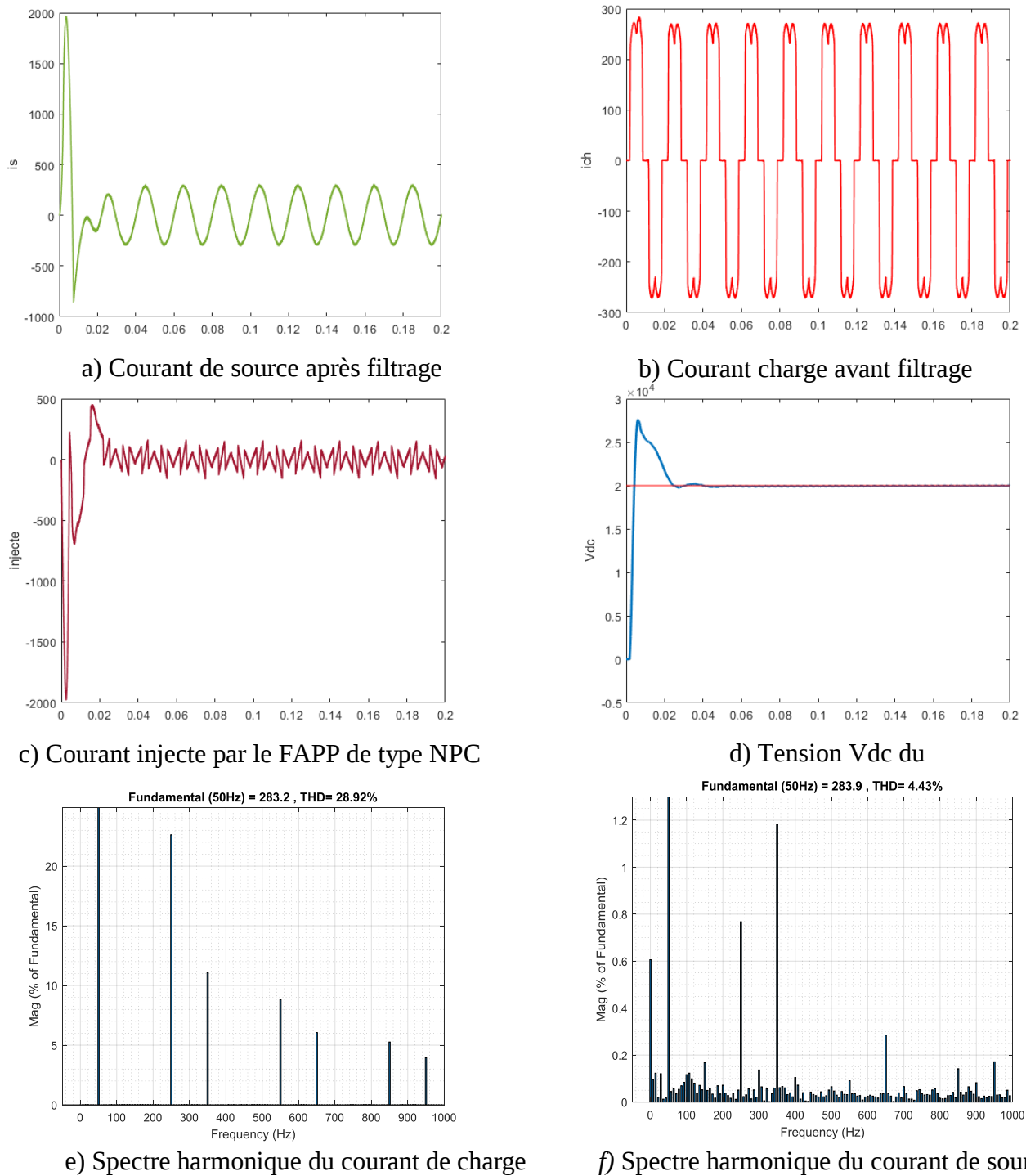
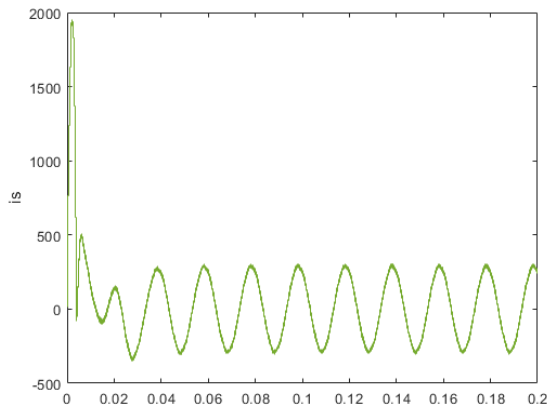


Figure 3.2 : Simulation du FAPP multi-niveaux type NPC utilisant la commande PQ.

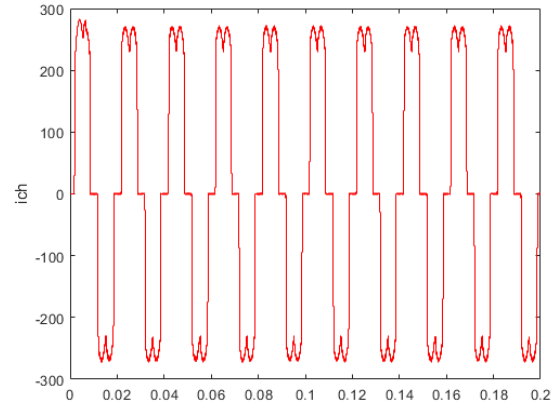
3.1.2 Topologie FC utilisant la commande PQ

Maintenant nous allons remplacer la topologie NPC par une topologie dite FC, en utilisant toujours la commande PQ.

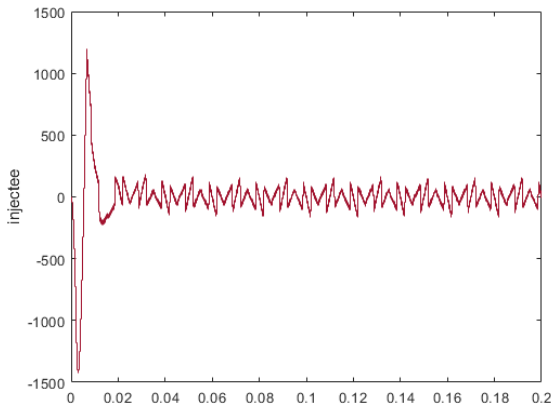
Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :



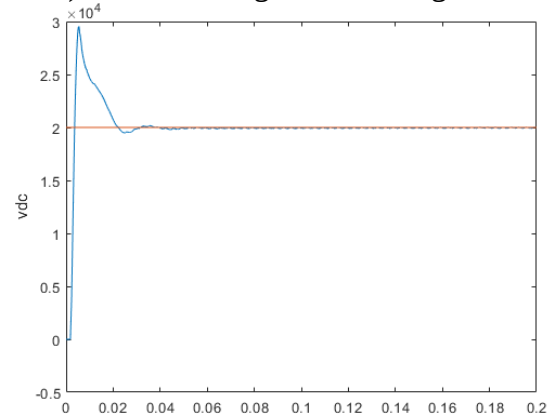
a) Courant de source après filtrage



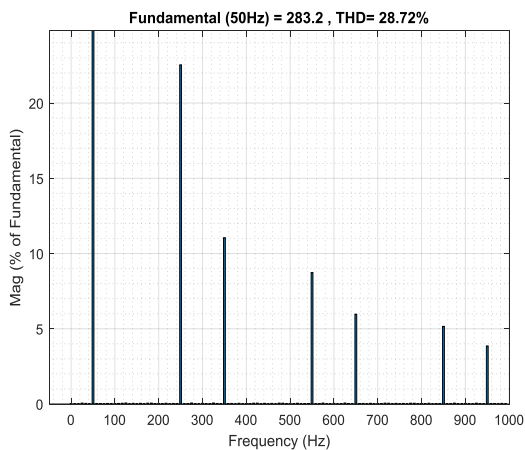
b) Courant charge avant filtrage



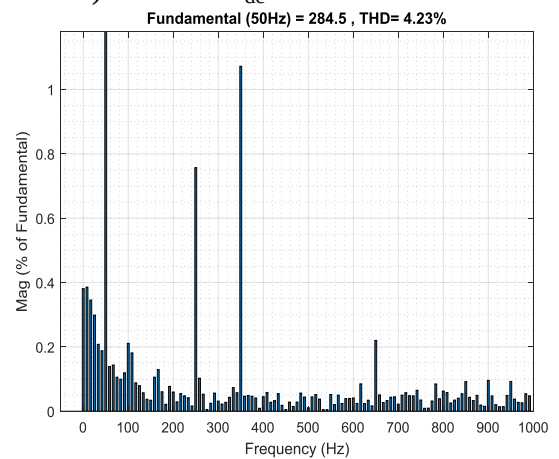
c) Courant injecté par le FAPP de type FC



d) Tension V_{dc} du condensateur



e) Spectre harmonique du courant de charge



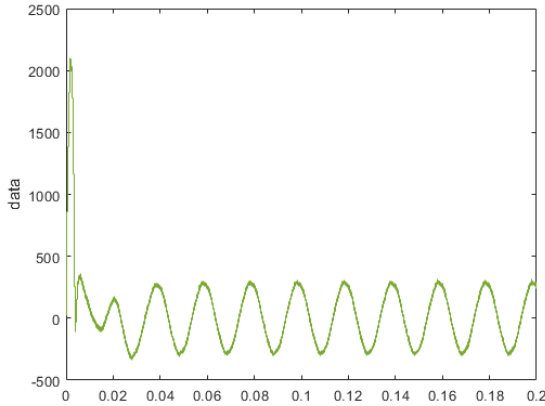
f) Spectre harmonique du courant de source

Figure 3.3 : Simulation du FAPP Trois-niveaux type FC utilisant la commande PQ

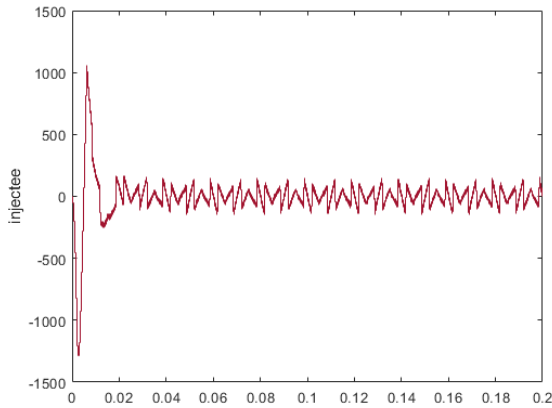
3.1.3 Topologie T-bridge utilisant la commande PQ

Maintenant nous allons remplacer la topologie FC par une topologie dite T-bridge, en utilisant toujours la commande PQ.

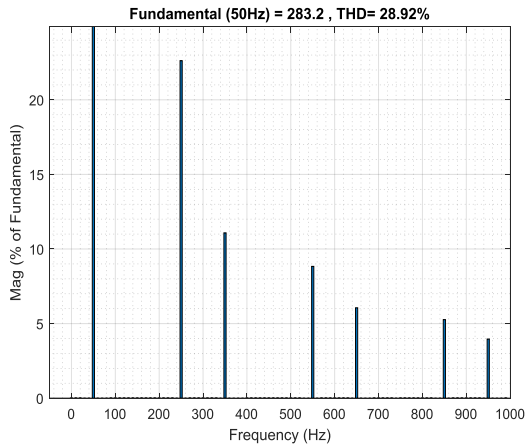
Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :



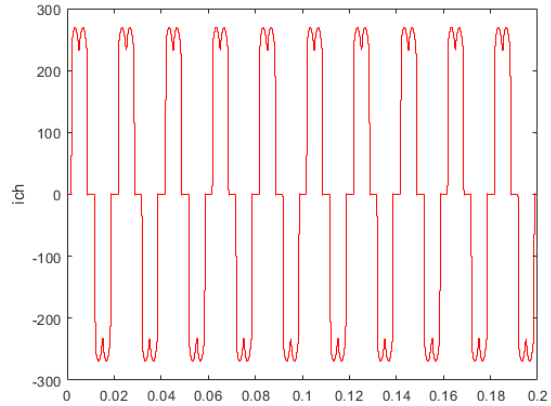
a) Courant de source après filtrage



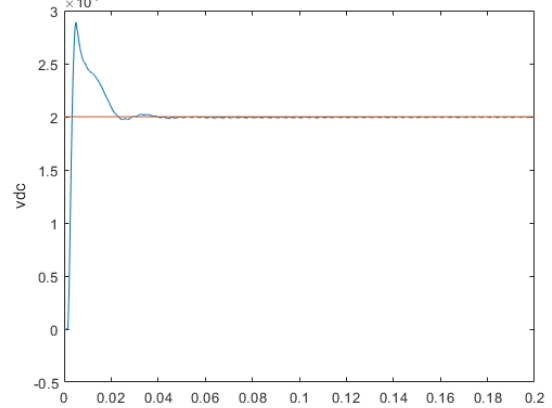
c) Courant injecté par le FAPP de type T-bridge



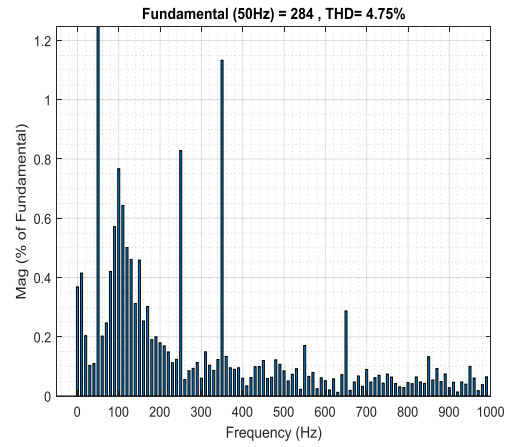
e) Spectre harmonique du courant de charge



b) Courant charge avant filtrage



d) Tension V_{dc} du condensateur



f) Spectre harmonique du courant de source

Figure 3.4 : Simulation du FAPP Trois-niveaux type T-bridge utilisant la commande PQ

3.1.4 Topologie H-bridge utilisant la commande PQ

Maintenant nous allons remplacer la topologie T-bridge par une topologie dite H-bridge, en utilisant toujours la commande PQ.

Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :

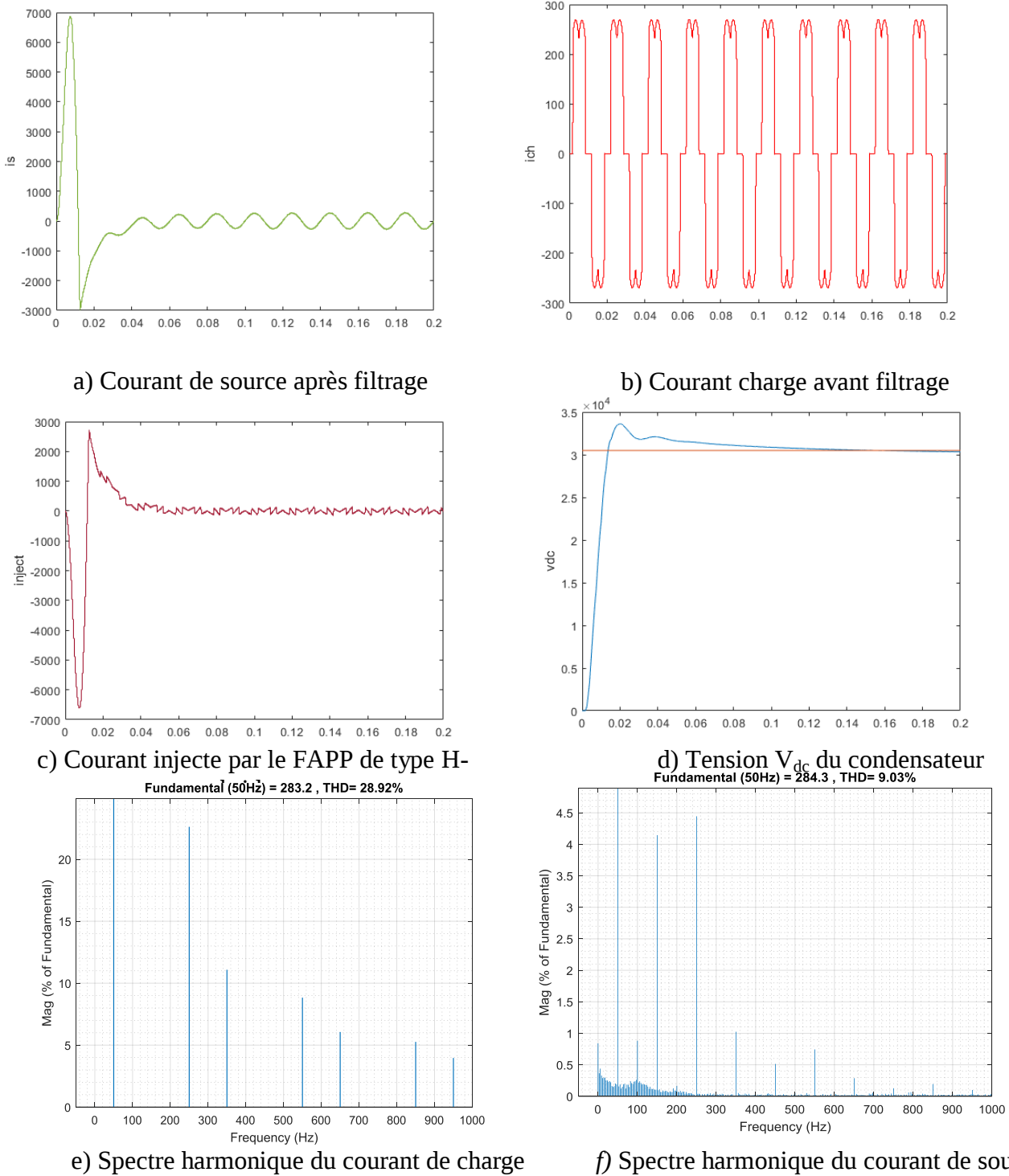


Figure 3.5 : Simulation du FAPP Trois-niveaux type H-bridge utilisant la commande PQ

Interprétation des résultats :

Dans le tableau (3.1) nous allons présenter les THD pour le courant de source avant et après filtrage pour les 4 topologies utilisant la commande PQ.

	Avant Filtrage I_c (courant de la charge)	Après Filtrage I_s (courant de la source)
NPC (Neutral Point Clamped)	28.92%	4.43%
FC (Flying Capaciter)	28.72%	4.23%
T-bridge	28.92%	4.75%
H-bridge	28.92%	9.03%

Tableau 3.1 : Quatre topologies de FAPP 3 niveaux (Avant et Après Filtrage)

Nous remarquons des simulations que le courant de source après filtrage est sinusoïdal et que la tension aux bornes du condensateur est constante. Nous remarquons également que le THD pour la topologie H-bridge donne le moins bon résultat que celui des autres topologies, à savoir 9.03%, ce qui est au-dessus des 5% qui est fixé par la norme CEI. Ceci est due du fait qu'il atténue moins bien la 5^{ème} harmoniques.

3.1.5 Topologie NPC utilisant la commande PQ incluant deux FMV

Nous allons maintenant utiliser la commande PQ mais qui utilise cette fois ci deux filtres multi variable (FMV), comme le montre la figure 3.6.

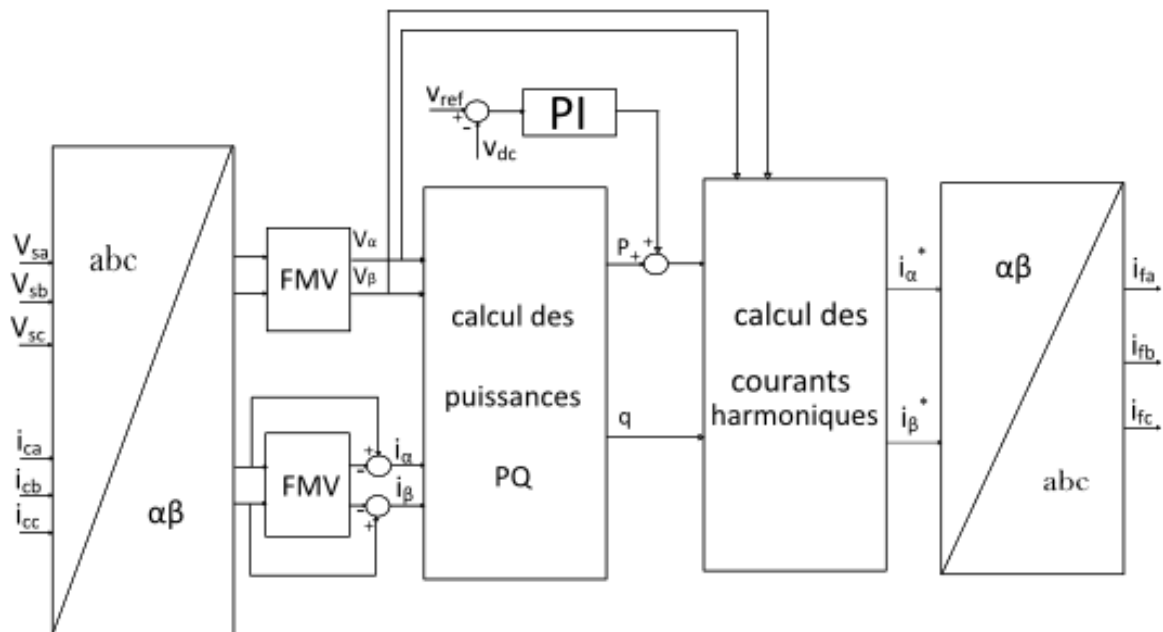
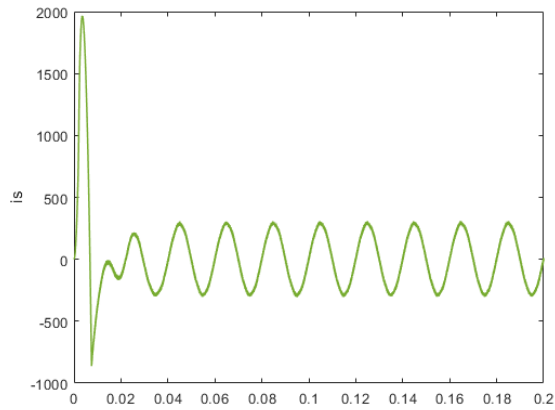
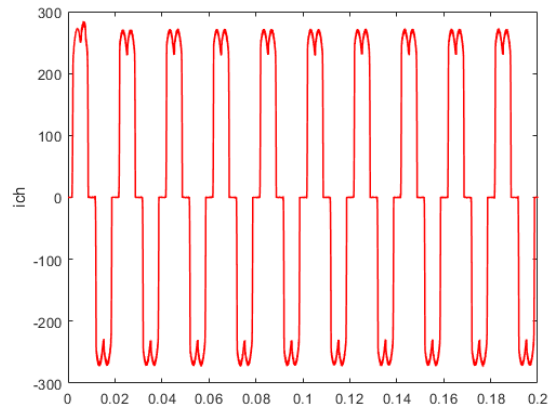


Figure 3.6 : Commande PQ utilisant deux FMV.

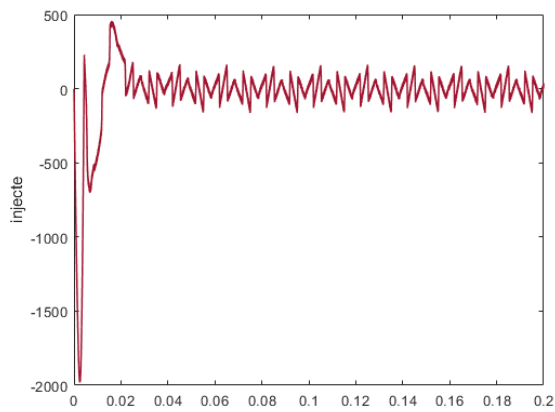
Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :



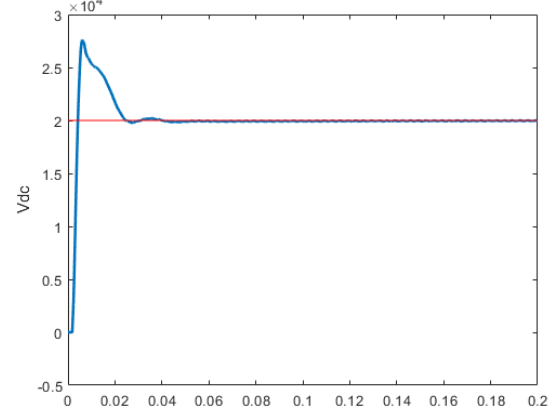
a) Courant de source après filtrage



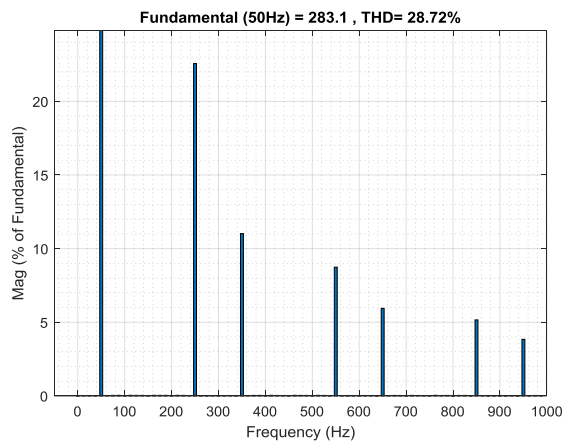
b) Courant charge avant filtrage



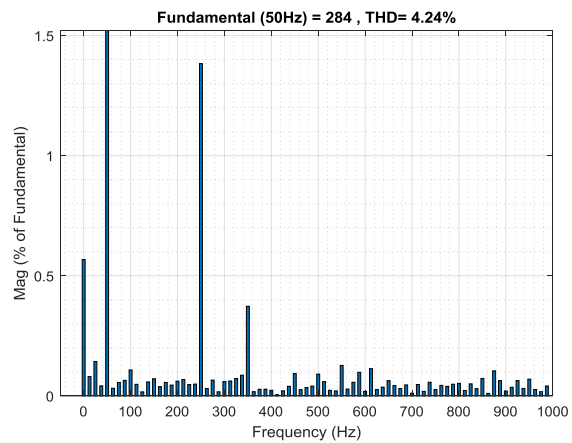
c) Courant injecté par le FAPP de type NPC



d) Tension Vdc du condensateur



e) Spectre harmonique du courant de charge



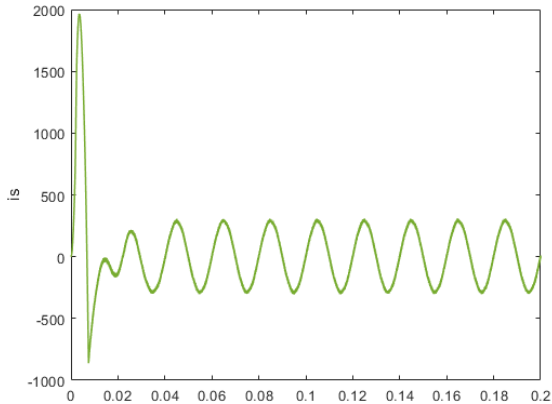
f) Spectre harmonique du courant de source

Figure 3.7 : Simulation du FAPP multi-niveaux type NPC utilisant la commande PQ utilisant deux FMV.

