

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 : Commande des machines électriques

Par : Haraïche Marwa et Berkani Marame

Sujet

Etude et simulation d'une commande directe et indirecte appliquées à un FAP parallèle à deux bras avec condensateur à point milieu connecté à un réseau électrique triphasé à trois fils

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

Mme GHLAM K.	MCA	Univ. Tlemcen	Président
M. BENHABIB Mohamed Choukri	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
M. LAZREG M. H.	MCA	Univ. Tlemcen	Examineur

Année universitaire : 2024 /2025

Dédicace

A mes chers parents,

Vous avez été mon premier soutien, ma source inépuisable d'amour et de motivation. Ce mémoire est le fruit de vos efforts et votre confiance en moi.

A mes chers frères,

« Abderrahmane, Malek »

A ma famille et mes amis,

« Sara, Marwa, Assia, Fatoum, Souad, Meryem » Merci pour votre présence, vos conseils et votre soutien tout au long de cette aventure. Vos encouragements m'ont aidé à préserver dans les moments les plus difficiles.

A mes enseignants et encadrants,

Votre accompagnement, votre bienveillance et votre savoir ont été essentiels à ma progression.

A ma chère binôme,

« Berkani Marame ».

Haraïche Marwa

Dédicace

Avec tous mes sentiments de respect. Avec l'expérience de ma reconnaissance, je dédie ma remise de diplôme et ma joie

A mon paradis à la prunelle de mes yeux à la source de ma vie et mon bonheur, ma lune et le fil d'espoir qui allume mon chemin. Ma moitié
Maman

A mon support qui était toujours à mes côtés pour me soutenir et m'encourager a

Mes frères Badr Eddine et Mohamed et mes sœurs
Et mon grand-père qui m'a toujours soutenu.
Et aux enfants de ma sœur

A tous mes ami(e)s qui m'ont toujours encouragé, et qui je souhaite plus de succès.

Sans oublier à mon binôme « HARAICHE MARWA » pour son soutien moral sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet

A tous ce qui m'aiment

BERKANI MARAME

Remerciement

Avant tout, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce mémoire.

Tout d'abord nous remercions sincèrement monsieur « BENHABIB Mohamed Choukri » notre encadreur de mémoire, pour son encadrement précieux, ses conseils avisés et son soutien tout au long de ce PFE.

Nous souhaitons également remercier la présidente du jury Mme GHLAM. K et le membre du jury Mr LAZREG.M-H d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous remercions également tous les responsables de l'université et les enseignants du département génie électrique.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à mener à terme ce travail.

Table des matières

Liste des symboles et abréviations	
Listes des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	12
CHAPITRE I : Généralité sur les trois bras à commande directe et indirecte.....	13
Introduction	14
I. Principe de fonctionnement	14
I.1 Filtre actif de puissance parallèle (FAPP).....	14
I.2 Filtre actif de puissance série (FAPS).....	15
I.3 Structure d'un FAPP à Structure Tension.....	15
I.3.1 Etude de la partie puissance	16
I.3.2 Etude de la partie commande	17
I.4 Résultat de Simulation de l'ensemble charge non-linéaire - FAPP à trois bras	20
CHAPITRE II : Généralité sur les FAPP deux bras à commande directe et indirecte	31
Introduction.....	32
II.1 Présentation de la structure du FAP à deux bras avec condensateur à point milieu (FAPP2BPM)	32
II.2 Etude de la partie puissance	33
II.3 Etude de la partie commande	35
II.3.1 Méthode (PQ) et la méthode (SRF) modifier.....	36
II.3.2 Commande généralisée du courant de Fryze.....	37
CHAPITRE III : Résultats des simulations des stratégies de commande pour FAP à deux bras à point milieu.....	40
Introduction.....	41
III.1 Méthode directe des puissances instantanées avec une hystérésis.....	41
III.2 Méthode directe des puissances instantanées PQ utilisant une MLI	43
III.3 Méthode directe des puissances instantanées utilisant deux filtres multi-variable et une hystérésis	44
III.4 Méthode directe des puissances instantanées PQ incorporant deux filtres multivariables et utilisant une MLI	46
III.5 Méthode directe des puissances instantanées PQ incorporant un filtre multivariable et une PLL et utilisant une hystérésis	47
III.6 Méthode directe des puissances instantanées PQ incorporant un filtre multivariable et une PLL et utilisant une MLI	48
III.7 Méthode directe utilisant la méthode de Fryze et une Hystérésis	51

III.8	Méthode directe utilisant la méthode de Fryze et une MLI	51
III.9	Méthode indirecte des puissances instantanées PQ utilisant une hystérésis.....	53
III.10	Méthode indirecte des puissances instantanées PQ utilisant une MLI.....	55
III.11	Méthode indirecte des puissances instantanées PQ incorporant deux filtres multivariables et utilisant une hystérésis.....	56
III.12	Méthode indirecte des puissances instantanées PQ incorporant deux filtres multivariables et utilisant une MLI	57
III.13	Méthode indirecte des puissances instantanées PQ incorporant un filtre multivariable et une PLL et utilisant une hystérésis.....	59
III.14	Méthode indirecte des puissances instantanées PQ incorporant un filtre multivariable et une PLL et utilisant une MLI	60
III.15	Méthode indirecte utilisant la méthode de Fryze et une Hystérésis.....	62
III.16	Méthode indirecte utilisant la méthode de Fryze et une MLI	63
	Conclusion générale	65
	Références bibliographiques	66
	Annexe A.....	69
	Annexe B.....	73
	Annexe C.....	80

Liste des symboles et abréviations

Symboles

T	Etat de l'interrupteur S (ouvert ou fermé).
S	Nombre d'interrupteur.
R	Résistance.
L	L'inductance.
i_a	Courant actif (partie utile, en phase avec la tension).
i_n	Courant à compenser.
i_c	Valeur efficace du courant de la charge.
i_f	Valeur efficace du courant injecté par le FAPP.
i_s	Valeur efficace du courant de la source.
C_{dc}	Condensateur du bus continue.
V_{dc}	Tension aux bornes du condensateur.
PI	Proportionnel-Intégral.
K_i	Gain intégral du régulateur.
K_p	Gain proportionnel du régulateur.
α - β	Axes α et β du repaire de Concordia

Abréviations

FAPP	Filtre Actif de Puissance Parallèle.
FAPS	Filtre Actif de Puissance série.
FPB	Filtre Passe Bas.
FPH	Filtre Passe Haut.
IGBT	Insolated Gate Bipolar Transistor.
MOSFET	Metal oxide Semiconductor Field Effect.
PLL	Phase Locked Loop.
FMV	Filter multivariable.
SRF	Synchronous référence frame.

Listes des figures

Figure I.1: Branchement du FAP parallèle au réseau électrique.....	15
Figure I.2: Branchement du FAP série.....	15
Figure I.3: Structure d'un FAP à Structure Tension.....	16
Figure I.4: Partie puissance de l'onduleur.....	16
Figure I.5: Commande directe.....	18
Figure I.6: Commande indirecte.....	18
Figure I.7: Stratégie de commande utilisant les puissances instantanées.....	19
Figure I.8: Stratégie de commande utilisant le référentiel lié au synchronisme (SRF).....	20
Figure I.9: Schéma de charge qui alimente une charge RL.....	20
Figure I.10: Courant au niveau de la source.....	21
Figure I.11: Courant au niveau de la tension de source.....	21
Figure I.12: Courant au niveau de la charge non linéaire.....	21
Figure I.13: Commande directe utilisant la méthode PQ.....	22
Figure I.14: Courant de source après filtrage.....	22
Figure I.15: Courant de charge.....	23
Figure I.16: Courant injecté par le FAPP.....	23
Figure I.17: Tension aux bornes du condensateur du FAPP.....	23
Figure I.18: FFT et THD du courant de source de la phase 1 avant et après filtrage.....	23
Figure I.19: Commande directe utilisant la méthode PQ par MLI.....	24
Figure I.20: Courant de source après filtrage.....	24
Figure I.21: Courant de charge.....	25
Figure I.22: Courant injecté par le FAPP.....	25
Figure I.23: Tension aux bornes du condensateur du FAPP.....	25
Figure I.24: FFT et THD du courant de source de la phase 1 avant et après filtrage.....	26
Figure I.25: Commande indirecte utilisant la méthode PQ.....	27
Figure I.26: Courant de source après filtrage.....	27
Figure I.27: Courant de charge.....	27
Figure I.28: Courant injecté par le FAPP.....	28
Figure I.29: Tension aux bornes du condensateur du FAPP.....	28
Figure I.30: FFT et sont THD du courant de source de la phase1 avant et après filtrage.....	28
Figure I.31: Commande indirecte utilisant la méthode PQ par MLI.....	28
Figure I.32: Courant de source après filtrage.....	29
Figure I.33: Courant de charge.....	29
Figure I.34: Courant injecté par le FAPP.....	29
Figure I.35: Tension aux bornes du condensateur du FAPP.....	29
Figure I.36: FFT et sont THD du courant de source de la phase1 avant et après filtrage.....	29
Figure II.1: FAPP2BPM connecté au réseau électrique.....	32
Figure II.2: Filtre actif de puissance à deux bras connectés en parallèle aux réseaux électriques.....	34
Figure II.3: Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur de tension à deux bras.....	35
Figure II.4: Structure d'un filtre multi-variable (FMV).....	36
Figure II.5: Commande directe PQ utilisant le FMV.....	37
Figure II.6: Commande directe DQ utilisant le FMV.....	37
Figure II.7: Commande généralisée du courant de Fryze.....	38
Figure III.1: Commande directe avec hystérésis.....	41
Figure III.2: Courant de source après filtrage.....	42
Figure III.3: Courant de charge.....	42

Figure III.4: Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM	42
Figure III.5: FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.....	42
Figure III.6: Tension aux bornes des deux condensateurs	42
Figure III.7: Courant de source après filtrage	43
Figure III.8: Courant de charge	43
Figure III.9: Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM	43
Figure III.10: FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.....	43
Figure III.11: Tension aux bornes des deux condensateurs	44
Figure III.12: Courant de source après filtrage	44
Figure III.13: Courant de charge	45
Figure III.14: Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM	45
Figure III.15: FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.....	45
Figure III.16: Tension aux bornes des deux condensateurs	45
Figure III.17: Courant de source après filtrage	46
Figure III.18: Courant de charge	46
Figure III.19: Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM	46
Figure III.20: FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.....	46
Figure III.21: Tension aux bornes des deux condensateurs	46
Figure III.22: Courant de source après filtrage	47
Figure III.23: Courant de charge	47
Figure III.25: Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM	47
Figure III.26: FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.....	48
Figure III.28: Tension aux bornes des deux condensateurs	48
Figure III.29: Courant de source après filtrage	48
Figure III.30: Courant de charge	48
Figure III.31: Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM	49
Figure III.32: FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.....	49
Figure III.33: Tension aux bornes des deux condensateurs	49
Figure III.34: Courant de source après filtrage	50
Figure III.35: Courant de charge	50
Figure III.36: Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM	50
Figure III.37: FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.....	50
Figure III.38: Tension aux bornes des deux condensateurs	51
Figure III.39: Courant de source après filtrage	51
Figure III.40: Courant de charge	51
Figure III.41: Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM	52
Figure III.42: Commande indirecte avec hystérésis.....	53
Figure III.43: Courant de source après filtrage	54
Figure III.44: Courant de charge	54
Figure III.45 : Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM	54
Figure III.46: FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.....	54
Figure III.48: Tension aux bornes des deux condensateurs	54
Figure III.50: Courant de source après filtrage	55
Figure III.51: Courant de charge	55
Figure III.52: Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM	55
Figure III.53: Courant de source après filtrage	56
Figure III.54: Courant de charge	56
Figure III.55: Courant d'une phase injectée par Le FAPP2BPM.....	56
Figure III.56 : FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.....	57
Figure III.57: Tension aux bornes des deux condensateurs	57

Figure III.58: Courant de source après filtrage	58
Figure III.59: Courant de charge	58
Figure III.60: Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM	58
Figure III.61: Courant de source après filtrage	58
Figure III.62: Courant de charge	58
Figure III.63: Courant d'une phase injectée par Le FAPP2BPM.....	58
Figure III.64: FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.....	58
Figure III.65: Tension aux bornes des deux condensateurs	59
Figure III.66: Courant de source après filtrage	59
Figure III.67: Courant de charge	59
Figure III.68: Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM	59
Figure III.69: Courant de source après filtrage	59
Figure III.70: Courant de charge	60
Figure III.71: Courant d'une phase injectée par Le FAPP2BPM.....	60
Figure III.72 : FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.....	60
Figure III.73: Tension aux bornes des deux condensateurs	61
Figure III.74: Courant de source après filtrage	61
Figure III.75: Courant de charge	61
Figure III.76: Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM	62
Figure III.77: Courant de source après filtrage	63
Figure III.78: Courant de charge	63
Figure III.79: Courant d'une phase injectée par Le FAPP2BPM.....	63
Figure III.80 : FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.....	64

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients d'un FAP triphasé à 3 bras.....	17
Tableau II.1 : comparaison entre FAP a deux bras et FAP a trois bras.....	33
Tableau II.2 : Tension générées par l'onduleur de tension à deux bras	35

Introduction générale

Le réseau électrique est un système complexe qui assure le transport et la distribution de l'électricité aux usagers. Toutefois, il est fréquemment confronté à une multitude de problèmes. Parmi ces problèmes nous avons l'apparition des harmoniques associés au courant et/ou à la tension. L'existence de ces harmoniques dans les réseaux électriques, souvent qualifiés de pollution harmonique, n'est pas une nouveauté. En général, cette pollution harmonique est engendrée par des charges dite non linéaires qui consomment des courants qui ne sont pas sinusoïdaux. Les chercheurs et ingénieurs spécialisés dans les réseaux électriques travaillent ardemment pour trouver des solutions performantes afin de réduire au maximum ces courants et/ou tension harmoniques.

Parmi les solutions nous avons les filtres actifs de puissance qui se différencient soit par leur méthode de raccordement au réseau (série ou parallèle), soit par leur commande (générateur de courant ou de tension), soit par leur configuration (onduleur de tension ou de courant).

On peut distinguer deux grandes catégories de filtre ; les filtres actifs de puissance et les filtres passifs. Ces derniers sont les plus utilisés mais présentent plusieurs inconvénients. Par contre, les filtres actifs de puissance sont de plus en plus utilisés à cause de l'évolution des semi-conducteurs qui fonctionnent dans les très hautes fréquences et qui sont commandables à la fermeture et à l'ouverture permettant ainsi d'avoir un meilleur filtrage.

Ces filtres actifs de puissance sont basés sur des onduleurs de tension ou de courant et sont connecté soit en parallèle ou en série aux réseau électrique. Ils génèrent soit des courants ou des tensions harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase avec les harmoniques circulant dans le réseau électrique. Ainsi, ce mémoire présente une étude, suivie de simulation des filtres actifs de puissance dites parallèles destiné à l'atténuation des courants harmoniques qui apparaissent dans les réseaux électriques basse tension à trois fils.

Ainsi, nous avons divisé notre PFE en 3 chapitres, à savoir :

- Le premier chapitre présente les généralités sur les FAP à trois bras avec une présentation des stratégies de commande directe et indirecte.
- Le second chapitre est consacré aux FAP à deux bras avec condensateur à point milieu, qui font l'objet principal de cette étude.
- Le troisième et dernier chapitre exposera les résultats de simulation, en mettant l'accent sur la topologie FAP à deux bras avec condensateur à point milieu pour différentes stratégies de commandes et une interprétation des résultats de simulation sera présenté.

Chapitre I

Généralité sur les FAPP trois bras à commande directe et indirecte

Introduction

Le filtre actif de puissance (FAP) est un dispositif à base d'électronique de puissance qui permet d'éliminer les harmoniques de courant du réseau électrique générés par les charges non linéaires. De plus, il permet de compenser l'énergie réactive.

Dans ce chapitre, nous proposons de réduire les harmoniques de courant et l'énergie réactive au niveau de la source en utilisant le filtrage actif de puissance parallèle. Pour faire, nous présenterons dans ce chapitre les différentes topologies ainsi que les stratégies de commande, qui utilise l'une des deux commandes, à savoir, la commande directe ou la commande indirecte.

I. Principe de fonctionnement

Dans cette partie, nous allons présenter le principe de fonctionnement des FAP série et FAP parallèle.

I.1 Filtre actif de puissance parallèle (FAPP)

Le FAPP ou compensateur shunt (figure I.1) est un onduleur associé à un dispositif de contrôle et de commande adapté qui est connecté en parallèle au réseau électrique. Le FAPP peut être assimilé à une source de courant qui compense en temps réel les courants harmoniques en les injectant au niveau du réseau en opposition de phase après leurs identifications [1] et [2]. Dans le cadre de la gestion de l'énergie, le FAPP est classé en deux catégories principales en fonction du type de stockage : à savoir à structure courant ou à structure tension. La première catégorie est réalisée par une inductance, tandis que la seconde l'est par un condensateur. Il est à noter que les FAPP à structure tension sont plus couramment utilisés dans les applications industrielles en raison de leurs avantages, notamment leur simplicité, leur coût réduit et leurs dimensions réduites. [3], [4]

D'un autre côté, ces FAPP utilisent soit une stratégie de commande dite directe ou une stratégie de commande dite indirecte.

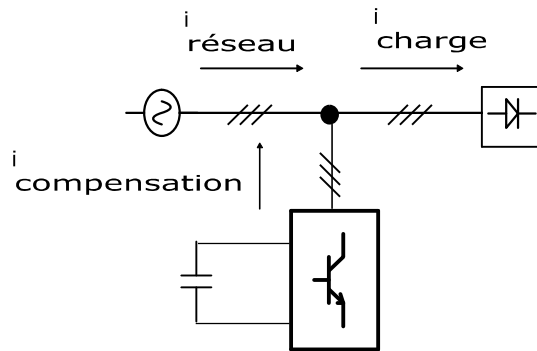


Figure I.1 : Branchement du FAP parallèle au réseau électrique

I.2 Filtre actif de puissance série (FAPS)

Le FAPS est connecté en série au réseau électrique, voir figure I.2. Il compense les harmoniques de tension venant côté source afin de protéger la charge. Le FAPS est un dispositif spécialement conçu pour la compensation efficace des tensions perturbatrices, tel que les harmoniques, les creux de tension et le déséquilibre [5] et [6].

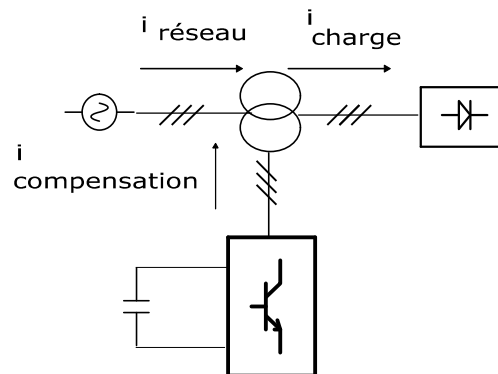


Figure I.2 : Branchement du FAP série

I.3 FAPP à Structure Tension

Un FAPP à structure tension comporte initialement une partie puissance et une partie commande, comme le montre la figure I.3. La partie puissance est composée :

- D'un onduleur de tension qui est un dispositif à base d'électronique de puissance, dont les interrupteurs de puissance sont de type IGBT, MOSFET, etc.
- IL est également équipé d'un filtre de découplage et d'un condensateur qui sert de source de stockage d'énergie.

La partie commande a pour fonction l'identification des courants perturbés et la régulation du condensateur qui est coté continue de l'onduleur. Un système à base de PLL (boucle de

verrouillage de phase) peut également être utilisé. Une régulation cotée PWM peut également être utilisée si nous utilisons par exemple une MLI à dent de scie. [7]

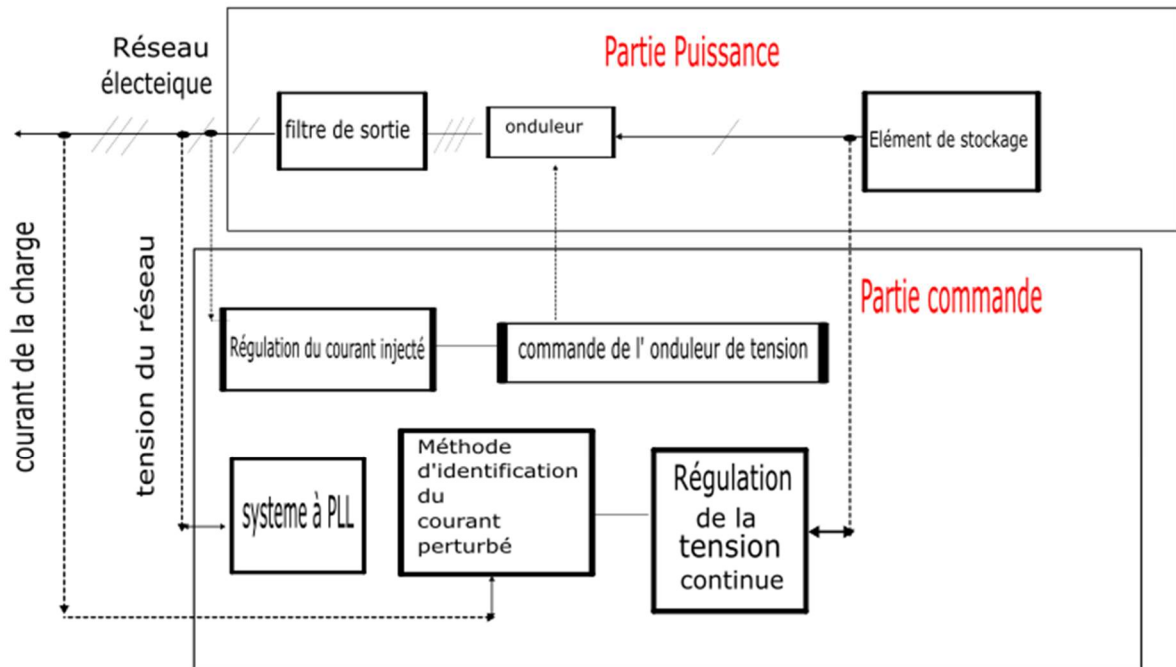


Figure I.3 : Structure d'un FAP à Structure Tension

I.3.1 Etude de la partie puissance

Nous allons maintenant présenter la partie puissance du FAPP. Comme nous le voyons sur la figure I.4, c'est un onduleur de tension deux niveaux à trois bras. Il contient un système de stockage d'énergie, qui utilise un condensateur C_{dc} qui fournit une tension continue V_{dc} . Le filtre à la sortie de l'onduleur, dit de découplage, est généralement un filtre passif de premier ordre pour relier l'onduleur au réseau électrique.[8]

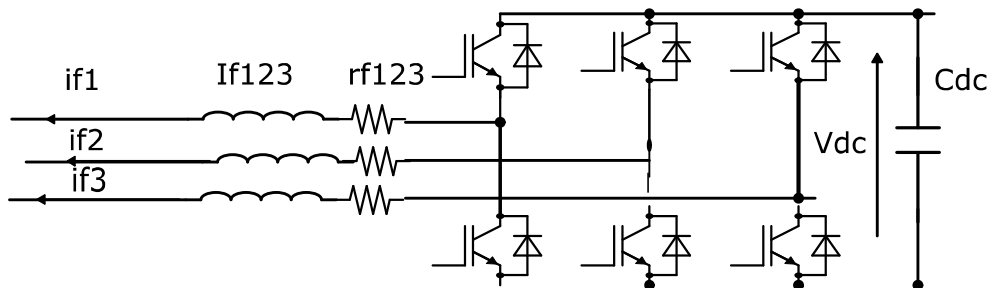


Figure I.4 : Partie puissance de l'onduleur

Pour l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur du FAPP, nous regardons l'état des signaux de commande (S_1, S_2, S_3). Cette dernière a été étudiée en détail dans les références suivantes [9] et [10].

Le tableau ci-dessous présente les principaux avantages et inconvénients d'un filtre actif de puissance (FAP) triphasé à 3 bras lorsqu'il est connecté au réseau électrique triphasé à trois fils.

Avantages	Inconvénients
Structure simple et largement répandue.	Ne permet pas la compensation du courant de neutre.
Moins de composants électroniques (6 interrupteurs) → coût réduit	Inefficace pour les réseaux à 4 fils (avec neutre)
Adapté aux réseaux triphasés équilibrés	Ne compense pas les composantes homopolaires (3 ^e harmonique et multiples)
Efficace pour la réduction des harmoniques de phase	Moins performant en présence de charges déséquilibrées
Faible encombrement et facilité d'intégration	Moins flexible comparé aux topologies à 4 bras
Bon rendement énergétique (pertes de commutation réduites)	Sensible aux défauts d'équilibrage du réseau
Contrôle et algorithmes de commande plus simples	Performances limitées en cas de déséquilibres ou charges non linéaires sévères

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients d'un FAP triphasé à 3 bras

I.3.2 Etude de la partie commande

Les FAPPs servent à compenser les harmoniques de courant et l'énergie réactive générée par les charges non linéaires. Il existe deux types de stratégies de commande : la commande directe et la commande indirecte. [11]

- **Concernant la commande directe**

La commande directe compare le courant de référence $i_{ref}(t)$, calculé avec une méthode appropriée à partir de la mesure du courant de charge polluante $i_c(t)$, au courant injecté par le FAPP $i_f(t)$. La figure suivante illustre la commande directe.

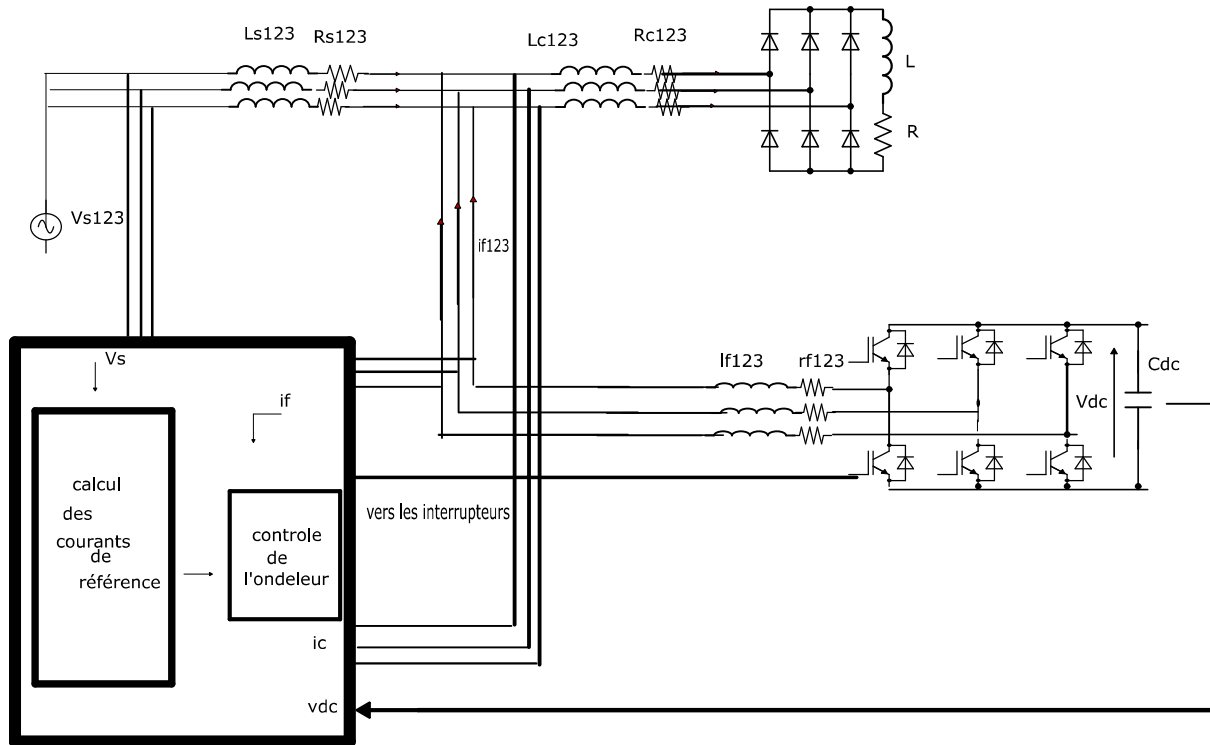


Figure I.5 : Commande directe

- **Concernant la commande indirecte**

La commande indirecte compare le courant de référence i_{ref} , calculé avec une méthode appropriée à partir de la mesure du courant de charge polluante $i_c(t)$, au courant de source $i_s(t)$. La figure suivante illustre la commande indirecte.

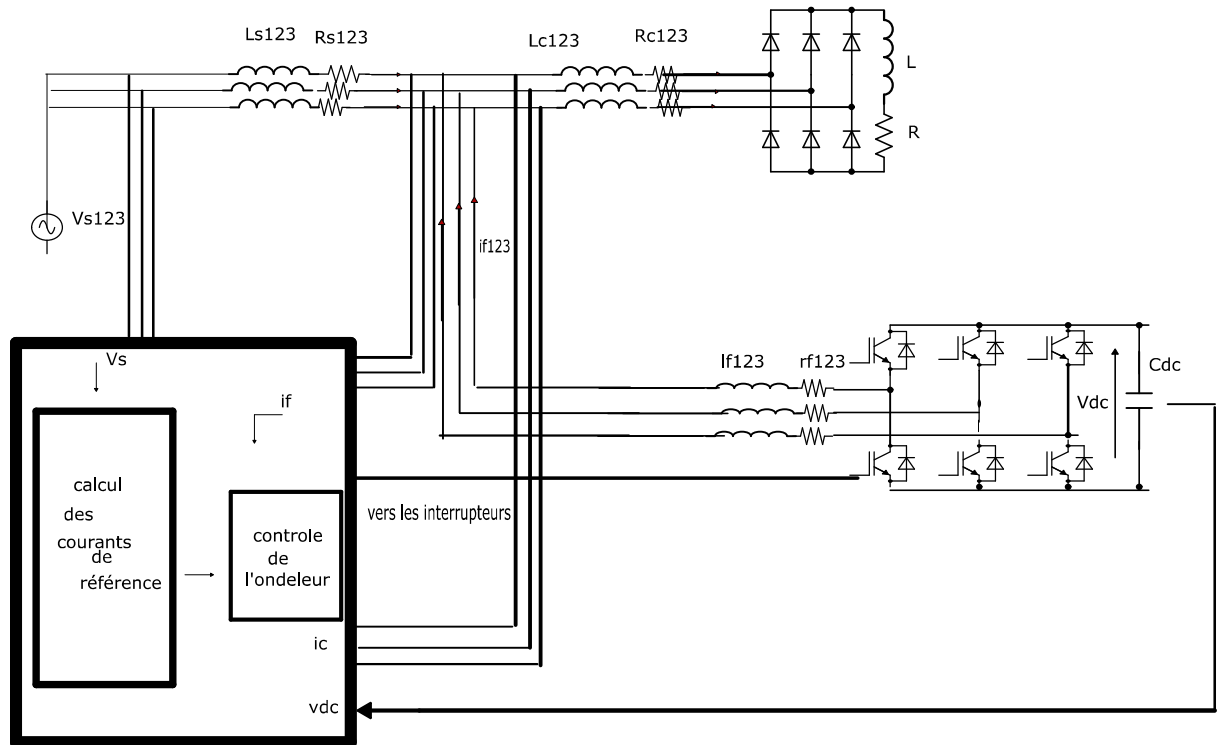


Figure I.6 : Commande indirecte

Parmi les stratégies de commande qui existe que ce soit pour la commande directe ou indirecte, nous avons :

- **Méthode basée sur les puissances réelles (PQ) utilisant la commande directe**

En 1983, H. Akagi a proposé une théorie, communément appelée « théorie (PQ) », qui a permis d'apporter un cadre conceptuel à la puissance réactive instantanée aux circuits triphasés. Cette théorie repose sur le calcul des valeurs instantanées pour les systèmes triphasés, avec ou sans neutre, et s'applique aussi bien aux opérations en régime permanent qu'aux opérations en régime transitoire [12]. La théorie PQ a été détaillé dans plusieurs références, à savoir [13] et [14].

La figure suivante montre la stratégie de commande directe utilisant la méthode des puissances instantanées.

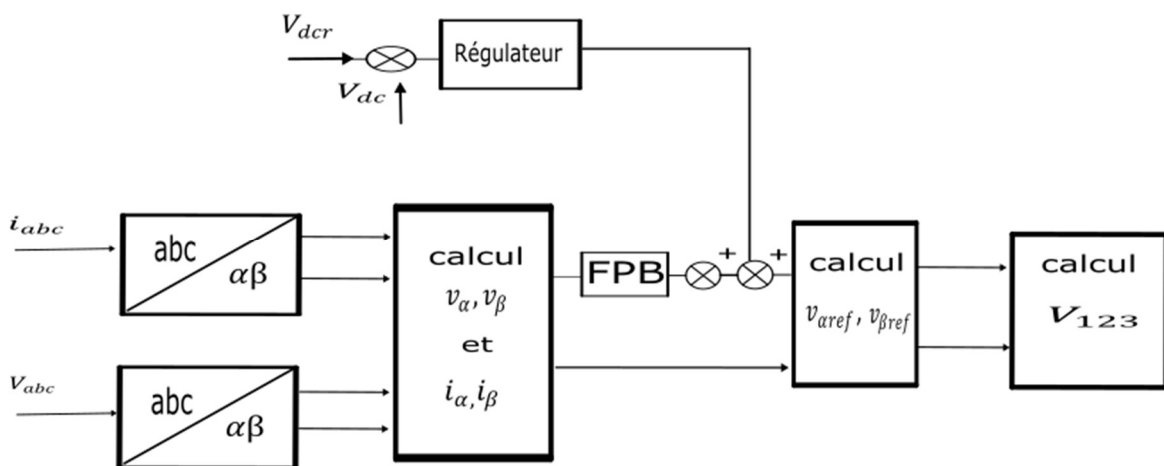


Figure I.7 : Stratégie de commande utilisant les puissances instantanées.

