

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Electrotechnique

Spécialité : Commandes électriques

Par : Zergoug Nawel & Messaoud Omar

Sujet

Étude et simulation d'un filtre actif de puissance parallèle multi-niveaux et modulaire

Soutenu publiquement, le 20 / 06 /2023, devant le jury composé de :

Mr. Abed MALTI	MCA	Université de Tlemcen	Président
Mme. Sihem BOURI	MCA	Université de Tlemcen	Examineur
Mr. Mohamed Choukri BENHABIB	Professeur	Université de Tlemcen	Encadreur

Année universitaire: 2022 /2023

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu le Tout-Puissant de nous avoir donné la force d'atteindre nos objectifs et de faire notre travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre encadrant, Pr. M. C. BENHABIB, professeur à la Faculté de Technologie de l'Université Aboubekr Belkaïd à Tlemcen, pour sa disponibilité et sa patience et pour ses conseils avisés, qui nous ont permis de réaliser ce mémoire.

Nous remercions également tous les responsables universitaires et les enseignants du Département de génie électrique

Je souhaite exprimer ma gratitude envers les membres du jury, Mr. Abed MALTI et Mme. Sihem BOURI, pour avoir accepté de juger ce travail.

Par ailleurs, je suis sincèrement reconnaissant à tous ceux qui m'ont prodigué des conseils, de près ou de loin, qui m'ont permis de faire ce travail.

Dédicace

Je souhaite dédier ce travail à mes très chers parents que Dieu les protège incha Allah, qui ont été d'une grande aide tout au long de mon parcours, ainsi qu'à mon frère.

À tous mes proches, qu'ils soient grands ou petits.

À tous ceux qui nous chérissent.

À tous nos enseignants pour leur générosité dans le partage de leur savoir et de leurs connaissances.

ZERGOUG NAWEL

Dédicace

Je dédie ce travail à :

- Ma mère et mon père qui m'ont soutenus durant toutes les périodes de vie, que Dieu les protège incha Allah.
- Mon frère et ma sœur.
- Mes chers oncles et tantes.
- Mes cousins.
- Mes chers amis.
- Enseignants et enseignantes depuis ma carrière scientifique.
- Mes amis de la promotion pour leurs aides et supports.
- Mon binôme.

MESSAOUD OMAR.

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I Étude des Filtres actifs de Puissance Parallèle	3
I.1 Introduction.....	4
I.2 Filtre actif de puissance parallèle.....	4
I.3 Classification des filtres actifs de puissance parallèles.....	4
I.4 Structure générale d'un filtre actif de puissance parallèle.....	5
I.4.1 Étude du filtre actif de puissance parallèle - partie puissance	5
I.4.2 Étude du filtre actif de puissance parallèle - partie commande	9
I.5 Simulation	13
I.5.1 Simulation d'un filtre actif de puissance parallèle.....	13
I.5.2 Simulation du FAPP qui contient un onduleur à deux bras avec un condensateur à point milieu.....	16
I.6 Conclusion	19
Chapitre II Étude séparée des filtres actifs de Puissance Parallèles Modulaires et multi-niveaux.....	21
II.1 Introduction	22
II.2 Filtre actif de puissance parallèle modulaire	22
II.3 Simulation.....	23
II.3.1 Simulation du FAPP modulaire utilisant deux onduleurs à trois bras.....	23
II.3.2 Simulation du FAPP modulaire utilisant deux onduleurs à deux bras à point milieu	26
II.4 Filtre actif de puissance parallèle multi-niveaux	28
II.5 Topologie des onduleurs multi-niveaux	29
II.5.1 Onduleurs multi-niveaux à condensateur flottant (FC)	29
II.5.2 Onduleur multi-niveaux en cascade (Pont H).....	30
II.5.3 Onduleur multi-niveaux de type NPC	30
II.6 Simulation.....	33
II.6.1 Simulation du FAPP trois niveaux de type NPC.....	34
II.6.2 Simulation du FAPP cinq niveaux de type NPC	36
II.6.3 Simulation du FAPP sept niveaux de type NPC.....	38
II.7 Conclusion	40
Chapitre III Étude des Filtres actifs de puissance Parallèles Modulaire Multi-niveaux	41
III.1 Introduction	42
III.2 Filtre actif de puissance parallèle modulaire multi-niveaux	42
III.3 Simulation	43

III.3.1 Simulation du FAPMM trois niveaux de type NPC.....	44
III.3.2 Simulation du FAPMM cinq niveaux de type NPC.....	46
III.3.3 Simulation du FAPMM sept niveaux de type NPC	48
III.4 Conclusion.....	50
Conclusion générale	51
Références bibliographiques	52
ANNEXE	54
Résumé	74

Liste des tableaux

Tableau I. 1: Modes de compensation de la commande des puissances instantanées	11
Tableau I. 2 :Paramètres de simulation	14
Tableau I. 3: Paramètres de simulation	17
Tableau II. 1:Paramètres de simulation.....	24
Tableau II. 2: Paramètres de simulation.....	26
Tableau II. 3: Commutation du convertisseur NPC 3 niveaux.	31
Tableau II. 4: Commutation du convertisseur NPC 5 niveaux.	32
Tableau II. 5 :Commutation du convertisseur NPC 7 niveaux.	33
Tableau II. 6: Paramètres de simulation.....	34
Tableau III. 1: Paramètres de simulation du système complet.....	43

Liste des figures

Fig.I. 1: Filtre actif de puissance parallèle	4
Fig.I. 2: Structure générale d'un FAPP	5
Fig.I. 3: Structure du FAPP à trois bras basés sur un onduleur de tension pour la compensation des réseaux électriques à 3 fils	6
Fig.I. 4: FAPP à trois bras à structure tension connecté en parallèle au réseau électrique	7
Fig.I. 5: FAPP à structure tension à deux bras à point milieu connectés en parallèle au réseau électrique	8
Fig.I. 6: Schéma de commande directe d'un FAPP	9
Fig.I. 7: Schéma de commande indirecte d'un FAPP	10
Fig.I. 8: Commande d'un FAPP pour la compensation des courants harmoniques et l'énergie réactive par la méthode directe des puissances instantanées.....	12
Fig.I. 9: Commande directe d'un FAPP par la méthode d-q.....	13
Fig.I. 10: Schéma général du FAPP à trois bras.....	14
Fig.I. 11: Résultats de simulation du FAPP directe par SFR	16
Fig.I. 12: Schéma général du FAPP a deux bras à point milieu.....	17
Fig.I. 13: Résultats de simulation du FAPP deux bras.....	19
Fig. II. 1: Structure générale du filtre de puissance active modulaire connecté au réseau électrique	22
Fig. II. 2: Schéma général de la FAPP modulaire a deux bras avec un condensateur à point milieu.....	23
Fig. II. 3: Résultats de simulation du FAPP modulaire directe par SFR.....	25
Fig. II. 4: Résultats de simulation du FAPP modulaire à deux bras à point milieu	28
Fig. II. 5: Onduleur trois niveaux à condensateurs flottants.	29
Fig. II. 6: structure générale d'onduleur H-bridge	30
Fig. II. 7: Onduleur NPC à trois niveaux	30
Fig. II. 8 : Structure d'onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC	31
Fig. II. 9: Structure d'onduleur triphasé à cinq niveaux de type NPC	32
Fig. II. 10: Structure d'onduleur triphasé à sept niveaux de type NPC.....	33
Fig. II. 11: Schéma de commande indirecte.....	34
Fig. II. 12: Schéma général de la simulation de l'onduleur trois niveaux de type NPC	35
Fig. II. 13 : Résultats de simulation du FAPP 3 niveaux à commande indirecte par la méthode p-q.....	36
Fig. II. 14: Schéma général de la simulation du FAPP cinq niveaux de type NPC.	37
Fig. II. 15: Résultats de simulation du FAPP 5 niveaux à commande indirecte par la méthode p-q.....	38
Fig. II. 16: Schéma général de la simulation de l'onduleur sept niveaux NPC.....	39
Fig. II. 17: Résultats de simulation du FAPP 7 niveaux à commande indirecte par la méthode p-q.....	40
Fig. III. 1: Schéma général de la simulation de FAPMM n niveaux de type NPC	43
Fig. III. 2: Schéma général de la simulation de FAPMM trois niveaux de type NPC	44
Fig. III. 3: Résultats de simulation du FAPP 3 niveaux modulaire à commande indirecte par la méthode p-q.....	45
Fig. III. 4: Schéma général de la simulation de FAPMM cinq niveaux de type NPC	46

Fig. III. 5 : Résultats de simulation du FAPP 5 niveaux modulaire à commande indirecte par la méthode p-q.....	47
Fig. III. 6: Schéma général de la simulation de FAPMM sept niveaux de type NPC.....	48
Fig. III. 7: Résultats de simulation du FAPP 7 niveaux modulaire à commande indirecte par la méthode p-q.....	49
Fig.A. 1:Schéma générale de la simulation de FAPP par la commande directe par MLI a base la méthode d-q.....	55
Fig.A. 2: Schéma de la commande direct a base méthode d-q.....	57
Fig.A. 3: Schéma de la PLL	58
Fig.A. 4: : Schéma générale de la simulation de FAPP avec onduleur à condensateur point milieu connecté au système d'alimentation.....	59
Fig.A. 5: Schéma général de la commande indirecte par la méthode (p-q)	61
Fig.B. 1: Schéma générale de la simulation du FAPP modulaire à commande directe par MLI basé sur la méthode directe d-q	62
Fig.B. 2: Schéma de simulation de FAP modulaire à deux bras avec un point milieu condensateur.....	63
Fig.B. 3: Schéma général de la simulation de l'onduleur trois niveaux de type NPC	64
Fig.B. 4: Onduleur trois niveaux à structure NPC et sa commande MLI	65
Fig.B. 5: Onduleur cinq niveaux à structure NPC et sa commande MLI	66
Fig.B. 6 : Onduleur sept niveaux à structure NPC	68
Fig.B. 7: Commande MLI de NPC 7 niveaux.....	69
Fig.C. 1: Schéma de la simulation de l'onduleur trois niveaux NPC modulaire	71
Fig.C. 2: Schéma de la simulation de l'onduleur cinq niveaux NPC modulaire.....	72
Fig.C. 3: Schéma de la simulation de l'onduleur sept niveaux NPC modulaire	73

Liste des symboles

FAPP : filtre actif de puissance parallèle.

FAPMM : filtre actif de puissance parallèle modulaire multi-niveaux.

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion.

IGBT : Le transistor bipolaire à grille isolée, en anglais Insulated Gate Bipolar Transistor.

GTO : Le thyristor à extinction par la gâchette, en anglais Gate Turn-Off Thyristor.

FFT : Transforme de Fourier rapide.

CEI : Commission Electrotechnique Internationale.

NPC : Neutral Point Clamped.

FC : Flying Capacitor.

SFR : Synchronous reference frame

PLL : Phase-Locked Loop (Boucle à verrouillage de phase).

$\overline{p} \overline{q}$: Puissance continue liée à la composante fondamentale active et réactive du courant.

$\tilde{p} \tilde{q}$: Puissance alternative liées à la somme des composantes harmonique du courant.

f : Fréquence.

V_s : Tension de source.

I_s: Courant de la source.

I_e: courant de charge.

I_f: Courant de filtre (injecté)

V_{dc} : Tension aux bornes de condensateur.

CA : Courant alternative

CD : Courant continue

R : Résistance

L : Inductance

C : Condensateur

Introduction générale

Le réseau électrique est un système complexe qui distribue l'électricité aux consommateurs. Cependant, il est souvent confronté à divers problèmes, notamment les harmoniques de courant et/ou de tension. Les problèmes harmoniques dans les systèmes électriques, également connus sous le nom de pollution harmonique, ne sont pas nouveaux. Cette pollution harmonique est causée en général par des charges dites non linéaires qui consomment des courants non sinusoïdaux.

La présence d'harmoniques dans un réseau électrique peut avoir plusieurs conséquences néfastes. Tout d'abord, ils conduisent à une réduction de la qualité de l'énergie fournie aux utilisateurs finaux. De plus ils provoquent des fluctuations de tension, des variations de fréquence et des distorsions de courant qui peuvent nuire au bon fonctionnement des équipements sensibles tels que les ordinateurs, les moteurs, les transformateurs, etc.

Actuellement, la situation des réseaux électriques est assez inquiétante car la qualité de l'électricité se détériore inexorablement du faite de la pollution harmonique. Par conséquent, elle devient une source de problèmes importants pour les distributeurs d'énergie et leurs clients. Cette détérioration est directement due à la prolifération des charges dites non linéaires. Ce type de charge est employé dans les systèmes commerciaux, industriels et résidentiels. [21], [22] et [23].

La manière conventionnelle de résoudre ce problème est d'utiliser des filtres passifs. Cette solution est la plus utilisée, la plus simple et la moins chère, mais elle présente certains inconvénients, tels qu'une faible adaptabilité aux changements d'impédance du réseau et une éventuelle résonance avec l'impédance du réseau.

De nouvelles solutions de filtrage plus efficaces peuvent être utilisées, appelées filtres actifs de puissance. Cette solution vise à combler les lacunes des solutions de dépollution traditionnelles, qui ne répondent pas aux variations de charge et du réseau électrique. Ces filtres ont pour but de générer des courants et/ou des tensions harmoniques pour compenser les perturbations harmoniques générés par les charges non-linéaire.

Les filtres actifs de puissance peuvent être connectés au réseau de deux manières différentes, soit en parallèle ou en série. La connexion parallèle peut compenser le courant harmonique et l'énergie réactive, tandis que la connexion en série peut compenser la tension harmonique. [5]

De plus, si nous voulons compenser les courants harmoniques par les filtres actifs de puissance lorsque le niveau de tension est élevé où lorsque nous avons un courant de charge élevé, il est impératif d'utiliser des filtres actifs de puissance multi-niveaux et/ou modulaire. C'est cette dernière partie qui sera étudié dans notre mémoire.

Ainsi, ce mémoire sera divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre, sera consacré au principe de filtrage utilisant les filtres actifs de puissance parallèle utilisant des onduleurs à deux niveaux. Nous montrerons aussi les méthodes d'identifications des courants harmoniques basés sur l'utilisation des puissances actives et réactives instantanées, et pour terminer nous présenterons les résultats de simulation.

Le deuxième chapitre présentera l'étude des filtres actifs de puissance modulaire, afin de compenser les harmoniques de courant produites par des charges non linéaires consommant un courant élevé, et l'étude des filtres actifs de puissance multi-niveaux commandé par MLI lorsque nous avons une tension élevée. Dans cette partie nous présenterons également les résultats de simulation.

Le troisième chapitre présentera l'étude des filtres actifs de puissance qui sont à la fois modulaire et multi-niveaux commandé par MLI et qui n'as jamais été étudié auparavant. Les onduleurs multi-niveaux utilisées sont de type NPC avec ses différents niveaux. Les résultats de simulation seront également présentés.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I Étude des Filtres actifs de Puissance Parallèle

I.1 Introduction

Ces dernières années, plusieurs projets de recherche ont été menés pour compenser les courants harmoniques produits par les charges polluantes qui sont connectées aux réseaux électriques.

Parmi ces solutions, il y a l'utilisation des filtres actifs de puissance (FAP), pour la compensation des harmoniques de courant, des harmoniques de tension, le déséquilibre de tension et l'énergie réactive existant dans les réseaux électriques monophasé ou triphasé. Parmi ces filtres actifs de puissance il existe le filtre actif de puissance parallèle qui permet de compenser les courants harmoniques et l'énergie réactive. [1]

Dans ce mémoire nous allons nous intéresser et étudier plus en détail uniquement les filtres actifs de puissance parallèle (FAPP).

I.2 Filtre actif de puissance parallèle

Un filtre actif de puissance parallèle (FAPP) compense les courants harmoniques générés par les charges dites non linéaires, comme le montre la figure I.1. La commande du FAPP détecte le courant instantané généré par la charge, extrait son contenu harmonique et l'injecte au réseau électrique pour pouvoir obtenir un courant de source sinusoïdal.

L'efficacité du FAPP dépend essentiellement de la stratégie de commande utilisée pour compenser les harmoniques de courant et/ou compenser l'énergie réactive. [2]

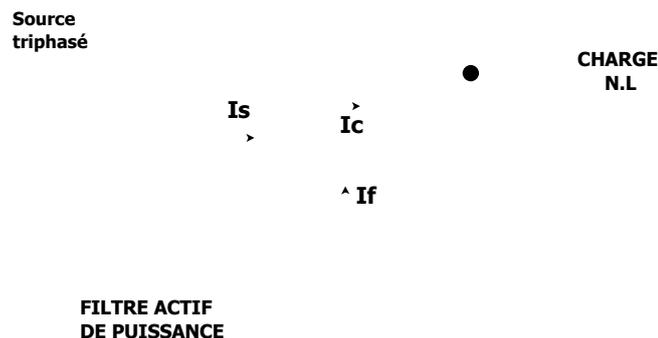


Fig.I. 1: Filtre actif de puissance parallèle

I.3 Classification des filtres actifs de puissance parallèles

Il existe plusieurs types de FAPP selon le nombre de bras constituant l'onduleur et/ou selon la topologie utilisée. Nous avons ainsi des FAPPs :

- Qui sont connectés aux réseaux électriques monophasés ou triphasés (qui en plus peuvent contenir ou pas le neutre, à savoir triphasés à quatre fils ou triphasés à trois fils).
- Qui sont basés sur l'utilisation d'un onduleur de tension ou d'un onduleur de courant.

Dans la littérature, les FAPPs monophasés sont normalement limités aux applications de faible puissance, tandis que les FAPPs triphasés sont plus largement utilisés dans les applications industrielles.

La deuxième catégorie, à savoir les FAPPs triphasés sont basées sur une topologie pouvant être connectée au réseau électrique triphasé ayant ou pas un neutre.

En termes de technologie d'onduleur, les FAPPs sont basés en général sur un onduleur de tension avec un condensateur coté continue et un filtre passif côté réseau,

Même s'il existe des articles basés sur l'onduleur de courant, l'onduleur de tension est souvent préféré en raison de son rendement plus élevé, de son coût plus faible et de son volume plus réduit. [4]

I.4 Structure générale d'un filtre actif de puissance parallèle

Un filtre actif de puissance parallèle se compose de deux parties. La première partie est constituée d'un onduleur, d'un filtre principal de couplage et d'une source continue. Ces deux derniers facteurs déterminent le type de filtre actif de puissance. Il peut être à structure tension ou courant selon la nature de l'onduleur. [3] La deuxième partie est la partie commande qui a pour rôle de déterminer les courants de références.

La partie puissance se compose en générale :

- D'un onduleur de tension.
- D'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif.
- Et d'un filtre de sortie.

La partie commande se compose en générale :

- D'un circuit d'identification des courants perturbés.
- D'une régulation de tension continue pour réguler l'élément de stockage d'énergie.
- D'une régulation du courant par la MLI du FAPP.

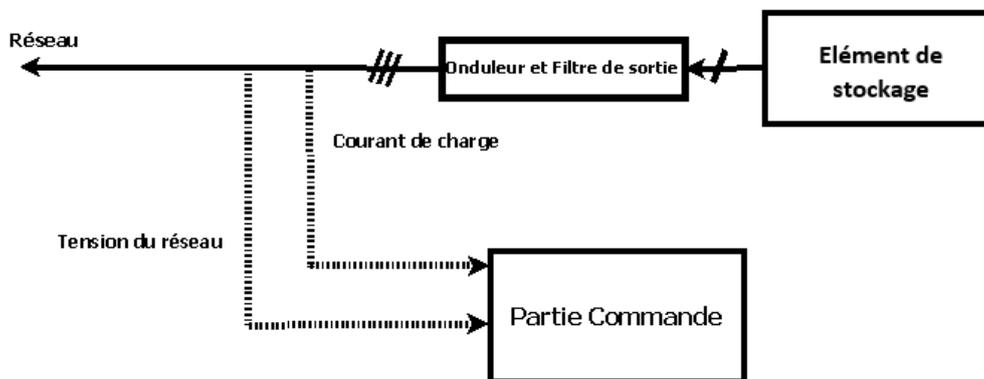


Fig.I. 2: Structure générale d'un FAPP

I.4.1 Étude du filtre actif de puissance parallèle - partie puissance

Dans le réseau de distribution l'utilisation des charges non linéaires qui produisent des courants harmoniques joue un rôle important dans la détérioration de la qualité de l'énergie. L'une des options les plus efficaces consiste à utiliser des filtres actifs de puissance parallèles pour éliminer les courants harmoniques et compenser la puissance réactive afin d'obtenir une bonne qualité du courant après filtrage.

La construction générale la plus courante d'un filtre actif de puissance parallèle connecté à un réseau électrique triphasé à trois fils est soit un onduleur à trois bras ou un onduleur à deux bras point milieu.

Concernant la première topologie à savoir l'onduleur triphasé qui est composé de trois bras basés sur des interrupteurs de puissance commandables. Il est connecté côté continu via un système de stockage de type condensateur C_{dc} pour fournir une tension constante « V_{dc} » ; et pour le côté alternatif, il est connecté au réseau via un système passif en général de premier ordre (L, R), comme l'illustre la figure ci-dessous. [5]

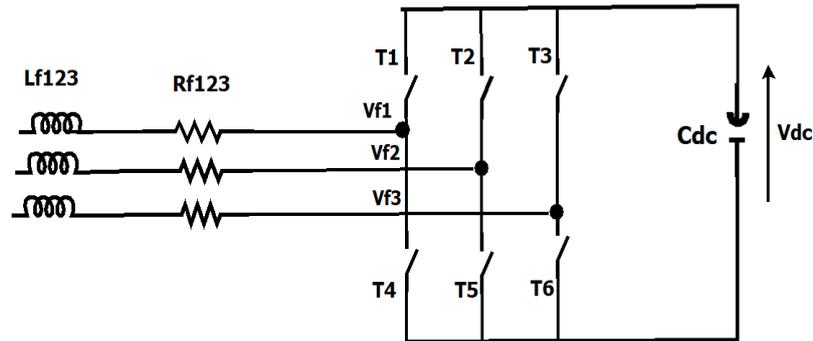


Fig.I. 3: Structure du FAPP à trois bras basés sur un onduleur de tension pour la compensation des réseaux électriques à 3 fils

Le condensateur C_{dc} sert de source de tension constante. La tension V_{dc} à ses bornes doit être positive et constante, pour ne pas dépasser la tension limite des semi-conducteurs qui composent les interrupteurs, et afin de ne pas dégrader les performances du FAPP.

Remarque : Le choix de la tension V_{dc} et de la capacité du condensateur C_{dc} influe sur la plage dynamique et les performances de compensation du FAPP.

L'onduleur utilise des interrupteurs bidirectionnels de type : [6]

- MOSFET pour une faible puissance.
- IGBT pour une puissance moyenne.
- Et GTO pour une grande puissance.

La figure ci-dessous montre un filtre actif de puissance parallèle à trois bras, qui est connecté au réseau électrique via un filtre passif de premier ordre. La source de tension continue est constituée d'un condensateur C_{dc} . La tension V_{dc} indiquant la tension à ces bornes, qui est maintenue à une valeur positive constante.

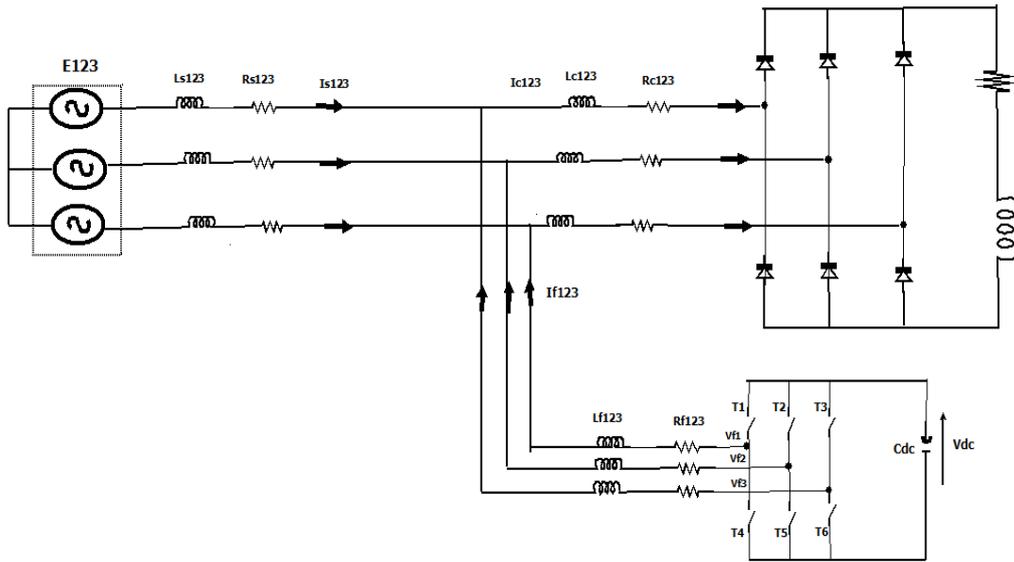


Fig.I. 4: FAPP à trois bras à structure tension connecté en parallèle au réseau électrique

L'état des signaux de commande de cette structure de FAPP est défini comme suit :

- $S_1= 1$ T_1 est fermée et T_4 est ouvert
- $S_1= 0$ T_1 est ouvert et T_4 est fermée
- $S_2= 1$ T_2 est fermée et T_5 est ouvert
- $S_2= 0$ T_2 est ouvert et T_5 est fermée
- $S_3= 1$ T_3 est fermée et T_6 est ouvert
- $S_3= 0$ T_3 est ouvert et T_6 est fermée

Sachant que :

$$\begin{bmatrix} V_{f1} - V_{f2} \\ V_{f2} - V_{f3} \\ V_{f3} - V_{f1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 - S_2 \\ S_2 - S_3 \\ S_3 - S_1 \end{bmatrix} V_{dc} \tag{I.1}$$

Pour des tensions simples (V_{f1} , V_{f2} , V_{f3}) qui sont rapportées au point neutre de la source, l'équation devient égale à :

$$\begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{f1} \\ i_{f2} \\ i_{f3} \end{bmatrix} \tag{I.2}$$

En supposant que le système est équilibré et que la somme totale des courants circulant à travers le FAPP est nul. Nous avons maintenant les deux équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{s1} + V_{s2} + V_{s3} = 0 \\ i_{f1} + i_{f2} + i_{f3} = 0 \end{cases} \tag{I.3}$$

Nous obtenons ainsi

$$\begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_1 & -S_2 & -S_3 \\ -S_1 & 2S_2 & -S_3 \\ -S_1 & -S_2 & 2S_3 \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{3} \quad (I.4)$$

La deuxième topologie qui existe, voir figure ci-dessous, montre un FAPP à deux bras à point milieu, il est composé de quatre interrupteurs bidirectionnels. L'onduleur est connecté au réseau électrique via un filtre passif du premier ordre. D'un autre côté, la source de tension continue et constituée de deux condensateurs C_{dc1} et C_{dc2} , dont son point milieu est connecté à la troisième phase. La tension V_{dc1} et V_{dc2} indiquant les tensions à ces bornes, qui sont maintenue à une valeur positive constante.

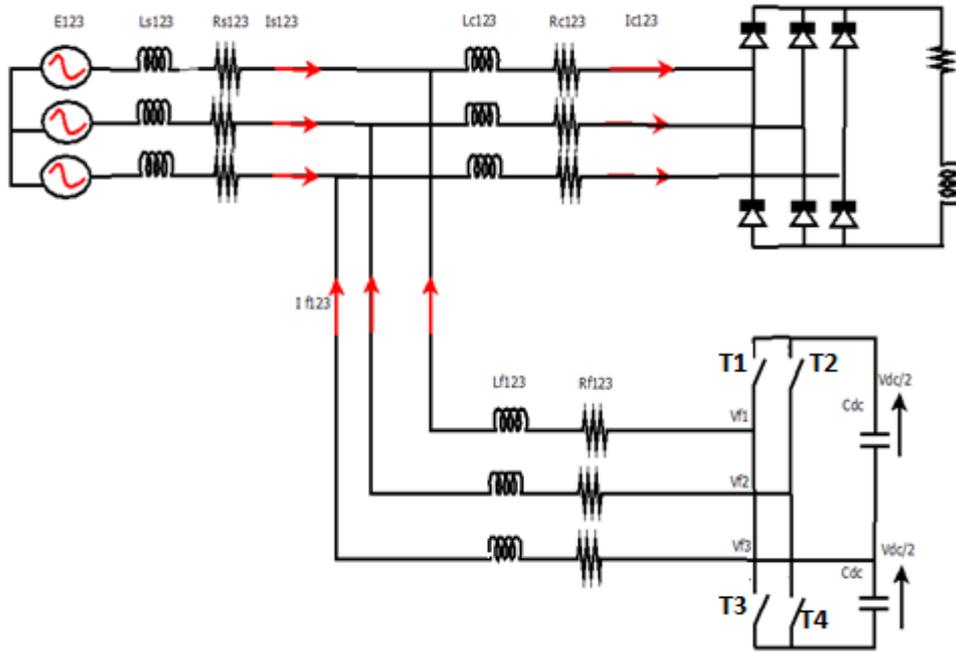


Fig.I. 5: FAPP à structure tension à deux bras à point milieu connectés en parallèle au réseau électrique

De la figure I.5, nous définissons les états des bras de l'onduleur de la manière suivante :

$S_1= 1$ T_1 est fermée et T_3 est ouvert

$S_1= 0$ T_1 est ouvert et T_3 est fermée

$S_2= 1$ T_2 est fermée et T_4 est ouvert

$S_2= 0$ T_2 est ouvert et T_4 est fermée

Sachant que :

$$V_{f1n} = V_{f10} + V_{0n} \quad (I.5)$$

$$V_{f2n} = V_{f20} + V_{0n} \quad (I.6)$$

$$V_{f3n} = V_{0n} \quad (I.7)$$

En sommant (I.5), (I.6) et (I.7) et en tenant compte de (I.3), nous obtenons :

$$V_{0n} = \frac{-(V_{f10} + V_{f20})}{3} \quad (I.8)$$

En mettant l'expression (I.8) dans (I.5), (I.6) et (I.7), nous avons au final l'expression :

$$\begin{bmatrix} V_{f1n} \\ V_{f2n} \\ V_{f3n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{-1}{3} \\ \frac{-1}{3} & \frac{2}{3} \\ \frac{-1}{3} & \frac{-1}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{f10} \\ V_{f20} \end{bmatrix} \quad (I.9)$$

Remarques : Ces deux topologies (à trois bras et à deux bras à point milieu) sont utilisées pour la compensation des réseaux électriques triphasé à trois fils et non pas à quatre fils.

I.4.2 Étude du filtre actif de puissance parallèle - partie commande

La commande des FAPP consiste à identifier les harmoniques de courant et l'énergie réactive des charges non-linéaires. Il existe deux façons de déterminer ces courants harmoniques, à savoir :

- a) **La commande directe :** dont son principe de fonctionnement est basé sur la comparaison du courant de référence $i_{ref}(t)$ qui est obtenu par l'extraction des courants harmoniques coté charge, aux courants injectés par le filtre actif de puissance $i_{inj}(t)$, comme le montre la figure I.6.

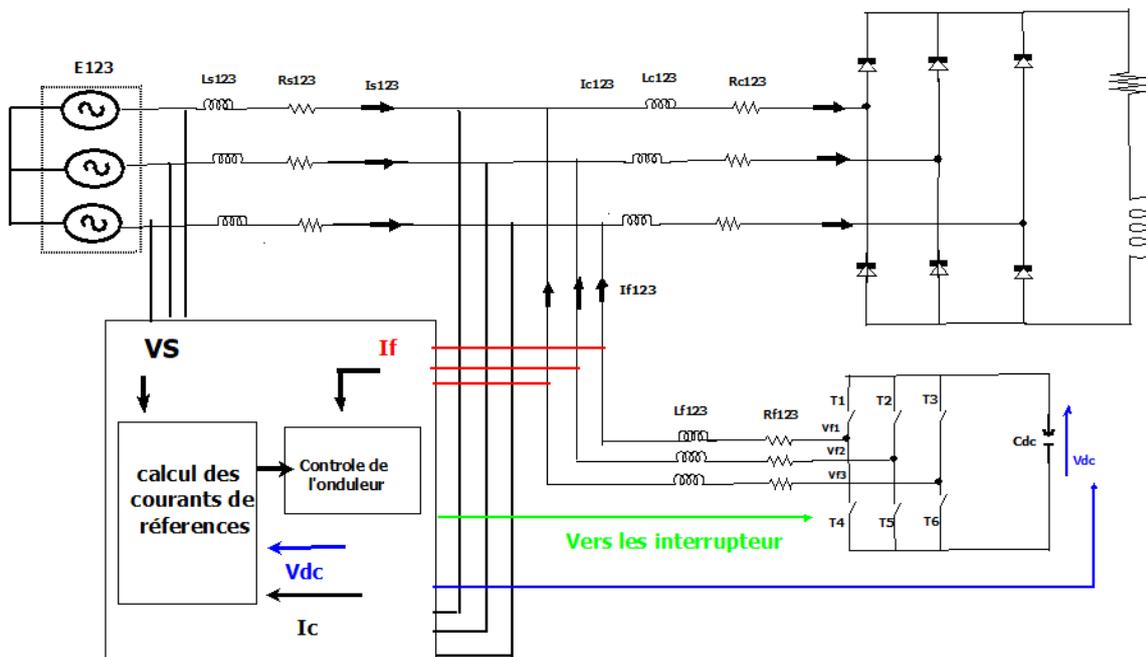


Fig.I. 6: Schéma de commande directe d'un FAPP

- b) **Et la commande indirecte :** qui est basée sur la comparaison entre les courants de références $i_{ref}(t)$ produits par une méthode appropriée, aux courants de source $i_s(t)$, comme le montre la figure I.7.