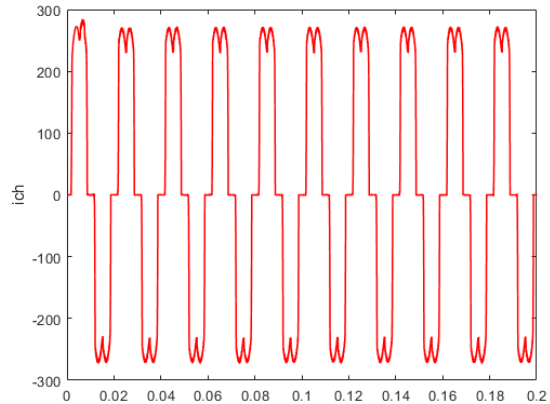
3.1.6 Topologie FC utilisant la commande PQ incluant deux FMV

Maintenant nous allons remplacer la topologie NPC par une topologie dite FC, en utilisant toujours la commande PQ utilisant deux FMV.

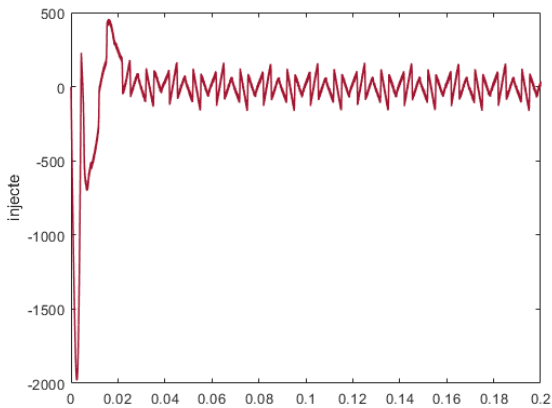
Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :



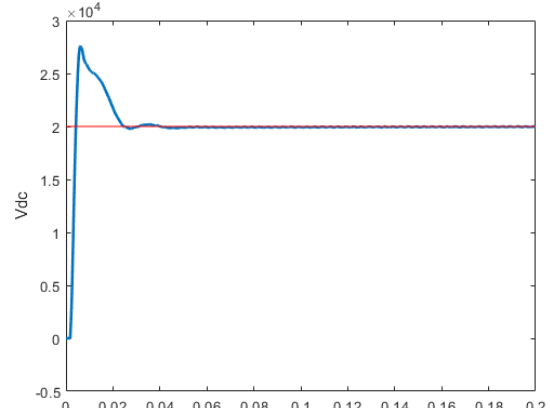
a) Courant de source après filtrage



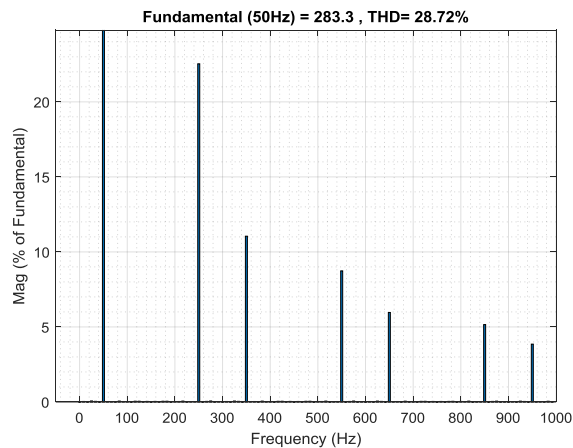
b) Courant charge avant filtrage



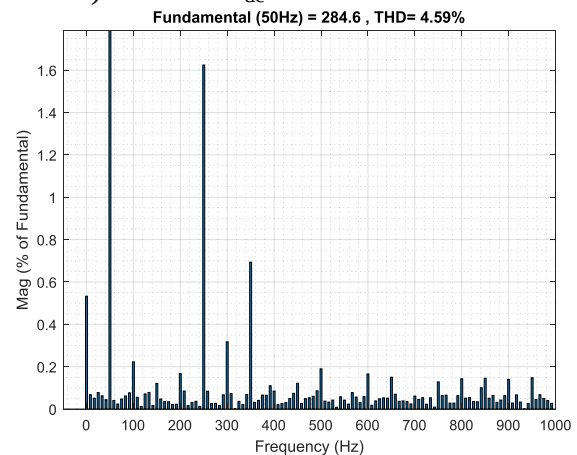
c) Courant injecté par le FAPP de type FC



d) Tension V_{dc} du condensateur



e) Spectre harmonique du courant de charge



f) Spectre harmonique du courant de source

Figure 3.8 : Simulation du FAPP Trois-niveaux type FC utilisant la commande PQ utilisant deux FMV

3.1.7 Topologie T-bridge utilisant la commande PQ incluant deux FMV

Maintenant nous allons remplacer la topologie FC par une topologie dite T-bridge, en utilisant toujours la commande PQ utilisant deux FMV.

Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :

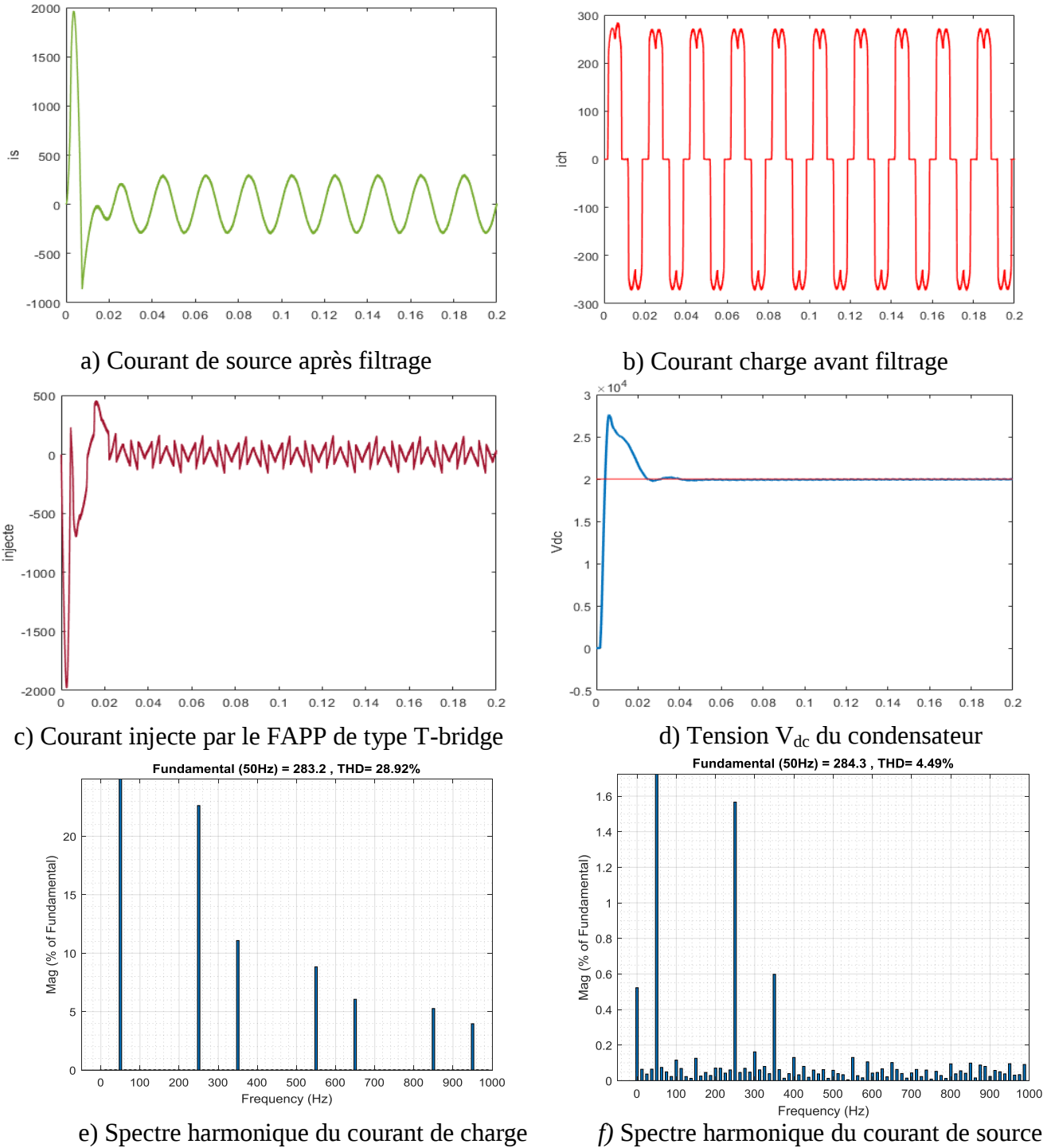


Figure 3.9 : Simulation du FAPP Trois-niveaux type T-bridge utilisant la commande PQ utilisant deux FMV

3.1.8 Topologie H-bridge utilisant la commande PQ incluant deux FMV

Maintenant nous allons remplacer la topologie T-bridge par une topologie dite H-bridge, en utilisant toujours la commande PQ utilisant deux FMV.

Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :

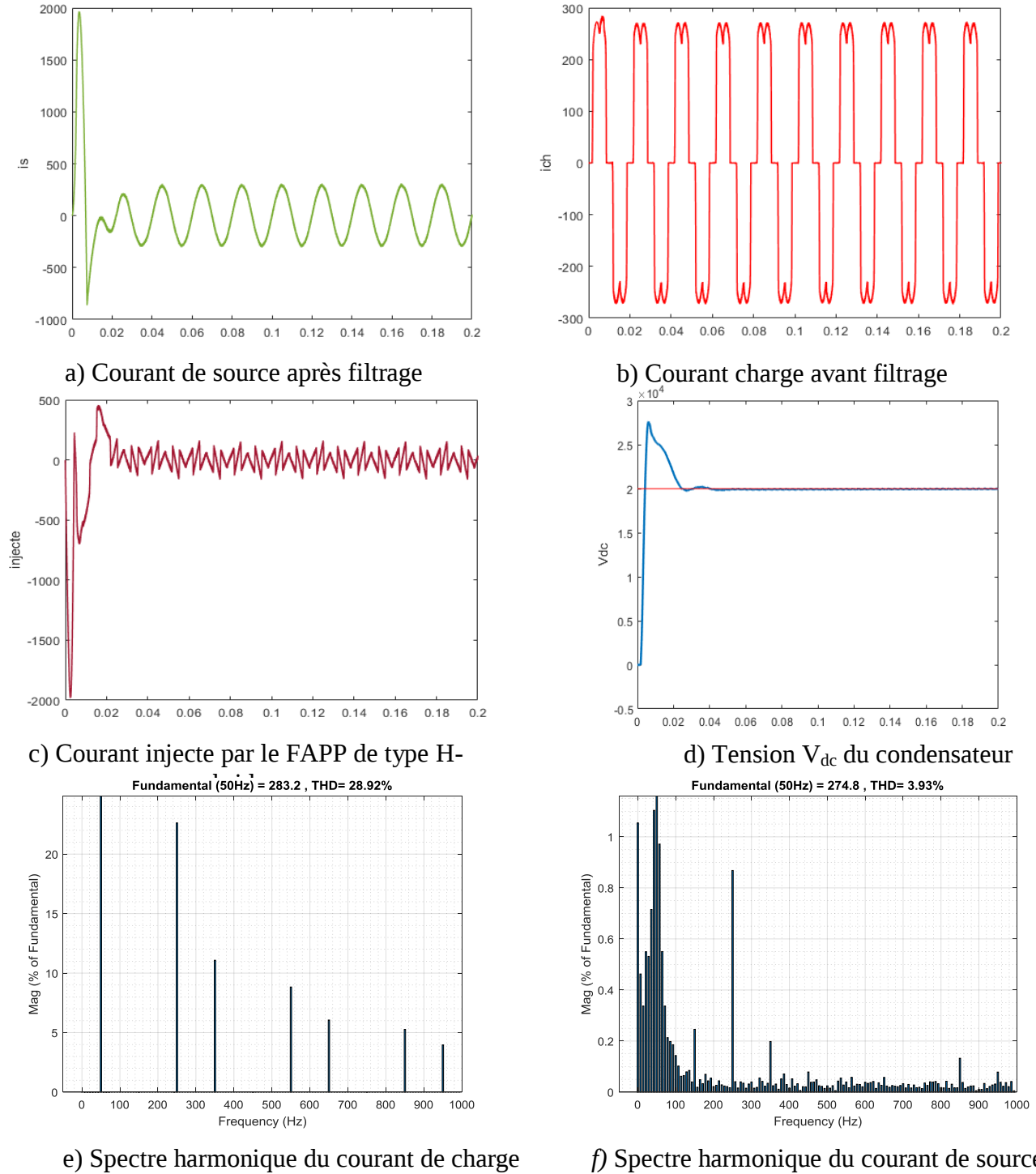


Figure 3.10 : Simulation du FAPP Trois-niveaux type H-bridge utilisant la commande PQ utilisant deux FMV

Interprétation des résultats :

Dans le tableau (3.2) nous allons présenter les THD pour le courant de source avant et après filtrage pour les 4 topologies utilisant la commande PQ incluant deux FMV.

	Avant Filtrage I_c (courant de la charge)	Après Filtrage I_s (courant de la source)
NPC (Neutral Point Clamped)	28.72%	4.24%
FC (Flying Capaciter)	28.72%	4.59%
T-bridge	28.92%	4.49%
H-bridge	28.92%	3.93%

Tableau 3.2 : Quatre topologies de FAPP 3 niveaux (Avant et Après Filtrage)

Nous remarquons des simulations que le courant de source après filtrage est sinusoïdal et que la tension aux bornes du condensateur est constante. Nous remarquons également que le THD pour la topologie H bridge donne cette fois-ci de meilleurs résultats que celui des autres topologies, à savoir 3.93%. D'un autre coté nous remarquons que toutes les topologies respectent la norme CEI qui est inférieure à 5%.

3.1.9 Topologie NPC utilisant la commande de Fryze

Nous allons maintenant utiliser la topologie NPC avec la commande qui se nomme commande de Fryze. La figure ci-dessous montre cette commande.

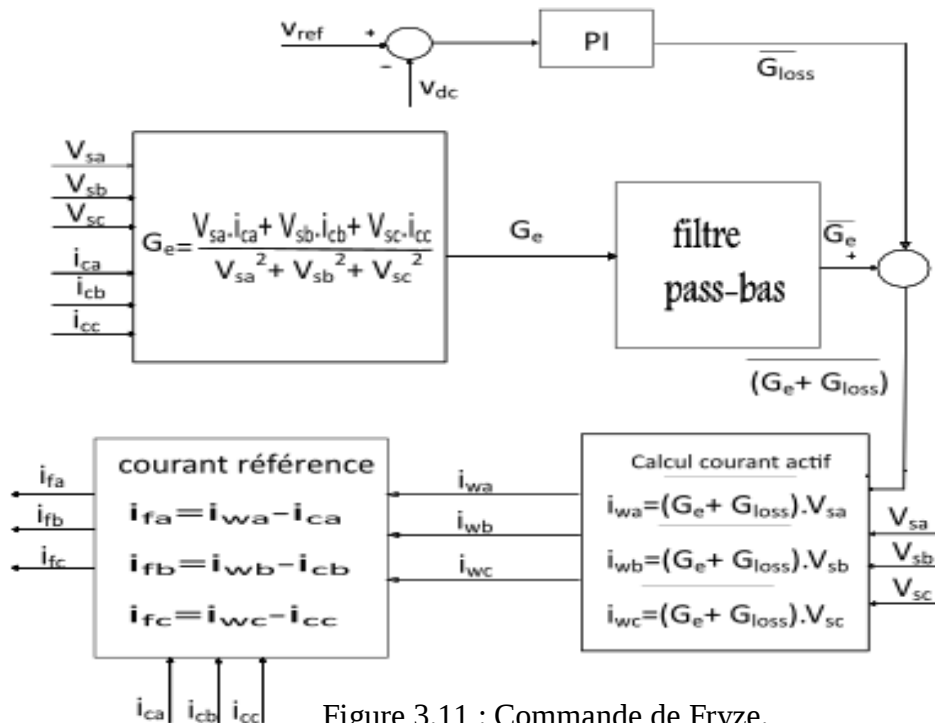


Figure 3.11 : Commande de Fryze.

Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :

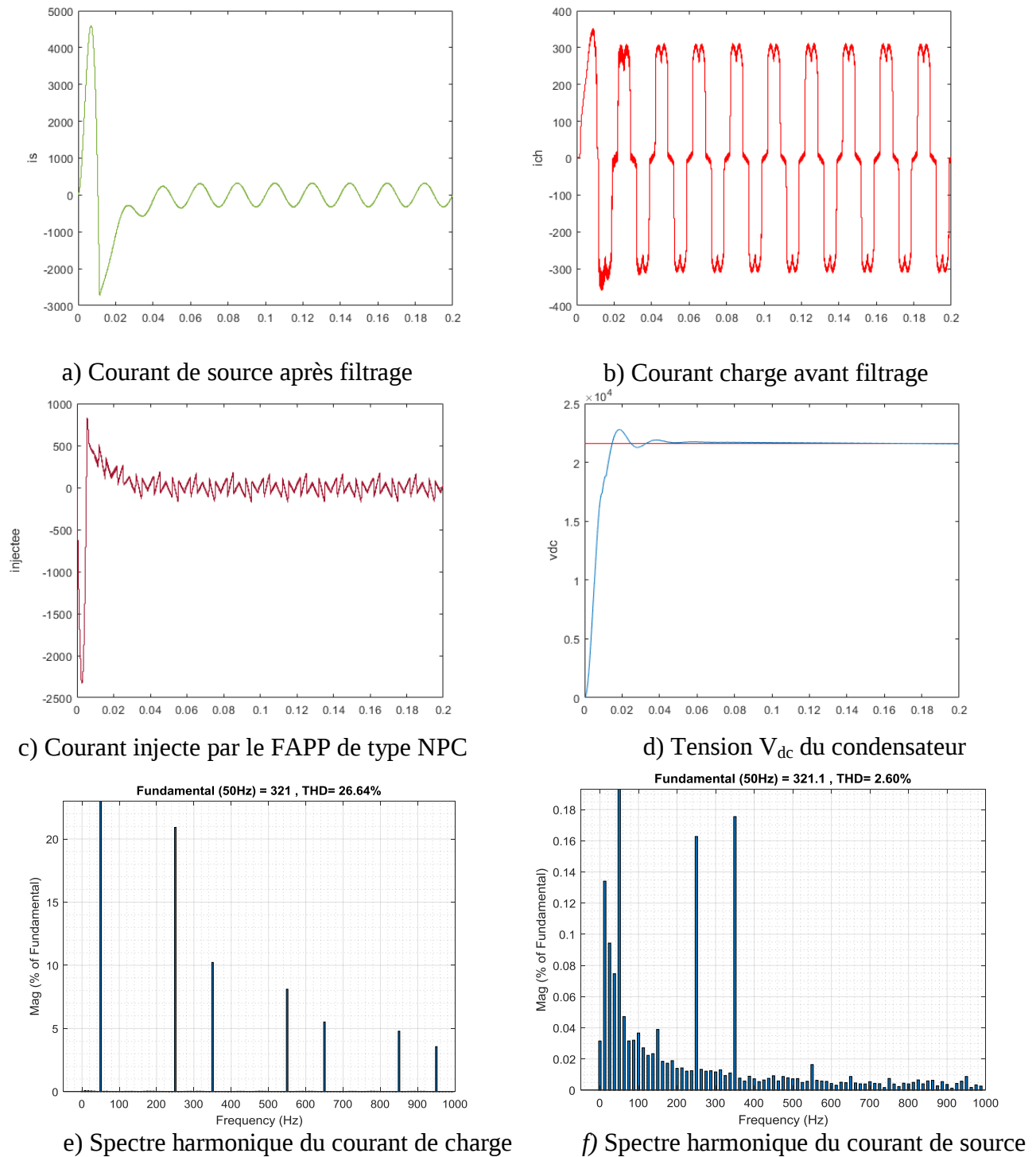
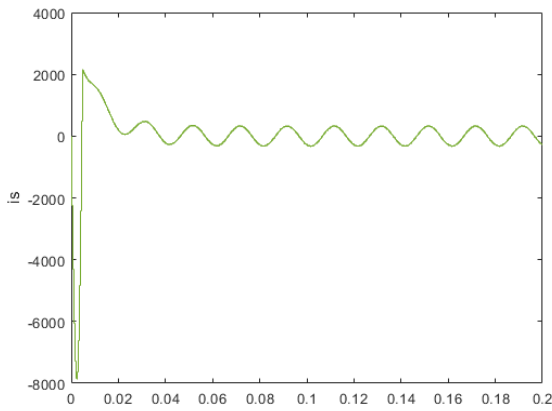


Figure 3.12: Simulation du FAPP multi-niveaux type NPC utilisant la commande de Fryze.

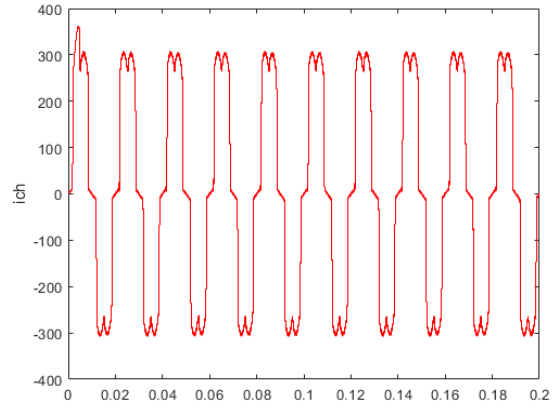
3.1.10 Topologie FC utilisant la commande de Fryze

Maintenant nous allons remplacer la topologie NPC par une topologie dite FC, en utilisant toujours la commande de Fryze.

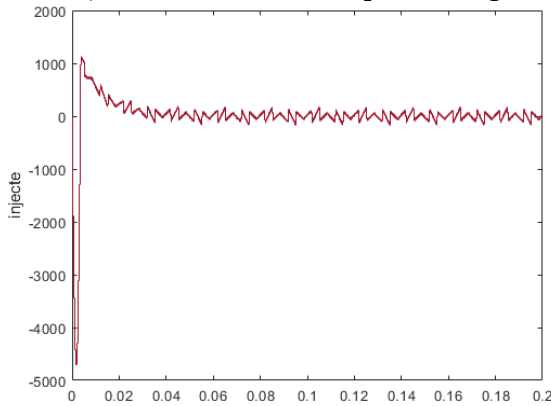
Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :



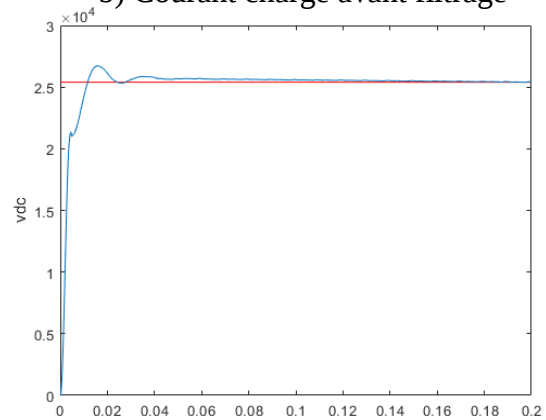
a) Courant de source après filtrage



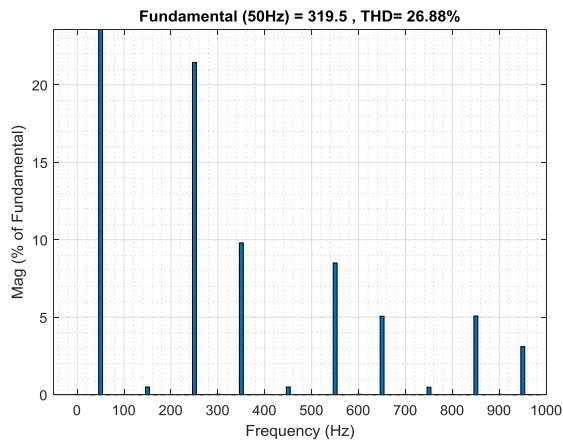
b) Courant charge avant filtrage



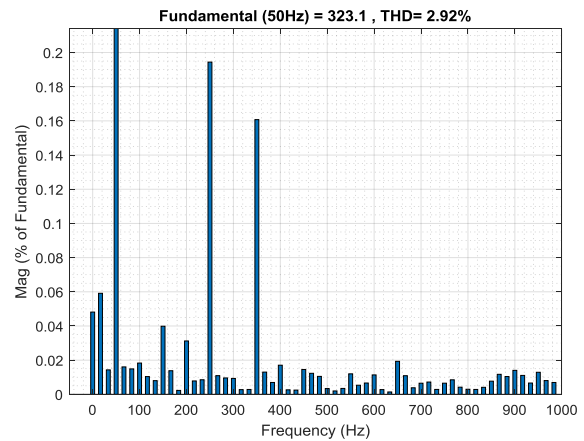
c) Courant injecté par le FAPP de type FC



d) Tension V_{dc} du condensateur



e) Spectre harmonique du courant de charge



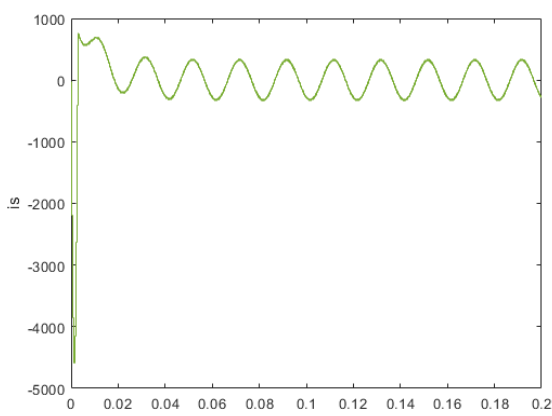
f) Spectre harmonique du courant de source

Figure 3.13 : Simulation du FAPP Trois-niveaux type FC utilisant la commande de Fryze

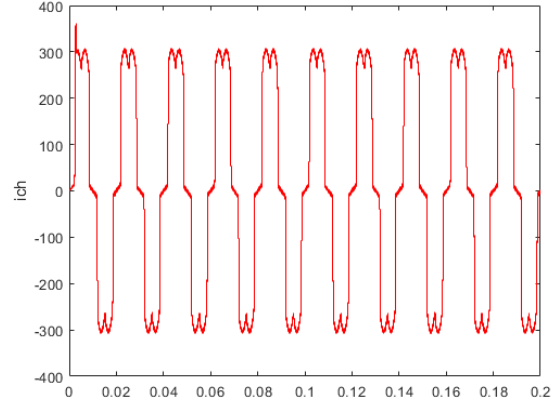
3.1.11 Topologie T-Bridge utilisant la commande de Fryze

Maintenant nous allons remplacer la topologie FC par une topologie dite T-bridge, en utilisant toujours la commande de Fryze.