- **Méthode du référentiel lié au synchronisme (SRF)**

Cette méthode, développée par Bhattacharya diffère de la méthode précédente, en utilisant la transformation de Concordia sur le plan (α, β) et en appliquant seulement aux courants de charge ($i_{c1}(t), i_{c2}(t), i_{c3}(t)$). Parmi les avantages de cette méthode, est que les tensions harmoniques n'affectent pas les courants identifiés, ce qui permet un meilleur filtrage [15]. Nous utilisons une PLL qui sera au niveau des tensions de source.

La figure suivante montre la stratégie de commande directe utilisant la méthode du référentiel lié au synchronisme. [16] et [17]

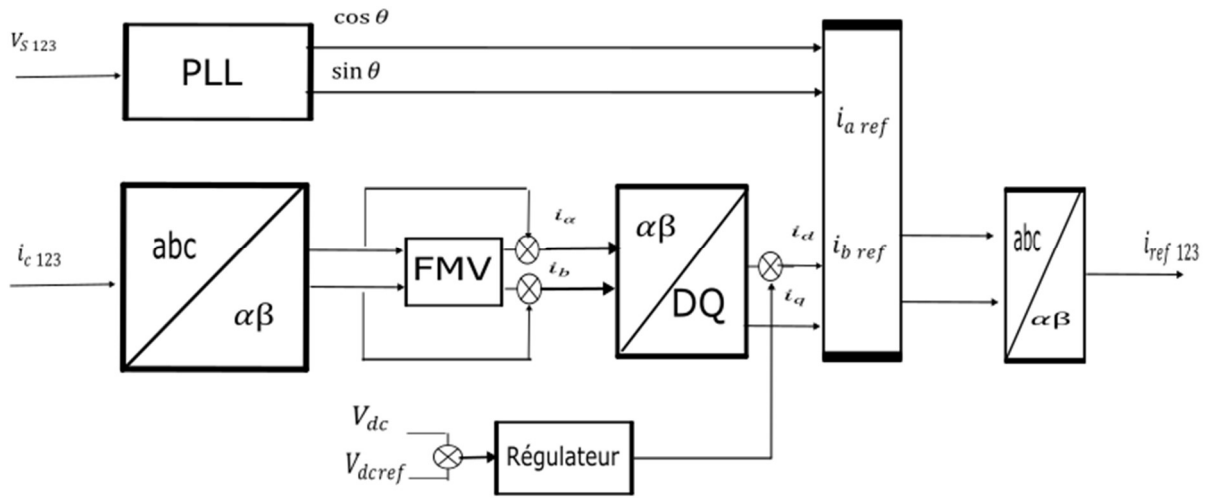


Figure I.8 : Stratégie de commande utilisant le référentiel lié au synchronisme (SRF)

I.4 Résultat de Simulation de l'ensemble charge non-linéaire - FAPP à trois bras

Soit le réseau électrique, illustré sur la figure I.9, qui est constitué d'une source alimentant une charge non linéaire constitué d'un pont redresseur alimentant à son tour une charge de type RL. Les paramètres de ce système sont donnés en Annexe A.

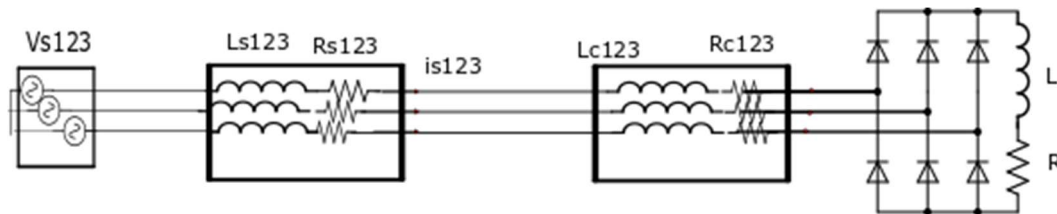


Figure I.9 : Schéma de charge qui alimente une charge RL

La figure suivante montre le courant de charge et la tension de source qui a été simulé en utilisant le logiciel sympower system de Matlab.

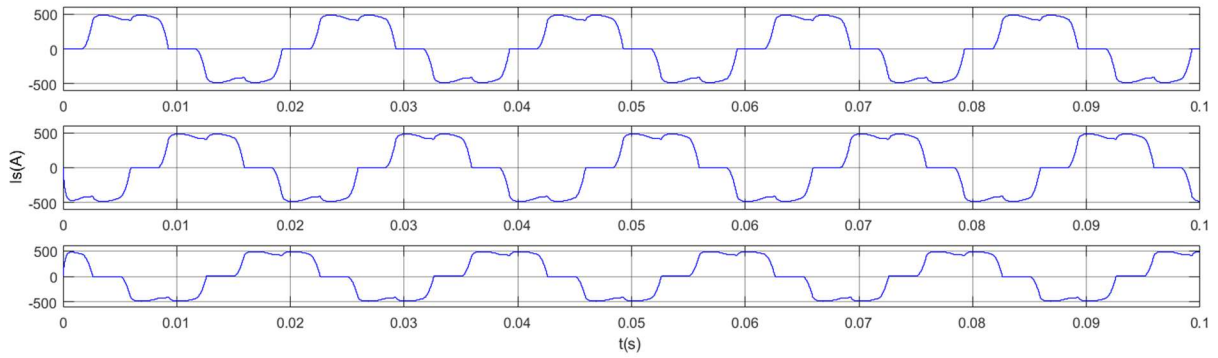


Figure I.10 : Courant au niveau de la source

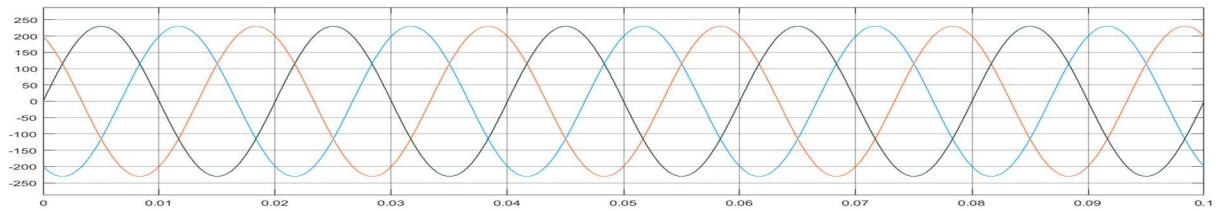


Figure I.11 : Courant au niveau de la tension de source

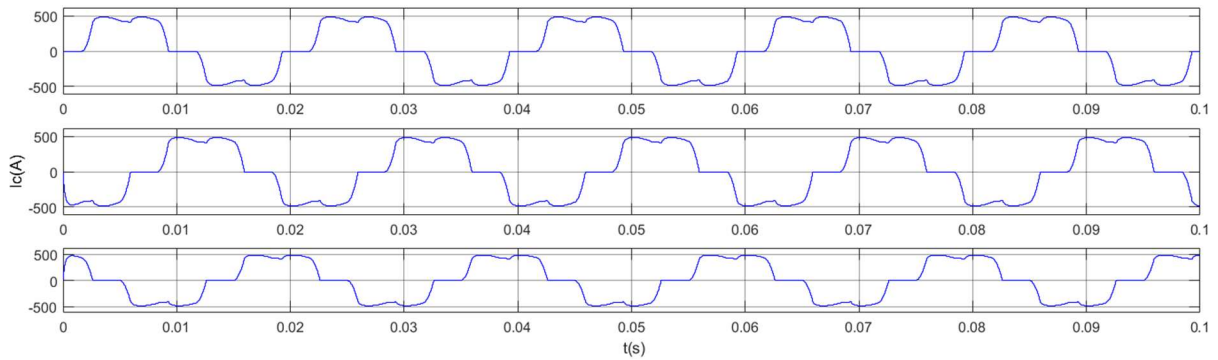


Figure I.12 : Courant au niveau de la charge non linéaire

Maintenant nous allons utiliser un FAPP à commande directe utilisant la méthode PQ. Nous allons également utiliser une hystérésis pour commander les interrupteurs du FAPP.

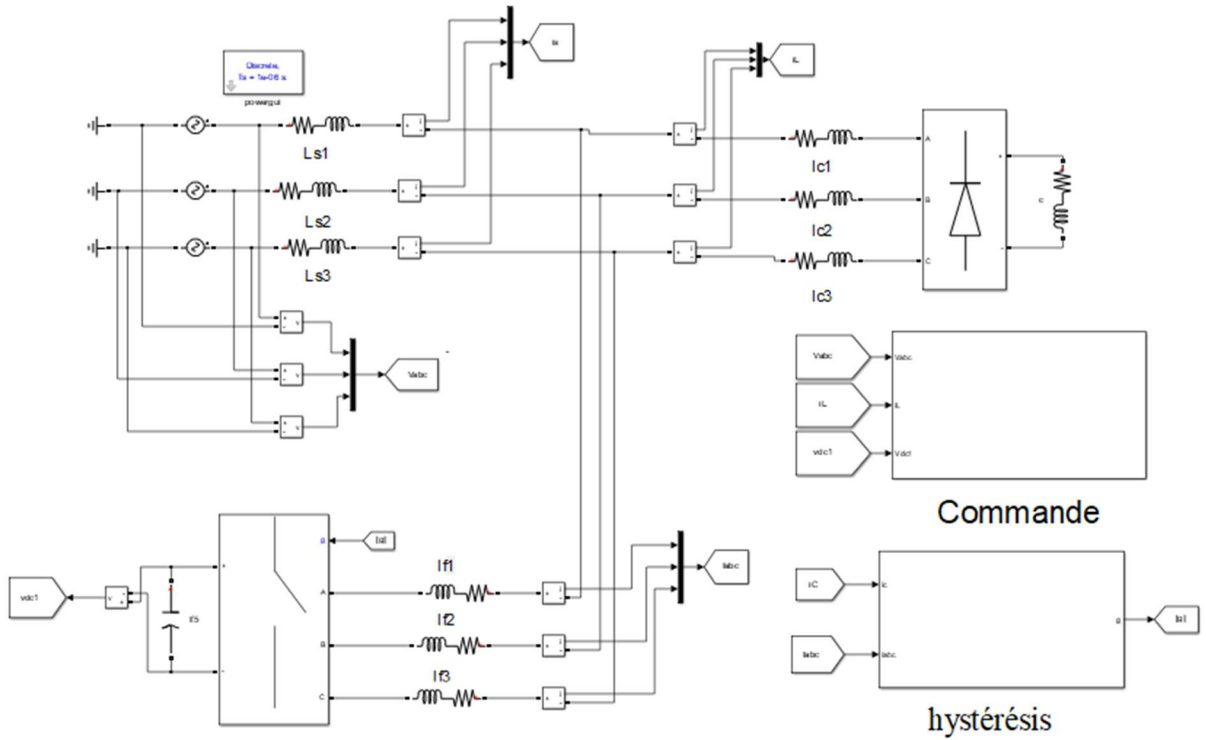


Figure I.13 : Commande directe utilisant la méthode PQ

Les valeurs des paramètres sont données en Annexe A. Les blocks représentant les sous-systèmes sont illustrés en Annexe B. Les résultats de simulation sont illustrés sur les figures suivantes :

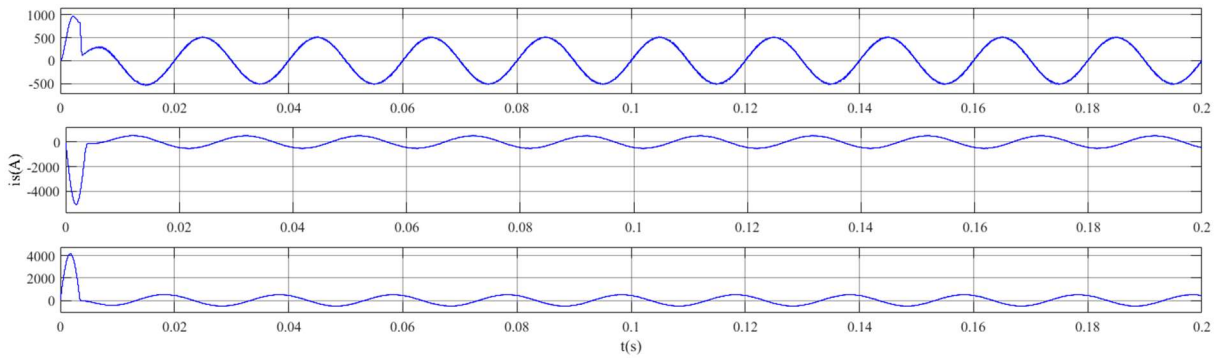


Figure I.14 : Courant de source après filtrage

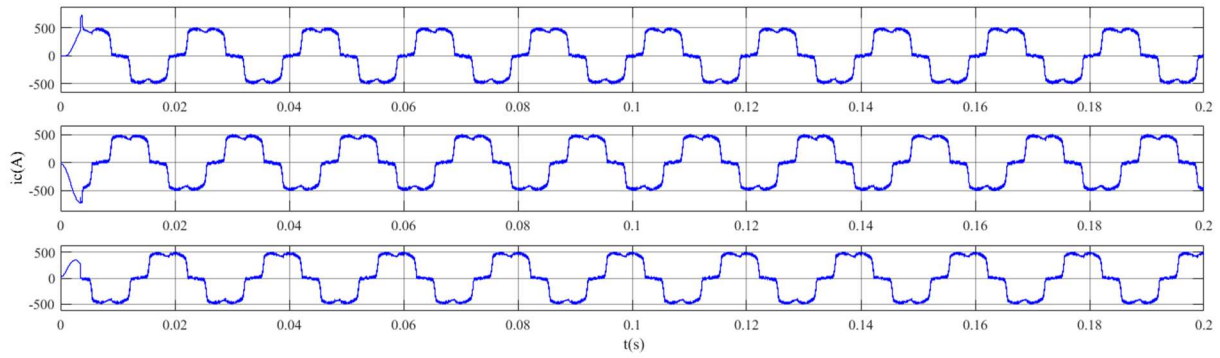


Figure I.15 : Courant de charge

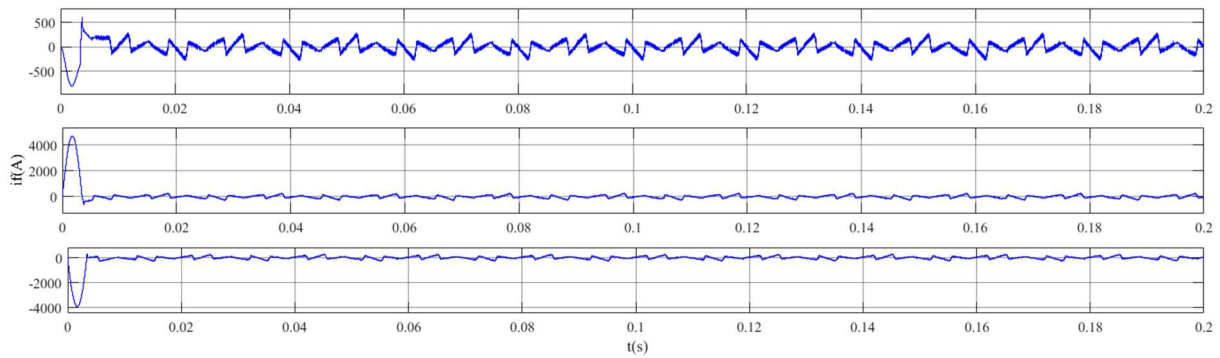


Figure I.16 : Courant injecté par le FAPP

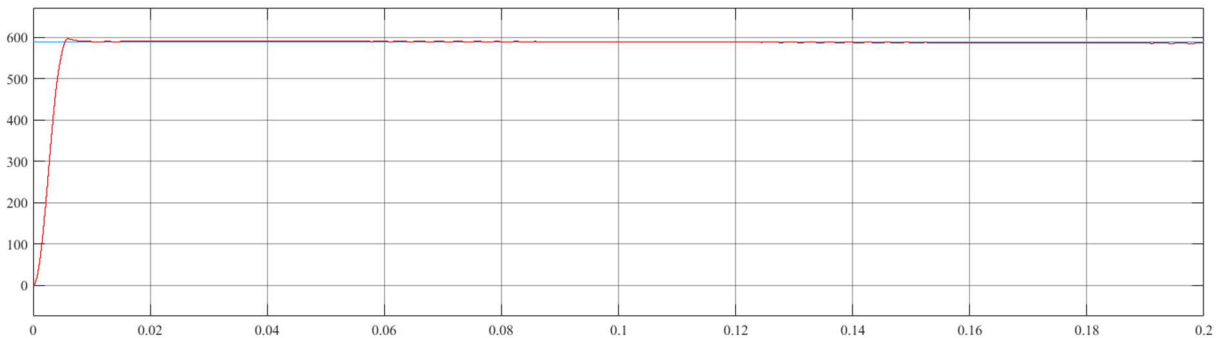


Figure I.17 : Tension aux bornes du condensateur du FAPP

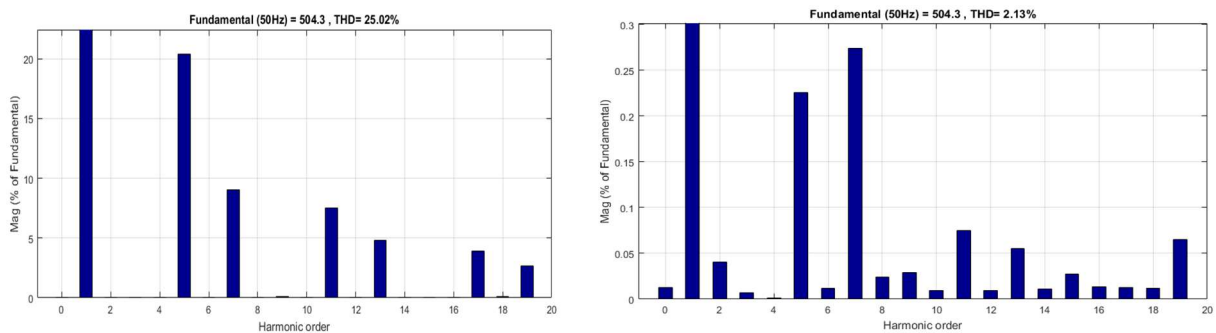


Figure I.18 : FFT et THD du courant de source de la phase 1 avant et après filtrage.

Maintenant, Nous allons utiliser une MLI à dent de scie pour commander les interrupteurs du FAP.

Les valeurs des paramètres sont données en Annexe A. Les blocks représentant les sous-systèmes sont illustrés en Annexe B. Les résultats de simulation sont illustrés sur les figures suivantes :

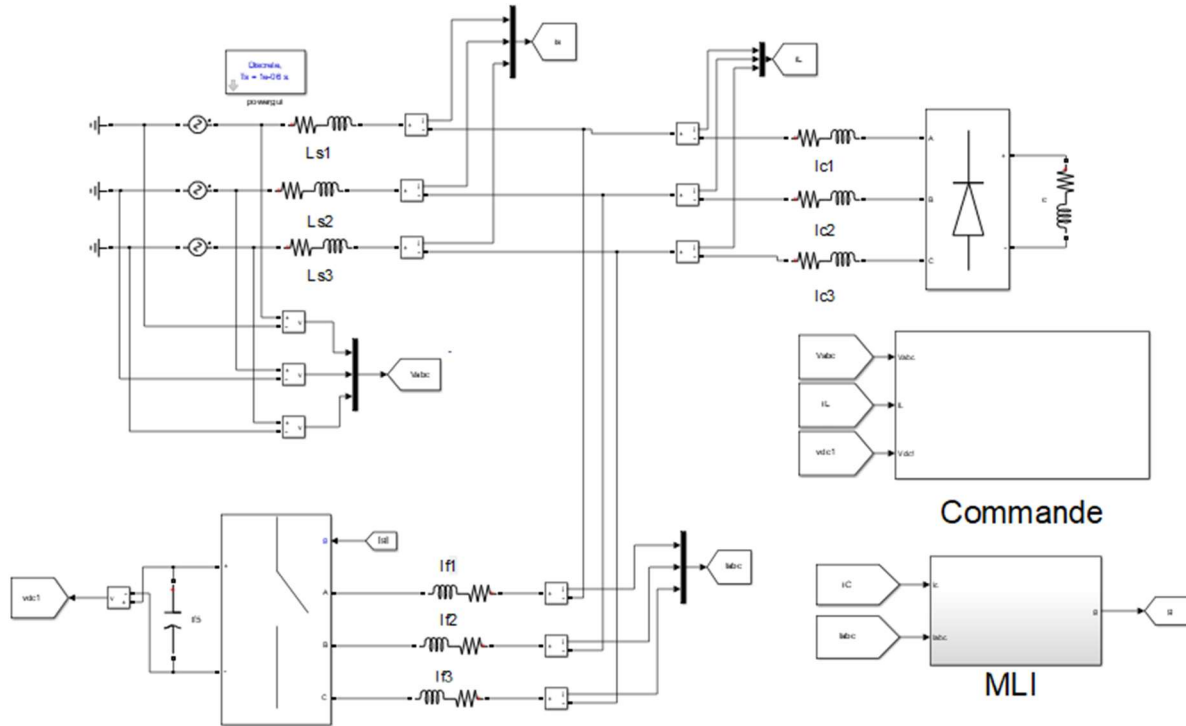


Figure I.19 : Commande directe utilisant la méthode PQ par MLI

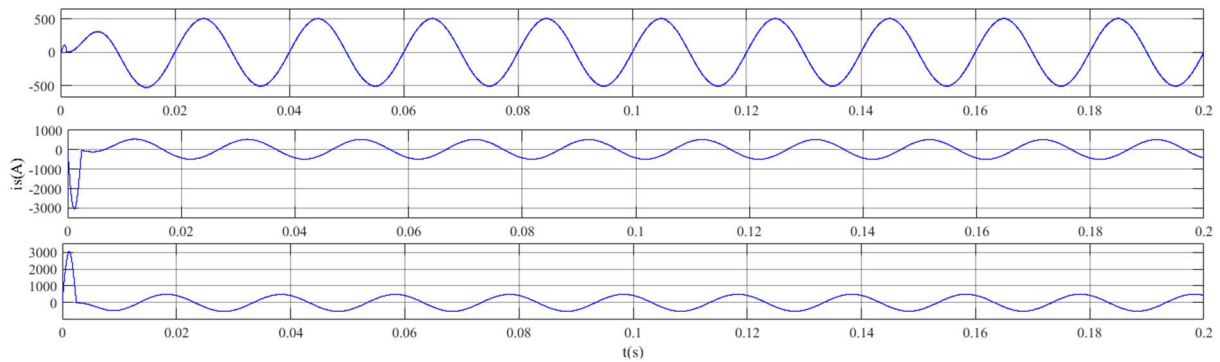


Figure I.20 : Courant de source après filtrage

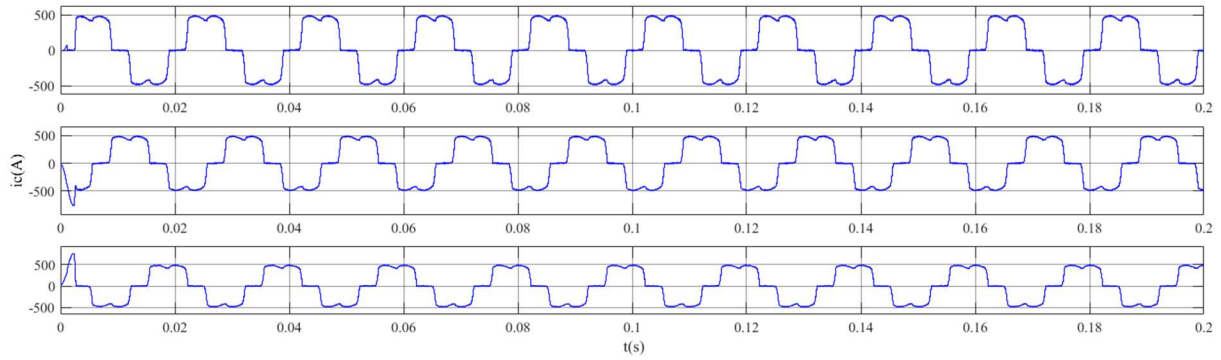


Figure I.21 : Courant de charge

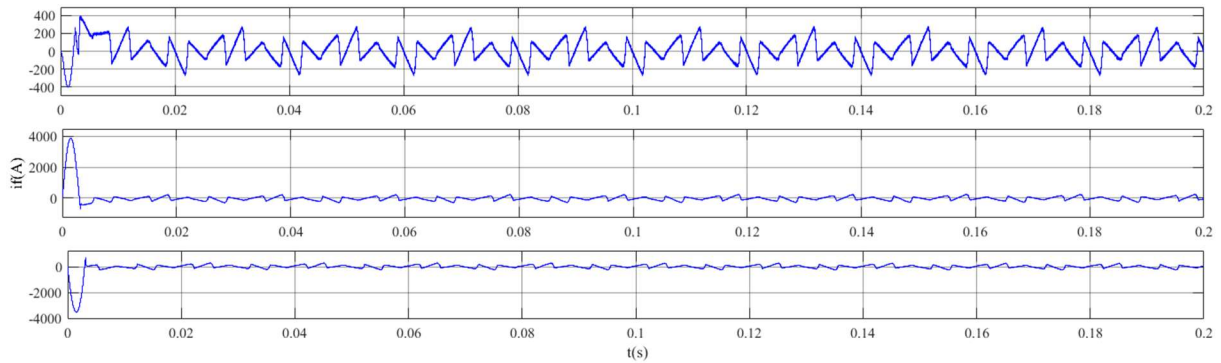


Figure I.22 : Courant injecté par le FAPP

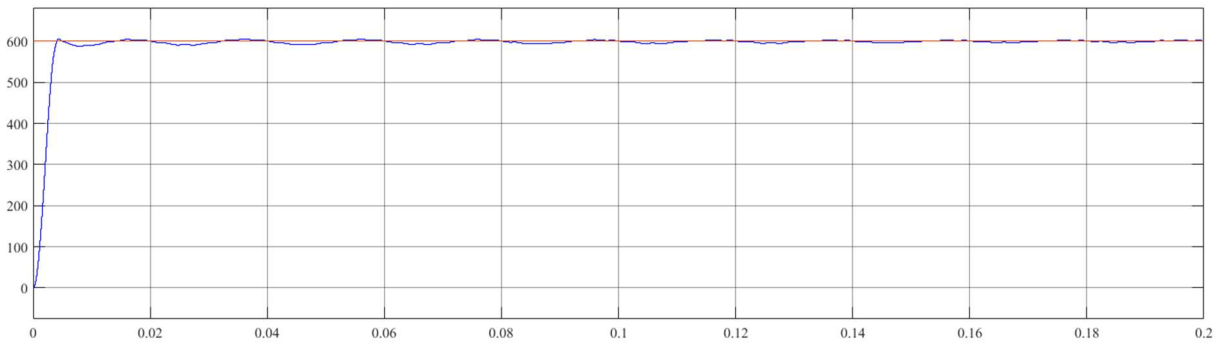


Figure I.23 : Tension aux bornes du condensateur du FAPP

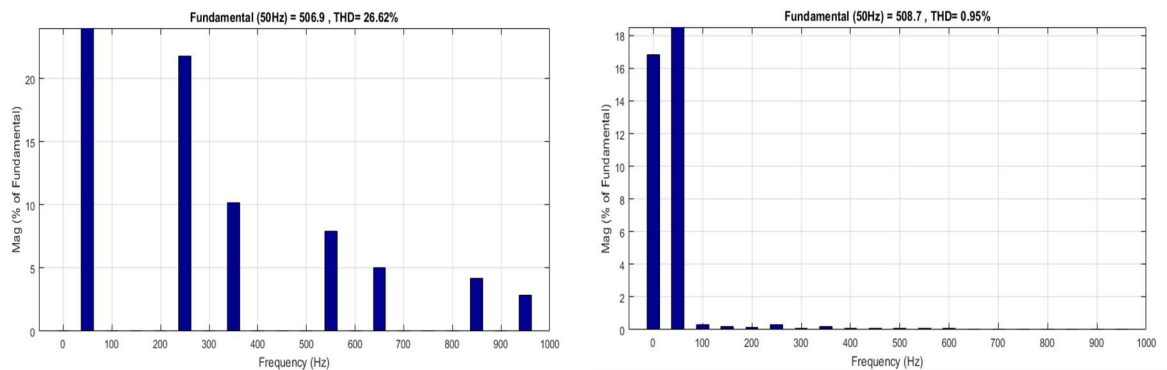


Figure I.24 : FFT et THD du courant de source de la phase 1 avant et après filtrage.

Interprétation des résultats

Nous remarquons que les deux simulations (commande directe de type PQ utilisant une hystérésis et l'autre utilisant une MLI) permettent de montrer une tension constante aux bornes du condensateur. De plus, nous voyons que le THD après filtrage des deux simulations est inférieur à 5%, pour le premier il est à 2.13% et le second il est à 0.95%.

Maintenant nous allons utiliser un FAPP à commande indirecte utilisant la méthode PQ. Nous allons utiliser ici aussi au début une hystérésis pour commander les interrupteurs du FAP.