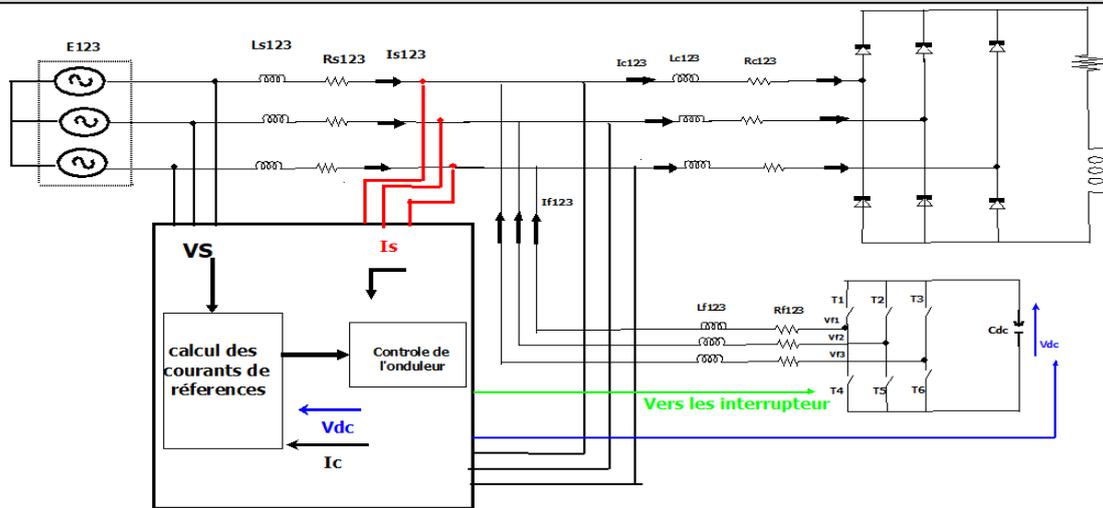


Fig.I. 7: Schéma de commande indirecte d'un FAPP

Remarque : Les deux types de commandes, à savoir la commande directe et la commande indirecte sont presque identiques. La seule différence majeure qui existe dans la commande elle-même, est que pour la commande directe nous utilisons un filtre passe haut pour extraire les composantes harmoniques, par contre pour la commande indirecte nous utilisons un filtre passe bas pour extraire la composante continue (composante fondamentale).

La commande des FAPPs diffère aussi par rapport à leurs stratégies de commande. Il existe plusieurs stratégies de commande, parmi les plus connues nous avons la commande utilisant les puissances instantanées (PQ) et la commande utilisant le référentiel lié au synchronisme (SFR).

Nous allons dans ce chapitre d'écrire plus en détail la stratégie de commande dite directe utilisant les puissances instantanées (PQ) et la stratégie de commande dite directe utilisant le référentiel lié au synchronisme (SFR). Sachant que pour la **commande indirecte** nous utilisons un filtre passe bas pour extraire la composante continue (composante fondamentale) et nous n'avons pas besoin de calculer la puissance réactive. Le schéma de la commande indirecte sera illustré dans le chapitre 2 car presque toutes les simulations seront à commande indirecte dans le chapitre 2 et 3.

La méthode PQ pour l'identification est la plus couramment utilisée pour générer des courants de référence. Cette approche est largement utilisée pour compenser les courants harmoniques et l'énergie réactive.

Cette méthode d'identification des courants harmoniques a été introduite par H. AKAGI [16] qui consiste à identifier la composante continue des puissances active et réactive instantanées. Cette dernière utilise la transformation de Concordia des tensions simples et des courants de ligne, afin de calculer ses puissances instantanées. La composante fondamentale du courant est transformée en une composante continue de la puissance et les composantes harmoniques du courant en composantes harmoniques de la puissance. [26]

Son principe est énoncé comme suit : En considérant respectivement les tensions simples de source par $v_{s1}(t)$, $v_{s2}(t)$, $v_{s3}(t)$ et les courants de ligne par $i_{s1}(t)$, $i_{s2}(t)$, $i_{s3}(t)$ d'un système triphasé équilibré :

$$[x_s] = \begin{bmatrix} x_{s1} \\ x_{s2} \\ x_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{I.10})$$

Avec x pouvant être une tension ou un courant.

La transformation de Concordia permet de ramener le système triphasé à un système dont les axes sont en quadrature :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{I.11})$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{I.12})$$

De ces deux expressions nous pouvons calculer les puissances instantanées réelle et imaginaire notées respectivement p et q comme suite :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{I.13})$$

En remplaçant ces tensions et ces courants par leurs homologues triphasés, on trouve :

$$p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta = v_{s1} i_{c1} + v_{s2} i_{c2} + v_{s3} i_{c3} \quad (\text{I.14})$$

$$q = v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha = \frac{-1}{\sqrt{3}} [(v_{s1} - v_{s2}) i_{c3} + (v_{s2} - v_{s3}) i_{c1} + (v_{s3} - v_{s1}) i_{c2}] \quad (\text{I.15})$$

Les composantes des puissances réelle et imaginaire instantanées peuvent être décomposer en deux parties comme suites :

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

Avec : \bar{p}, \bar{q} : les composantes continuent de p et q .

\tilde{p}, \tilde{q} : les composantes harmoniques de p et q .

Suivant la fonction que nous donnons à notre FAPP à trois bras, nous pouvons d'après le tableau suivant avoir les modes de compensations suivants :

	Harmoniques de courants	Énergie réactive	Harmoniques de courant et énergie réactive
Paramètre de commande	$p_f = \tilde{p}$ et $q_f = \tilde{q}$	$p_f = 0$ $q_f = \bar{q}$	$p_f = \tilde{p}$ $q_f = q$

Tableau I. 1: Modes de compensation de la commande des puissances instantanées

Pour notre commande nous décidons de compenser les courants harmoniques et l'énergie réactive. Ainsi nous utilisons un filtre passe haut pour extraire uniquement les composantes harmoniques de la puissance active instantanée. Pour obtenir ensuite les courants de références nous allons faire les deux transformations inverse suivante :

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

$$\begin{bmatrix} i_{f1}^{ref} \\ i_{f2}^{ref} \\ i_{f3}^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \end{bmatrix} \quad (I.18)$$

La figure I.8 illustre cet algorithme de commande :

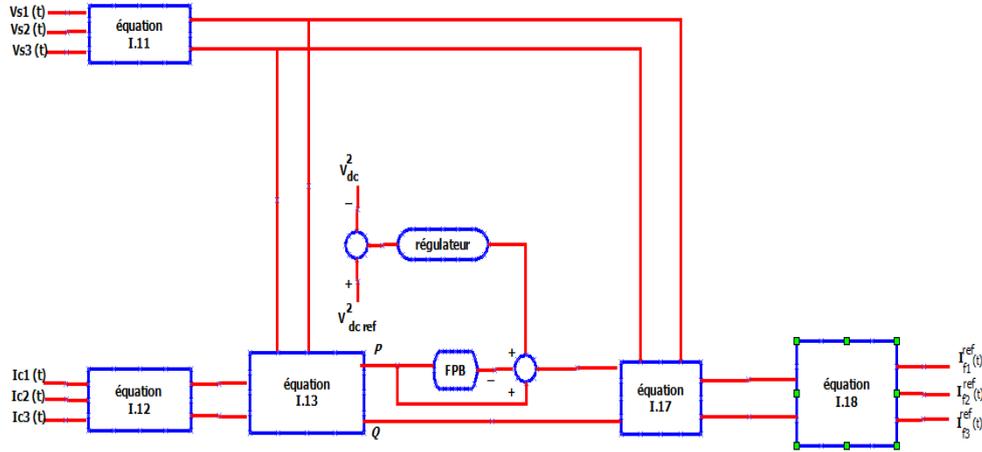


Fig.I. 8: Commande d'un FAPP pour la compensation des courants harmoniques et l'énergie réactive par la méthode directe des puissances instantanées.

Concernant la méthode SFR appelé aussi méthode des courants instantanés d-q, permet d'obtenir de meilleures performances même si le réseau est perturbé ou déséquilibré. [7]

Cette méthode, introduite par Bhattacharya 1991 [17], exploite également la transformation de Concordia mais appliquée uniquement aux courants de ligne produite par la charge. On effectue ensuite, une deuxième transformation pour obtenir l'axe dq des courants au niveau de la PLL. La composante fondamentale et les composantes harmoniques sont alors converties en une composante continue et une composante alternative du courant respectivement. [20]

Ainsi sachant que le courant a comme expression :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (I.19)$$

En générant à l'aide d'une PLL les signaux $\cos(\theta)$ et $\sin(\theta)$ depuis la tension "fondamentale" du réseau, nous obtenons l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (I.20)$$

Avec $\hat{\theta}$ la position angulaire de la tension fondamentale du réseau, estimée par la PLL.

Remarque : Il convient de noter que le P.L.L. est un circuit essentiel, car il est capable de récupérer les informations de phases des tensions. Cependant, ces tensions ne sont pas toujours sinusoïdales et équilibrées, ce qui rend difficile leurs détections. [8] et [5] Pour résoudre ce

problème nous pouvons utiliser des PLLs robuste qui sont très peu sensible à ces perturbations.

La PLL que nous avons utilisé a été développé en détail dans [8].

A partir de l'équation (I.20), si nous voulons compenser les courants harmoniques et l'énergie réactive en même temps, il suffit d'utiliser un filtre passe haut pour retirer la composante continue, ce qui nous donne : [25]

$$\begin{bmatrix} i_{fa}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (I.21)$$

En utilisant la transformation inverse de Concordia nous obtenons les courants de références :

$$\begin{bmatrix} i_{f1}^{ref} \\ i_{f2}^{ref} \\ i_{f3}^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & \sqrt{3} \\ 2 & 2 \\ -1 & -\sqrt{3} \\ 2 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fa}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \end{bmatrix} \quad (I.22)$$

La figure suivante illustre cet algorithme de commande :

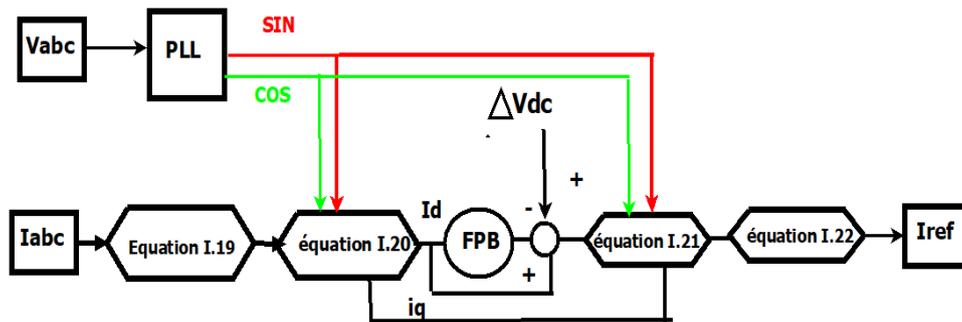


Fig.I. 9: Commande directe d'un FAPP par la méthode d-q.

I.5 Simulation

I.5.1 Simulation d'un filtre actif de puissance parallèle

Notre premier système complet est composé d'un réseau électrique alimentant un pont redresseur. Un filtre actif de puissance à commande directe D-Q est connecté à ce même réseau en parallèle, que l'on a nommée FAPP. Le réseau électrique utilisé est triphasé. Le FAPP se compose d'un onduleur à IGBT à six interrupteurs.

Les schémas de la simulation de notre système sont illustrés en détail en ANNEXE A.

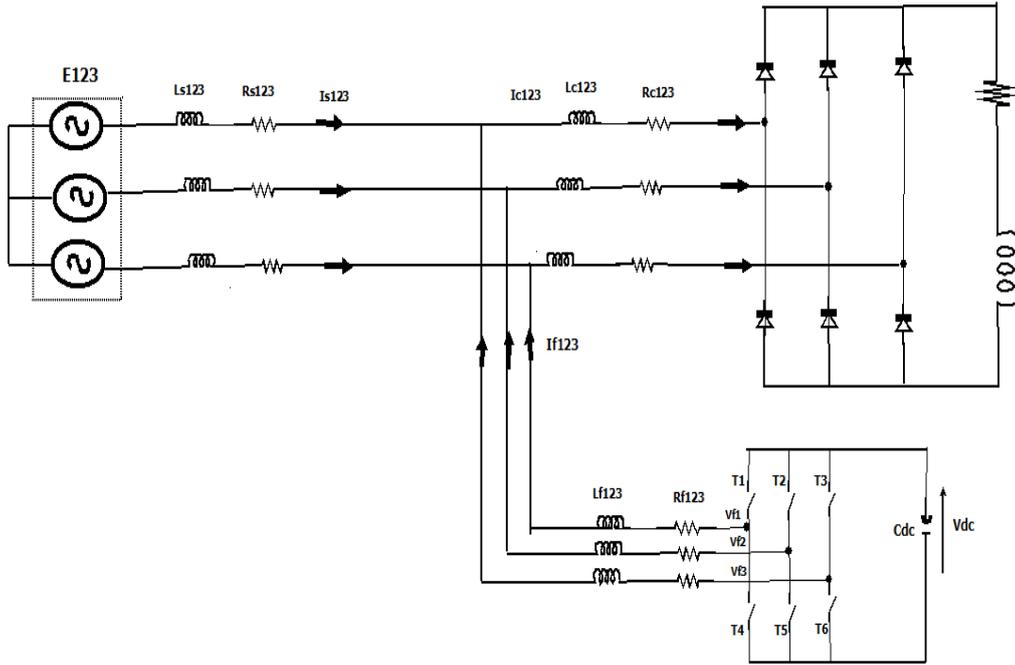


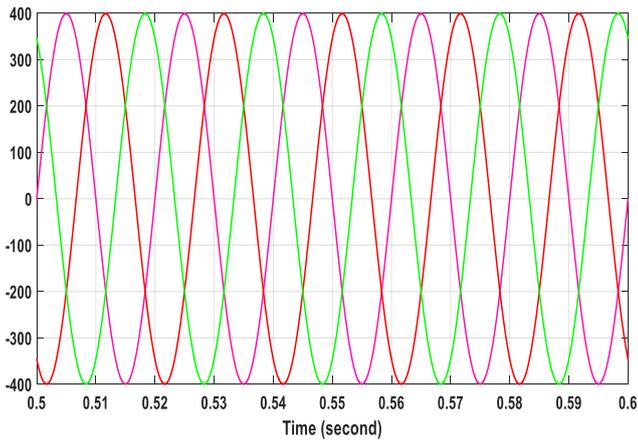
Fig.I. 10: Schéma général du FAPP à trois bras

Les paramètres de la simulation sont présentés dans le tableau suivant :

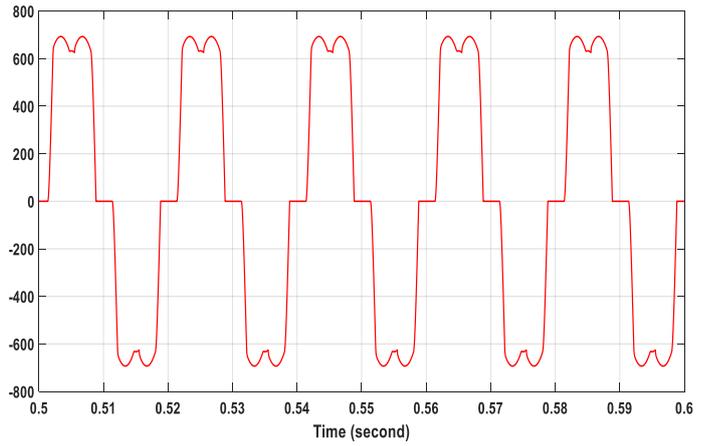
Éléments de notre système	Valeur de notre système
Réseau électrique	Source triphasée sinusoïdale et équilibrée $f=50 \text{ Hz}$ $V_s=400 \text{ v}$ $R_s= 1e-3 \Omega$, $L_s =1e-8 \text{ H}$
Pont redresseur	RL coté alternative du pont redresseur $L_c= 23.19e-6 \text{ H}$ $R_c= 2.73e-3 \Omega$ Charge RL $R_L= 0.79 \Omega$ $L_L= 2.6e-6 \text{ H}$
FAPP	$R_f = 10e-6 \Omega$ $L_f= 0.1e-3 \text{ H}$ $C_{dc} = 60.10^{-3} \text{ F}$

Tableau I. 2 :Paramètres de simulation

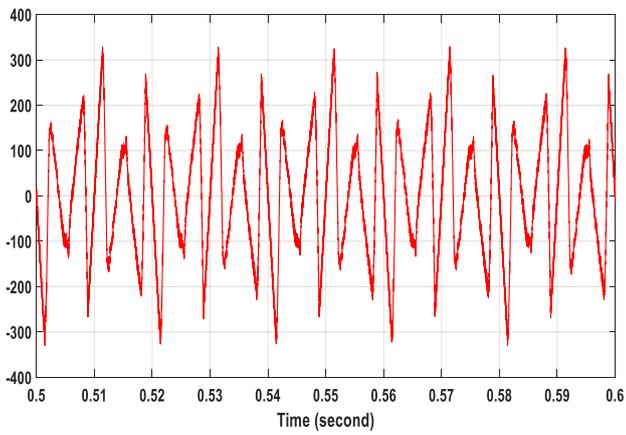
Les résultats de cette simulation sont illustrés par les figures suivantes :



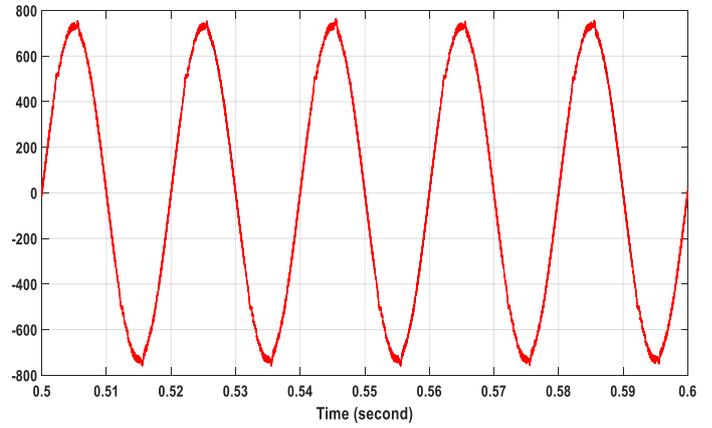
a) Tension de réseau



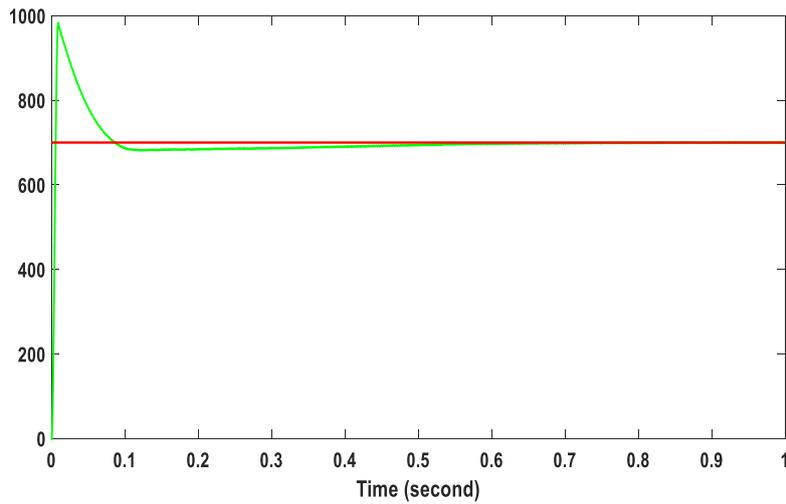
b) Courant de charge



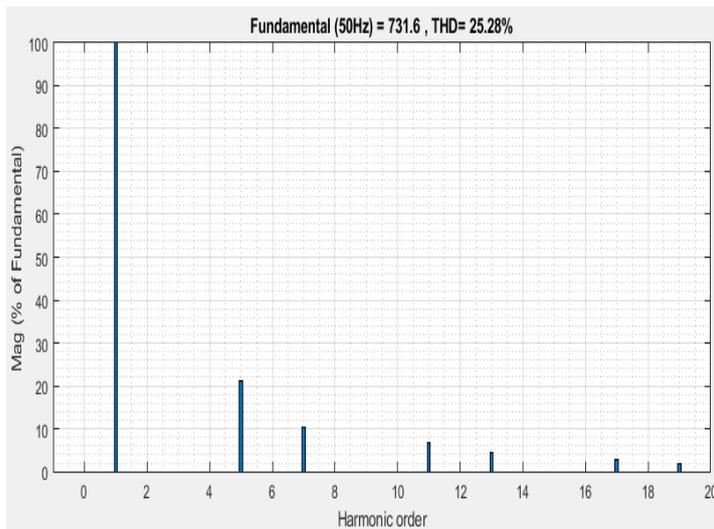
c) Courant injecté



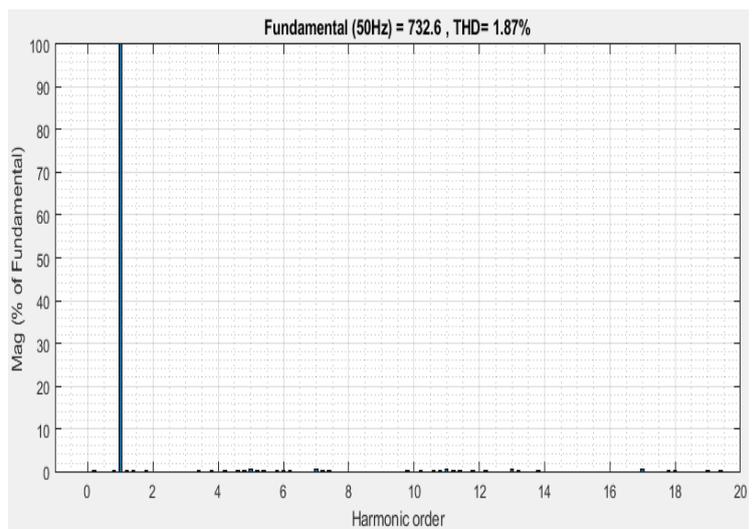
d) Courant de source



e) Tension aux bornes de condensateur



f) Analyse spectrale du courant de la charge
(THD=25.28%)



g) Analyse spectrale du courant de la source (THD=1.87%)

Fig.I. 11: Résultats de simulation du FAPP directe par SFR

Concernant la figure I.11, (a) illustre la tension de source qui montre un signal parfaitement sinusoïdal. (b, c, d) montrent les courants (de charge, injectée par le FAPP et de source respectivement) pour une seule phase. (e) représente la tension aux bornes du condensateur qui est constant car la régulation de la tension V_{dc} fonctionne correctement. (F, g) indiquent les spectres harmoniques des courants avant et après le filtrage, on observe que la valeur du spectre harmonique est réduite après filtrage de 25.28% à 1,87 %. C'est un résultat après filtrage qui respecte les normes CEI car inférieur à 5%.

I.5.2 Simulation du FAPP qui contient un onduleur à deux bras avec un condensateur à point milieu

Nous allons maintenant présenter les résultats de la simulation d'un réseau électrique triphasé à trois fils dont un FAPP qui contient un onduleur à deux bras à condensateur à point milieu à commande indirecte P-Q est connecté (voir la figure I.12).

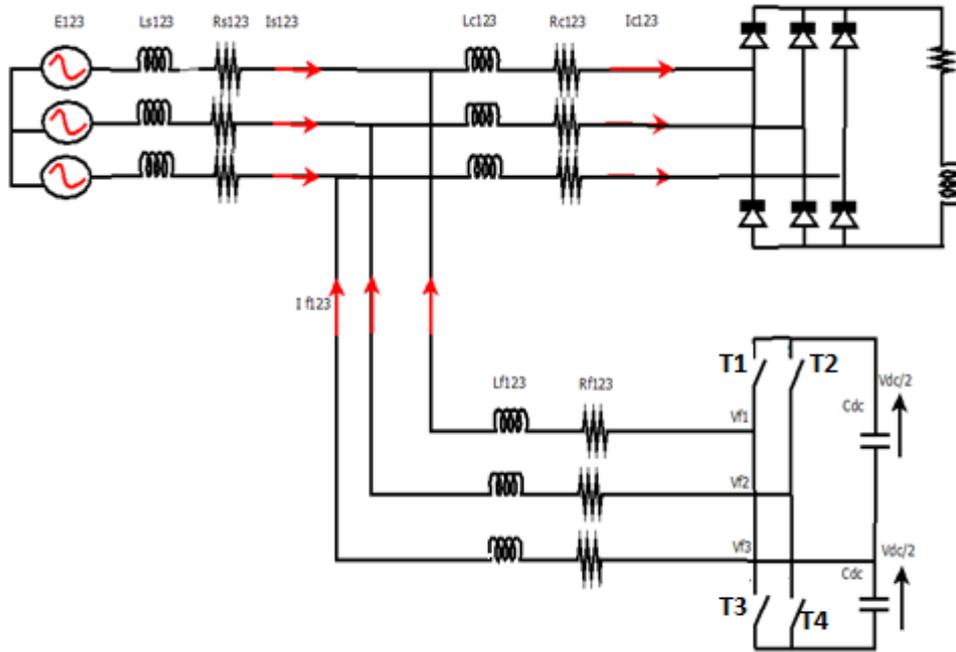


Fig.I. 12: Schéma général du FAPP a deux bras à point milieu

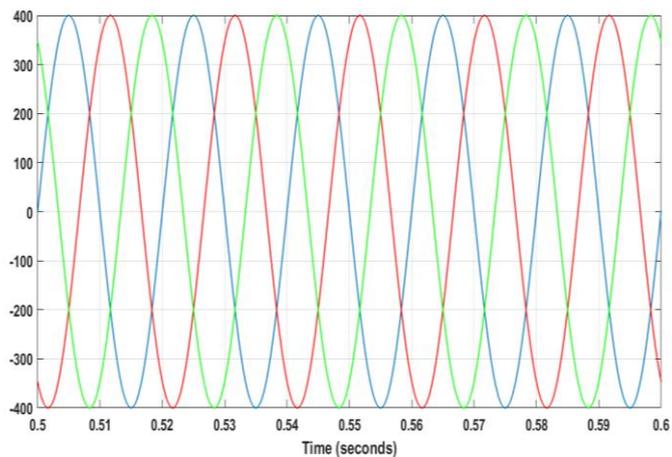
Les schémas de la simulation de notre système sont illustrés en détail en ANNEXE A.

Les paramètres de la simulation sont présentés dans le tableau suivant :

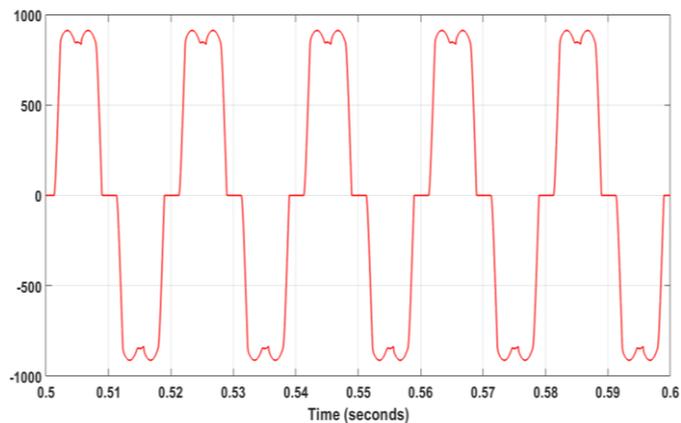
Éléments de notre système	Valeur de notre système
Réseau électrique	Source triphasée sinusoïdale et équilibrée $f=50 \text{ Hz}$ $V_s=400 \text{ v}$ $R_s= 1e-3 \Omega$, $L_s =1e-8 \text{ H}$
Pont redresseur	RL coté alternative du pont redresseur $R_c= 2.73e-3\Omega$ $L_c=23.19e-6\text{H}$ Charge RL $R_L = 0.79 \Omega$ $L_L= 2.6e-6\text{H}$
FAPP	$R_f = 5e-3 \Omega$ $L_f=100 e-6 \text{ H}$ $C_{dc1}= 60.10^{-3} \text{ F}$ $C_{dc2} = 60.10^{-3} \text{ F}$

Tableau I. 3: Paramètres de simulation

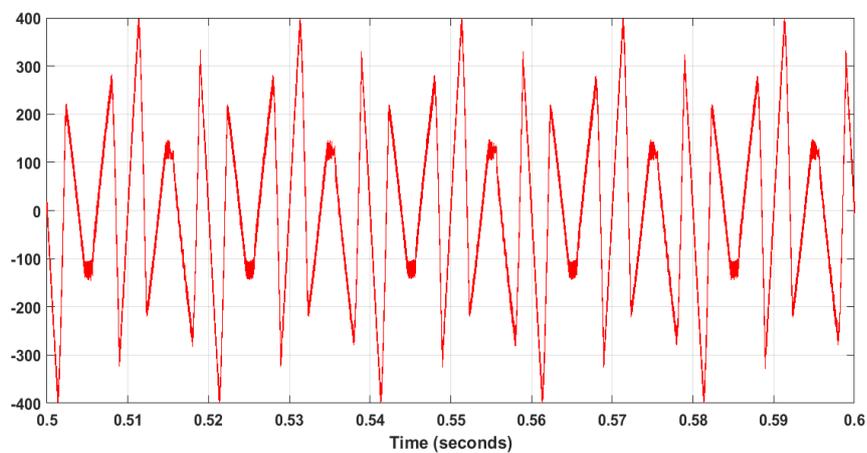
Les résultats de cette simulation sont illustrés par les figures suivantes :



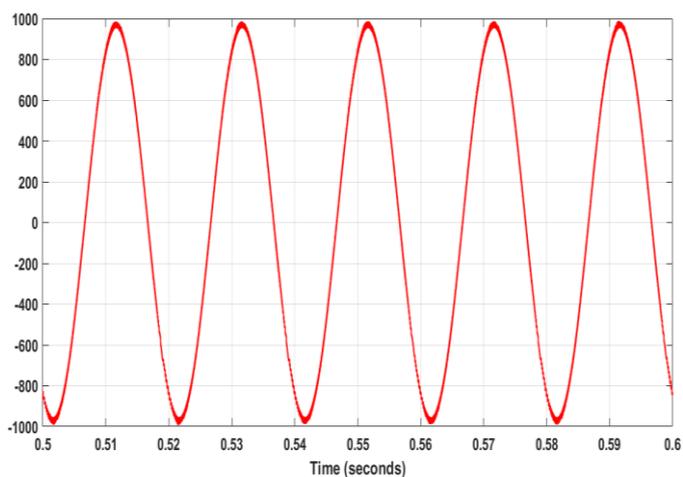
a) Tension de réseau



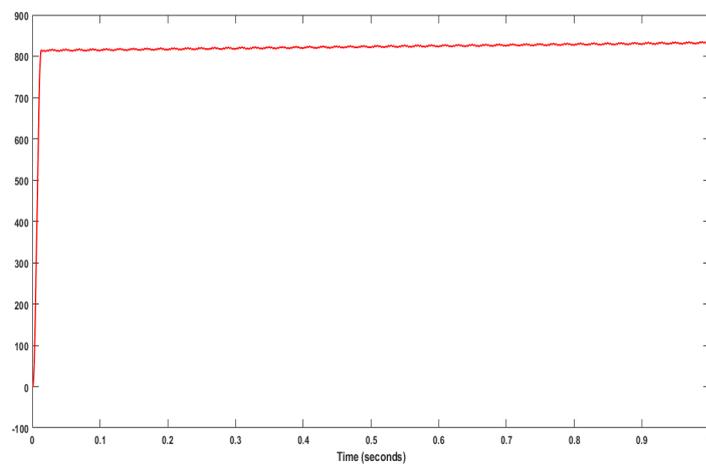
b) Courant de charge



c) Courant injecté par la phase 1 de l'onduleur



d) Courant de source



e) Tension aux bornes de 1^{er} condensateur

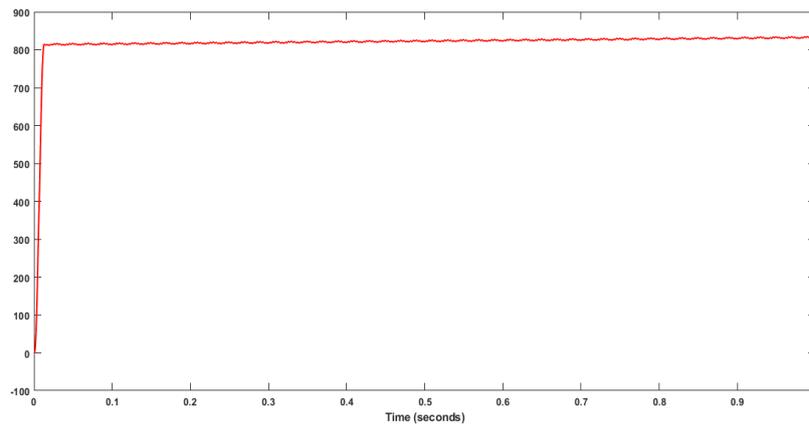
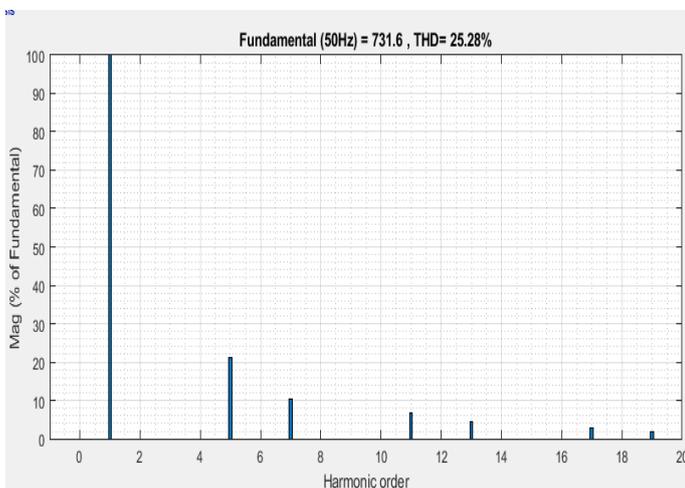
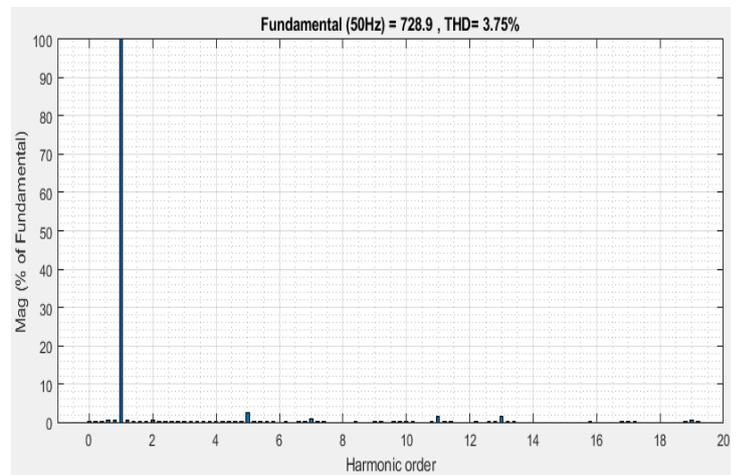
f) Tension aux bornes de 2^{ème} condensateurg) Analyse spectrale du courant de la charge
(THD=25.28%)h) Analyse spectrale du courant de la source
(THD= 3.75%)

Fig.I. 13: Résultats de simulation du FAPP deux bras

Concernant la figure I.13, (a) illustre la tension de source qui montre un signal parfaitement sinusoïdal. Les figures (b, c, d) montrent les courants (de charge, injectées par le FAPP et de source respectivement) pour une seule phase. (e, f) représentent la tension aux bornes du condensateur qui est constant car la régulation de la tension V_{dc} fonctionne correctement. (g, h) indiquent les spectres harmoniques des courants avant et après le filtrage. On voit que la valeur du spectre harmonique est réduite après le filtrage de 25.28% à 3,75 %. C'est un résultat après filtrage qui respecte les normes CEI.