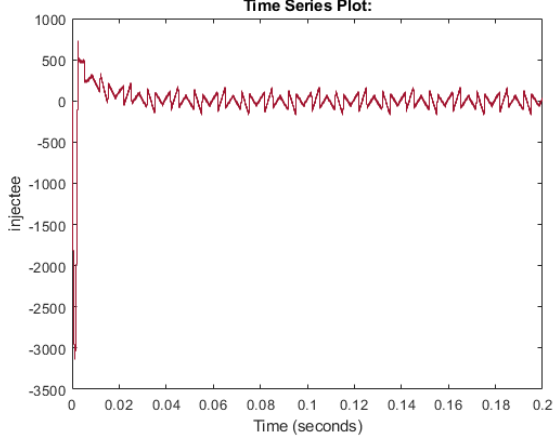
Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :



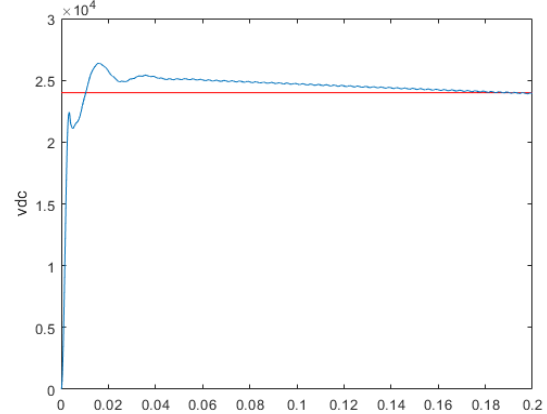
a) Courant de source après filtrage



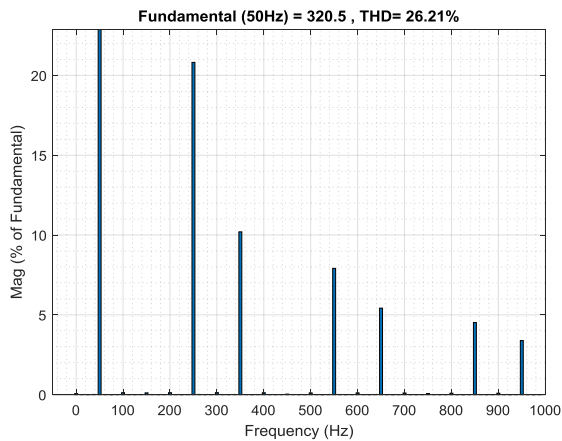
b) Courant charge avant filtrage



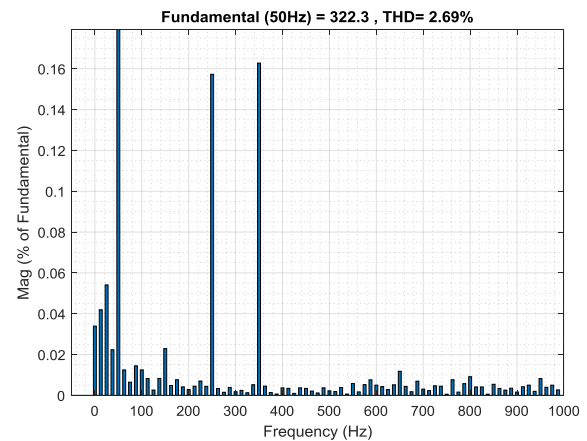
c) Courant injecté par le FAPP de type T-bridge



d) Tension V_{dc} du condensateur



e) Spectre harmonique du courant de charge



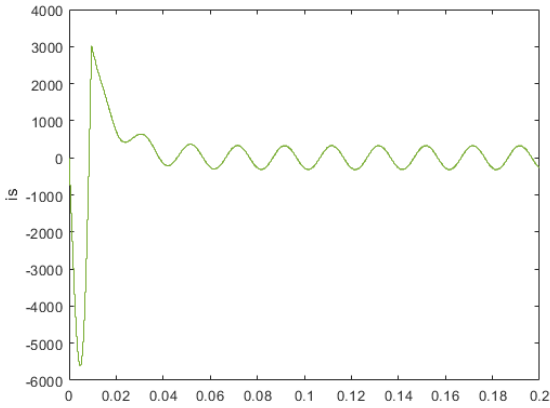
f) Spectre harmonique du courant de source

Figure 3.14 : Simulation du FAPP Trois-niveaux type T-bridge utilisant la commande de Fryze

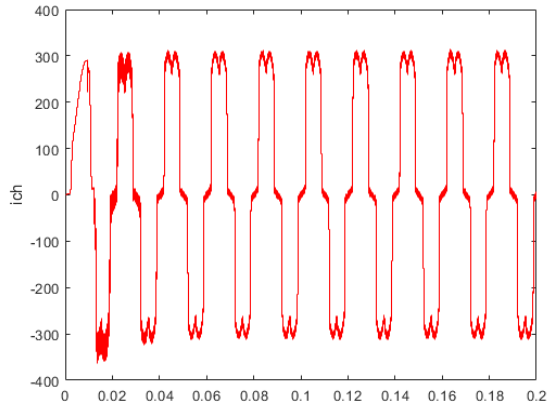
3.1.12 Topologie H-bridge utilisant la commande de Fryze

Maintenant nous allons remplacer la topologie T-bridge par une topologie dite H-bridge, en utilisant toujours la commande de Fryze.

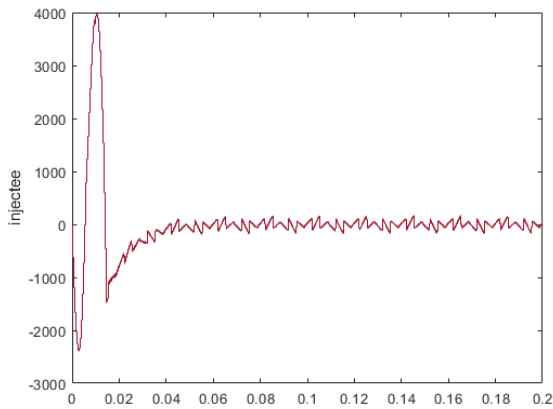
Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :



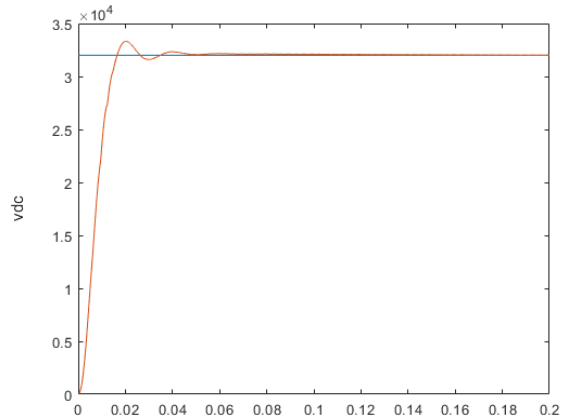
a) Courant de source après filtrage



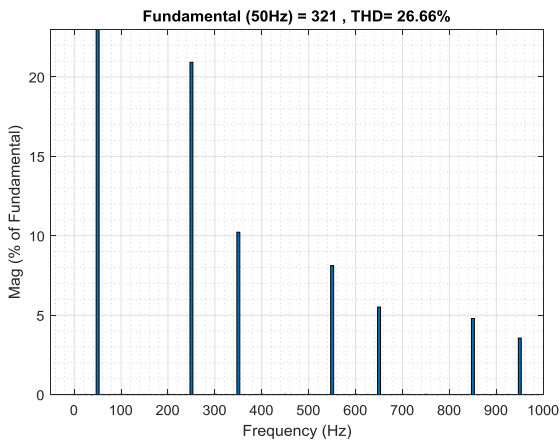
b) Courant charge avant filtrage



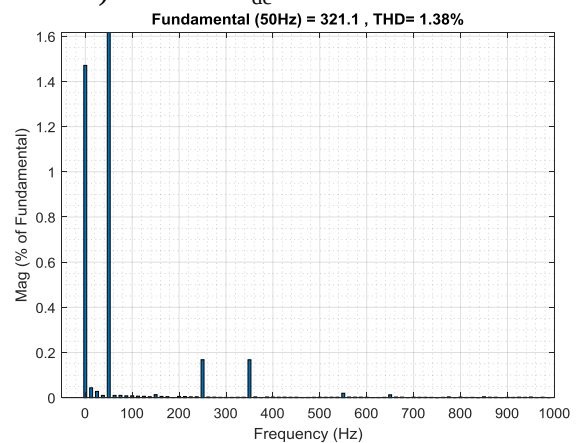
c) Courant injecté par le FAPP de type H-



d) Tension V_{dc} du condensateur



e) Spectre harmonique du courant de charge



f) Spectre harmonique du courant de source

Figure 3.15 : Simulation du FAPP Trois-niveaux type H-bridge utilisant la commande de Fryze

Interprétation des résultats :

Dans le tableau (3.3) nous allons présenter les THD pour le courant de source avant et après filtrage pour les 4 topologies utilisant la commande de Fryze.

	Avant Filtrage I_c (courant de la charge)	Après Filtrage I_s (courant de la source)
NPC (Neutral Point Clamped)	26.64%	2.60%
FC (Flying Capaciter)	26.88%	2.92%
T-bridge	26.21%	2.69%
H-bridge	26.66%	1.38%

Tableau 3.3 : Quatre topologies de FAPP 3 niveaux (Avant et Après Filtrage)

Nous remarquons des simulations que le courant de source après filtrage est sinusoïdal et que la tension aux bornes du condensateur est constante. Nous remarquons également que le THD pour la topologie H- bridge donne les meilleurs résultats que celui des autres topologies, à savoir 1.38%. De plus nous remarquons que le THD pour toutes les topologies est inférieur à 5%, ce qui permet de respecter la norme CEI. Nous remarquons également que la commande de Fryze quel que soit la topologie donne de meilleurs résultats que les autres stratégies de commande présentée précédemment.

3.2 Résultat de Simulation des FAPP trois niveaux selon les topologies en utilisant les filtres passifs

Nous allons maintenant présenter les résultats de simulation de chacune des topologies de FAPP lorsque des filtres passifs sont inclus au réseau électrique, comme le montre la figure 3.16. Puis nous présenterons les résultats de simulation en fixant la topologie mais en changeant les commandes.

3.2.1 Topologie NPC utilisant la commande PQ

Pour commencer nous allons présenter les résultats de simulation d'un FAPP de type NPC utilisant la commande PQ en présence du filtre passif au réseau électrique. Les paramètres du réseau électrique et du filtre actif de puissance sont présentés en Annexe. Le filtre passif utilisé permet d'atténuer la 5^{ième} harmonique du courant.

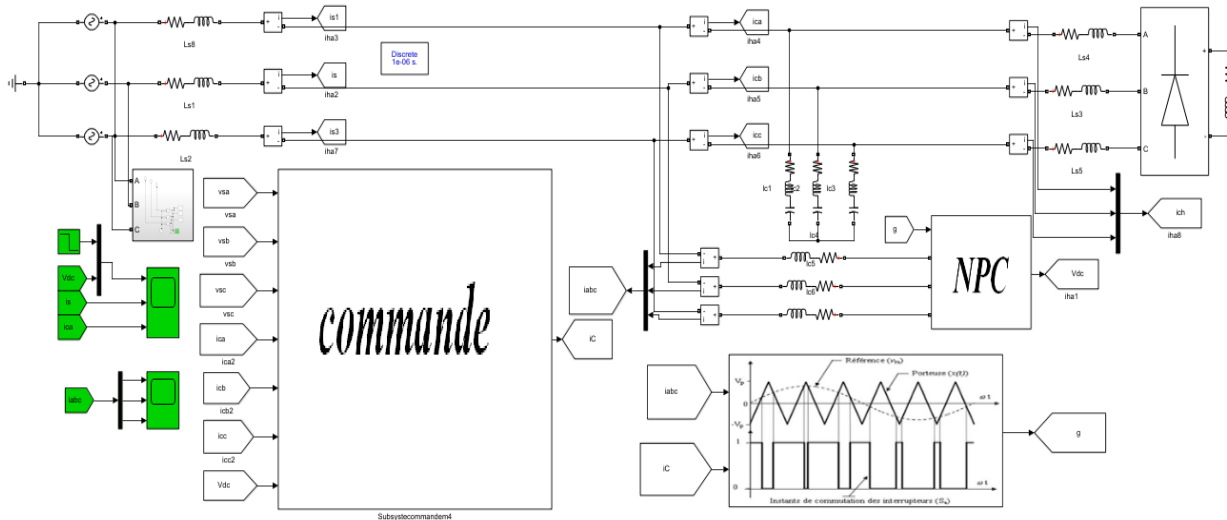
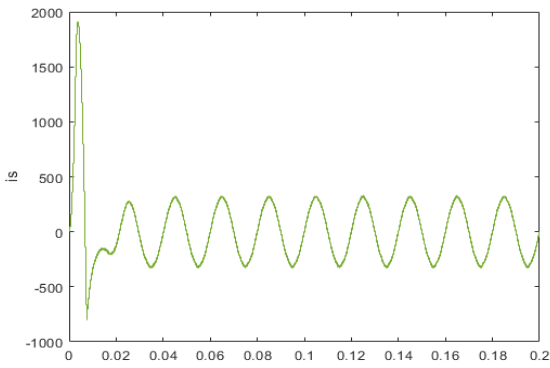


Figure 3.16 : Simulation du filtre passif éliminant la 5^{ème} harmonique et du FAPP type NPC utilisant commande p-q.

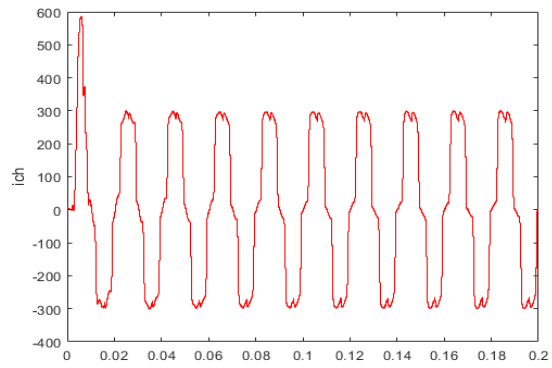
Remarque 1 : Sur la figure pour les autres topologies et/ou commande les deux seuls blocs qui changeront sont le block NPC et le bloc commande. C'est pour cela nous n'allons plus répéter le schéma.

Remarque 2 : Du fait que le FAPP à trois bras est placé après le filtre passif il faut savoir que les capteurs de courant qui permettent de détecter les harmoniques de courants sont eux placés entre le filtre passif et le FAPP à trois bras.

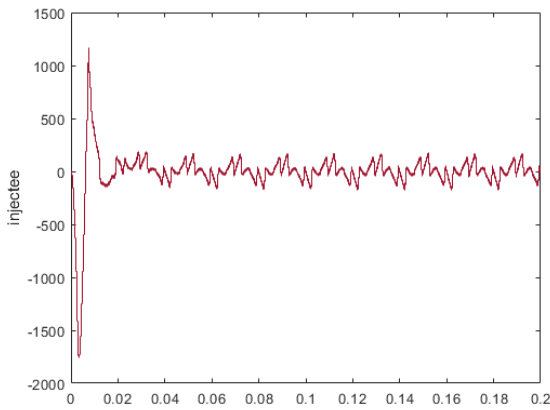
Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :



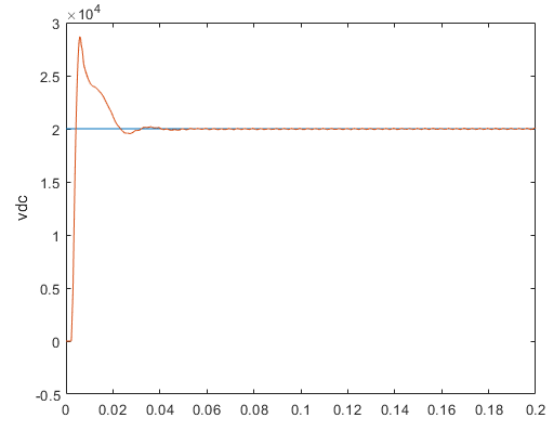
a) Courant de source après filtrage



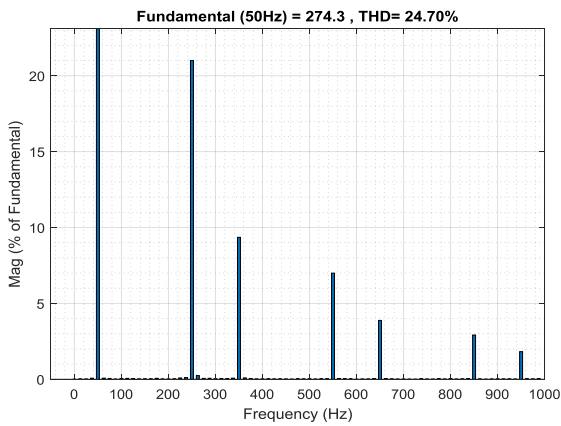
b) Courant charge avant filtrage



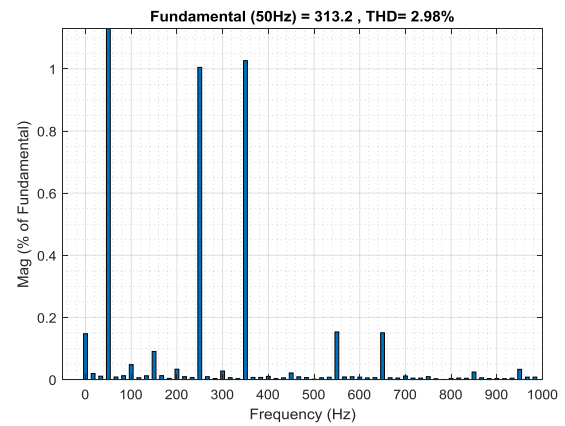
c) Courant injecté par le FAPP de type NPC



d) Tension V_{dc} du condensateur



e) Spectre harmonique du courant de charge



f) Spectre harmonique du courant de source

Figure 3.17 : Simulation du FAPP multi-niveaux type NPC utilisant la commande PQ.

3.2.2 Topologie FC utilisant la commande PQ

Maintenant nous allons remplacer la topologie NPC par une topologie dite FC, en utilisant toujours la commande PQ.

Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :

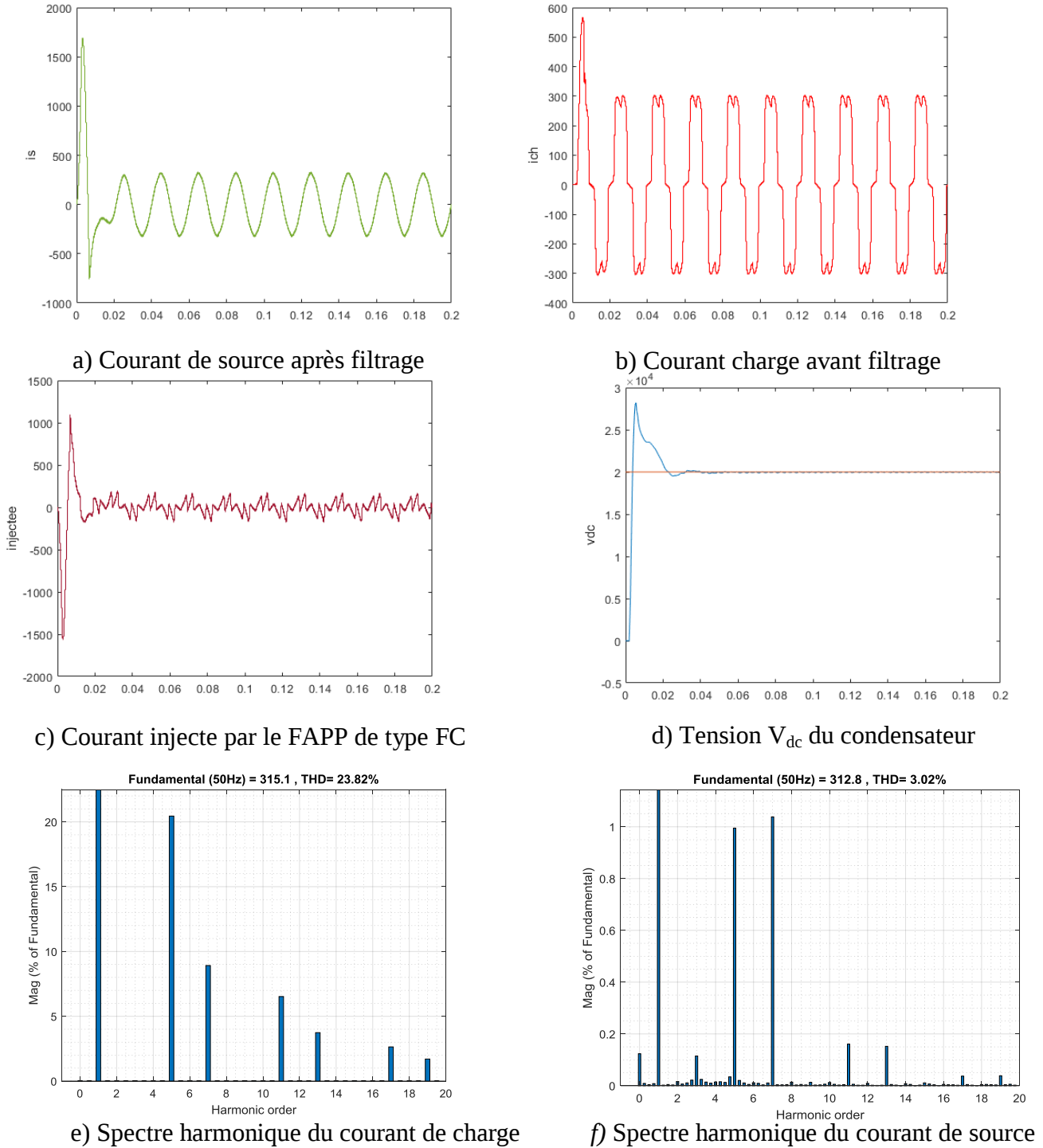
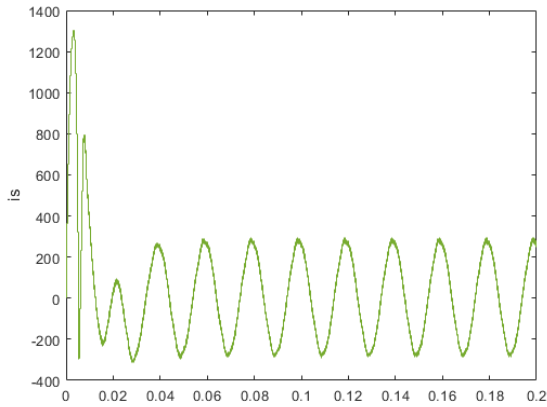


Figure 3.18: Simulation du FAPP Trois-niveaux type FC utilisant la commande PQ

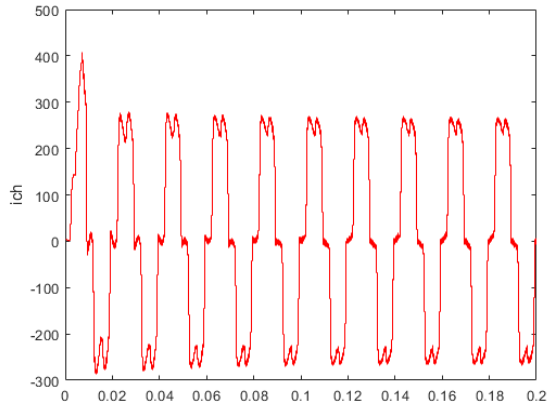
3.2.3 Topologie T-bridge utilisant la commande PQ

Maintenant nous allons remplacer la topologie FC par une topologie dite T-bridge, en utilisant toujours la commande PQ.

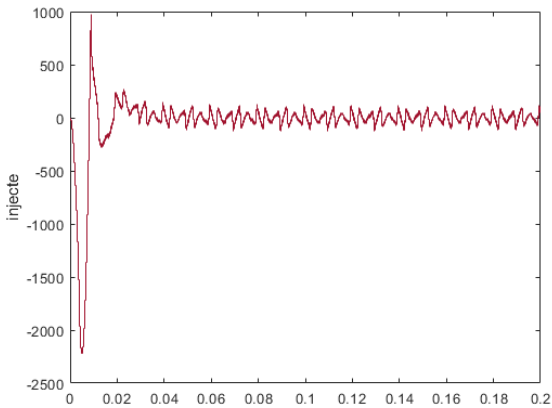
Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :



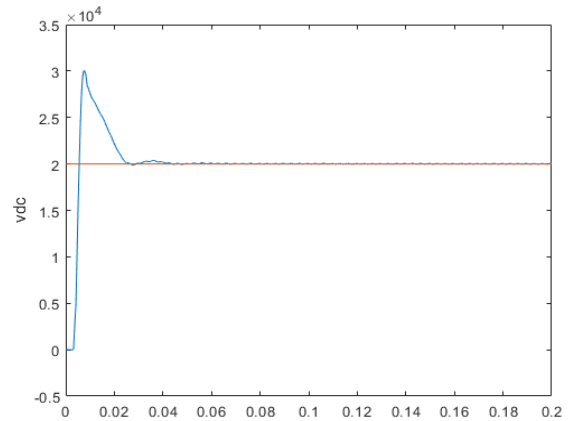
a) Courant de source après filtrage



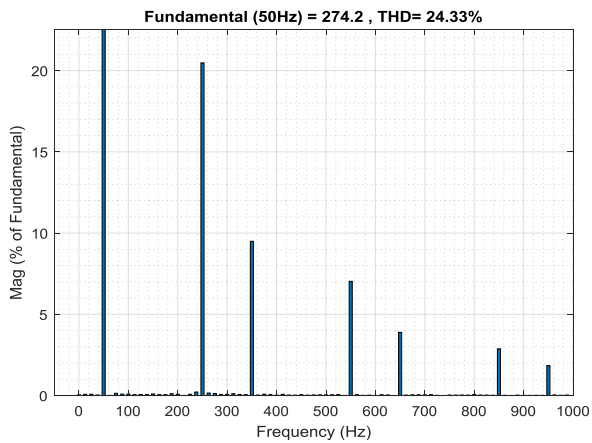
b) Courant charge avant filtrage



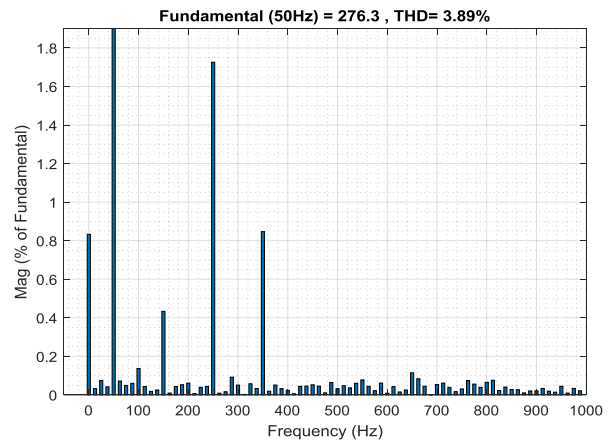
c) Courant injecté par le FAPP de type T-bridge



d) Tension V_{dc} du condensateur



e) Spectre harmonique du courant de charge



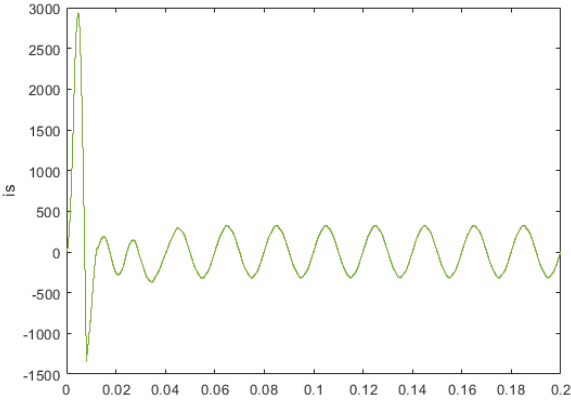
f) Spectre harmonique du courant de source

Figure 3.19: Simulation du FAPP Trois-niveaux type T-bridge utilisant la commande PQ

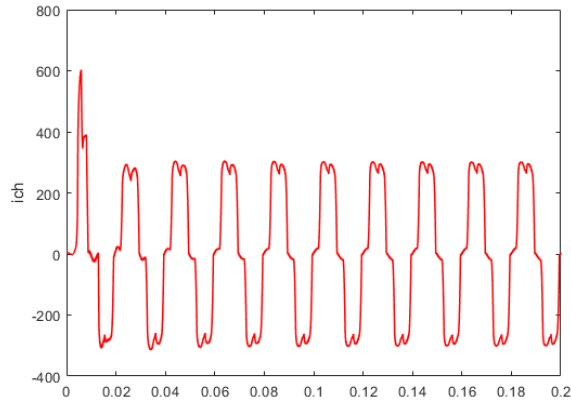
3.2.4 Topologie H-bridge utilisant la commande PQ

Maintenant nous allons remplacer la topologie T-bridge par une topologie dite H-bridge, en utilisant toujours la commande PQ.