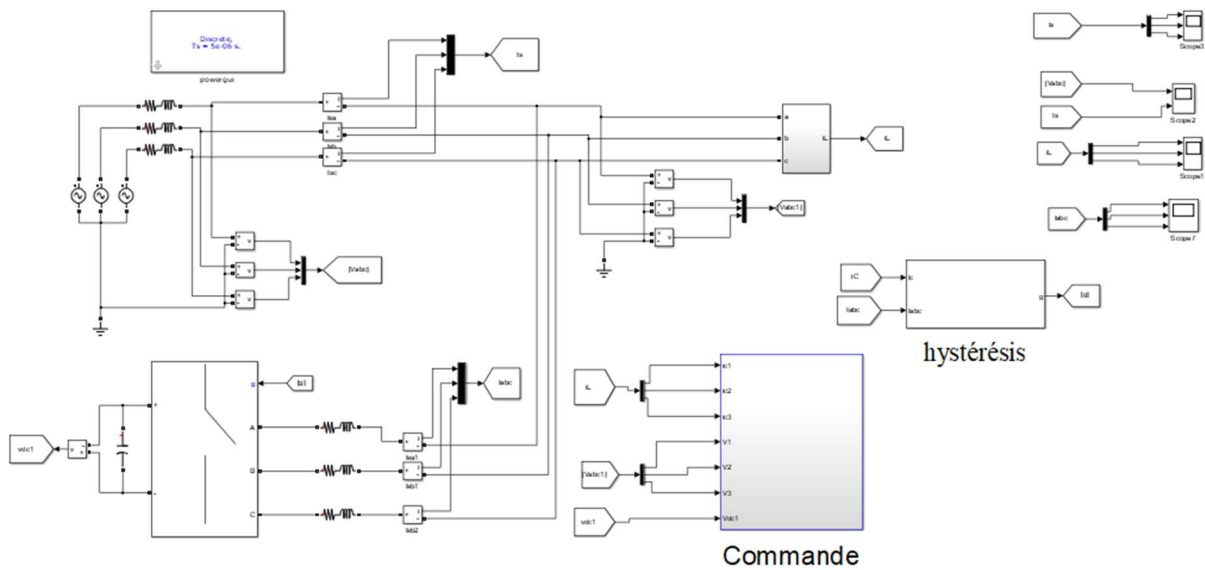


Figure I.25 : Commande indirecte utilisant la méthode PQ

Les valeurs des paramètres sont données en Annexe A. Les blocks représentant les sous-systèmes sont illustrés en Annexe B. Les résultats de simulation sont illustrés sur les figures suivantes :

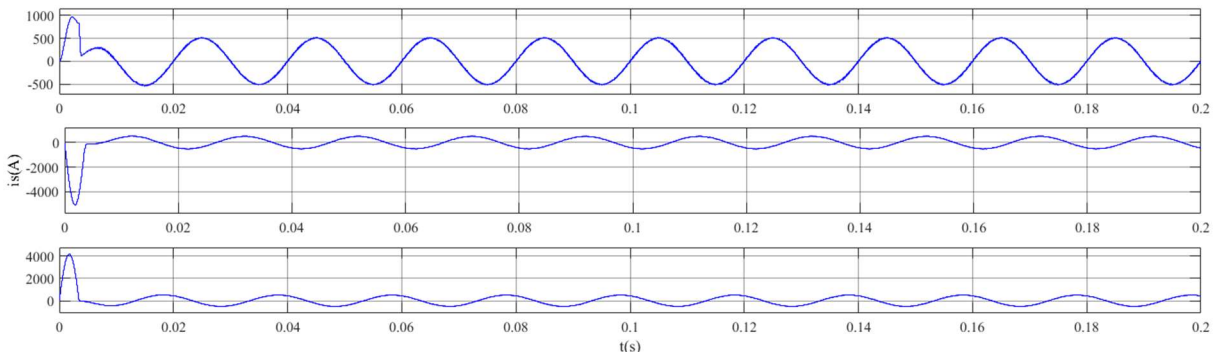


Figure I.26 : Courant de source après filtrage

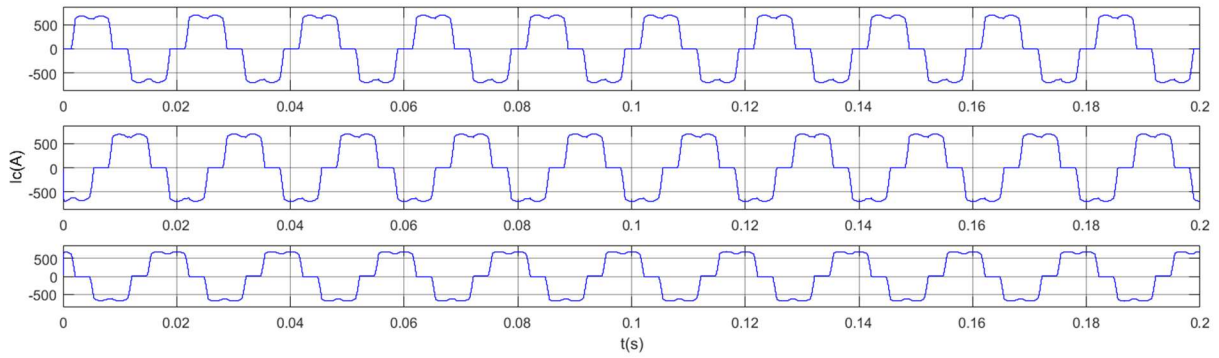


Figure I.27 : Courant de charge

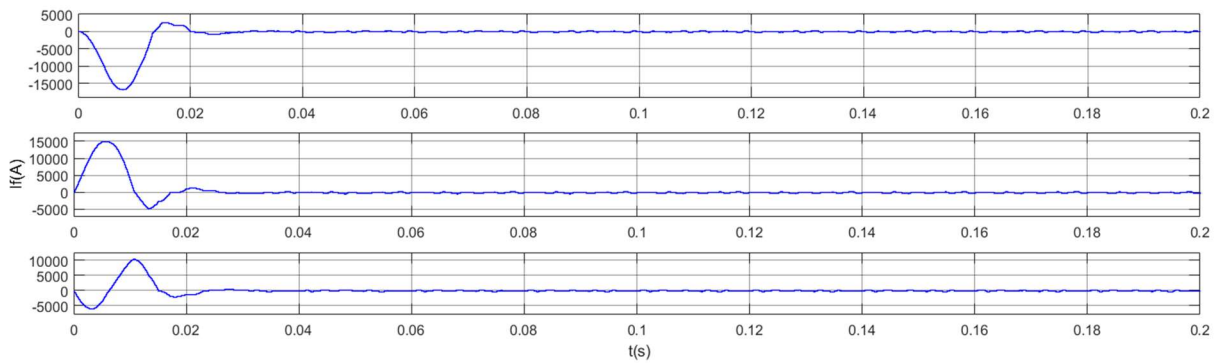


Figure I.28 : Courant injecté par le FAPP

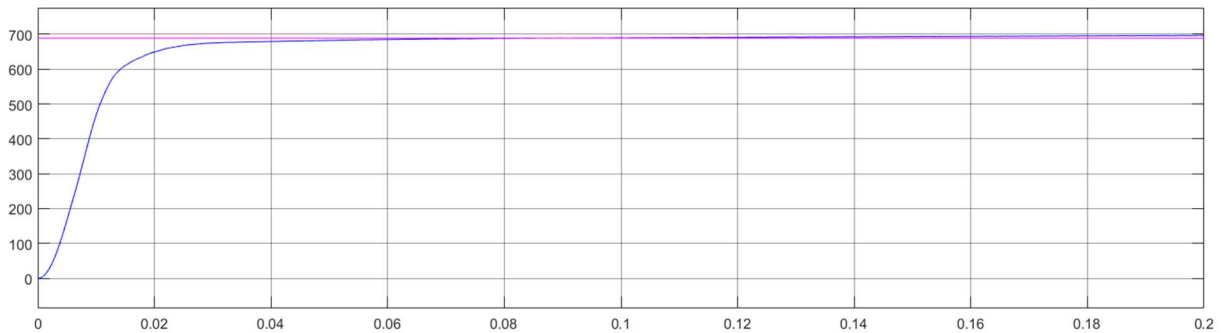


Figure I.29 : Tension aux bornes du condensateur du FAPP

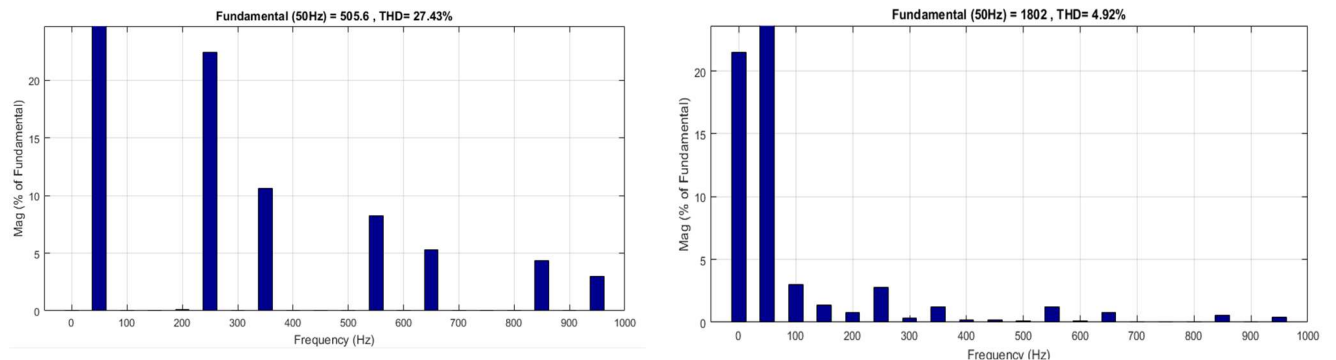


Figure I.30 : FFT et sont THD du courant de source de la phase1 avant et après filtrage.

Pour terminer, Nous allons utiliser une MLI à dent de scie pour commander les interrupteurs du FAP. Les résultats de simulation sont illustrés sur les figures suivantes :

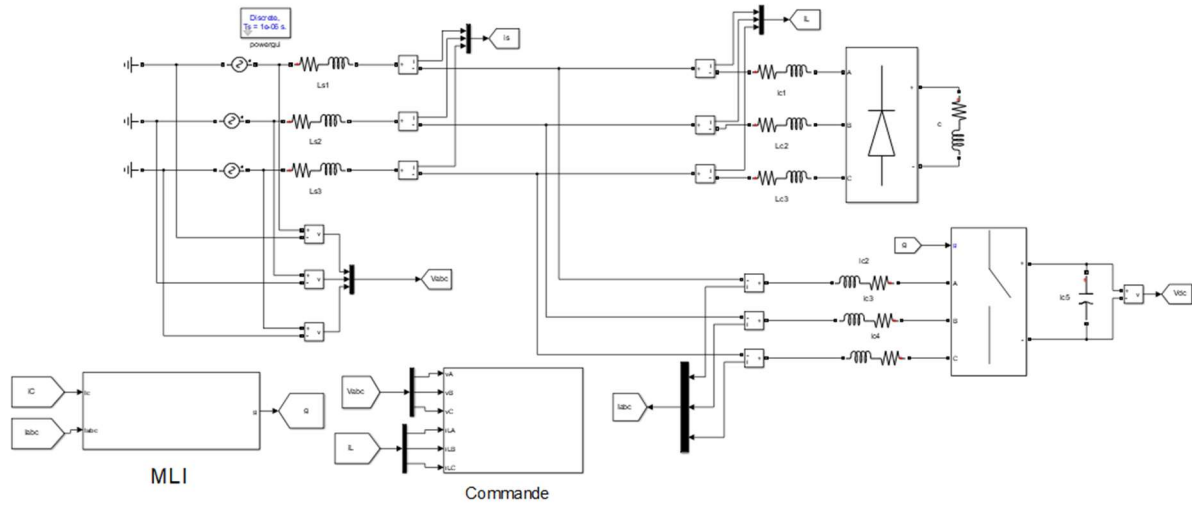


Figure I.31 : Commande indirecte utilisant la méthode PQ par MLI

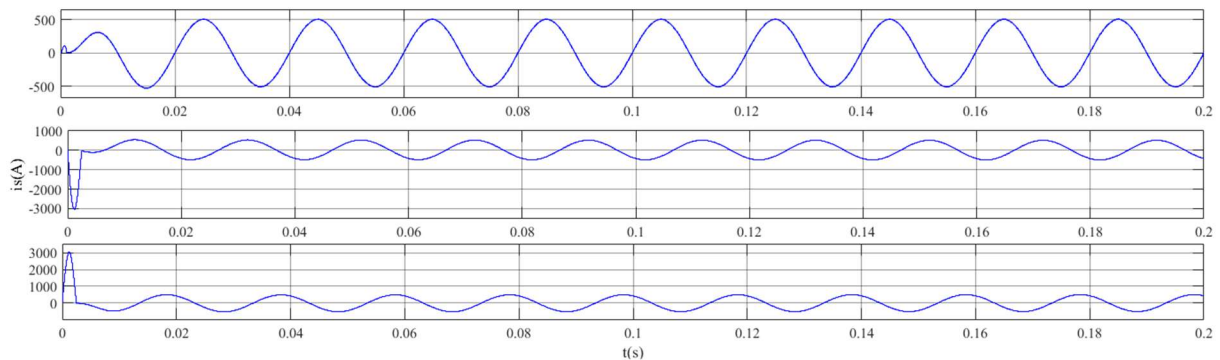


Figure I.32 : Courant de source après filtrage

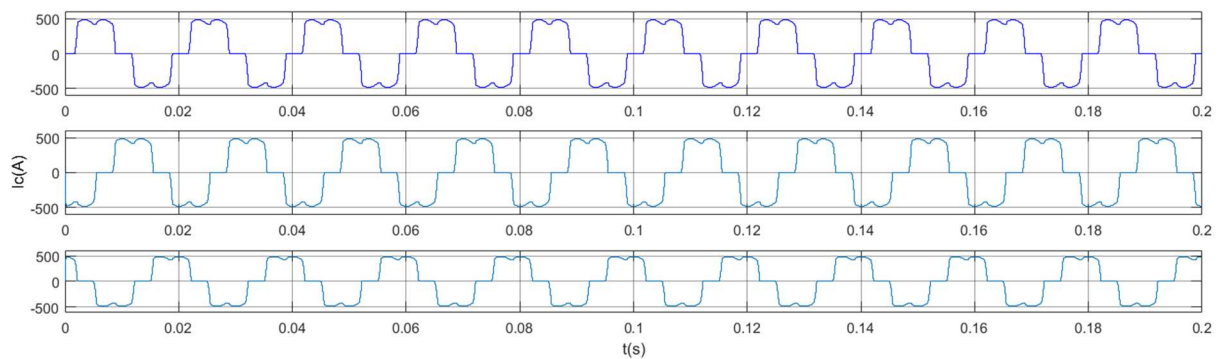


Figure I.33 : Courant de charge

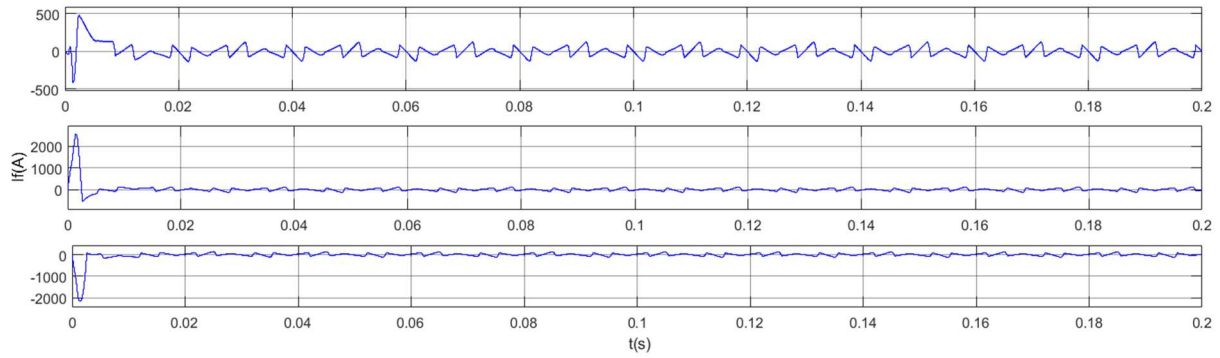


Figure I.34 : Courant injecté par le FAPP

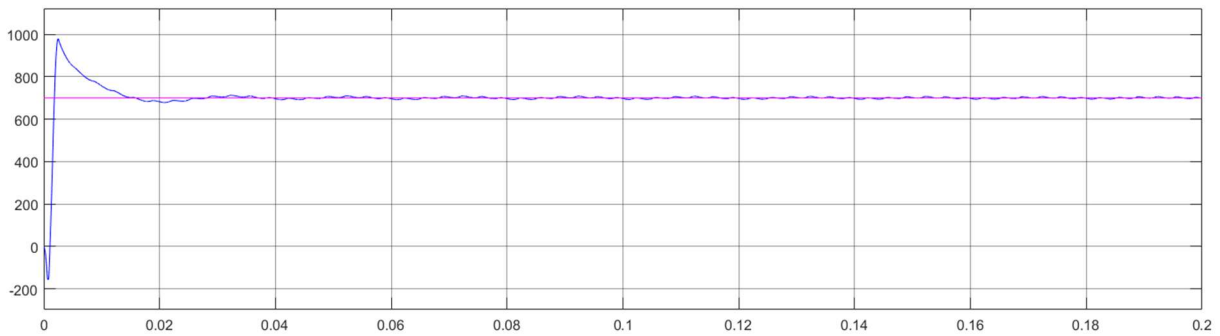


Figure I.35 : Tension aux bornes du condensateur du FAPP

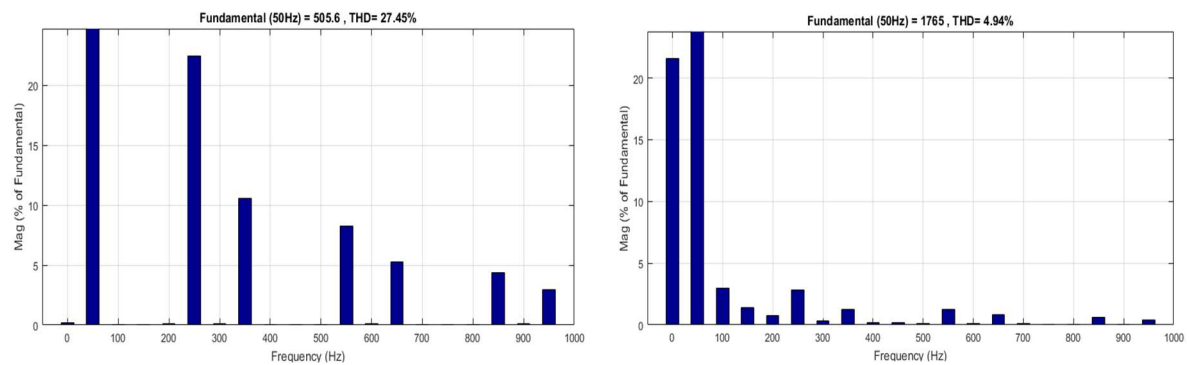


Figure I.36 : FFT et THD du courant de source de la phase 1 avant et après filtrage.

Interprétation de résultat :

Nous remarquons des deux simulations (commande indirecte de type PQ utilisant une hystérésis et l'autre utilisant une MLI) que la tension aux bornes du condensateur est constante. De plus, nous voyons que le THD après filtrage des deux simulations est inférieur à 5%, pour le premier il est à 4.92% et le deuxième il est à 4.94%.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les fondamentaux des Filtres Actifs de Puissance (FAP) à trois bras, en abordant en générale leurs principes de fonctionnement, leurs architectures, ainsi que les stratégies de commande directe et indirecte. Le FAP triphasé constitue une solution efficace pour la compensation des harmoniques et l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux à trois fils. Nous avons mis en évidence les avantages et les limites des deux types de commande. Ces généralités posent les bases nécessaires pour l'étude approfondie d'un FAP parallèle à deux bras avec condensateur à point milieu, sujet central de ce mémoire. Le chapitre suivant sera donc consacré aux FAPP à deux bras avec condensateur à point milieu.

Chapitre II

Généralité sur les FAPP deux bras à commande directe et indirecte

Introduction

L'étude des topologies de FAPP à deux bras avec condensateur à point milieu (FAPP2BPM) et les stratégies de commande directe et indirecte revêt une grande importance dans les applications de filtrage. D'un autre côté ces topologies permettent la réduction des pertes car utilisant moins de semi-conducteur.

L'objectif de ce chapitre est de fournir une compréhension approfondie des concepts fondamentaux liés à cette structure et aux stratégies de commande directe et indirecte qui leurs sont appliquées.

II.1 Présentation de la structure du FAP à deux bras avec condensateur à point milieu (FAPP2BPM)

Les FAPP2BPM sont utilisées pour injecter les courants harmoniques sur deux phases du réseau électrique et d'obtenir une compensation de la troisième phase via le point milieu qui existe entre les deux condensateurs. Nous utilisons cette topologie pour la compensation des réseaux électrique triphasés à trois fils sans neutre [18] et [19].

Un FAPP2BPM est constitué de deux bras composés chacun de deux interrupteurs d'une manière d'un onduleur monophasé, cependant chaque bras est connecté à une phase. Le FAPP2BPM est connecté en parallèle au réseau électrique. Côté continue de l'onduleur deux condensateurs sont utilisés dont le point milieu est connecté à la troisième phase, comme le montre la figure II.1.

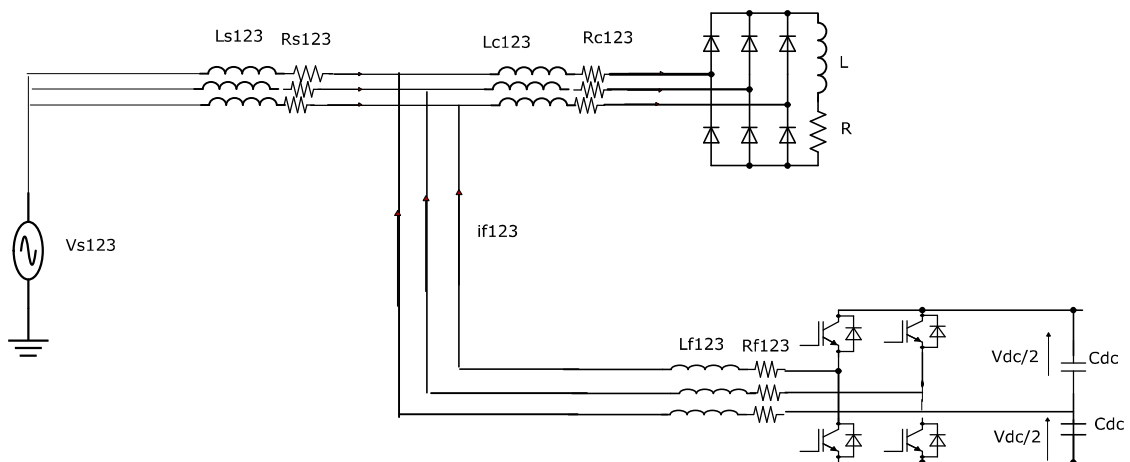


Figure II.1 : FAPP2BPM connecté au réseau électrique

Le principe de fonctionnement des FAPP2BPM repose sur une commutation alternée des interrupteurs, le détail des commutations à été développé dans [20].

II.2 Etude de la partie puissance

Dans cette partie nous avons étudié une topologie de FAPP à deux bras avec condensateur à point milieu. Les différences entre cette topologie et le FAP à trois bras sont donnés dans le tableau II.1 [21], [22] et [23].

Critère	FAP a deux bras avec condensateur à point milieu	FAP a trois bras.
Nombre de bras (interrupteurs)	2 bras (chaque bras a 2 interrupteurs, souvent de type MOSFET/IGBT).	3 bras (comme un onduleur triphasé)
Connexion des phases	Compense directement 2 phases, la compensation de la 3 ^{ème} phase est obtenu par le point milieu coté continue.	Compense directement les 3 phases.
Nécessite un point milieu	Oui	Non
Capacité de compensation	Limitée aux charges équilibrées.	Limitée aux charges équilibrées.
Complexité de commande	Plus simple.	Plus complexe.
Coût et composants	Moins couteux, moins de composants.	Plus couteux, plus de composants.
Applications typiques	Compensation des harmoniques de courant des réseaux triphasés sans neutre.	Compensation des harmoniques de courant des réseaux triphasés sans neutre.

Tableau II.1 : comparaison entre FAP a deux bras et FAP a trois bras

Maintenant que nous avons montré la différence entre le FAPP à 2 bras avec condensateur à point milieu et le FAPP à 3 bras, nous allons montrer maintenant comment fonctionne le FAPP à 2 bras avec condensateur à point milieu.

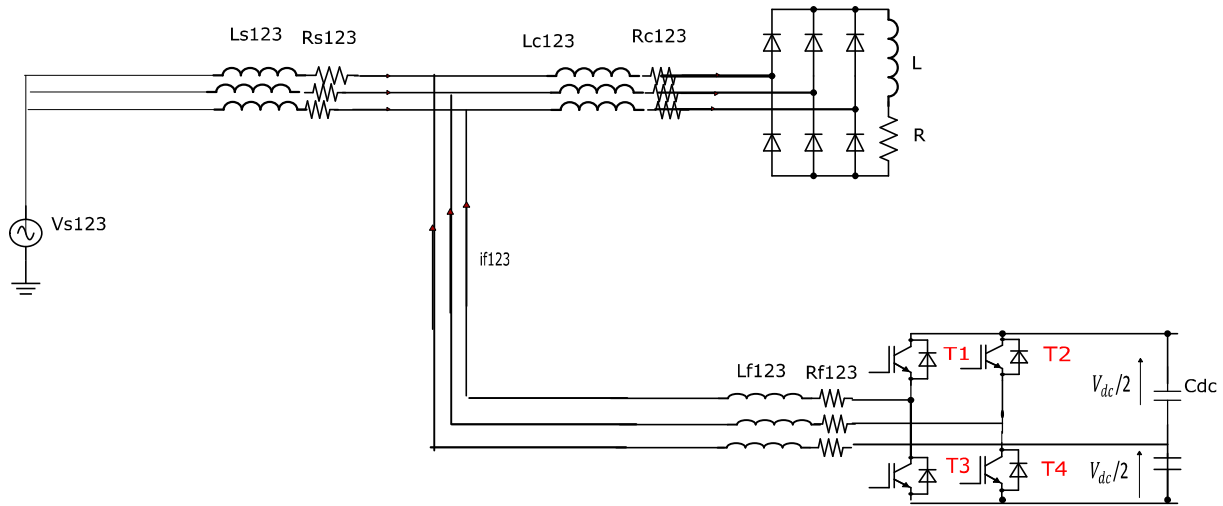


Figure II.2 : Filtre actif de puissance à deux bras connectés en parallèle aux réseaux électriques

De la figure II.2, nous définissons les états des bras de l'onduleur de la manière suivante :

$$S_1 = \begin{cases} 1 & T_1 \text{ est fermé et } T_3 \text{ est ouvert} \\ 0 & T_1 \text{ est ouvert et } T_3 \text{ est fermé} \end{cases}$$

$$S_2 = \begin{cases} 1 & T_2 \text{ est fermé et } T_4 \text{ est ouvert} \\ 0 & T_2 \text{ est ouvert et } T_4 \text{ est fermé} \end{cases}$$

Sachant que les tensions de sortie de l'onduleur sont données par les expressions suivantes :

$$V_{f1n} = V_{f10} + V_{0n} \tag{eq.I.1}$$

$$V_{f2n} = V_{f20} + V_{0n} \tag{eq.I.2}$$

$$V_{f3n} = V_{0n} \tag{eq.I.3}$$

En sommant les eq.I.1, eq.I.2 et eq.I.3 nous obtenons :

$$V_{0n} = -\frac{(V_{f10} + V_{f20})}{3} \tag{eq.I.4}$$

En mettant l'expression eq.I.4 dans eq.I.1, eq.I.2 et eq.I.3, nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} V_{f10} \\ V_{f20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_1 - 1 \\ 2S_2 - 1 \end{bmatrix} \cdot \frac{V_{dc}}{2} \tag{eq.I.5}$$

Puisque les variables S_1 et S_2 prennent chacune deux valeurs, nous observons pour cette topologie quatre états possibles, présentées dans le tableau II.2 [24].

Les tensions peuvent également être représentées sous la forme d'un vecteur v_f suivant les axes $\alpha\beta$. Les quatre vecteurs tensions correspondantes aux quatre possibilités de la commande sont représentées sur la figure II.3.

K	S_2	S_1	V_{f1n}	V_{f2n}	V_{f3n}
0	0	0	$-V_{dc}/6$	$-V_{dc}/6$	$-V_{dc}/3$
1	0	1	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	0
2	1	0	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	0
3	1	1	$V_{dc}/6$	$V_{dc}/6$	$-V_{dc}/3$

Tableau II.2 : Tension générées par l'onduleur de tension à deux bras

Cette figure II.3 illustre les tensions générées par cette topologie qui sont également sous forme d'un vecteur $\vec{V}_f(K)$

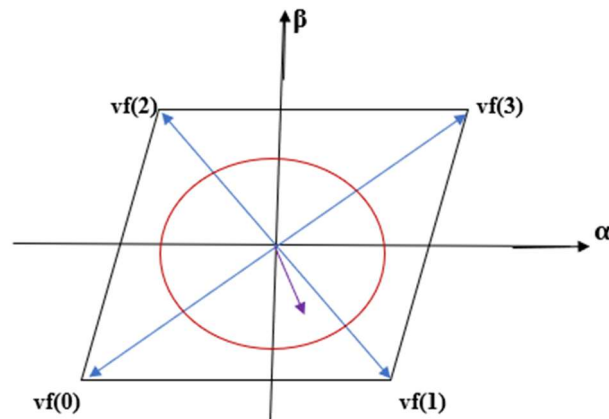


Figure II.3 : Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur de tension à deux bras

II.3 Etude de la partie commande

Nous allons maintenant présenter quelque commande additionnelle que nous allons également utiliser dans nos simulations.

II.3.1 Méthode (PQ) et la méthode (SRF) modifier

Le FAPP2BPM peut utiliser les stratégies de commande PQ et SRF qui ont été présentées au chapitre 1. Cependant, le seul changement que nous trouvons pour ces commandes est que la MLI contrôlera cette fois-ci deux bras au lieu de trois. D'un autre côté nous devons réguler correctement les deux condensateurs pour avoir une tension continue côté continu de l'onduleur du FAPP2BPM [25] et [26].

La stratégie de commande PQ et SRF utilise pour extraire la puissance harmonique un filtre passe haut lorsque la commande utilisée est directe et un filtre passe bas lorsque la commande utilisée est indirecte. Nous allons supprimer ce filtre et le remplacer par un filtre dit multi variable (FMV) [27].

Le filtre multi variable est un filtre développé par [28] permettant de filtrer directement les courants selon l'axe $\alpha\beta$. L'expression générale de ce filtre est donnée par l'équation :

$$\hat{v}_\alpha(s) = \frac{k}{s} [v_\alpha(s) - \hat{v}_\alpha(s)] - \frac{\omega_c}{s} \hat{v}_\beta(s) \tag{eq.I.6}$$

$$\hat{v}_\beta(s) = \frac{k}{s} [v_\beta(s) - \hat{v}_\beta(s)] + \frac{\omega_c}{s} \hat{v}_\alpha(s) \tag{eq.I.7}$$

Le schéma de ce filtre est illustré sur la figure suivante :

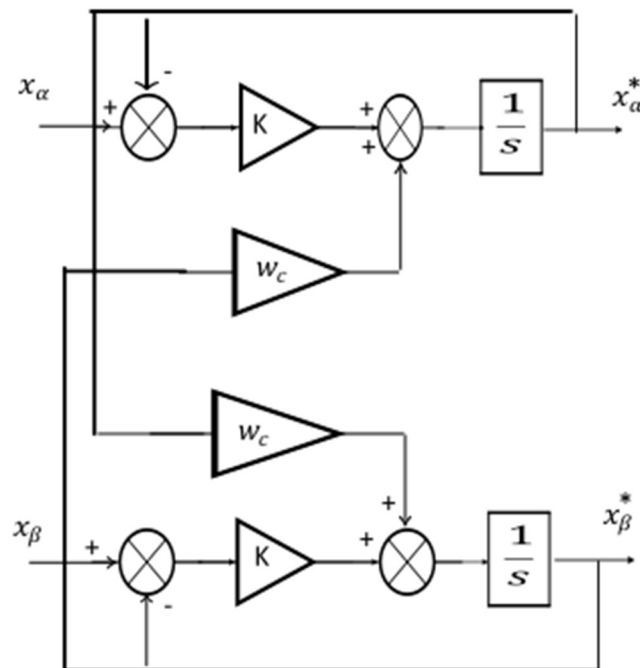


Figure II.4 : Structure d'un filtre multi-variable (FMV)

Ce FMV a été introduit dans la commande PQ ce qui nous a donné la figure II.5.

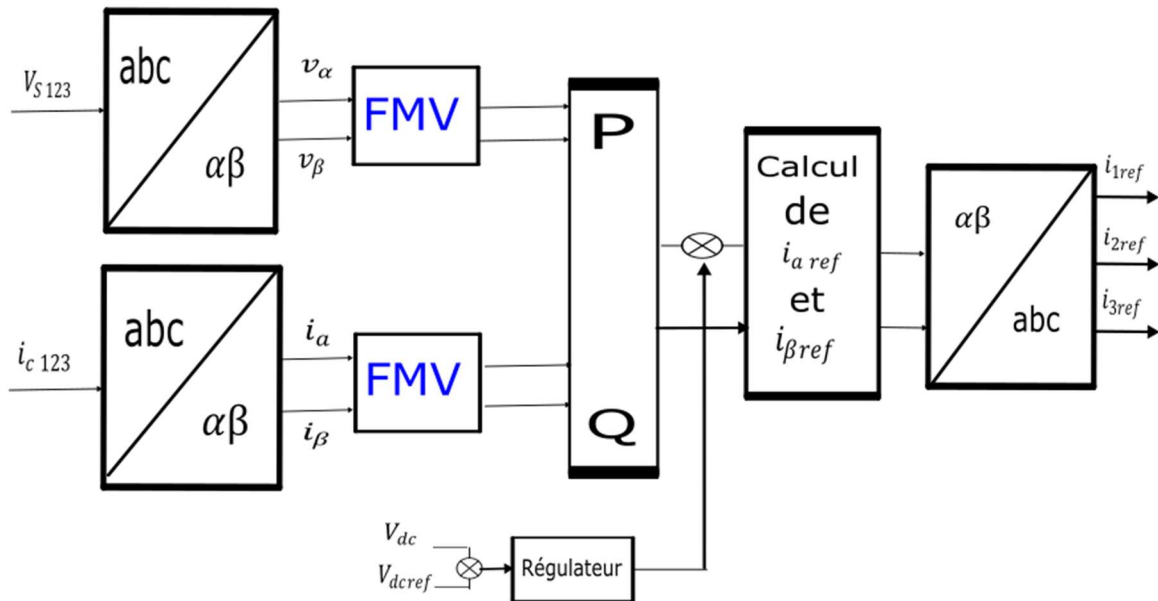


Figure II.5 : Commande indirecte PQ utilisant le FMV

Et il a été introduit dans la commande SRF ce qui nous a donné la figure II.6.

