

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Électrotechnique

Spécialité : Commandes électriques

Par : Guelai Marwa et Chikh Bougherara Abdessamad El Mokhtar

Sujet

Étude et simulation de commandes de topologies d'onduleur à trois niveaux pour filtres actifs de puissance parallèle

Soutenu publiquement, le 05 / 06 /2024, devant le jury composé de :

Mr. MELIANI Sidi Mohammed	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mr. LOUCIF Mourad	MCA	Université de Tlemcen	Examinateur
Mr. BENHABIB Mohamed Choukri	Professeur	Université de Tlemcen	Encadreur
Mr. BRIKCI NIGASSA Mohammed Amine	MAA	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2023 /2024

Remerciements

Nous tenons à remercier tout d'abord le bon dieu notre créateur qui nous a donné la force, le courage et la volonté pour atteindre nos objectifs et pour terminer ce travail.

Toute notre gratitude et remerciement a notre encadreur Mr. BENHABIB Mohamed Choukri, Professeur à la faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen ainsi que Mr. BRIKCI NIGASSA Mohamed Amine Maître assistant à l'université de Tlemcen, pour leurs conseils, disponibilité et pour leurs aides tout au long de notre projet de fin d'étude.

Nous tenons également à remercier les membres du jury Mr. MELIANI Sidi Mohammed Professeur à l'Université de Tlemcen et Mr. LOUCIF Mourad Maître de conférences à l'Université de Tlemcen pour avoir accepté de juger notre travail.

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

Nous adressons aussi nos remerciements à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Dédicace 1

Je dédier ce travail à :

Mes chers parents que Dieu les préserve, piliers de ma vie qui sont toujours derrière moi et qui m'ont poussé à donner le meilleur de moi-même.

A mes chères sœurs Kawther et Meriem.

A mes grandes parents, tantes, oncles, cousins, cousines et tous les membres de ma grande famille qui m'ont toujours soutenu.

A mes meilleurs amis avec lesquels j'ai partagé mes moments de joie et de bonheur.

GUELAI MARWA

Dédicace 2

Je dédie ce travail :

A Mes chers parents que Dieu les protège
Incha-Allah qui m'ont soutenu et m'ont aidé à
atteindre le niveau d'études actuel.

A Mes chers frères.

A tous les membres de ma famille et toutes les
personnes qui porte le nom **CHIKH**.

A mes meilleurs amis.

A tous nos enseignants et enseignantes.

CHIKH BOUGHERARA ABDESSAMAD EL MOKHTAR

Table des matières

Liste des figures	i
Liste des tableaux	iii
Liste des symboles	iv
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Topologies et stratégies de commande des filtres actifs de puissance parallèle à deux niveaux.	3
I.1 Introduction	4
I.2 Description et structure du FAPP à deux niveaux.....	4
I.3 Différentes Topologies d'onduleur à deux niveaux pour le FAPP.....	5
I.4 Techniques de commandes.....	6
I.4.1 Algorithme de commande basé sur les puissances instantanées	7
I.4.2 Méthode du référentiel lié au synchronisme	8
I.5 Simulation d'un onduleur deux niveaux pour filtre actif de puissance parallèle	9
I.5.1 Simulation d'un FAPP en utilisant le contrôle par MLI	9
I.5.2 Simulation d'un FAPP en utilisant le contrôle par hystérésis	14
I.6 Limitation des onduleurs à deux niveaux.....	17
I.7 Conclusion.....	17
Chapitre II : Étude et commande des différentes topologies d'un FAPP à trois niveaux	18
II.1 Introduction	19
II.2 Structure d'un FAPP utilisant un onduleur trois niveaux.....	19
II.3 Différentes topologies d'onduleur trois niveaux	19
II.3.1 Onduleur trois niveaux de type NPC.....	19
II.3.2 Onduleur trois niveaux de type T-Bridge.....	22
II.3.3 Onduleur trois niveaux de type H bridge.....	25
II.3.4 Onduleur trois niveaux de type FC.....	28
II.4 MLI pour les différentes topologies	30
II.4.1 Commande MLI de l'onduleur H bridge.....	31
II.4.2 Commande MLI de l'onduleur T bridge	32
II.4.3 Commande MLI de l'onduleur NPC et FC	33
II.5 Conclusion.....	34
Chapitre III : Simulation des différents FAPPs trois niveaux.....	35
III.1 Introduction.....	36
III.2 Étude de notre système	36

III.3 Simulation des FAPPs à trois niveaux	38
III.3.1 FAPP de type NPC utilisant la commande (p-q)	38
III.3.2 FAPP de type NPC utilisant la commande (d-q)	43
III.3.3 FAPP de type T-bridge utilisant la commande (d-q)	46
III.3.4 FAPP de type H-bridge (pont en H) utilisant la commande (d-q)	49
III.3.5 FAPP de type FC utilisant la commande (d-q)	53
III.3.6 Comparaison des résultats de simulation entre les topologies	55
III.4 Conclusion	56
Conclusion générale	57
Références bibliographie	58

Liste des figures

Figure I. 1: Schéma générale du FAPP.	4
Figure I. 2: Onduleur deux niveaux connecté à un réseau électrique à trois fils.	5
Figure I. 3: Onduleur deux niveaux connecté à un réseau électrique à quatre fils.	6
Figure I. 4: Méthode directe d'un filtre actif de puissance parallèle.	6
Figure I. 5: Commande directe basé sur les puissances instantanées.	8
Figure I. 6 : Commande directe basé sur la méthode du référentiel lié au synchronisme.	9
Figure I. 7 : FAPP à trois bras.	10
Figure I. 8 : Paramètre de simulation.	10
Figure I. 9 : Schéma général de la simulation du FAPP a deux niveaux par la méthode directe.	11
Figure I. 10 : Schéma de la MLI de l'onduleur à deux niveaux.	11
Figure I. 11 : Schéma de simulation de la méthode des puissances instantanées du FAPP.	12
Figure I. 12 : Résultats de simulation du FAPP avec l'utilisation de la MLI.	14
Figure I. 13: Schéma de la commande par hystérésis de l'onduleur à deux niveaux.	15
Figure I. 14: Résultats de simulation du FAPP avec l'utilisation de l'hystérésis.	16
Figure II. 1: Onduleur à trois niveaux de type NPC.	20
Figure II. 2: État des interrupteurs pour la première configuration.	21
Figure II. 3 : État des interrupteurs pour la deuxième configuration.	21
Figure II. 4 : État des interrupteurs pour la troisième configuration.	22
Figure II. 5 : Onduleur à trois niveaux de type T.	23
Figure II. 6: Passage du courant dans les interrupteurs selon le sens positif.	24
Figure II. 7 : Passage du courant dans les interrupteurs selon le sens négatif.	24
Figure II. 8: Onduleur à trois niveaux de type H bridge.	25
Figure II. 9: État des interrupteurs pour la première configuration.	26
Figure II. 10: État des interrupteurs pour la deuxième configuration.	26
Figure II. 11: État des interrupteurs pour la troisième configuration.	27
Figure II. 12: État des interrupteurs pour la quatrième configuration.	27
Figure II. 13: Onduleur à trois niveaux de type FC.	28
Figure II. 14: État des interrupteurs pour la première configuration.	29
Figure II. 15: État des interrupteurs pour la deuxième configuration.	29
Figure II. 16 : État des interrupteurs pour la troisième configuration.	30
Figure II. 17: Commande MLI du H-bridge.	31
Figure II. 18: Signaux de la MLI-sinusoïdale multi porteuses de l'onduleur H-bridge.	32
Figure II. 19 : Commande MLI du T-bridge.	32
Figure II. 20: Signaux de la MLI-sinusoïdale multi porteuses de l'onduleur de type T Bridge.	33
Figure II. 21 : Commande MLI du NPC et FC.	33
Figure II. 22: Signaux de la MLI-sinusoïdale multi porteuses de l'onduleur NPC et FC.	34
Figure III. 1: FAPP à trois niveaux.	36
Figure III. 2: Commande basé sur la méthode du référentiel lié au synchronisme (dq).	37
Figure III. 3: Schéma générale de la simulation du FAPP 3 niveaux type NPC.	39
Figure III. 4: Commande MLI de l'onduleur NPC à trois niveaux.	40
Figure III. 5: Paramètre de simulation.	40

Figure III. 6: Schéma de la commande directe basée sur la méthode des puissances instantanées.....	41
Figure III. 7 : Paramètre de la commande.....	41
Figure III. 8 : Résultat de simulation du FAPP 3 niveaux type NPC par l'utilisation de la méthode des puissances instantanées.	42
Figure III. 9 : Schéma de la commande directe basée sur la méthode du référentiel lié au synchronisme	43
Figure III. 10: Résultat de simulation du FAPP 3 niveaux type NPC par l'utilisation de la méthode du référentiel lié au synchronisme.....	45
Figure III. 11: Schéma générale de la simulation du FAPP 3 niveaux type T-bridge.....	46
Figure III. 12 : Commande MLI de l'onduleur T-bridge à trois niveaux.....	47
Figure III. 13: Résultat de simulation du FAPP 3 niveaux type T Bridge par l'utilisation de la commande du référentiel lié au synchronisme.	48
Figure III. 14 : Schéma générale de la simulation du FAPP 3 niveaux type H-bridge.	49
Figure III. 15 : Schéma d'un pont H (H-bridge) trois niveaux.	50
Figure III. 16 : Commande MLI de l'onduleur H-bridge à trois niveaux.....	51
Figure III. 17 : Résultat de simulation du FAPP 3 niveaux type H-Bridge par l'utilisation de la commande du référentiel lié au synchronisme.	52
Figure III. 18 : Schéma générale de la simulation du FAPP 3 niveaux type FC.....	53
Figure III. 19 : Résultat de simulation du FAPP 3 niveaux type FC par l'utilisation de la commande du référentiel lié au synchronisme.....	55

Liste des tableaux

Tableau II. 1: États des interrupteurs de l'onduleur trois niveaux de type NPC.....	22
Tableau II. 2: États des interrupteurs de l'onduleur trois niveaux de type T-bridge.....	23
Tableau II. 3: États des interrupteurs de l'onduleur trois niveaux de type H-bridge.....	28
Tableau II. 4: États des interrupteurs de l'onduleur trois niveaux de type FC.....	30
Tableau III. 1: THD pour chaque'une des quatre topologies.....	55

Liste des symboles

FAPP : Filtre actif de puissance parallèle.