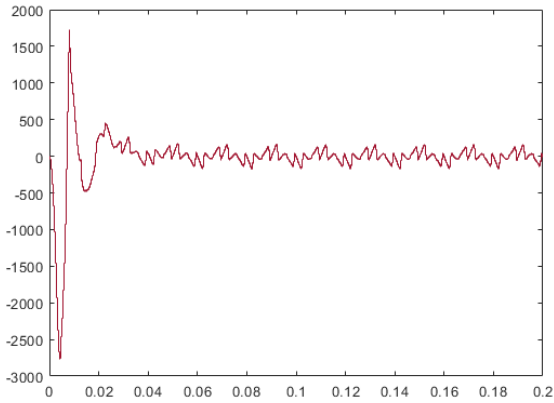
Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :



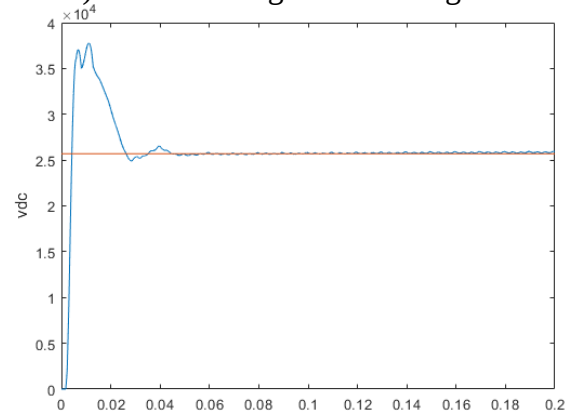
a) Courant de source après filtrage



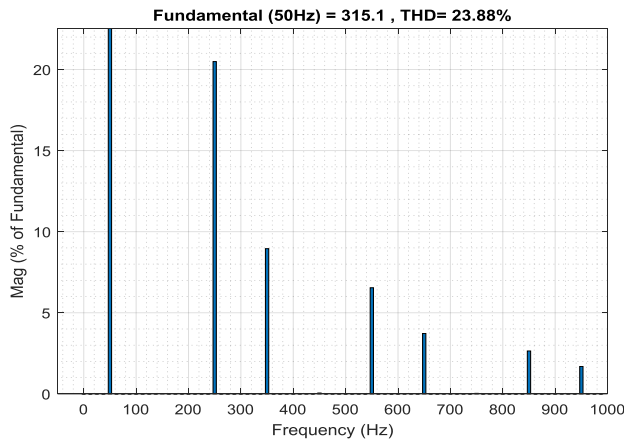
b) Courant charge avant filtrage



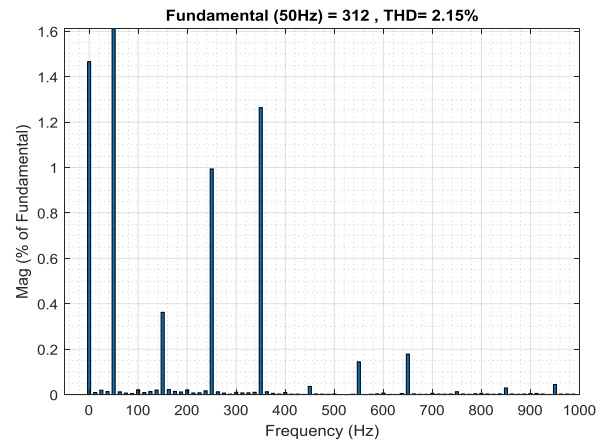
c) Courant injecté par le FAPP de type H-bridge



d) Tension V_{dc} du condensateur



e) Spectre harmonique du courant de charge



f) Spectre harmonique du courant de source

Figure 3.20 : Simulation du FAPP Trois-niveaux type H-bridge utilisant la commande PQ

Interprétation des résultats :

Dans le tableau (3.4) nous allons présenter les THD pour le courant de source avant et après filtrage pour les 4 topologies utilisant la commande PQ.

	Avant Filtrage I_c (courant de la charge)	Après Filtrage I_s (courant de la source)
NPC (Neutral Point Clamped)	24.70%	2.98%
FC (Flying Capaciter)	23.82%	3.02%
T-bridge	24.33%	3.89%
H-bridge	23.88%	2.15%

Tableau 3.4 : Quatre topologies de FAPP 3 niveaux (Avant et Après Filtrage)

Nous remarquons des simulations que le courant de source après filtrage est sinusoïdal et que la tension aux bornes du condensateur est constante. Nous remarquons également que le THD pour la topologie H-bridge donne le moins bon résultat que celui des autres topologies, à savoir 2.15%, ce qui est au-dessous de 5% qui est la norme CEI.

3.2.5 Topologie NPC utilisant la commande PQ incorporant deux FMV

Voici la commande proposer qui utilise deux filtres multi variable (FMV) et qui sera utiliser au début avec la topologie NPC.

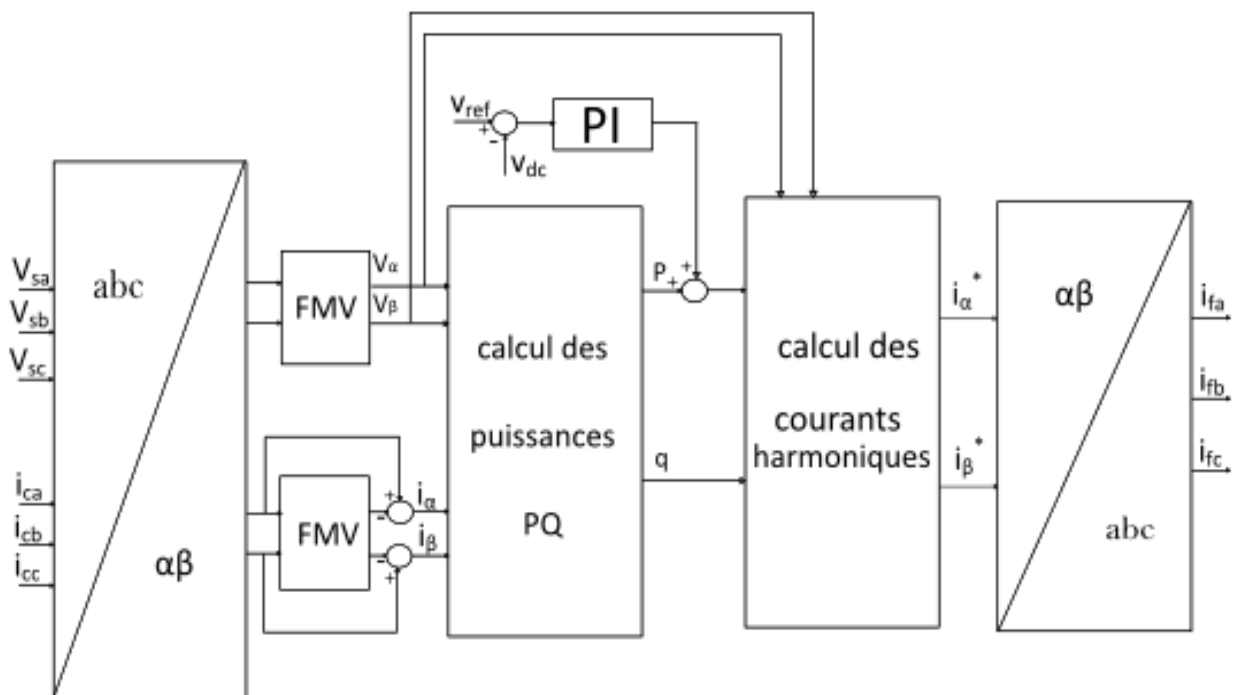


Figure 3.21 : Commande PQ utilisant deux FMV.

Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :

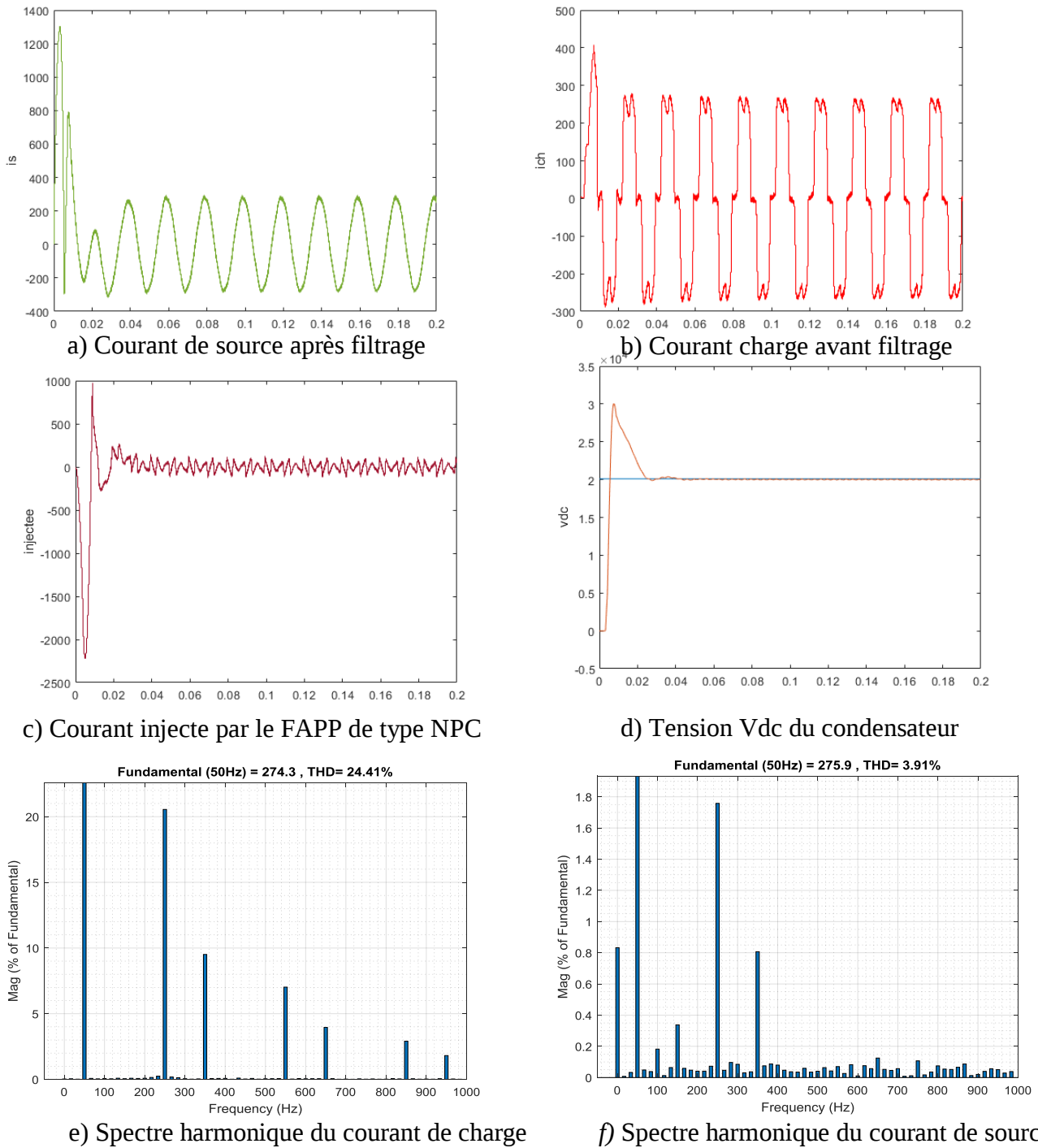
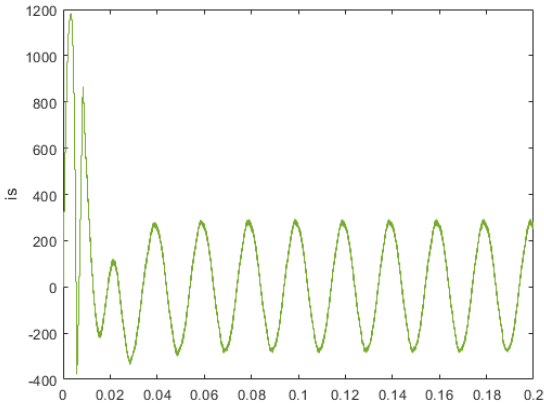


Figure 3.22 : Simulation du FAPP multi-niveaux type NPC utilisant la commande PQ utilisant deux FMV.

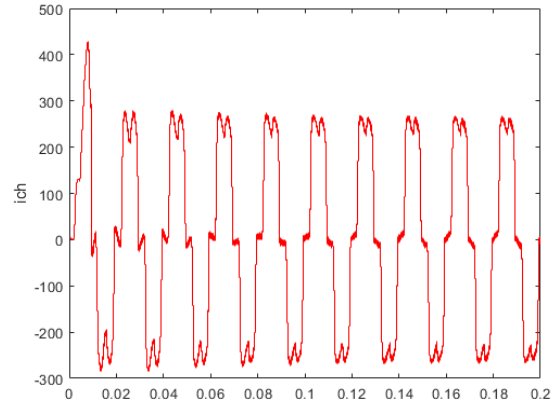
3.2.6 Topologie FC utilisant la commande PQ incorporant deux FMV

Maintenant nous allons remplacer la topologie NPC par une topologie dite FC, en utilisant toujours la commande PQ utilisant deux FMV.

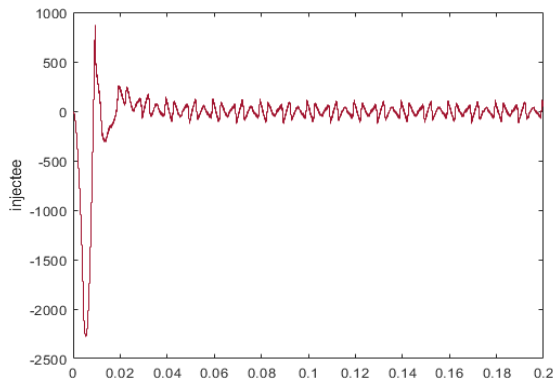
Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :



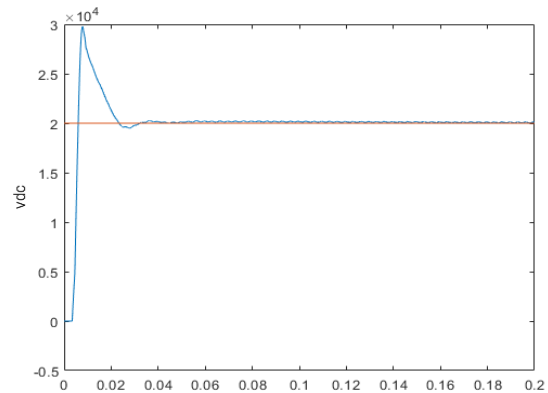
a) Courant de source après filtrage



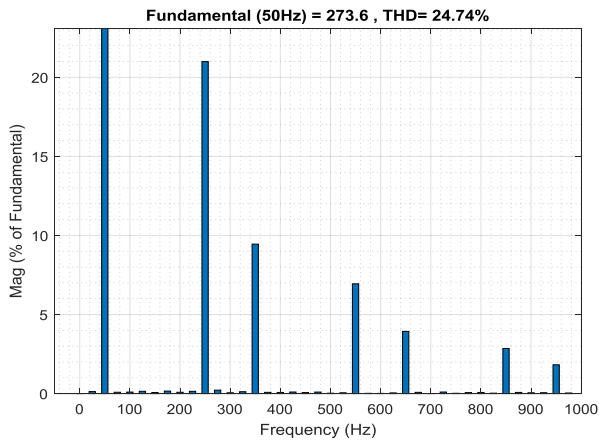
b) Courant charge avant filtrage



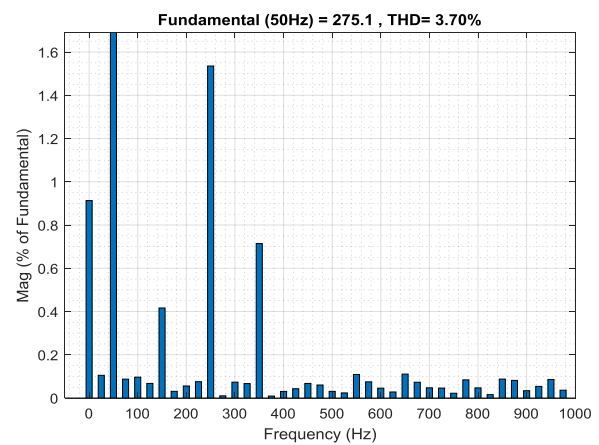
c) Courant injecté par le FAPP de type FC



d) Tension V_{dc} du condensateur



e) Spectre harmonique du courant de charge



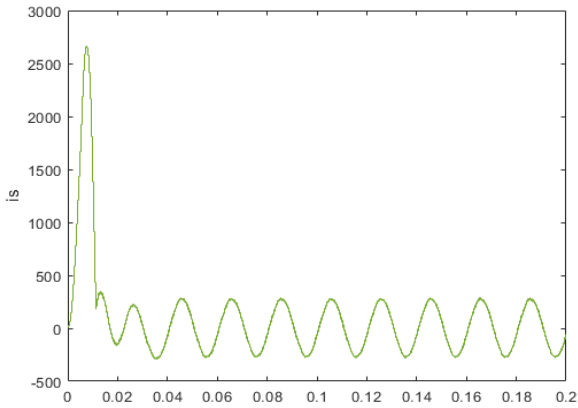
f) Spectre harmonique du courant de source

Figure 3.23 : Simulation du FAPP Trois-niveaux type FC utilisant la commande PQ utilisant deux FMV

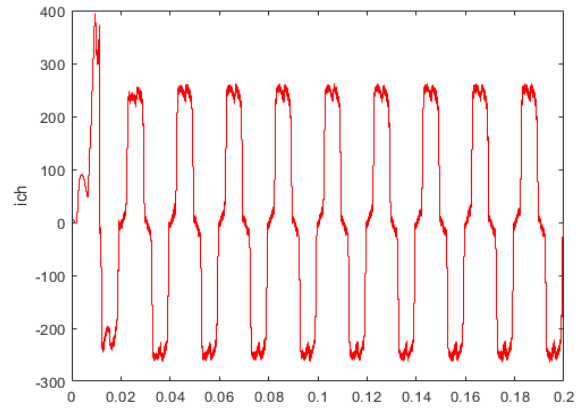
3.2.7 Topologie T-bridge utilisant la commande PQ incorporant deux FMV

Maintenant nous allons remplacer la topologie FC par une topologie dite T-bridge, en utilisant toujours la commande PQ utilisant deux FMV.

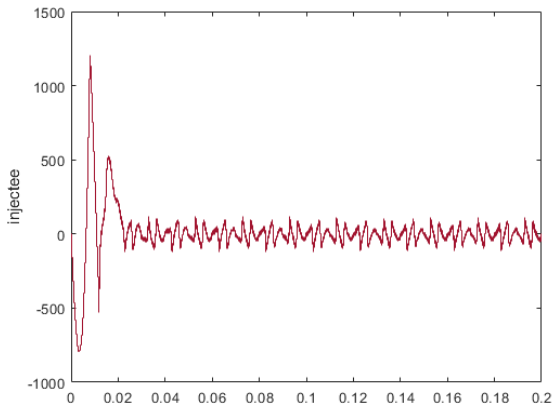
Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :



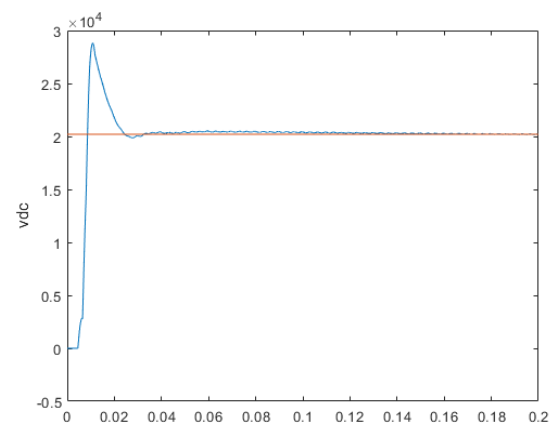
a) Courant de source après filtrage



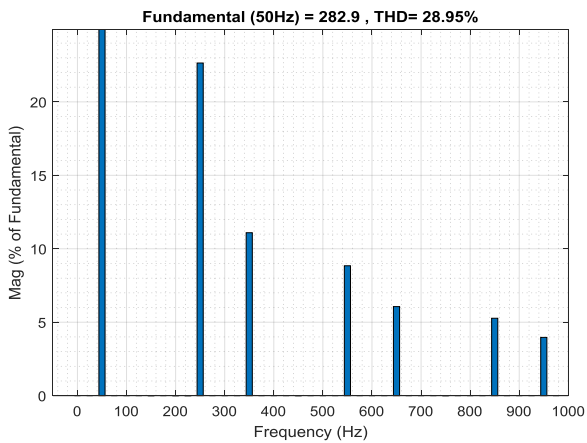
b) Courant charge avant filtrage



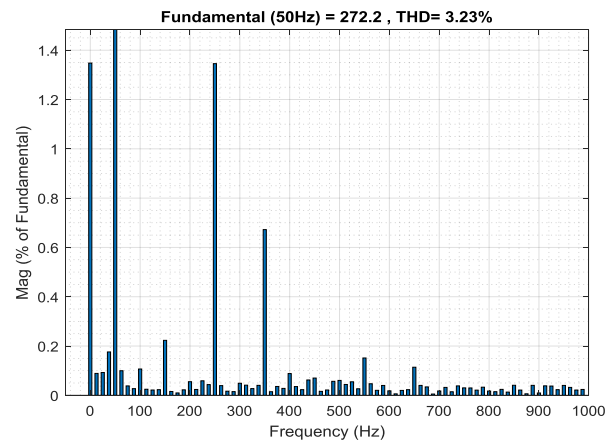
c) Courant injecté par le FAPP de type T-bridge



d) Tension V_{dc} du condensateur



e) Spectre harmonique du courant de charge



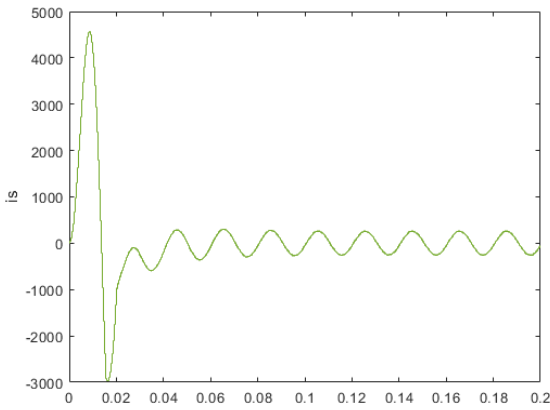
f) Spectre harmonique du courant de source

Figure 3.24 : Simulation du FAPP Trois-niveaux type T-bridge utilisant la commande PQ utilisant deux FMV

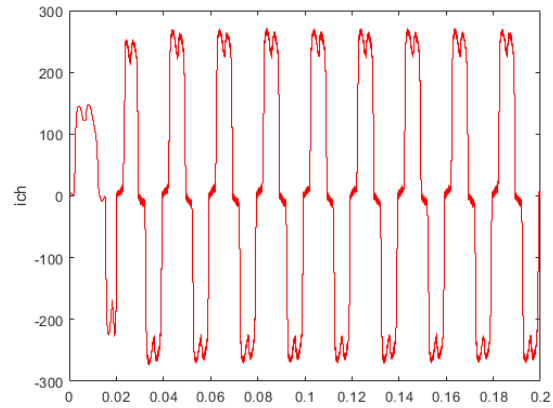
3.2.8 Topologie H-bridge utilisant la commande PQ incorporant deux FMV

Maintenant nous allons remplacer la topologie T-bridge par une topologie dite H-bridge, en utilisant toujours la commande PQ utilisant deux FMV.