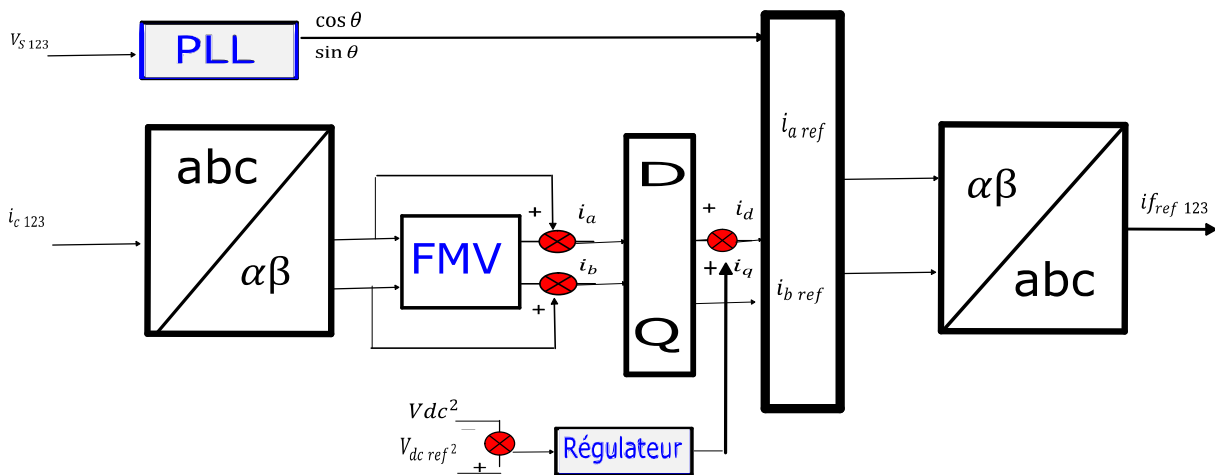


Figure II.6 : Commande directe DQ utilisant le FMV

II.3.2 Commande généralisée du courant de Fryze

Cette stratégie de commande dite généralisée du courant de Fryze, présenté dans [29] et [30] a comme avantage par rapport aux commandes cité plus haut, la réduction du calcul, puisqu'elle fonctionne directement avec les tensions de phase et les courants de ligne. De plus, l'élimination de la transformation de Concordia rend cette stratégie de contrôle simple. La figure II.7 montre la stratégie de contrôle complète. La conductance équivalente instantanée G_e est calculée à

partir de la puissance active instantanée triphasée par la tension globale instantanée au carré, comme le montre l'équation I.8. La conductance moyenne G_e est obtenue en filtrant G_e par un filtre passe-bas. Les portions actives instantanées i_{wa} , i_{wb} et i_{wc} du courant de charge sont directement obtenues en multipliant G_e par les tensions de phase v_a , v_b , v_c respectivement, comme le montre l'équation I.9. Pour terminer, nous faisons la différence entre le courant i_{wa} , i_{wb} et i_{wc} et le courant de charge i_{La} , i_{Lb} et i_{Lc} comme le montre l'équation I.10.

$$G_e = \frac{v_a i_{ca} + v_b i_{cb} + v_c i_{cc}}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \quad \text{eq.I.8}$$

$$\begin{aligned} i_{wa} &= (G_e + G_{perte})v_a \\ i_{wb} &= (G_e + G_{perte})v_b \\ i_{wc} &= (G_e + G_{perte})v_c \end{aligned} \quad \text{eq.I.9}$$

$$\begin{aligned} i_{ha} &= (i_{wa} - i_{La}) \\ i_{hb} &= (i_{wb} - i_{Lb}) \\ i_{hc} &= (i_{wc} - i_{Lc}) \end{aligned} \quad \text{eq. I.10}$$

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

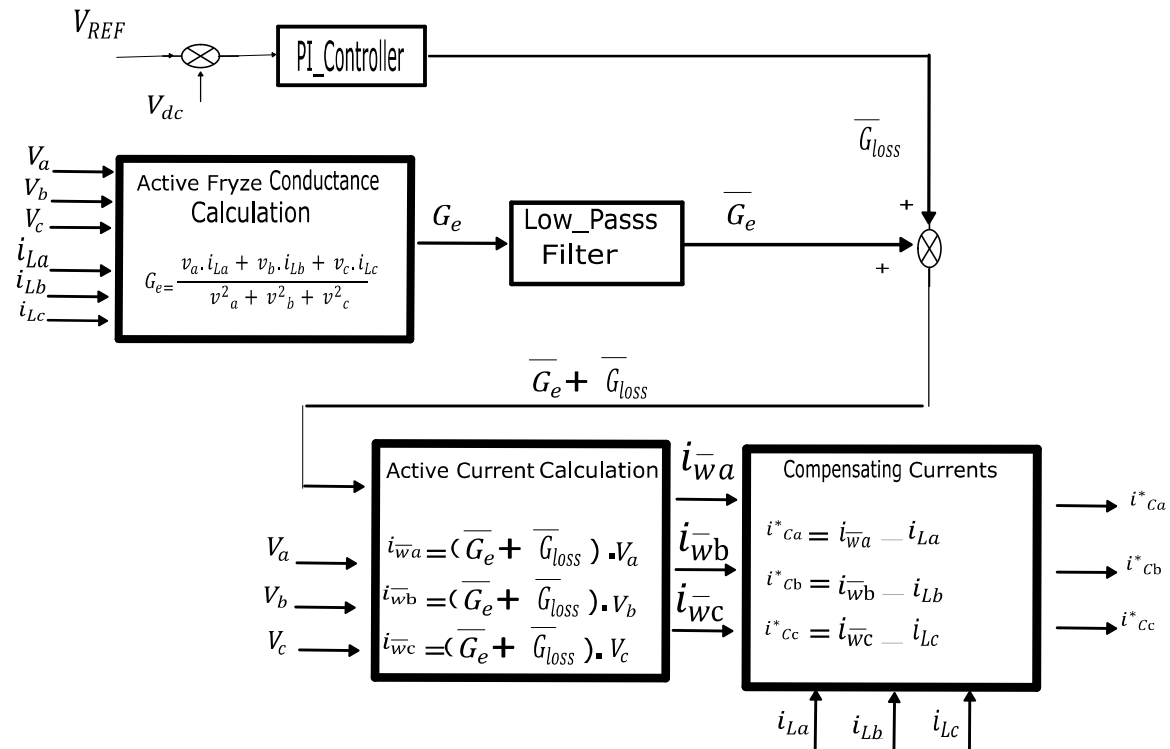


Figure II.7 : Commande généralisée du courant de Fryze

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre 2 les FAPP à deux bras avec condensateur à point milieu. Nous avons ensuite présenté deux autres commandes en plus de ce qui ont été proposées dans le chapitre 1. Nous allons dans le chapitre 3 présenter les résultats de simulation pour cette topologie pour différentes stratégies de commande, que ce soit pour une commande directe ou une commande indirecte.

Chapitre III

Résultats des simulations des Stratégies de Commande pour FAP à deux bras à point milieu

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats des simulations obtenus pour un système équilibrés utilisant un filtre actif de puissance parallèle à deux bras avec condensateur à point milieu en appliquant les commandes directes et les commandes indirectes utilisant chacun quatre stratégies de commandes.

III.1 Méthode directe des puissances instantanées avec une hystérésis

Soit le système complet (voir figure III.1) constitué du réseau électrique alimentant une charge non linéaire qui à son tour alimente une charge RL. Le FAPP2BPM est connecté en parallèle au réseau électrique. Les paramètres de notre topologie et des stratégies de commande utilisé sont présenté en Annexe.

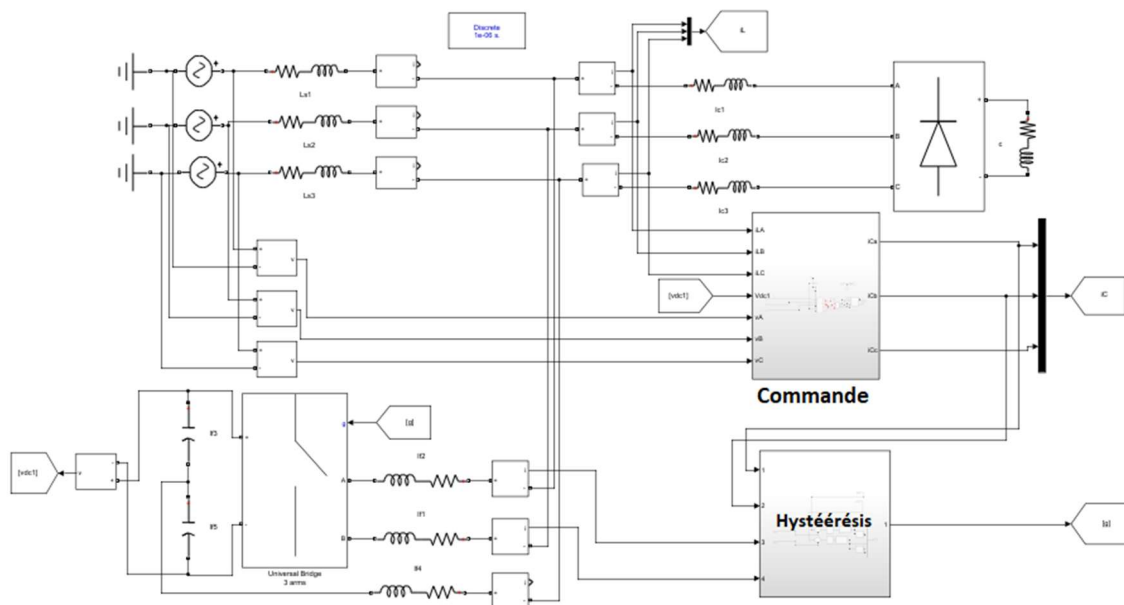


Figure III.1 : Commande directe avec hystérésis

Remarque : Nous n'allons pas dans les prochaines simulations présenter la figure du système complet car les deux seuls blocs qui changeront sont le block de la commande et le block d'hystérésis. Par conséquent nous les citerons directement dans les titres de chaque simulation.

Chapitre III Résultats des simulations des Stratégies de Commande pour FAP à deux bras à point milieu

Pour cette première simulation voici les résultats obtenus :

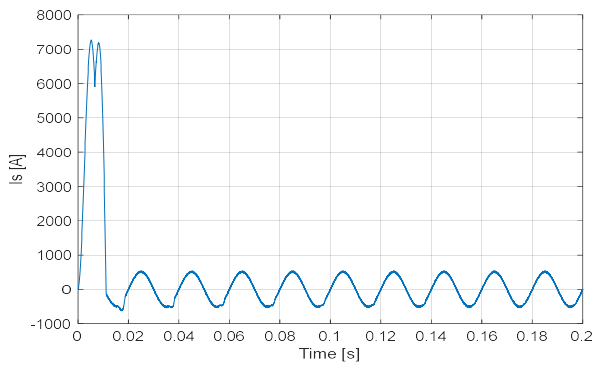


Figure III.2 : Courant de source après filtrage

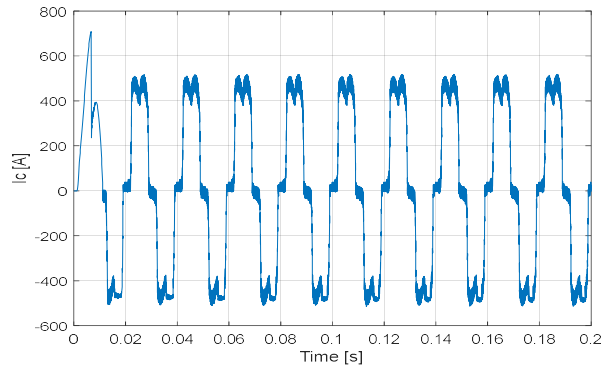


Figure III.3 : Courant de charge

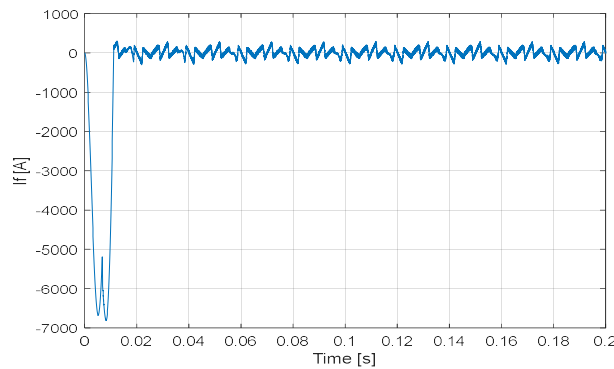


Figure III.4 : Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM

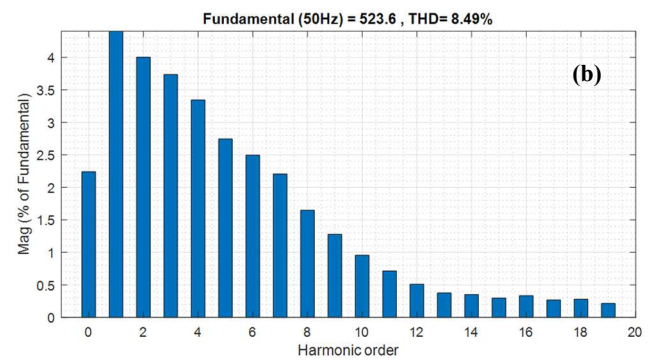
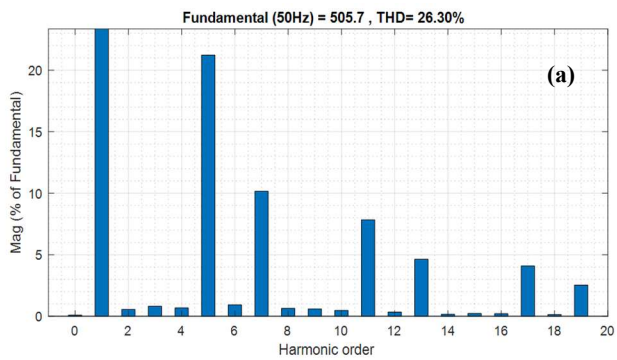


Figure III.5 : FFT du courant de source (a) Avant filtrage et (b) Après filtrage.

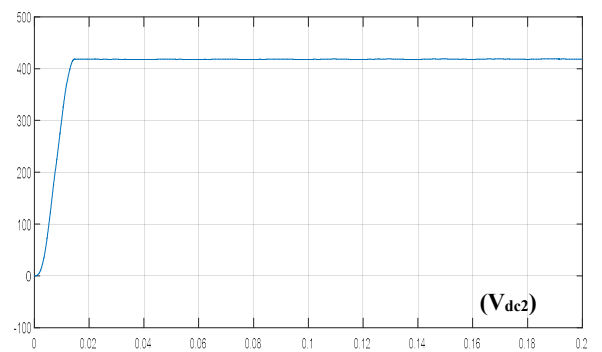
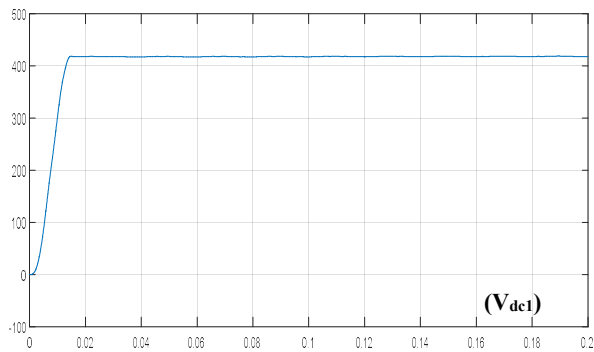


Figure III.6 : Tension aux bornes des deux condensateurs

Chapitre III Résultats des simulations des Stratégies de Commande pour FAP à deux bras à point milieu

Interprétation des résultats

Les figures III.2 et III.3 montrent les courants de source et de charge respectivement avec leurs analyses spectrales qui sont illustrés sur les figures III.5 (a) et (b). Le THD du courant de source après filtrage qui est égale à 8.49% à une valeur supérieure à 5%, ce qui implique qu'il ne respecte pas la norme CEI. Nous remarquons également que la tension au niveau de chaque condensateur est constante.

III.2 Méthode directe des puissances instantanées PQ utilisant une MLI

Nous allons maintenant garder la commande mais cette fois-ci au lieu d'utiliser une hystérésis nous allons utiliser une MLI à dent de scie. Les résultats obtenus pour cette simulation sont comme suite :

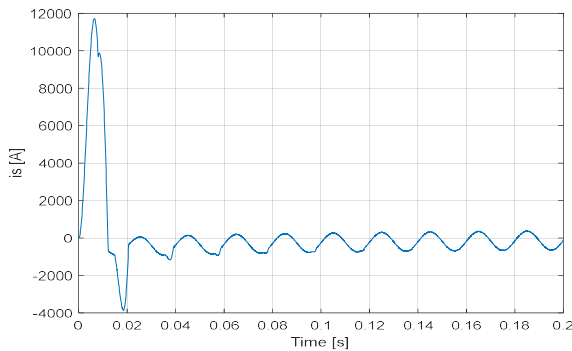


Figure III.7 : Courant de source après filtrage

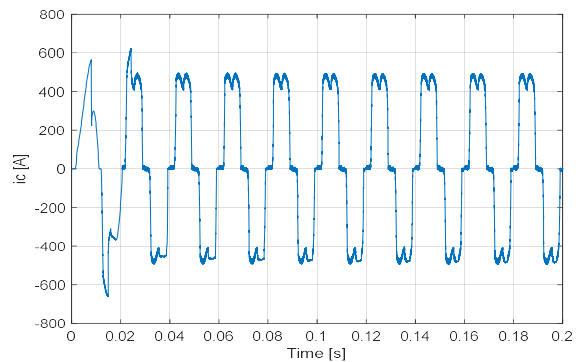


Figure III.8 : Courant de charge

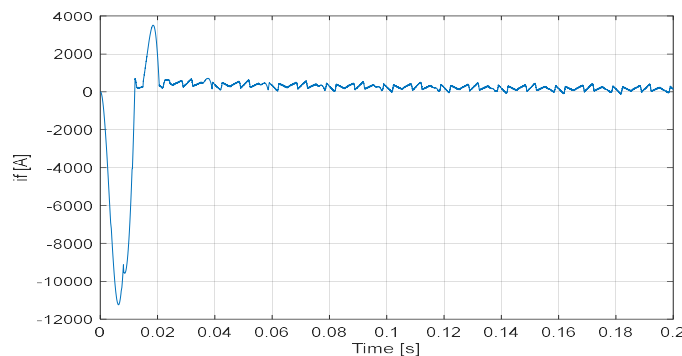


Figure III.9 : Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM

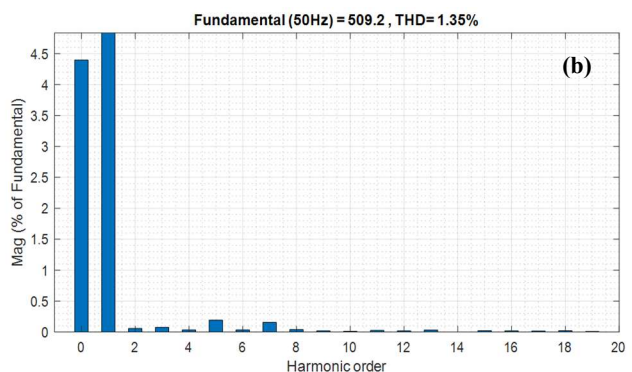
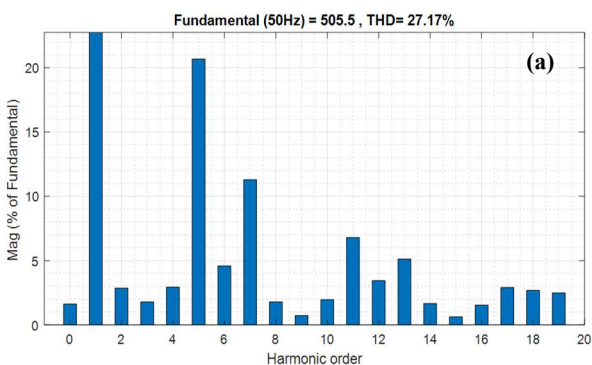


Figure III.10 : FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.

Chapitre III Résultats des simulations des Stratégies de Commande pour FAP à deux bras à point milieu

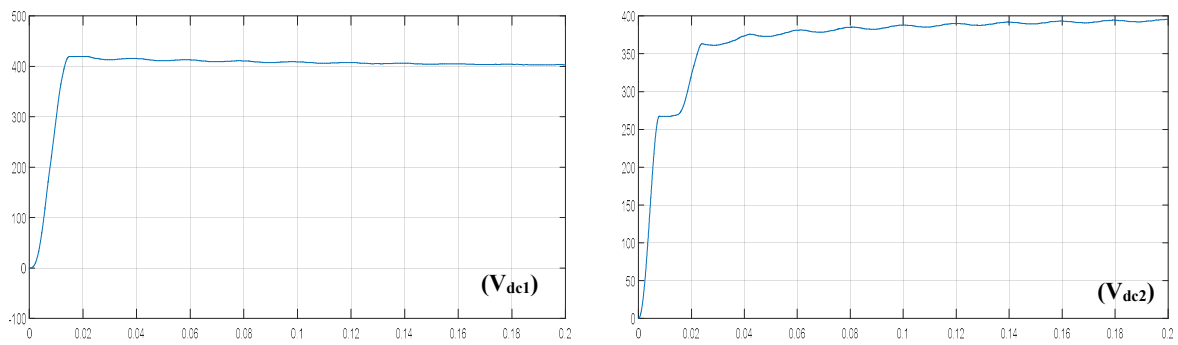


Figure III.11 : Tension aux bornes des Condensateurs

Interprétation des résultats

Nous remarquons de ces figures que le courant de source après filtrage est sinusoïdal et à un THD qui descend jusqu'à 1.35%. Ce THD est inférieur à 5% et respecte la norme CEI. Nous remarquons également que la tension au niveau de chaque condensateur est constante. Ainsi par rapport à la commande précédente, le filtre actif de puissance parallèle élimine très bien les harmoniques de courant.

III.3 Méthode directe des puissances instantanées utilisant deux filtres multi-variable et une hystérésis

Nous allons toujours garder la commande mais cette fois ci nous allons utiliser deux filtres multi-variable qui vont remplacer le filtre passe haut. Nous allons également utiliser une hystérésis pour la commande des interrupteurs de notre FAP à deux bras à point milieu. Les résultats obtenus pour cette simulation sont comme suite :

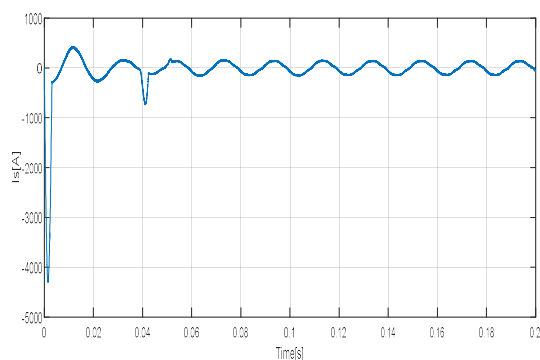


Figure III.12 : Courant de source après filtrage

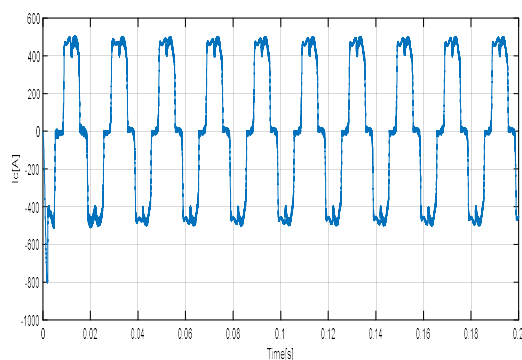


Figure III.13 : Courant de charge

Chapitre III Résultats des simulations des Stratégies de Commande pour FAP à deux bras à point milieu

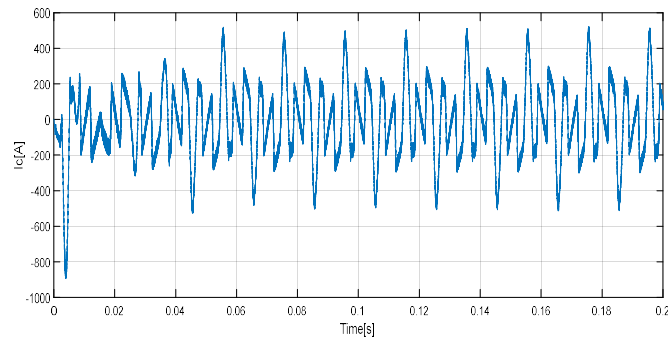


Figure III.14 : Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM

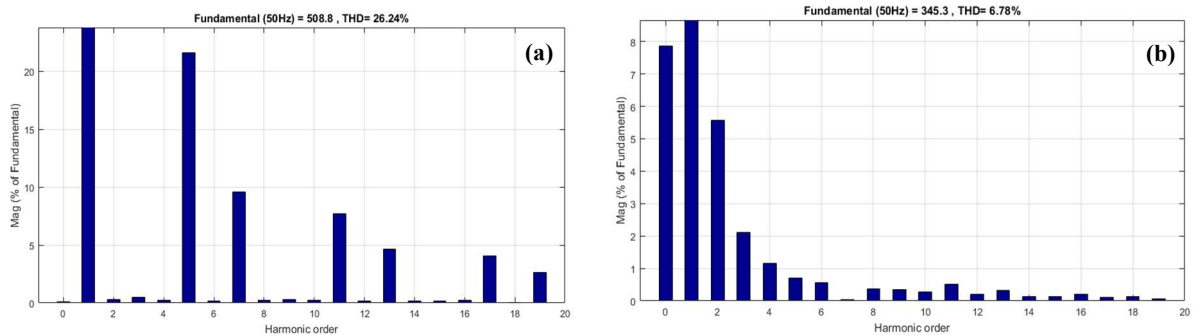


Figure III.15 : FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.

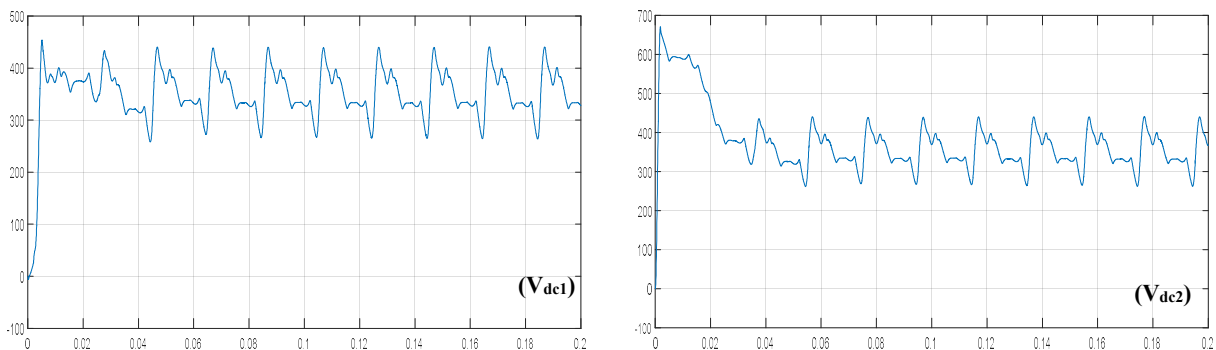


Figure III.16 : Tension aux bornes des Condensateurs

Interprétation des résultats

Nous remarquons de ces figures que le courant de source après filtrage est sinusoïdal et à un THD de 6.78%. Ce THD est supérieur à 5% (norme CEI). Nous remarquons également que la tension au niveau de chaque condensateur varie autour de 400 V mais reste constante.

III.4 Méthode directe des puissances instantanées PQ incorporant deux filtres multivariables et utilisant une MLI

Nous allons maintenant garder la commande mais cette fois ci au lieu d'utiliser une hystérésis nous allons utiliser une MLI à dent de scie pour la commande des interrupteurs de notre FAP à deux bras à point milieu. Les résultats obtenus pour cette simulation sont comme suite :

Chapitre III Résultats des simulations des Stratégies de Commande pour FAP à deux bras à point milieu

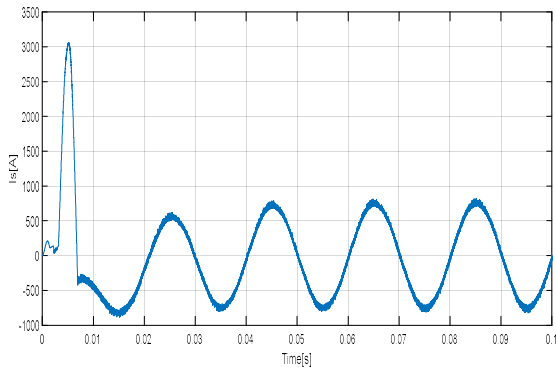


Figure III.17 : courant de source après filtrage

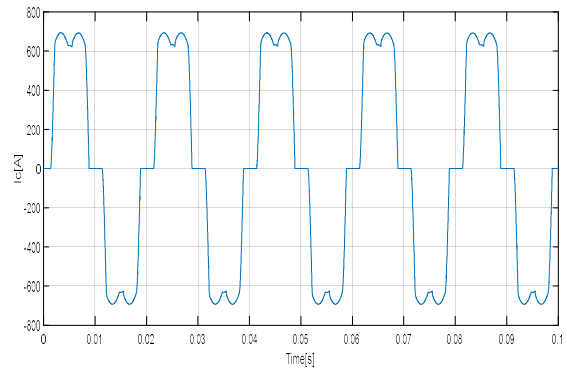


Figure III.18 : courant de charge

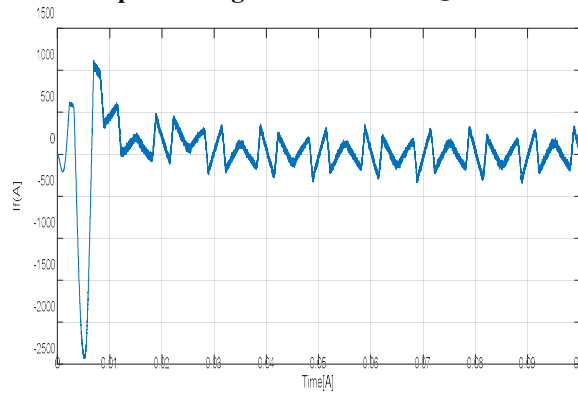


Figure III.19 : Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM

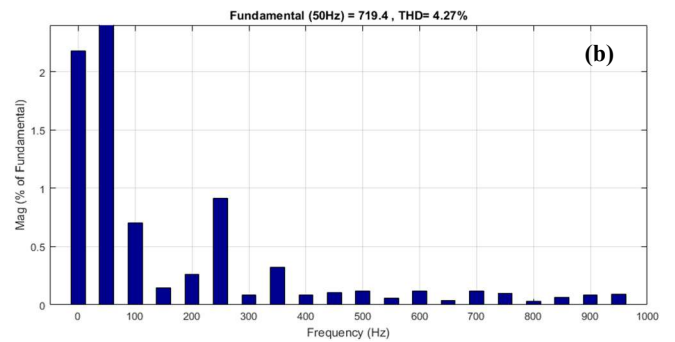
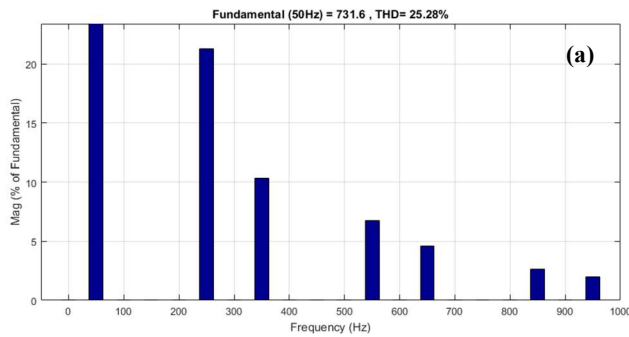


Figure III.20 : FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.

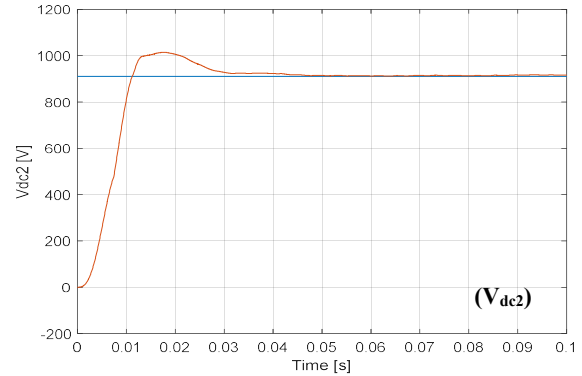
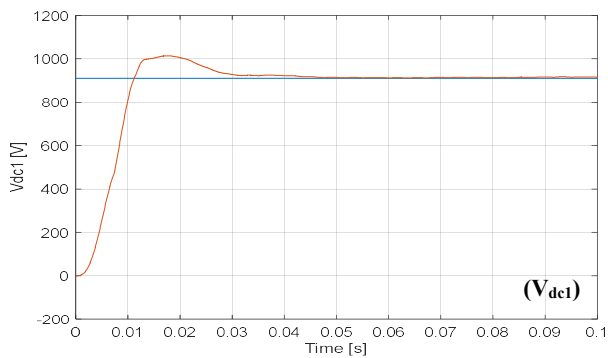


Figure III.21 : Tension aux bornes des Condensateurs

Chapitre III Résultats des simulations des Stratégies de Commande pour FAP à deux bras à point milieu

Interprétation des résultats

Nous remarquons de ces figures que le courant de source après filtrage est sinusoïdal et à un THD qui descend jusqu'à 4.27%. Ce THD est inférieur à 5% et ainsi respecte la norme CEI. Nous remarquons également que la tension au niveau de chaque condensateur est constante. Pour terminer, nous remarquons que le filtre actif de puissance parallèle élimine très bien les harmoniques de courant lorsqu'il utilise une MLI à dent de scie

III.5 Méthode directe des puissances instantanées PQ incorporant un filtre multivariable et une PLL et utilisant une hystérésis

Nous allons maintenant garder la commande mais cette fois ci au lieu d'utiliser deux filtres multi-variable, nous allons utiliser un filtre multi-variable et une PLL. Nous allons également utiliser une hystérésis pour la commande des interrupteurs de notre FAP à deux bras à point milieu. Les résultats obtenus pour cette simulation sont comme suite :

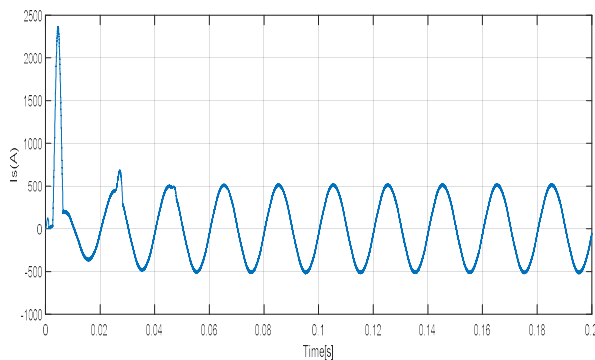


Figure III.22 : courant de source après filtrage

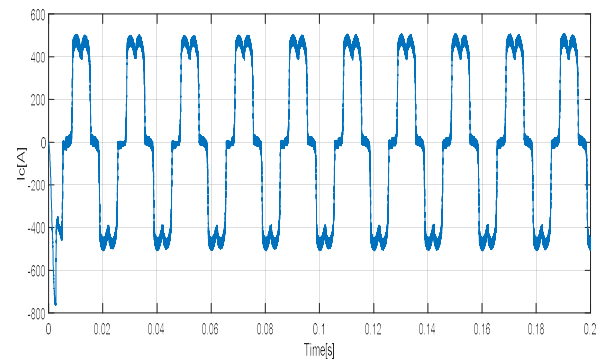


Figure III.23 : courant de charge

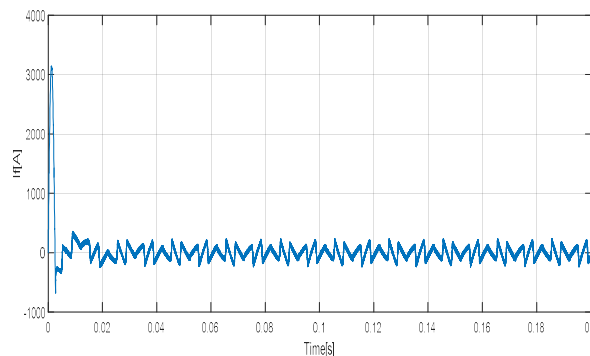


Figure III.24 : Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM

Chapitre III Résultats des simulations des Stratégies de Commande pour FAP à deux bras à point milieu

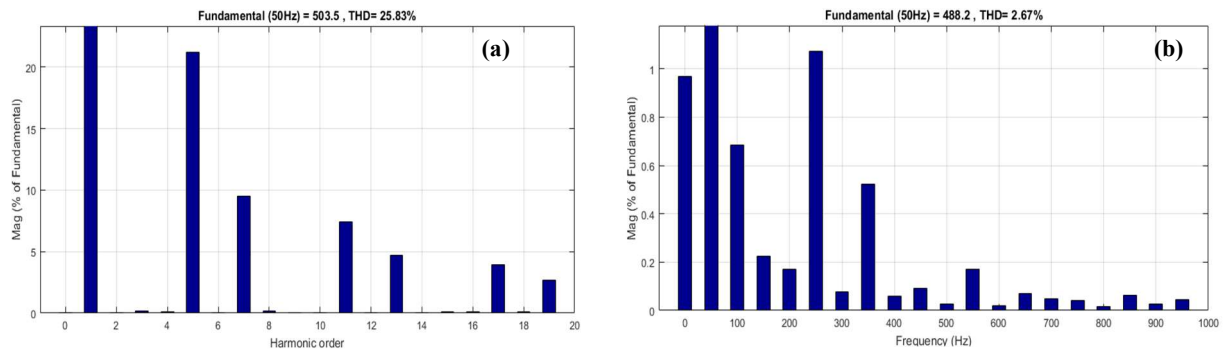


Figure III.25 : FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.