FAP : filtre actif de puissance.

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

V_{source} : Tension de la source.

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

V_s : Tension de sortie du filtre actif de puissance.

I_{source} : Courant de la source.

I_{charge} : Courant de la charge.

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

\bar{p} \bar{q} : Puissances actives et réactives instantanées continues.

\tilde{p} \tilde{q} : Puissances actives et réactives instantanées alternatives.

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

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

f : Fréquence.

R : Résistance.

L : Inductance.

C : Condensateur.

PLL : Boucle à verrouillage de phase.

THD : Taux de Distorsions Harmoniques.

CEI : Commission Electrotechnique Internationale.

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

FC : Onduleur à capacités flottantes (Flying Capacitor).

MLI : Modulation de Largeur d'impulsion.

PWM : Pulse Width Modulation.

Introduction générale

L'utilisation croissante de l'électronique de puissance, tel que les convertisseurs statiques (redresseurs à diodes, variateurs, alimentations, ...) adossé aux réseaux électriques provoquent de plus en plus de problème lié à la distorsion harmonique du courant et/ou de la tension. Cette distorsion entraînera une augmentation des pertes dans le réseau, ainsi que la perturbation de fonctionnement de certains équipements [1] [2].

Plusieurs solutions ont été proposées dans la nomenclature pour résoudre ce problème de pollution harmonique au niveau des réseaux électriques. Parmi ces solutions, nous citerons, l'utilisation des filtres actifs de puissance (FAP) afin d'éliminer les harmoniques de courants et/ou compenser la puissance réactive.

Cette solution offre de nombreux avantages, tels que [3] :

- Une auto-adaptation à l'évolution des charges et du réseau ;
- Une élimination des risques de résonance entre filtre et l'impédance du réseau ;
- Une compensation totale ou sélective des harmoniques.

La classification des FAPs dépend de la nature du réseau électrique : monophasés ou triphasés (trois fils ou quatre fils), et de nombreuses charges non linéaires, telles que les appareils ménagers, qui sont connectées à ces mêmes réseaux [4].

Les FAPs utilisent généralement un onduleur de tension classique à deux niveaux. Cependant, pour des réseaux électriques ayant une tension plus élevée, ce type d'onduleur n'est plus adapté car il doit pouvoir supporter une tension et un courant plus élevé. Ceci est due du fait que les composants de type IGBTs ou MOSFETs ne supporte pas ce niveau de tension. Face à cette limitation, de nouvelles structures dites multi-niveaux ont été développées.

Il existe un certain nombre de topologies d'onduleurs multi-niveaux présentés dans la littérature [5]. Parmi ces onduleurs multiniveaux, nous citerons : le FC, le NPC, le T-bridge et le H-bridge. Ce sont ces topologies qui seront étudié dans notre PFE.

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

- Dans le premier chapitre, nous allons étudier les filtres actifs de puissance parallèle (FAPP) utilisant un onduleur deux niveaux. Nous présenterons les différentes topologies existant pour les réseaux électriques à trois fils et les réseaux électriques à quatre fils. Nous allons également présenter les commandes utilisées par ces FAPs pour l'identification des harmoniques de courant généré par les charges non-linéaire. Les résultats des simulations obtenus par le FAPP de deux niveaux seront également présentés dans ce chapitre.

- Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter les FAPPs utilisant un onduleur à trois niveaux. Nous montrerons les différentes topologies existantes et les différentes MLI utilisé pour chacune d'elles.
- Dans Le troisième et dernier chapitre nous présenterons les simulations en détail avec les résultats de chaque topologie étudiée. Nous terminerons par la comparaison entre les différentes topologies d'onduleurs.

Chapitre I : Topologies et stratégies de commande des filtres
actifs de puissance parallèle à deux niveaux.

I.1 Introduction

Les filtres actifs de puissance parallèles (FAPP) constituent une technique efficace pour compenser les composantes harmoniques de courants [6]. Dans ce chapitre, nous étudierons les filtres actifs de puissance parallèles utilisant un onduleur de type deux niveaux. Ce type de FAPP est composée de deux parties : la partie puissance et la partie contrôle. La partie puissance comporte trois modules principaux à savoir : Un onduleur de tension, un élément de stockage d'énergie et un filtre de découplage. La partie contrôle comprend l'identification des courants harmoniques, la régulation des courants de références et celle de la tension continue [7]. Ainsi, nous allons présenter dans ce chapitre quelques topologies de type deux niveaux et les commandes du FAPP. Une série de simulation de notre système sera aussi présentée sous l'environnement MATLAB/Simulink.

I.2 Description et structure du FAPP à deux niveaux

Le filtre actif de puissance parallèle est utilisé pour éliminer les courants harmoniques produits par les charges génératrices de courants harmoniques [8]. Il peut cependant, dans certaines conditions, être aussi utilisé pour compenser la puissance réactive [9]. Le FAPP est placé en parallèle avec la charge dans le but d'injecter un courant harmonique de même amplitude et de phase opposée que celui de la charge [10].

Le schéma de FAPP est illustré dans la figure I.1 :

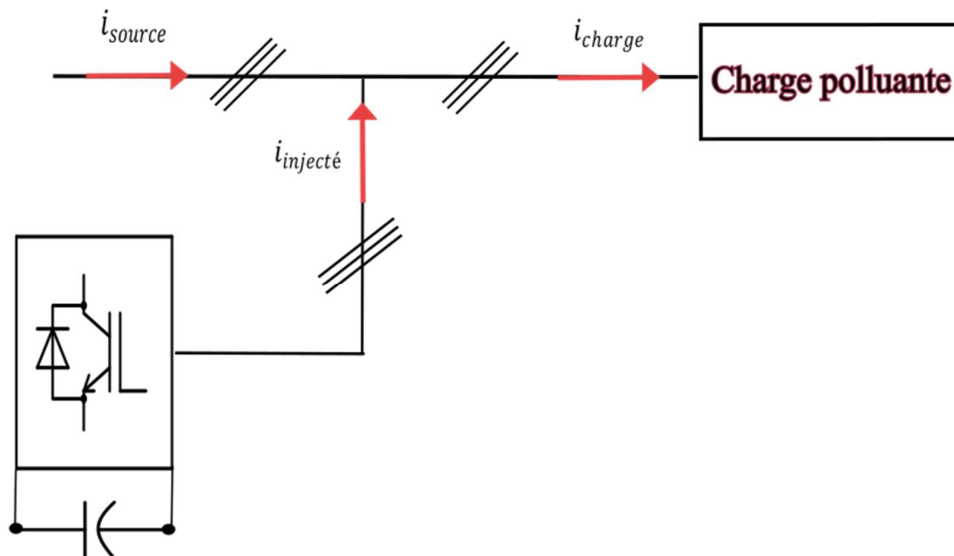
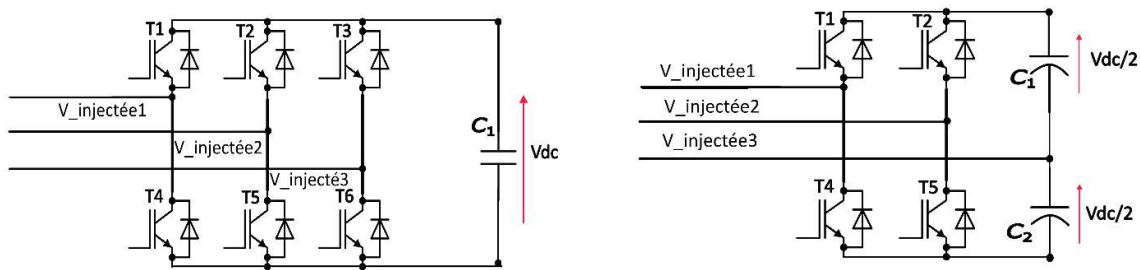


Figure I. 1: Schéma générale du FAPP.

I.3 Différentes Topologies d'onduleur à deux niveaux pour le FAPP

Les topologies existantes du FAPP sont présentées dans les figures I.2 et I.3, elles sont en général utilisées pour les réseaux électriques à 3 fils ou à 4 fils.

- **Concernant les FAPPs à trois fils** : Nous distinguons deux topologies d'onduleur à savoir le FAPP à trois bras et le FAPP a deux bras avec condensateurs à point milieu.
 - ✓ La figure I.2.a représente un onduleur à trois bras. Chaque bras possède deux interrupteurs en plus d'un condensateur C connecté à l'entrée de l'onduleur pour fournir une tension continue de valeur positive à ses bornes. Cette tension V_{dc} nécessite une régulation.
 - ✓ La figure I.2.b représente un onduleur à quatre interrupteurs « formant deux bras », le troisième bras est substitué par deux condensateurs en série de sorte que le point milieu est relié à la troisième phase du réseau. Chacun des deux condensateurs agit comme une source de tension continue $V_{dc}/2$. Cette tension à leurs bornes devra être également maintenue à une valeur positive quasi constante [3].



a) Onduleur de tension a trois bras.

b) Onduleur de tension à deux bras avec condensateurs à point milieu.

Figure I. 2: Onduleur deux niveaux connecté à un réseau électrique à trois fils.

- **Concernant les FAPPs à quatre fils** : Pour ce type de FAPP il existe aussi deux topologies d'onduleur : Le FAPP à quatre bras et le FAPP à trois bras avec condensateurs à point milieu.
 - ✓ La figure I.3.a présente un onduleur à quatre bras. Les trois premiers bras sont reliés aux trois phases et sont constitués respectivement de deux IGBT. Le quatrième bras, quant à lui, est connecté au neutre. La capacité fonctionne comme une source de tension continue positive et constante.
 - ✓ La figure I.3.b présente un onduleur dont les trois premiers bras sont constitués de six interrupteurs en plus d'un quatrième bras constitué de deux condensateurs avec un point milieu relié au neutre du réseau électrique [3].