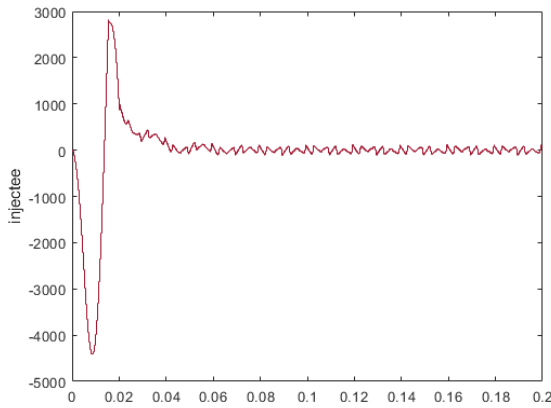
Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :



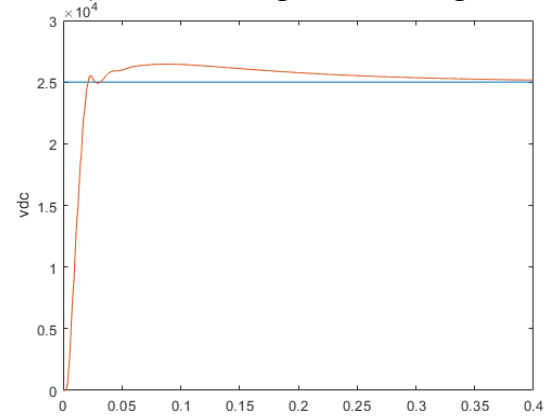
a) Courant de source après filtrage



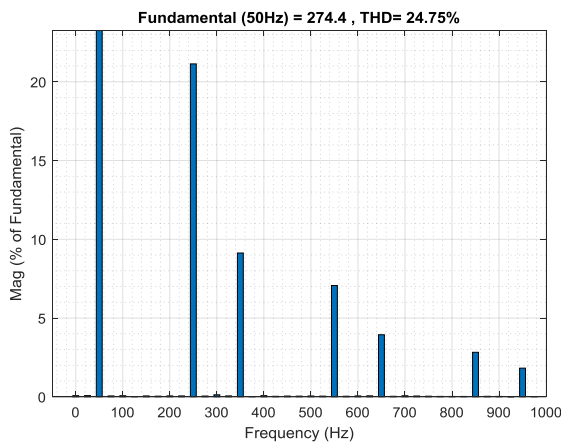
b) Courant charge avant filtrage



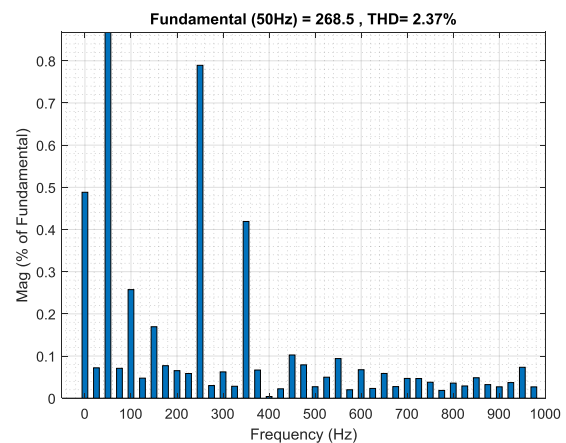
c) Courant injecte par le FAPP de type H-bridge



d) Tension V_{dc} du condensateur



e) Spectre harmonique du courant de charge



f) Spectre harmonique du courant de source

Figure 3.25: Simulation du FAPP Trois-niveaux type H-bridge utilisant la commande PQ utilisant deux FMV

Interprétation des résultats :

Dans le tableau (3.5) nous allons présenter les THD pour le courant de source avant et après filtrage pour les 4 topologies utilisant la commande PQ incluant deux FMV.

	Avant Filtrage I_c (courant de la charge)	Après Filtrage I_s (courant de la source)
NPC (Neutral Point Clamped)	24.41%	3.91%
FC (Flying Capaciter)	24.74%	3.70%
T-bridge	28.95%	3.23%
H-bridge	24.75%	2.37%

Tableau 3.5 : Quatre topologies de FAPP 3 niveaux (Avant et Après Filtrage)

Nous remarquons des simulations que le courant de source après filtrage est sinusoïdal et que la tension aux bornes du condensateur est constante. Nous remarquons également que le THD pour la topologie H bridge donne le meilleur résultat que celui des autres topologies, à savoir 2.37%. D'un autre coté nous remarquons que toutes les topologies respectent la norme CEI car inférieure à 5%.

3.2.9 Topologie NPC utilisant la commande de Fryze

Voici la stratégie de commande proposer qui utilise la théorie de Fryze

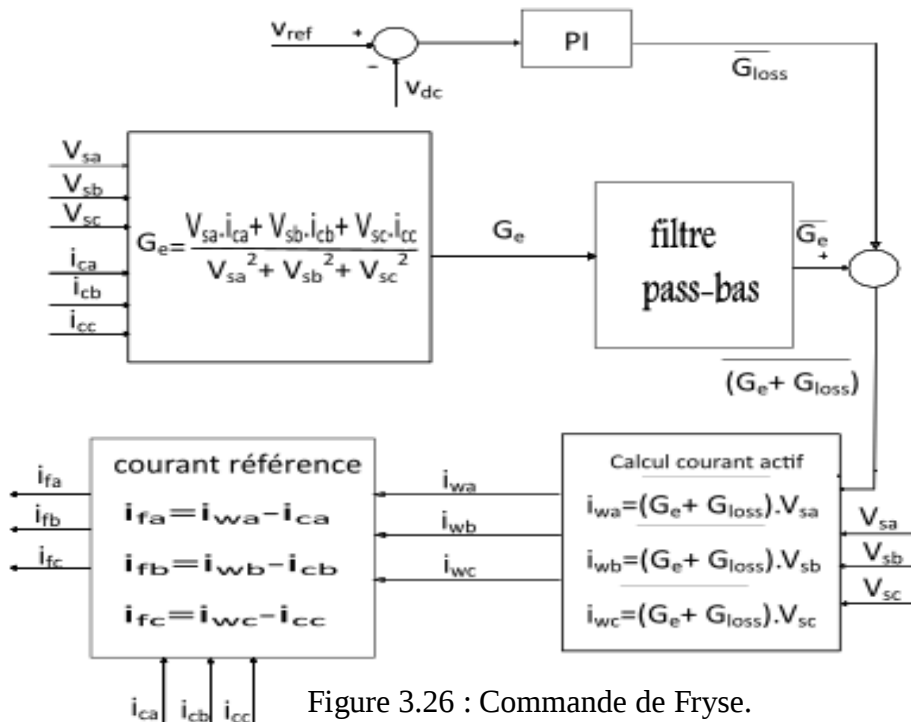
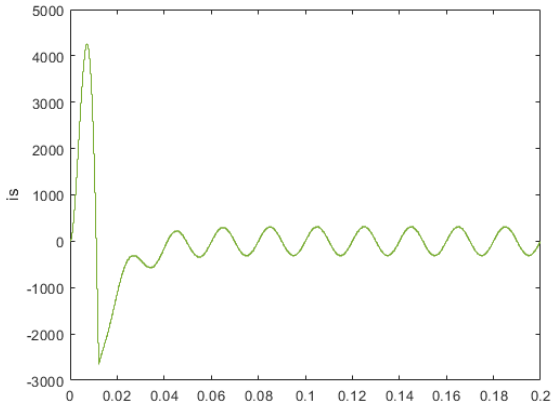
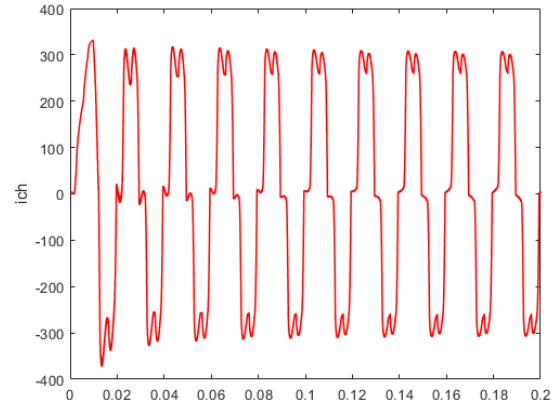


Figure 3.26 : Commande de Fryze.

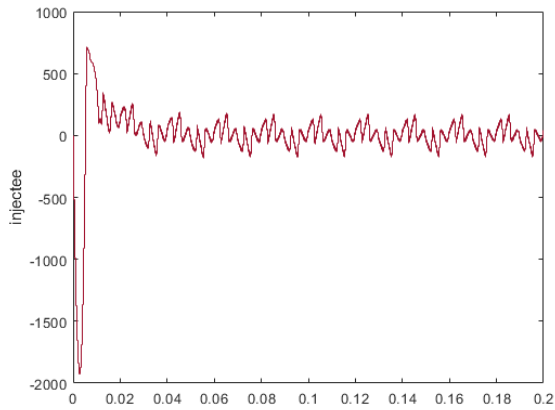
Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :



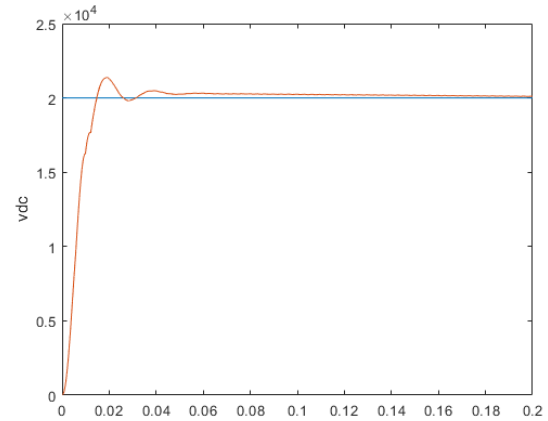
a) Courant de source après filtrage



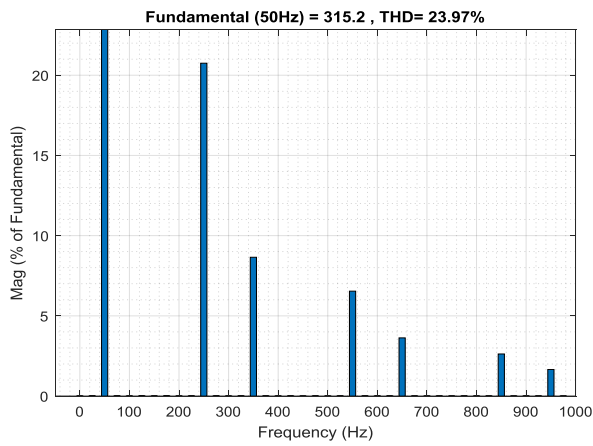
b) Courant charge avant filtrage



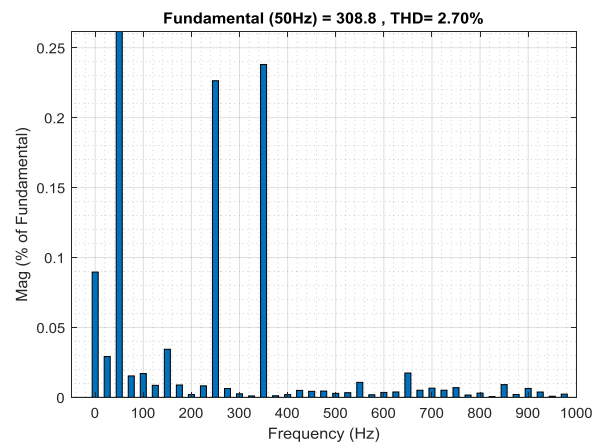
c) Courant injecté par le FAPP de type NPC



d) Tension V_{dc} du condensateur



e) Spectre harmonique du courant de charge



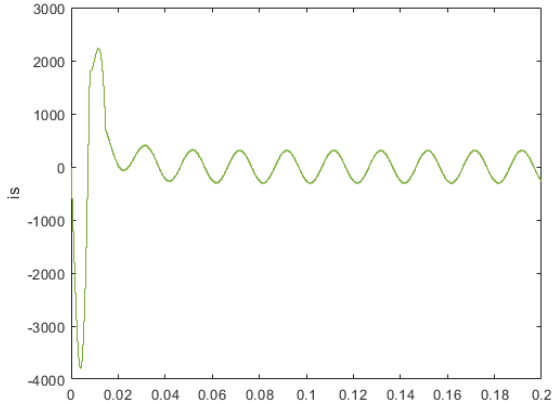
f) Spectre harmonique du courant de source

Figure 3.27 : Simulation du FAPP multi-niveaux type NPC utilisant la commande de Fryze.

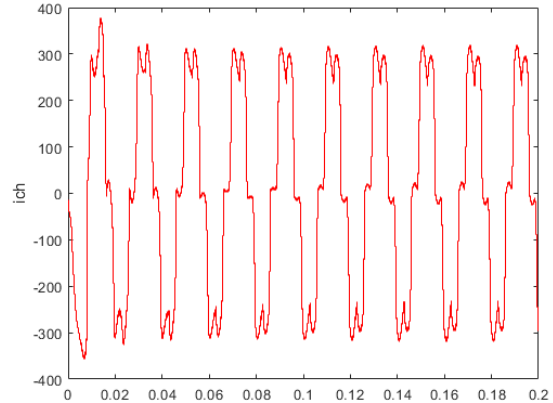
3.2.10 Topologie FC utilisant la commande de Fryze

Maintenant nous allons remplacer la topologie NPC par une topologie dite FC, en utilisant toujours la commande de Fryze.

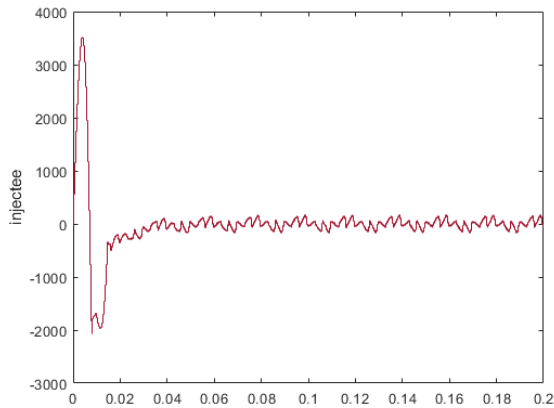
Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :



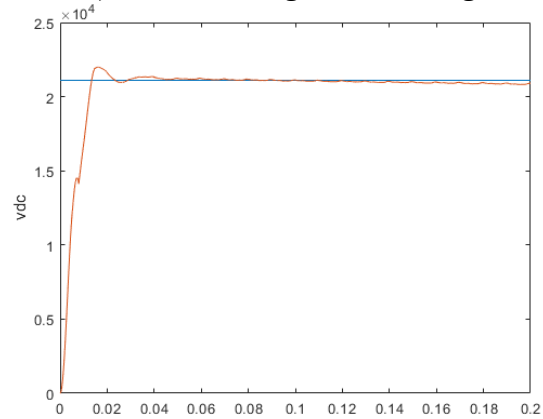
a) Courant de source après filtrage



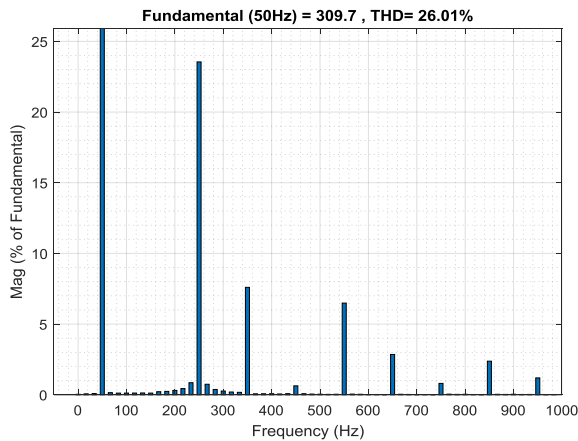
b) Courant charge avant filtrage



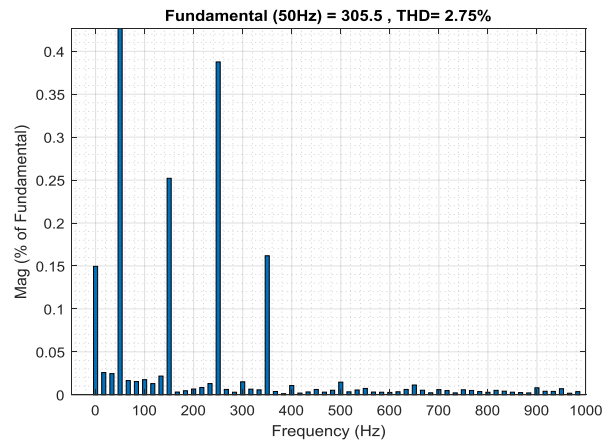
c) Courant injecté par le FAPP de type FC



d) Tension V_{dc} du condensateur



e) Spectre harmonique du courant de charge



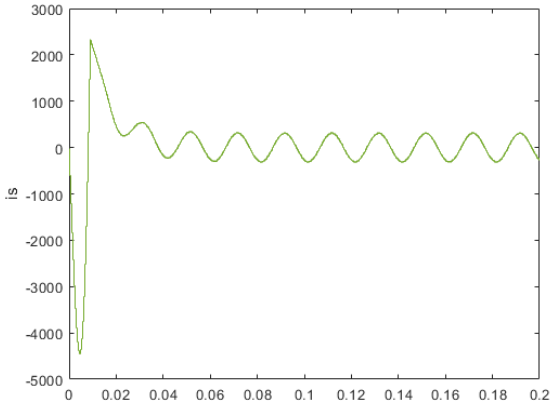
f) Spectre harmonique du courant de source

Figure 3.28 : Simulation du FAPP Trois-niveaux type FC utilisant la commande de Fryze

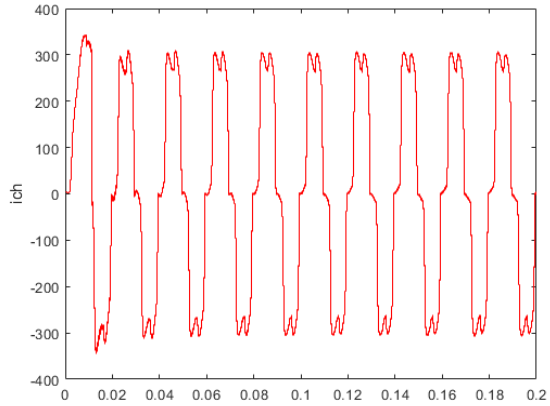
3.2.11 Topologie T-Bridge utilisant la commande de Fryze

Maintenant nous allons remplacer la topologie FC par une topologie dite T-bridge, en utilisant toujours la commande de Fryze.

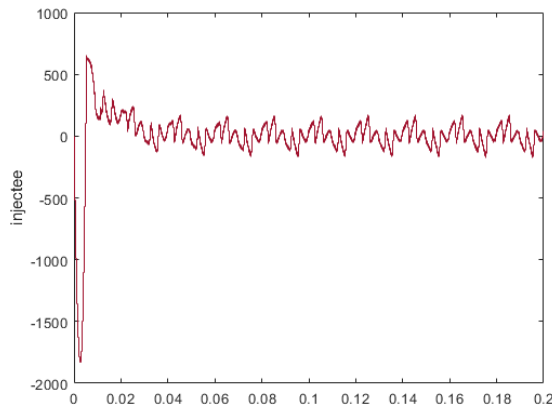
Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :



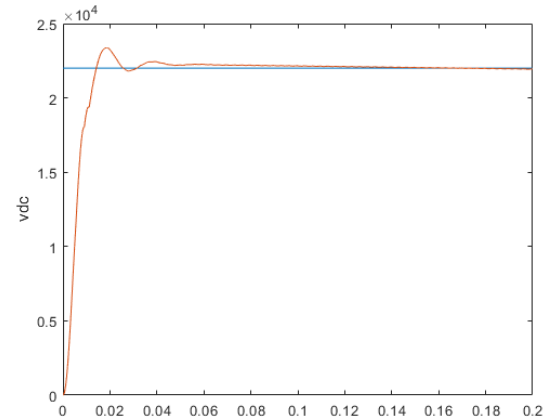
a) Courant de source après filtrage



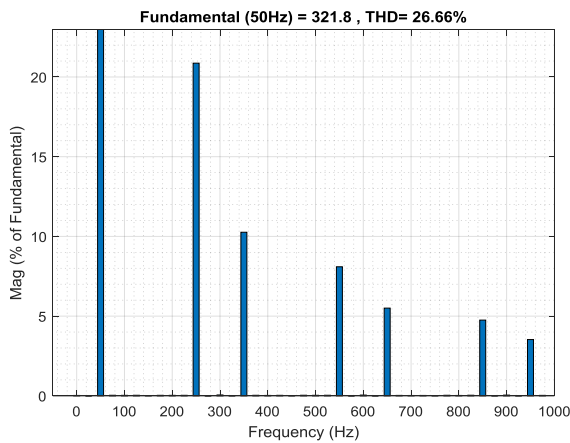
b) Courant charge avant filtrage



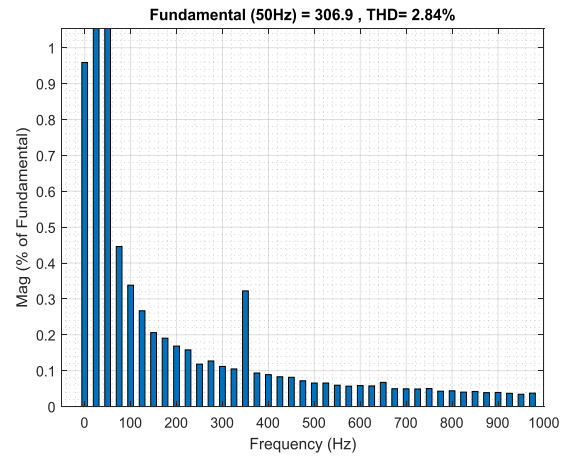
c) Courant injecté par le FAPP de type T-bridge



d) Tension V_{dc} du condensateur



e) Spectre harmonique du courant de charge



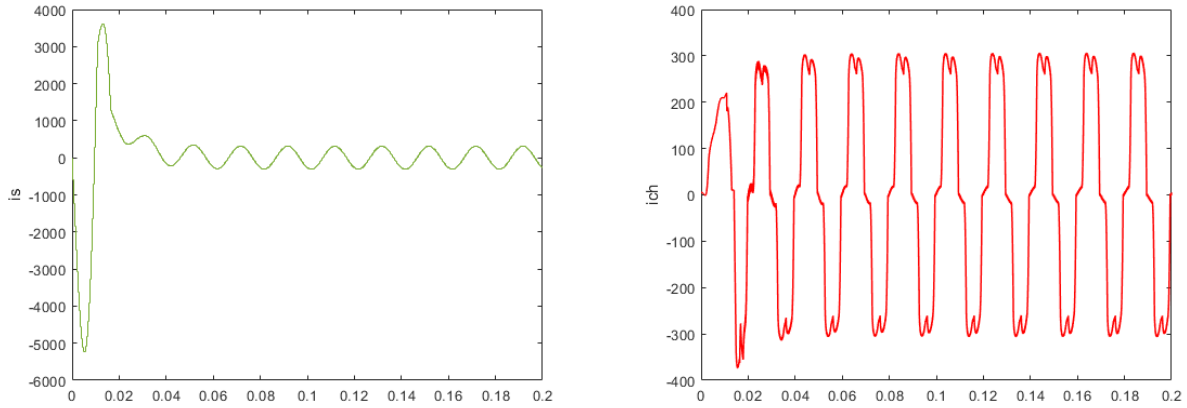
f) Spectre harmonique du courant de source

Figure 3.29 : Simulation du FAPP Trois-niveaux type T-bridge utilisant la commande de Fryze

3.2.12 Topologie H-bridge utilisant la commande de Fryze

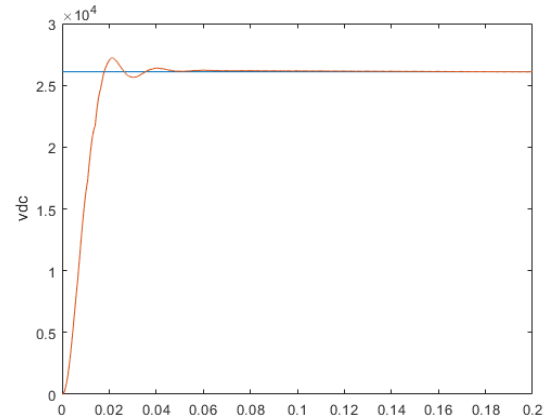
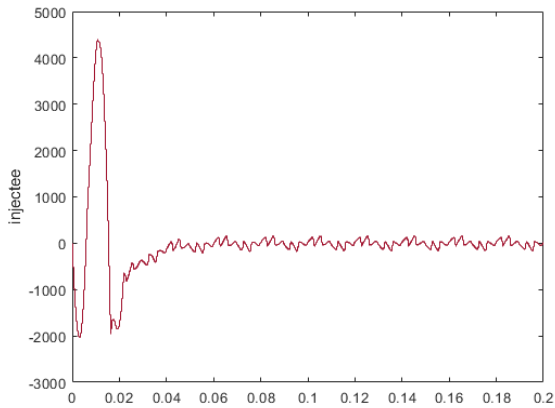
Maintenant nous allons remplacer la topologie T-bridge par une topologie dite H-bridge, en utilisant toujours la commande de Fryze.

Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :



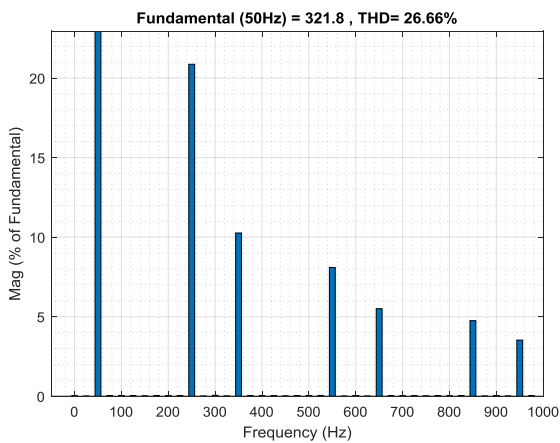
a) Courant de source après filtrage

b) Courant charge avant filtrage

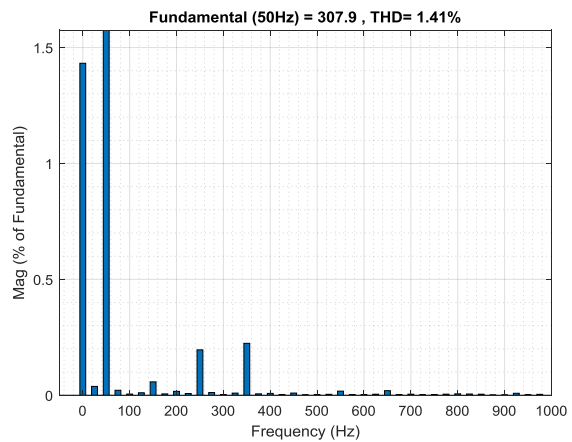


c) Courant injecté par le FAPP de type H-bridge

d) Tension V_{dc} du condensateur



e) Spectre harmonique du courant de charge



f) Spectre harmonique du courant de source

Figure 3.30 : Simulation du FAPP Trois-niveaux type H-bridge utilisant la commande de Fryze

Interprétation des résultats :

Dans le tableau (3.6) nous allons présenter les THD du courant de source avant et après filtrage pour les 4 topologies utilisant la commande de Fryze.

	Avant Filtrage I_c (courant de la charge)	Après Filtrage I_s (courant de la source)
NPC (Neutral Point Clamped)	23.97%	2.70%
FC (Flying Capaciter)	26.01%	2.75%
T-bridge	26.66%	2.84%
H-bridge	26.66%	1.41%

Tableau 3.6 : Quatre topologies de FAPP 3 niveaux (Avant et Après Filtrage)

Nous remarquons des simulations que le courant de source après filtrage est sinusoïdal et que la tension aux bornes du condensateur est constante. Nous remarquons également que le THD pour la topologie H bridge donne également le meilleur résultat par rapport aux autres topologies, à savoir 1.41%. De plus nous remarquons que le THD pour toutes les topologies est inférieur à 5%, ce qui permet de respecter la norme CEI. Nous remarquons également que la commande de Fryze quel que soit la topologie donne de meilleurs résultats que les autres stratégies de commande.