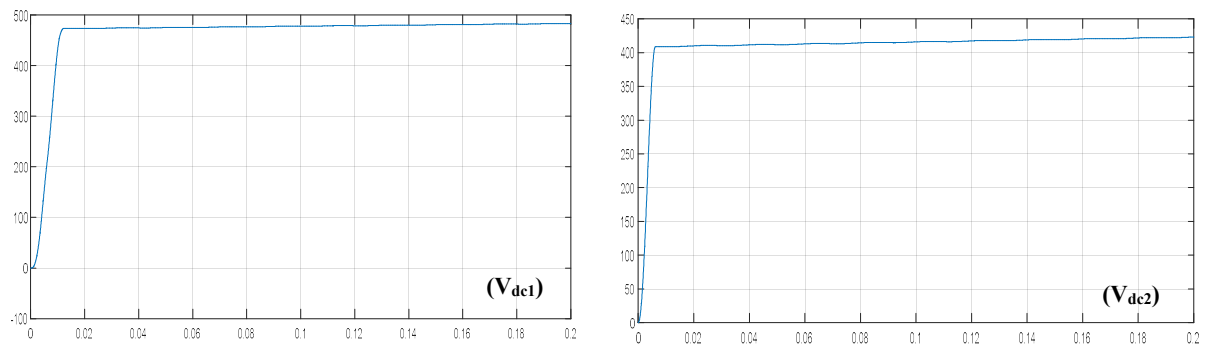


Figure III.26 : Tension aux bornes des Condensateurs

Interprétation des résultats

Nous remarquons que le filtre actif de puissance parallèle élimine très bien les harmoniques de courant. Le courant de source après filtrage est sinusoïdal et à un THD qui descend jusqu'à 2.67%. Ce THD est inférieur à 5% et respecte la norme CEI. Nous remarquons également que la tension au niveau de chaque condensateur est constante.

III.6 Méthode directe des puissances instantanées PQ incorporant un filtre multivariable et une PLL et utilisant une MLI

Nous allons maintenant garder la commande mais cette fois ci au lieu d'utiliser une hystérésis nous allons utiliser une MLI à dent de scie pour la commande des interrupteurs de notre FAP à deux bras à point milieu. Les résultats obtenus pour cette simulation sont comme suite :

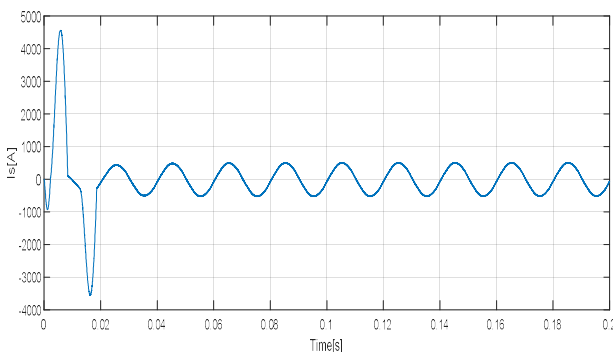


Figure III.27 : courant de source après filtrage

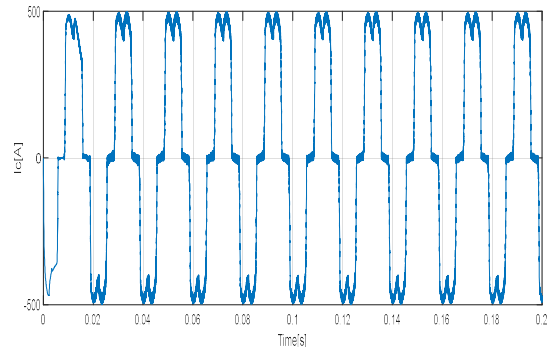


Figure III.28 : courant de charge

Chapitre III Résultats des simulations des Stratégies de Commande pour FAP à deux bras à point milieu

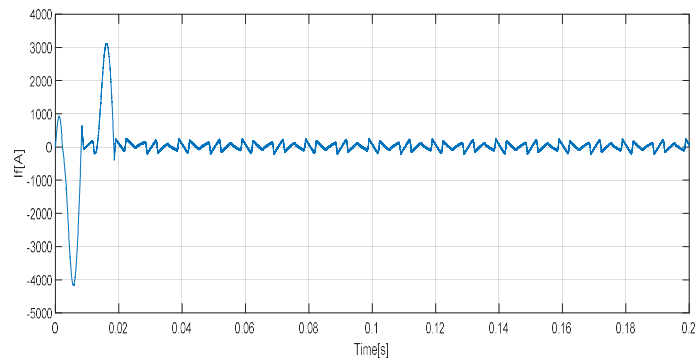


Figure III.29 : Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM

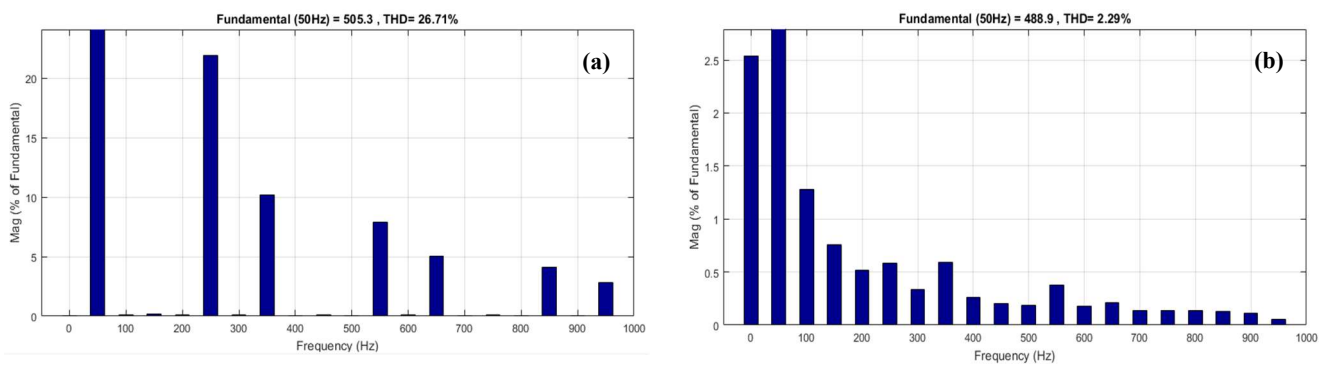


Figure III.30 : FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.

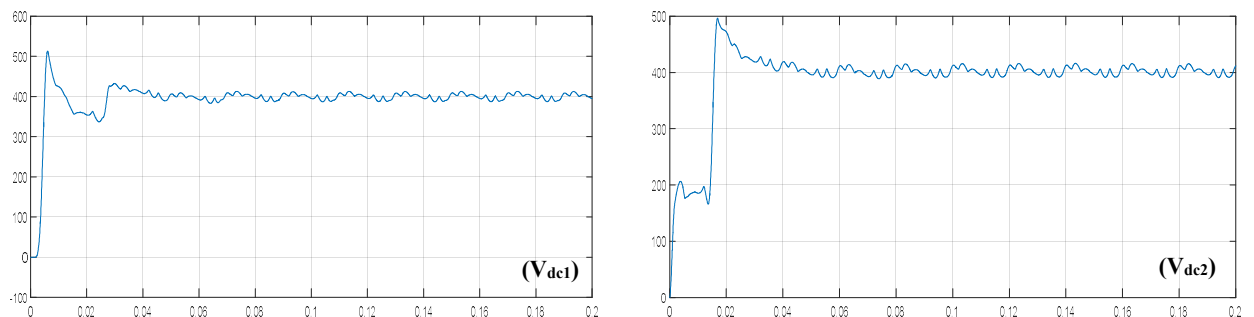


Figure III.31 : Tension aux bornes des Condensateurs

Interprétation des résultats

Nous remarquons de ces figures que le THD descend jusqu'à 2.29%. Ce THD est inférieur à 5% et respecte la norme CEI. Nous remarquons également que la tension au niveau de chaque condensateur varie autour de 400 V mais reste constante. Nous remarquons également que le filtre actif de puissance parallèle élimine très bien les harmoniques de courant et à un meilleur résultat que celui utilisant une hystérésis.

Chapitre III Résultats des simulations des Stratégies de Commande pour FAP à deux bras à point milieu

III.7 Méthode directe utilisant la méthode de Fryze et une Hystérésis

Nous allons pour cette simulation changer la commande en utilisant la méthode de Fryze. Nous allons également utiliser une Hystérésis pour la commande des interrupteurs de notre FAP à deux bras à point milieu. Les résultats obtenus pour cette simulation sont comme suite.

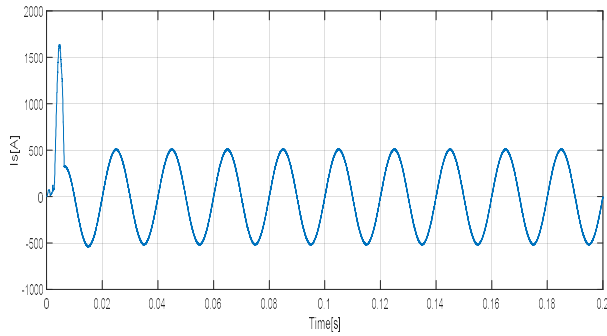


Figure III.32 : courant de source après filtrage

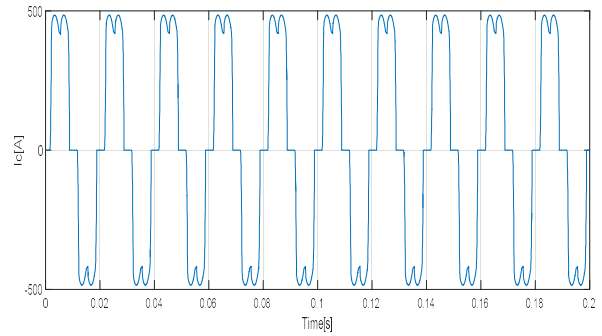


Figure III.33 : courant de charge

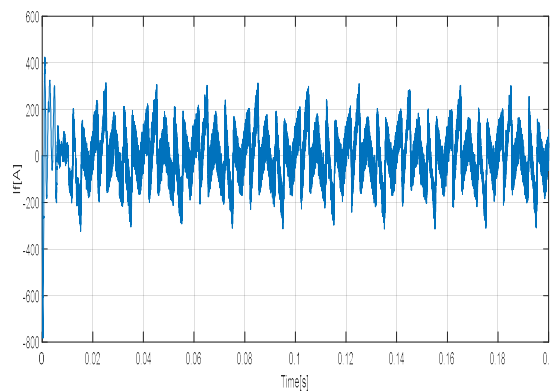


Figure III.34 : Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM

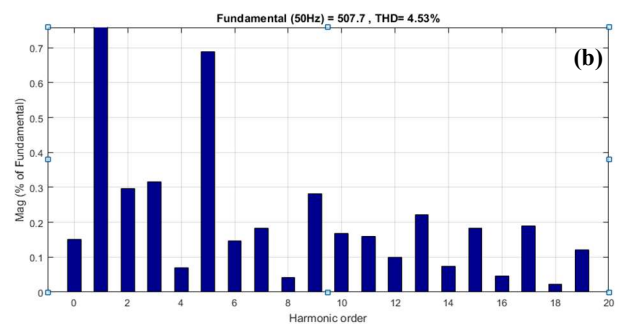
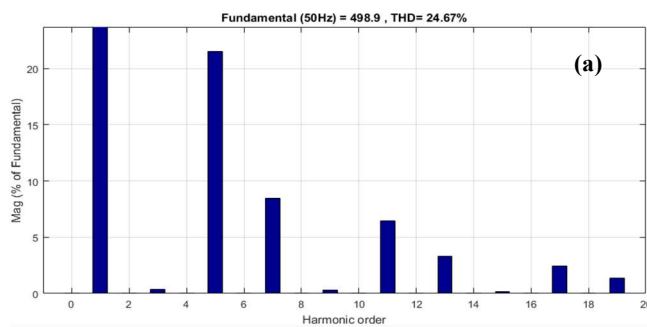


Figure III.35 : FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.

Chapitre III Résultats des simulations des Stratégies de Commande pour FAP à deux bras à point milieu

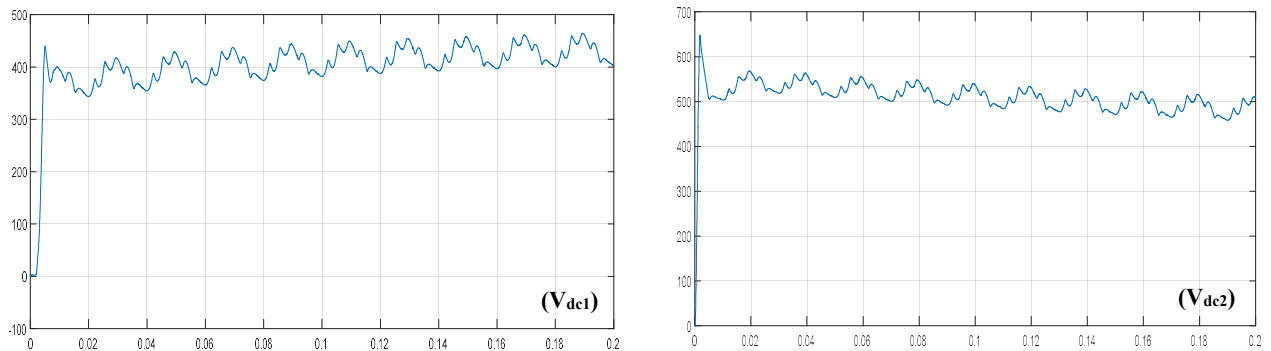


Figure III.36 : Tension aux bornes des Condensateurs

Interprétation des résultats

Le courant de source après filtrage est sinusoïdal et à un THD qui descend jusqu'à 4.53%. Ce THD est inférieur à 5% et respecte la norme CEI. Nous remarquons également que la tension au niveau de chaque condensateur varie autour de 400 V mais reste constante. Ainsi, nous remarquons que le filtre actif de puissance parallèle élimine très bien les harmoniques de courant.

III.8 Méthode directe utilisant la méthode de Fryze et une MLI

Nous allons pour cette simulation utiliser la méthode de Fryze mais à la place d'utiliser une hystérésis nous allons utiliser une MLI à dent de scie. Les résultats obtenus pour cette simulation sont comme suite :

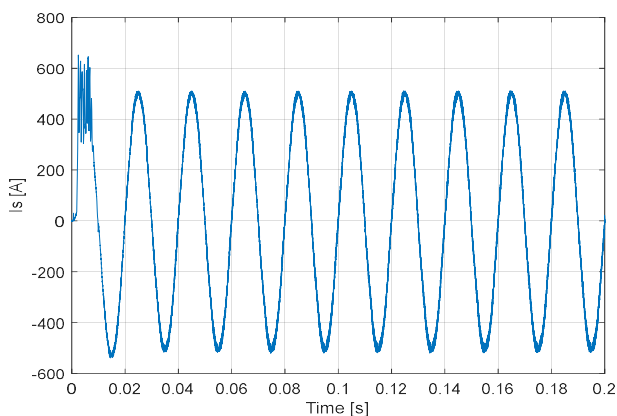


Figure III.37 : courant de source après filtrage

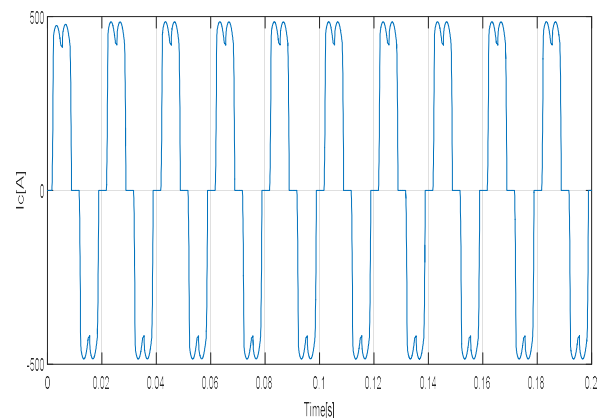


Figure III.38 : courant de charge

Chapitre III Résultats des simulations des Stratégies de Commande pour FAP à deux bras à point milieu

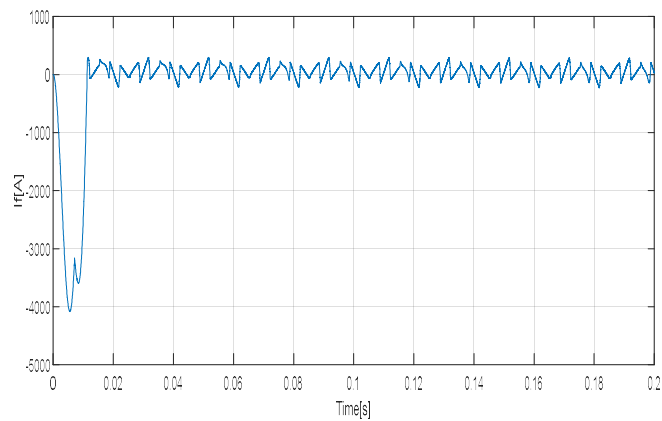


Figure III.39 : Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM

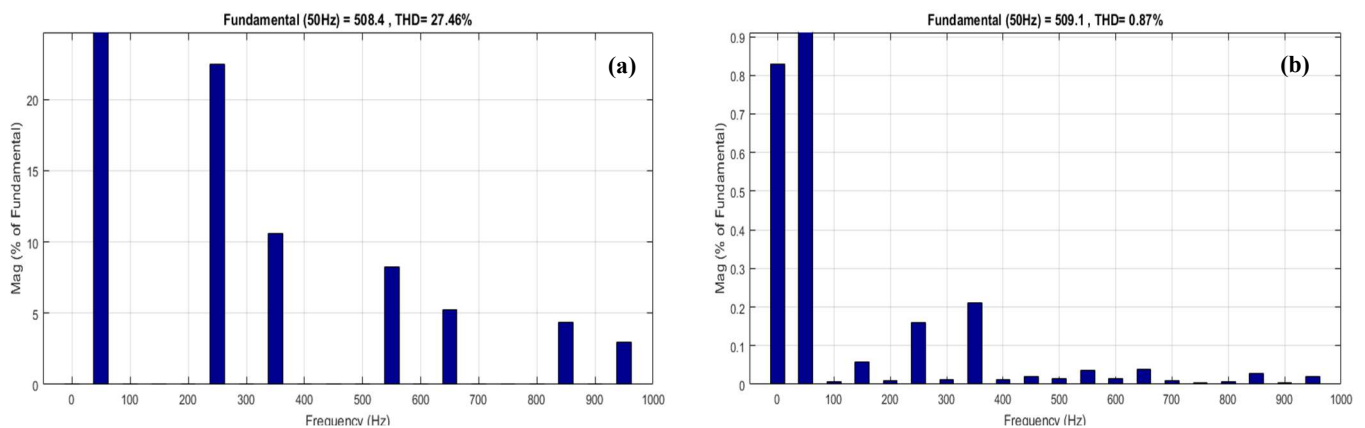


Figure III.40 : FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.

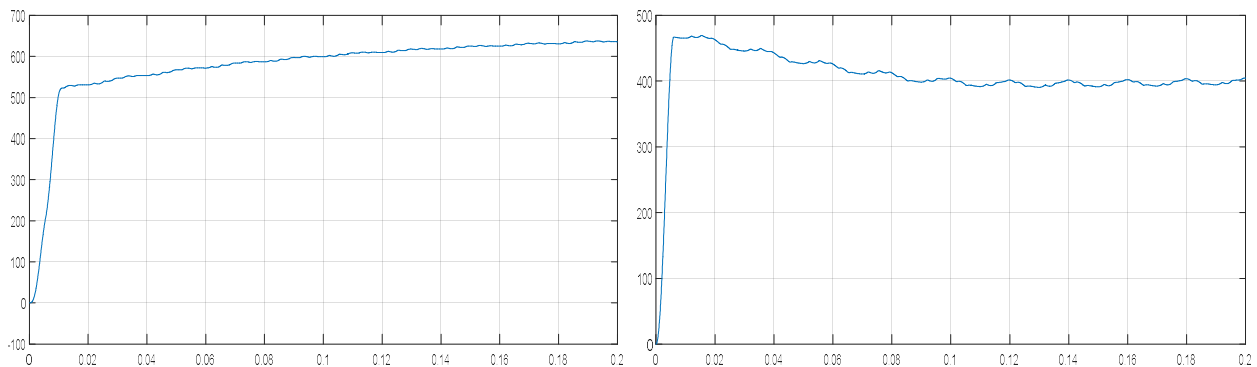


Figure III.41 : Tension aux bornes des Condensateurs

Interprétation des résultats

Nous remarquons de ces figures que le courant de source après filtrage est sinusoïdal et à un THD qui descend jusqu'à 0.87%. Ce THD est inférieur à 5% et respecte la norme CEI. Nous remarquons également que la tension au niveau de chaque condensateur varie autour, de 600 V pour l'un et aux alentours de 400 V pour l'autre mais reste constante. Nous pensons que cette

Chapitre III Résultats des simulations des Stratégies de Commande pour FAP à deux bras à point milieu

variation est due du fait que nous arrivons difficilement et à mal réguler la tension lorsque nous utilisons la commande de Fryze.

III.9 Méthode indirecte des puissances instantanées PQ utilisant une hystérésis

Soit le système complet (voir figure III.42) constitué du réseau électrique alimentant une charge non linéaire qui à son tour alimente une charge RL. Le FAPP2BPM est connecté en parallèle au réseau électrique. Les paramètres de notre topologie et des stratégies de commande sont présentés en Annexe. Nous utiliserons cette fois ci la commande indirecte.

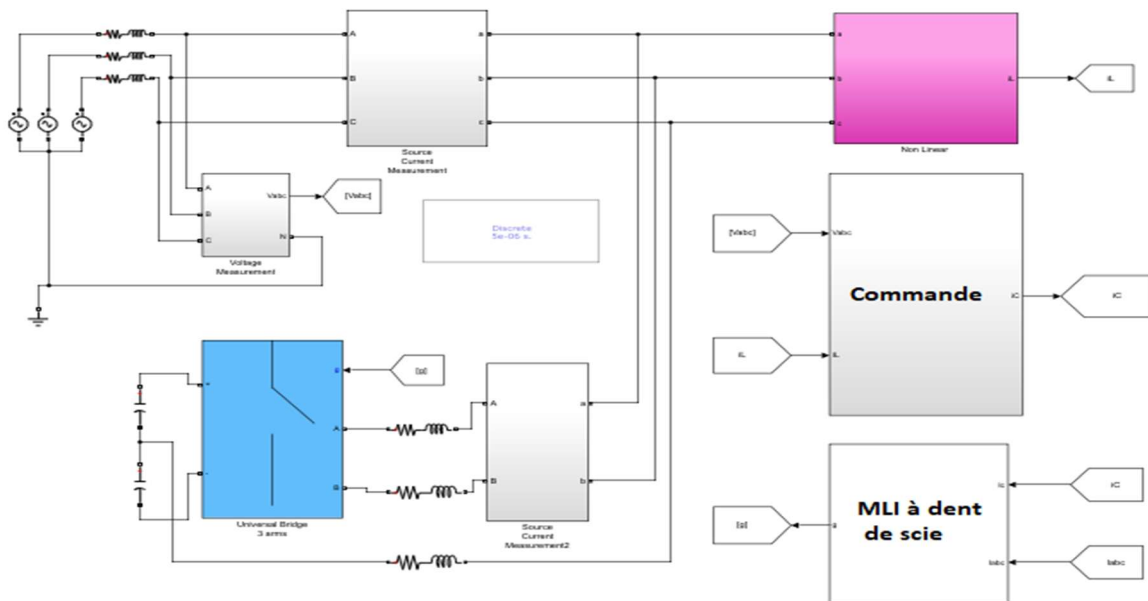


Figure III.42 : Commande indirecte avec hystérésis

Remarque 1 : Nous n'allons pas dans les prochaines simulations illustrées encore une fois la figure du système complet car les deux seuls blocs qui changeront sont le bloc de la commande et le bloc de la MLI à dent de scie. Par conséquent nous les citerons directement dans les titres de chaque simulation.

Remarque 2 : Nous avons sur la figure I_{abc} qui représente le courant de source et I_c qui représente le courant de charge.

Pour cette première simulation voici les résultats obtenus :

Chapitre III Résultats des simulations des Stratégies de Commande pour FAP à deux bras à point milieu

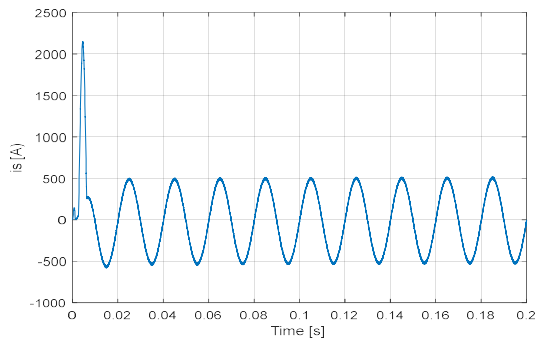


Figure III.43 : courant de source après filtrage

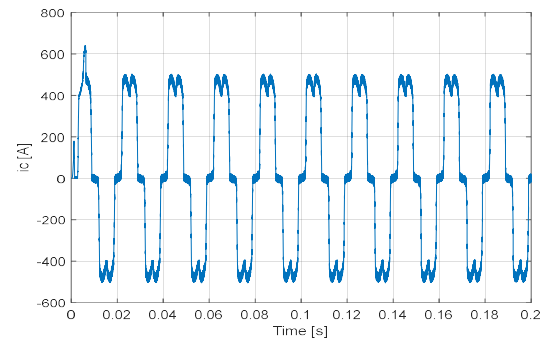


Figure III.44 : courant de charge

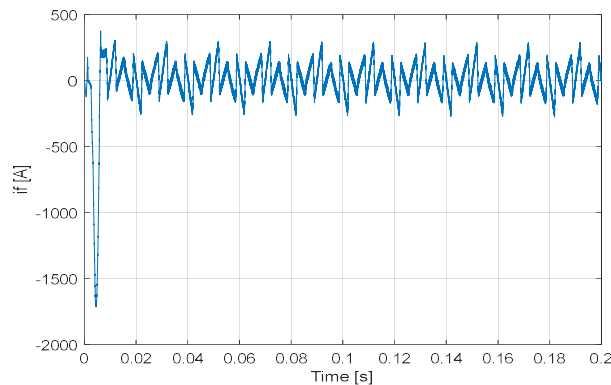


Figure III.45 : Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM

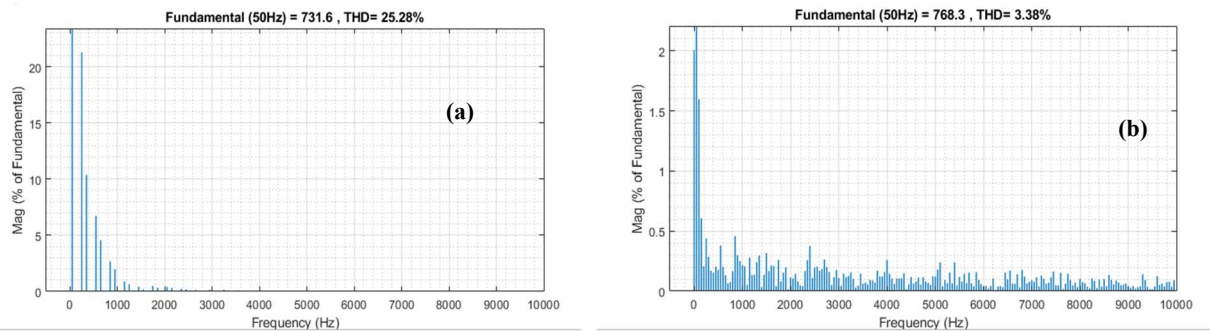


Figure III.46 : FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.

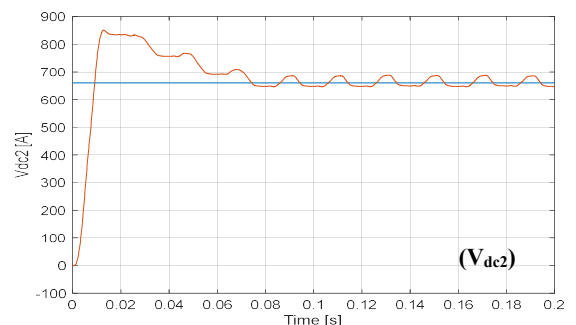
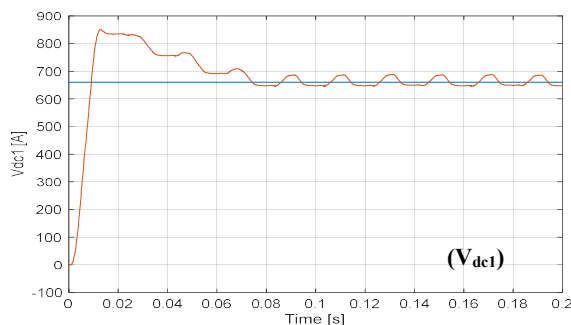


Figure III.47 : Tension aux bornes des deux condensateurs

Interprétation des résultats

Nous remarquons de ces figures que le courant de source après filtrage est sinusoïdal et à un THD qui descend jusqu'à 3.38%. Ce THD est inférieur à 5% et respecte la norme CEI. Nous

Chapitre III Résultats des simulations des Stratégies de Commande pour FAP à deux bras à point milieu

remarquons également que la tension au niveau de chaque condensateur varie aux alentours de 650 V mais reste constante.