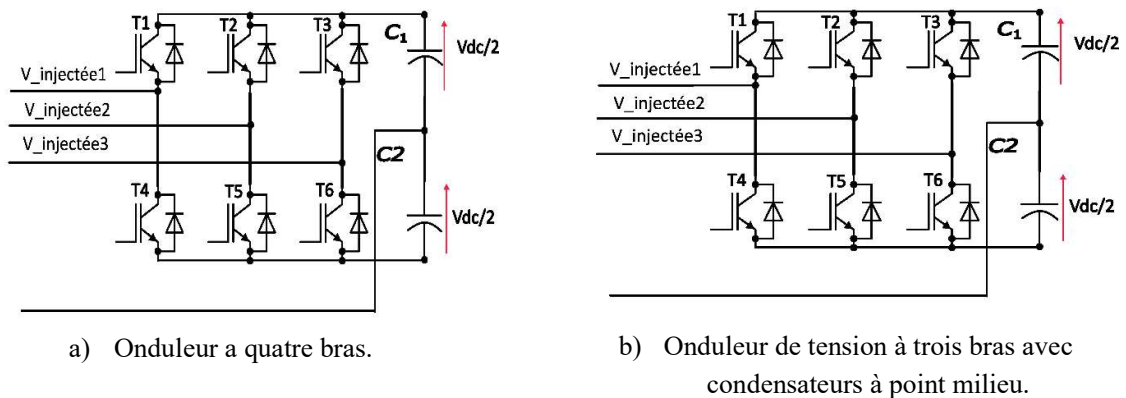


Figure I. 3: Onduleur deux niveaux connecté à un réseau électrique à quatre fils.

I.4 Techniques de commandes

Après avoir présenté les différentes topologies pour la compensation des courants harmoniques d'un réseau électrique quelconque, nous allons maintenant examiner certaines méthodes de commande appliquée uniquement pour les FAPPs à 3 bras connecté au réseau électrique à trois fils pour identifier les courants harmoniques produits par les charges dites non linéaires. Nous avons étudié deux types de commande par la méthode directe d'identification des courants de référence, comme illustrée sur la Figure I.4.

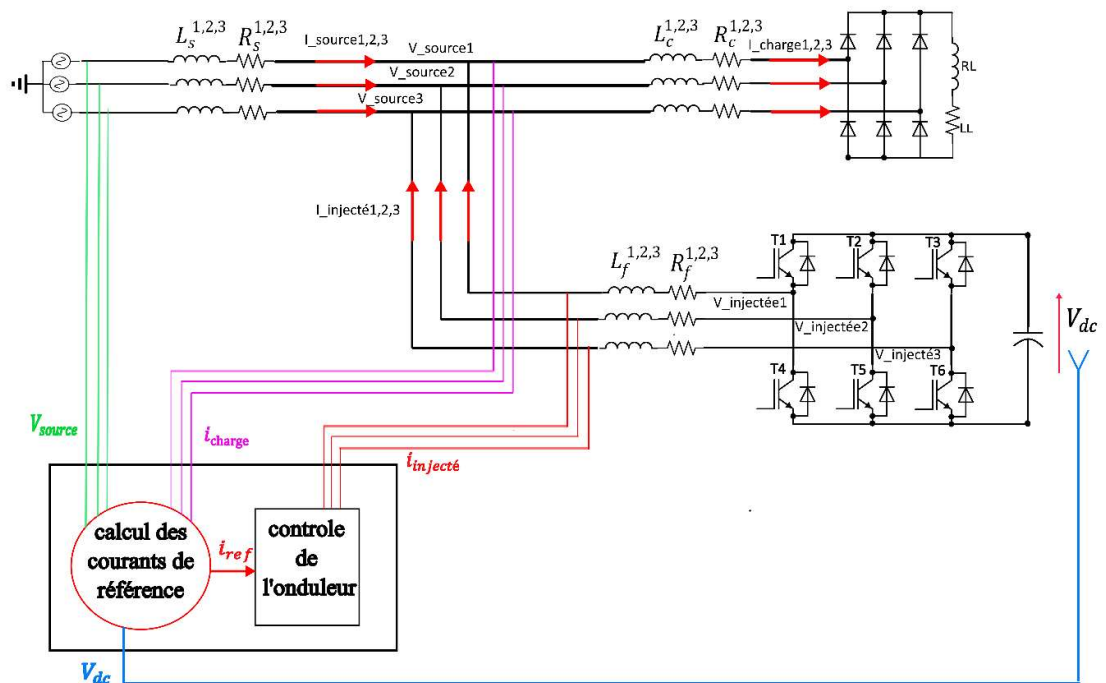


Figure I. 4: Méthode directe d'un filtre actif de puissance parallèle.

I.4.1 Algorithme de commande basé sur les puissances instantanées

Cette commande est basée sur la mesure de variables instantanées triphasées sur le réseau avec ou sans composantes homopolaires. Cette méthode est valable aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire. Dans cet algorithme de contrôle (Fig. I.5), l'utilisation de la transformée de Concordia permet de convertir les valeurs mesurées de la tension et du courant exprimées en triphasée ($a-b-c$) sous la forme biphasé ($\alpha-\beta$) noté comme suite : [11]

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{source} \\ V_{source} \\ V_{source3} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{charge1} \\ i_{charge2} \\ i_{charge3} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

De ces équations nous pouvons calculer la puissance active et réactive instantanée, comme suit [11] :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Ces deux puissances ont des composantes constantes et des composantes harmoniques. Il est donc intéressant de séparer p et q en deux parties [11]:

A partir de l'équation (I.3) il sera possible d'écrire :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

Ou \bar{p} et \bar{q} sont les composantes continues

Et \tilde{p} et \tilde{q} sont les composantes alternatives

Selon la fonctionnalité que nous donnons au FAPP, nous pouvons compenser soit les harmoniques de courant et l'énergie réactive, ou seulement l'une des deux. [3]

Dans notre étude nous avons choisie de compenser l'énergie réactive et les harmoniques de courant. Pour cela, nous utiliserons un filtre passe haut uniquement au niveau de la puissance active instantanée pour extraire les composantes harmoniques, suite à quoi nous obtenons ainsi l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^{ref} \\ i_\beta^{ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

En appliquant ensuite la transformé inverse de Concordia nous obtenons alors :

$$\begin{bmatrix} i_1^{ref} \\ i_2^{ref} \\ i_3^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha^{ref} \\ i_\beta^{ref} \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

L'algorithme de commande de la puissance instantanée est présenté sur la figure suivante :

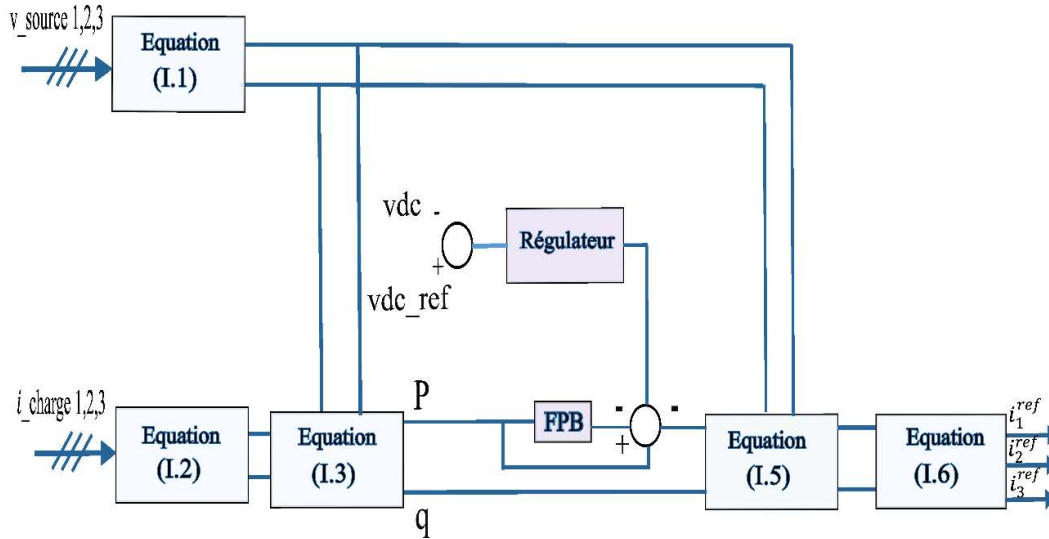


Figure I. 5: Commande directe basé sur les puissances instantanées.

I.4.2 Méthode du référentiel lié au synchronisme

Cette méthode, proposée par Bhattacharya [12], utilise le même principe que la méthode précédente, la seule différence c'est l'utilisation de la transformée de Concordia uniquement pour les courants de charge [13]. De plus, en utilisant une PLL pour générer les signaux $\cos(\theta)$ et $\sin(\theta)$ à partir de la tension "fondamentale" du réseau [37], nous obtenons l'expression suivante pour le courant dans un système $(d-q)$:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

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

Nous obtenons ainsi après l'utilisation d'un filtre passe haut, puis en appliquant la transformée inverse de $(d-q)$ vers $(\alpha-\beta)$, nous obtenons l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^{ref} \\ i_{\beta}^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (I.8)$$

En appliquant ensuite la transformé inverse de Concordia nous obtenons alors :

$$\begin{bmatrix} i_1^{ref} \\ i_2^{ref} \\ i_3^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\alpha}^{ref} \\ i_{\beta}^{ref} \end{bmatrix} \quad (I.9)$$

L'algorithme de cette commande est présenté sur la figure suivante.

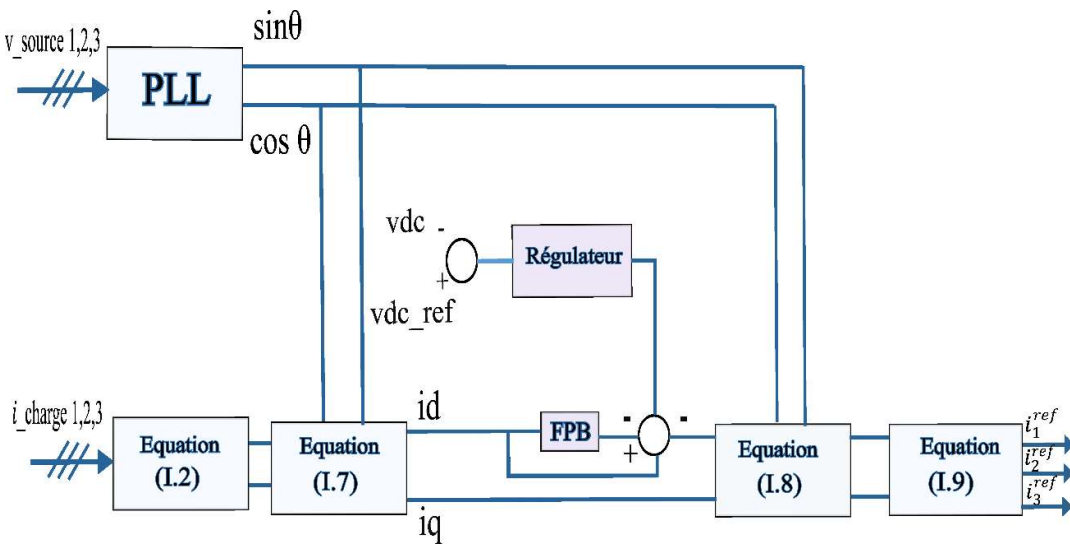


Figure I. 6 : Commande directe basé sur la méthode du référentiel lié au synchronisme.