3.3 Résultat de Simulation des FAPP trois niveaux selon les topologies en utilisant les filtres passifs 5^{ième} et 7^{ième} en même temps

Nous allons dans cette partie montrer les résultats de simulation en utilisant uniquement la commande de Fryze utilisé par le FAP trois niveaux lorsque nous avons au réseau électrique deux filtres passifs qui sont branchés. Ensuite, du fait que nous avons également fait les simulations pour les autres stratégies de commandes, mais que nous n'allons pas les présenter, nous allons réaliser un tableau qui incorporera le THD pour chaque topologie et commande utiliser.

Soit le réseau électrique qui incorpore deux filtres passifs qui élimine la 5^{ième} et 7^{ième} harmonique et un FAPP 3 niveaux, comme le montre la figure suivante :

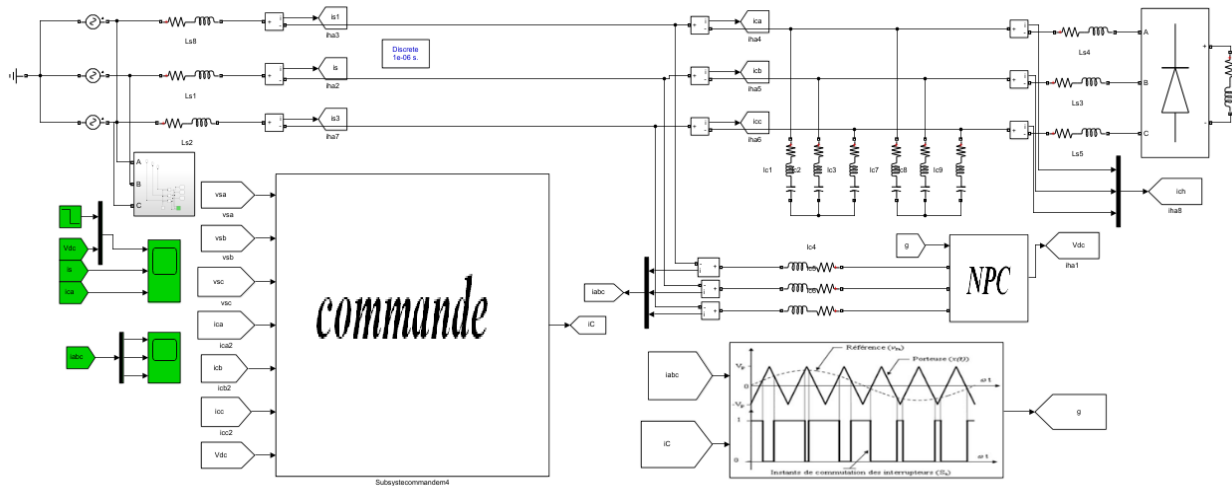
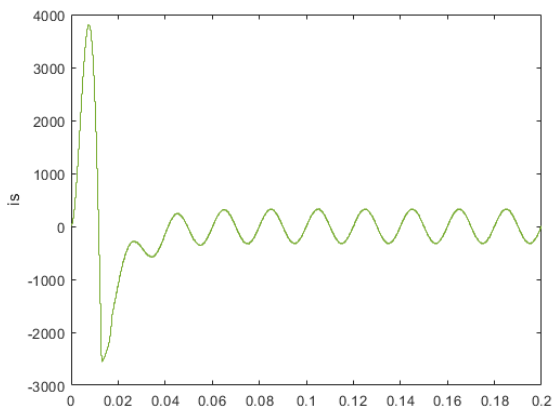


Figure 3.31 : Simulation du filtre passif éliminant la 5 et 7ème harmonique et du FAPP type NPC utilisant la commande Fryze

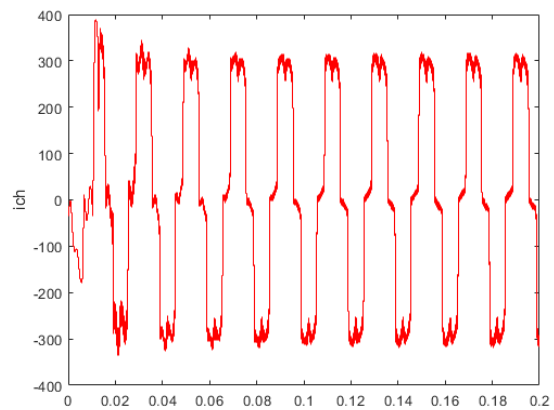
Les résultats de simulation pour ce système sont présentés ci-dessous.

3.3.1 Topologie NPC utilisant la commande de Fryze

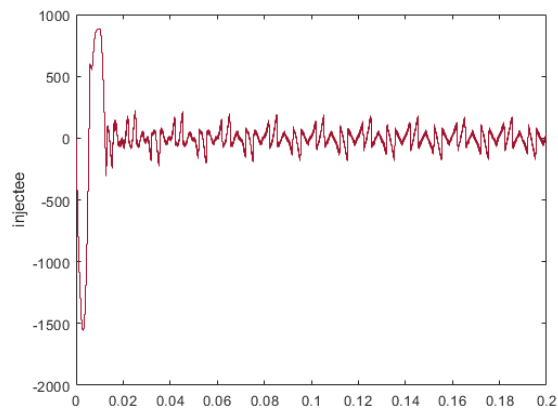
Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :



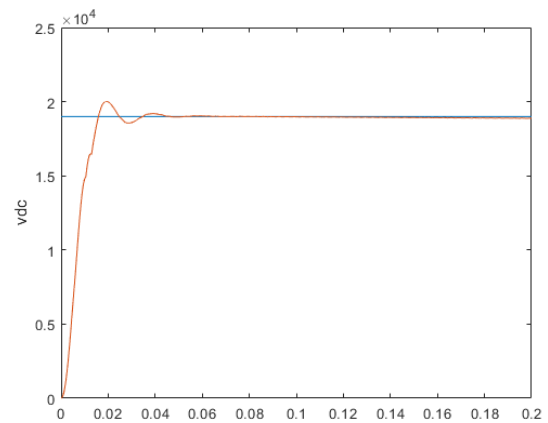
a) Courant de source après filtrage



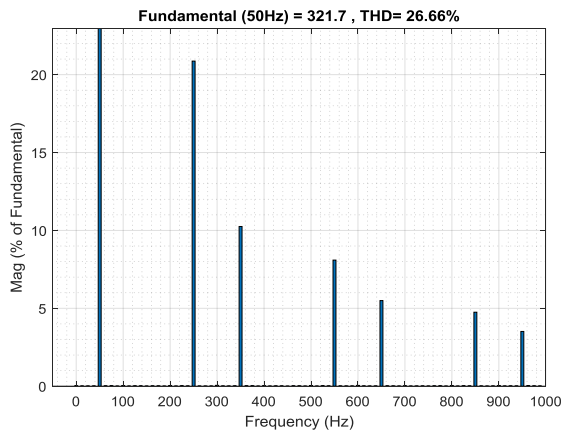
b) Courant charge avant filtrage



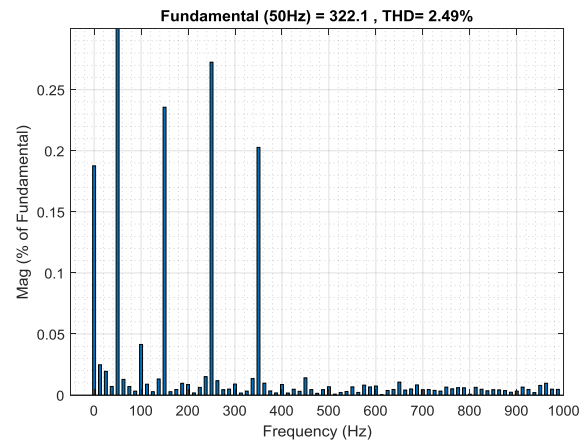
c) Courant injecté par le FAPP de type NPC



d) Tension V_{dc} du condensateur



e) Spectre harmonique du courant de charge



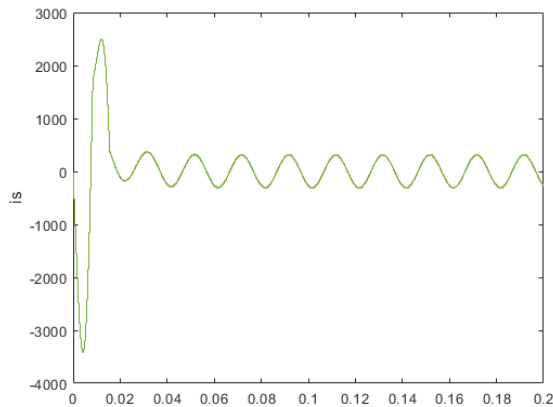
f) Spectre harmonique du courant de source

Figure 3.32 : Simulation du FAPP multi-niveaux type NPC utilisant la commande de Fryze.

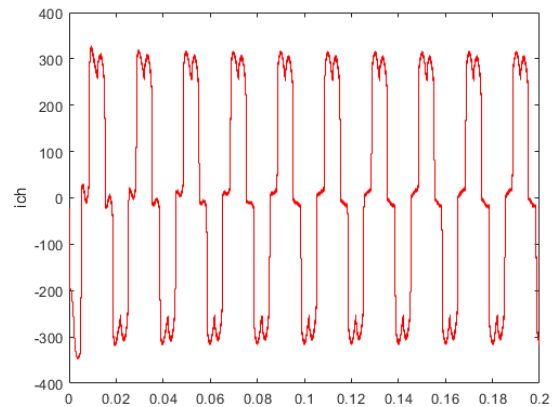
3.3.2 Topologie FC utilisant la commande de Fryze

Maintenant nous allons remplacer la topologie NPC par une topologie dite FC, en utilisant toujours la commande de Fryze.

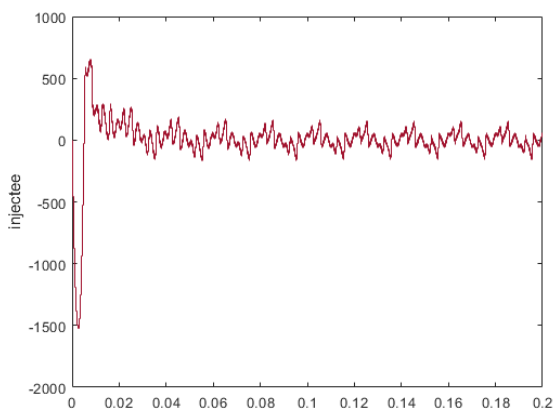
Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :



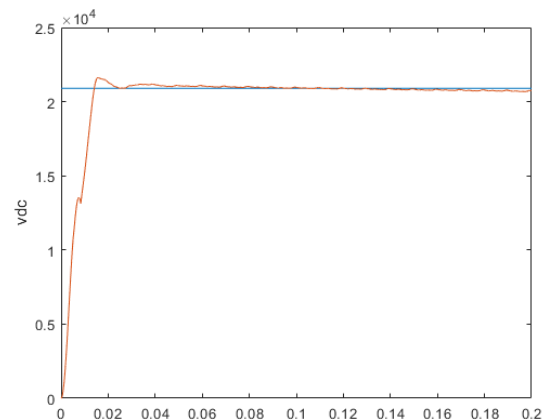
a) Courant de source après filtrage



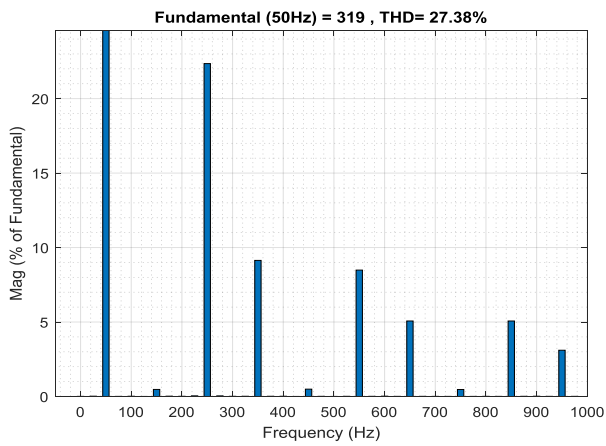
b) Courant charge avant filtrage



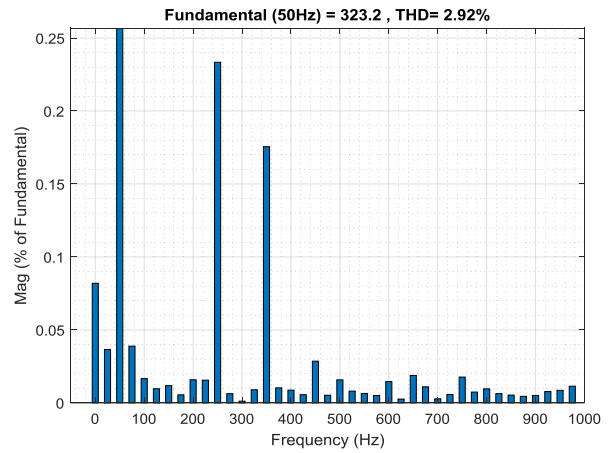
c) Courant injecté par le FAPP de type FC



d) Tension V_{dc} du condensateur



e) Spectre harmonique du courant de charge



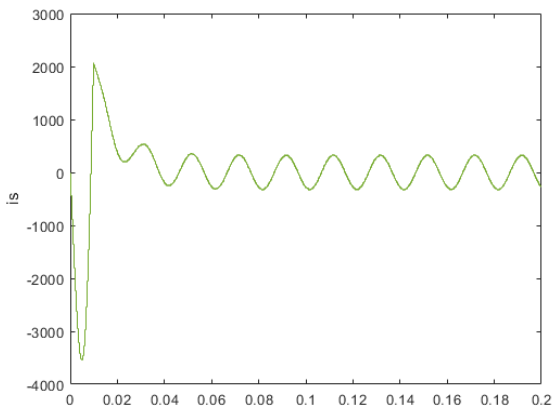
f) Spectre harmonique du courant de source

Figure 3.33 : Simulation du FAPP Trois-niveaux type FC utilisant la commande de Fryze

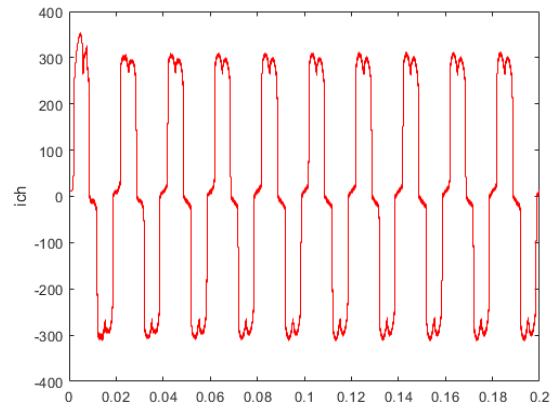
3.3.3 Topologie T-Bridge utilisant la commande de Fryze

Maintenant nous allons remplacer la topologie FC par une topologie dite T-bridge, en utilisant toujours la commande de Fryze.

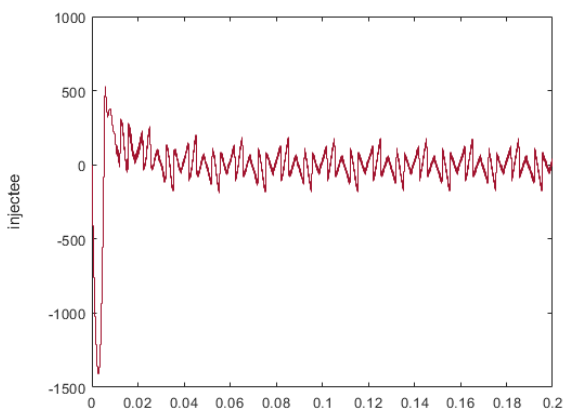
Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :



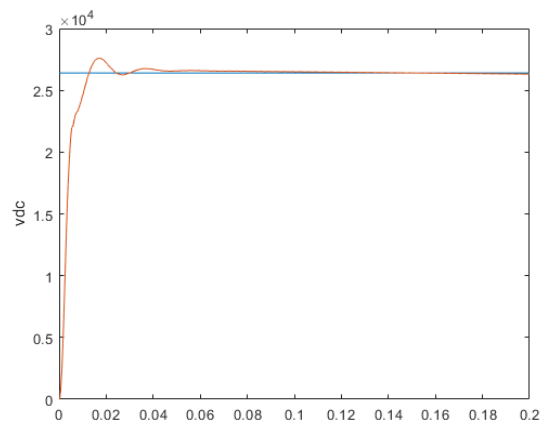
a) Courant de source après filtrage



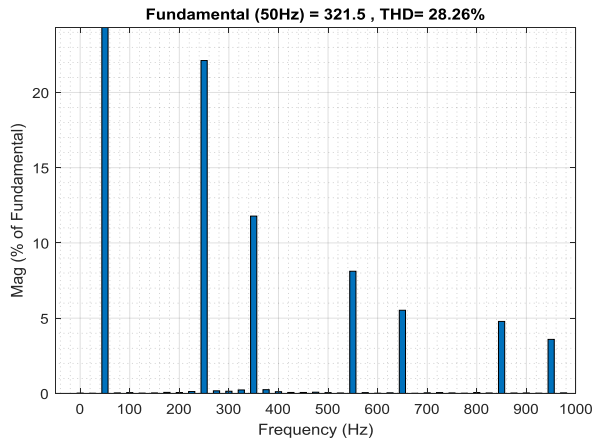
b) Courant charge avant filtrage



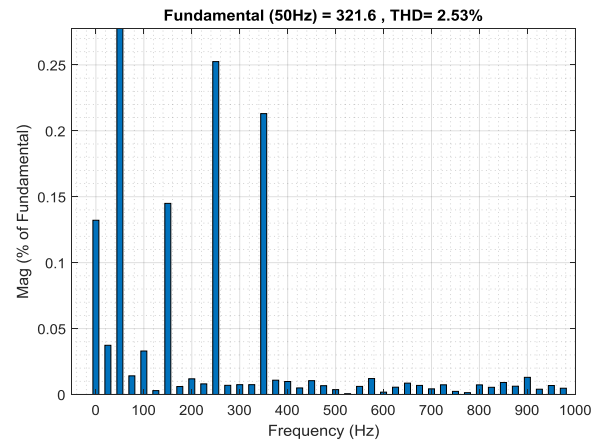
c) Courant injecté par le FAPP de type T-bridge



d) Tension V_{dc} du condensateur



e) Spectre harmonique du courant de charge



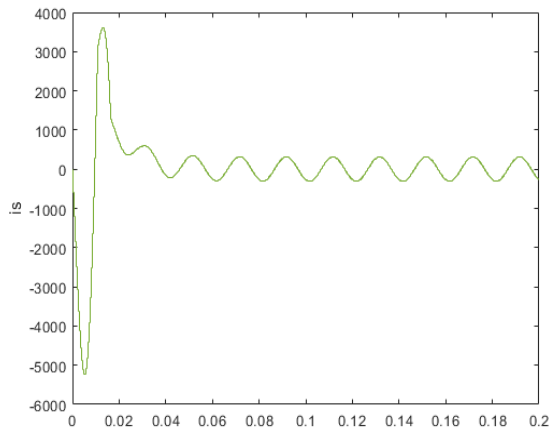
f) Spectre harmonique du courant de source

Figure 3.34 : Simulation du FAPP Trois-niveaux type T-bridge utilisant la commande de Fryze

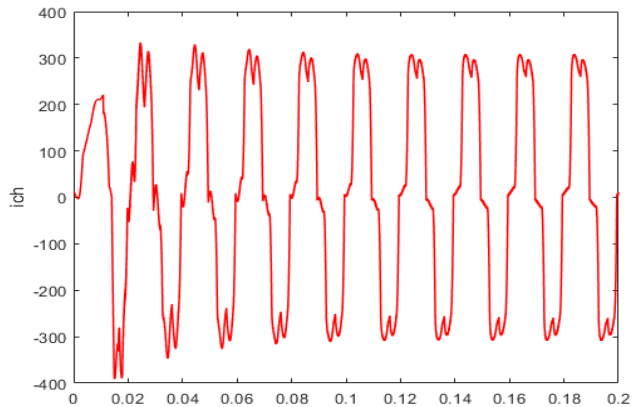
3.3.4 Topologie H-bridge utilisant la commande de Fryze

Nous allons remplacer la topologie T-bridge par une topologie dite H-bridge, en utilisant toujours la commande de Fryze.

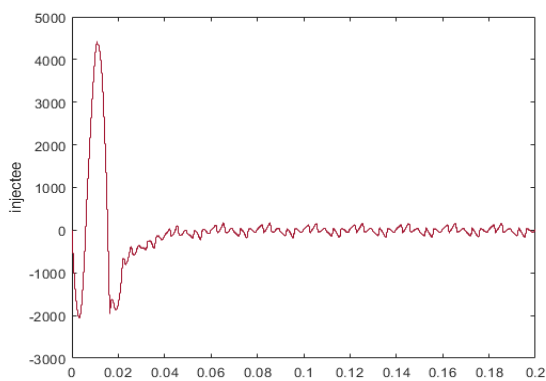
Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :



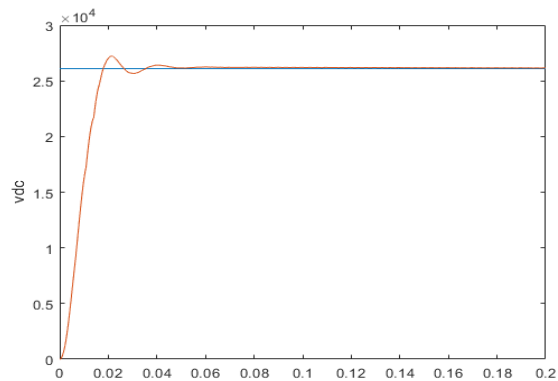
a) Courant de source après filtrage



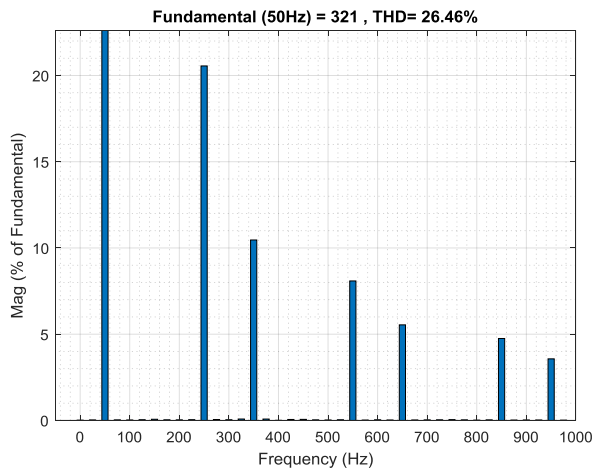
b) Courant charge avant filtrage



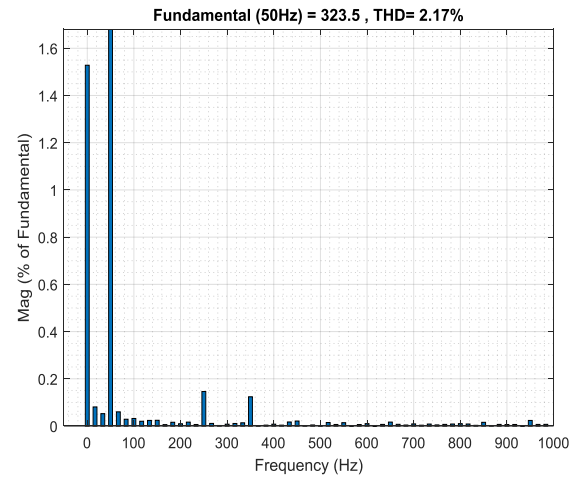
c) Courant injecté par le FAPP de type H-bridge



d) Tension V_{dc} du condensateur



e) Spectre harmonique du courant de charge



f) Spectre harmonique du courant de source

Figure 3.35 : Simulation du FAPP Trois-niveaux type H-bridge utilisant la commande de Fryze

Interprétation des résultats :

Dans le tableau (3.7) nous allons présenter les THD pour le courant de source avant et après filtrage pour les 4 topologies utilisant la commande de Fryze.

	Avant Filtrage I_c (courant de la charge)	Après Filtrage I_s (courant de la source)
NPC (Neutral Point Clamped)	26.66%	2.49%
FC (Flying Capaciter)	27.38%	2.92%
T-bridge	28.26%	2.53%
H-bridge	26.46%	2.17%

Tableau 3.7 : Quatre topologies de FAPP 3 niveaux (Avant et Après Filtrage)

Nous remarquons des simulations que le courant de source après filtrage est sinusoïdal et que la tension aux bornes du condensateur est constante. Nous remarquons également que le THD pour la topologie H bridge donne de meilleurs résultats que celui des autres topologies, à savoir 2.17%. De plus nous remarquons que le THD pour toutes les topologies est inférieur à 5%, ce qui permet de respecter la norme CEI.

Le tableau suivant montre le THD pour différente topologie et stratégie de commande de FAPP trois niveaux lorsque nous avons en plus dans le réseau électrique deux filtres passifs, pour éliminer la 5^{ième} et la 7^{ième} harmonique, qui sont toujours placé avant le FAPP trois niveaux.

	Avant Filtrage I_c (courant de la charge)	Après Filtrage I_s (courant de la source)
NPC - Commande PQ	27.13%	2.65%
FC - Commande PQ	27.13%	2.67
T-bridge - Commande PQ	26.86%	3.17%
H-bridge - Commande PQ	27.03%	1.73%
NPC - Commande PQ utilisant deux FMV	25.07%	3.46%
FC - Commande PQ utilisant deux FMV	25.92%	3.53%
T-bridge - Commande PQ utilisant deux FMV	24.35%	2.97%
H-bridge - Commande PQ utilisant deux FMV	26.06	2.38%
NPC – commande de Fryze	26.66%	2.49%
FC - commande de Fryze	27.38%	2.92%
T-bridge - commande de Fryze	28.26%	2.53%
H-bridge - commande de Fryze	26.46%	2.17%

Tableau 3.8 : Quatre topologies de FAPP 3 niveaux (Avant et Après Filtrage)

Nous remarquons de ce tableau que quel que soit la topologie utilisé et/ou la stratégie de commande utilisé nous avons toujours un THD qui est inférieur à 5%. Nous remarquons également que le THD après filtrage du H-bridge donne les meilleurs résultats.