III.10 Méthode indirecte des puissances instantanées PQ utilisant une MLI

Nous allons maintenant garder la même commande mais cette fois ci au lieu d'utiliser une hystérésis nous allons utiliser une MLI à dent de scie. Les résultats obtenus pour cette simulation sont comme suite :

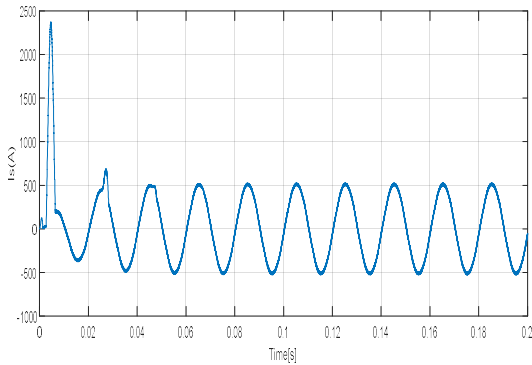


Figure III.48 : courant de source après filtrage

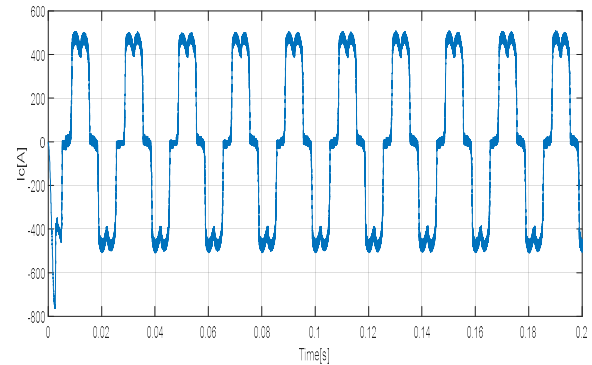


Figure III.49 : courant de charge

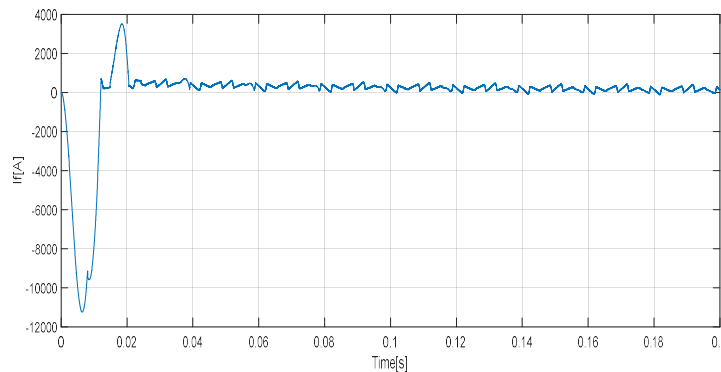


Figure III.50 : Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM

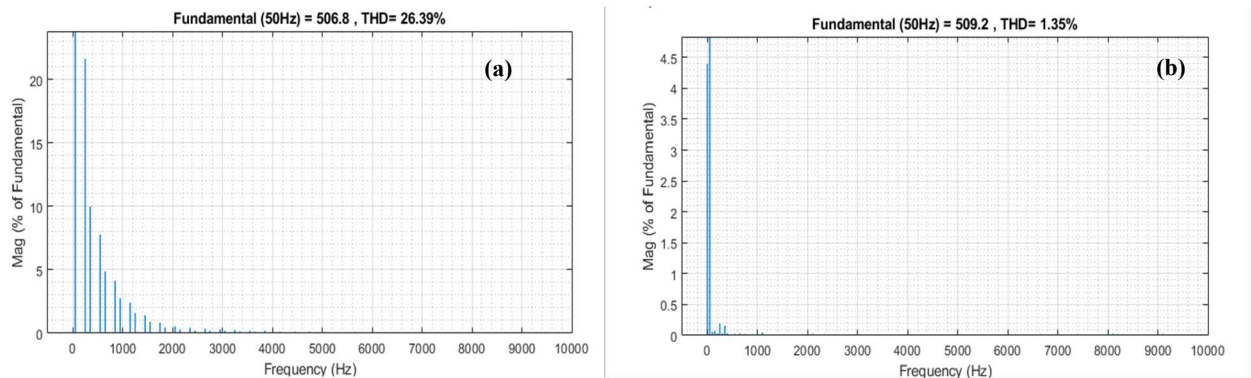


Figure III.51 : FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.

Chapitre III Résultats des simulations des Stratégies de Commande pour FAP à deux bras à point milieu

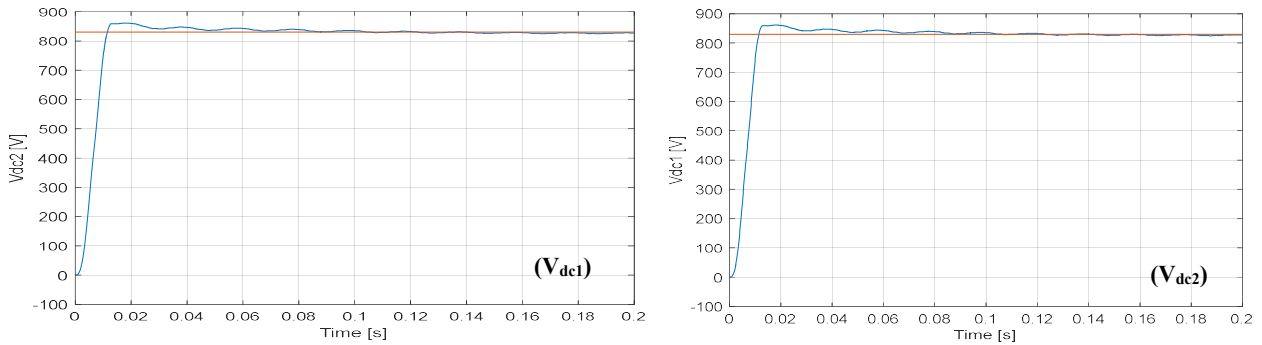


Figure III.52 : Tension aux bornes des condensateurs

Interprétation des résultats

Nous remarquons de ces figures que le courant de source après filtrage est sinusoïdal et à un THD qui descend jusqu'à 1.35%. Ce THD est inférieur à 5% et respecte la norme CEI. Nous remarquons également que la tension au niveau de chaque condensateur varie aux alentours de 830 V mais reste constante.

III.11 Méthode indirecte des puissances instantanées PQ incorporant deux filtres multivariables et utilisant une hystérésis

Nous allons utiliser la commande indirecte en appliquant la stratégie de commande PQ et en utilisant une hystérésis. Nous allons utiliser deux filtre multi-variable qui vont remplacer le filtre passe haut. Nous allons également utiliser une hystérésis pour la commande des interrupteurs de notre FAP à deux bras à point milieu. Les résultats obtenus pour cette simulation sont comme suite :

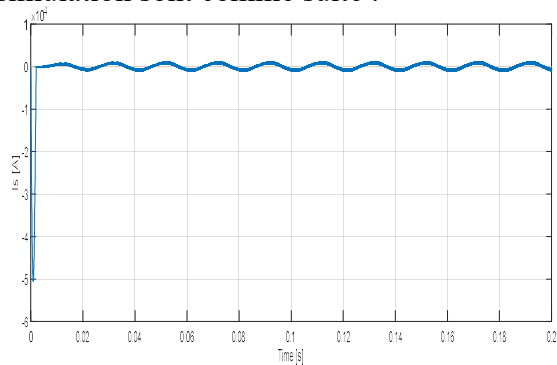


Figure III.53 : courant de source après filtrage

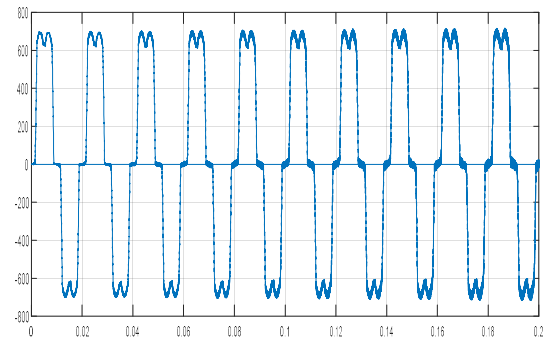


Figure III.54 : courant de charge

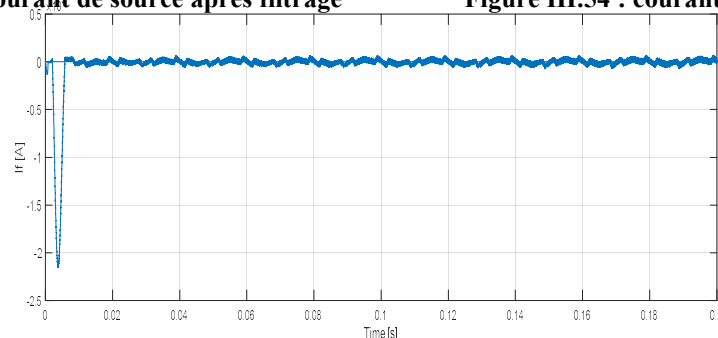


Figure III.55 : Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM

Chapitre III Résultats des simulations des Stratégies de Commande pour FAP à deux bras à point milieu

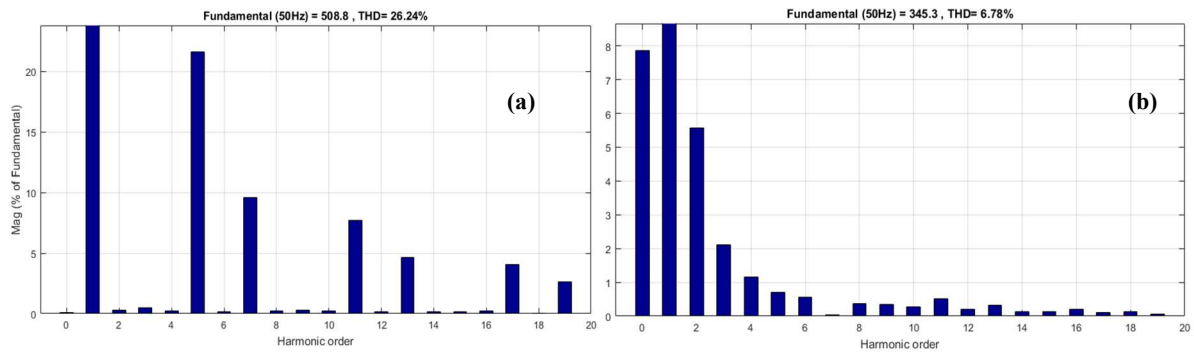


Figure III.56 : FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.

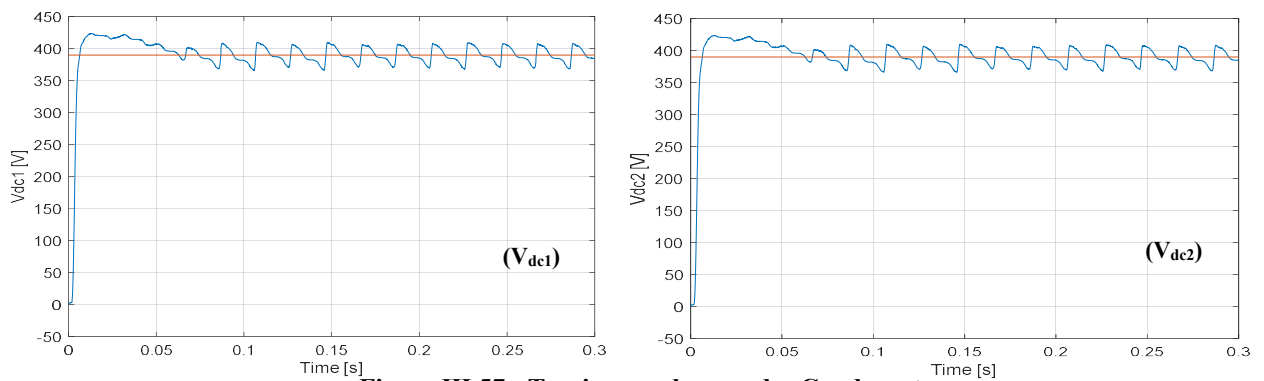


Figure III.57 : Tension aux bornes des Condensateurs

Interprétation des résultats

Nous remarquons de ces figures que le courant de source après filtrage est sinusoïdal et à un THD qui descend jusqu'à 6.78%. Ce THD est supérieur à 5% (norme CEI). Nous remarquons également que la tension au niveau de chaque condensateur varie aux alentours de 400 V et reste constante. Ainsi ce filtre actif de puissance parallèle élimine moins bien les courants harmoniques.

III.12 Méthode indirecte des puissances instantanées PQ incorporant deux filtres multivariables et utilisant une MLI

Nous allons maintenant garder la commande mais cette fois ci au lieu d'utiliser une hystérésis nous allons utiliser une MLI à dent de scie pour la commande des interrupteurs de notre FAP à deux bras à point milieu.

Les résultats obtenus pour cette simulation sont comme suite :

Chapitre III Résultats des simulations des Stratégies de Commande pour FAP à deux bras à point milieu

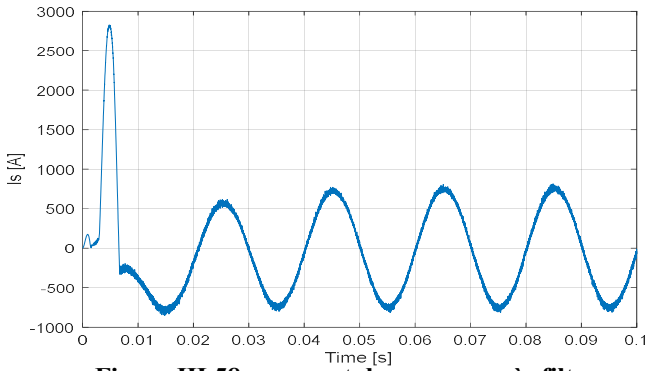


Figure III.58 : courant de source après filtrage

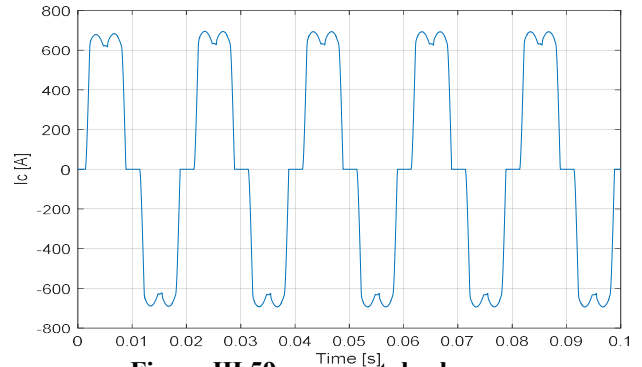


Figure III.59 : courant de charge

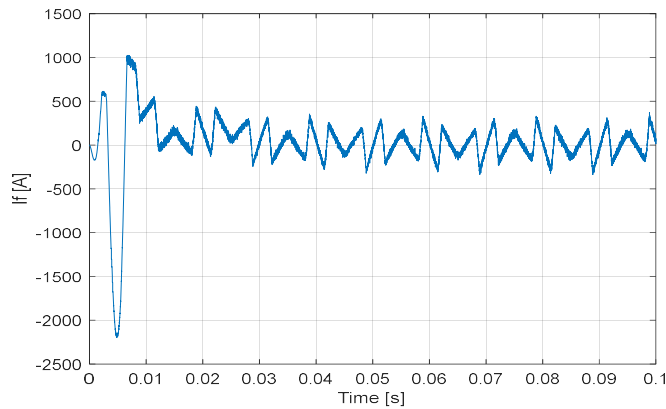


Figure III.60 : Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM

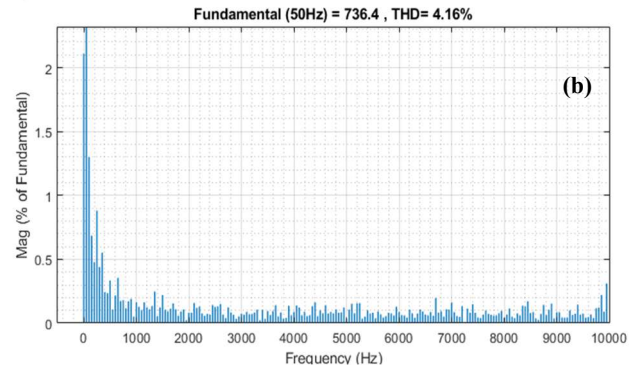
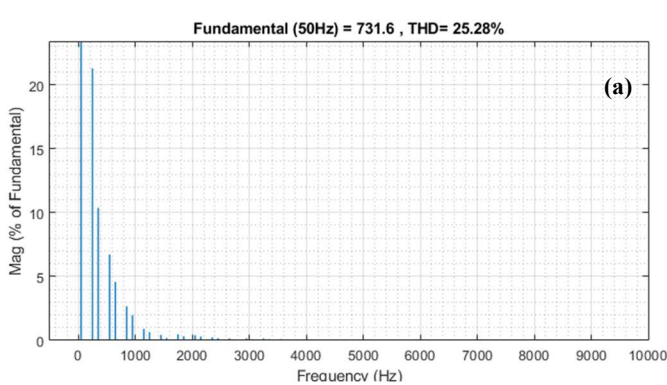
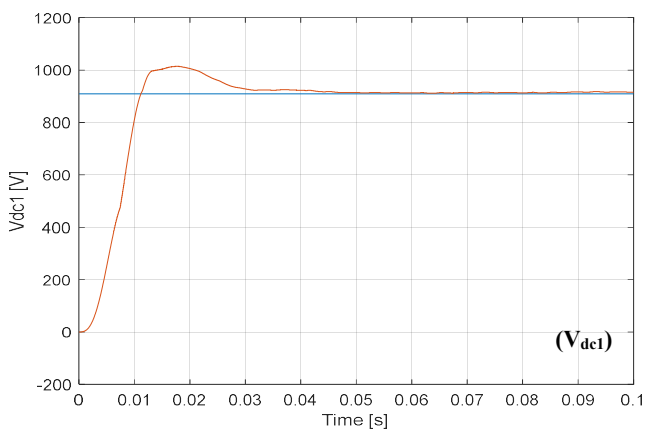
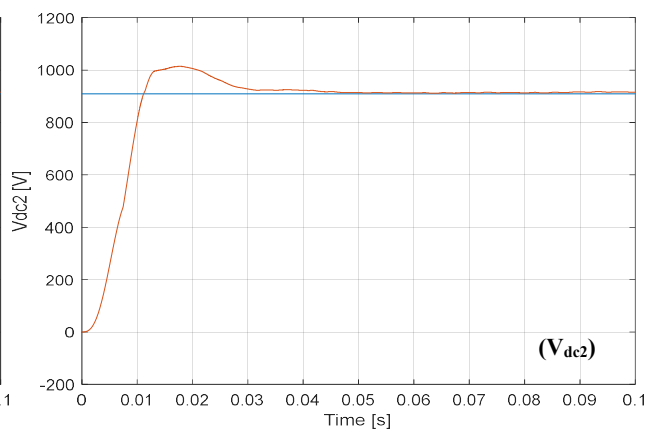


Figure III.61 : FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.



(V_{dc1})



(V_{dc2})

Figure III.62 : Tension aux bornes des Condensateurs

Chapitre III Résultats des simulations des Stratégies de Commande pour FAP à deux bras à point milieu

Interprétation des résultats

Nous remarquons de ces figures que le courant de source après filtrage est sinusoïdal et à un THD qui descend jusqu'à 4.16%. Ce THD est inférieur à 5%. Nous remarquons également que la tension au niveau de chaque condensateur varie aux alentours de 900 V mais reste constante.

III.13 Méthode indirecte des puissances instantanées PQ incorporant un filtre multivariable et une PLL et utilisant une hystérésis

Nous allons toujours garder la même commande mais cette fois ci au lieu d'utiliser deux filtres multi-variables, nous allons utiliser un filtre multi-variable et une PLL. Nous allons également utiliser une hystérésis pour la commande des interrupteurs de notre FAP à deux bras à point milieu. Les résultats obtenus pour cette simulation sont comme suite :

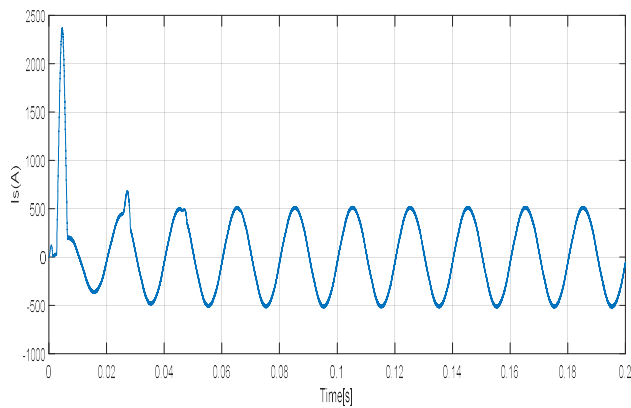


Figure III.63 : courant de source après filtrage

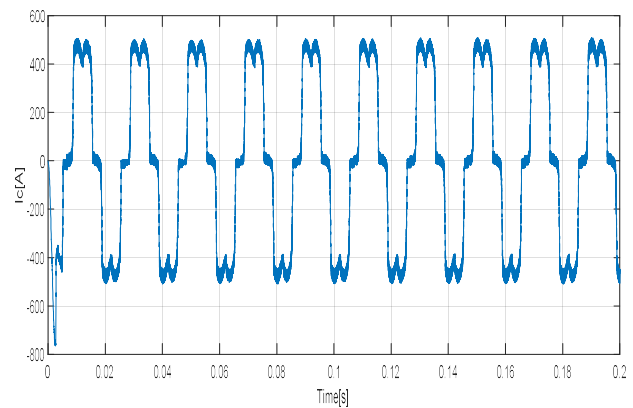


Figure III.64 : courant de charge

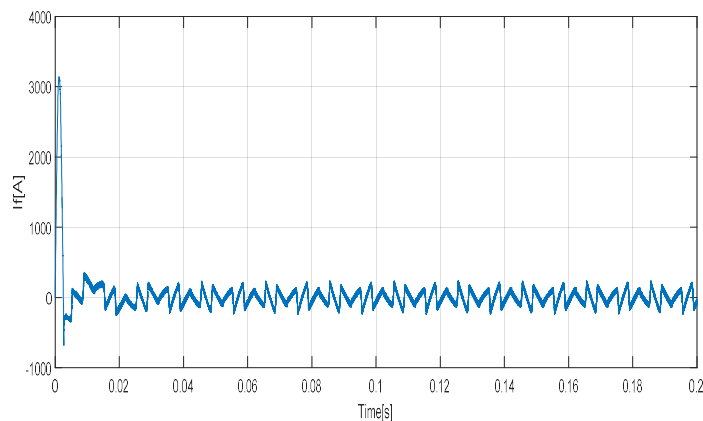


Figure III.65 : Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM

Chapitre III Résultats des simulations des Stratégies de Commande pour FAP à deux bras à point milieu

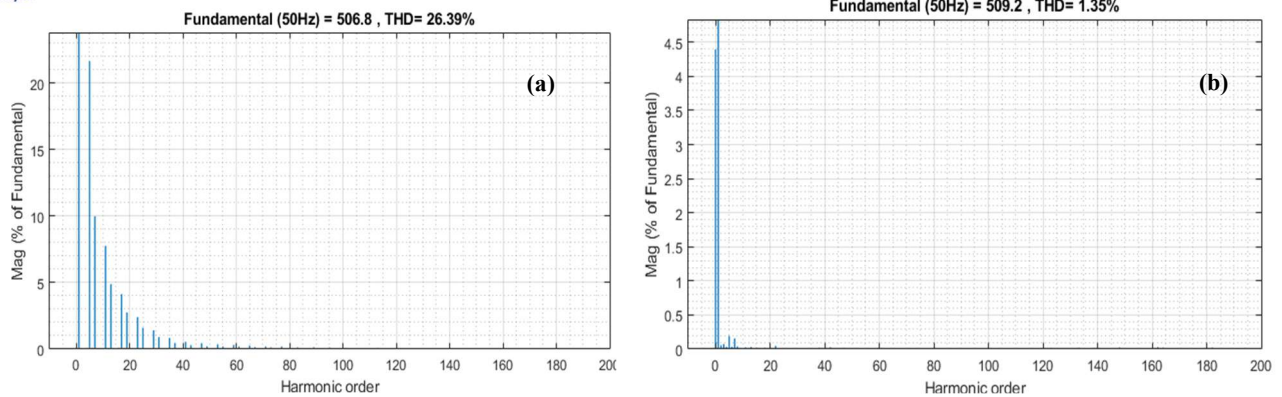


Figure III.66 : FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.

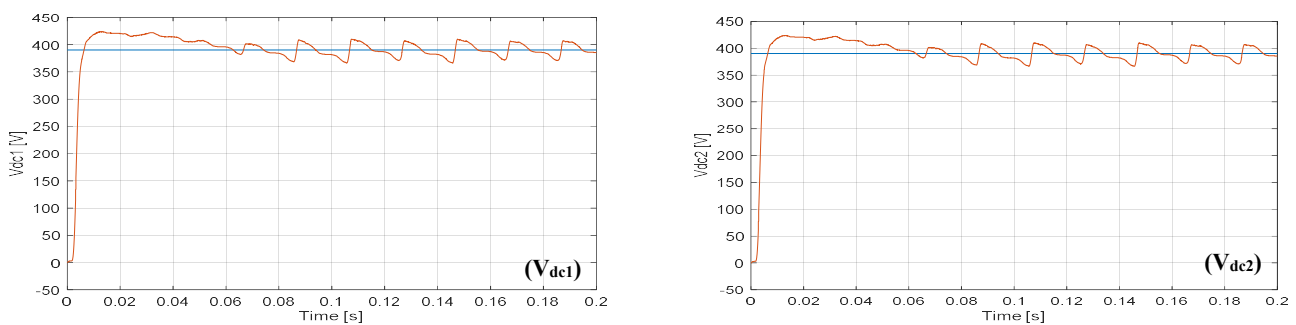


Figure III.67 : Tension aux bornes des Condensateurs

Interprétation des résultats

Nous remarquons de ces figures que le courant de source après filtrage est sinusoïdal et à un THD de 1.35%. Ce THD est inférieur à 5%. Nous remarquons également que la tension au niveau de chaque condensateur varie aux alentours de 400 V mais reste constante. Pour terminer, nous remarquons que le FAPP élimine très bien les harmoniques de courant.

III.14 Méthode indirecte des puissances instantanées PQ incorporant un filtre multivariable et une PLL et utilisant une MLI

Nous allons maintenant garder la commande mais cette fois ci au lieu d'utiliser une Hystérésis nous allons utiliser une MLI à dent de scie pour la commande des interrupteurs de notre FAP à deux bras à point milieu. Les résultats obtenus pour cette simulation sont comme suite :

Chapitre III Résultats des simulations des Stratégies de Commande pour FAP à deux bras à point milieu

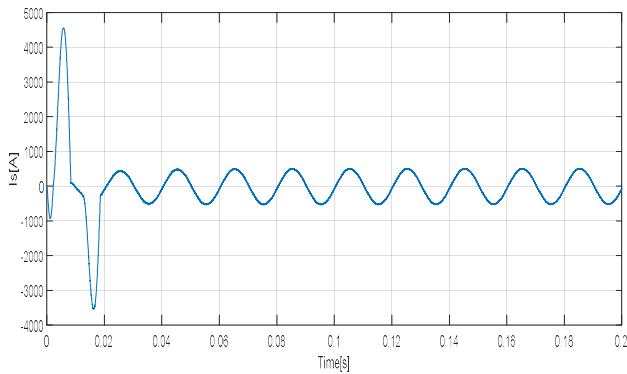


Figure III.68 : courant de source après filtrage

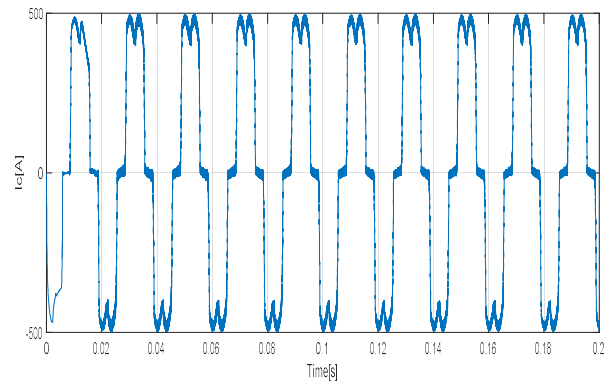


Figure III.69 : courant de charge

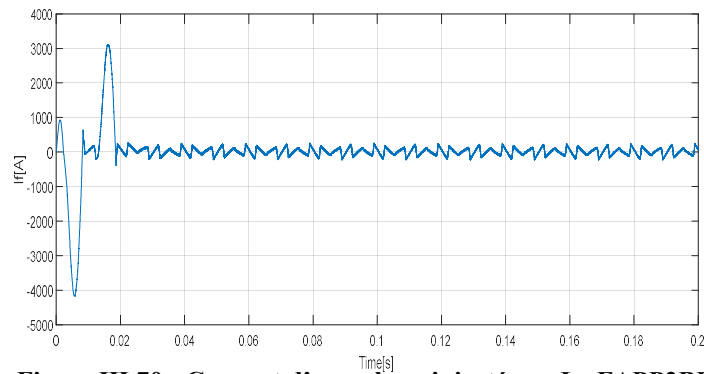


Figure III.70 : Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM

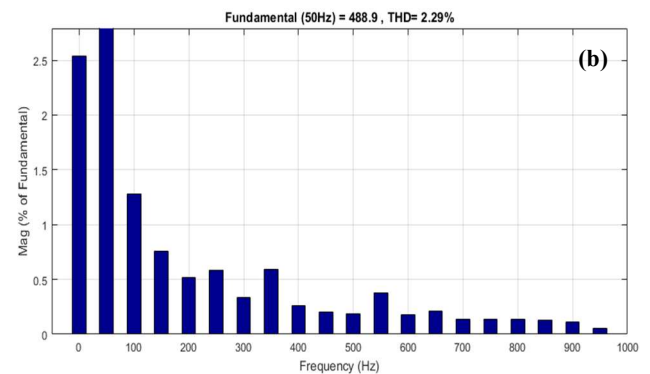
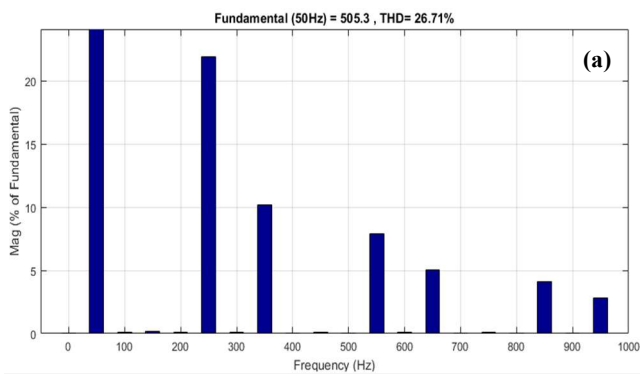


Figure III.71 : FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.

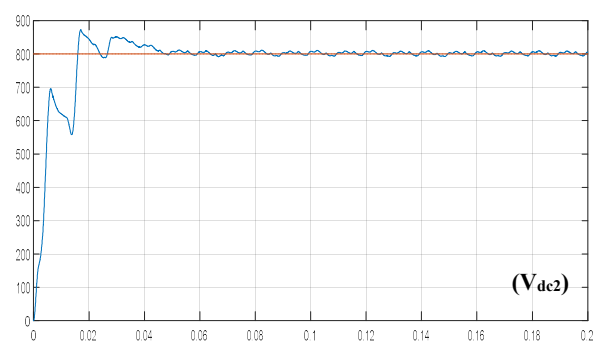
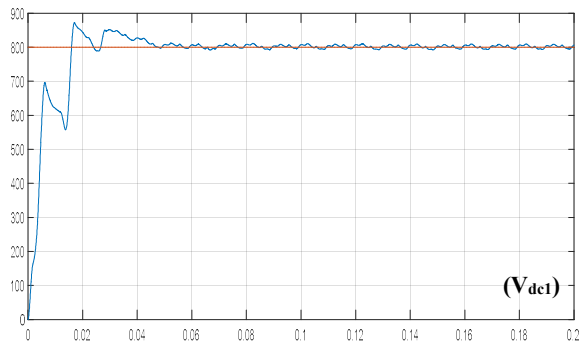


Figure III.72 : Tension aux bornes des Condensateurs

Chapitre III Résultats des simulations des Stratégies de Commande pour FAP à deux bras à point milieu

Interprétation des résultats

Ces figures montrent que le courant de source après filtrage est sinusoïdal et à un THD qui descend jusqu'à 2.29%. Nous remarquons également que la tension au niveau de chaque condensateur varie aux alentours de 800 V mais reste constante. Nous remarquons que le filtre actif de puissance parallèle élimine très bien les harmoniques de courant.