I.5 Simulation d'un onduleur deux niveaux pour filtre actif de puissance parallèle

Nous allons dans cette partie faire la simulation d'un FAPP utilisant la stratégie de commande des puissances instantanées. Au début nous appliquerons le contrôle MLI ensuite nous appliquerons le contrôle par hystérésis.

I.5.1 Simulation d'un FAPP en utilisant le contrôle par MLI

La topologie du FAPP deux niveaux que nous avons choisi dans notre étude est le FAPP à trois bras (voir I.7). Il est composé d'un réseau électrique triphasé alimentant un pont redresseur et d'un FAPP connecté en parallèle à ce même réseau avec comme stratégie de commande directe avec la méthode de type $(p-q)$.

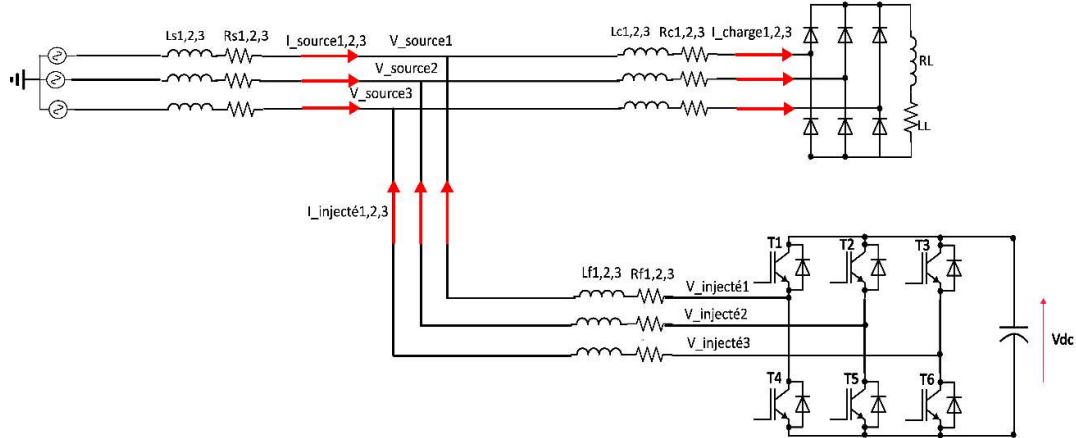


Figure I. 7 : FAPP à trois bras.

Les paramètres de chaque élément utiliser dans cette simulation, ont les valeurs suivantes :

- ✓ Le réseau électrique : $f = 50\text{HZ}$, $V_{source} = 230\text{V}$, $R_{source} = 10^{-3}\ \Omega$ et $L_{source} = 10^{-8}\text{H}$
- ✓ Le pont redresseur : $R_{charge} = 2.7 \times 10^{-3}\ \Omega$, $L_{charge} = 23.19 \times 10^{-6}\text{H}$ et $R_L = 0.78\ \Omega$ et $L_L = 2.25 \times 10^{-6}\text{H}$
- ✓ Le FAPP $R_{filtre} = 10^{-6}\ \Omega$, $L_{filtre} = 0.1 \times 10^{-3}\text{H}$, $C = 60 \times 10^{-3}\text{F}$

Les figures suivantes présentent les schémas de simulation de notre système en détail

Figure I. 8 : Paramètre de simulation.

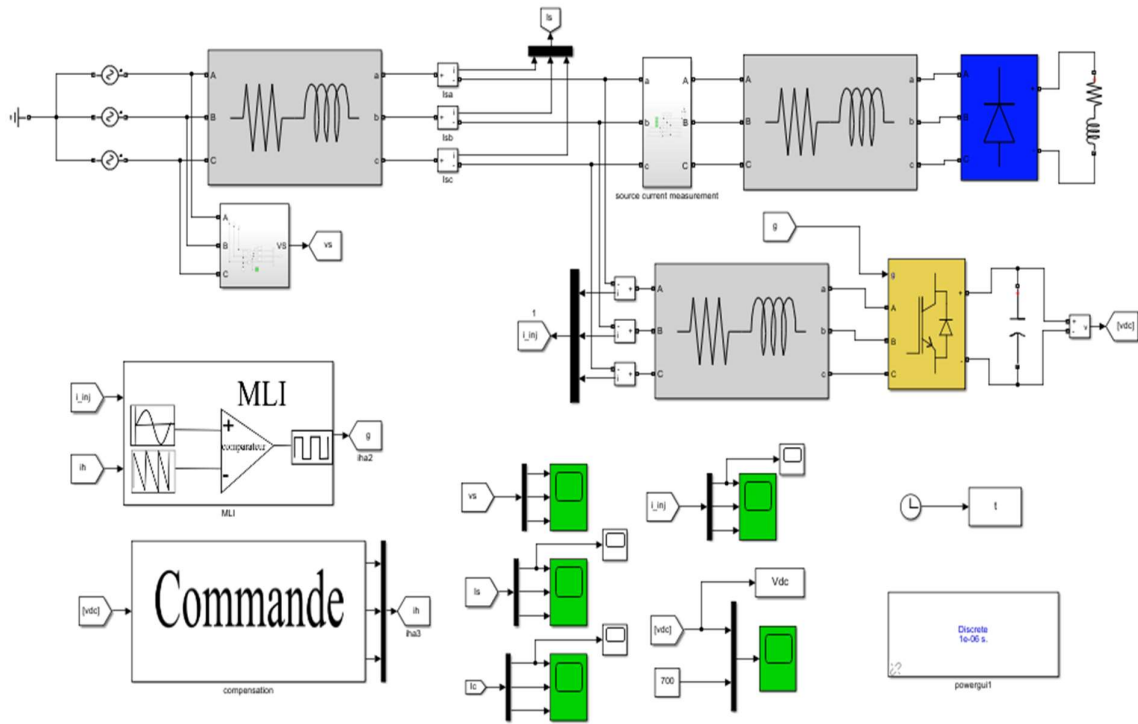


Figure I. 9 : Schéma général de la simulation du FAPP à deux niveaux par la méthode directe.

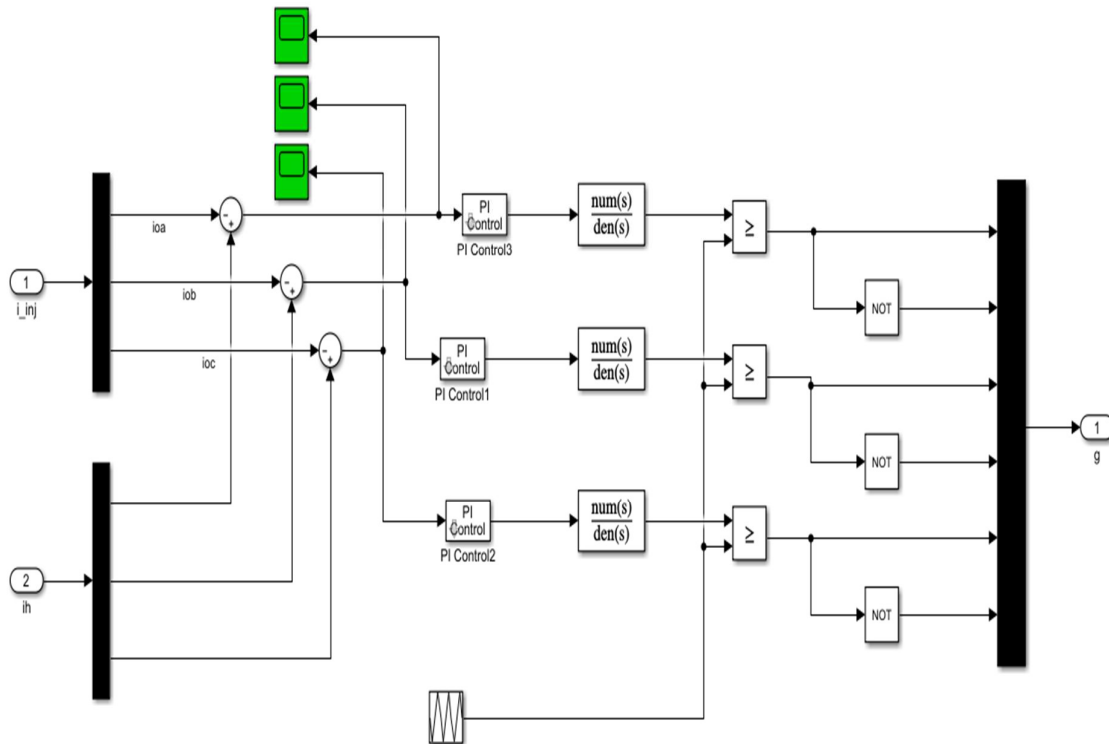


Figure I. 10 : Schéma de la MLI de l'onduleur à deux niveaux.