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté et simulé les filtres actifs de puissance parallèle, en utilisant différentes méthodes d'identification des courants de référence. La méthode d'identification de puissance instantanée et la méthode avec PLL ont été choisies pour permettre l'identification des harmoniques de courant et l'énergie réactive du réseau électrique. Les résultats de simulation ont montré que le FAPP a trois bras et a deux bras a point milieu donne

de bons résultats après compensation en donnant un THD inférieur à 5%, ce qui permet de respecter la norme IEC.

Chapitre II Étude séparée des filtres actifs de Puissance Parallèles Modulaires et multi- niveaux

II.1 Introduction

La topologie la plus utilisée pour compenser les courants harmoniques générés par les charges non linéaires, qui sont connecté à un réseau électrique triphasé à trois fils est le filtre actif de puissance parallèle (FAPP). Cependant, il existe également d'autres topologies de FAPP qui sont utilisées, tel que le modulaire et le multi-niveaux.

Concernant les FAPPs modulaires, ils sont conçus de manière à permettre le fonctionnement simultané de plusieurs FAPP, afin de compenser les courants harmoniques de fort intensité.

Par contre les FAPP multi-niveaux, sont conçus de manière à permettre l'onduleur constituant le FAPP à supporter des tensions élevées.

Dans ce chapitre nous allons étudier ces deux types de FAPP séparément.

II.2 Filtre actif de puissance parallèle modulaire

Le filtre actif de puissance parallèle modulaire est utilisé lorsqu'un courant fort consommé par les charges non linéaires apparaissent aux réseaux électriques.

Comme dans le chapitre I, si nous voulons compenser les harmoniques de courant a fort intensité dans les réseaux électriques à trois fils, il existe deux topologies qui peuvent être utilisé, à savoir :

- Celle composé de deux onduleurs à trois bras.
- Et celle composé de deux onduleurs à deux bras avec condensateurs à point milieu.

Ces deux topologies sont illustrées sur les deux figures suivantes.

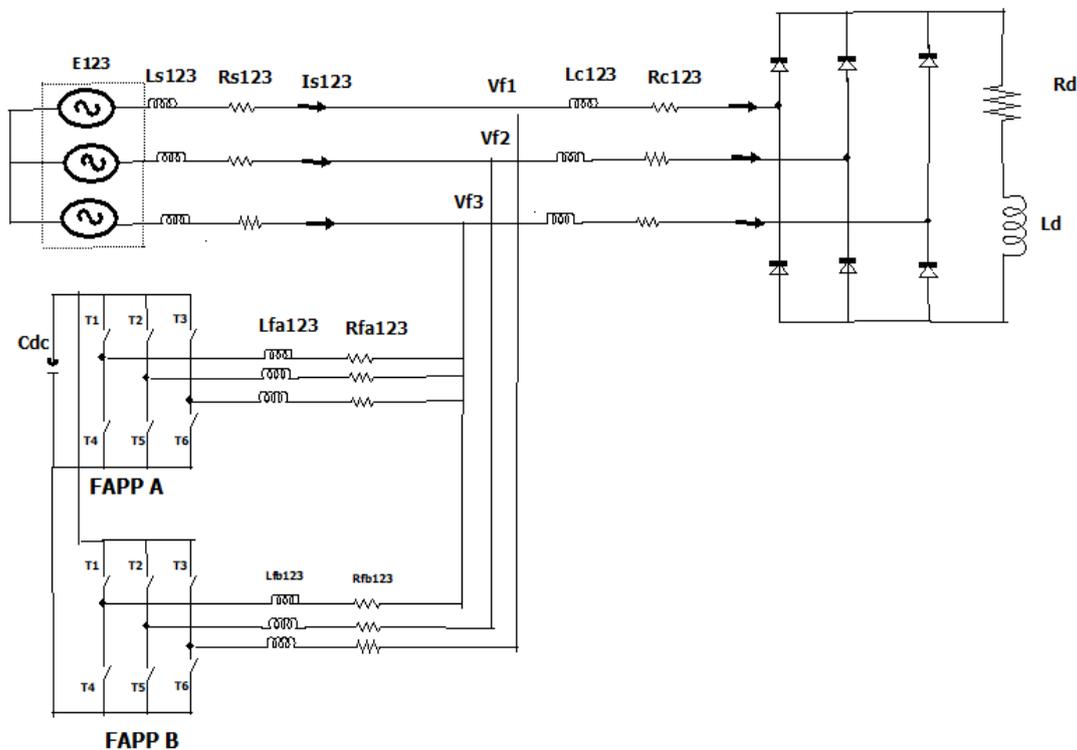


Fig. II. 1: Structure générale du filtre de puissance active modulaire connecté au réseau électrique

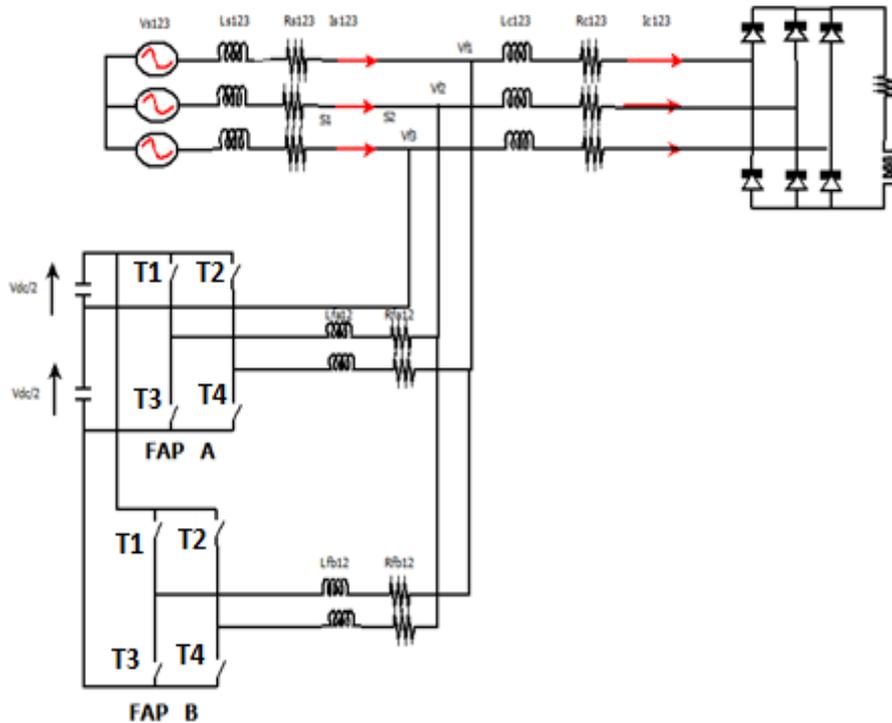


Fig. II. 2: Schéma général de la FAPP modulaire a deux bras avec un condensateur à point milieu

Les commandes utilisées pour ces deux FAPP modulaires sont la commande PQ pour le FAPP modulaire a 2 bras à point milieu et la commande SFR pour le FAPP modulaire à 3 bras. C’est deux commandes ne vont pas être présenté dans ce chapitre car ils ont été détailler dans le chapitre I.

Nous allons ainsi présenter dans ce chapitre les résultats de simulation pour ces deux types de FAPP modulaire.

Ce qui différencie entre la commande du chapitre I et la commande du chapitre II sont les courants à l’entrée la MLI. Du fait qu’on utilise 2 onduleurs avec une seule commande, il faut diviser les courants de références par 2 et les courants injectés par l’onduleur par 2. Puis nous utilisons la MLI.

Ainsi si nous avons n onduleurs en parallèle, nous devons diviser par n.

II.3 Simulation

II.3.1 Simulation du FAPP modulaire utilisant deux onduleurs à trois bras

Cette topologie qui utilise deux FAPPs comme l’illustre la figure II.1, est composé d’un réseau électrique alimentant un pont redresseur. Deux FAPPs sont connecté en parallèle au réseau électrique. Le réseau électrique est représenté par un système triphasé ayant une forme de tension sinusoïdale. Le pont redresseur est relié à une charge de type RL. Chaque onduleur du FAPP est composé de 3 bras. Ces deux onduleurs sont connectés du côté continu au même condensateur C_{dc} et du côté alternatif par un filtre passif de 1er ordre, constitué d'une résistance

R_f et d'une inductance L_f qui à leur tour sont connecté au réseau électrique. La commande utilisée pour cette simulation est identique à celle utilisée dans le chapitre I, à savoir la commande directe d-q. Le schéma détaillé de la simulation pour cette topologie est détaillé dans l'ANNEXE B.

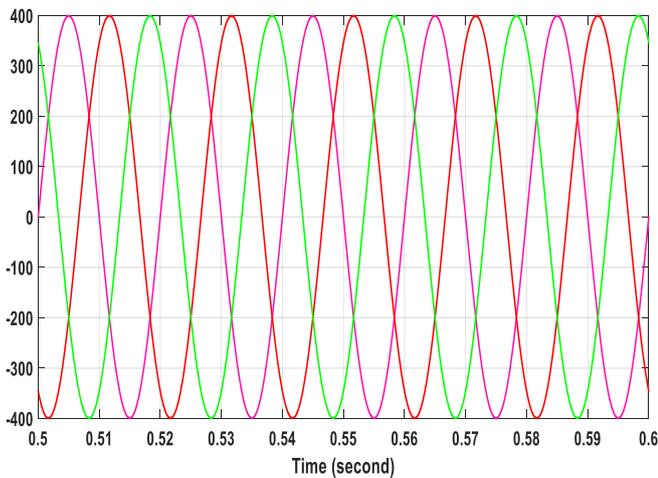
Le schéma de la simulation de notre système est donné par la figure II.1

Les paramètres de simulation de notre système sont présentés dans le tableau II.1:

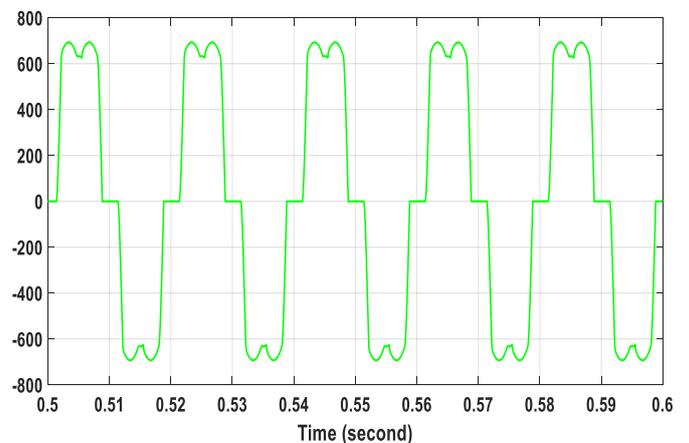
Éléments de notre système	Valeur de notre système
Réseau électrique	Source triphasée sinusoïdale et équilibrée $f=50$ Hz $V_s=400$ v $R_s= 1e-3 \Omega$, $L_s =1e-8$ H
Pont redresseur	RL coté alternative du pont redresseur $L_c= 23.19e-6$ H $R_c= 2.73e-3 \Omega$ Charge RL $R_L= 0.79 \Omega$ $L_L= 2.6e-6$ H
FAPP	FAPP 1 $R_{f1} = 10e-6 \Omega$ $L_{f1}= 0.1e-3$ H FAPP 2 $R_{f2} = 10e-6 \Omega$ $L_{f2}= 0.1e-3$ H $C_{dc} = 60.10^{-3}$ F

Tableau II. 1:Paramètres de simulation

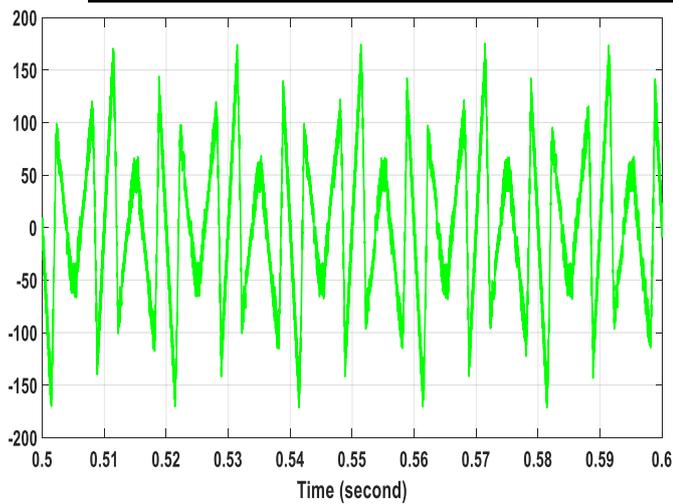
Les résultats obtenus après simulation sont donnés par les figures suivantes :



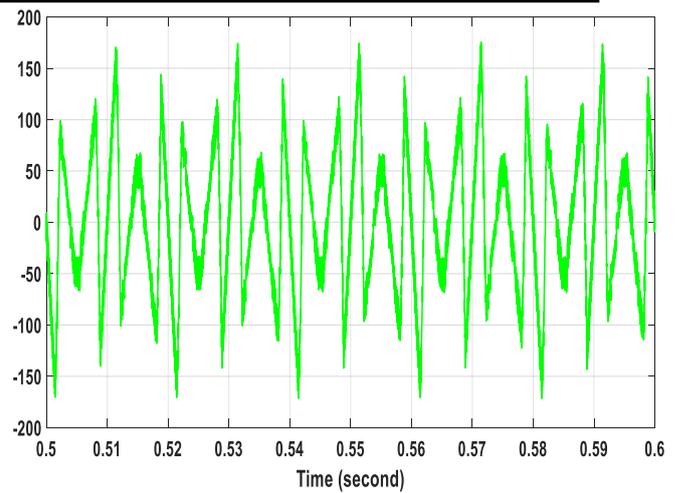
a) Tension de réseau



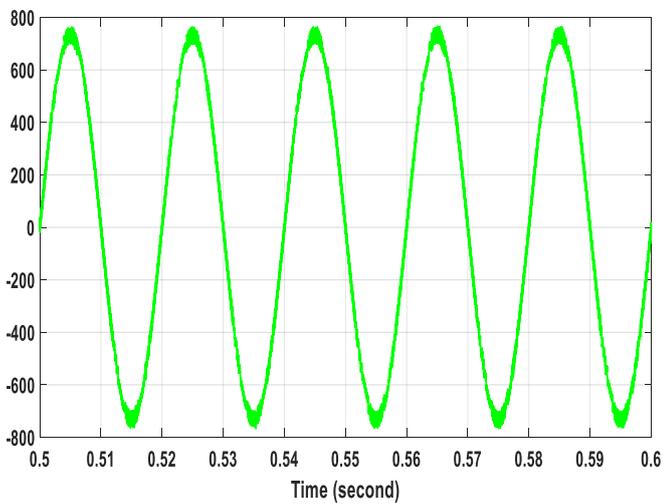
b) Courant de charge



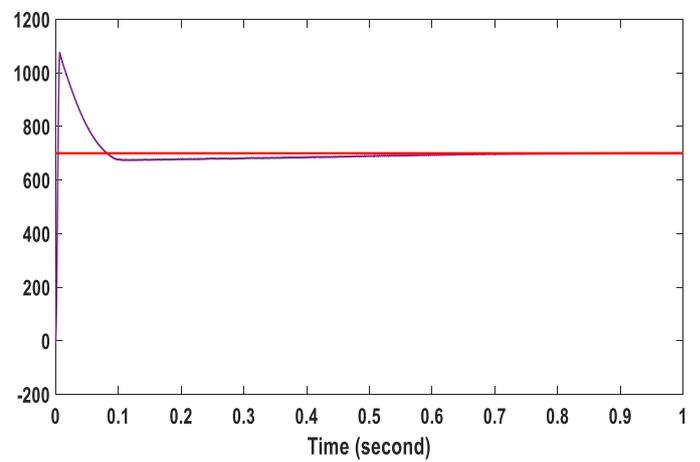
c) Courant injecté par 1^{er} onduleur



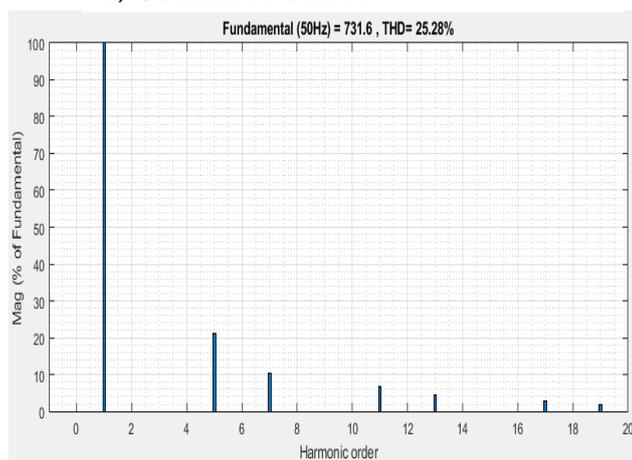
d) Courant injecté par 2^{ème} onduleur



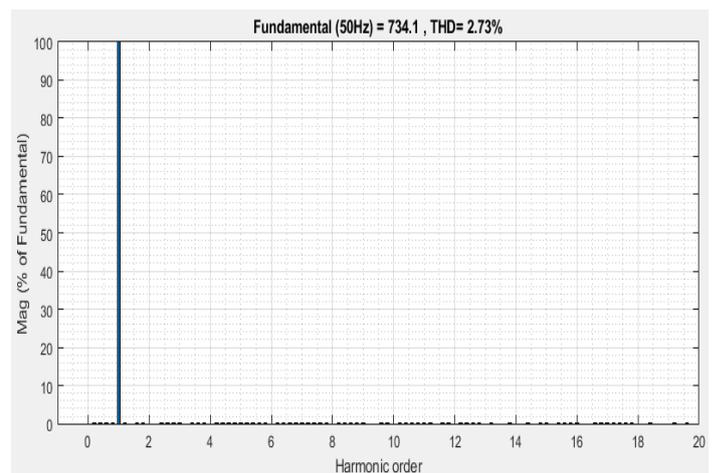
e) Courant de source



f) Tension aux bornes de condensateur



g) Analyse spectrale du courant de la charge (THD=25.28%)



h) Analyse spectrale du courant de la source (THD= 2.73%)

Fig. II. 3: Résultats de simulation du FAPP modulaire directe par SFR

Les figures II.3, (a) la tension de source qui montre un signal parfaitement sinusoïdal. (b, c, d, e) montrent les courants (injectés, de charge, et de source) lors d'utilisation du FAPP modulaire pour une seule phase. Nous remarquons que le courant de source après filtrage est sinusoïdal. (f) représente la tension aux bornes du condensateur qui est constant ce qui implique que la régulation de la tension V_{dc} fonctionne correctement. (g, h) indiquent les spectres harmoniques des courants avant et après le filtrage. On voit que la valeur du spectre harmonique est réduite après le filtrage. Ainsi le THD qui était 25.28% est devenu égale à 2.73 %. Ce résultat montre le respect des normes CEI.

Nous pouvons remarquer aussi de ces résultats le bon fonctionnement de notre filtre actif de puissance parallèle modulaire et sa grande capacité à éliminer les harmoniques de courant fort intensité.

II.3.2 Simulation du FAPP modulaire utilisant deux onduleurs à deux bras à point milieu

Cette topologie de FAPP se compose de deux onduleurs connectés en parallèle au réseau électrique. L'onduleur est constitué de deux bras. Le troisième bras est remplacé par deux condensateurs connectés à la 3ème phase du réseau électrique. Chacun des deux condensateurs agissent comme une source de tension continue, comme l'illustre la figure II.2. La tension à leurs bornes est égale à $\frac{V_{dc}}{2}$ et est maintenu à une valeur constante. [5]

Un filtre passif de premier ordre composé d'une inductance L_f et d'une résistance R_f assure la connexion des onduleurs au réseau électrique.

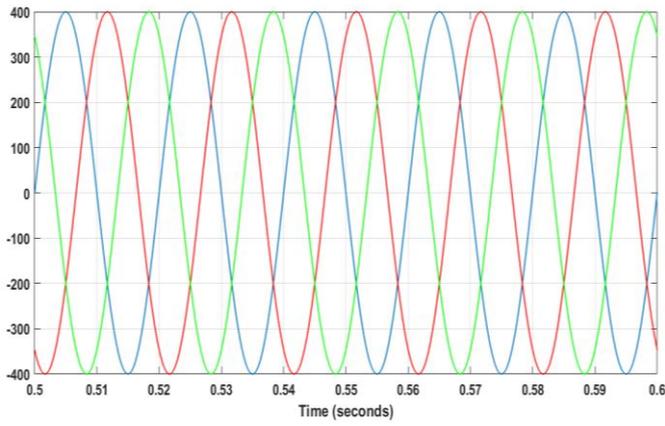
Le schéma de simulation de notre système est donné par la figure II.2

Les paramètres de simulation de notre système sont présentés dans le tableau II.2 :

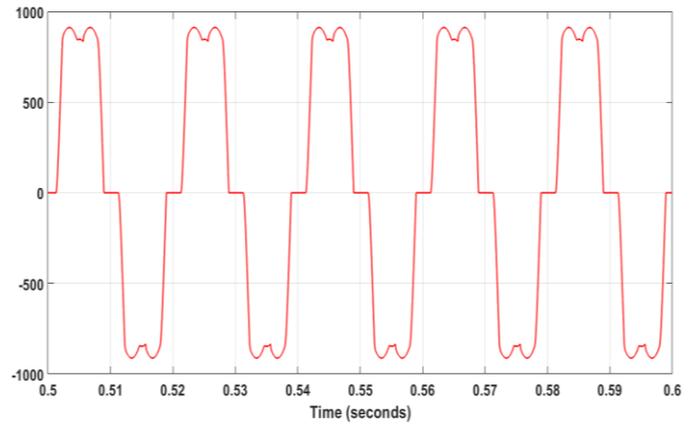
Éléments de notre système	Valeur de paramètre
Réseau électrique	Source triphasée sinusoïdale et équilibrée $f=50$ Hz $V_s=400$ v $R_s=1e-3$ Ω , $L_s=1e-8$ H
Pont redresseur	RL coté alternative du pont redresseur $R_c=2.73e-3$ Ω $L_c=23.19e-6$ H Charge RL $R_L=0.79$ Ω $L_L=2.6e-6$ H
FAPP	FAPP 1 $R_{f1}=5e-3$ Ω $L_{f1}=100e-6$ H FAPP 2 $R_{f2}=5e-3$ Ω $L_{f2}=100e-6$ H $C_{dc1}=60.10^{-3}$ F $C_{dc2}=60.10^{-3}$ F

Tableau II. 2: Paramètres de simulation

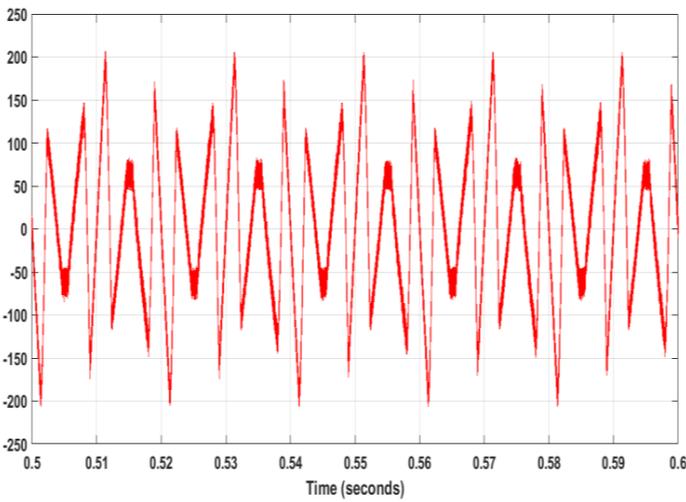
Les résultats de simulation sont illustrés par les figures suivantes :



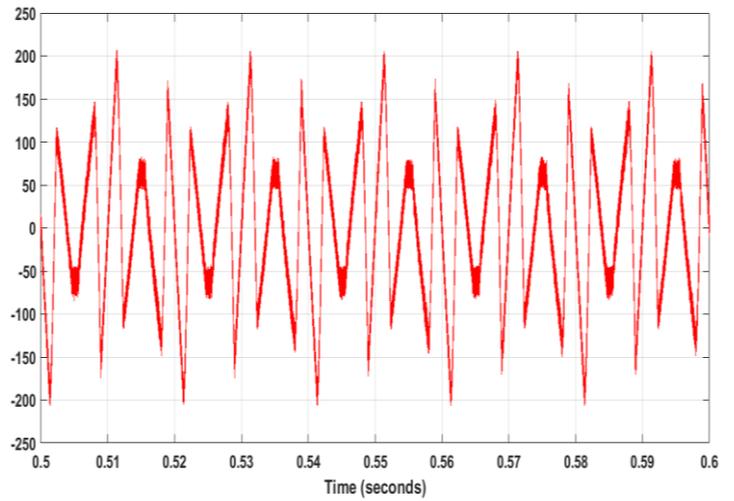
a) Tension de réseau



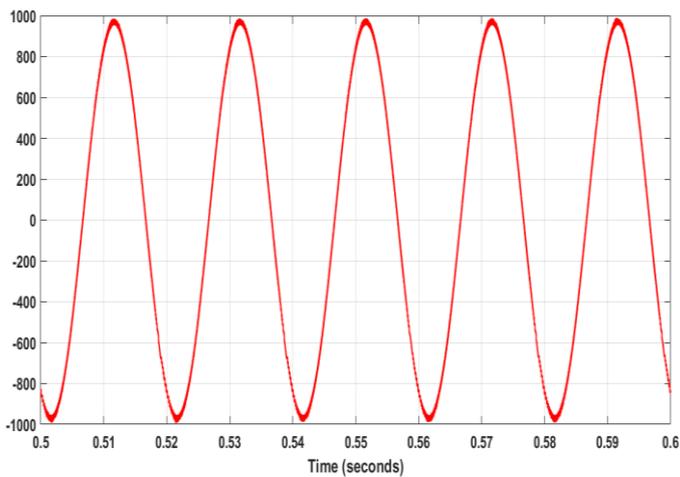
b) Courant de charge



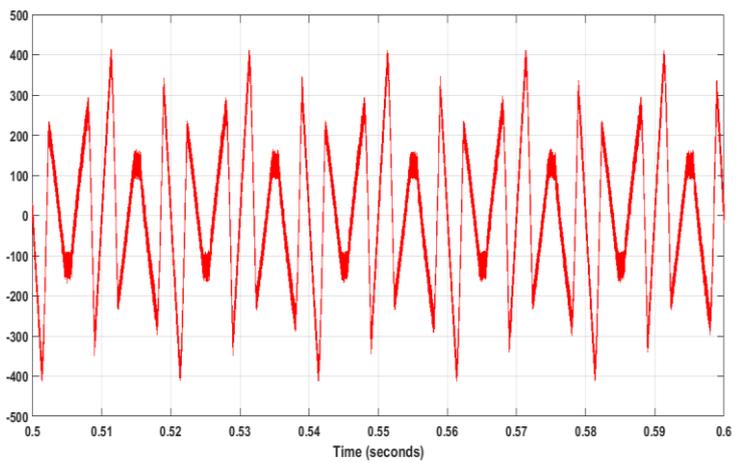
c) Courant injecté par 1^{er} onduleur



d) Courant injecté par 2^{ème} onduleur



f) Courant de source



e) Courant injecté par les deux onduleurs

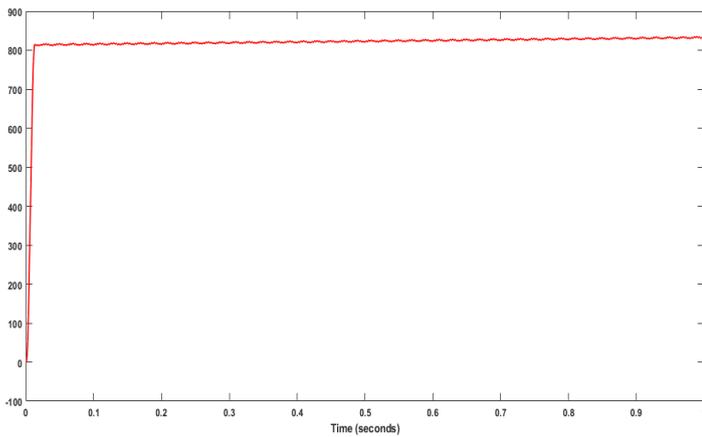
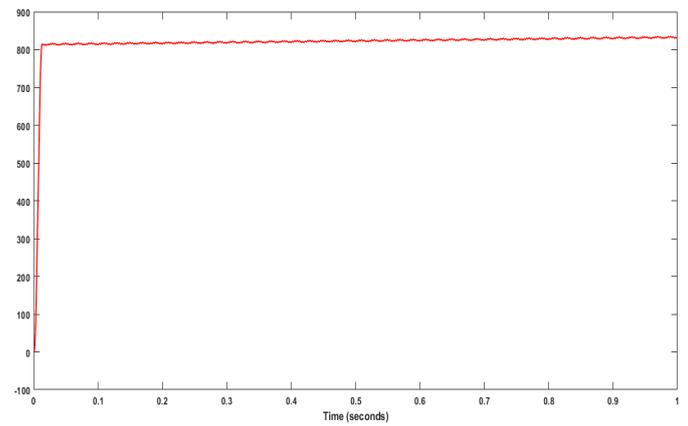
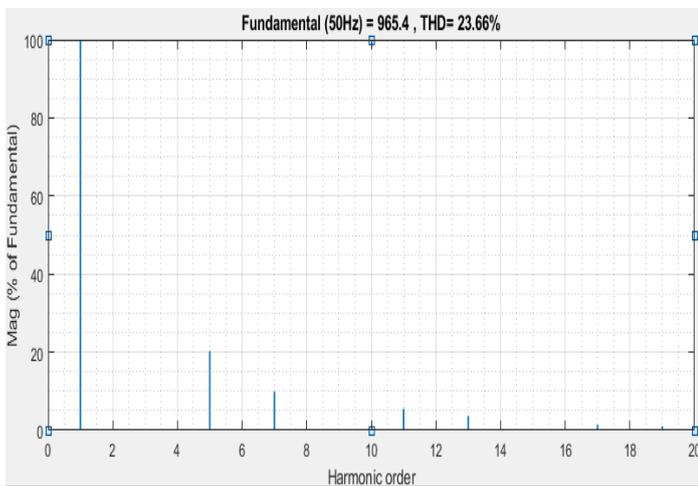
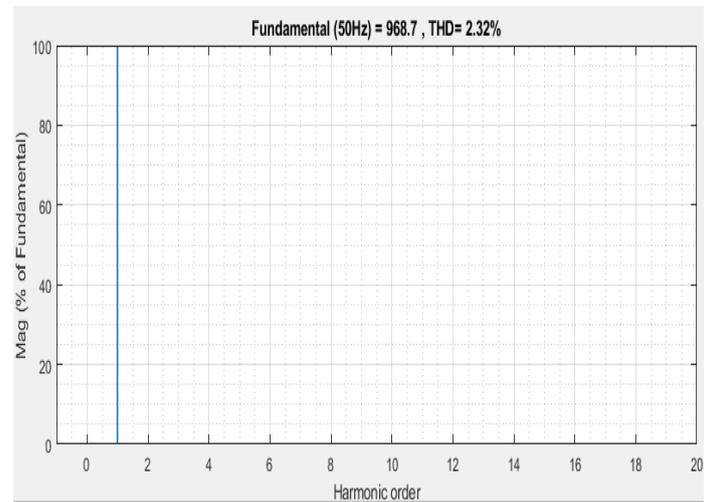
g) Tension aux bornes de 1^{er} condensateurh) Tension aux bornes de 2^{ème} condensateuri) Analyse spectrale du courant de la charge
(THD=23.66%)k) Analyse spectrale du courant de la source
(THD= 2.32%)

Fig. II. 4: Résultats de simulation du FAPP modulaire à deux bras à point milieu

D'après les figures II.4, (a) représente la tension de source qui a un signal parfaitement sinusoïdal. (b, c, d, e, f) montrent les courants (injectées, de charge et de source) après utilisation du FAPP modulaire pour une seule phase. On remarque que le courant de source après filtrage est sinusoïdal. (g, h) représentent la tension aux bornes des condensateurs. On remarque que ces tensions sont constantes. Nous pouvons dire ainsi que la régulation de la tension V_{dc} fonctionne correctement. (i, k) indiquent les spectres harmoniques des courants avant et après le filtrage. On constate que la valeur du THD après filtrage est de 2,32 % par rapport au THD avant filtrage qui était de 23.66%. Ainsi le résultat obtenu montre que le FAPP fonctionne correctement et donne de bonne résultats.