III.15 Méthode indirecte utilisant la méthode de Fryze et une Hystérésis

Nous allons pour cette simulation changer la commande en utilisant la commande de Fryze. Nous allons également utiliser une hystérésis pour la commande des interrupteurs de notre FAP à deux bras à point milieu. Les résultats obtenus pour cette simulation sont comme suite :

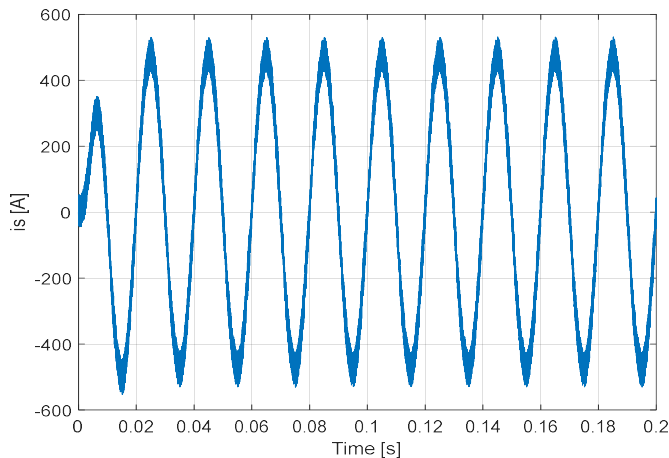


Figure III.73 : courant de source après filtrage

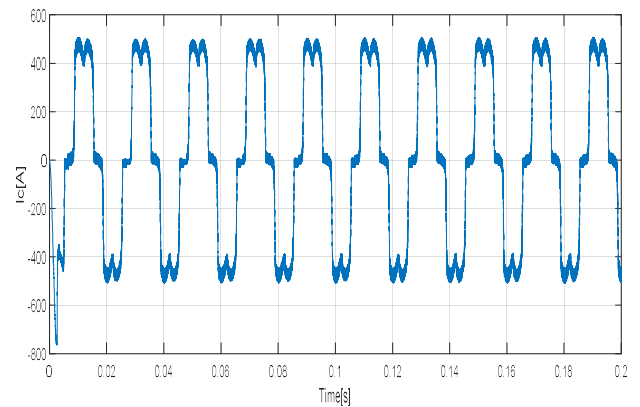


Figure III.74 : courant de charge

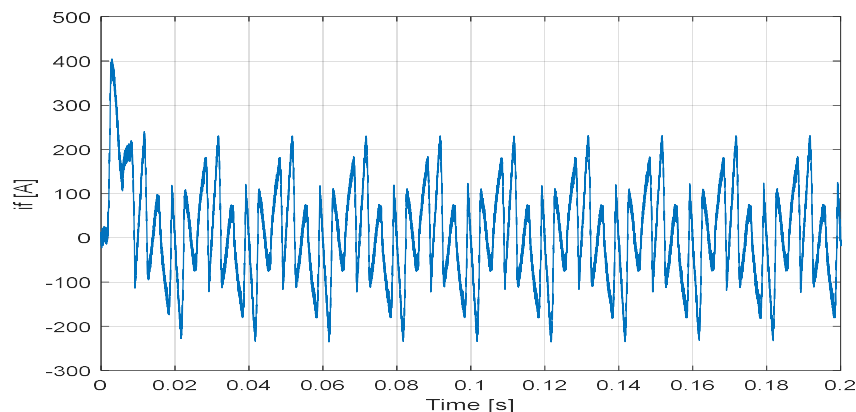


Figure III.75 : Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM

Chapitre III Résultats des simulations des Stratégies de Commande pour FAP à deux bras à point milieu

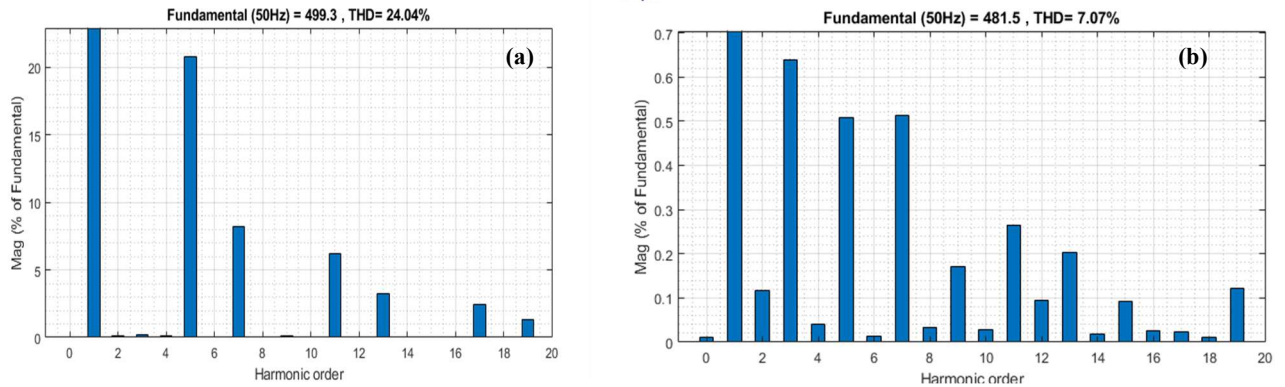


Figure III.76 : FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.

Interprétation des résultats

Nous remarquons de ces figures que le courant de source après filtrage est sinusoïdal et à un THD qui descend jusqu'à 7.07%. Ce THD est supérieur à 5% qui est la norme CEI. Nous n'avons pas pu stabiliser les valeurs de la tension aux bornes des condensateurs du FAP à 2 bras à point milieu, c'est pour cela que nous ne les avons pas ajoutés.

III.16 Méthode indirecte utilisant la méthode de Fryze et une MLI

Nous allons pour cette simulation utiliser la méthode de Fryze. Nous allons également utiliser une MLI à dent de scie pour la commande des interrupteurs de notre FAP à deux bras à point milieu. Les résultats obtenus pour cette simulation sont comme suite :

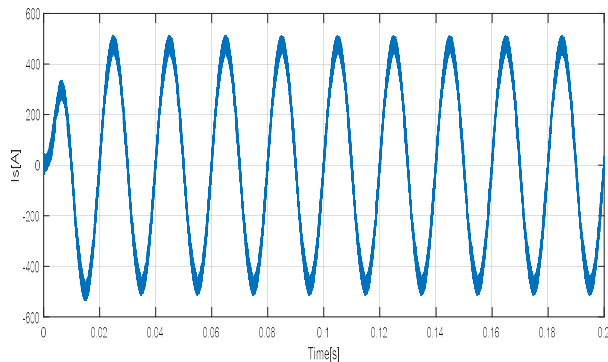


Figure III.77 : courant de source après filtrage

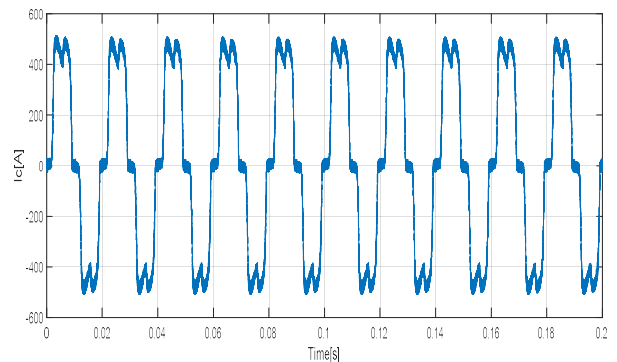


Figure III.78 : courant de charge

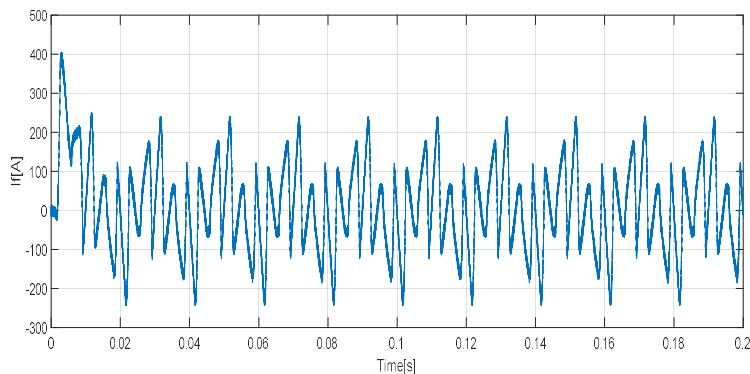


Figure III.79 : Courant d'une phase injecté par Le FAPP2BPM

Chapitre III Résultats des simulations des Stratégies de Commande pour FAP à deux bras à point milieu

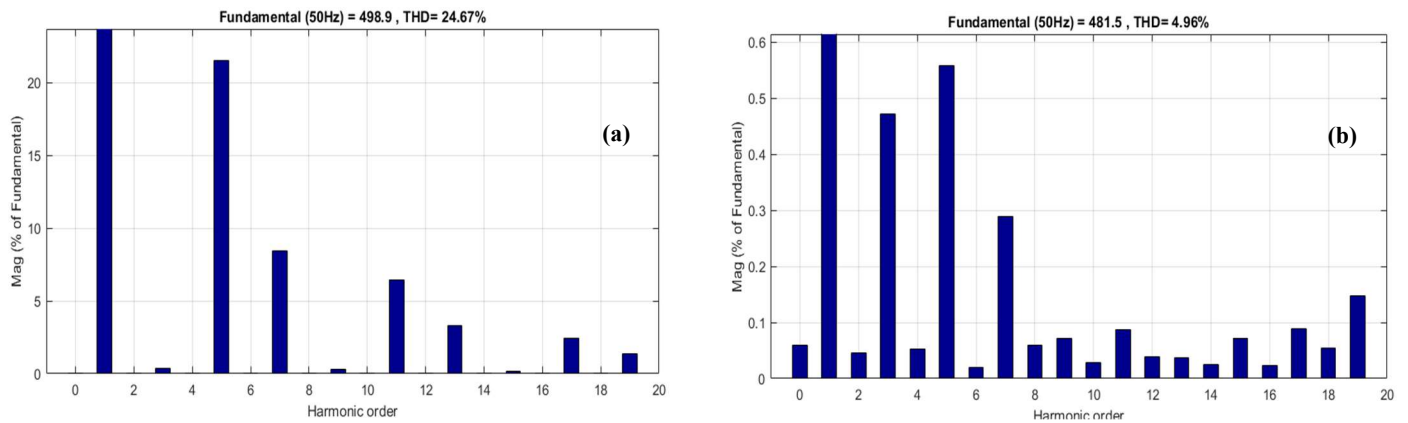


Figure III.80 : FFT du courant de source (a) avant filtrage et (b) après filtrage.

Interprétation des résultats

Nous remarquons de ces figures que le courant de source après filtrage est sinusoïdal et à un THD qui descend jusqu'à 4.96%. Ce THD est inférieure à 5% (norme CEI). Nous n'avons pas pu stabiliser ici aussi les valeurs de la tension aux bornes des condensateurs du FAP à 2 bras à point milieu, c'est pour cela que nous ne les avons pas ajoutés.

Conclusion

Les résultats de simulation des différentes stratégies de commande du filtre actif de puissance à deux bras à point milieu ont permis de valider l'efficacité filtrage pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique. Les simulations ont mis en évidence la capacité du FAP à deux bras à point milieu à compenser efficacement les harmoniques de courant.

De plus les simulations nous ont permis d'évaluer et de comparer leurs performances en matière de compensation des perturbations de courant dans les réseaux électriques en observant le THD après filtrage.

La méthode Fryze basée sur le calcul de la conductance, a montré une bonne efficacité pour la compensation des charges non-linéaires. Par contre, la commande utilisant la PLL a démontré une bonne synchronisation avec la tension du réseau et une robustesse aux perturbations de tension, ce qui a permis d'améliorer la détection de la composante fondamentale de la tension et ainsi il a permis une compensation plus précise.

La commande utilisant deux filtres multivariables quant à lui s'est révélé être une stratégie qui permet de bien compenser les harmoniques de courant.

En somme, l'architecture à deux bras à point milieu combinées à une commande adéquate, constitue une solution efficace pour l'amélioration de la qualité de l'énergie.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons étudié et simulé deux types de commande : la commande directe et indirecte appliquées à un Filtre Actif de Puissance (FAP) parallèle à deux bras à point milieu, et connecté à un réseau électrique triphasé à trois fils. L'objectif principal était d'analyser le comportement de ce type de filtre en vue d'améliorer la qualité de l'énergie électrique, en particulier la compensation des courants harmoniques générés par les charges non linéaires.

Dans une première partie, nous avons exposé les généralités sur les FAP à trois bras, en mettant en évidence leurs principes de fonctionnement, et les différentes stratégies de commande existantes. Ensuite, nous nous sommes concentrés sur les FAP à deux bras, qui constituent une alternative plus économique tout en assurant une compensation efficace dans les réseaux électriques équilibrés. Cette topologie nécessite toutefois une gestion rigoureuse du point milieu, assuré ici par deux condensateurs, élément clé du bon équilibre énergétique.

La partie principale du travail a été consacrée à la simulation sous MATLAB/Simulink de deux types de contrôle des interrupteurs (MLI et hystérésis) :

Les simulations ont permis de comparer les performances des différentes stratégies de commande décrit au chapitre 1 et chapitre 2 pour ce type de topologie.

Ces simulations confirment l'efficacité des FAP à deux bras à point milieu commandés de manière directe ou indirecte pour la compensation harmonique dans les réseaux triphasés sans neutre. Elle met également en évidence les avantages et les limites des deux techniques de commande utilisées. Ces résultats ouvrent la voie à des perspectives futures, notamment la mise en œuvre expérimentale sur banc de test, l'optimisation des stratégies de commande (notamment prédictives ou intelligentes), ou encore l'intégration de techniques de régulation adaptatives pour un fonctionnement encore plus robuste.

Références bibliographiques

- [1] **M. ANTOINE HANNA NOHRA** « Commande de Filtres Actifs Parallèles sur un Réseau Fortement Perturbé ». Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2017.
- [2] LARABI Soumia et AMANI Juma Shabani « Etude et simulation d'une commande d'un filtre actif de puissance basé sur les ondelettes » Université Tlemcen. 2017
- [3] SELKA, Mohammed *et* TALEB, Abderrahmane Mortada « Etude et Simulation d'un filtre actif de puissance hybride constitué d'un filtre actif de puissance série associé à un filtre de puissance passif » Université Tlemcen. 2022
- [4] **GAOUAR FATEH, CHOUIDIRA Ibrahim, OULDDJE SIDI.**, « Commande d'un filtre actif série ». Mémoire de fin d'études, Université de M'SILA. 2010
- [5] **AMARA, Asma et BENGANA, Adil Yassine** « Étude et simulation d'un circuit de commande pour un filtre actif parallèle à deux bras ». Université Tlemcen. 2015
- [6] **Laksari Abdelkader et Si Tayeb Mustapha Ayoub Abdelnacer.** « Etude et simulation d'un filtre actif de puissance hybride constituée d'un filtre passif et un filtre actif de puissance parallèle à commande indirecte » Université Tlemcen. 2022
- [7] **Tahri Meryem et Zoukha Djemaa** « Etude et simulation d'une commande robuste pour filtre actif de puissance à deux Bras a point milieu pour la compensation de courant harmonique » Mémoire Master, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2017
- [8] **S. Bhattacharya and D. Diwan.** « Synchronous Frame Based Controller Implementation for a Hybrid Series Active Filter System.» Proceedings of IEEE IAS Meeting 1995, Hyderabad, 5-7 January 1995, pp 2531-2540.
- [9] **Rafaa Fethi et Youb Mohamed** « Étude et simulation d'un filtre actif parallèle à commande indirecte associé à un filtre actif série ». Université Tlemcen. 2022
- [10] **H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae.**, «Generalized theory of the instantaneous reactive power in Three-phase circuits». IPEC Tokyo. 1983
- [11] **Akagi, H., Ogasawara, S., Kim, H.**, «The theory of instantaneous power in Three-phase four-wire systems and its applications». Electrical Engineering in Japan, vol. 135, no. 3, 1999
- [12] **Belayachi Fatna Imane et Benabbou.** « *Etude comparative entre commandes par mode glissant d'ordre 2 appliquées à une MSAP* ». Mémoire de Master, Université de Tlemcen.2022
- [13] **Akagi., H.** «New trends in active filters for power conditioning». IEEE Transactions on Industry Applications. 1996
- [14] **MARIF Yacine et 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 tlemcen.2016

Références bibliographiques

- [15] **Akagi, H., Watanabe, E. H., & Aredes, M.**, « Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning». Wiley-IEEE Press. 2007
- [16] **M Diab, M El-Habrouk, TH Abdelhamid, S Deghedie** « Survey of active power filters configurations» iee international conference on system, computation, automation and networking (icscan), 2018
- [17] Zergoug Nawel et Messaoud Omar «Étude et simulation d'un filtre actif de puissance parallèle multi-niveaux et modulaire » Mémoire de Master, Université Tlemcen. 2023
- [18] **Mihaela Popescu, Alexandru Bitoleanu** « Shunt Active Power Filters in Three-Phase, Three-Wire Systems: A Topical Review» *Energies* **2024**, *17*(12), 2867; <https://doi.org/10.3390/en17122867>
- [19] **Emanuel, A. E.**, «Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow». Wiley-IEEE Press. 2010
- [20] **Czarnecki, L.S.**, «What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion power and why it should be abandoned». IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol IM-36, N°3, 1987
- [21] **M El-Habrouk, MK Darwish, P Mehta** «Active power filters: A review» IEE Proceedings-Electric Power Applications 147 (5), 403-413, 2000.
- [22] **Akagi, H., Kanazawa, Y., & Nabae, A.**, « Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components». IEEE Transactions on Industry Applications, 20(3), 625–630, 1984
- [23] **Benhabib, M. C.**, « Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension ». Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, France, 2004
- [24] **Bachir Asma et Merabti Mohammed el amine.** « *Etude et simulation d'un filtre actif parallèle Multi- niveaux* » Mémoire de Master, Université Tlemcen. 2020
- [25] **Bhattacharya, A., & Chakraborty, C.**, « A Shunt Active Power Filter with Enhanced Performance Using ANN-Based Predictive and Adaptive Controllers». IEEE Transactions on Industrial Electronics, 58(2), 2010
- [26] **Anouar Nasri.** « La commande prédictive d'un filtre actif parallèle » Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'hidi Oum-El-Bouaghi, 2019
- [27] **Peng, F. Z.**, « Application issues of active power filters». IEEE Industry Applications Magazine, 4(5), 21–30, 1998
- [28] **Mammad Meryem & Kadri Rania.** « Étude et simulation d'un filtre actif de puissance parallèle utilisant une commande intelligente » Mémoire de Master, Université tlemcen.2021
- [29] **Akagi, H., Watanabe, E. H., & Aredes, M.**, « Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning». Wiley-IEEE Press. 978-0471712323, 2007

Références bibliographiques

[30] **Mohamed Muftah Abdusalam** « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales ». Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, France, 2008

Annexe

Annexe A

Page 20 : FAPP à trois bras de l'ensemble charge non-linéaire qui alimente une charge RL

Vs (v)	Ls (H)	Rs (Ω)	Lc (H)	Rc (Ω)	Rd (Ω)	Ld (H)
230	45.56e-6	1.59e-3	23.1e-6	2.73e-3	0.79	2.6e-6

Tableau A.1

Page 21 : FAP trois bras a point milieu à commande directe utilisant de la stratégie de commande PQ qui incluant type hystérésis

Vs (v)	Ls (H)	Rs (Ω)	Lc (H)	Rc (Ω)	Rd (Ω)	Ld (H)	Rf (Ω)	Lf (H)	C _{dc} (F)
230	45.56e-6	1.59e-3	23.1e-6	2.73e-3	0.79	2.6e-6	0.79e-3	2.6e-6	450e-4

Tableau A.2

Page 23 : FAP trois bras a point milieu à commande directe utilisant de la stratégie de commande PQ qui incluant type MLI

Vs (v)	Ls (H)	Rs (Ω)	Lc (H)	Rc (Ω)	Rd (Ω)	Ld (H)	Rf (Ω)	Lf (H)	C _{dc} (F)
230	45.56e-6	1.59e-3	23.1e-6	2.73e-3	0.79	2.6e-6	0.79e-3	2.6e-6	250e-4

Tableau A.3

Page 25 : FAP trois bras a point milieu à commande indirecte utilisant de la stratégie de commande PQ qui incluant type hystérésis

Vs (v)	Ls (H)	Rs (Ω)	Lc (H)	Rc (Ω)	Rd (Ω)	Ld (H)	Rf (Ω)	Lf (H)	C _{dc} (F)
230	1e-8	1e-3	23.1e-6	2.73e-3	0.79	2.6e-6	10e-6	0.1e-3	260e-3

Tableau A.4

Page 27 : FAP trois bras a point milieu à commande indirecte utilisant de la stratégie de commande PQ qui incluant type MLI

Vs (v)	Ls (H)	Rs (Ω)	Lc (H)	Rc (Ω)	Rd (Ω)	Ld (H)	Rf (Ω)	Lf (H)	C _{dc} (F)
230	1e-8	1e-3	23.1e-6	2.73e-3	0.79	2.6e-6	10e-6	0.1e-3	25e-4

Tableau A.5

Annexe

Chapitre III

Page 40 : FAP deux bras a point milieu à commande directe utilisant de la stratégie de commande PQ qui incluant type hystérésis

Vs (v)	Ls (H)	Rs (Ω)	Lc (H)	Rc (Ω)	Rd (Ω)	Ld (H)	Rf (Ω)	Lf (H)	C _{dc} (F)
230	45.56e-6	1.59e-3	23.1e-6	2.73e-3	0.79e-3	2.6e-6	0.79e-3	2.6e-6	4878,4e-6

Tableau A.6

Page 42 : FAP deux bras a point milieu à commande directe utilisant de la stratégie de commande PQ qui incluant type MLI

Vs (v)	Ls (H)	Rs (Ω)	Lc (H)	Rc (Ω)	Rd (Ω)	Ld (H)	Rf (Ω)	Lf (H)	C _{dc} (F)
230	45.56e-6	1.59e-3	23.1e-6	2.73e-3	0.79e-3	2.6e-6	0.79e-3	2.6e-6	95e-4

Tableau A.7

Page 43 : FAP deux bras a point milieu à commande directe utilisant la stratégie de commande PQ incorporant deux filtres multivariables qui incluant type hystérésis

Vs (v)	Ls (H)	Rs (Ω)	Lc (H)	Rc (Ω)	Rd (Ω)	Ld (H)	Rf (Ω)	Lf (H)	C _{dc} (F)
230	45.56e-6	1.59e-3	23.1e-6	2.73e-3	0.79e-3	2.6e-6	0.79e-3	2.6e-6	487.84*10e-6

Tableau A.8

Page 44 : FAP deux bras a point milieu à commande directe utilisant la stratégie de commande PQ incorporant deux filtres multivariables qui incluant type MLI

Vs (v)	Ls (H)	Rs (Ω)	Lc (H)	Rc (Ω)	Rd (Ω)	Ld (H)	Rf (Ω)	Lf (H)	C _{dc} (F)
230	45.56e-6	1.59e-3	23.1e-6	2.73e-3	0.79e-3	2.6e-6	0.79e-3	2.6e-6	95e-4

Tableau A.9

Page 46 : FAP deux bras a point milieu à commande directe utilisant la stratégie de commande PQ incorporant un filtre multivariable et une PLL qui incluant type hystérésis

Vs (v)	Ls (H)	Rs (Ω)	Lc (H)	Rc (Ω)	Rd (Ω)	Ld (H)	Rf (Ω)	Lf (H)	C _{dc} (F)
230	45.56e-6	1.59e-3	23.1e-6	2.73e-3	0.79e-3	2.6e-6	0.79e-3	2.6e-6	487.84*10e-6

Tableau A.10

Page 47 : FAP deux bras a point milieu à commande directe utilisant la stratégie de commande PQ incorporant un filtre multivariable et une PLL qui incluant type MLI

Annexe

Vs (v)	Ls (H)	Rs (Ω)	Lc (H)	Rc (Ω)	Rd (Ω)	Ld (H)	Rf (Ω)	Lf (H)	C_{dc} (F)
230	45.56e-6	1.59e-3	23.1e-6	2.73e-3	0.79e-3	2.6e-6	0.79e-3	2.6e-6	95e-4

Tableau A.11

Page 48 : FAP deux bras a point milieu à commande directe utilisant de la méthode de Fryze qui incluant type hystérésis

Vs (v)	Ls (H)	Rs (Ω)	Lc (H)	Rc (Ω)	Rd (Ω)	Ld (H)	Rf (Ω)	Lf (H)	C_{dc} (F)
230	45.56e-6	1.59e-3	23.1e-6	2.73e-3	0.79	2.6e-6	0.79e-3	2.6e-6	60e-5

Tableau A.12

Page 49 : FAP deux bras a point milieu à commande directe utilisant de la méthode de Fryze qui incluant type MLI

Vs (v)	Ls (H)	Rs (Ω)	Lc (H)	Rc (Ω)	Rd (Ω)	Ld (H)	Rf (Ω)	Lf (H)	C_{dc} (F)
230	1e-8	1e-3	23.1e-6	2.73e-3	0.79	2.6e-6	1e-6	0.1e-3	40e-4

Tableau A.13

Page 51 : FAP deux bras a point milieu à commande indirecte utilisant de la stratégie de commande PQ qui incluant type hystérésis

Vs (v)	Ls (H)	Rs (Ω)	Lc (H)	Rc (Ω)	Rd (Ω)	Ld (H)	Rf (Ω)	Lf (H)	C_{dc} (F)
230	1e-8	1e-3	23.1e-6	2.73e-3	0.79e-3	2.6e-6	10e-6	0.1e-3	60e-3

Tableau A.14

Page 53 : FAP deux bras a point milieu à commande indirecte utilisant de la stratégie de commande PQ qui incluant type MLI

Vs (v)	Ls (H)	Rs (Ω)	Lc (H)	Rc (Ω)	Rd (Ω)	Ld (H)	Rf (Ω)	Lf (H)	C_{dc} (F)
230	1e-8	1e-3	23.1e-6	2.73e-3	0.79	2.6e-6	10e-6	0.1e-3	60e-3

Tableau A.15

Page 54 : FAP deux bras a point milieu à commande indirecte utilisant la stratégie de commande

PQ incorporant deux filtres multivariables qui incluant type hystérésis

Vs (v)	Ls (H)	Rs (Ω)	Lc (H)	Rc (Ω)	Rd (Ω)	Ld (H)	Rf (Ω)	Lf (H)	C_{dc} (F)
230	1e-8	1e-3	23.1e-6	2.73e-3	0.79e-3	2.6e-6	10e-6	0.1e-3	60e-3

Tableau A.16

Page 55 : FAP deux bras a point milieu à commande indirecte utilisant la stratégie de commande PQ incorporant deux filtres multivariables qui incluant type MLI

Annexe

Vs (v)	Ls (H)	Rs (Ω)	Lc (H)	Rc (Ω)	Rd (Ω)	Ld (H)	Rf (Ω)	Lf (H)	C _{dc} (F)
230	1e-8	1e-3	23.1e-6	2.73e-3	0.79	2.6e-6	10e-6	0.1e-3	60e-3

Tableau A.17

Page 56 : FAP deux bras a point milieu à commande indirecte utilisant la stratégie de commande PQ incorporant un filtre multivariable et une PLL qui incluant type hystérésis

Vs (v)	Ls (H)	Rs (Ω)	Lc (H)	Rc (Ω)	Rd (Ω)	Ld (H)	Rf (Ω)	Lf (H)	C _{dc} (F)
230	1e-8	1e-3	23.1e-6	2.73e-3	0.79e-3	2.6e-6	10e-6	0.1e-3	60e-3

Tableau A.18

Page 58 : FAP deux bras a point milieu à commande indirecte utilisant la stratégie de commande PQ incorporant un filtre multivariable et une PLL qui incluant type MLI

Vs (v)	Ls (H)	Rs (Ω)	Lc (H)	Rc (Ω)	Rd (Ω)	Ld (H)	Rf (Ω)	Lf (H)	C _{dc} (F)
230	1e-8	1e-3	23.1e-6	2.73e-3	0.79	2.6e-6	10e-6	0.1e-3	60e-3

Tableau A.19

Page 59 : FAP deux bras a point milieu à commande indirecte utilisant de la méthode de Fryze qui incluant type hystérésis

Vs (v)	Ls (H)	Rs (Ω)	Lc (H)	Rc (Ω)	Rd (Ω)	Ld (H)	Rf (Ω)	Lf (H)	d _c (v)
230	45.56e-6	1.59e-3	23.1e-6	2.73e-3	0.79	2.6e-6	0.79e-3	2.6e-6	700

Tableau A.20

Page 60 : FAP deux bras a point milieu à commande indirecte utilisant de la méthode de Fryze qui incluant type MLI

Vs (v)	Ls (H)	Rs (Ω)	Lc (H)	Rc (Ω)	Rd (Ω)	Ld (H)	Rf (Ω)	Lf (H)	d _c (v)
230	45.56e-6	1.59e-3	23.1e-6	2.73e-3	0.79	2.6e-6	0.79e-3	2.6e-6	700

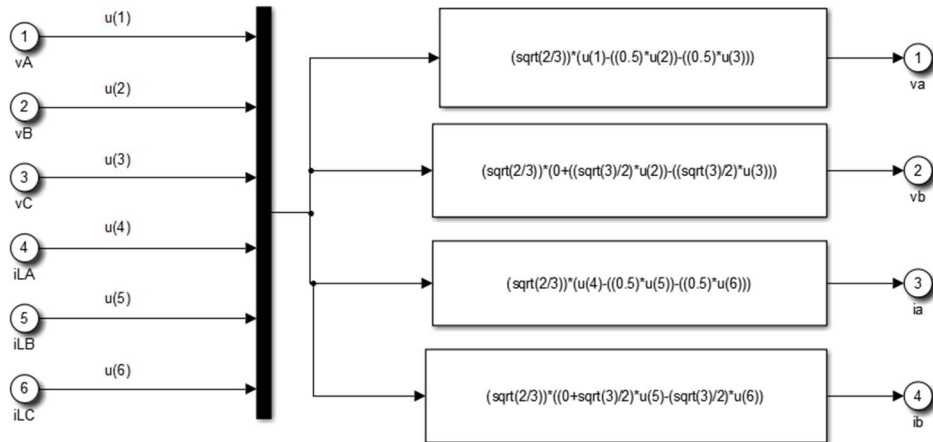
Tableau A.21

Annexe

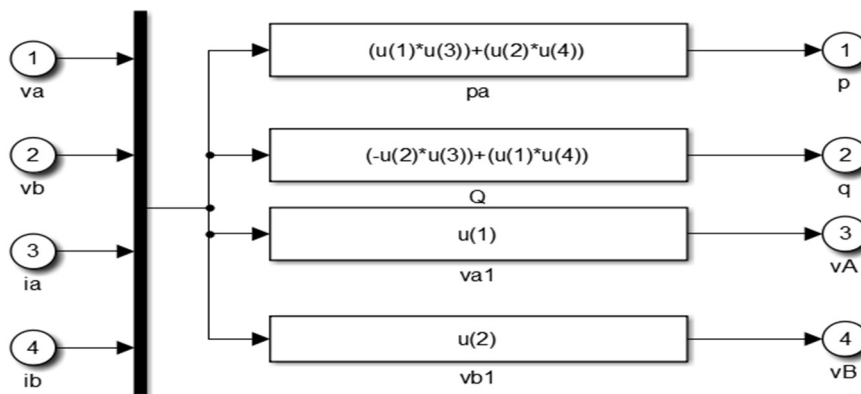
Annexe B

Les blocks représentant les sous-systèmes de la commande utilisé PQ :

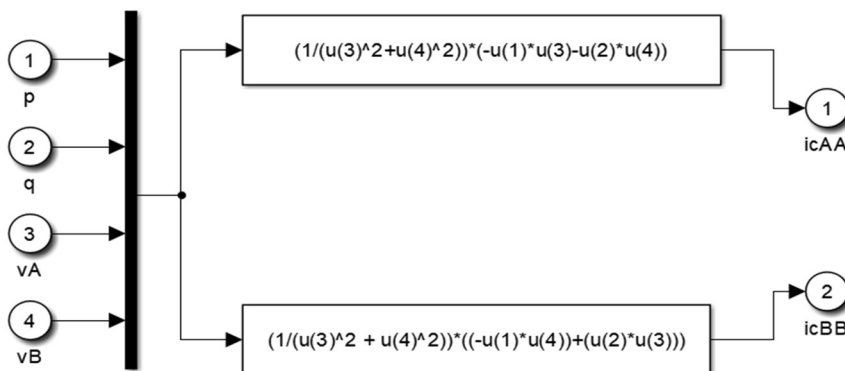
Les équations de commande PQ :



Transformation de Concordia

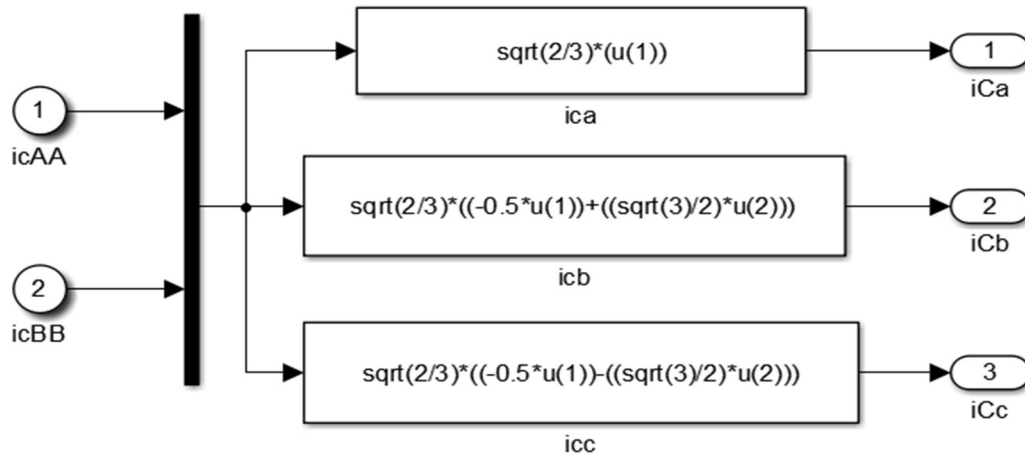


Calcul des puissances instantanées



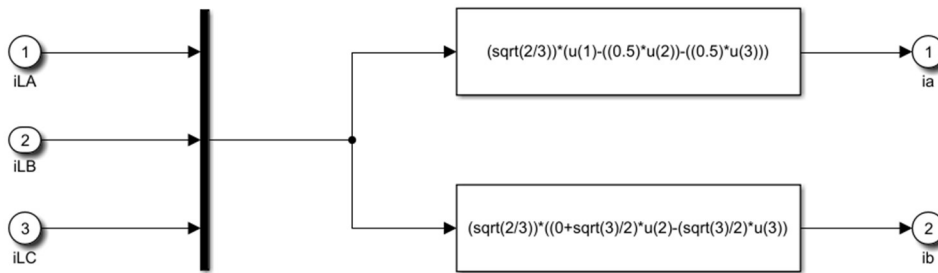
Calcul des courants en $\alpha\beta$

Annexe

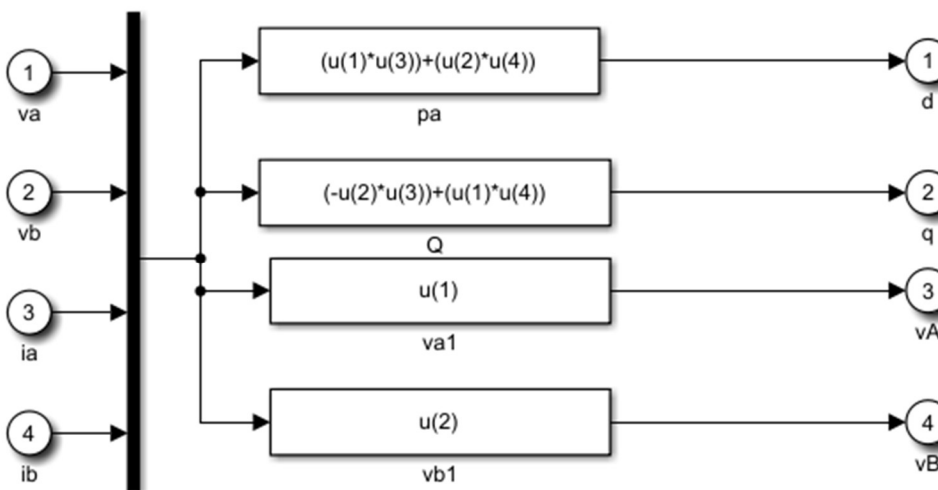


Transformation de Concordia inverse

Les blocks représentant les sous-systèmes de la commande utilisé DQ :