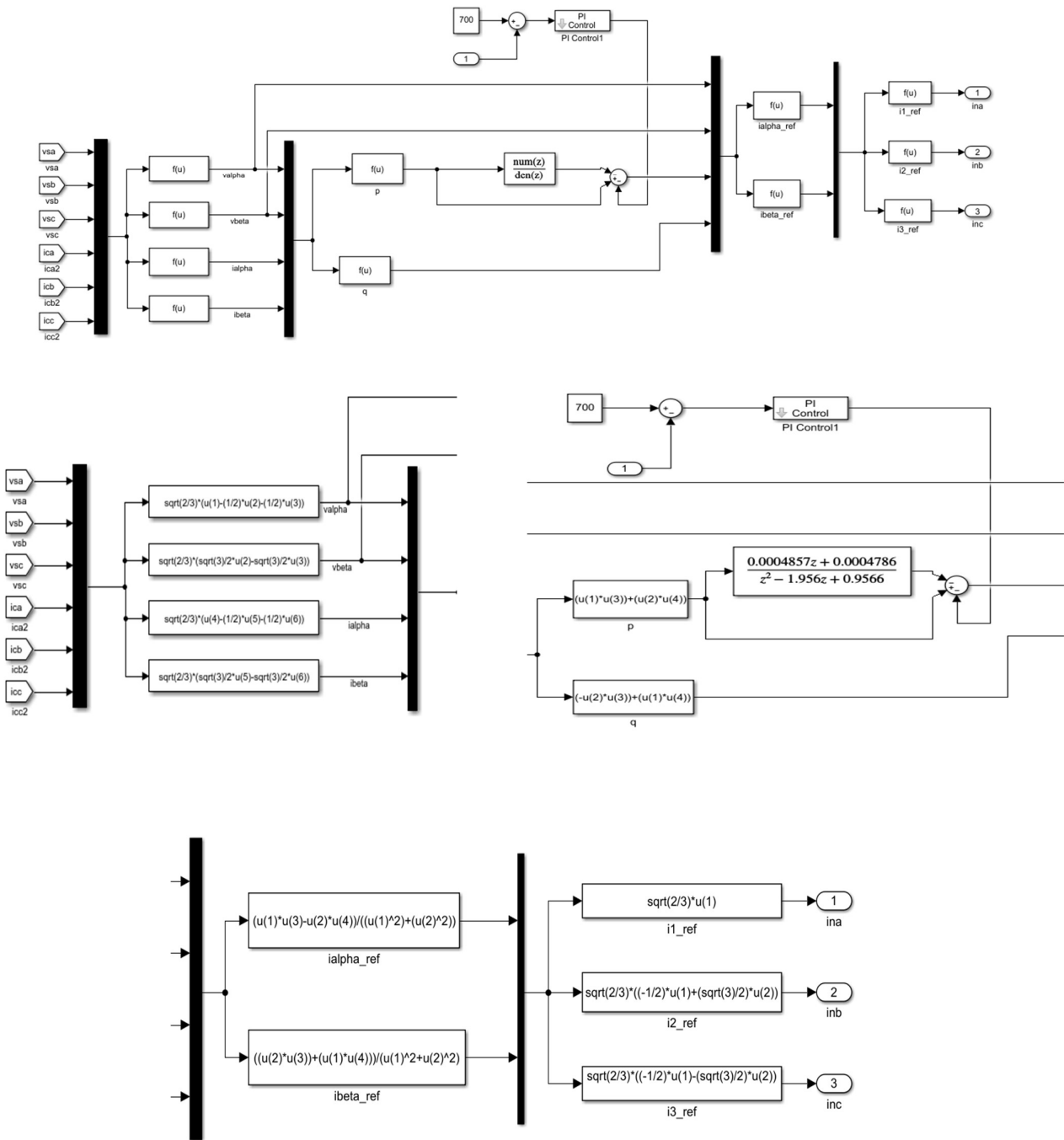
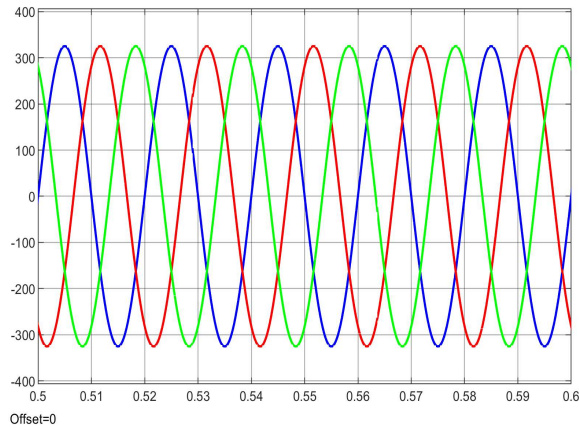
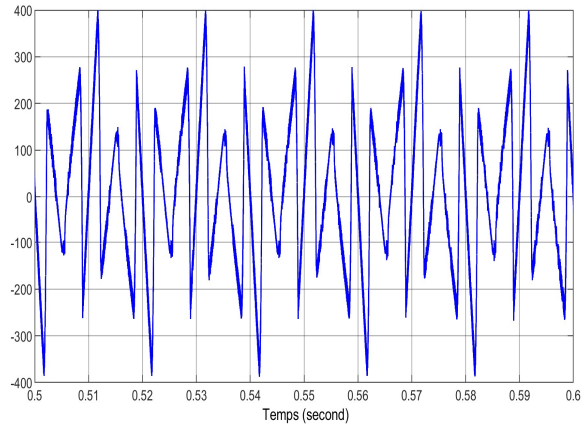


Figure I. 11 : Schéma de simulation de la méthode des puissances instantanées du FAPP.

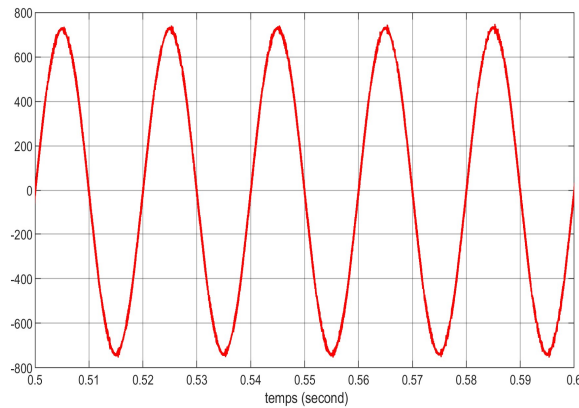
Après la simulation nous obtenons les figures suivantes :



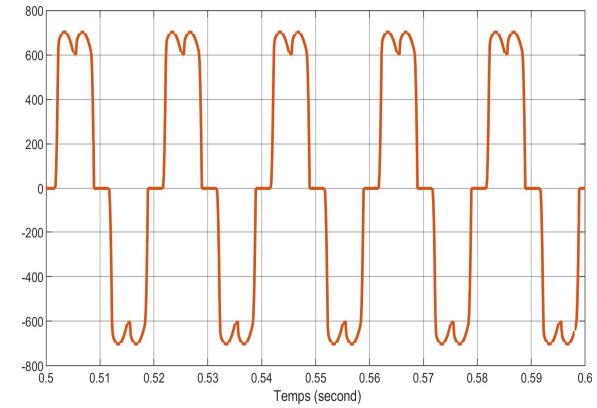
a) Tensions aux bornes de la source.



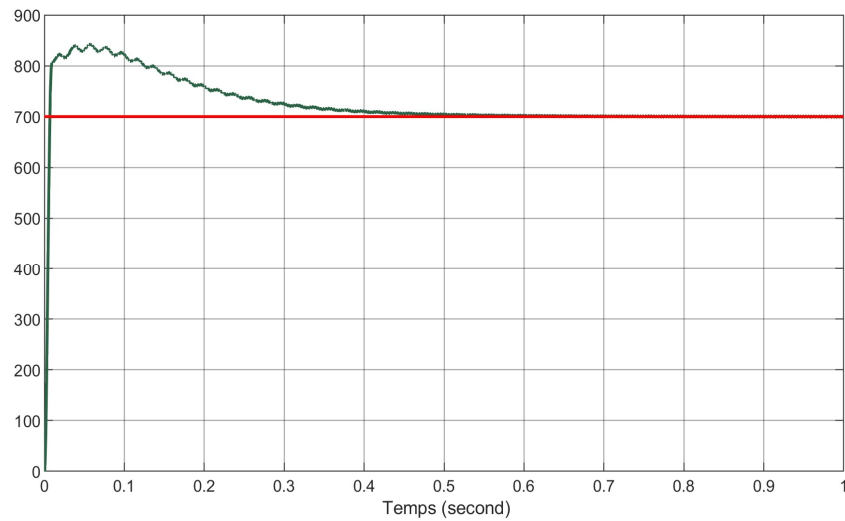
b) Courant injecté par le FAP.



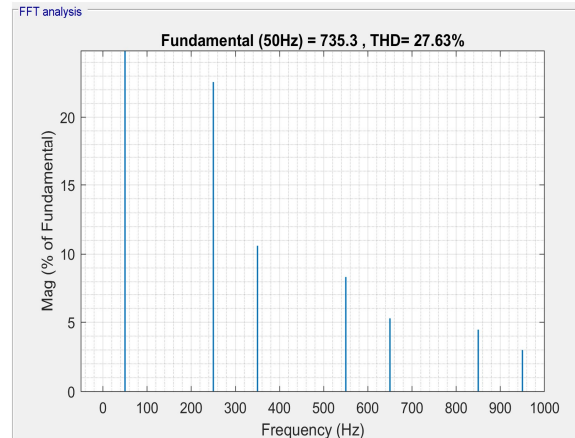
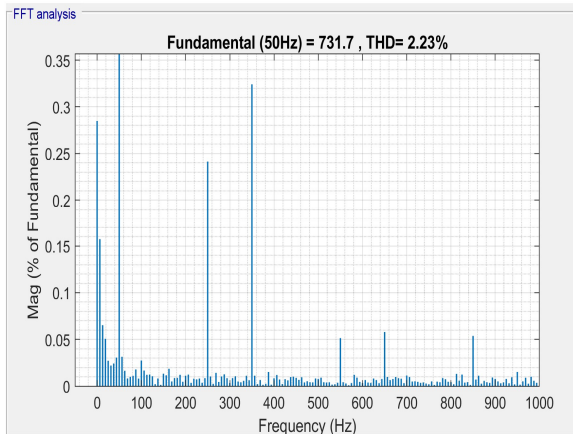
c) Courant de la source après filtrage.



d) Courant de la charge.



e) Tension V_{dc} du condensateur.



f) Spectre harmonique du courant de la source après filtrage

g) Spectre harmonique du courant de la charge

Figure I. 12 : Résultats de simulation du FAPP avec l'utilisation de la MLI.

La figure I.12.a présente la courbe de la tension de source des trois phase A, B, C, qui ont une forme sinusoïdale.