II.4 Filtre actif de puissance parallèle multi-niveaux

Le FAPP multi-niveaux est utilisé lorsque la tension du réseau électrique est élevée. Il existe plusieurs topologies de multi-niveaux [12], tel que :

- Onduleur multi-niveaux à condensateurs flotteur ou [Flying Capacitor (FC)].

- Onduleur multi-niveaux à pont en cascade H-bridge.
- Onduleur multi-niveaux à diode de bouclage (en anglais clamping diodes appelé diode Clamp ou NPC ou Neutral Point Clamped).

Un convertisseur multi-niveaux présente plusieurs avantages par rapport à un convertisseur conventionnel à deux niveaux qui utilise une modulation de largeur d'impulsion (PWM) à fréquence de commutation élevée. Les caractéristiques d'un onduleur multi-niveaux sont :

- Les convertisseurs multi-niveaux peuvent réduire les contraintes dv/dt ; donc les problèmes de compatibilité électromagnétique (CEM) peuvent être amoindri. [11]
- La tension commutée est de faible amplitude et la commutation est par conséquent plus aisée à gérer.
- Sa capacité à se connecter à des systèmes de plus grande puissance.
- Le nombre de tensions produites par un onduleur multi-niveaux est plus important que celui d'un onduleur à deux niveaux. Ce type d'onduleur permet d'améliorer la qualité de la forme de son onde, ce qui se traduira par une diminution de sa tension de distorsion harmonique. [9]

II.5 Topologie des onduleurs multi-niveaux

II.5.1 Onduleurs multi-niveaux à condensateur flottant (FC)

Cette topologie a fait son entrée au début des années 90. Le convertisseur FC est basé sur le principe de la connexion en série de cellules de commutation. Les cellules sont connectées entre elles par le biais une source de tension. Ce qui permet d'avoir une tension multi-niveaux. Ces sources de tension sont obtenues grâce à des condensateurs flottants. [27]

La figure II.5 montre l'onduleur à condensateur flottant à trois niveaux.

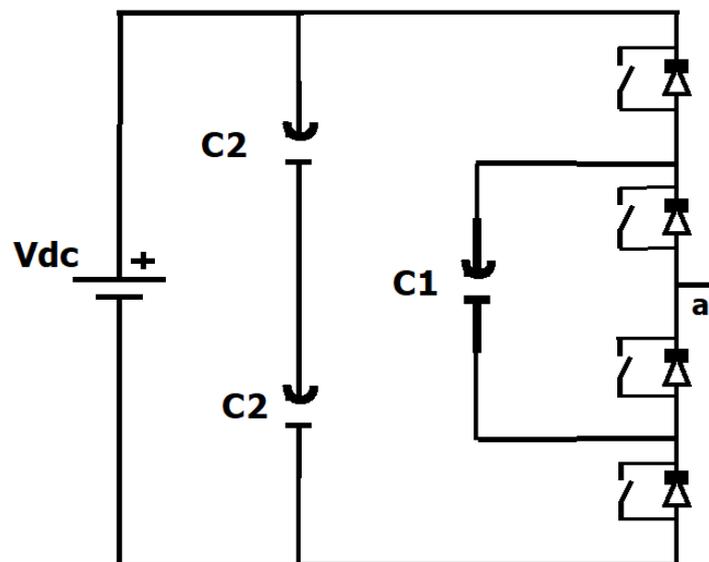


Fig. II. 5: Onduleur trois niveaux à condensateurs flottants.

II.5.2 Onduleur multi-niveaux en cascade (Pont H)

Une autre topologie nommée onduleur multi-niveaux à pont en H (en cascade) a été utilisée pour les applications haute tension car il présente des avantages en termes de nombre de composants, de haute fiabilité et de modularité. [18]

Cependant, l'onduleur multi-niveaux à pont en H nécessite plusieurs sources de tension d'entrée pour obtenir une tension de sortie multi-niveaux, comme le montre la figure suivante. [19]

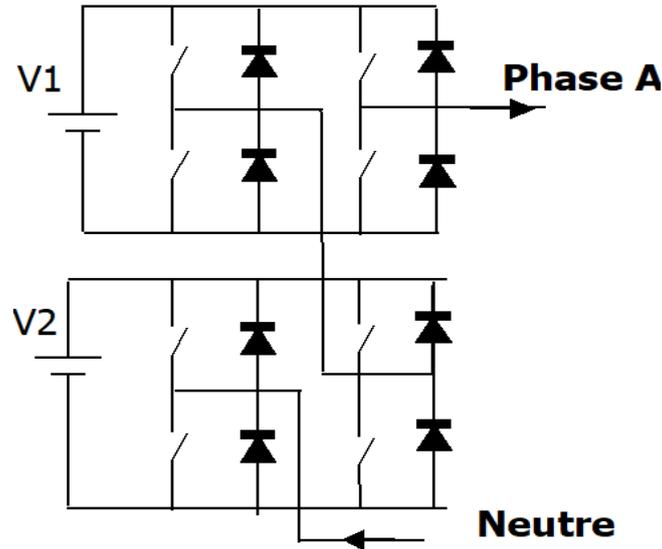


Fig. II. 6: structure générale d'onduleur H-bridge

II.5.3 Onduleur multi-niveaux de type NPC

Les onduleurs NPC (Neutral Point Clamped), voir figure II.7 se caractérisent par l'utilisation de diodes de serrage pour garantir le partage de tension approprié entre les interrupteurs de puissance. Aujourd'hui, c'est la topologie multi-niveaux la plus connue et la plus utilisée. En effet, grâce à leur nature multi-niveaux, les onduleurs Neutral Point Clamped offrent une qualité de forme d'onde supérieure (aux onduleurs à deux niveaux), entraînant des exigences de filtrage réduites. On les trouve souvent dans les applications à moyenne tension. Cependant il faut savoir que la tension de sortie maximale est la moitié de la tension continue d'entrée, ce qui est considéré comme un inconvénient. [13]

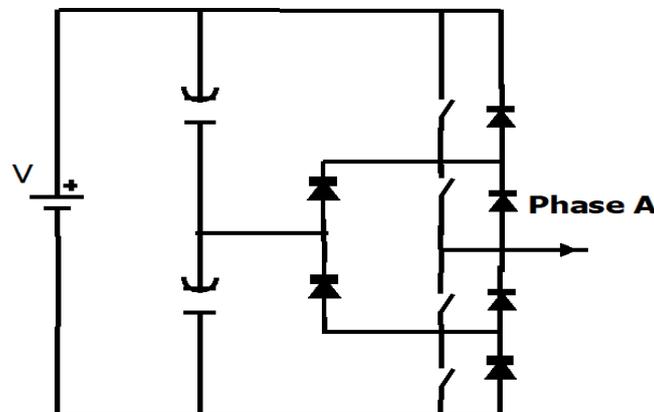


Fig. II. 7: Onduleur NPC à trois niveaux

La Fig. II.8 illustre la topologie NPC à trois niveaux de l'onduleur à diode. En dépit d'une structure plus complexe que celle de l'onduleur à deux niveaux, le mode de fonctionnement est plus aisé et bien maîtrisé. En résumé, chaque nœud de phase (a, b ou c) peut être connecté à n'importe quel nœud de la batterie de condensateurs (d_0, d_1, d_2). La connexion de la phase aux jonctions d_0 et d_2 peut être réalisée en commutant les transistors T_{a1} et T_{a2} tous les deux éteints ou tous les deux allumés respectivement. Ces états sont les mêmes que ceux de l'onduleur à deux niveaux produisant une tension ligne-terre nulle. La connexion à la jonction d_1 est réalisée en désactivant T_{a1} et en activant T_{a2} . [9]

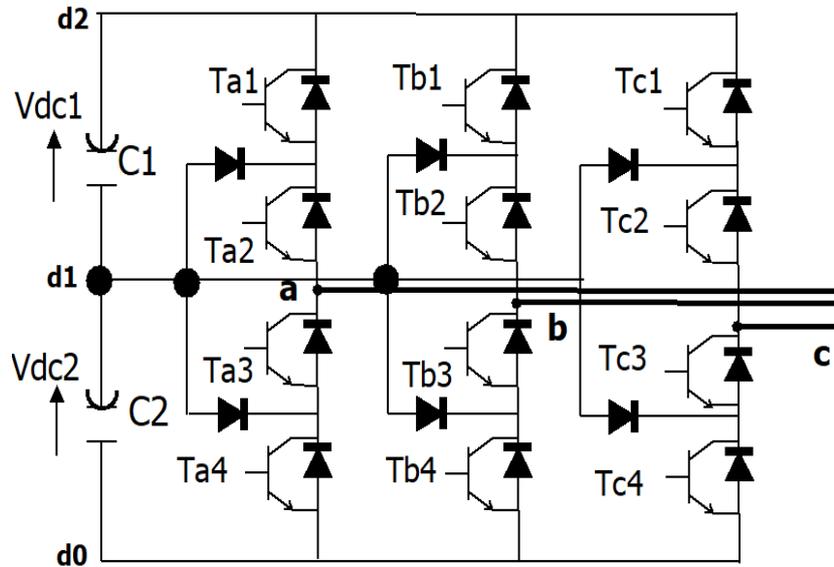


Fig. II. 8 : Structure d'onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC

Selon cette description, nous obtenons le tableau suivant : [24]

T_{a1}	T_{a2}	T_{a3}	T_{a4}	Tension de Sortie
1	1	0	0	$V_{dc}/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-V_{dc}/2$

Tableau II. 3: Commutation du convertisseur NPC 3 niveaux.

Les onduleurs NPC que nous avons étudié sont les onduleurs NPC 5 niveaux et onduleurs NPC 7 niveaux.

Concernant la structure de l'onduleur de tension de type NPC à cinq niveaux qui est représenté sur la figure II.9 : Le nombre de sources secondaires continues nécessaire pour cette topologie est $S = 4$. Dans ce cas, quatre condensateurs se partagent la tension E pour donner quatre sources distinctes de tension $E/4$. Cette topologie contient 8 interrupteurs à IGBT et 6 diodes de bouclage. [14] et [15]

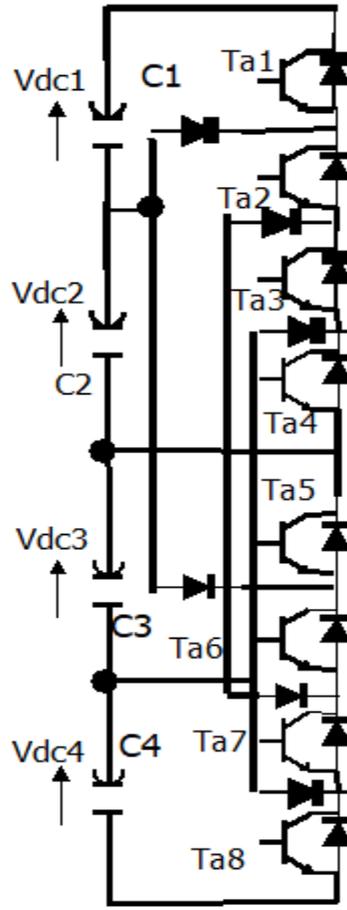


Fig. II. 9: Structure d’onduleur triphasé à cinq niveaux de type NPC

Les états de commutation pour ce type d’onduleur sont présentés dans le tableau suivant :

Ta1	Ta2	Ta3	Ta4	Ta5	Ta6	Ta7	Ta8	Tension de Sortie
1	1	1	1	0	0	0	0	$E/2$
0	1	1	1	1	0	0	0	$E/4$
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	$-E/4$
0	0	0	0	1	1	1	1	$-E/2$

Tableau II. 4: Commutation du convertisseur NPC 5 niveaux.

Concernant la structure de l’onduleur de tension de type NPC à sept niveaux, il est représenté par la figure II.10. Le nombre de sources secondaires continues nécessaire pour cette topologie est $S = 6$. Dans ce cas, six condensateurs se partagent la tension E pour donner quatre sources distinctes de tension $E/6$. Cette topologie contient 12 interrupteurs à IGBT. [10]

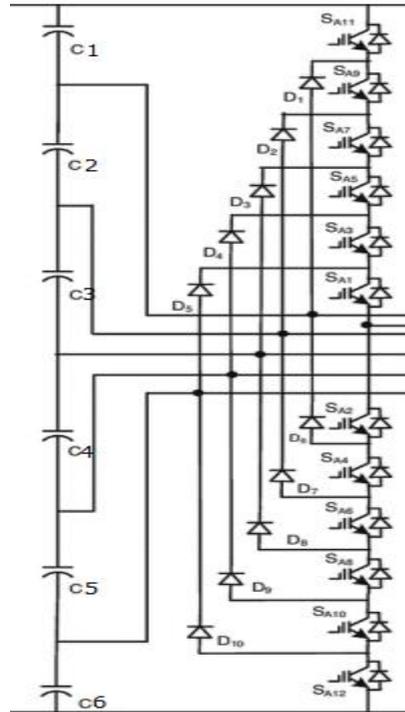


Fig. II. 10: Structure d’onduleur triphasé à sept niveaux de type NPC

Les états de commutation pour ce type d’onduleur sont présentés dans le tableau suivant :

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	Tension de Sortie
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	E/2
0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	E/3
0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	E/6
0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	-E/6
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	-E/3
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	-E/2

Tableau II. 5 :Commutation du convertisseur NPC 7 niveaux.

II.6 Simulation

Nous allons maintenant présenter les résultats de simulation des FAPPs multi-niveaux de type NPC connecté en parallèle à un réseau triphasé à trois fils. Le réseau électrique est connecté à une charge non linéaire triphasée qui alimente une charge de type RL. La méthode des puissances instantanées p-q à commande indirecte a été utilisée. La commande indirecte se différencie de la commande directe par le fait qu’on :

1. Utilise un filtre passe bas pour extraire la composante continue de la puissance au lieu d’un filtre passe haut,
2. Et au niveau de la MLI on fait la différence entre le courant de référence et le courant source.

La commande indirecte est donnée par la figure suivante :

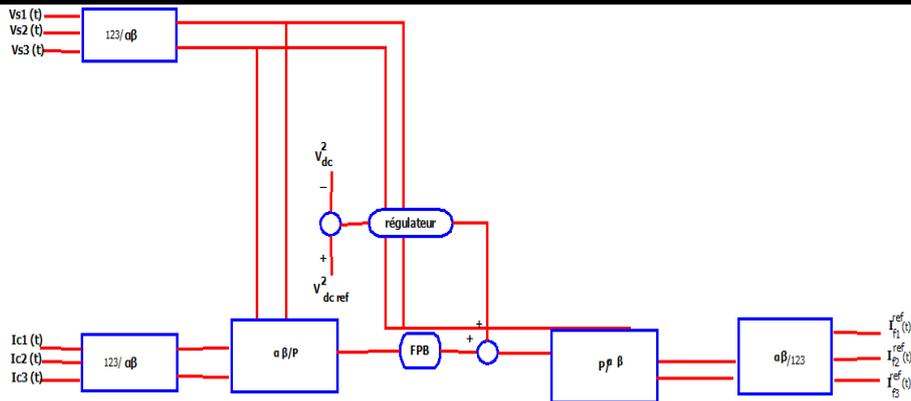


Fig. II. 11:Schéma de commande indirecte

Toutes les simulations présentées ci-dessous concernant les FAPP à 3 niveaux, 5 niveaux et 7 niveaux, utilise les mêmes paramètres de simulation de notre système, donné dans le tableau suivant :

Éléments de notre système	Valeur de notre système
Réseau électrique	Source triphasée sinusoïdale et équilibrée $f=50$ Hz $V_s=5500$ v $R_s= 0.0001 \Omega$ $L_s =0.0005H$
Pont redresseur	RL coté alternative du pont redresseur $R_c= 0.1e-3 \Omega$ $L_c =0.5e-3H$ Charge RL $R_L= 50 \Omega$ $L_L=0.5e-3H$
FAPP	$R_f = 0.0001 \Omega$ $L_f = 0.02$ H $C_{dc}= 0.5.10^{-3}$ F pour le 3 et 5 niveaux $C_{dc}= 0,9.10^{-3}$ F pour le 7 niveaux

Tableau II. 6: Paramètres de simulation

II.6.1 Simulation du FAPP trois niveaux de type NPC

La figure suivante présente le FAPP trois niveaux de type NPC. Le schéma détaillé du système complet de simulation est présenté en ANNEXE B.

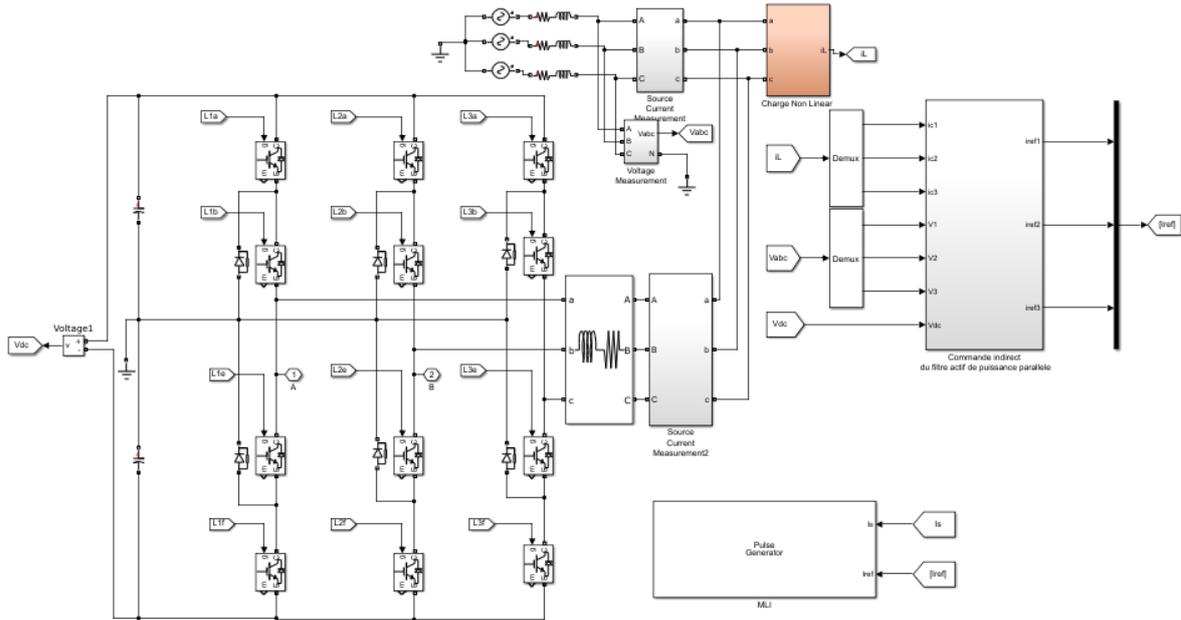
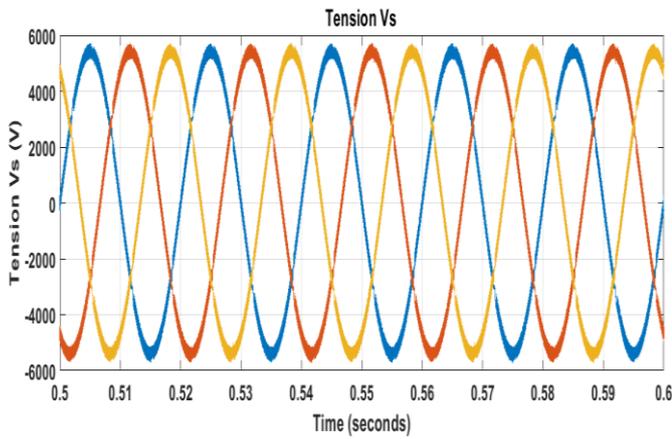
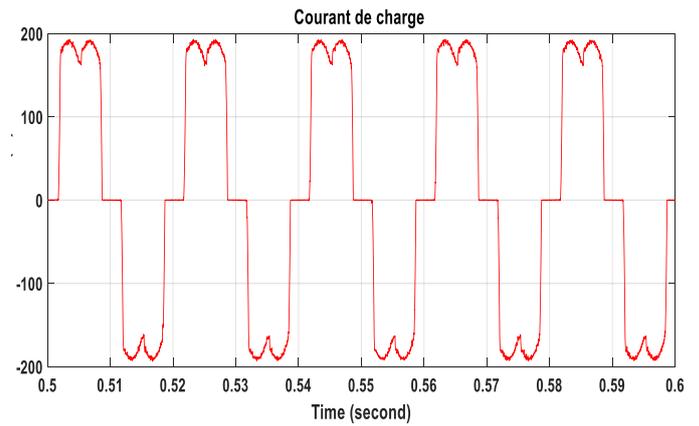


Fig. II. 12: Schéma général de la simulation de l'ondulateur trois niveaux de type NPC

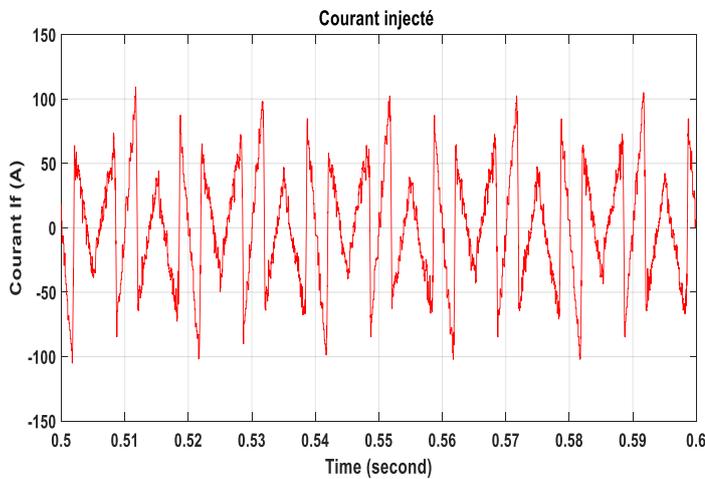
Les résultats de cette simulation sont illustrés par les figures suivantes :



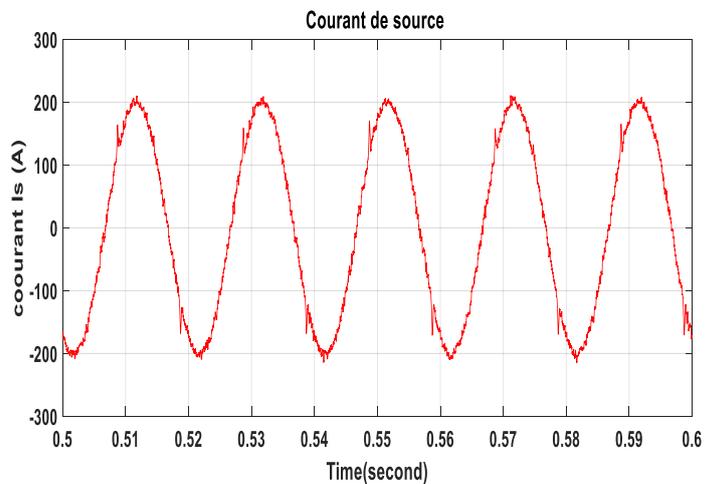
a) Tension de réseau



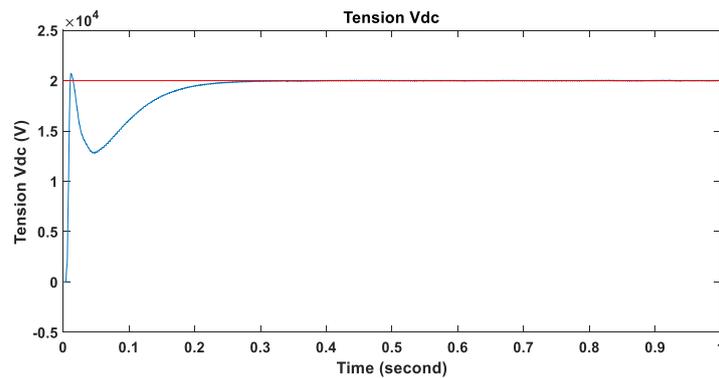
b) Courant de charge



c) Courant injecté



d) Courant de source



e) Tension aux bornes de condensateur

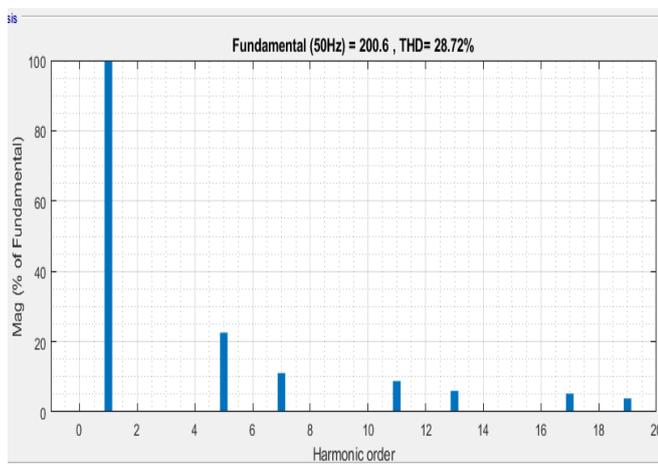
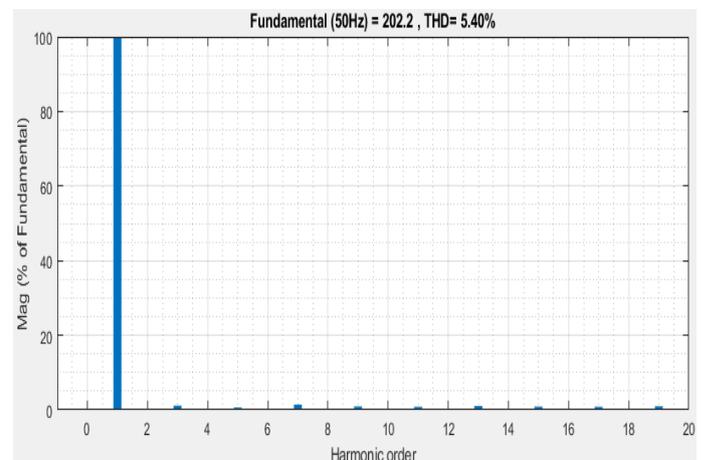
f) Analyse spectrale du courant de la charge
(THD=28.72%)g) Analyse spectrale du courant de la source
(THD= 5.40%)

Fig. II. 13 :Résultats de simulation du FAPP 3 niveaux à commande indirecte par la méthode p-q

D'après les figures II.13, (a) montre la tension de source qui a un signal parfaitement sinusoïdal. (b, c, d) montrent les courants (injectées, de charge et de source) pour une seule phase lors de l'utilisation du FAPP 3 niveaux de type NPC.(e) représente la tension aux bornes des condensateurs qui est constant.(f, g) indiquent les spectres harmoniques des courants avant et après le filtrage, on voit que le THD qui était de 28.72% avant filtrage est devenu après filtrage égal à 5,40 %.

II.6.2 Simulation du FAPP cinq niveaux de type NPC

La figure suivante présente le FAPP cinq niveaux de type NPC connecté à un réseau électrique alimentant une charge non linéaire. Le schéma détaillé du système complet de la simulation est présenté en ANNEXE B.

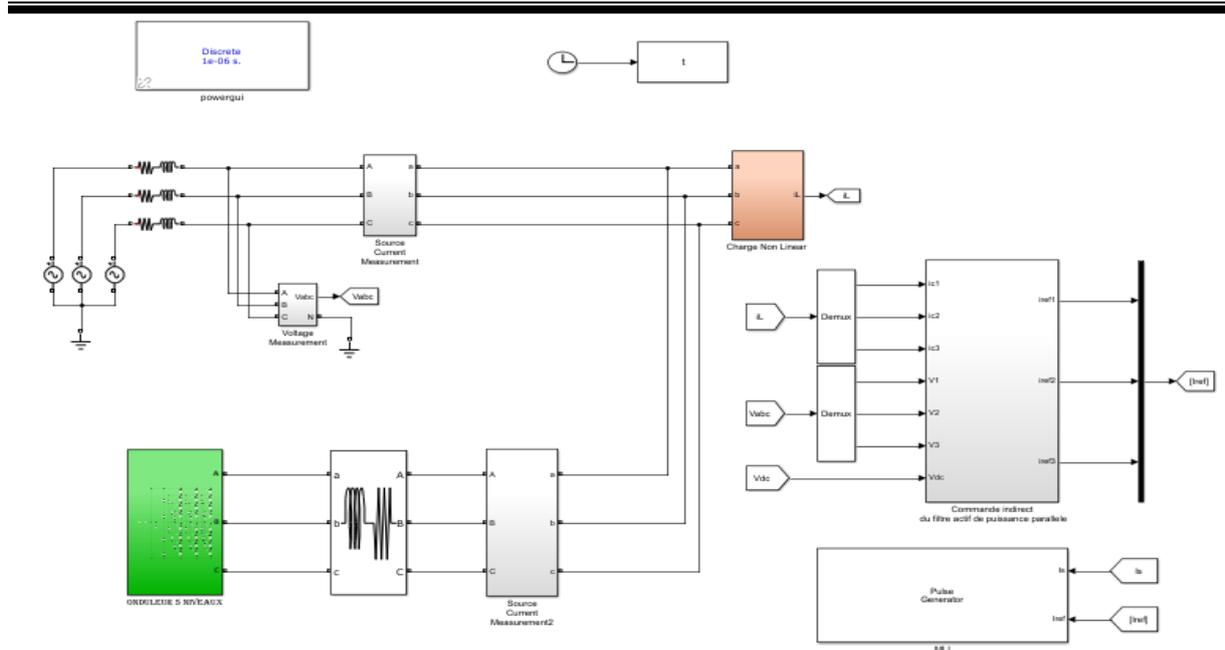
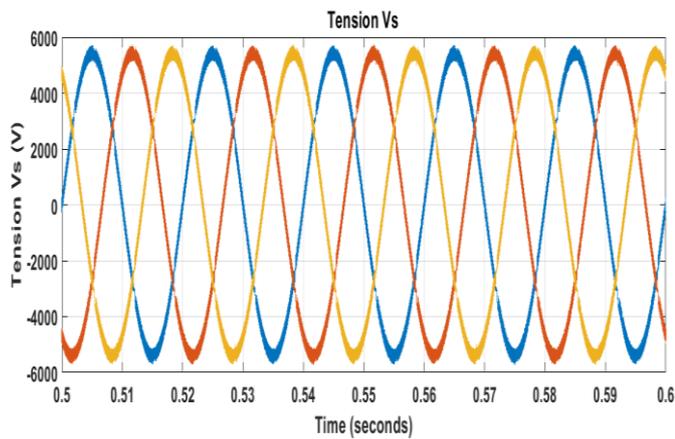
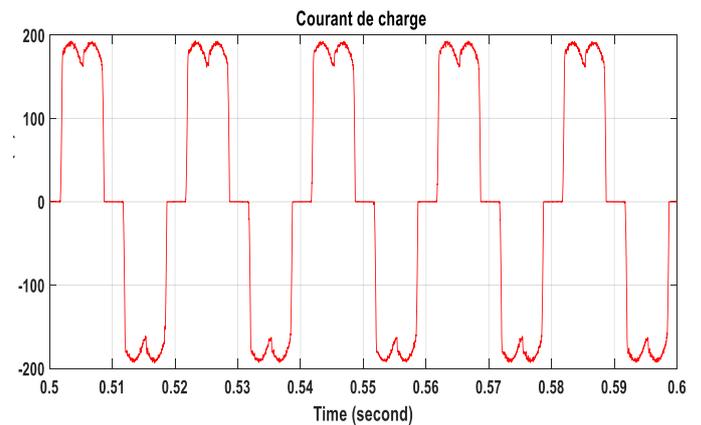


Fig. II. 14: Schéma général de la simulation du FAPP cinq niveaux de type NPC.