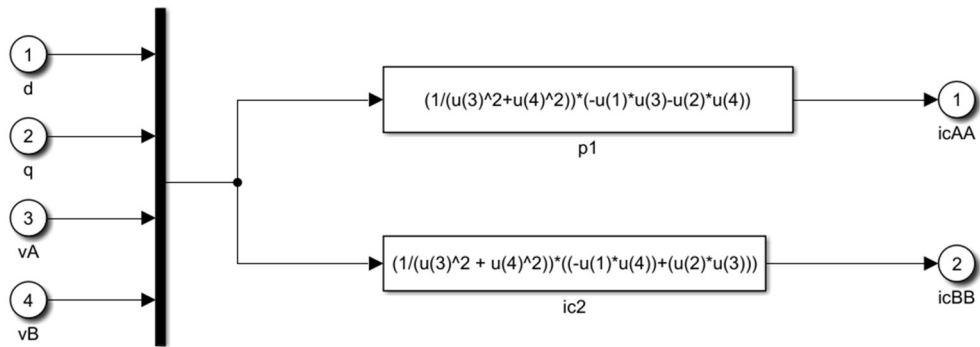


Calcul des courants en i_a et i_b

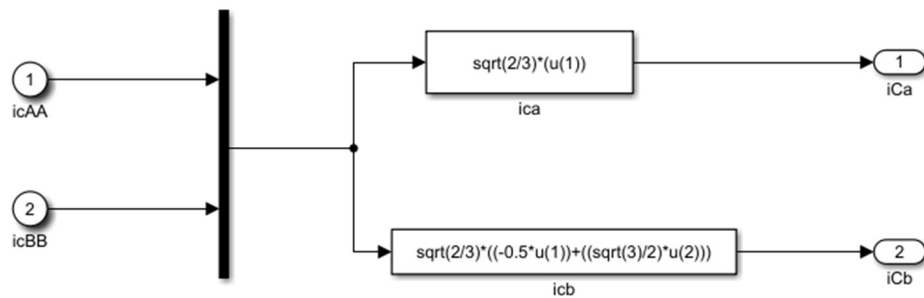


Calcul des puissances instantanées

Annexe



Calcul des courants en $\alpha\beta$



Transformation de Clarke inverse

Les blocks représentant les sous-systèmes de la méthode directe de puissance instantanées PQ deux filtres multi-variable

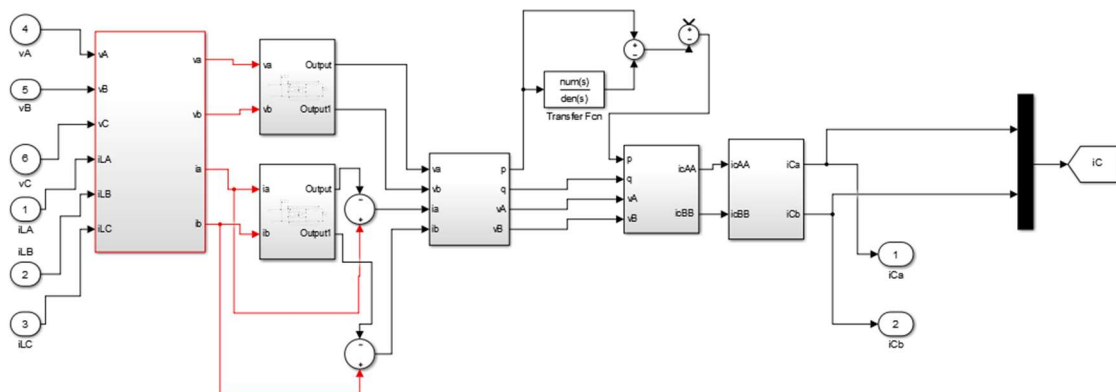
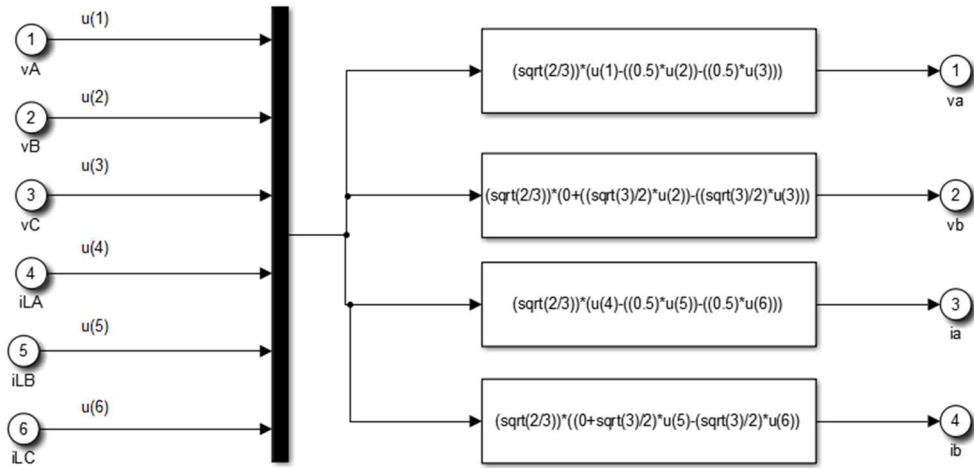
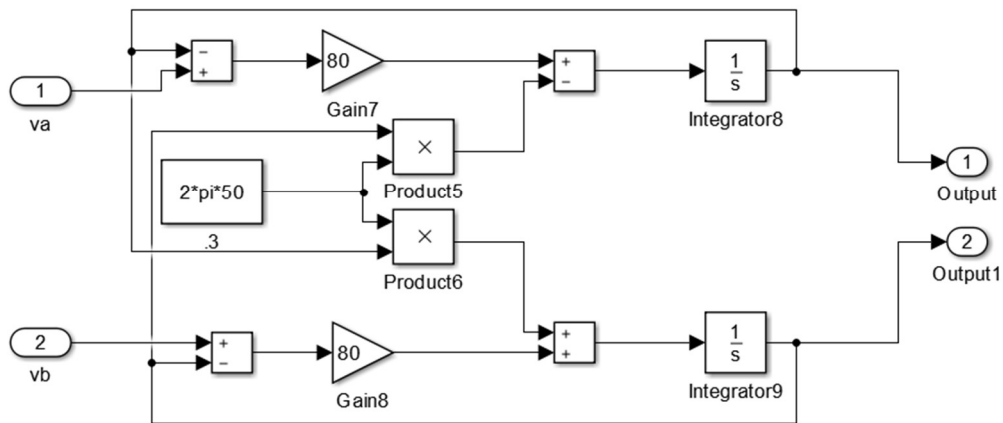


Schéma de la commande multi-variable

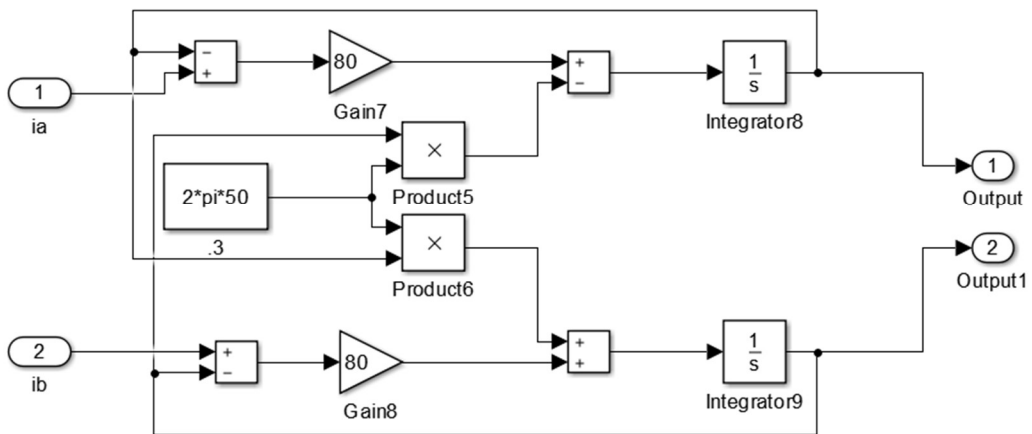
Annexe



Transformation de Clarke

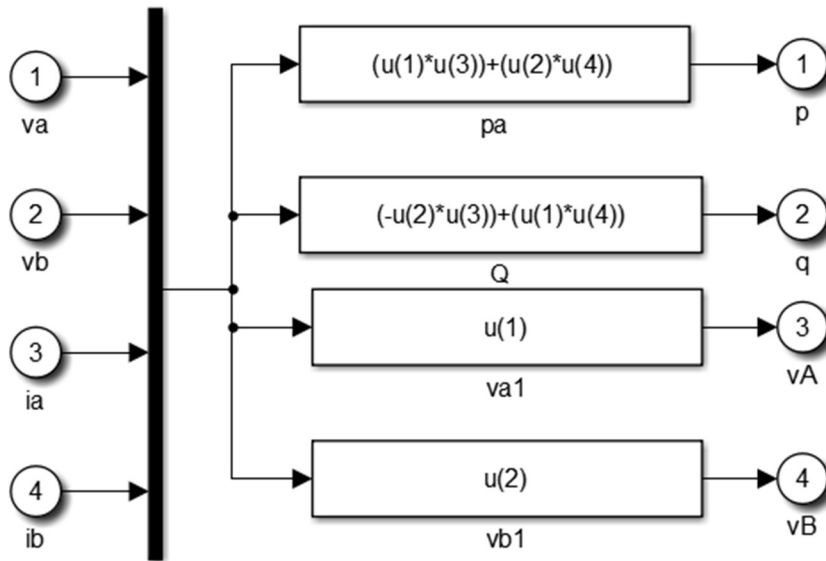


Filtre multi-variable v_a et v_b

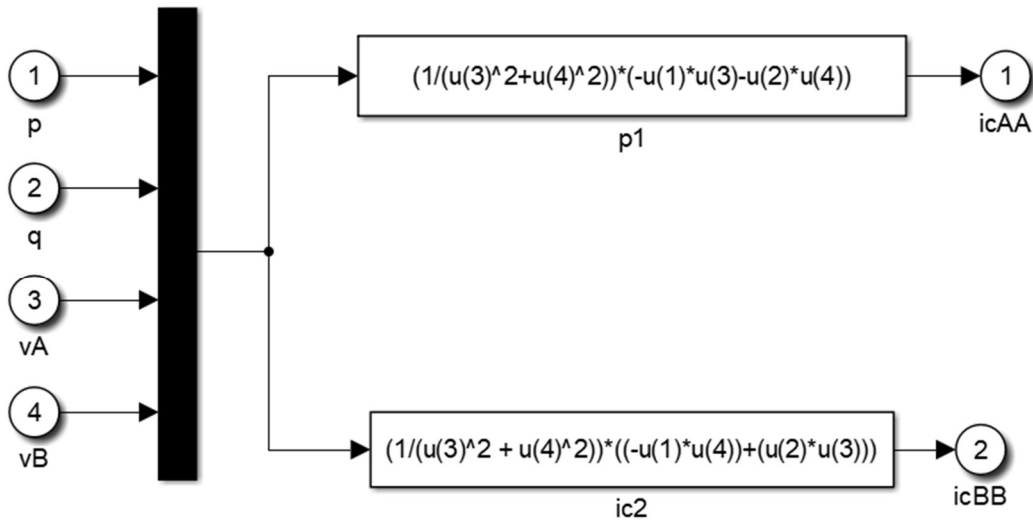


Filtre multi-variable i_a et i_b

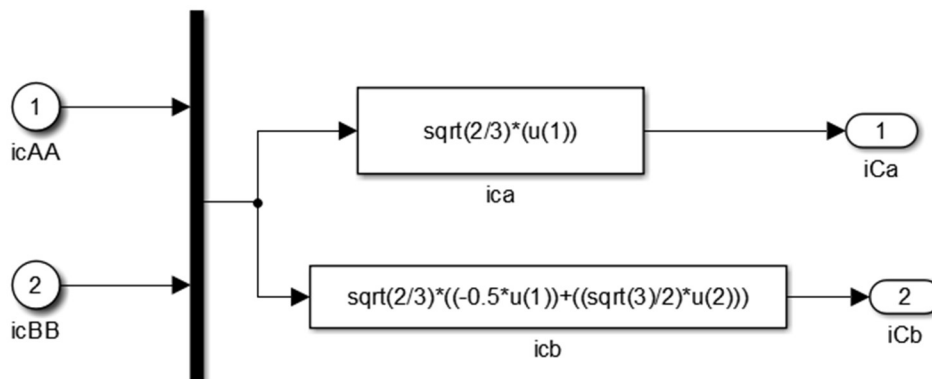
Annexe



Calcul des puissances instantanées



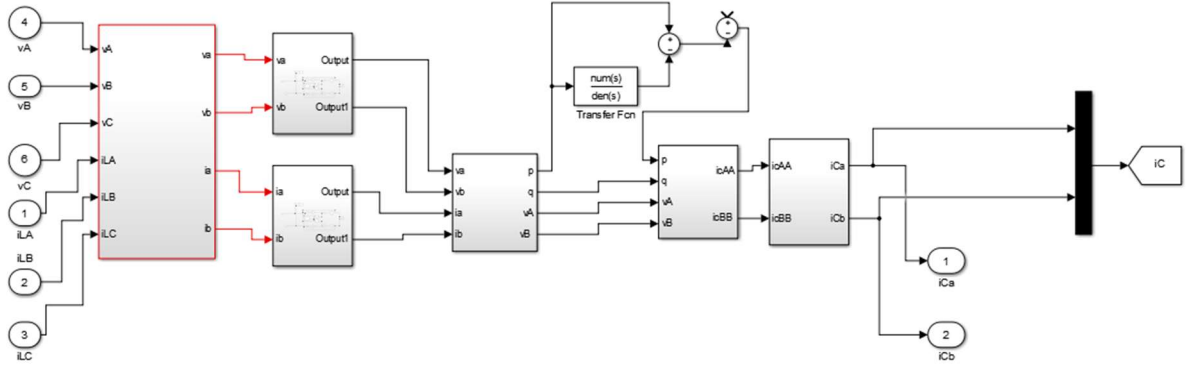
Calcul des courants en $\alpha\beta$



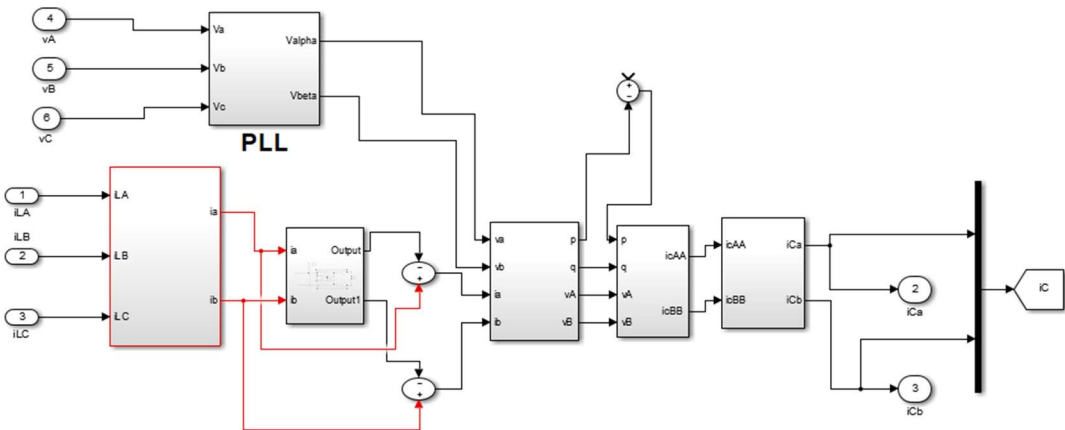
Transformation de Clarke inverse

Annexe

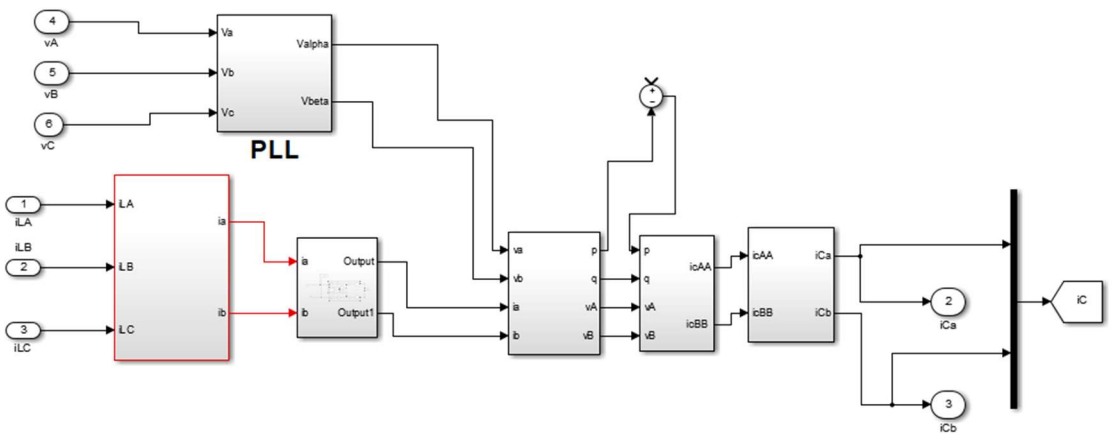
Les blocks représentant les sous-systèmes de la méthode indirecte de puissance instantanées PQ deux filtres multi-variable



Les blocks représentant les sous-systèmes de la méthode directe de puissance instantanées PQ d'un filtre multi-variable et un PLL



Les blocks représentant les sous-systèmes de la méthode indirecte de puissance instantanées PQ d'un filtre multi-variable et un PLL



Annexe

Les blocks représentant les sous-systèmes de la méthode Fryze

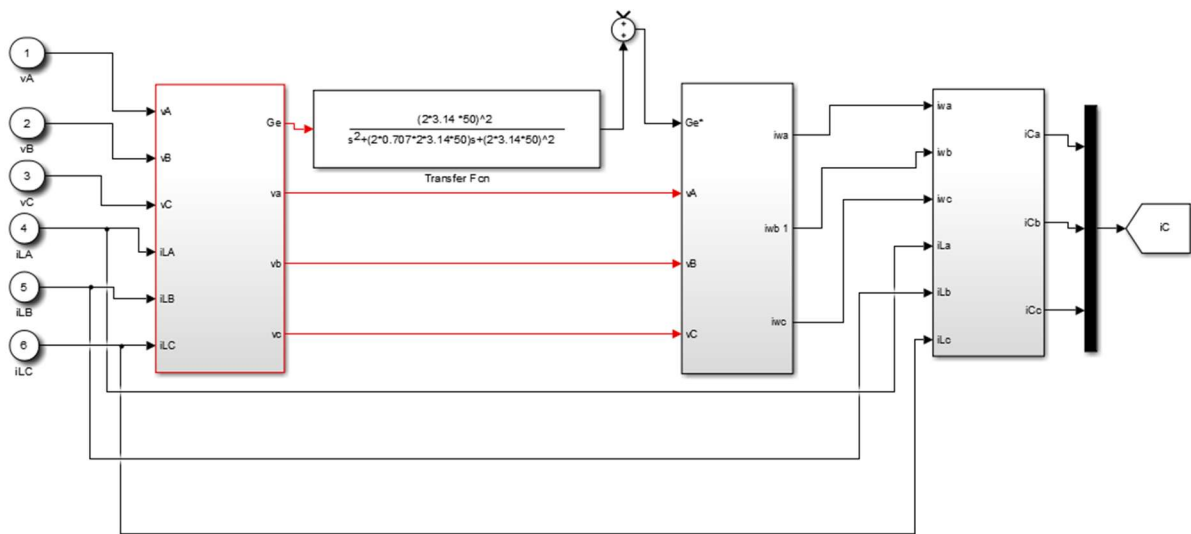
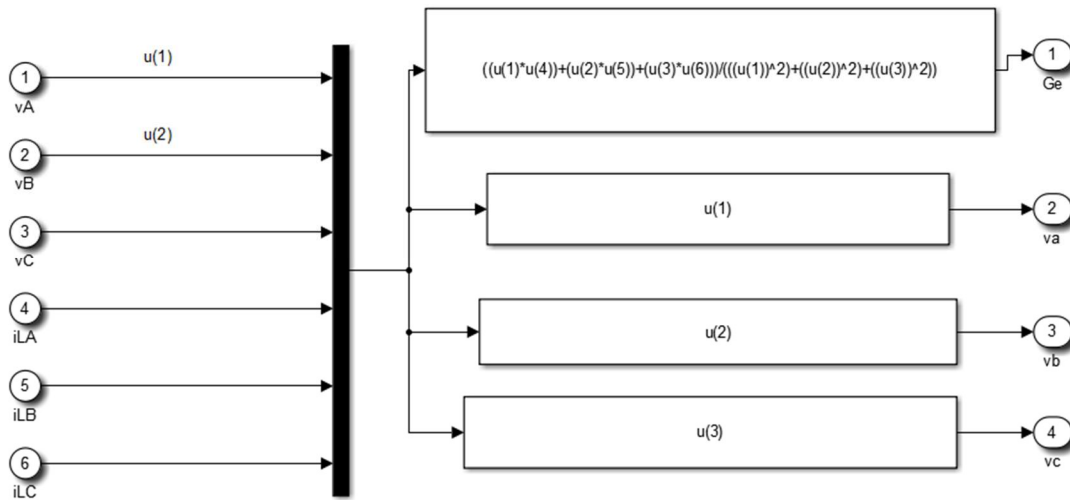
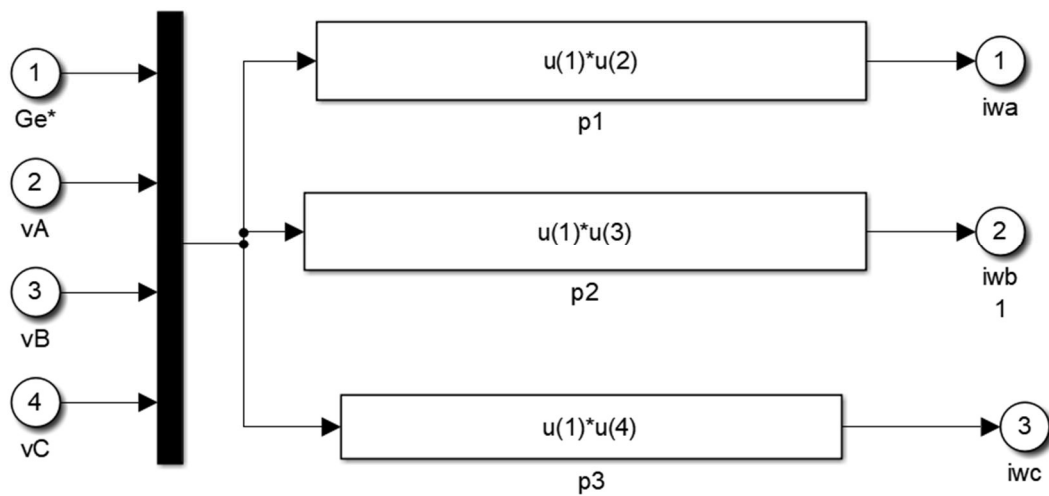


Schéma de commande Fryze

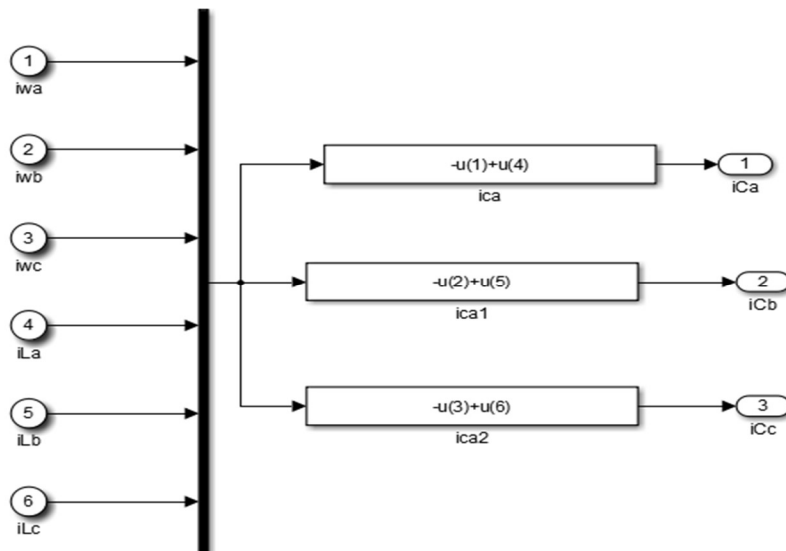


Calcul de la conductance active selon Fryze



Calcul des courants actifs

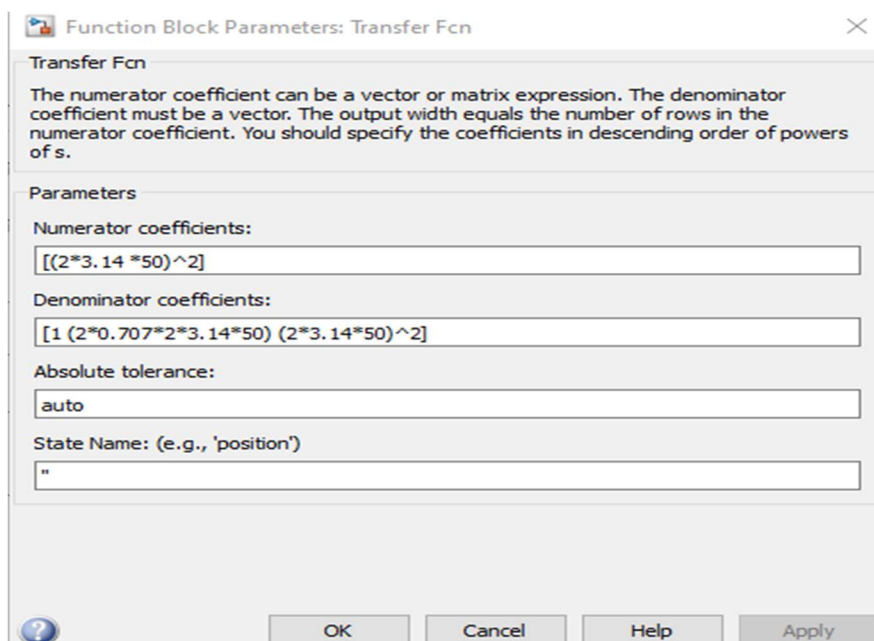
Annexe



Calcul des courants de compensatio

Annexe C

Paramètres du Filtre passe bas FAP :



Paramètre filtre passe-bas

Les tensions simples et les courants linéaires d'un système triphasé sans homopolaire $i_{c1}(t); i_{c2}(t); i_{c3}(t); V_{S1}(t); V_{S2}(t); V_{S3}(t)$. Concordia a changé et maintenant on peut obtenir quelque chose.

Annexe

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_B \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \\ V_{S3} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_B \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix}$$

La puissance réelle p est exprimée sans tenir compte des harmoniques de tension.

$$p = V_a i_a + V_B i_B$$

La puissance réelle peut être décrite en deux parties : une qui est toujours là et une autre qui change tout le temps.

$$p = \bar{p} + \tilde{p}$$

La composante continue de p s'appelle \bar{p} et la composante alternative de p s'appelle \tilde{p}

Les composantes de courant en $(\alpha-\beta)$ sont données par ces expressions :

$$i_a = \frac{V_a}{V_a^2 + V_B^2} p$$

$$i_B = \frac{V_B}{V_a^2 + V_B^2} p$$

Les axes $(\alpha - \beta)$ deviennent

$$i_a = \frac{V_a}{V_a^2 + V_B^2} \bar{p} + \frac{V_a}{V_a^2 + V_B^2} \tilde{p}$$

$$i_B = \frac{V_B}{V_a^2 + V_B^2} \bar{p} + \frac{V_B}{V_a^2 + V_B^2} \tilde{p}$$

Le filtre de puissance actif sert seulement à compenser les courants harmoniques. $p_f = \bar{p}$, On obtient donc :

$$i_{aref} = \frac{V_a}{V_a^2 + V_B^2} p_f$$

$$i_{Bref} = \frac{V_B}{V_a^2 + V_B^2} p_f$$

Les courants de référence sont encore donnés par la transformation inverse de Concordia.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_B \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix}$$

الملخص:

في هذه الأطروحة، نقدم دراسة ونتائج محاكاة لاستراتيجيتين للتحكم - المباشرة وغير المباشرة - المطبقة على مرشحات الطاقة يتم توصيل مرشح الطاقة النشطة النشطة هذا بشبكة (APFs) النشطة المتوازية ذات نقطتي التوازي في منتصف الذراعين كهربائية ثلاثية الأطوار وثلاثية الأسلاك، وهدفه الرئيسي هو تحسين جودة الطاقة الكهربائية من خلال تعويض التيارات التوافقية الناتجة عن الأحمال غير الخطية.

قمنا بإجراء محاكاة ومقارنة بين مختلف استراتيجيات التحكم، سواء كانت مباشرة أو غير مباشرة. وقد مكنتنا المحاكاة المنفذة باستخدام بيئة MATLAB/Simulink من تقييم الأداء الديناميكي ودقة كل استراتيجية تحكم. وتُظهر النتائج المحققة فعالية المرشح الفعال ذو الذراعين ونقطة التوصيل الوسطى في تقليل التوافقيات الناتجة عن الأحمال غير الخطية وتحسين معامل القدرة، حيث تم تحقيق نسبة تشويه توافقية كلية (THD) أقل من 5%، مما يسمح بالامتثال للمعيار الدولي IEC **الكلمات المفتاحية:** FAPP مع ذراعين في منتصف النقطة، تحكم مباشر وغير مباشر، شبكة كهربائية ثلاثية الأطوار بثلاثة أسلاك.

Résumé :

Nous présentons dans ce mémoire une étude et les résultats de simulation de deux stratégies de commande – directe et indirecte – appliquées aux filtres actifs de puissance (FAP) parallèle à deux bras à point milieu. Ce FAPP est connecté à un réseau électrique triphasé à trois fils, et a pour principal objectif l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique en compensant les courants harmoniques engendrés par les charges non linéaires. Nous avons fait les simulations et une comparaison des différentes stratégies de commande que ce soit pour la commande directe ou indirecte. Les différentes simulations réalisées sous l'environnement MATLAB/Simulink permettent d'évaluer les performances dynamiques et la précision de chaque stratégie de commande. Les résultats obtenus démontrent l'efficacité du FAPP à deux bras à point milieu dans la réduction des harmoniques de courant injecter par les charges non linéaire et l'amélioration du facteur de puissance, en obtenant un THD inférieur à 5% ce qui permet de respecter la norme CEI.

Mots clés : FAPP à 2 bras à point milieu, commande directe et indirecte, réseau électrique triphasé trois fils.

Abstract:

This thesis presents a study and simulation results of two control strategies – direct and indirect – applied to two-leg midpoint parallel active power filters (APF). This APF is connected to a three-phase, three-wire electrical network and aims primarily to improve power quality by compensating currents harmonics generated by nonlinear loads. We conducted simulations and a comparison of the different control strategies, both using direct control and indirect. The various simulations carried out in the MATLAB/Simulink environment allow for an evaluation of the dynamic performance and accuracy of each control strategy. The results obtained demonstrate the effectiveness of the two-leg midpoint APF in reducing current harmonics injected by nonlinear loads and improving the power factor, achieving a THD below 5%, thus complying with IEC standards.

Keywords: 2-arm mid-point APFP, direct and indirect control, three-phase three-wire electrical network.