Les figures (I.12.b, I.12.c et I.12.d) montrent respectivement le courant injectée par le FAPP, le courant de la source après filtrage et le courant de charge d'une seule phase. La figure I.12.e présente la tension aux bornes du condensateur. Cette dernière est quasi-constante car la régulation de la tension V_{dc} présente de bonne performance. Les figures (f et g) indiquent l'analyse spectral des harmoniques des courants avant et après filtrage. Nous remarquons que la valeur du THD diminue passant de 27.63% à 2,23 %. Le FAPP à ainsi apporter une nette amélioration de la qualité de notre courant de source conforme aux normes en vigueur.

I.5.2 Simulation d'un FAPP en utilisant le contrôle par hystérésis

Le seul changement qui sera fait sur cette simulation et de changer le contrôle MLI par le contrôle par hystérésis, selon la figure I.13 :

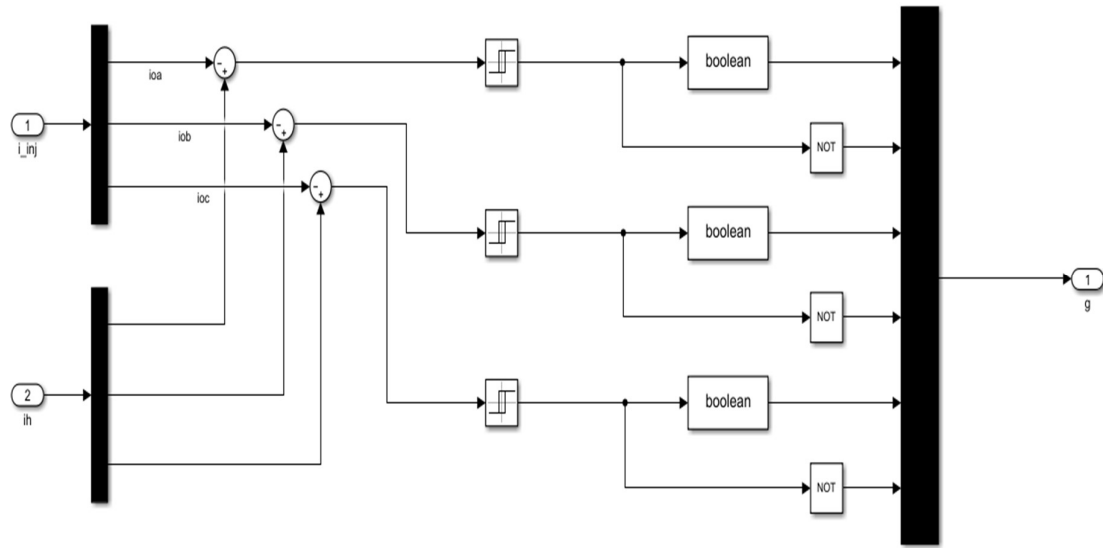
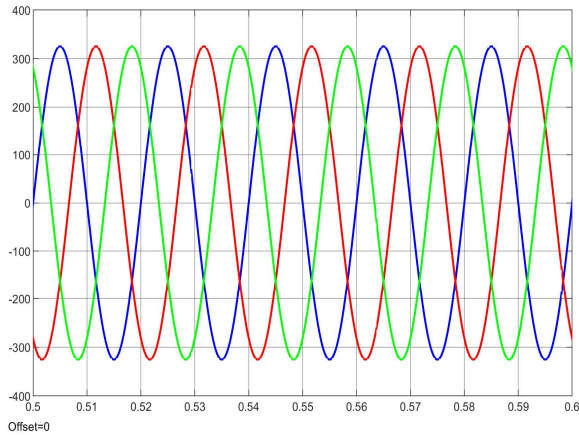
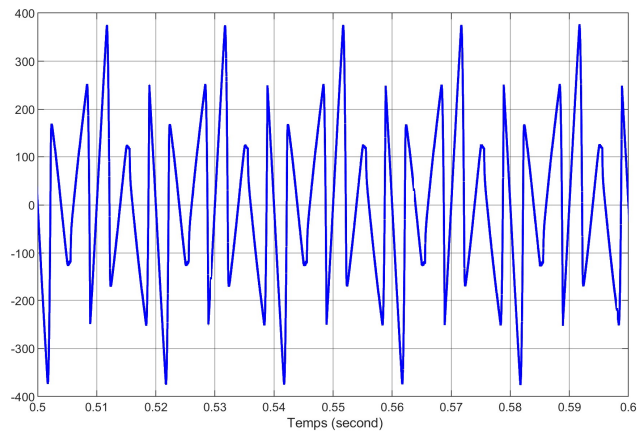


Figure I. 13: Schéma de la commande par hystérésis de l'onduleur à deux niveaux.

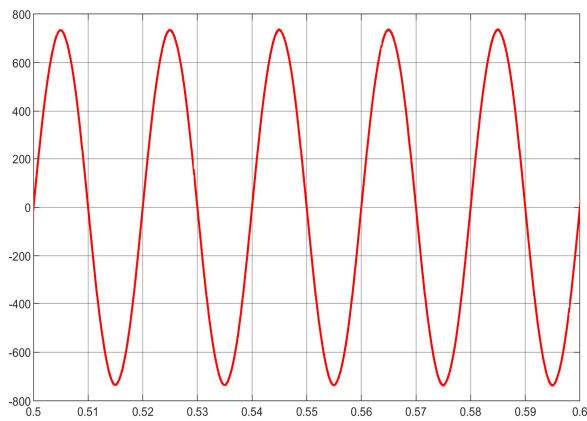
Après la simulation nous obtenons les figures suivantes :



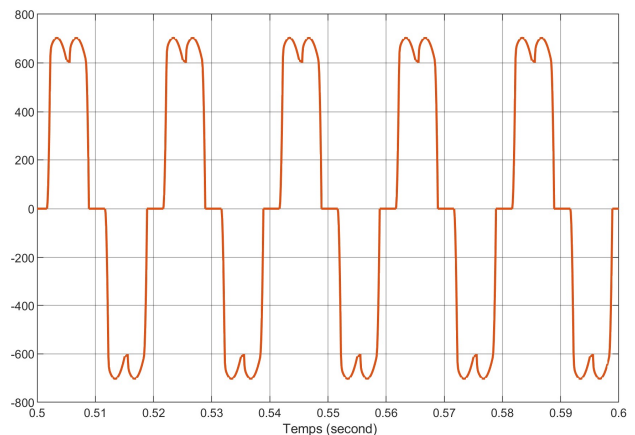
a) Tensions aux bornes de la source



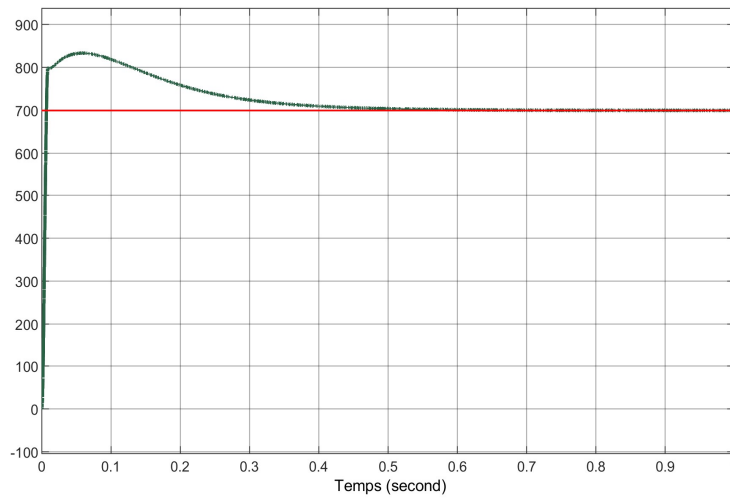
b) Courant injecté par le filtre



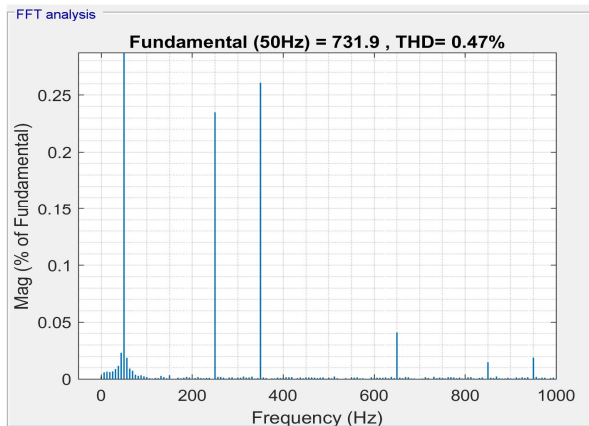
c) Courant de la source après filtrage



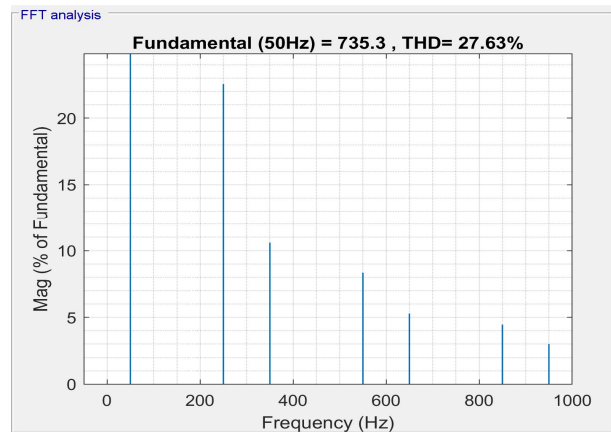
d) Courant de la charge



e) Tension V_{dc} du condensateur



f) Spectre du courant de la source



g) Spectre du courant de la charge

Figure I. 14: Résultats de simulation du FAPP avec l'utilisation de l'hystérésis.

La figure I.14.a présente la courbe de la tension de source des trois phase A, B, C, qui ont une forme sinusoïdale.

Les Figures (I.14.b, I.14.c et I.14.d) montrent respectivement le courant injectée par le FAPP, le courant de la source après filtrage et le courant de la charge d'une seule phase. La Figure I.14.e présente la tension aux bornes du condensateur. Cette dernière est quasi-constante. Les Figures (I.14.f et I.14.g) mettent en évidence l'analyse spectral des harmoniques de courants avant et après le filtrage, on remarque que la valeur du THD diminue après filtrage de 27.63% à 0,47%.

I.6 Limitation des onduleurs à deux niveaux

Les IGBTs ont permis de nombreuses avancées dans les applications d'électronique de puissance en termes de fiabilité et d'efficacité. Les GTO d'un autre côté, présente l'avantage, d'être conçus pour les applications haute tension et courant élevé, mais elle présente des inconvénients, tels que la complexité de la commande, les pertes de puissance et l'augmentation de la charge de tension [14]. Concernant le MOSFET, il convient aux convertisseurs basse tension et haute fréquence [14].