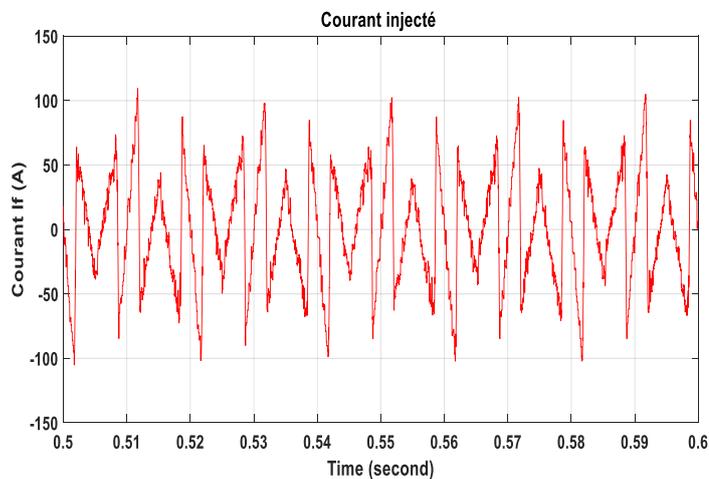
Les résultats de cette simulation sont illustrés par les figures suivantes :



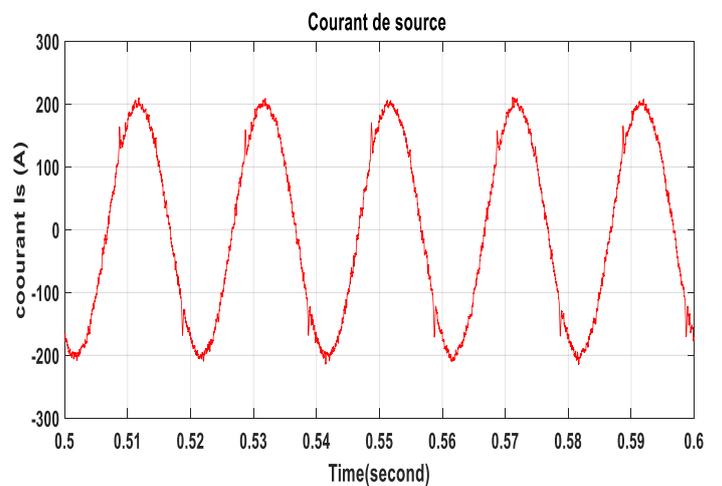
a) Tension de réseau



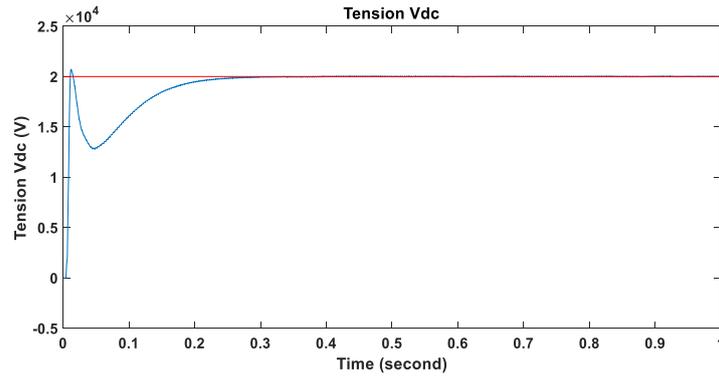
b) Courant de charge



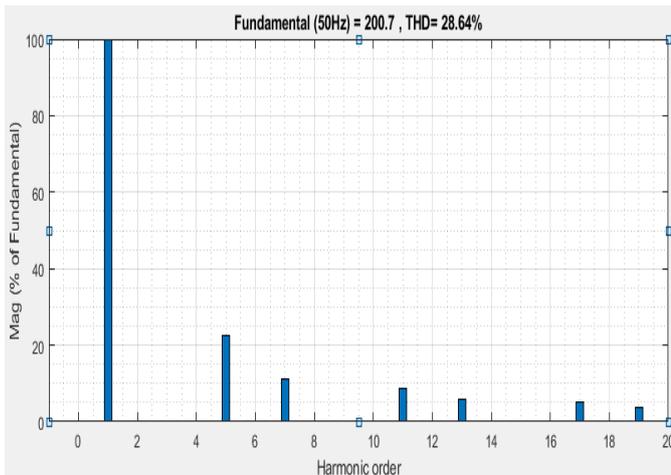
c) Courant injecté



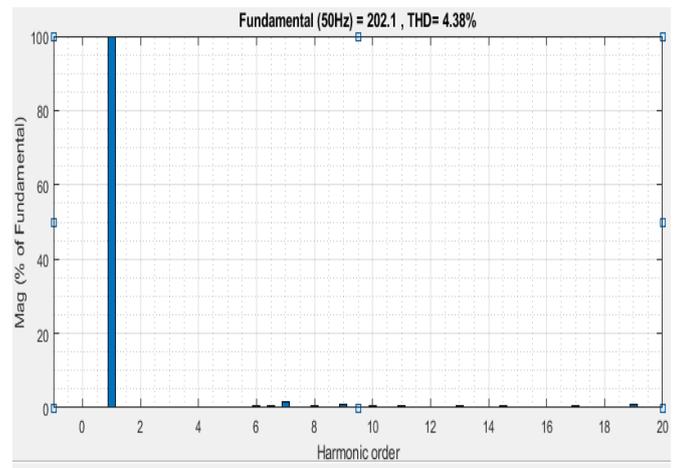
d) Courant de source



e) Tension aux bornes de condensateur



f) Analyse spectrale du courant de la charge (THD=28.64%)



g) Analyse spectrale du courant de la source (THD= 4.38%)

Fig. II. 15: Résultats de simulation du FAPP 5 niveaux à commande indirecte par la méthode p-q

D’après Les figures II.15 : (a) illustre la tension de source qui a un signal parfaitement sinusoïdal. (b, c, d) illustrent les courants (injectées, de charge et de source) lors de l’utilisation du FAPP cinq niveaux de type NPC pour une seule phase. (e) représente la tension aux bornes des condensateurs qui est constant. (f, g) indiquent les spectres harmoniques des courants avant et après le filtrage, on voit que la valeur du THD est de 28.64 % avant filtrage est devenu après filtrage de 4.38 %.

II.6.3 Simulation du FAPP sept niveaux de type NPC

La figure suivante représente le FAPP sept niveaux de type NPC. Les schémas pour la simulation du système complet sont illustrés en ANNEXE B.

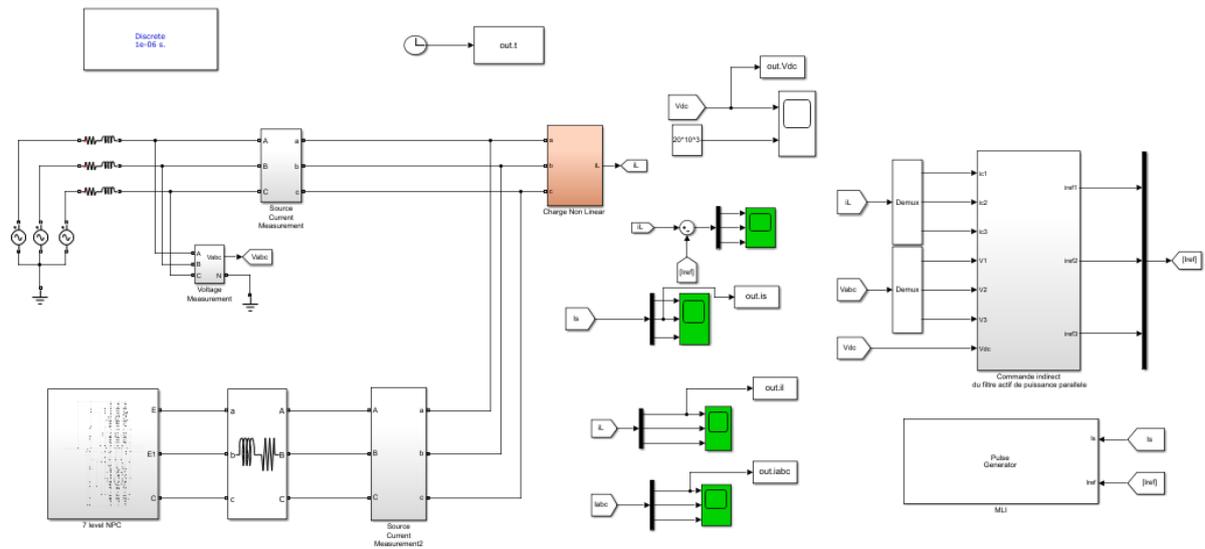
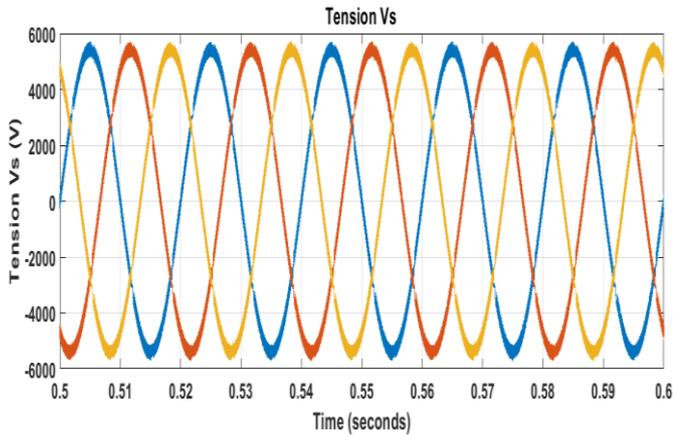
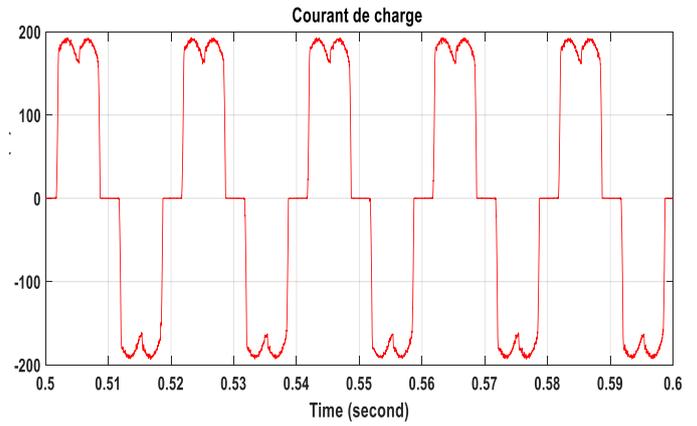


Fig. II. 16: Schéma général de la simulation de l'onduleur sept niveaux NPC

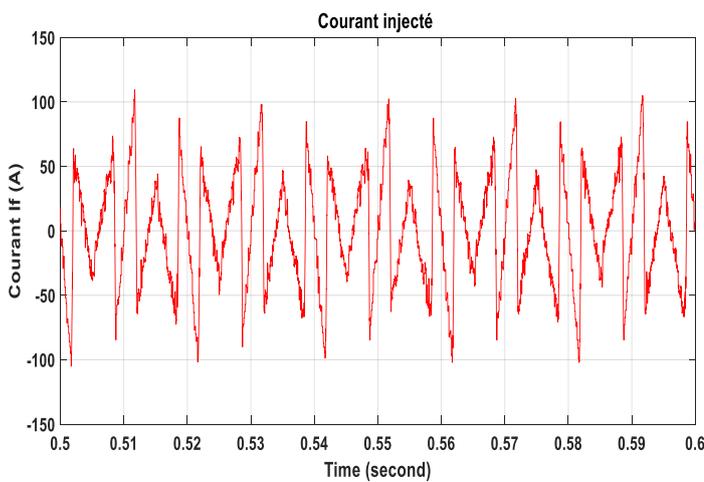
Les résultats de cette simulation sont illustrés par les figures suivantes :



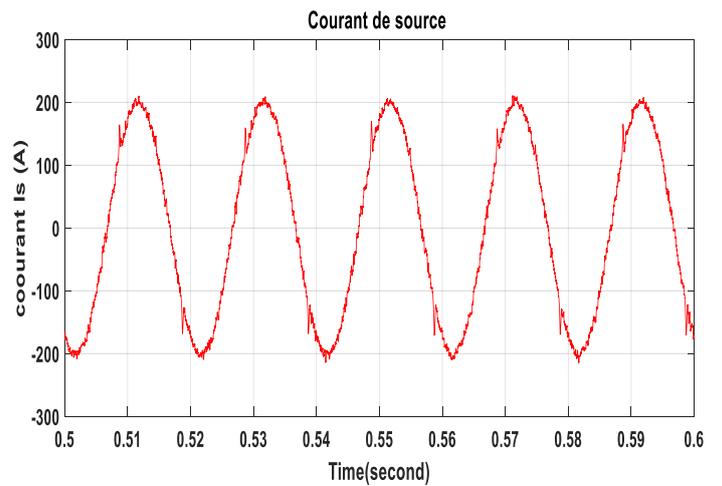
a) Tension de réseau



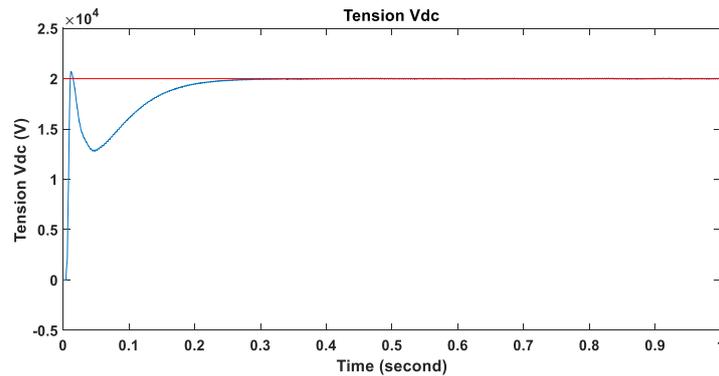
b) Courant de charge



c) Courant injecté



d) Courant de source



e) Tension aux bornes de condensateur

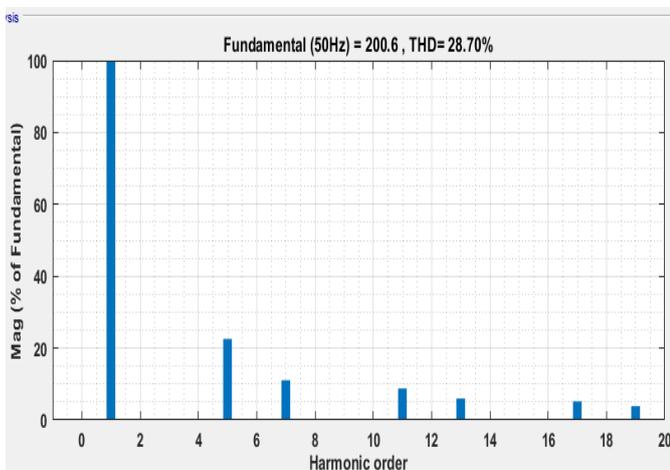
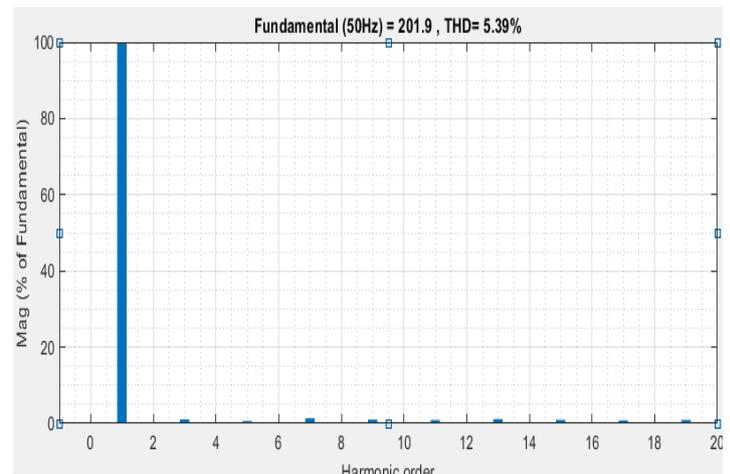
f) Analyse spectrale du courant de la charge
(THD=28.70%)g) Analyse spectrale du courant de la source
(THD= 5.39%)

Fig. II. 17: Résultats de simulation du FAPP 7 niveaux à commande indirecte par la méthode p-q

D'après les figures II.17, (a) illustre la tension de source qui a un signal parfaitement sinusoïdal. (b, c, d) montrent les courants (injectées, de charge et de source) pour une seule phase lors de l'utilisation du FAPP 7 niveaux de type NPC. La figure (e) représente la tension aux bornes des condensateurs qui est constant. (f, g) indiquent les spectres harmoniques des courants avant et après le filtrage. On voit que la valeur du THD après filtrage qui était de 28.70% est devenu égale à 5,39 %.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les filtres actifs de puissance modulaires et les filtres actifs de puissance multi-niveaux séparément. Nous avons également présenté les différentes simulations pour les FAPP modulaire à savoir les FAPP modulaire à trois bras et à deux bras à point milieu. Nous avons également présenté les résultats de simulation pour les FAPP multi-niveaux de type NPC. Nous avons montré les résultats de simulation pour le 3 niveaux, le 5 niveaux et le 7 niveaux. Nous avons constaté que le THD après filtrage était toujours inférieurs à 5 % pour toutes les simulations.

Chapitre III Étude des Filtres actifs de puissance Parallèles Modulaire Multi- niveaux

III.1 Introduction

Le filtre actif de puissance modulaire multi-niveaux n'a jamais été étudié avant nous et après une recherche approfondie nous avons trouvé aucun article et aucun document (article, mémoire ou livre) à ce sujet. Cependant, du fait qu'on a compris le principe de fonctionnement des filtres actifs de puissance modulaires et des filtres actifs de puissance multi-niveaux séparément, ce qui a été présenté dans le chapitre 2. Nous avons réussi à étudier et simuler un filtre actif de puissance étant en même temps modulaire et multi-niveaux.

Ainsi dans ce chapitre nous allons vous montrer la topologie que nous proposons et les résultats des simulations que nous avons obtenus.

III.2 Filtre actif de puissance parallèle modulaire multi-niveaux

Le filtre actif de puissance modulaire multi-niveaux (FAPMM) est utilisé lorsque nous avons une tension élevée et un courant important en même temps au réseau électrique. Cette tension élevée est dû au fait que nous connectons notre FAPMM en moyenne tension par exemple et un courant important est dû au fait qu'une et/ou des charges non linéaires consomment énormément un courant important.

Pour que notre FAPMM fonctionne sur ce type de réseau électrique il faut qu'il soit multi-niveaux afin de pouvoir le faire fonctionner lorsqu'il est connecté au réseau électrique et modulaire afin que chaque onduleur puisse supporter ce courant qui est important.

Le FAPMM que nous avons choisi de faire fonctionner est un FAPP modulaire constitué de deux onduleurs qui n'ont pas en commun la source cotée continu des onduleurs. Cependant, ils ont en commun la même commande qui doit les commander en même temps. Cette commande a comme contrainte de gérer en même temps deux sources différentes cotée continu des onduleurs. Chaque onduleur du FAPMM doit en plus être multi-niveaux de type NPC (nous avons essayé le 3 niveaux, 5 niveaux et 7 niveaux).

Le schéma de principe de notre système complet (topologie + commande) avec sa commande contenant deux onduleurs pour le modulaire et dont chaque onduleur est de type NPC 3 niveaux est présenté sur la figure suivante.

Remarque : Nous présentons les schémas de simulations pour les FAPMM modulaire 3 niveaux, 5 niveaux et 7 niveaux dans l'ANNEXE C.

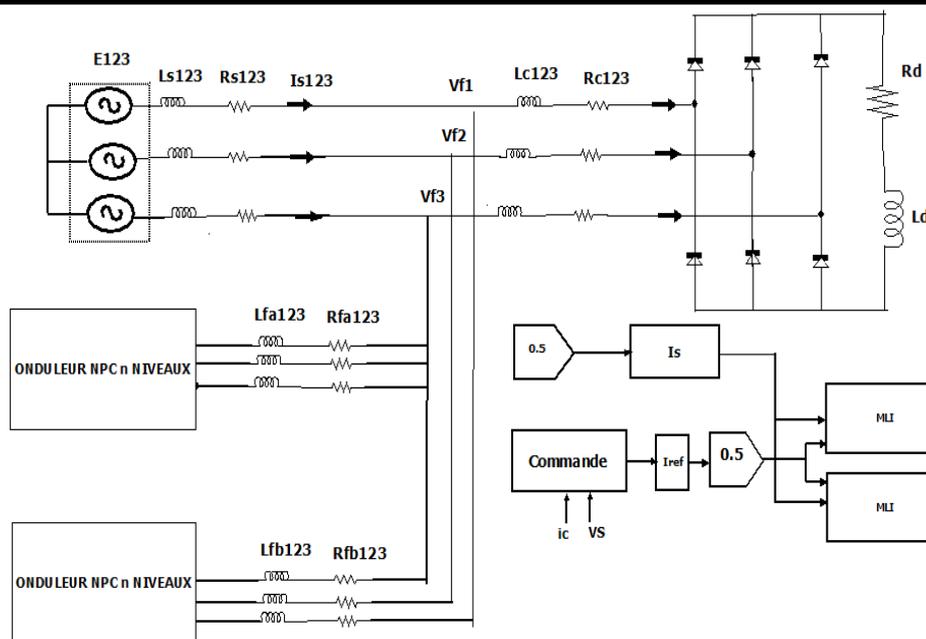


Fig. III. 1: Schéma général de la simulation de FAPMM n niveaux de type NPC

III.3 Simulation

Nous allons maintenant présenter les résultats des simulations des FAPMM connecté en parallèle à un réseau triphasé à trois fils. Le réseau électrique est connecté à une charge non linéaire triphasée qui alimente à son tour une charge de type RL. La méthode des puissances instantanées p-q à commande indirecte utilisant un contrôleur MLI a été utilisée comme stratégie de commande. Dans un premier temps, nous avons simulé le système complet en utilisant pour les deux onduleurs un multi-niveaux de type NPC 3 niveaux puis nous avons présenté les résultats de simulation des FAPMM pour le cinq niveaux puis pour le sept niveaux.

Les paramètres du système pour toutes les simulations sont identiques et sont donnés dans le tableau suivant :

Elément de notre système	Valeur de notre système
Réseau électrique	Source triphasée sinusoïdale et équilibrée $f=50 \text{ Hz}$ $V_s=5500 \text{ v}$ $R_s= 0.0001 \text{ } \Omega,$ $L_s =0.0005 \text{ H}$
Pont redresseur	RL coté alternative du pont redresseur $R_c= 0.0001 \text{ } \Omega$ $L_c =0.0005\text{H}$ Charge RL $R_L= 50 \text{ } \Omega$ $L_L= 0.0005\text{H}$
FAPP	$R_f = 0.0001 \text{ } \Omega$ $L_f = 0.02 \text{ H}$ $C_{dc}= 0.5e-3 \text{ F}$ pour le 3 et 5 niveaux $C_{dc}= 0.9e-3 \text{ F}$ pour le 7 niveaux

Tableau III. 1: Paramètres de simulation du système complet

III.3.1 Simulation du FAPMM trois niveaux de type NPC

La figure suivante représente le FAPMM trois niveaux de type NPC modulaire. Le schéma de simulation est détaillé en ANNEX C.

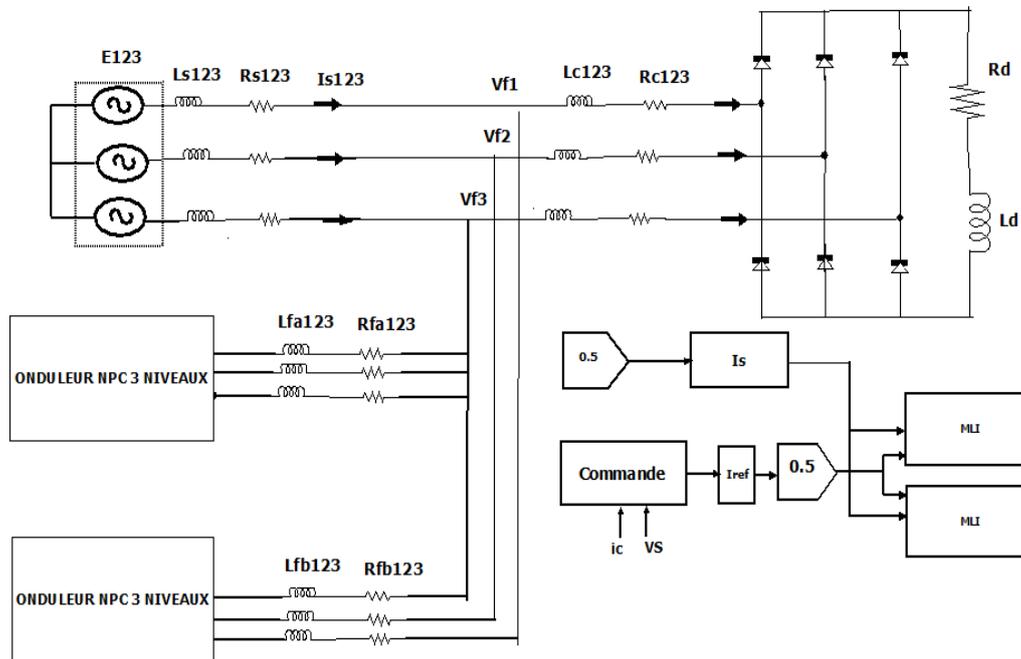
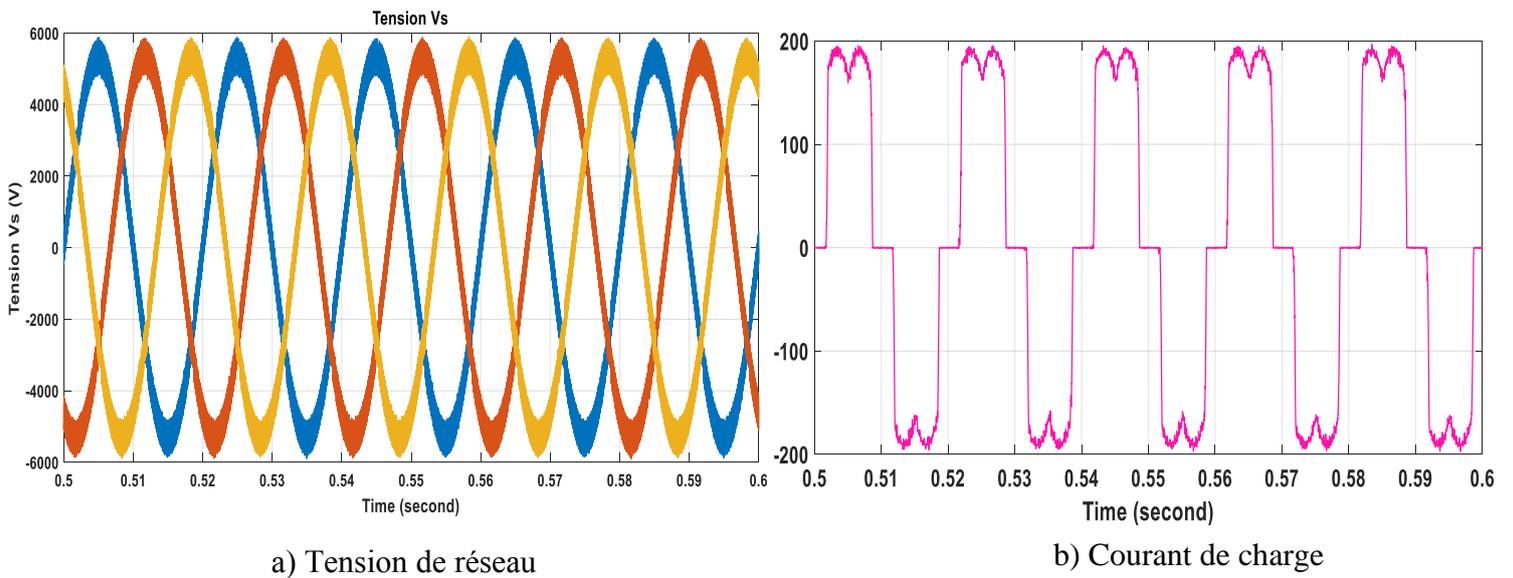


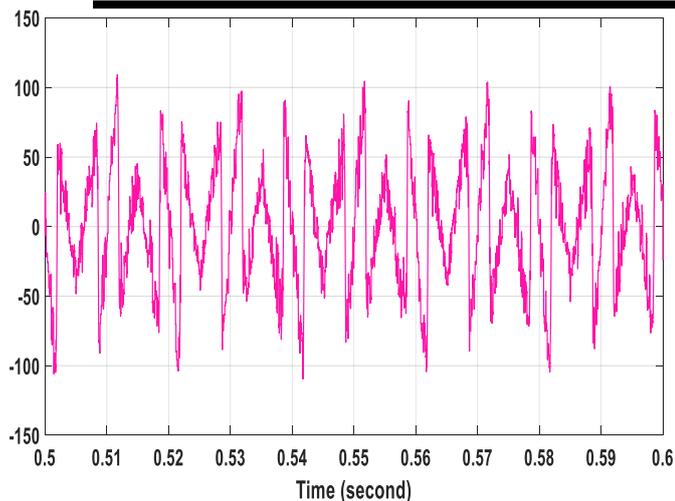
Fig. III. 2: Schéma général de la simulation de FAPMM trois niveaux de type NPC

Les résultats de cette simulation sont illustrés par les figures suivantes :

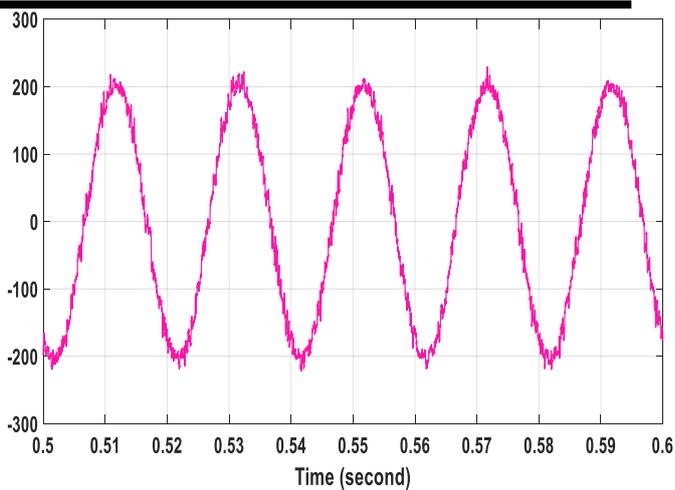


a) Tension de réseau

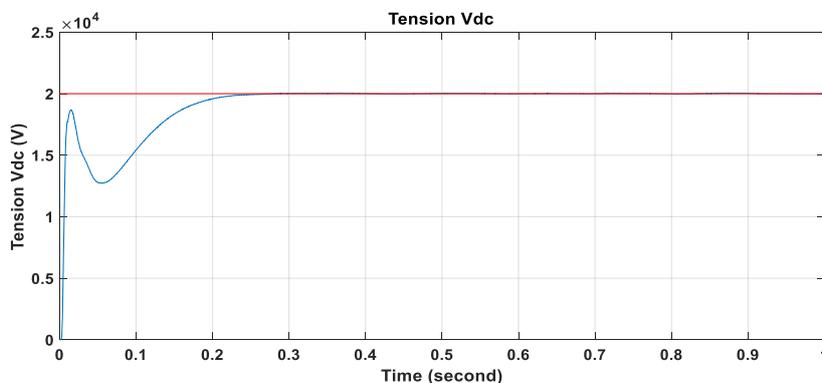
b) Courant de charge



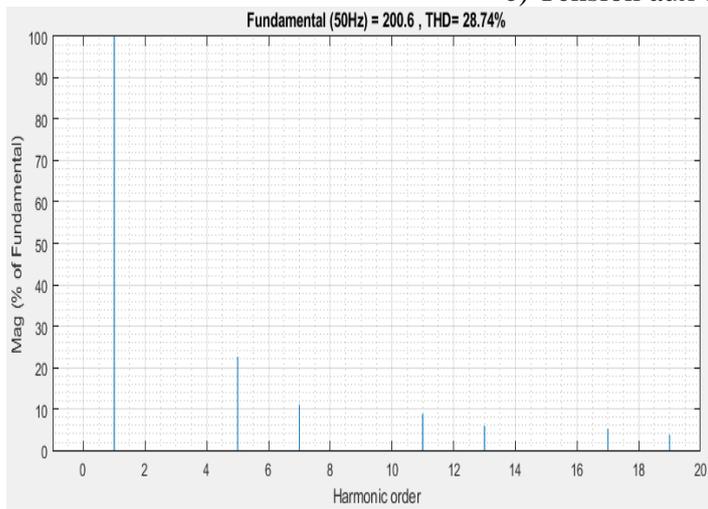
c) Courant injecté



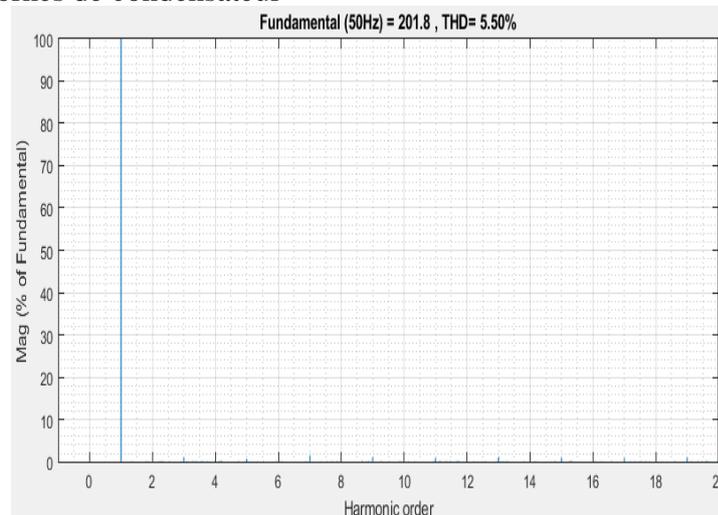
d) Courant de source



e) Tension aux bornes de condensateur



f) Analyse spectrale du courant de la charge
(THD=28.74%)



g) Analyse spectrale du courant de la source
(THD= 5.50%)

Fig. III. 3: Résultats de simulation du FAPP 3 niveaux modulaire à commande indirecte par la méthode p-q

D'après les figures III.3, (a) illustre la tension de source ayant un signal qui est parfaitement sinusoïdal. (b, c, d) montrent les courants (injectées, de charge et de source) pour une seule phase lors de l'utilisation du FAPMM 3 niveau de type NPC. (e) représente la tension aux bornes des condensateurs qui est constant. On remarque que la régulation de la tension Vdc fonctionne correctement. (f, g) indiquent les spectres harmoniques des courants avant et après le filtrage. On remarque que la valeur du spectre harmonique est réduite après filtrage de 28.74% à une valeur de 5,50 % pour le THD. C'est un résultat qui acceptable car le THD est proche de 5 %.