3.4 Simulation du FAPP trois niveaux placé avant le filtre passif parallèle

Nous proposons cette fois ci de placé le FAPP trois niveaux avant le filtre passif, comme l'illustre la figure suivante :

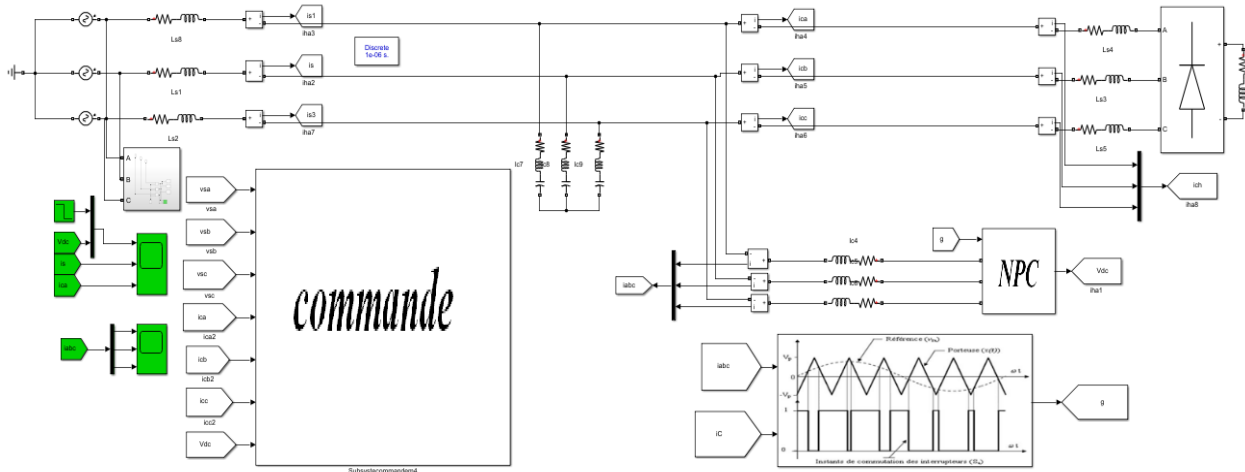


Figure 3.36 : Simulation du filtre passif parallèle éliminant la 5ième harmonique et du FAPP trois niveau placé avant le filtre passif.

La commande que nous proposons cette fois ci est comme suite. Cette commande basée sur la commande PQ utilisant deux filtre multi-variables incorpore une partie qui permet de ne pas détecter l'harmonique 5, comme le montre la figure suivante, car le filtre passif c'est lui qui l'éliminera.

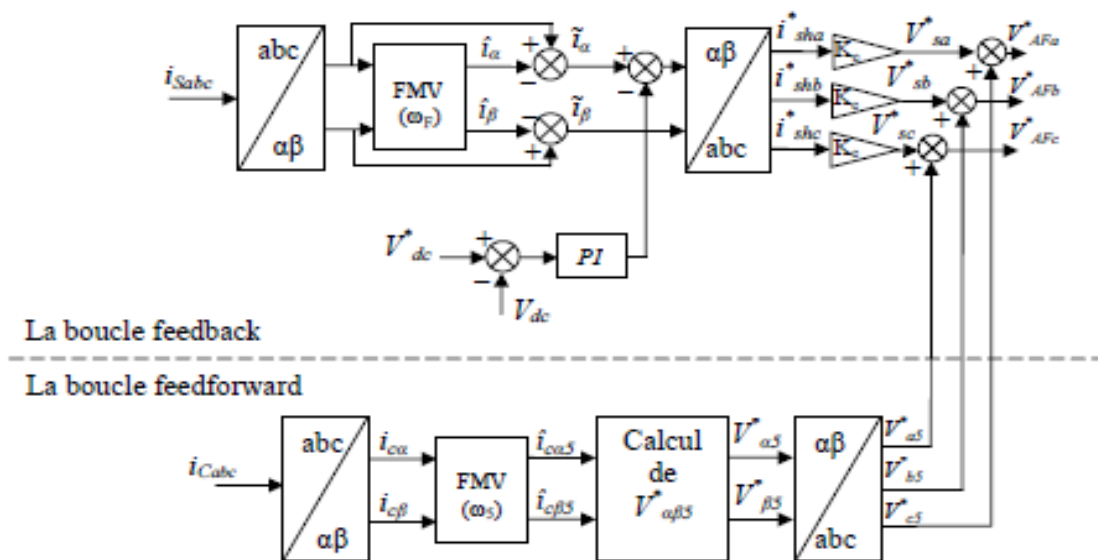
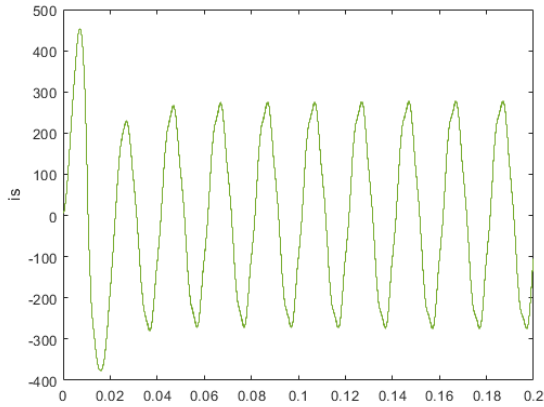


Figure3.37 : Schéma de contrôle du filtre passif parallèle

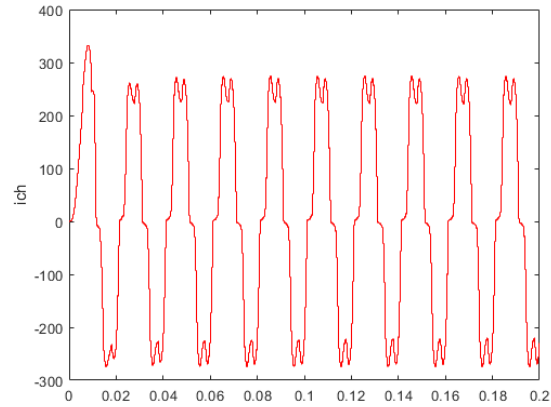
Les résultats de simulation de ce type de commande sont illustrés ci-dessous.

3.4.1 Topologie NPC utilisant la commande PQ incluant deux FMV

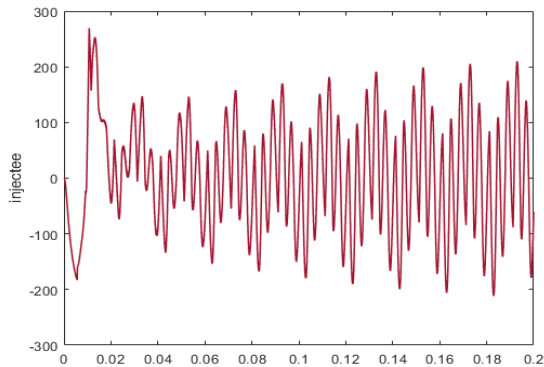
Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :



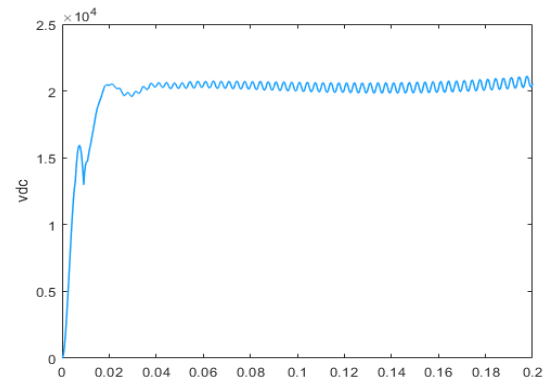
a) Courant de source après filtrage



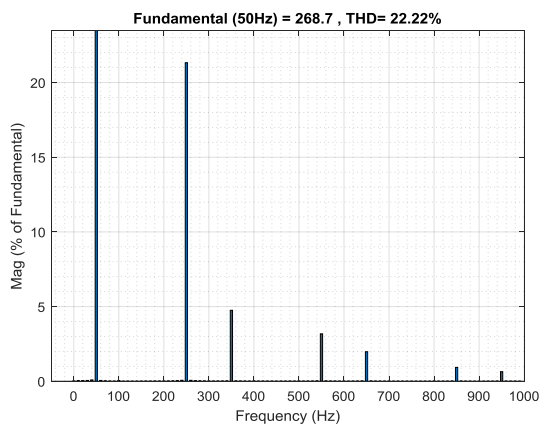
b) Courant charge avant filtrage



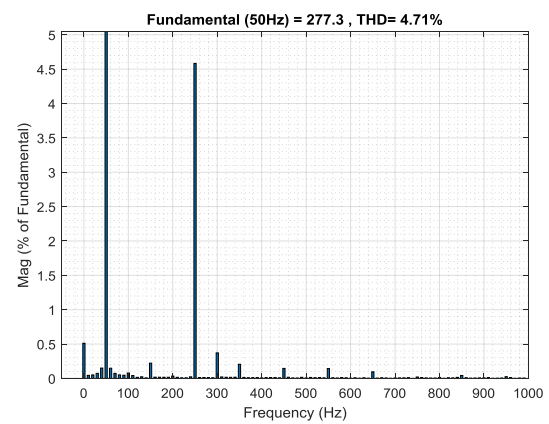
c) Courant injecté par le FAPP de type H-bridge



d) Tension V_{dc} du condensateur



e) Spectre harmonique du courant de charge



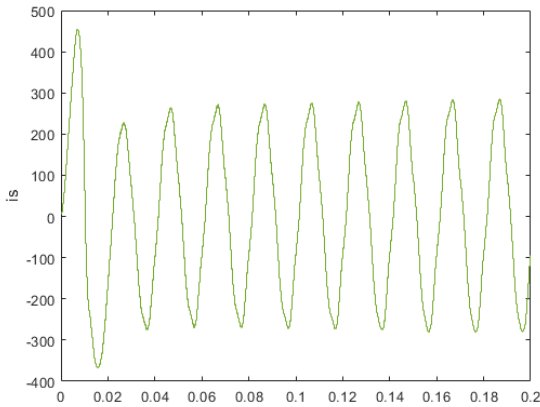
f) Spectre harmonique du courant de source

Figure 3.38 : Simulation du FAPP multi-niveaux type NPC utilisant la commande PQ utilisant deux FMV.

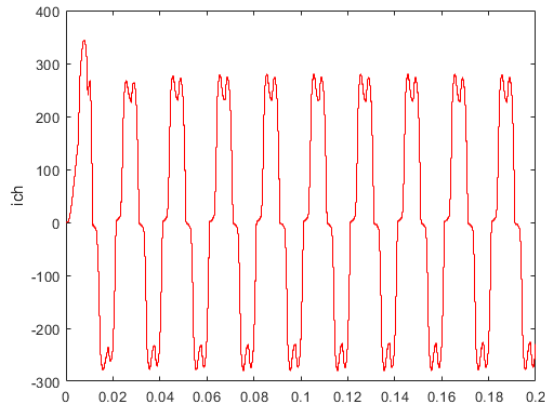
3.4.2 Topologie FC utilisant la commande PQ incluant deux FMV

Maintenant nous allons remplacer la topologie NPC par une topologie dite FC, en utilisant toujours la même commande.

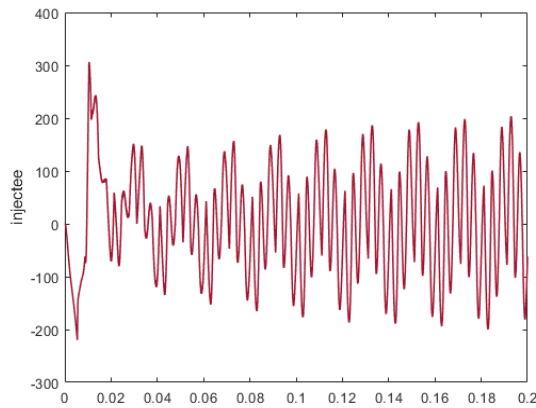
Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :



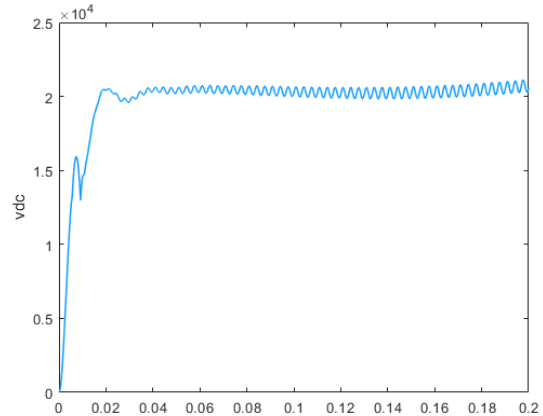
a) Courant de source après filtrage



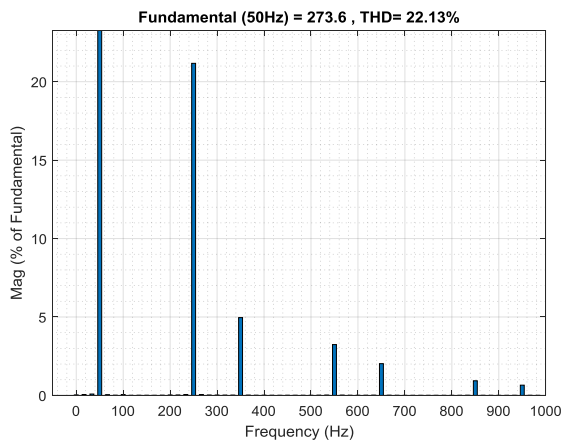
b) Courant charge avant filtrage



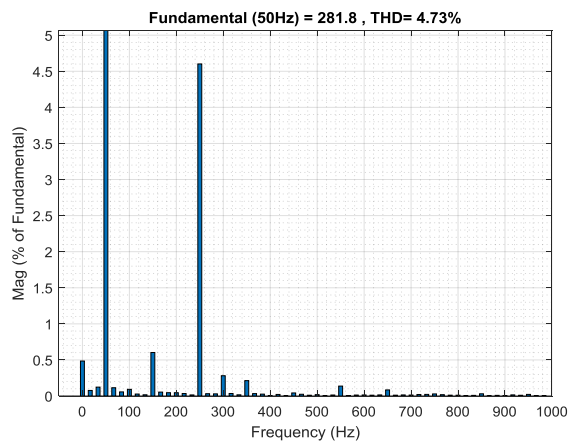
c) Courant injecté par le FAPP de type H-bridge



d) Tension V_{dc} du condensateur



e) Spectre harmonique du courant de charge



f) Spectre harmonique du courant de source

Figure 3.39 : Simulation du FAPP multi-niveaux type FC utilisant la commande PQ utilisant deux FMV.

3.4.3 Topologie T-bridge utilisant la commande PQ incluant deux FMV

Maintenant nous allons remplacer la topologie FC par une topologie dite T-bridge, en utilisant toujours la même commande. Les résultats de simulation pour cette topologie sont comme suite :

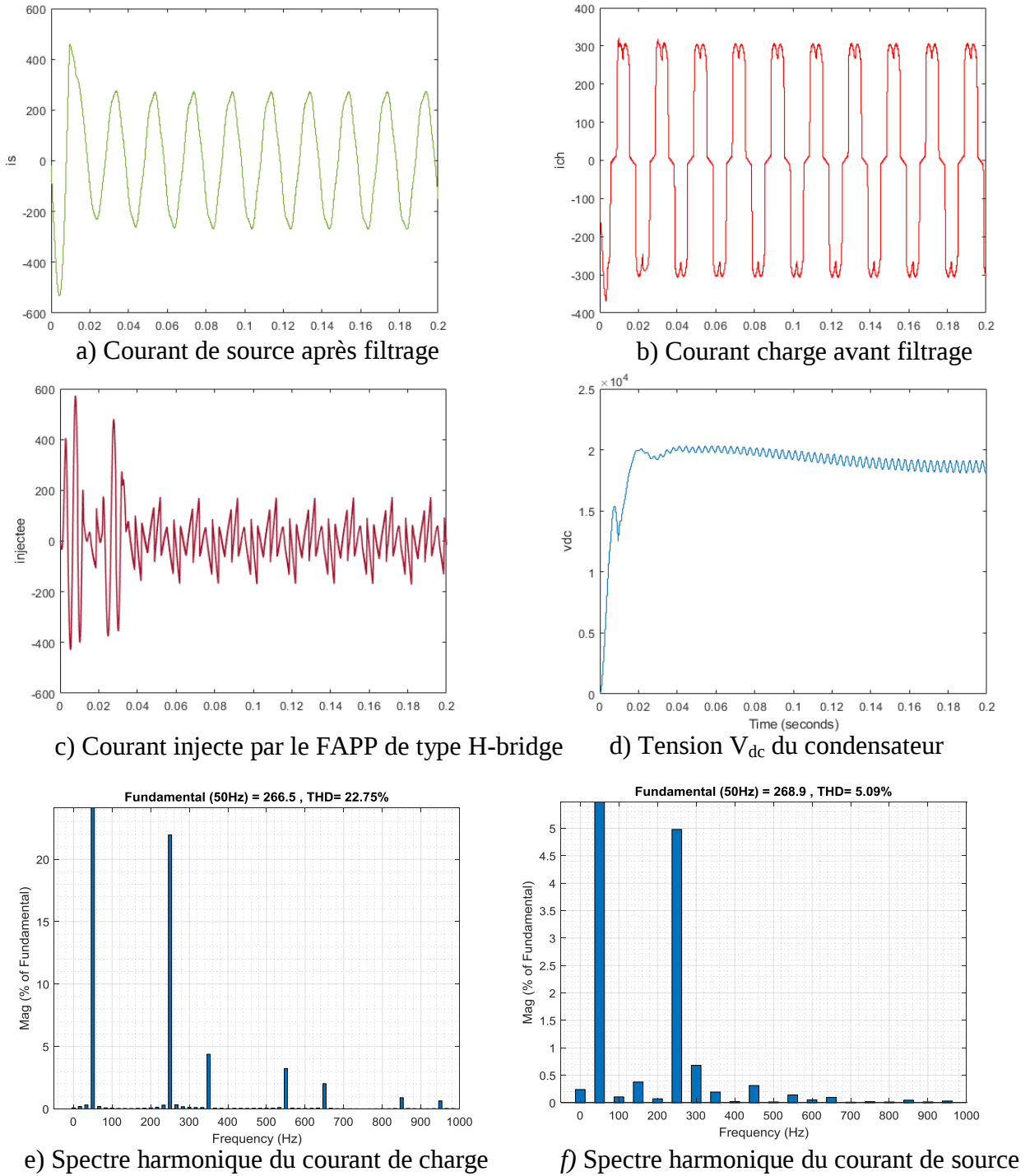


Figure 3.40: Simulation du FAPP multi-niveaux type T-bridge utilisant la commande PQ utilisant deux FMV.

Interprétation des résultats :

Dans le tableau (3.8) nous allons présenter les THD pour le courant de source avant et après filtrage pour les 3 topologies utilisant la commande PQ utilisant deux filtre FMV.

	Avant Filtrage I_c (courant de la charge)	Après Filtrage I_s (courant de la source)
NPC (Neutral Point Clamped)	22.22%	4.71%
FC (Flying Capacitor)	22.13%	4.73%
T-bridge	22.75%	5.09%

Tableau 3.9 : Trois topologies de FAPP 3 niveaux (Avant et Après Filtrage)

Nous remarquons des simulations que le courant de source après filtrage est sinusoïdal et que la tension aux bornes du condensateur est constante. Nous remarquons également que le THD pour la topologie NPC donne de meilleurs résultats que celui des autres topologies, à savoir 4.71%. De plus nous remarquons que le THD pour toutes les topologies est inférieur à 5%, ce qui permet de respecter la norme CEI.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les performances des FAPP associé à différentes stratégies de commande, appliquées à quatre topologies d'onduleurs multi-niveaux : NPC (Neutral Point Clamped), FC (Flying Capacitor), T-bridge et H-bridge. L'objectif a été d'évaluer l'efficacité de chaque combinaison en termes de compensation harmonique. Les résultats ont montré que quel que soit la topologie et quel que soit la stratégie de commande avec ou sans l'utilisation du filtre passif nous obtenons toujours une diminution du THD après filtrage, qui dans la plupart des cas est inférieur à 5%, ce qui permet de respecter la norme CEI.

Conclusion générale

L'étude et les simulations des filtres actifs de puissance à trois niveaux hybride ont mis en évidence leurs efficacités dans l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique des réseaux électriques moyenne tension. Ce système de compensation permet notamment de compenser les harmoniques de courant, de corriger le facteur de puissance et de réduire les perturbations affectant le réseau.

La structure à trois niveaux offre des avantages notables par rapport aux filtres traditionnels à deux niveaux. Elle permet une meilleure qualité de la tension des réseaux électriques MT. L'ajout d'un filtrage passif permet également de soulager le convertisseur actif de puissance, ce qui améliore l'efficacité globale tout en optimisant le coût du système.

Le premier chapitre a introduit la problématique des perturbations harmoniques dans les réseaux électriques, principalement dues aux charges non linéaires telles que les redresseurs. Ces distorsions entraînent une dégradation de la qualité de l'énergie, se traduisant par des échauffements, des pertes supplémentaires et des risques de résonance.

Pour y remédier, deux types de filtres ont été explorés :

- ✓ Les filtres passifs, composés de circuits RLC qui ont pour but dans notre étude de cibler spécifiquement les 5^{ème} et 7^{ème} harmoniques, dominantes dans les systèmes triphasés. Bien que simples et peu coûteux, leur efficacité dépend fortement des conditions du réseau électrique.
- ✓ Le filtre actif de puissance parallèle (FAPP), utilisant un onduleur triphasé à trois bras, permet une compensation dynamique en générant des courants opposés aux harmoniques perturbateurs.

Le second chapitre a porté sur l'étude des différentes topologies de FAPP trois niveaux ainsi que leurs commandes.

Le troisième chapitre a présenté les résultats des simulations réalisées sous MATLAB/Simulink/SymPower System pour évaluer les performances des topologies NPC, FC, T-Bridge et H-Bridge, associées à différentes stratégies de commande. Ces analyses ont permis de juger l'efficacité des systèmes de compensation en matière de qualité de l'énergie, stabilité et compensation harmonique.

La commande du filtre actif parallèle de puissance (FAPP) repose sur l'efficacité d'extraire les harmoniques de courant en utilisant une stratégie de commande appropriée. En combinant les filtres passifs et les filtres actifs de puissance, on obtient une solution hybride efficace pour améliorer la qualité de l'énergie.

L'étude des différentes topologies (FC, NPC, T-Bridge, H-Bridge) associées aux commandes (P-Q, Fryze, FMV) ont montré qu'ils sont tous efficaces à la compensation des harmoniques de courant. D'un autre côté si nous utilisons :

- La commande de Fryze, cette dernière permet une bonne compensation des courants harmoniques avec une complexité modérée de la commande.
- D'un autre côté, la commande PQ utilisant deux FMVs, a permis une forte atténuation des courants harmoniques. Cependant cette commande a une mise en œuvre plus complexe.

Les résultats de simulation sous MATLAB/Simulink ont montrés l'efficacité de ces topologies et commandes de FAPP trois niveaux fonctionnant en parallèle avec des filtres passifs dans un environnement soumis à des charges non linéaires pour la compensation des réseaux électrique MT.

Référence bibliographique

- [1] HAFSIA, S. « commande d'un filtre actif parallèle à quatre bras par des techniques avancées » Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences et de la Technologie UMK Biskra.2015
- [2] CHELLI Z. « amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique » Thèse Doctorat en Science, Université Badji MOKHTAR-ANNABA. 2015
- [3] CHENNAI S. « étude, modélisation & commande des filtres actifs : apport des techniques de l'intelligence artificielle » Thèse Doctorat en sciences, Université Mohamed Khider – Biskra. 2013
- [4] ABDUSALAM M. « structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales ». Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy-I-France, 2008.
- [5] Friekh A. « Filtrage Actif des harmoniques dans un réseau de transport de l'énergie électrique » Mémoire de Master, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA.2019.
- [6] BOUFASSA RABAH, MEKARNIA OMAR « Modélisation et commande d'un UPFC utilise en filtrage des courants harmoniques d'un réseau électrique » Mémoire d'ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique, El-Harrach, ALGER. Juin 2007.
- [7] SINGH B., VERMA.V, AL-HADDAD K. « Hybrid filters for power quality improvement » IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, vol. 152, no 3, p. 365-378,2005.
- [8] ZERGOUG N. et MESSAOUD O. « Étude et simulation d'un filtre actif de puissance parallèle multi-niveaux et modulaire » Mémoire de master, Université du Tlemcen, Alegria, 2023.
- [9] ZOUKH N. et RAS GHANEM A. « a amélioration de la qualité de l'énergie électrique par l'utilisation d'un filtre actif parallèle dans un réseau électrique » Mémoire de master, Université IBN-KHALDOUN DUE TIARET.2023-2026.

- [10] ZELLOUMA M. « étude et réalisation d'un filtre actif parallèle de puissance commandé par DSPACE1104 » Mémoire de master, Université BADJI MOKHTAR-ANNABA.2019.
- [11] MOHAMED AMINE SAIDI, « implémentation de la commande de l'énergie active et réactive d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique », Mémoire de Master, Laboratoire de Recherche en Électrotechnique (LRE) - École Nationale Polytechnique (ENP) 10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie, ENP 2021.
- [12] BACHIR A. et MERABTI el Amine « étude et simulation d'un filtre actif parallèle multi-niveaux » Mémoire de Master, Université de Tlemcen.2020.
- [13] ABDELKADER BERHAIL « Commande d'une éolienne à base de Gsap connectée au réseau électrique par convertisseur multiniveaux » Mémoire en Maitrise en Génie électrique, Université du Québec a Trois-Rivières, 2020.
- [14] LAKSARIA et SI TAYEB M.A.A. « Étude et simulation d'un filtre actif de puissance hybride constitue d'un filtre passif et un filtre actif de puissance parallèle à commande indirecte ». Mémoire de Master Université Tlemcen, Alegria, 2022.
- [15] SELKA .M, TALEB A. M. « Étude et simulation d'un filtre actif de puissance hybride constitué d'un filtre actif de puissance série associé à un filtre de puissance passif » Mémoire de Master Université Tlemcen, Alegria, 2022
- [16] LARBES C. et BOUCHEKOUK O. « Étude comparative entre les différentes topologies et les commandes des onduleurs » Mémoire de Master Ecole Nationale Polytechnique, 2015.
- [17] BACHIR Asma, MERABTI Mohammed el amine « Étude et simulation d'un filtre actif parallèle Multi niveaux » Mémoire de Master Université de Tlemcen, Alegria, 2020
- [18] BENABDERRAHMANE Houcine et RACHEDI Houcine « Étude et simulation d'un filtre actif de puissance parallèle Multi niveau » Mémoire de Master, Université de Tlemcen., Alegria, 2019

- [19] MAMMAD MERYEM, KADRI RANIA « Étude et simulation d'un filtre actif de puissance parallèle utilisant une commande intelligente » Mémoire de Master, Université de Tlemcen, Alegria, 2021
- [20] Florent B. « Contribution à la continuité de service des convertisseurs statiques multi niveaux » Thèse Formation Doctorale "Electrotechnique – Electronique". Université de Lorraine.2017.
- [21] CHIBANI R, « Application de l'automatique aux cascades à onduleurs à cinq niveaux à Structure NPC » Thèse de Doctorat, ENP, Alger 2007.
- [22] BOUTARBOUCHA H.E. « Topologie d'onduleurs multi niveaux et stratégie de commande (application aux systèmes photovoltaïques) ». Mémoire de Master Université BADJI MOKHTAR-ANNABA.2021.
- [23] Taouririt Abd elhamid, « Conception et Réalisation d'un Robot Mobile à Base d'Arduino » Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2020
- [24] Hamoudaa N., Hemsasb K. E. et Benallac H. « étude comparative des techniques de filtrage actif sélectif par référentiel synchrone de Park d-q et approche FMV ». Laboratoire d'Automatique de Sétif (LAS), Université Ferhat Abbes Sétif, Laboratoire D'électrotechnique Université Constantine1, Algérie, MJMS 01 (2014) 089–098.
- [25] MARIF Yacine, RAHAOUI Ahmed, « Etude et simulation d'un filtre actif de puissance parallèle avec sa commande pour une compensation sélective des harmoniques » » Mémoire de Master, Université de Tlemcen., Algeria,2016
- [26] Wanjekeche T. et Nicolae D.V. and Jimoh A.A. « A Cascaded NPC/H-Bridge Inverter with Simplified Control Strategy and Minimum Component Count », IEEE AFRICON 2009, Nairobi, Kenya
- [27] N.Hamouda, K.E. Hemsas, H. Benalla, « étude comparative des techniques de filtrage actif Sélectif par référentiel synchrone de Park d-q et approche FMV », Université Constantine1, Algérie.2014

[28] MARIF Y. et RAHAOUI A. « étude et simulation d'un filtre actif de puissance parallèle avec sa commande pour une compensation sélective des harmoniques », Mémoire de Master, Université de Tlemcen, 2016.