Cependant, en raison des progrès considérables réalisés dans le domaine industriel, la puissance utilisée dans les réseaux électriques est de plus en plus élevée. Ainsi, l'augmentation de la tension, comme pour notre cas où nous avons besoins d'augmenter la tension à une valeur de 5,5 kV, il n'y a aucun composant qui peut le supporter. A cause de tous ces inconvénients, il est impératif d'exploiter la structure dite multi-niveaux. Nous nous proposons d'étudier les topologies à trois niveaux dans le chapitre suivant.

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié un FAPP de type deux niveaux avec ces différentes topologies, et avec l'emploi de deux méthodes d'identification, à savoir : la méthode des puissances instantanées et la méthode utilisant la PLL, nommé méthode SFR. Ensuite, nous avons simulé un FAPP à trois bras avec sa commande. Nous avons terminé ce chapitre par la présentation des différents résultats. Les résultats obtenus montrent que le FAPP à deux niveaux compense mieux les harmoniques de courant de charge, en donnant un THD inférieur a 5%, ce qui est conforme aux normes CEI.

Chapitre II : Étude et commande des différentes topologies d'un FAPP à trois niveaux

II.1 Introduction

Actuellement les onduleurs traditionnels à deux niveaux ne sont pas adaptés aux systèmes avec une puissance élevée car les composants (IGBT ou MOSFET) ne sont pas capables de supporter une tension et un courant élevé [15]. Pour améliorer la tension de sortie des onduleurs, nous pouvons soit apporter des modifications au circuit de l'onduleur lui-même, soit en choisissant une stratégie de contrôle adapté. Plusieurs topologies d'onduleurs ont été développées dans la littérature, telles que les onduleurs à multi-niveaux. Ces derniers permettent de générer une tension de sortie de plusieurs niveaux de tension, en augmentant le nombre de commutateurs qui composent l'onduleur et en multipliant le nombre de sources de courant continu aux extrémités [15].

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à l'étude des onduleurs trois niveaux ainsi que la présentation des différentes topologies et le contrôle MLI de chacune d'elles.

II.2 Structure d'un FAPP utilisant un onduleur trois niveaux

Dans le domaine des onduleurs à trois niveaux, la forme d'onde de sortie est caractérisée par trois niveaux de tension [16] : $+V_{dc}/2$, 0 et $-V_{dc}/2$. Ces onduleurs sont constitués de plusieurs branches, chacune capable de générer une phase de la tension de sortie. Leur objectif est de produire des formes d'onde de tension et de courant de sortie de qualité supérieure par rapport aux convertisseurs traditionnels à deux niveaux. La structure spécifique d'un onduleur à trois niveaux peut varier en fonction de la topologie choisie, telle que le (NPC) ou de type T-bridge ou le condensateur flottant (FC), etc. Les FAPPs à trois niveaux, présentent des avantages significatifs en termes de qualité de tension de sortie et de tension imposée aux interrupteurs réduite. Ces avantages en font une solution intéressante pour les applications de conversion de puissance triphasée de forte puissance [17] [15].

II.3 Différentes topologies d'onduleur trois niveaux

Un onduleur à trois niveaux peut avoir différentes topologies, parmi lesquelles nous examinerons les suivantes :

- Onduleur trois niveaux de type NPC (Neutral Point Clamped).
- Onduleur trois niveaux de type T-bridge.
- Onduleur trois niveaux de type H-bridge (Pont H).
- Onduleur trois niveaux de type FC (condensateur flottant).

II.3.1 Onduleur trois niveaux de type NPC

La première topologie qui est la plus utilisée, est l'onduleur de tension trois niveaux de type NPC. Il a été présentée en premier fois en 1981 par Nabae et Akagi [11] [18] [19]. Le schéma de l'onduleur à trois niveaux de type NPC est présenté sur la figure II.1. Cette structure se compose de trois bras identiques, chaque bras est constitué de quatre interrupteurs en série, plus deux diodes médianes permettant d'avoir le niveau zéro de la tension connectées et liées au

point milieu. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode montée en antiparallèle [20]. Il y a aussi de deux condensateurs en série étant connectés au bus continu, ce qui permettent de créer un point milieu capacitif.

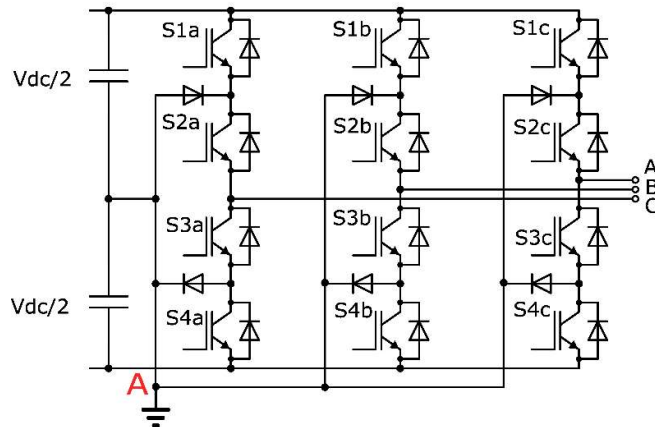


Figure II. 1: Onduleur à trois niveaux de type NPC.

L'onduleur est alimenté par une source de tension V_{dc} , que deux condensateurs de valeurs égales se partagent pour donner deux sources distinctes de tension $V_{dc}/2$ [21].

L'avantage principal de cette structure est le nombre limité de condensateurs utilisés connectés au même bus DC commun. Elle permet également d'augmenter le nombre de niveaux de tension en fonction de la topologie de base [22].

- **Configurations possibles des interrupteurs d'un seul bras d'onduleur**

Les configurations possibles pour un seul bras de 4 interrupteurs sont 16 configurations que l'on peut représenter par un quadruplet de 0 et de 1 suivant l'état des interrupteurs. Cependant, seules trois configurations possibles sont mises en œuvre, On évite les autres configurations car soit, elles court-circuitent le circuit de source continu ou elles ne peuvent pas être connecter à la charge au point neutre des sources de courant continu [23].

- ✓ **Première configuration**

D'après la figure II.1 les interrupteurs S1a, S2a sont passant, et S3a et S4a sont bloqué. La tension de sortie est égale à $V_s = V_{dc}/2$. La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqué est : $V_{s3a} = V_{s4a} = V_{dc}/2$. Ainsi, la Figure II.2 montre la 1ère configuration :

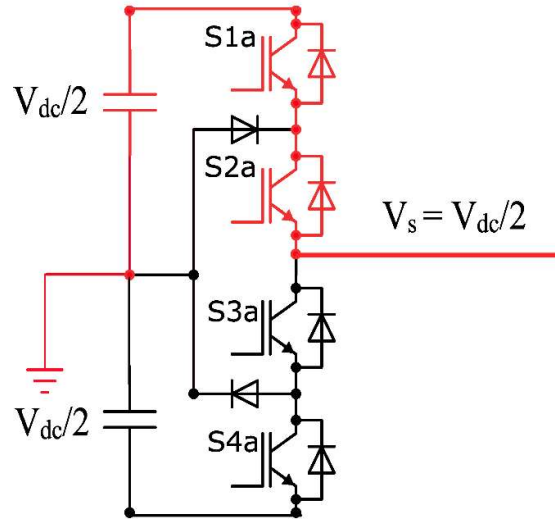


Figure II. 2: État des interrupteurs pour la première configuration.

✓ **Deuxième configuration**

Si S2a, S3a sont passant, tandis que S1a et S4a sont bloqué, alors la charge est bouclée à l'aide d'un interrupteur S2a ou S3a et d'une diode de bouclage. Le point "A" est lié directement au point milieu capacitif. La tension de sortie est alors nul $V_s = 0$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqué est alors égale à : $V_{s1a} = V_{s4a} = V_{dc}/2$ comme le montre la figure II.3.

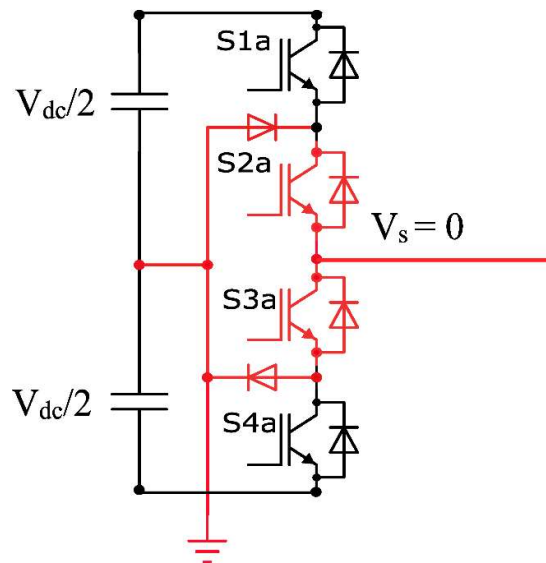


Figure II. 3 : État des interrupteurs pour la deuxième configuration.

✓ **Troisième configuration**

Lorsque S3a et S4a sont passant et S1a et S2a sont bloqué, voir la figure II.4. La valeur de la tension de sortie est alors égale à $V_s = -V_{dc}/2$ et les tensions appliquées aux bornes des interrupteurs bloqué sont égale à : $V_{s1a} = V_{s2a} = V_{dc}/2$

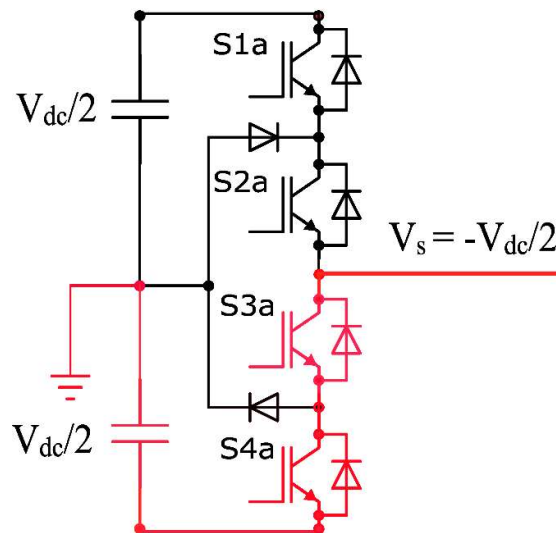


Figure II. 4 : État des interrupteurs pour la troisième configuration.