III.3.2 Simulation du FAPMM cinq niveaux de type NPC

La figure suivante représente le FAPMM parallèle cinq niveaux de type NPC. Le schéma de simulation est détaillé en ANNEXE C.

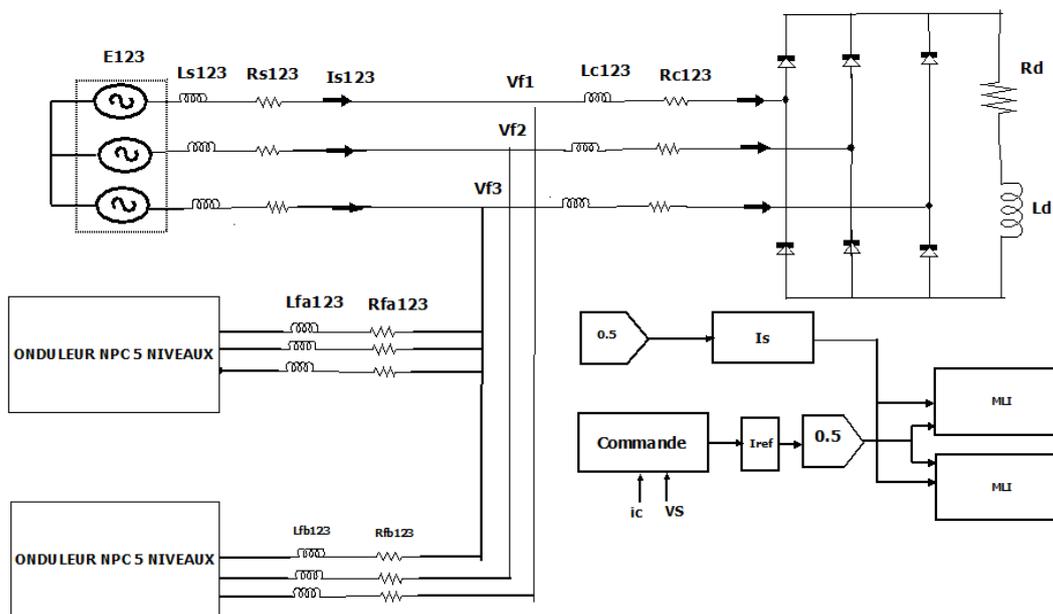
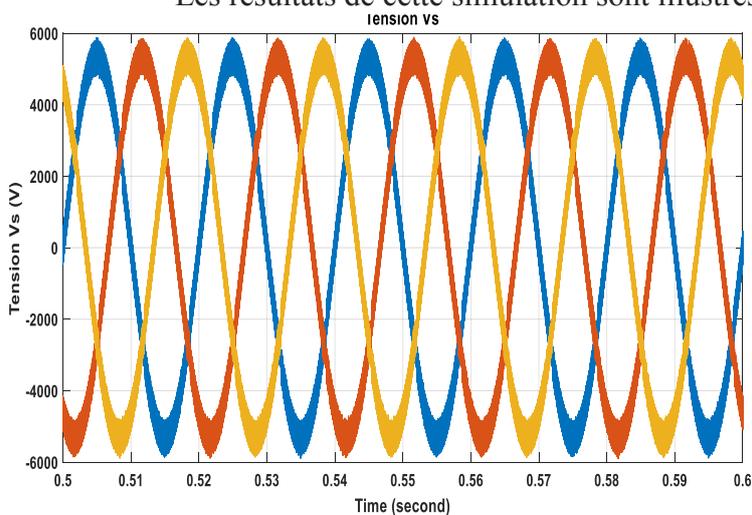
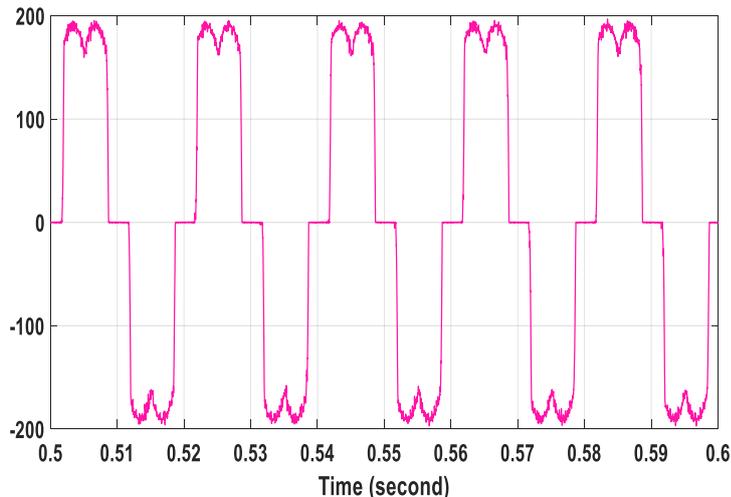


Fig. III. 4: Schéma général de la simulation de FAPMM cinq niveaux de type NPC

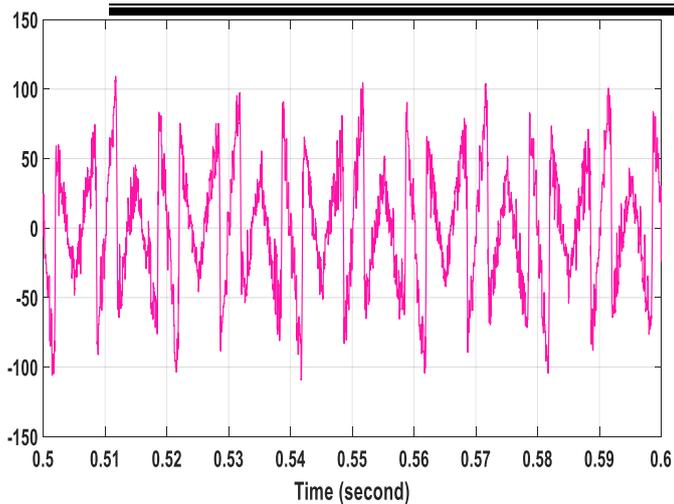
Les résultats de cette simulation sont illustrés par les figures suivantes :



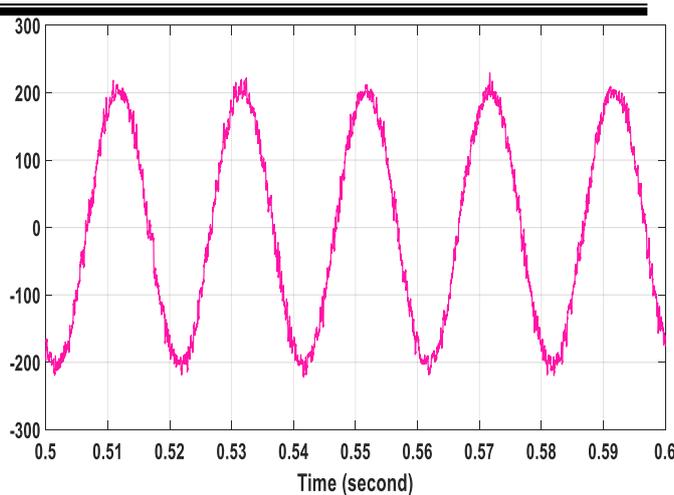
a) Tension de réseau



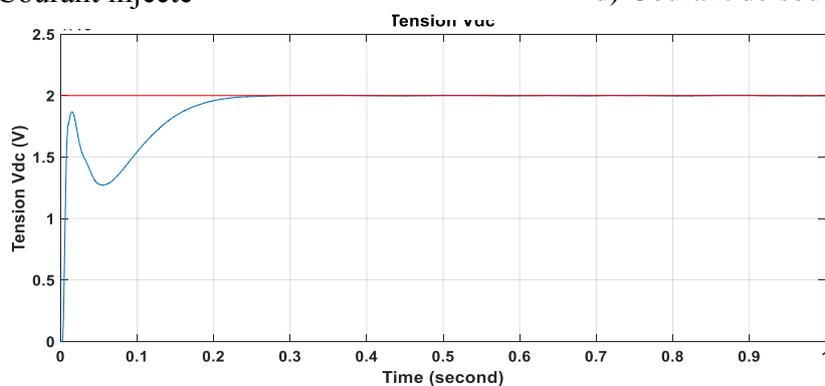
b) Courant de charge



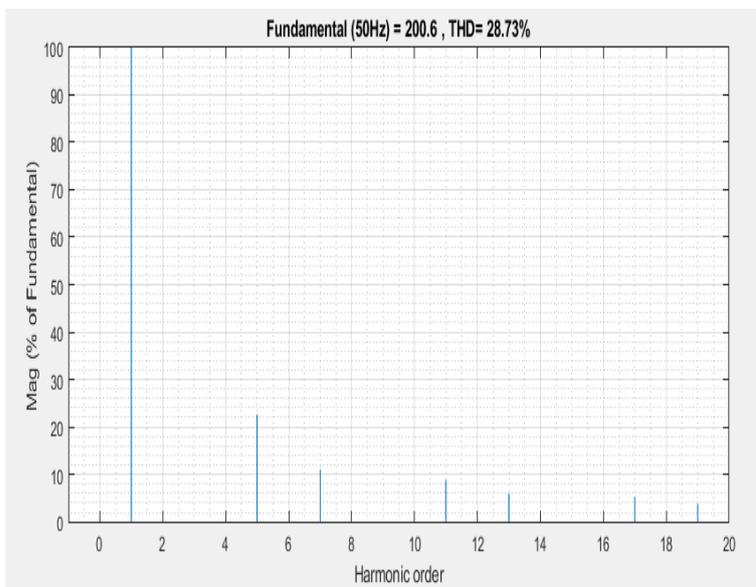
c) Courant injecté



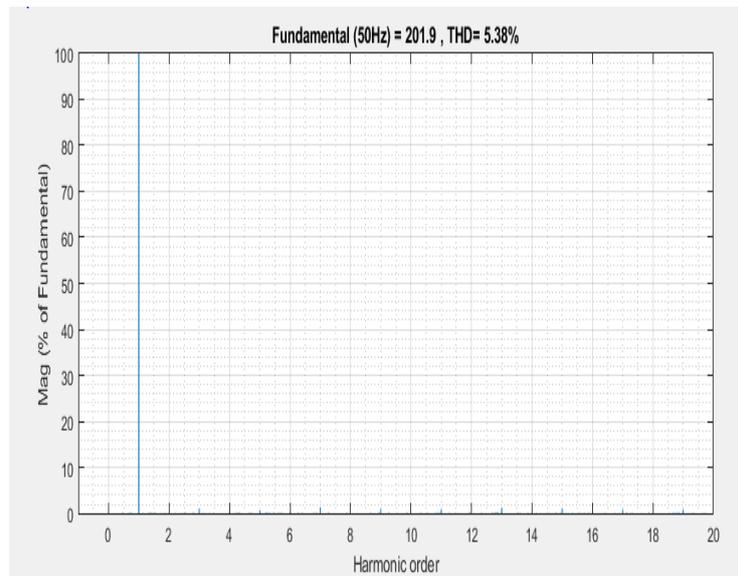
d) Courant de source



e) Tension aux bornes de condensateur



f) Analyse spectrale du courant de la charge
(THD=28.73%)



g) Analyse spectrale du courant de la source
(THD= 5.38%)

Fig. III. 5 : Résultats de simulation du FAPP 5 niveaux modulaire à commande indirecte par la méthode p-q

D'après les figures III.5, (a) illustre la tension de source qui a un signal parfaitement sinusoïdal. (b, c, d) montrent les courants (injectées, de charge et de source) pour une seule phase lors de l'utilisation du FAPMM 5 niveau de type NPC. (e) représente la tension aux bornes des condensateurs qui est constant. On remarque que la régulation de la tension Vdc fonctionne correctement. (f, g) indiquent les spectres harmoniques des courants avant et après filtrage. On remarque que la valeur du spectre harmonique est réduite après filtrage de 28.73% à 5,38 % pour le THD. Ces résultats sont également satisfaisants car le THD est presque égale à 5 %.

III.3.3 Simulation du FAPMM sept niveaux de type NPC

La figure suivante représente le filtre actif de puissance parallèle trois niveaux de type NPC modulaire. La simulation est plus détaillée en ANNEX C.

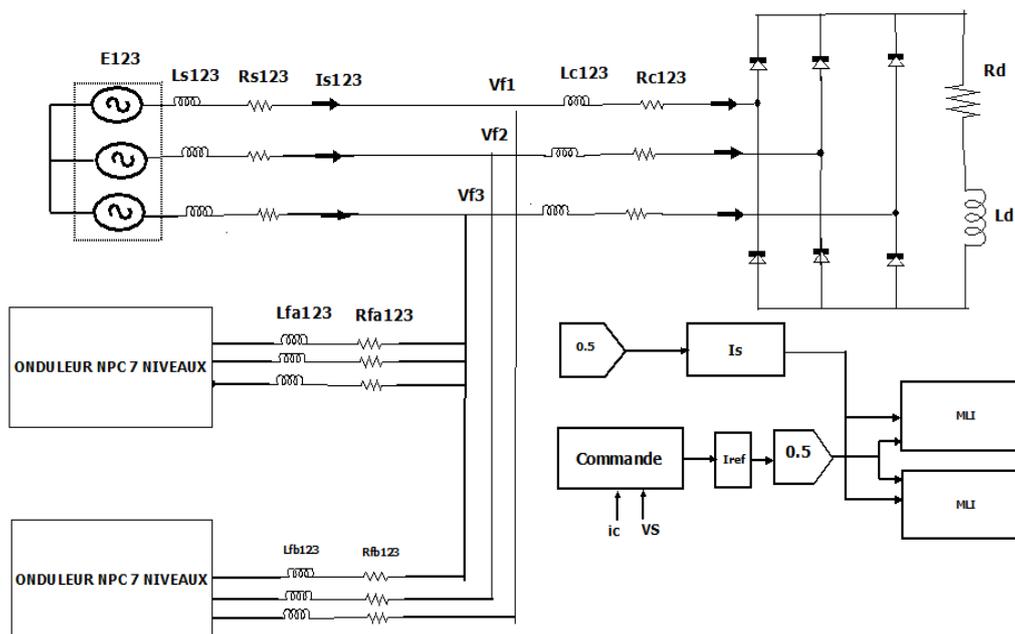
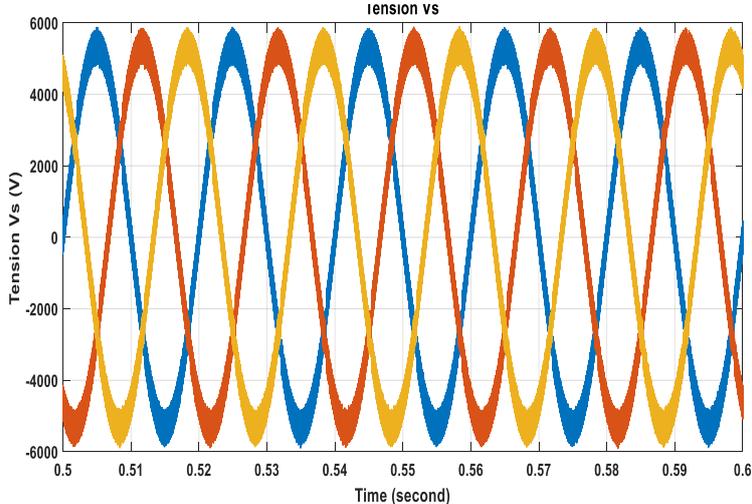
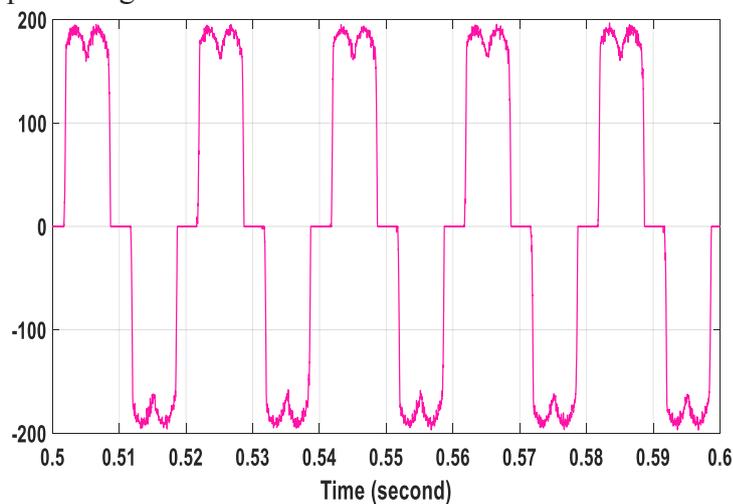


Fig. III. 6: Schéma général de la simulation de FAPMM sept niveaux de type NPC

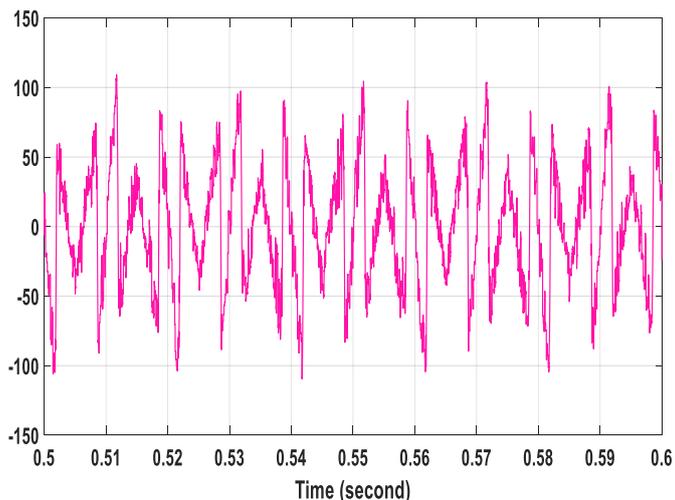
Les résultats de cette simulation sont illustrés par les figures suivantes :



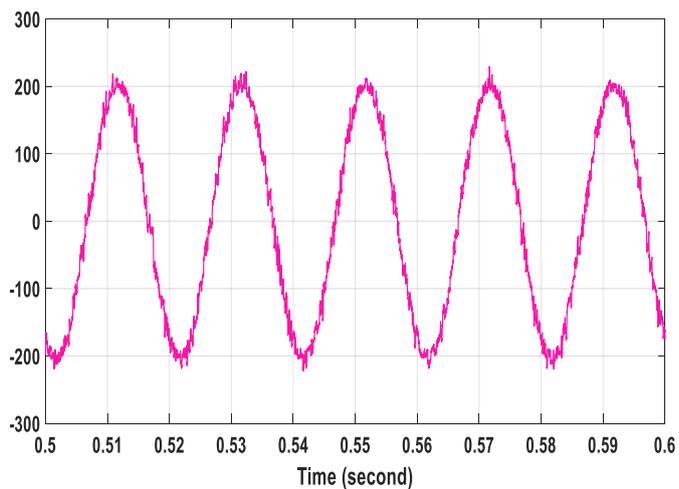
a) Tension de réseau



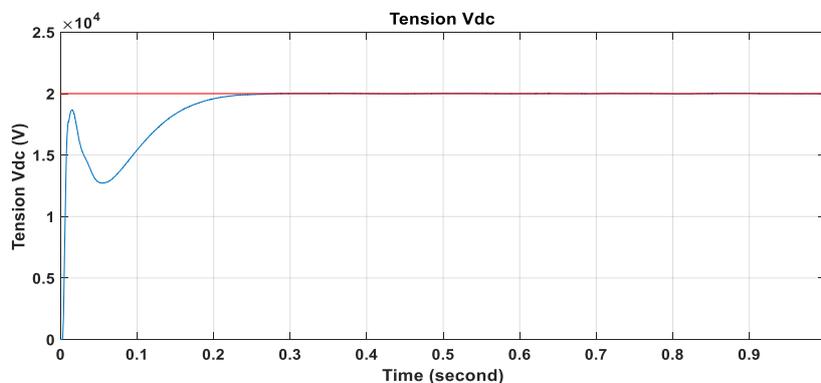
b) Courant de charge



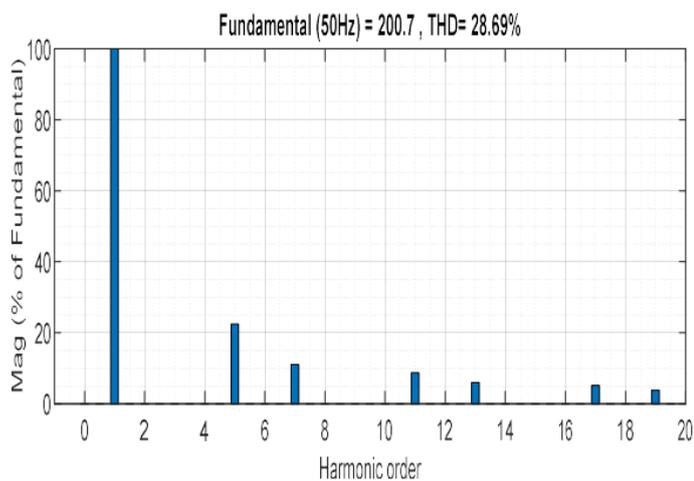
c) Courant injecté



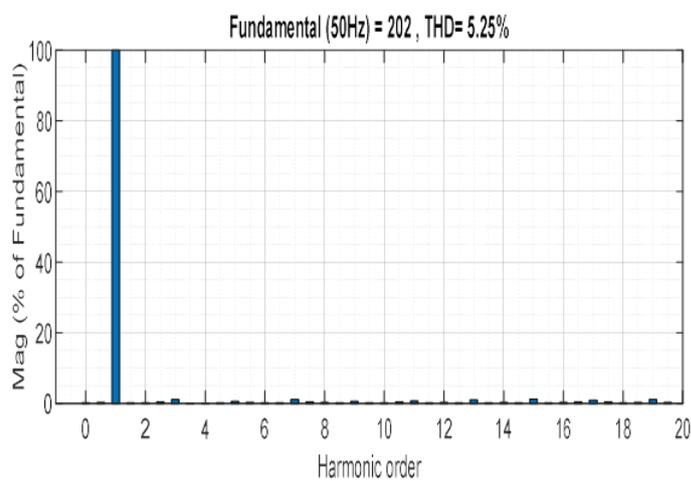
d) Courant de source



e) Tension aux bornes de condensateur



f) Analyse spectrale du courant de la charge (THD=28.69%)



g) Analyse spectrale du courant de la source (THD= 5.25%)

Fig. III. 7: Résultats de simulation du FAPP 7 niveaux modulaire à commande indirecte par la méthode p-q

D'après les figures III.7, (a) illustre la tension de source qui a un signal parfaitement sinusoïdal. (b, c, d) montrent les courants (injectés, de charge et de source) pour une seule phase lors de l'utilisation du FAPMM 5 niveau de type NPC. (e) représente la tension aux bornes des condensateurs qui est constant. On remarque que la régulation de la tension Vdc fonctionne correctement. (f, g) indiquent les spectres harmoniques des courants avant et après filtrage. On remarque que la valeur du spectre harmonique est réduite après filtrage de 28.69% à 5,25% pour le THD. Ces résultats sont également satisfaisants car le THD est presque égale à 5 %.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons réussi à simuler les filtres actifs de puissance modulaire multi-niveaux, afin de compenser les harmoniques de courant lorsque ces derniers sont connectés à un réseau électrique moyenne tension et dont des charges de forte consommation sont également connectées. Nous avons fait la simulation de ces FAPMM de type NPC à trois niveaux, puis à cinq niveaux et enfin à sept niveaux. Les résultats obtenus ont été satisfaisant parce que le THD obtenus après filtrage était aux alentours de 5 % et par conséquent les harmoniques de courants ont été éliminer.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire avait pour objectif d'étudier les filtres actifs de puissance modulaire multi-niveaux commandé par MLI qui n'a jamais été étudié avant.

Nous avons divisé notre travail en trois chapitres. Pour le premier chapitre, nous avons vu le principe de fonctionnement des filtres de puissance actifs de puissance et nous avons simulé deux types de topologies qui sont le filtre actif de puissance à trois bras et le filtre actif de puissance à deux bras à un point milieu. Nous avons utilisé deux commandes pour ces deux structures. La commande PQ et la commande dq. Les résultats de simulations obtenus nous ont montré que les deux filtres actifs de puissance parallèle éliminer très bien ces harmoniques et donné un THD inférieur à 5 %.

Dans le second chapitre, nous avons commencé par l'étude des filtres actifs de puissance modulaires pour compenser les harmoniques de courant consommés par les charges non linéaires consommant un courant élevé. Nous simulé deux topologies, à savoir le filtre actif de puissance modulaire à trois bras et le filtre actif de puissance modulaire à deux bras à point milieu. Nous avons ensuite fait l'étude des filtres actifs de puissance multi-niveaux afin de compenser les réseaux électriques de tension élevée. Nous avons utilisé comme topologie le NPC de trois niveaux, cinq niveaux et sept niveaux. Les résultats de simulation que ce soir pour le modulaire ou le multi-niveaux nous ont donné de très bon résultats, avec un THD également inférieur à 5 %.

Dans le dernier chapitre, nous avons étudié les filtres actifs de puissance modulaire multi-niveaux. Les résultats de simulations nous ont montré que ce type de topologie est faisable et que les résultats de simulation donnés des THD inférieur à 5 %. Ce qui est une valeur acceptable.

Références bibliographiques

- [1] **Badache Zohir & Saci Abdeslam.** « Etude par simulation d'un filtre actif parallèle », mémoire d'ingénieur, Université de Msila, 2006.
- [2] **Özkaya Hasan.** « Parallel active filter design, control, and implementation m.s», Department of Electrical and Electronics Engineering Supervisor: Asst. Prof. Dr. Ahmet M. Hava June 2007
- [3] **Mammar Mohamed Meroune & Zidane Ayoub.** «Study and simulation of a modular active power filter», mémoire de Master. Université de Tlemcen 2022
- [4] **Yahiaouia Ahmed Lamine.** « Détection de défaut des convertisseurs de puissance : Application au filtre actif parallèle », mémoire de Master. Université de M'sila, 2014.
- [5] **M.C. Benhabib.** « Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèle à structure tension », Thèse de doctorat en génie électrique le 17 décembre 2004.
- [6] **S. MOUTTOU.** "Nouvelles Approches de Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Source De Courant", Mémoire présenté à l'université du Québec à Trois-Rivières comme exigence partielle de la maîtrise en génie électrique, Université du Québec à Trois-Rivières, 2002.
- [7] **Abbes Mohamed Taha el amine ET Ghabach Chemseddine.** «Étude comparative entre les deux techniques d'identification des harmoniques pq et dq d'un filtre actif parallèle », mémoire de Master. Université de ANNABA, 2020.
- [8] **Mohamed Choukri Benhabib & Shahrokh Saadate.** «A new robust experimentally validated phase locked loop for power electronic control »,EPE Journal, Volume 15, 2005 - Issue 3.
- [9] **SANJEEV BALACHANDRAN, A. NARENDRA BABU, SUNIL HANSDAH.** «Study and analysis of three phase multilevel inverter », Bachelor of Technology in Electrical Engineering. National Institute of Technology Rourkela 2007.
- [10] **BRIGHEN HAROUNE HALAIMIA SAFOUANE.** « Etude et analyse de la commande des onduleurs multi-niveaux par MLI sinusoïdal », mémoire de Master. Université de Tebessa 2016.
- [11] **Mohammed Souleymane GUERBOUZ, Ismail SALAHI.** « Etude, Modélisation et commande d'un onduleur à trois niveaux à structure NPC », mémoire de Master. Université d'Adrar 2021.
- [12] **BELMAHI Amine, AHMED BELKACEM Djamel.** « Étude et simulation d'un filtre actif de puissance parallèle multi-niveaux à commande indirecte », mémoire de Master. Université de Tlemcen 2022.
- [13] <https://imperix.com/doc/implementation/neutral-point-clamped-inverter> lus le 23/03/23.
- [14] **DELLALOU KHEIREDDINE.** « Stratégies De Commande Des Onduleurs Multiniveaux (MLI ST et MLI Vectorielle) », mémoire de Master. Université de Annaba 2019.

Références bibliographiques

- [15] **TOUMI Mohamed.** «Application des onduleurs multiniveaux dans les systèmes de chauffage par induction. Analyse, Modélisation et Commande », mémoire de Master. Université de Batna 2012.
- [16] **H. AKAGI, Y. KANAZAWA and A. NABAE,** « Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits ». Proceeding International Power Electronics Conference. Tokyo, Japan, pp. 1375-1386, (1983).
- [17] **Bhattacharya 1991.**
- [18] **Feel-soon Kang, Yeun-Ho Joung.** «A cascaded multilevel inverter using bidirectional H-bridge Modules». Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems vol. 1, no. 4, pp. 448~456, 2012.
- [19] **D. A. Ruiz-Caballero, R. M. Ramos-Astudillo, S. A. Mussa, and M. L. Heldwein.** «Symmetrical hybrid multilevel dc–ac converters with reduced number of insulated dc supplies». IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, no. 7, pp. 2307-2314, July 2010.
- [20] **S, KARIMI.** « Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage "FPGA in the Loop". Application au filtre actif parallèle ». Thèse de Docteur l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2009.
- [21] **BAKHI Hamza.** « Commande d'un filtre actif triphasé shunt par logique floue » mémoire de Master. Université de M'sila, 2015.
- [22] **Mohamed Muftah Abdusalam.** « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales », Thèse de Doctorat, Univ. H. Poincaré, Nancy-I, Mai 2008.
- [23] **N. Bruyant.** « Etude et commande généralisée de filtres actifs parallèles, compensation global ou sélective des harmoniques, régime équilibré ou déséquilibré ». Thèse de doctorat de l'université de Nantes, France, (1999).
- [24] **BENABDERRAHMANE Houcine et RACHEDI Houcine.** « Étude et simulation d'un filtre actif de puissance parallèle Multi-niveau » mémoire de Master. Université de Tlemcen 2019.
- [25] **Nekkar Djamel.** « Contribution à l'étude des Stratégies de Commande des Filtres Actifs Triphasés », Mémoire de Magister, Université de Souk-Ahras, 2014.
- [26] **Moussa Oussama.** « Etude des harmoniques et techniques de commandes du filtre actif » mémoire de Magister Université de Batna 2, 2016.
- [27] **Fellague Chebra Abderraouf Fellag amine.** « Étude et simulation d'un filtre actif de puissance parallèle Multi-niveau » mémoire de Master. Université de Blida 2018.