[29] M. C. Benhabib, « Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension, Modélisation, simulation et validation expérimentale de la commande » Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-France, (2004).

[30] AKAGI, HIROFUMI. « Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits » In: Proc. Int. Power Electronics Conf., 1983. 1983. p. 1375-1386.

Annexe

A : Paramètres de simulation pour chaque topologie et stratégie de commande

Page 17 : Simulation du FAPP sans l'utilisation de filtre passif

Le réseau électrique	$V=230$, $R_s=1 \cdot 10^{-3}$, $L_s=5 \cdot 10^{-8}$
Le point de redresseur	$R_c=2.7 \cdot 10^{-3}$, $L_c=23.19 \cdot 10^{-6}$ $R_d=0.79$, $L_d=2.25 \cdot 10^{-6}$
Le FAPP	$R_f=1 \cdot 10^{-6}$, $L_f=0.1 \cdot 10^{-3}$, $C_f=5 \cdot 10^{-4}$

Figure A.1 les paramètres de simulation du FAPP sans l'utilisation de filtre passif

Page 35 Résultat de Simulation des FAPP trois niveaux selon les topologies sans utiliser de filtre passif

Le réseau électrique	$R_s=1 \cdot 10^{-4}$, $L_s=5 \cdot 10^{-4}$
Le point de redresseur	$R_c=1 \cdot 10^{-4}$, $L_c=5 \cdot 10^{-4}$ $R_d=50$, $L_d=5 \cdot 10^{-4}$
Le FAPP	$R_f=1 \cdot 10^{-4}$, $L_f=5 \cdot 10^{-3}$, $C_f=5 \cdot 10^{-4}$

Figure A.2 les paramètres de simulation du FAPP sans l'utilisation de filtre passif

Page 51 Résultat de simulation FAPP trois niveaux selon les topologies en utilisant filtre passif

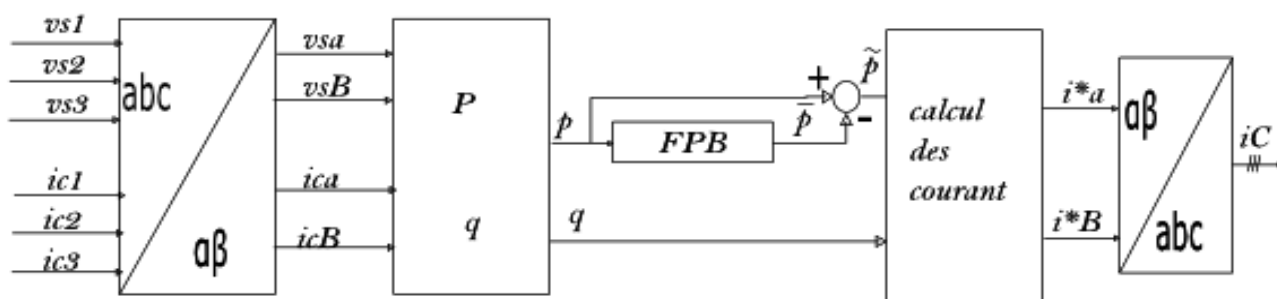
Réseaux électrique	$V=5500 \cdot \sqrt{2}$ $R_s=1 \cdot 10^{-4}$, $L_s=45 \cdot 10^{-4}$
La charge non linéaire	$R_c=1 \cdot 10^{-4}$, $L_c=35 \cdot 10^{-4}$ $R_d=50$, $L_d=35 \cdot 10^{-4}$
Filtre active parallèle	$R_f=0.005$, $L_f=0.001$, $C=5 \cdot 10^{-4}$
Filtre passif 5 harmonique	$R=6.05$ $L=0.1926$ $C=2.1045 \cdot 10^{-6}$
Filtre passif 7 harmonique	$R=4.3214$ $L=0.0983$ $C=2.1045 \cdot 10^{-6}$

Figure A.3 les paramètres de simulation du FAPP l utilisant de filtre passif

B : Figure de chaque élément utiliser lors des simulations avec matlab sympower system

Page 17 : Simulation du FAPP sans l'utilisation de filtre passif

Figure B.1 : Schéma du système complet utilisant matlab sympower system .



Page 36 : Topologie NPC la commande PQ

Figure B.2 : schéma d'onduleur type Npc.

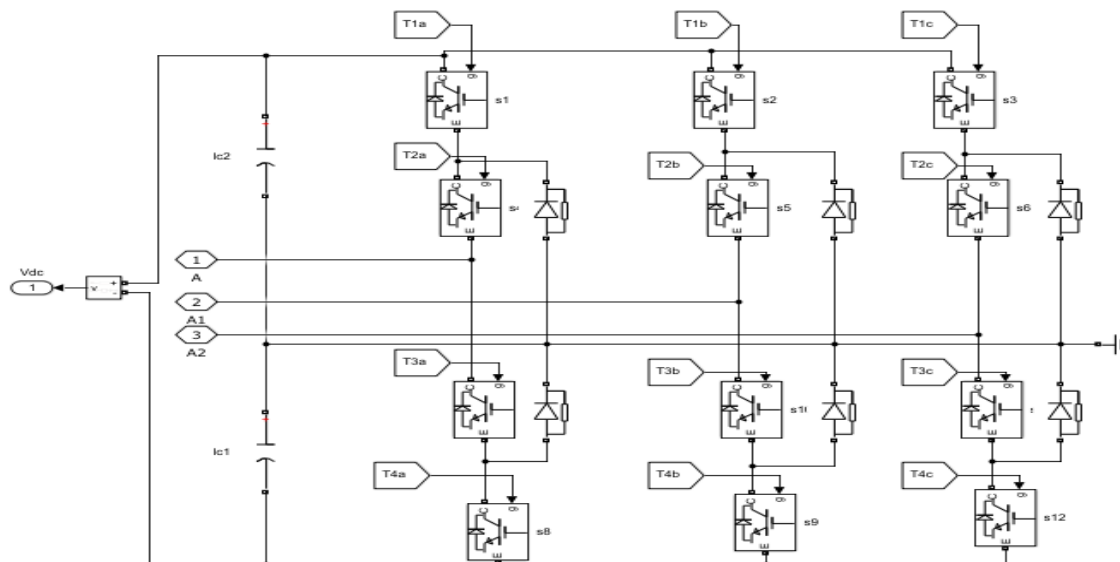
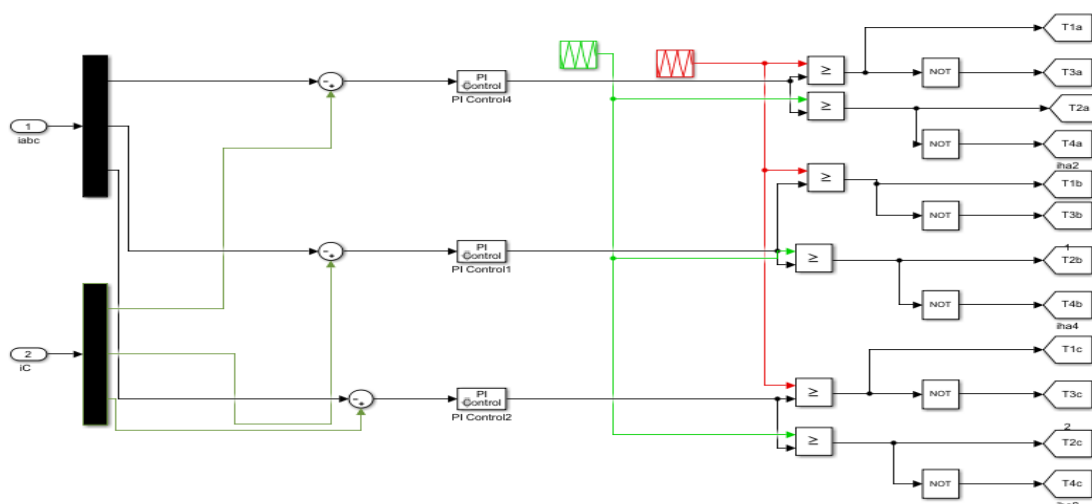


Figure B.3 Commande MLI de l'onduleur multi-niveaux type NPC



Page 38 : Topologie FC utilisant la commande PQ

Figure B.4 : schéma d'onduleur type FC.

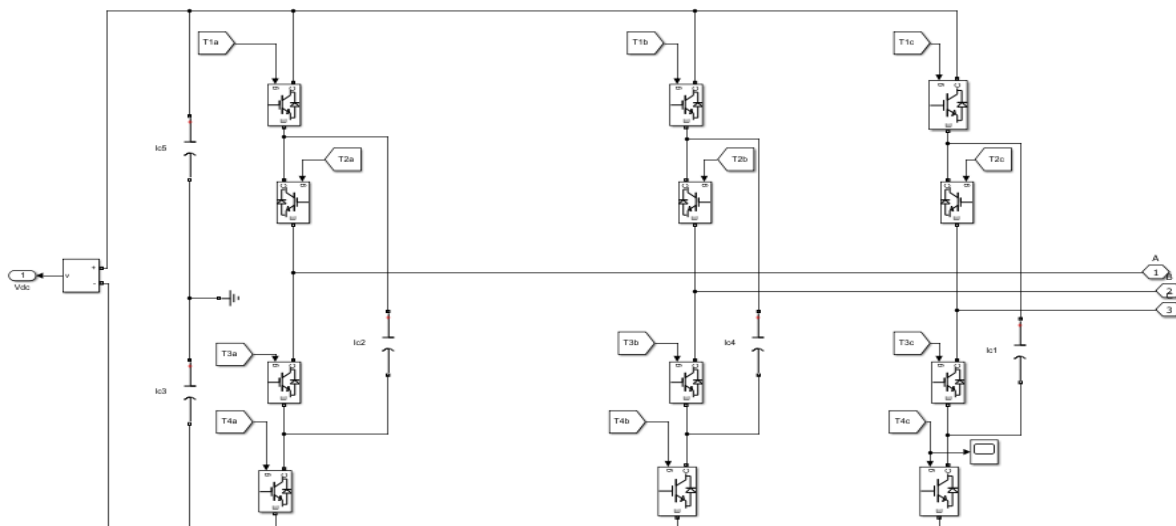
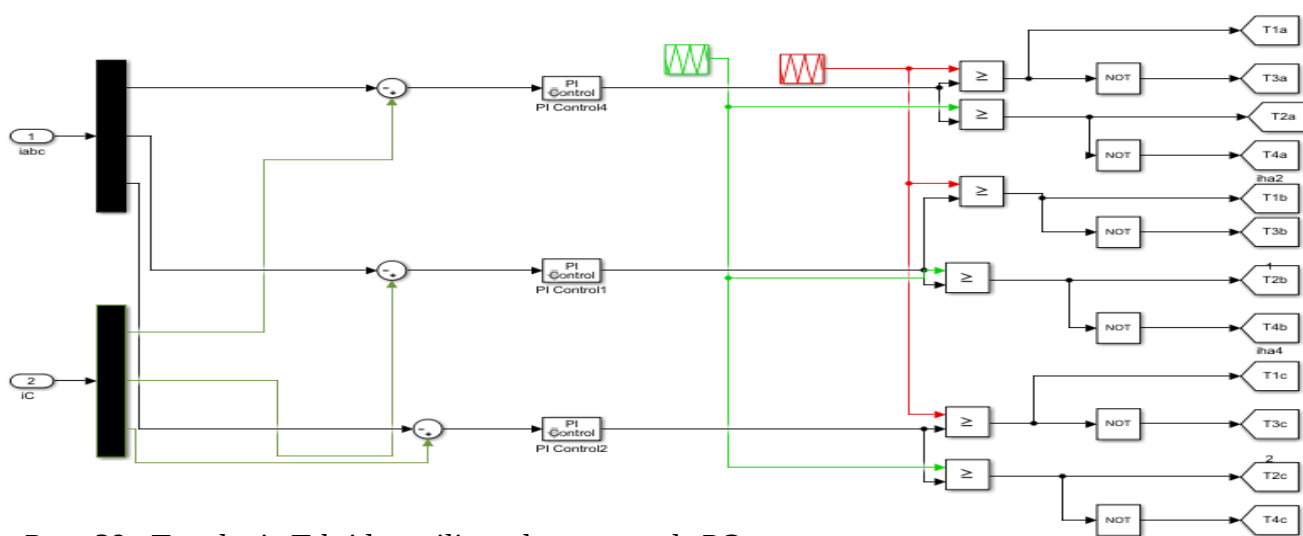


Figure B.5 Commande MLI de l'onduleur multi-niveaux type FC



Page 39 : Topologie T-bridge utilisant la commande PQ

Figure B.6 : schéma d'onduleur type T-bridge

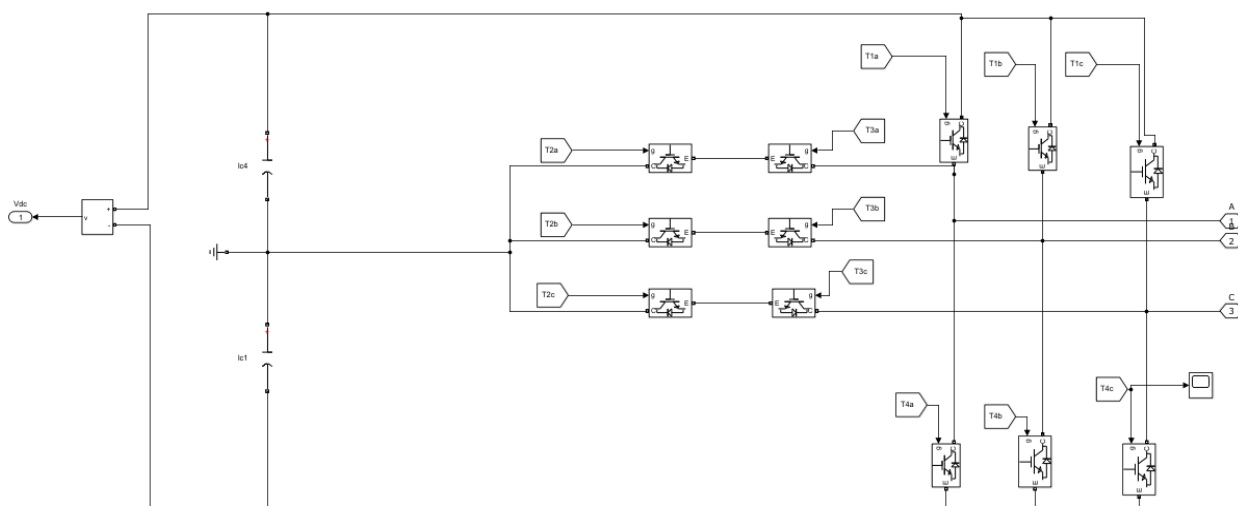
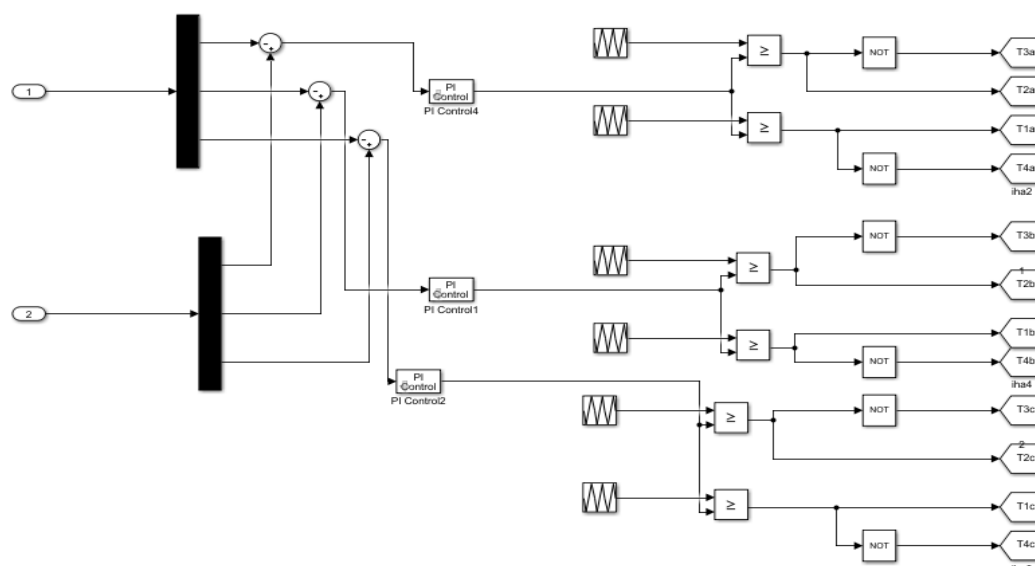


Figure B.7 Commande MLI de l'onduleur multi-niveaux type T-bridge



Page 40: Topologie H-bridge utilisant la commande PQ

Figure B.8 : schéma d'onduleur type H-bridge

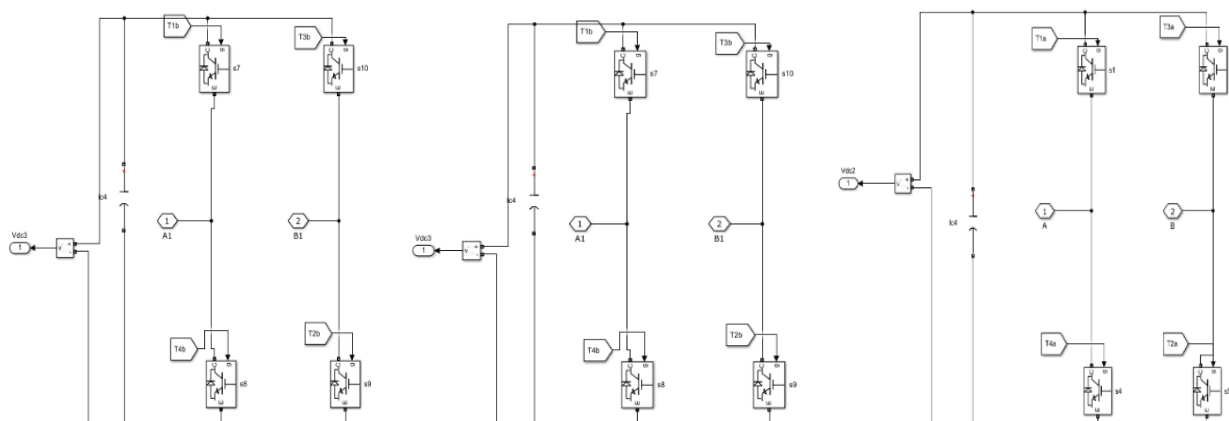
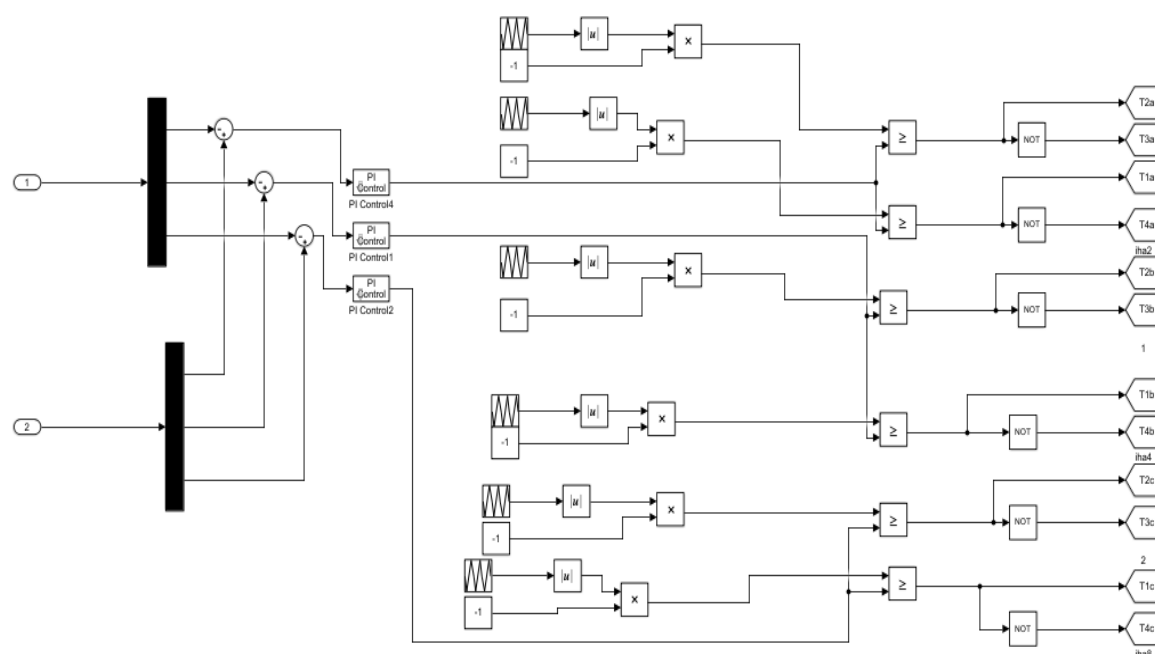


Figure B.9 Commande MLI de l'onduleur multi-niveaux type H-bridge



PWM

Paramètre de la porteuse 1

 Block Parameters: Repeating Sequence4

Repeating table (mask) (link)

Output a repeating sequence of numbers specified in a table of time-value pairs. Values of time should be monotonically increasing.

Parameters

Time values:

[[0 1/(50*200*4) 3/(50*200*4) 1/(50*200)]]

Output values:

[0 -10 10 0]

Paramètre de la porteuse 2

 Block Parameters: PI Control4

Subsystem (mask)

Parameters

kp

-1

ki

-100

Paramètre de filtre bas haut

 Block Parameters: Transfer Fcn

Transfer Fcn

The numerator coefficient can be a vector or matrix expression. The denominator coefficient must be a vector. The output width equals the number of rows in the numerator coefficient. You should specify the coefficients in descending order of powers of s.

Parameters

Numerator coefficients:

[(2*3.14*50)^2]

Denominator coefficients:

[1 (2*0.707*2*3.14*50) (2*3.14*50)^2]

Absolute tolerance:

auto

State Name: (e.g., 'position')

"

Paramètre de PI

 Block Parameters: Repeating Sequence3

Repeating table (mask) (link)

Output a repeating sequence of numbers specified in a table of time-value pairs. Values of time should be monotonically increasing.

Parameters

Time values:

[[0 1/(50*200*4) 3/(50*200*4) 1/(50*200)]]

Output values:

[0 -10 10 0]

C : Expression mathématique utilisé par la commande PQ

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{eq (C.1)}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad \text{eq (C.2)}$$

Avec:

$$C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad \text{eq (C.3)}$$

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{3}{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} \quad \text{eq. (C.4)}$$

ملخص:

يؤدي وجود أحمال غير خطية في الشبكة الكهربائية إلى توليد التوافقيات الحالية، مما يضر بجودة الطاقة الكهربائية على الشبكة. ولحل هذه المشكلة، تتوفر عدة حلول متاحة لتحسين جودة الطاقة الكهربائية، بما في ذلك استخدام المرشحات السلبية أو استخدام مرشحات الطاقة النشطة المتوازية (FAPP) أو استخدام مرشحات الطاقة النشطة الهجينة التي تجمع بين الاثنين. وهذا هو الحل الأخير الذي استخدمناه للتخلص من التوافقيات الحالية. قمنا بدراسة ومحاكاة الطوبولوجيا المختلفة (NPC، FC، جسر T وجسر T وجسر H) واستراتيجيات التحكم (PQ، PQ مع اثنين من FMVs و Fryze) لمرشحات الطاقة النشطة الهجينة ثلاثية المستويات FAPPs. أظهرت نتائج المحاكاة فعالية هذه الطوبولوجيات واستراتيجيات التحكم هذه، مما جعل من الممكن تقليل التوافقيات الحالية بشكل كبير بعد التصفية من أجل تحقيق THD أقل من 5%.

الكلمات الرئيسية: المرشح النشط المتوازي الهجين، استراتيجية التحكم، العاكس ثلاثي المستويات، جودة الطاقة على الشبكة الكهربائية

Abstract:

The presence of non-linear loads in the electrical network generates current harmonics, thus compromising the quality of electrical power on the network. To solve this problem, several solutions are available to improve power quality, including the use of passive filters, parallel active power filters (FAPP) or hybrid active power filters combining the two. We used the latter solution to eliminate current harmonics. We studied and simulated the different topologies (NPC, FC, T bridge and H bridge) and control strategies (PQ, PQ with two FMVs and Fryze) of Hybrid three-level FAPPs. The simulation results demonstrated the effectiveness of these topologies and control strategies in significantly reducing post-filtering current harmonics to achieve a THD of less than 5%.

Key words: Hybrid parallel active filter, control strategy, three-level inverter, power quality on the electrical grid.

Résumé :

La présence de charge non linéaire dans le réseau électrique engendre les harmoniques de courant, compromettant ainsi la qualité de l'énergie électrique sur ce réseau. Pour résoudre ce problème plusieurs solutions apparaissent pour améliorer la qualité de l'énergie électrique, parmi elle nous avons l'utilisation des filtres passifs ou l'utilisation des filtres actifs parallèle (FAPP) ou encore l'utilisation des Filtres actifs de puissance hybrides combinant les deux. C'est cette dernière solution que nous avons utilisée pour éliminer les harmoniques de courant. Nous avons étudié et simuler les différentes topologies (NPC, FC, T bridge et H bridge) et stratégies de commande (PQ, PQ avec deux FMV et Fryze) des FAPPs à trois niveaux Hybride. Les résultats de simulation ont montré l'efficacité de ces topologies et ces stratégies de commande qui ont permis de réduire considérablement les harmoniques de courant après filtrage afin d'obtenir un THD inférieur à 5%.

Mots clés : Filtre actif parallèle Hybride, stratégie de commande, onduleur trois-niveaux, qualité de l'énergie sur le réseau électrique.