ANNEXE

ANNEXE A

Simulation d'un filtre actif de puissance parallèle

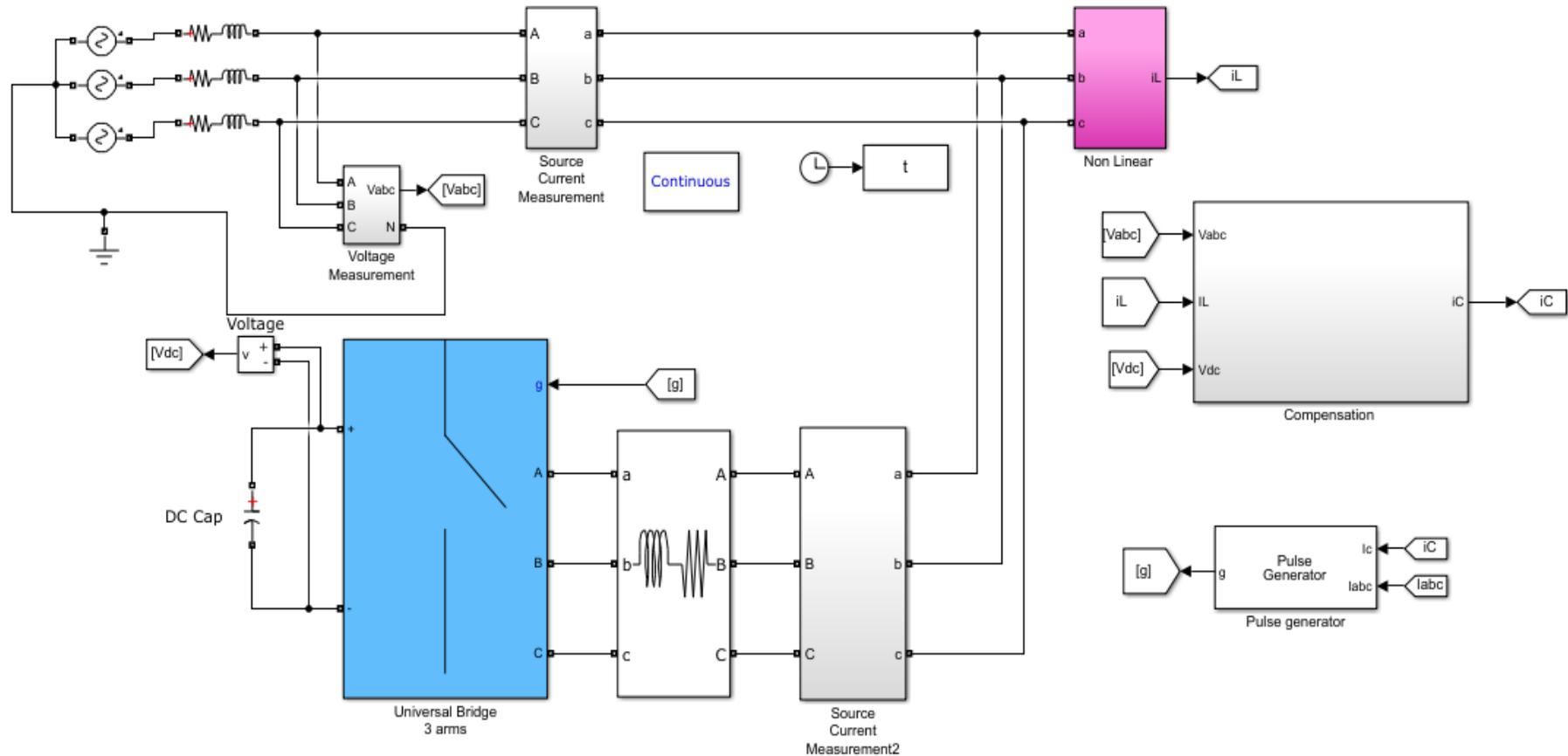
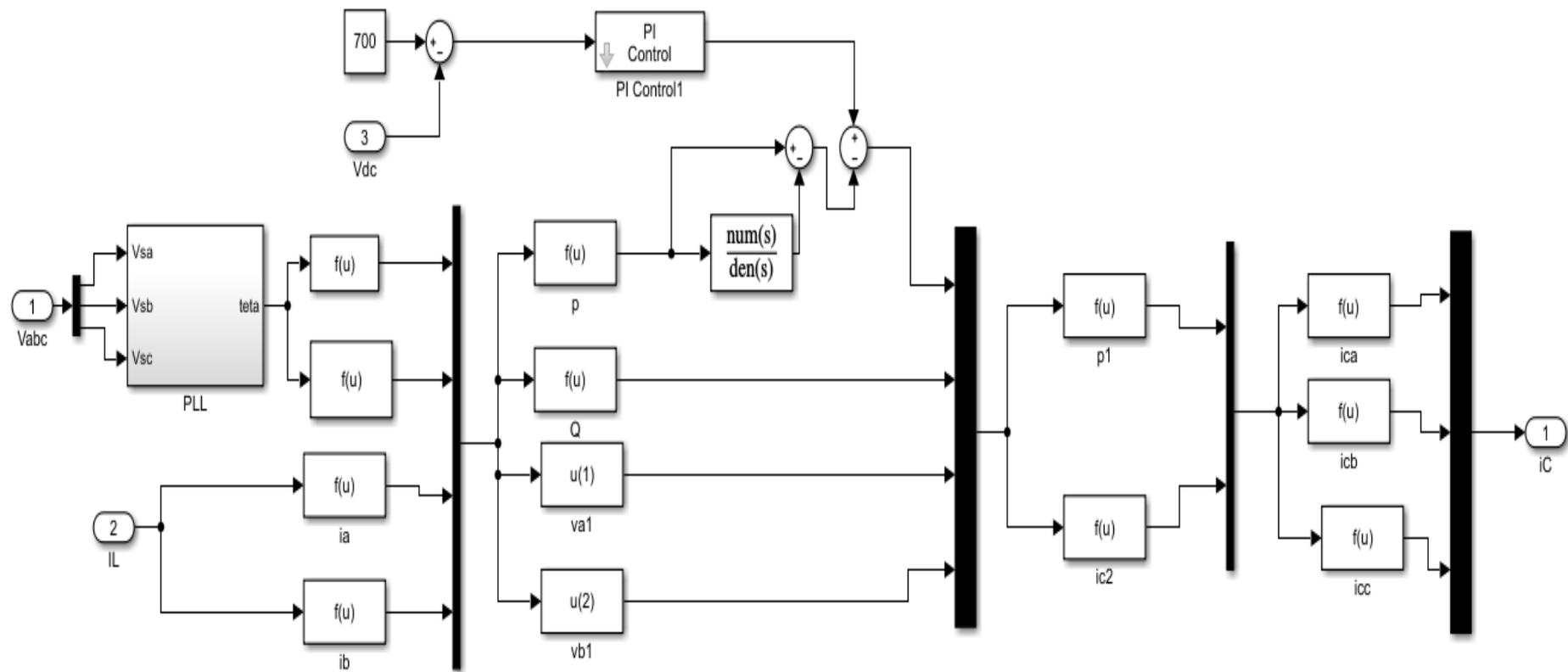


Fig.A. 1: Schéma générale de la simulation de FAPP par la commande directe par MLI à base de la méthode d-q.

Commande directe par la méthode d-q



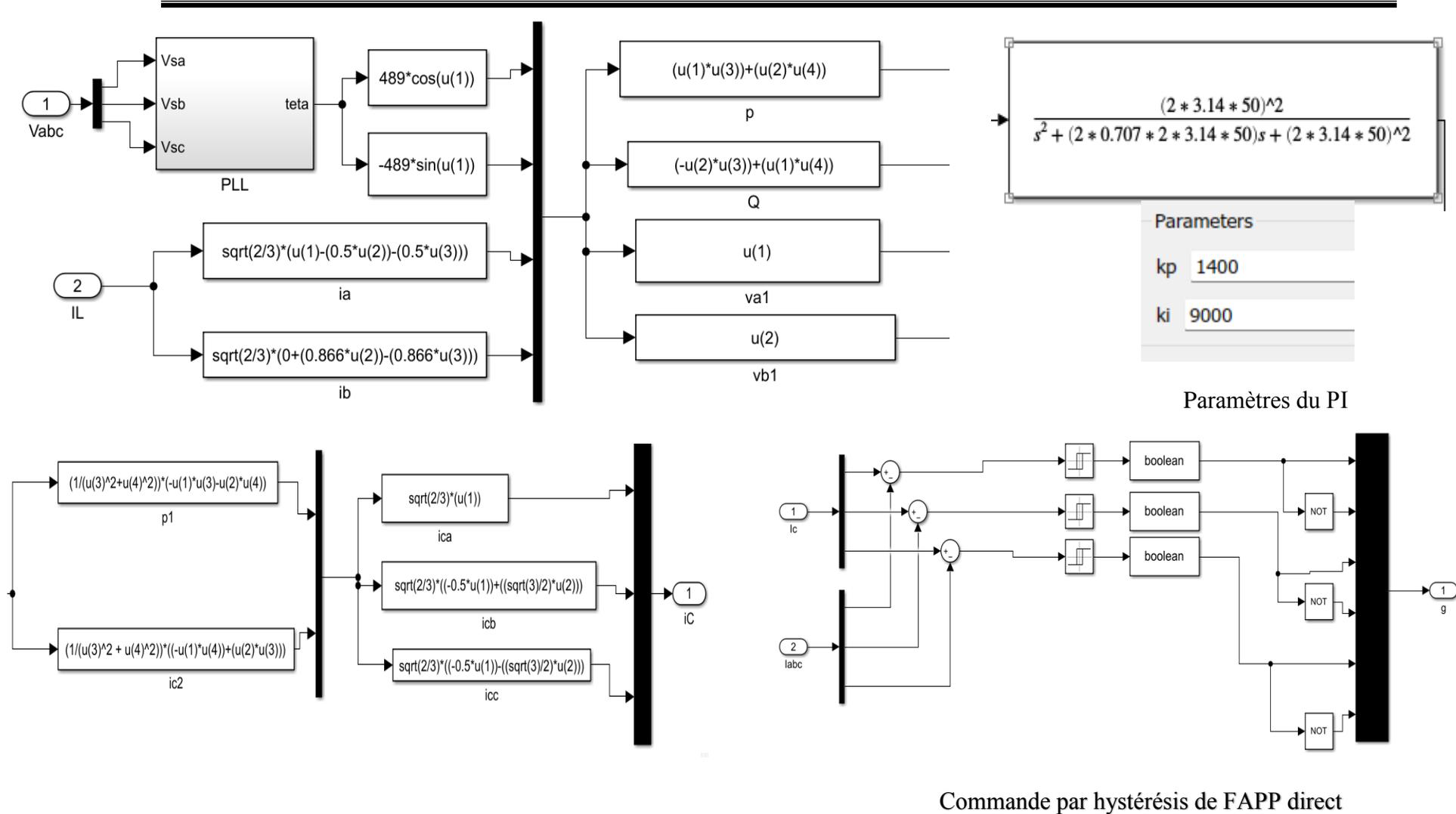
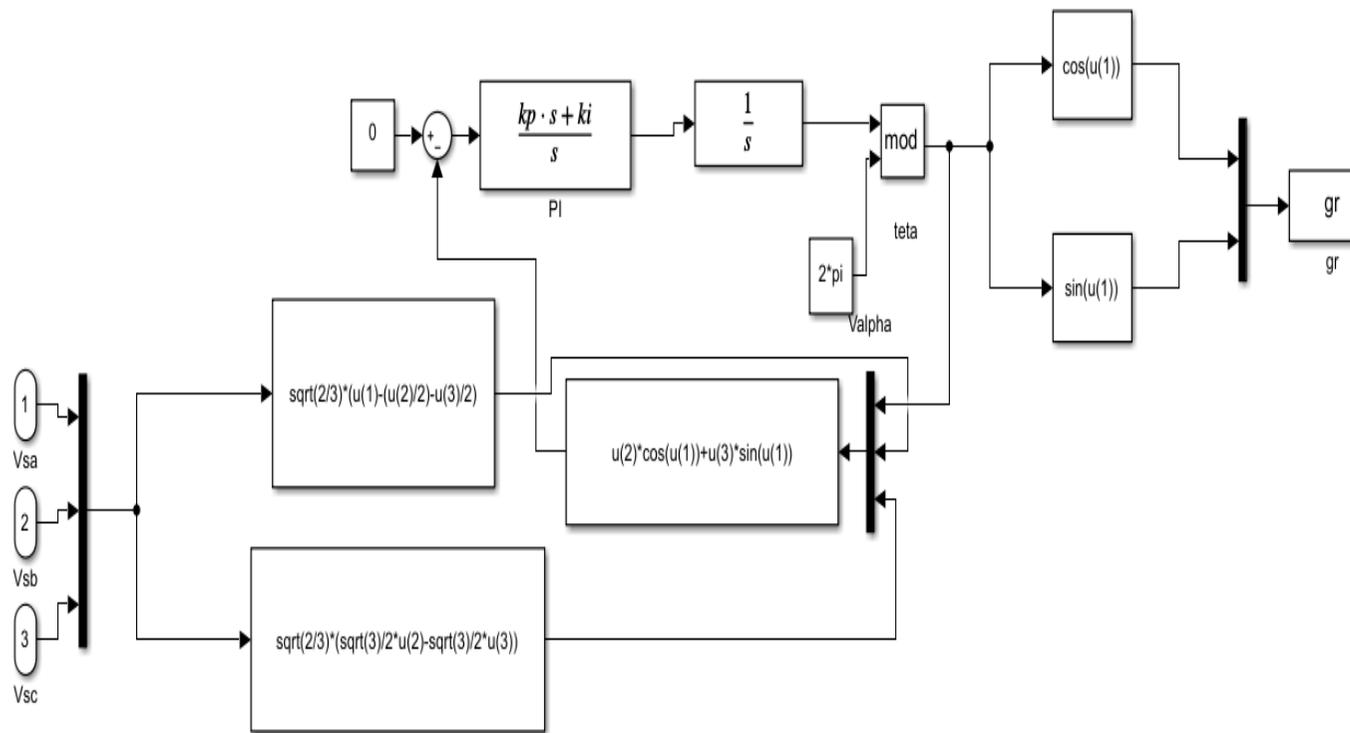


Fig.A. 2: Schéma de la commande direct a base méthode d-q



Model initialization function:

```

tm=1e-4;
wn=3/tm;
pci=sqrt(2)/2;
ki=wn*wn/sqrt(3)/230
kp=2*pci*wn/sqrt(3)/230

```

Paramètres du PLL

Fig.A. 3: Schéma de la PLL

Simulation FAPP de deux onduleurs à deux bras avec condensateur à point milieu

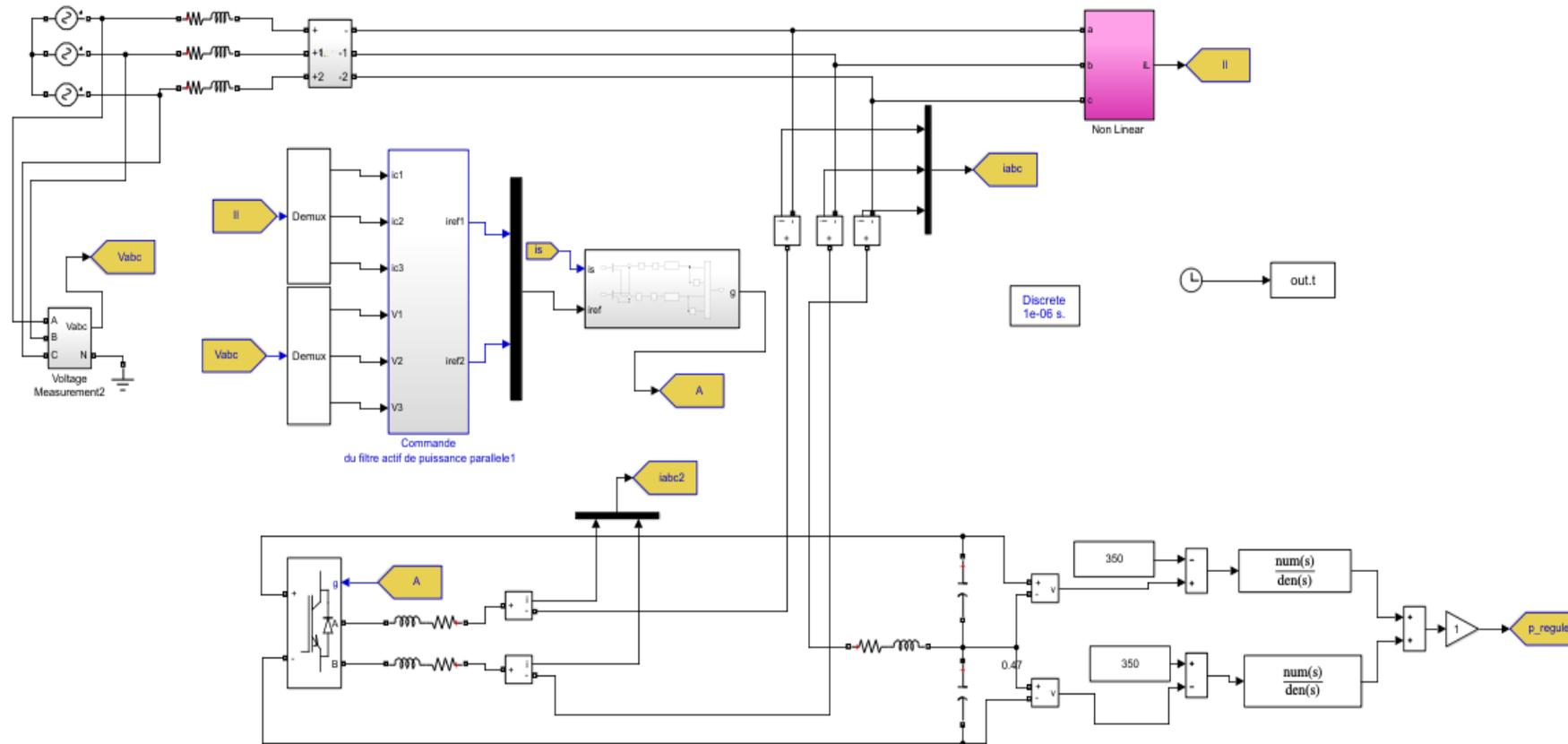
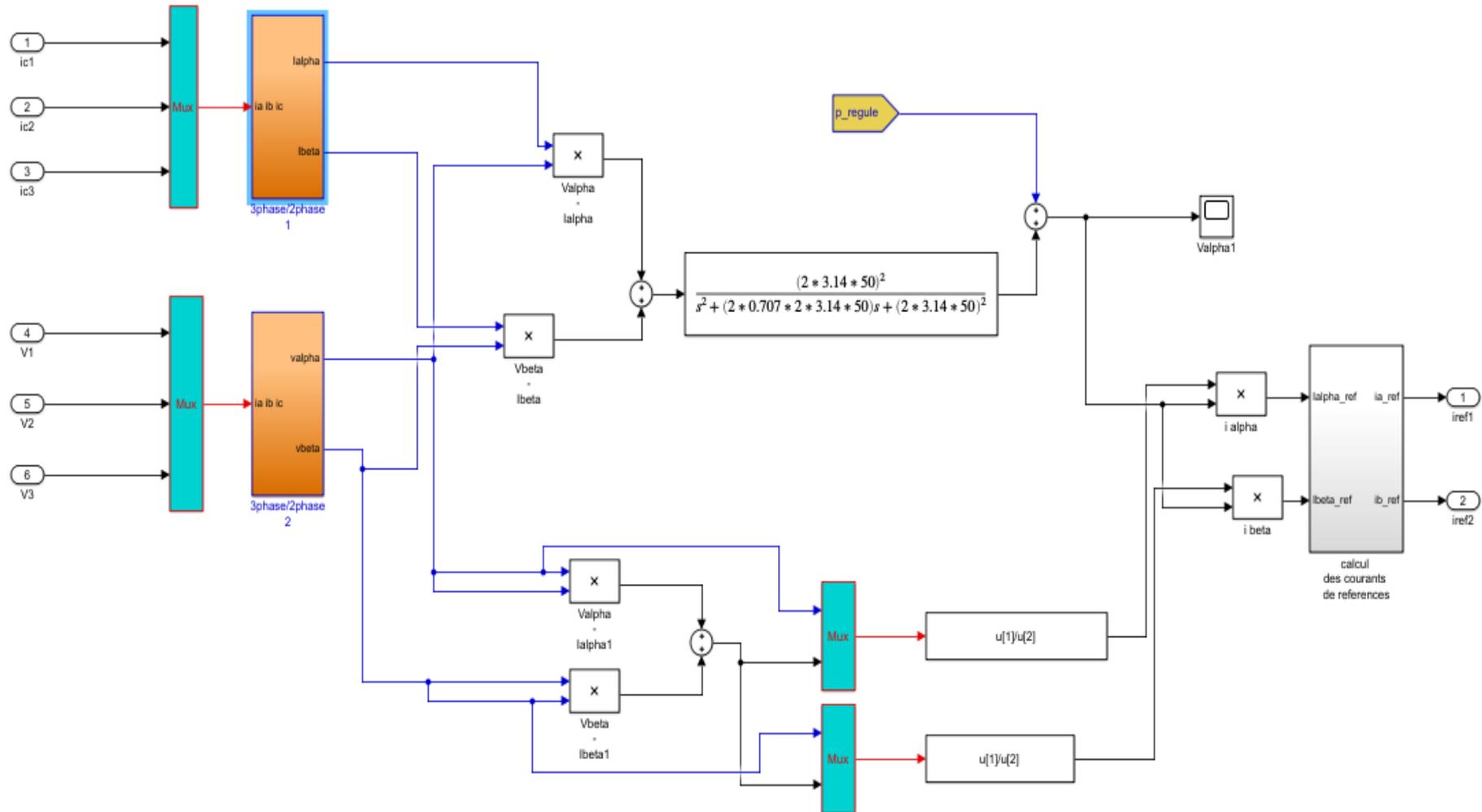
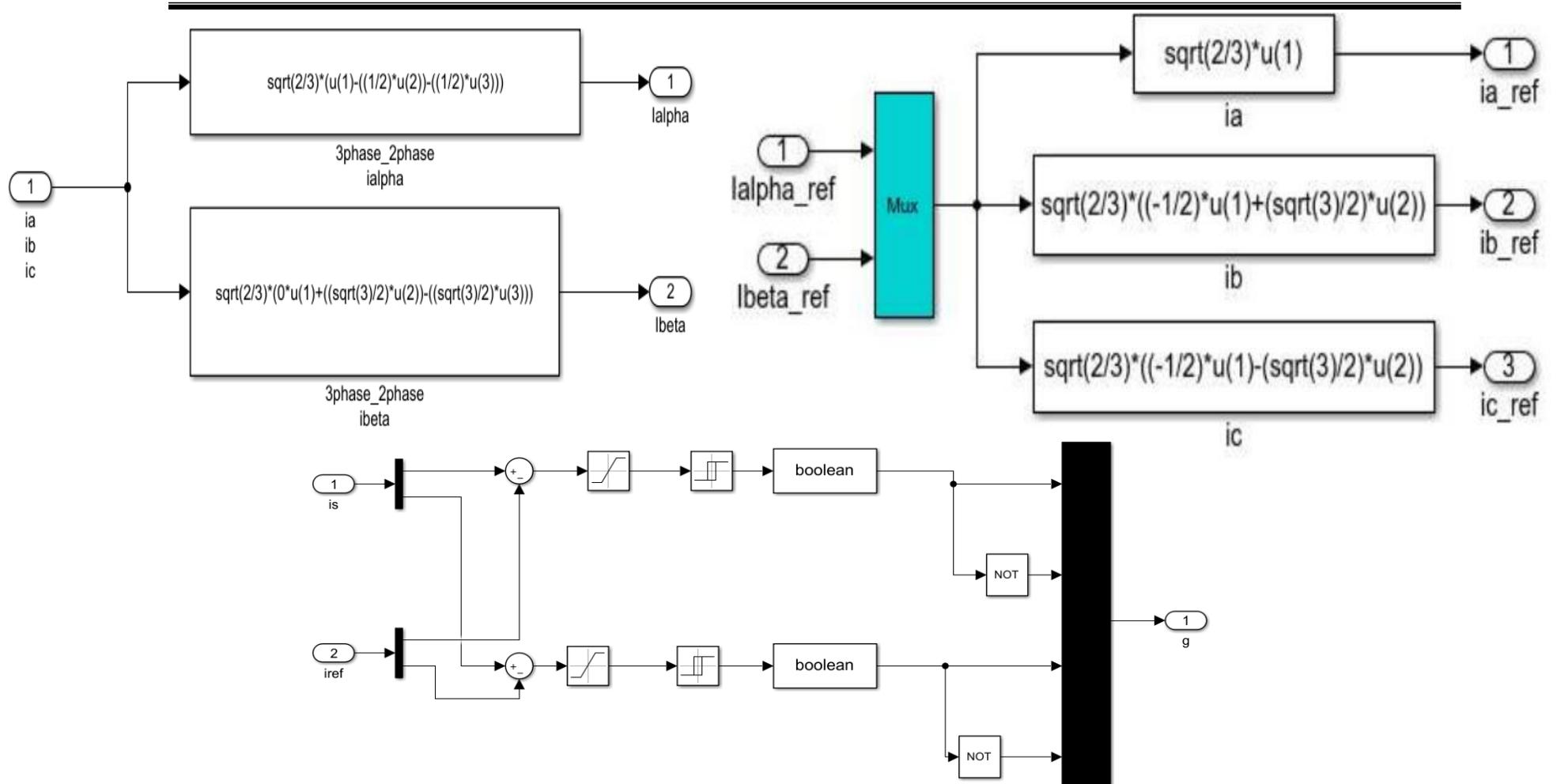


Fig.A. 4: : Schéma générale de la simulation de FAPP avec onduleur à condensateur point milieu connecté au système d'alimentation

Commande indirecte par la méthode p-q :





Commande par hystérésis du FAPP 2 bras

Fig.A. 5: Schéma général de la commande indirecte par la méthode (p-q)

ANNEXE B

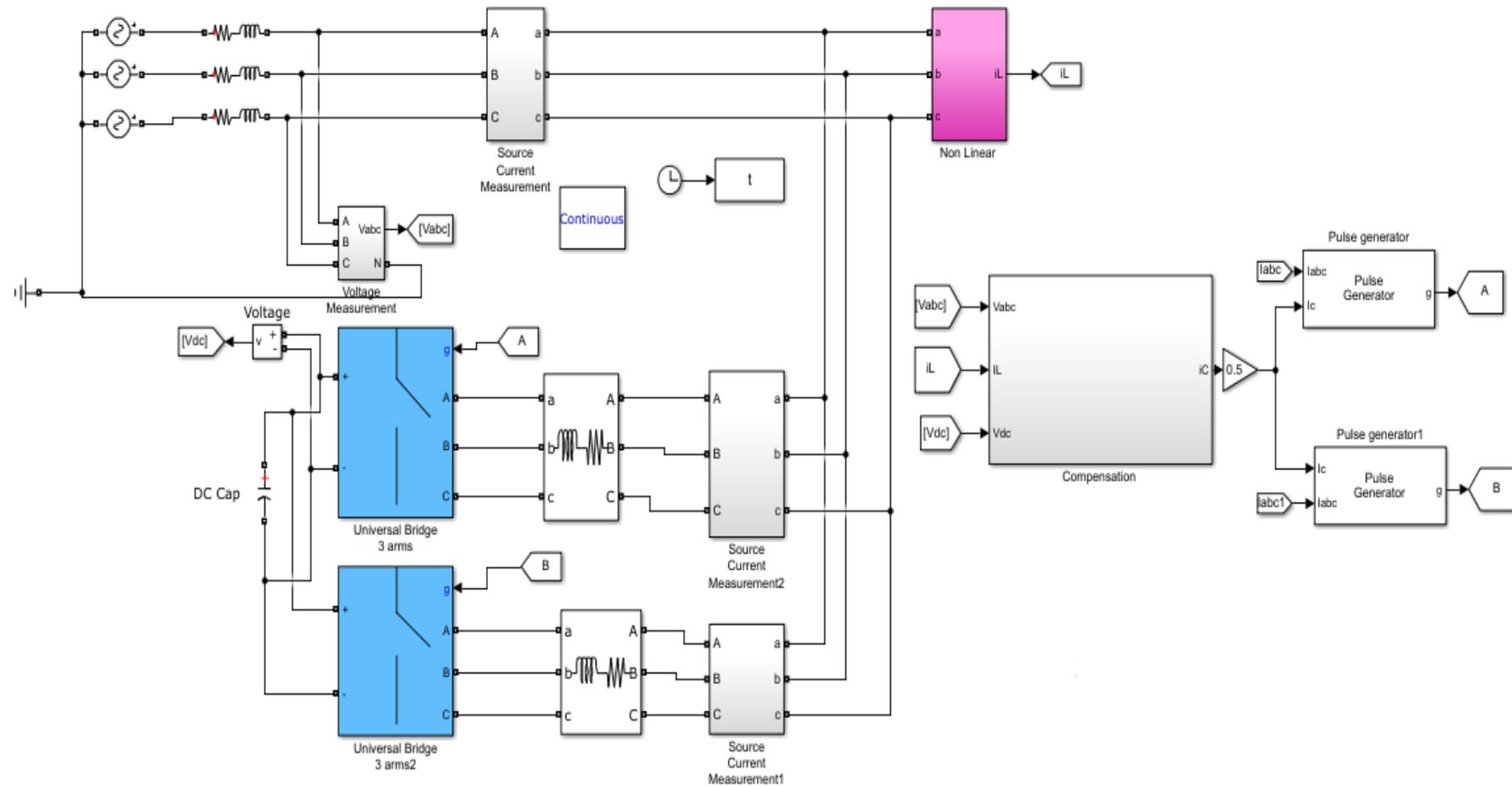


Fig.B. 1: Schéma générale de la simulation du FAPP modulaire à commande directe par MLI basé sur la méthode directe d-q

Simulation FAPP modulaire de deux onduleurs à deux bras avec condensateur à point milieu

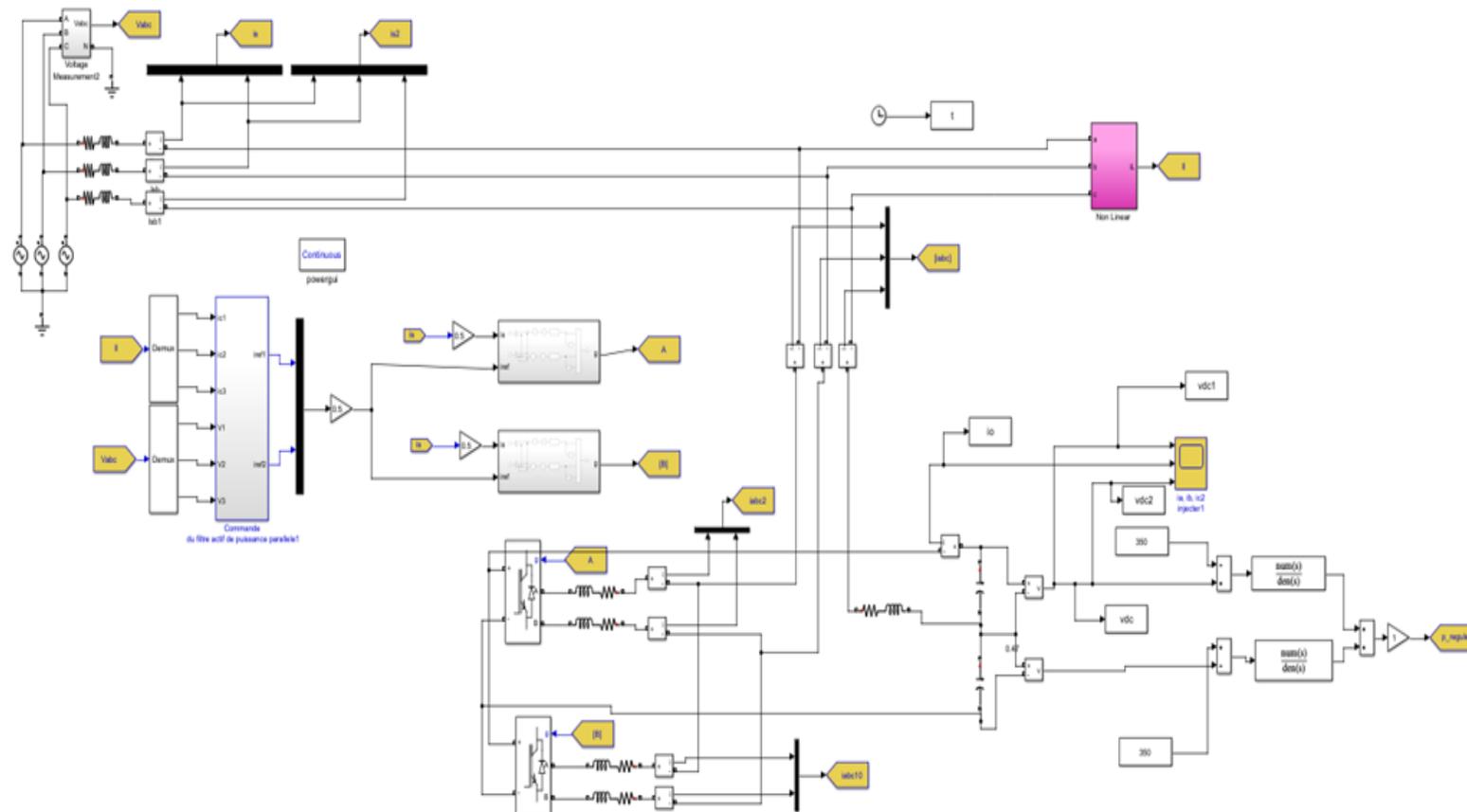


Fig.B. 2: Schéma de simulation de FAPP modulaire à deux bras avec un point milieu condensateur

Simulation du FAPP trois niveaux de type NPC :

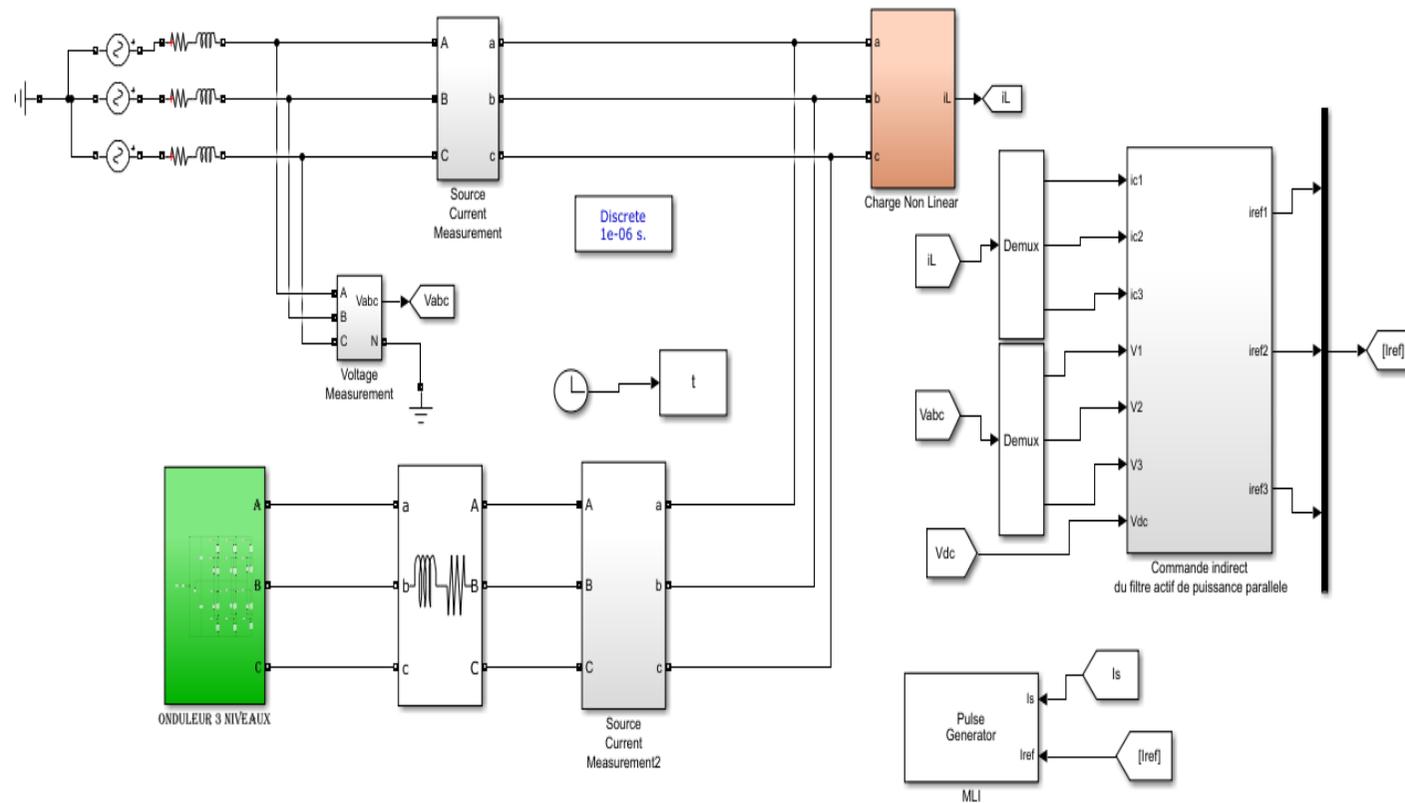


Fig.B. 3: Schéma général de la simulation de l'onduleur trois niveaux de type NPC

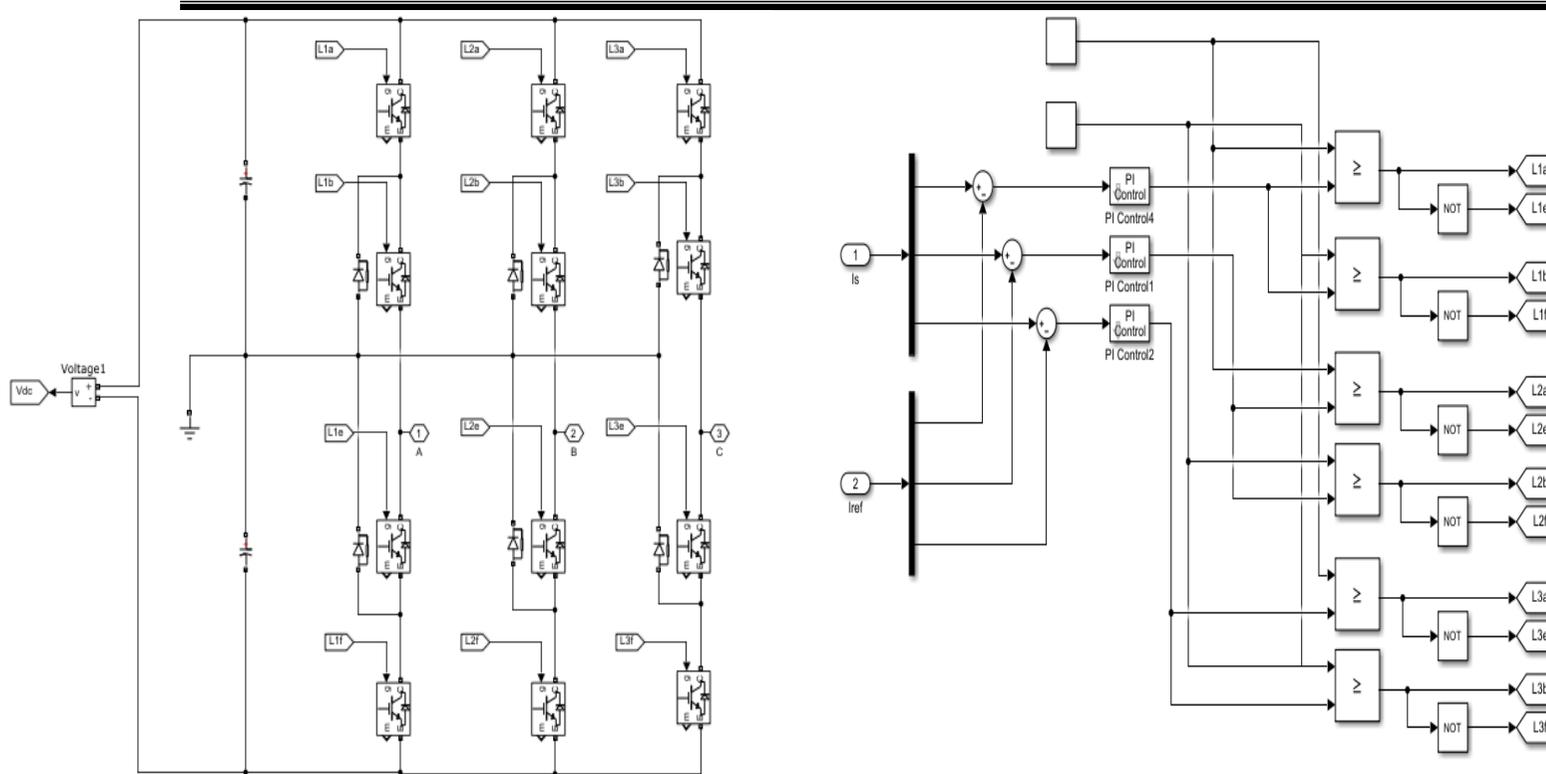


Fig.B. 4: Onduleur trois niveaux à structure NPC et sa commande MLI

kp
-1

ki
-100

$$\frac{0.0001981z + 0.0001963}{z^2 - 1.972z + 0.9721}$$

Parameters

Time values:
[0 2*T/8 4*T/8 6*T/8 T]

Output values:
[0 1 0 -1 0]

FAPP cinq niveaux de type NPC :

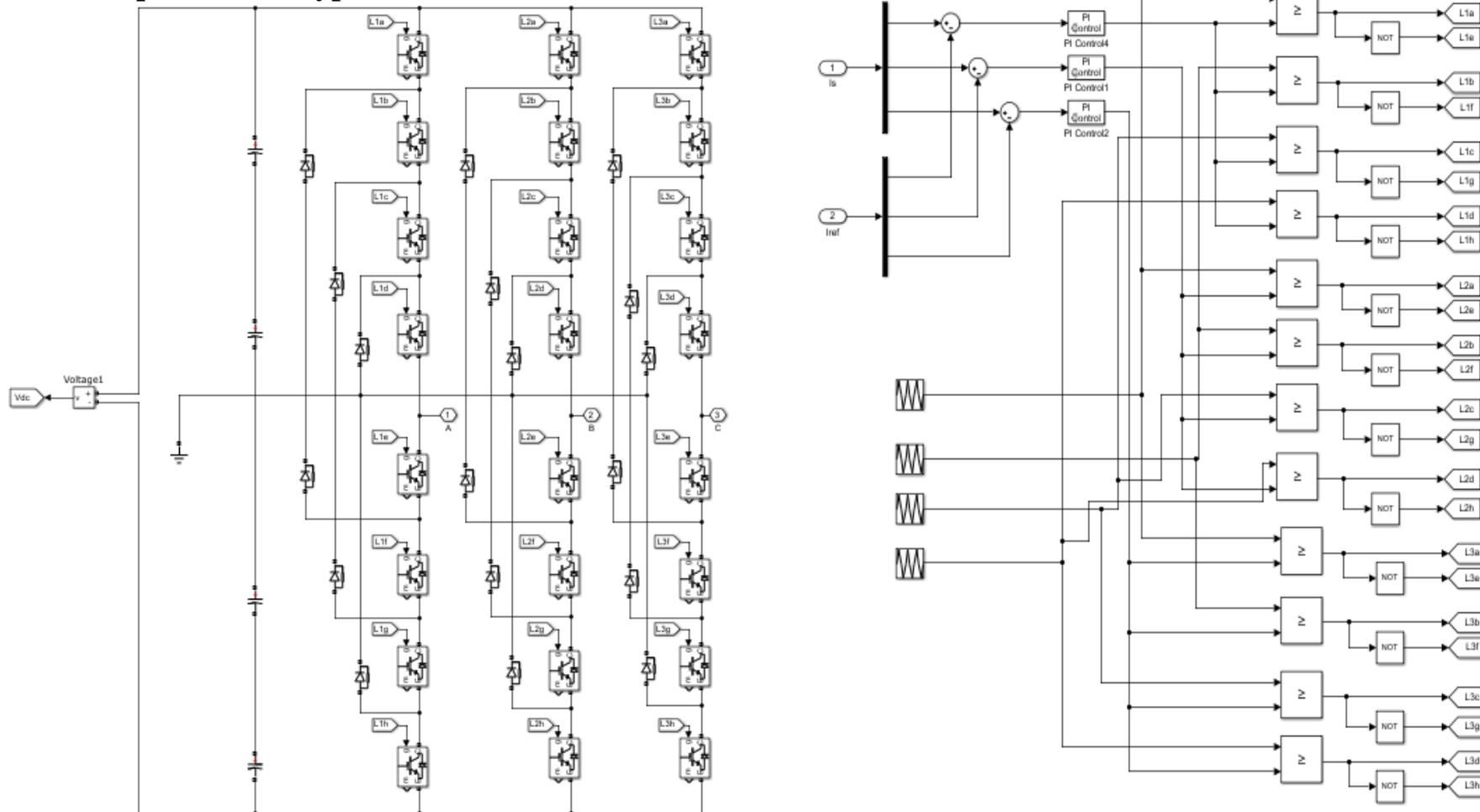


Fig.B. 5: Onduleur cinq niveaux à structure NPC et sa commande MLI

Parameters

kp
-1

ki
-100

Paramètres du PI

Parameters

Time values:
[0 2*T/8 4*T/8 6*T/8 T]

Output values:
[0 1 0 -1 0]

Paramètres du Repeating sequence

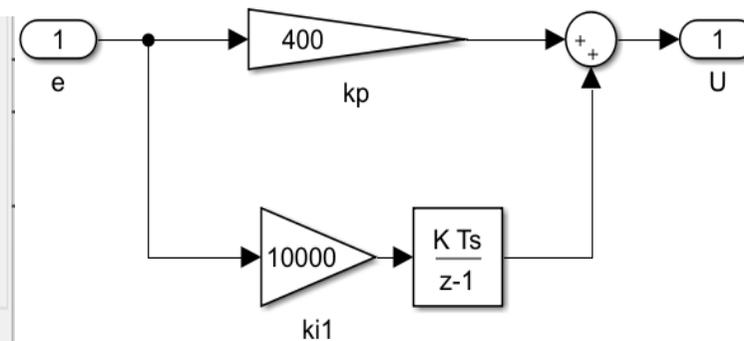
ET :

$T=1/1e4;$
 $fsw=10^4;$

FAPP sept niveaux de type NPC

kp
-0.1

ki
-10



Paramètres du PI

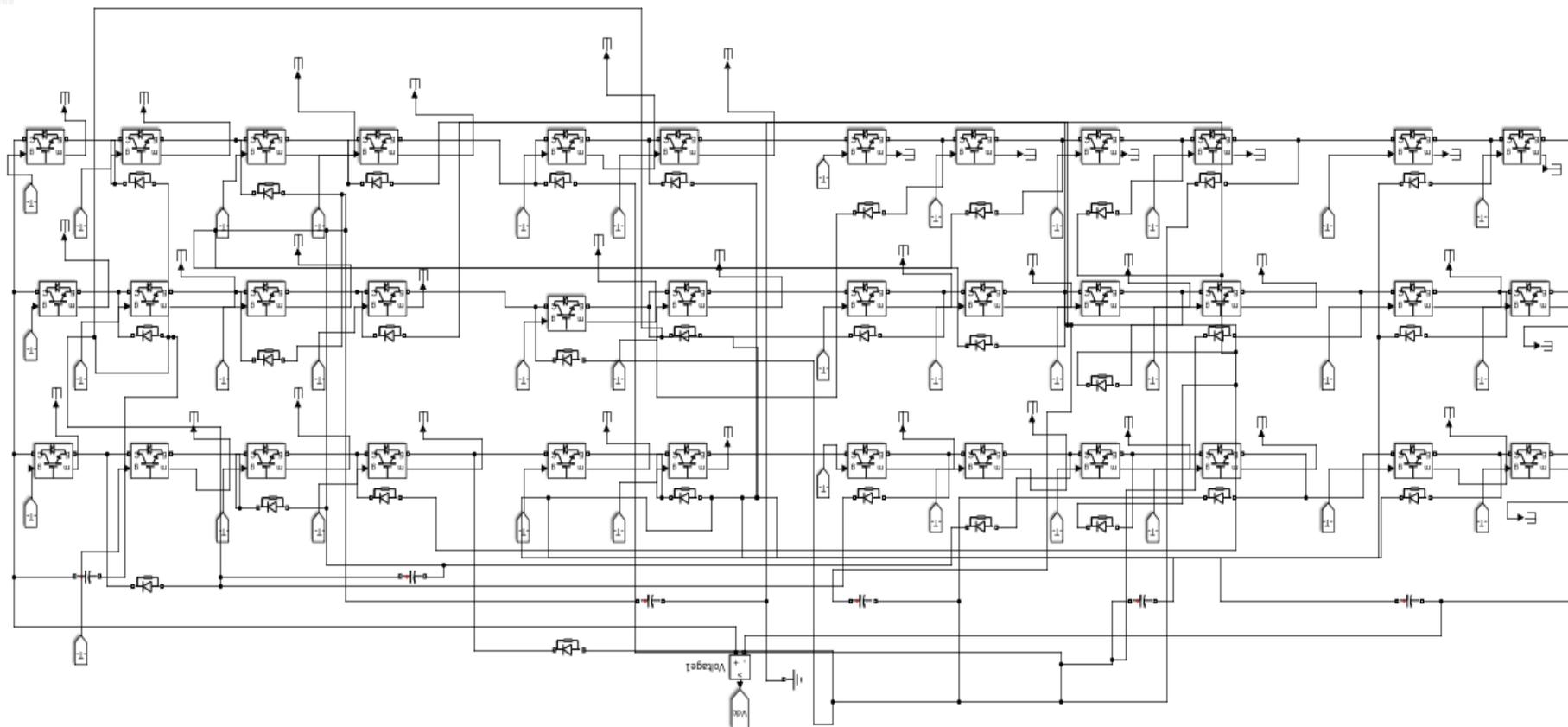


Fig.B. 6 : Onduleur sept niveaux à structure NPC

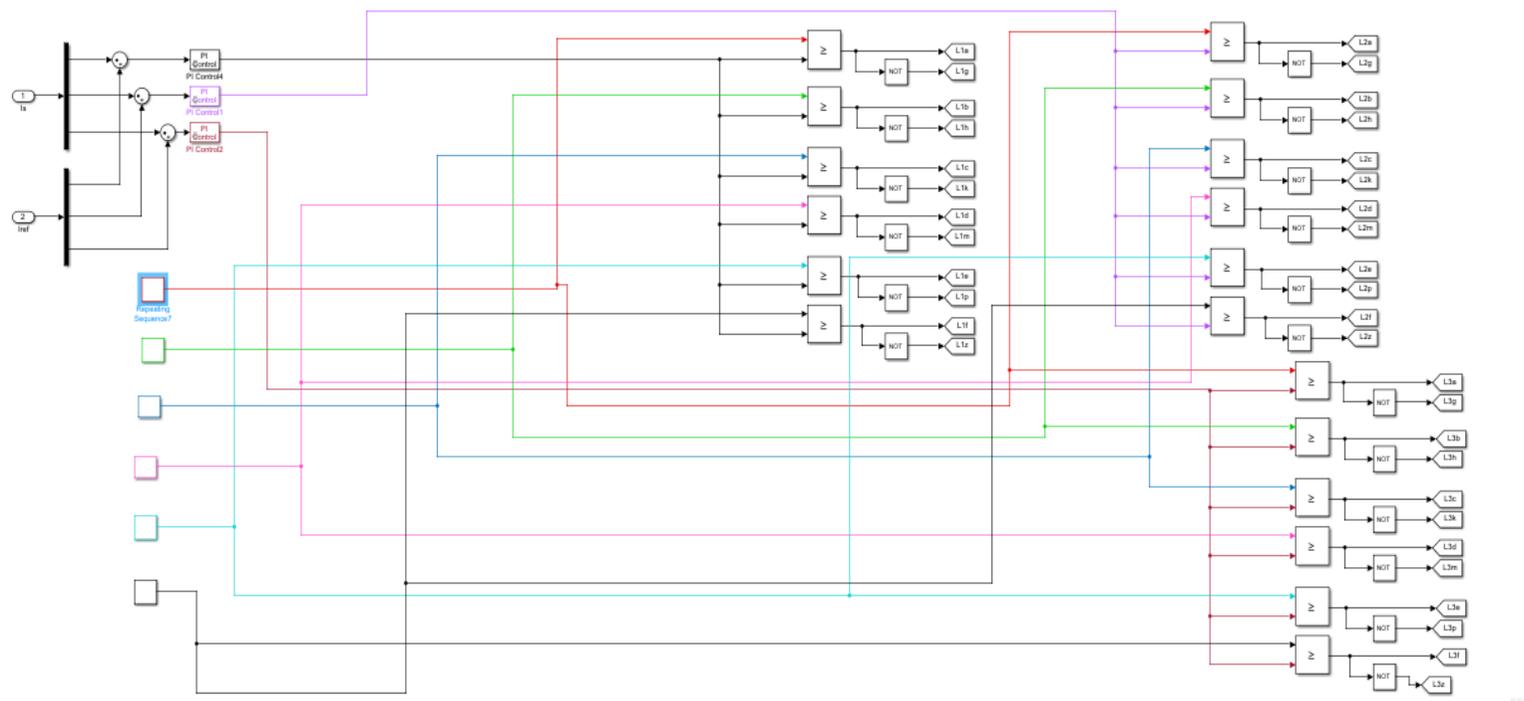


Fig.B. 7: Commande MLI de NPC 7 niveaux

Les paramètres du bloc « Repeating sequence » :

Il y a 6 bloc de Repeating sequence sont classés par ordre.

Parameters

Time values:

Output values:

ANNEXE C

Simulation du FAPP trois niveaux de type NPC modulaire

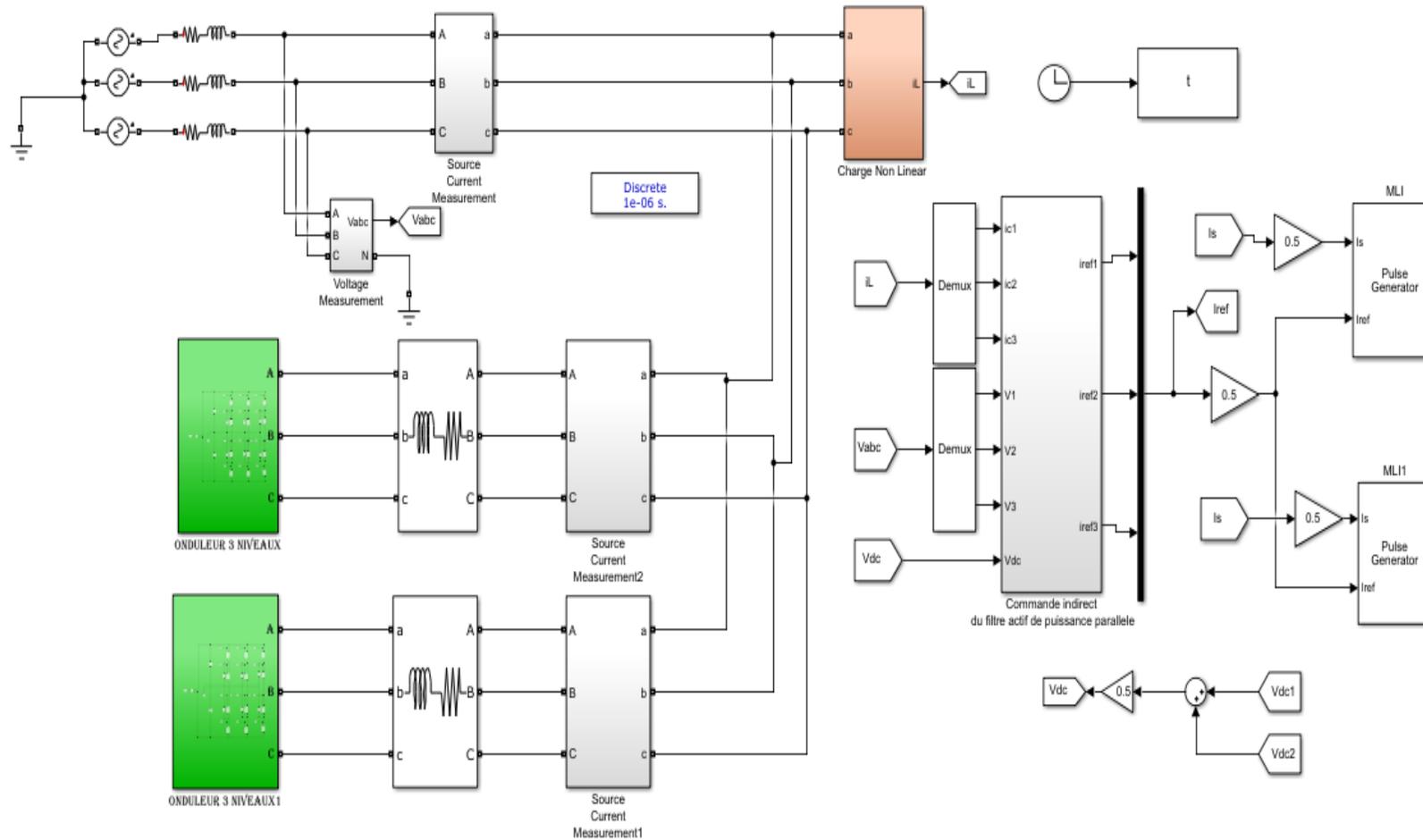


Fig.C. 1: Schéma de la simulation de l'onduleur trois niveaux NPC modulaire

Simulation du FAPP cinq niveaux de type NPC modulaire

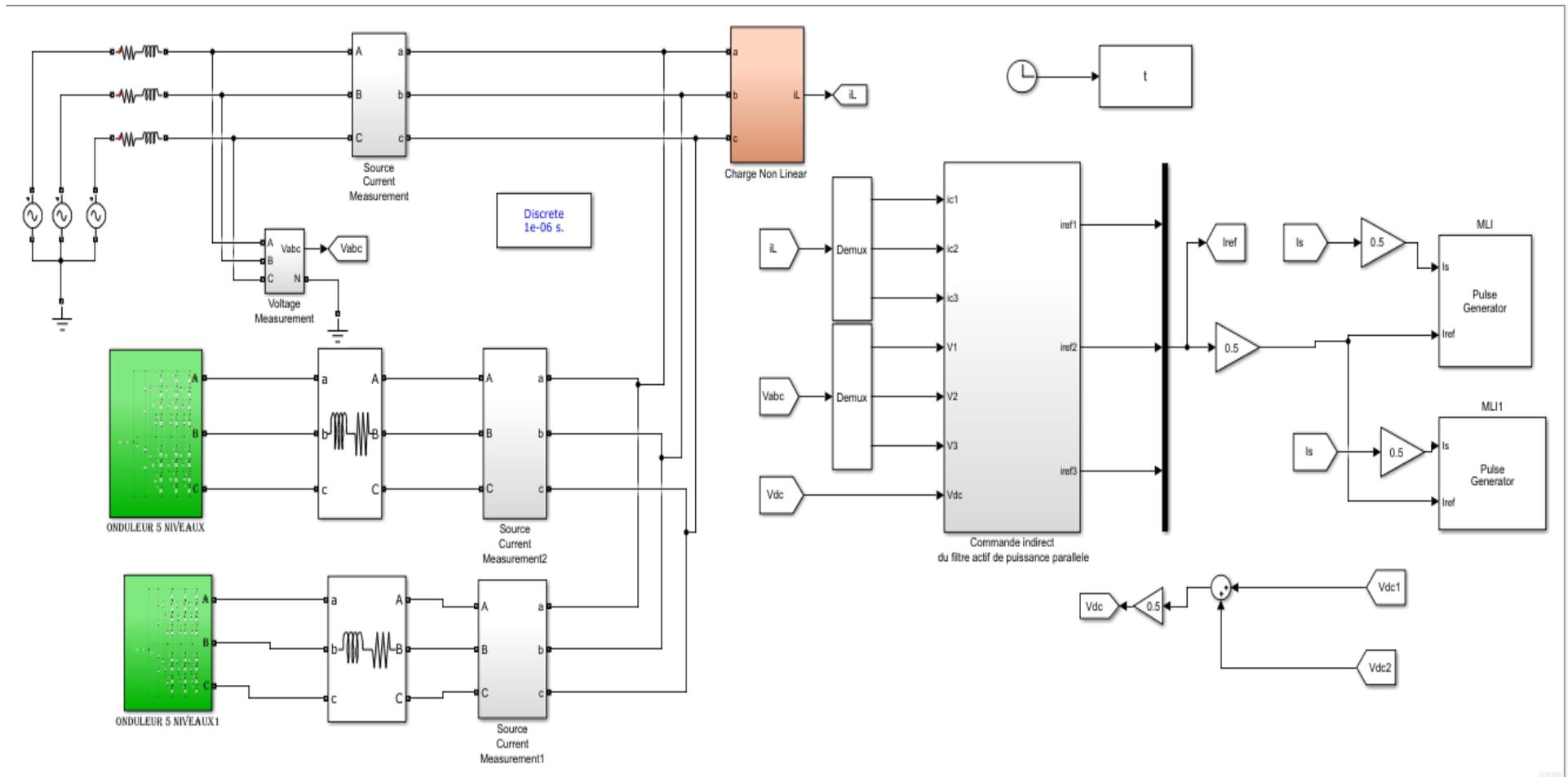


Fig.C. 2: Schéma de la simulation de l'onduleur cinq niveaux NPC modulaire

Simulation du FAPP sept niveaux de type NPC modulaire

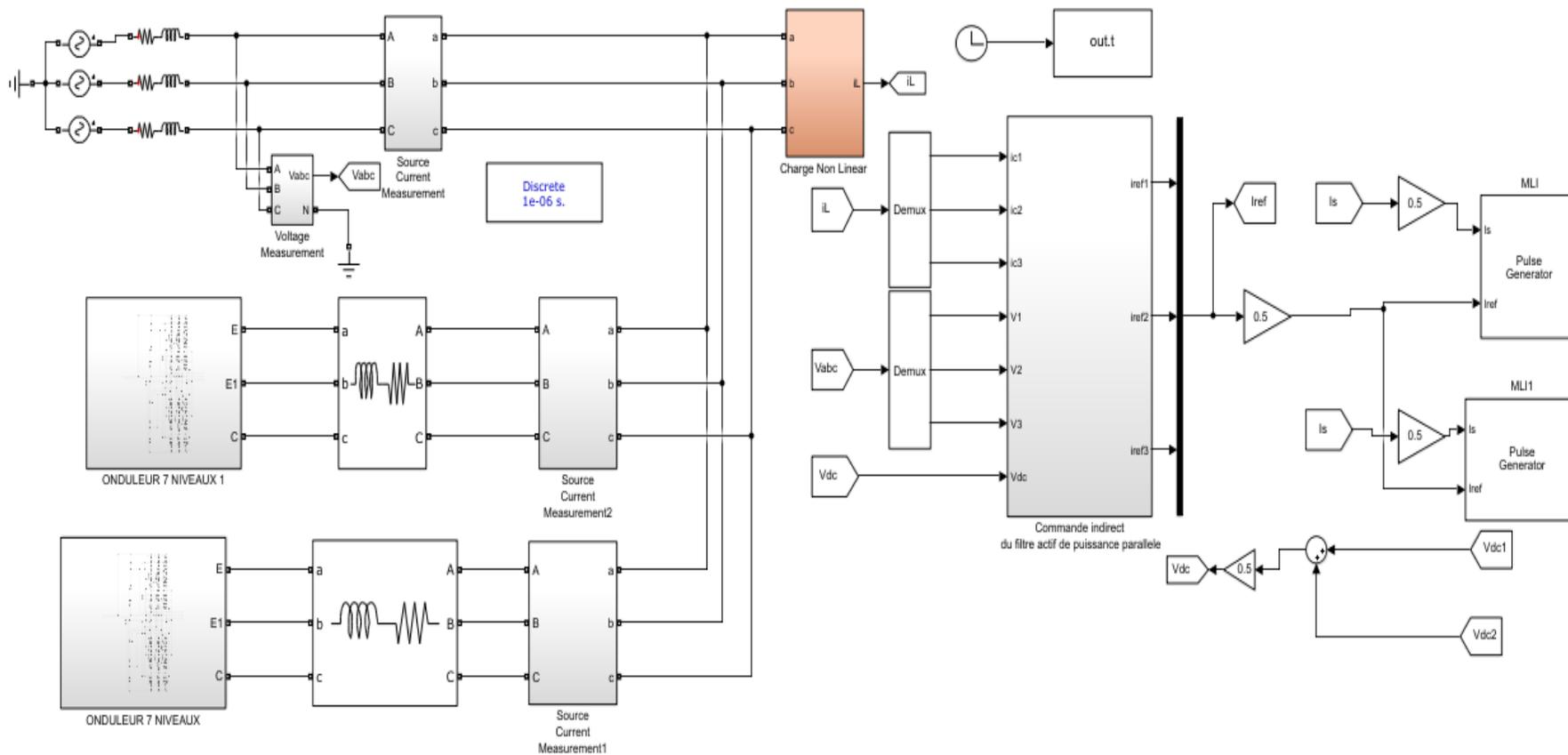


Fig.C. 3: Schéma de la simulation de l'onduleur sept niveaux NPC modulaire

Résumé :

Le problème de la pollution harmonique dans les réseaux de distribution d'énergie est l'un des phénomènes importants qui provoquent une dégradation de la qualité de l'énergie due aux charges dites "non linéaires". L'une des solutions modernes les plus efficaces à ce problème est le filtrage actif de puissance. Dans ce mémoire de master nous avons présenté et simulé les filtres actifs de puissance modulaires multi-niveaux pour compenser les harmoniques de courant générés par ces charges non linéaires à forte consommation de courant lors d'une tension élevée dans réseaux électrique. Nous avons étudié les stratégies de commandes basées sur la méthode directe et indirecte (p-q) et (d-q) et simulé le FAP de type NPC modulaire à trois, cinq et sept niveaux. Les résultats obtenus par simulation effectuée à l'aide du logiciel Matlab ont montré leurs efficacités pour éliminer les harmoniques de courant.

Mots clés :

Filtre actifs de puissance, Filtre actifs de puissance multiniveaux modulaire, onduleur de tension, stratégie de commande dq, stratégie de commande pq, MLI pour onduleur multiniveaux.

ملخص:

تواجه شبكات توزيع الطاقة مشكلة تلوث التوافق الناتج عن الأحمال غير الخطية، وهو ما يؤدي إلى تدهور جودة الطاقة. ومن بين الحلول الحديثة والفعالة لهذه المشكلة، يعتبر ترشيح الطاقة النشطة واحداً منها. في هذه أطروحة الماجستير، تم تقديم ومحاكاة مرشحات طاقة نشطة متعددة المستويات المعيارية، التي تهدف إلى التعويض عن التوافقيات الحالية الناتجة عن أحمال غير خطية تستهلك تياراً وجهداً عاليين. تمت دراسة استراتيجيات التحكم المبنية على طريقة المباشرة و غير المباشرة (p-q) و (d-q) وتمت محاكاة النوع المعياري FAP (ثلاثة وخمسة وسبعة مستويات) من نظامى NPC اظهرت النتائج التي تم الحصول عليها من خلال المحاكاة باستخدام برنامج MATLAB فعالية هذه المرشحات في القضاء على التوافقيات الحالية.

كلمات مفتاحية:

مرشح الطاقة النشط، مرشح طاقة نشط متعدد المستويات، عاكس الجهد، استراتيجيات التحكم (p-q) و (d-q)

MLI للعاكس متعدد المستويات

Abstract:

The problem of harmonic pollution in power distribution networks is one of the important phenomena that cause power quality degradation due to so-called "nonlinear" loads. One of the

most effective modern solutions to this problem is active power filtering. In this master thesis, we have presented and simulated multi-level modular active power filters to compensate for the current harmonics generated by these non-linear loads with high current consumption and when there is a high voltage in the power system. We have studied the control strategies based on the direct and the indirect (p-q) and (d-q) method and simulated the modular NPC type APF (with three, five and seven levels). The results obtained by simulation using Matlab software showed the efficiencies to eliminate current harmonics.

Key words:

Active power filter, multilevel modular active power filter, voltage inverter, control strategy, pq control strategy, PWM for multilevel inverter