De ces trois configurations, nous obtenons le tableau II.1 ci-dessous :

L'état des interrupteurs d'un seul bras a	S1a	1	0	0
	S2a	1	1	0
	S3a	0	1	1
	S4a	0	0	1
La valeur de la tension de sortie		$V_{dc}/2$	0	$-V_{dc}/2$

Tableau II. 1: États des interrupteurs de l'onduleur trois niveaux de type NPC.

II.3.2 Onduleur trois niveaux de type T-Bridge

Le deuxième type de topologie est l'onduleur de type T pont en T. Elle a été proposée la première fois en 2010 par Schweizer [24]. Elle utilise quatre interrupteurs bidirectionnels, deux en positions verticales et deux en positions horizontales, qui représentent la lettre « T », d'où le nom « T-bridge ». Sa structure globale est représentée par la Figure II.5. Comme le montre la figure, il comporte 3 bras identiques fournissant des tensions déphasées de 120 degrés entre

eux. La sortie de l'onduleur peut être connectée au pôle positif, au point neutre ou au pôle négatif, et trois valeurs de tension peuvent être obtenues. $+V_{dc}/2, 0$ et $-V_{dc}/2$

Par rapport à la structure de type NPC, la topologie T-bridge, change la position de deux interrupteur pour chaque branche et supprime six diodes, ce qui permet de réduire le coût et la taille de l'onduleur [25] , D'un autre côté, elle combine les avantages de l'onduleur à deux niveaux tels que les faibles pertes, moins de nombre de composants et la simplicité de fonctionnement avec les avantages de l'onduleur à trois niveaux comme les faibles pertes de commutation, le support de la hautes tension et évite la nécessité de passer brusquement d'un niveaux de tension à l'autre ainsi que l'augmentation de la durée de vie des composants [26].

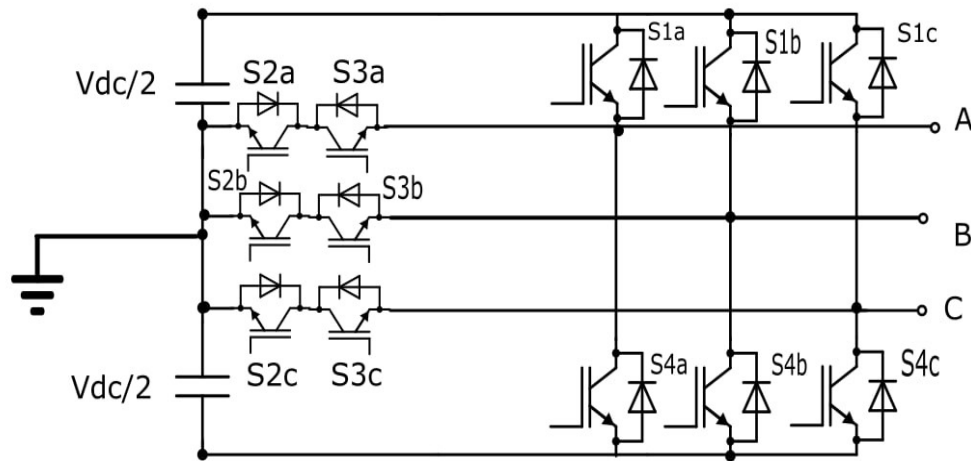


Figure II. 5 : Onduleur à trois niveaux de type T.

Pour avoir une tension positive nous fermons les interrupteurs S1a et S2a, pour une tension négative nous fermons S3a et S4a, et S2a et S3a pour une tension nulle. Nous obtenons ainsi le tableau suivant qui montre l'état de commutation et la tension à la sortie de l'onduleur :

L'état des interrupteurs d'un seul bras	S1a	1	0	0
	S2a	1	1	0
	S3a	0	1	1
	S4a	0	0	1
La valeur de la tension de sortie		$V_{dc}/2$	0	$-V_{dc}/2$

Tableau II. 2: États des interrupteurs de l'onduleur trois niveaux de type T-bridge.

• **Séquence de commutation indépendante du courant**

✓ **Le passage de P → 0 lorsque le courant prend le sens positif $I_{out} > 0$ on a :**

- 1) S1a et S2a fermé, S3a et S4a ouvert.
- 2) Lorsque l'ouverture de S1a, le courant commute naturellement sur S2a et D3.
- 3) Lorsque S3a est fermé, alors le courant commute vers le neutre après la fermeture.

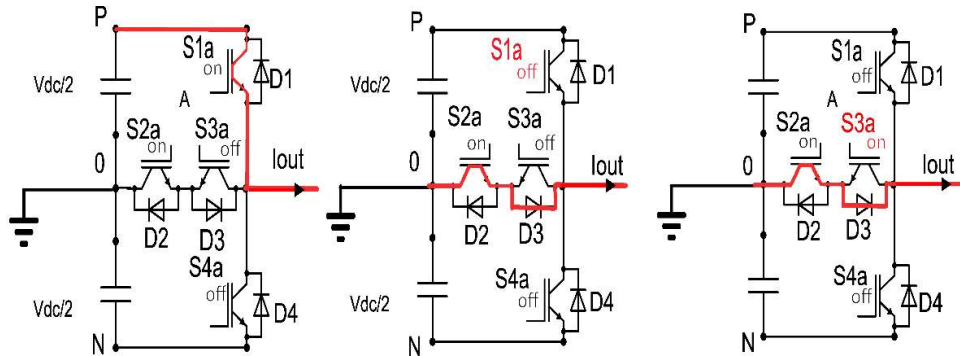


Figure II. 6: Passage du courant dans les interrupteurs selon le sens positif.

✓ **Le passage de 0 → P lorsque le courant prend le sens négatif $I_{out} < 0$ on a :**

- 1) S1a et S2a fermé, S3a et S4a ouvert.
- 2) L'ouverture de S1a, le courant commute naturellement sur S2a et D3.
- 3) S3a fermé le courant commute sur S3a et D2 vers le neutre après la fermeture.

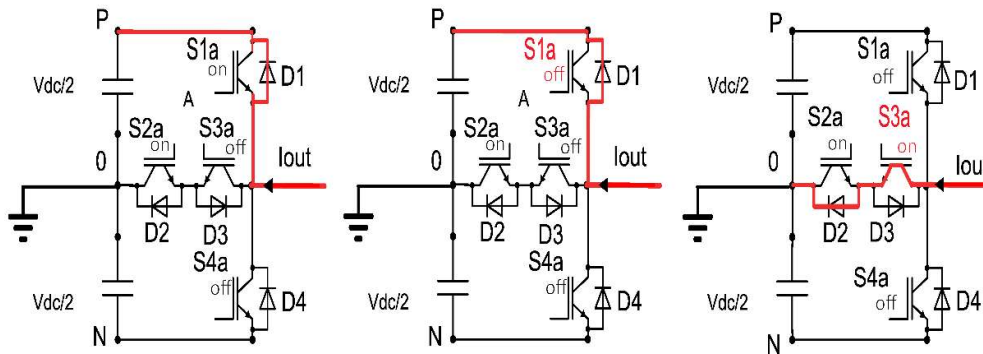


Figure II. 7 : Passage du courant dans les interrupteurs selon le sens négatif.

II.3.3 Onduleur trois niveaux de type H bridge

La troisième topologie est l'onduleur en pont H à trois niveaux. Elle a été développée en 1975 [27]. Sa première utilisation remonte à 1988 [27]. Elle a été utilisée pour stabiliser les plasmas. Il se compose de plusieurs ponts en H connectés en série, chaque pont contenant quatre interrupteurs de puissance, généralement des transistors MOSFET ou IGBT.

Ces branches de pont en H sont organisées pour produire trois niveaux de tension de sortie différents, comme le montre la Figure II.8. Le contrôle de puissance du pont H offre de la flexibilité. L'efficacité énergétique est également améliorée. Ces caractéristiques permettent une régulation précise de la tension et du courant. Les applications nécessitant un contrôle précis préfèrent cette solution. [28], [29].

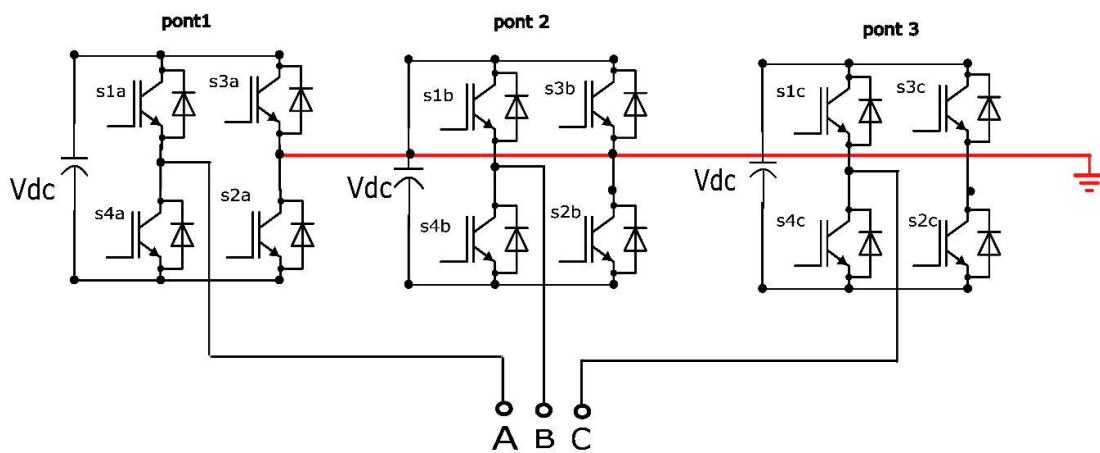


Figure II. 8: Onduleur à trois niveaux de type H bridge.

Le principe fondamental de fonctionnement de l'onduleur du pont H réside dans la gestion des commutateurs pour commander la tension de sortie V_s et la direction du courant. En analysant une configuration typique où une tension d'entrée V_{dc} est appliquée à l'onduleur, on observe alors que les commutateurs peuvent être activés de différentes manières pour permettre la circulation du courant dans la charge connectée. Nous avons ainsi :

- **Une configuration haute tension** : Lorsque les commutateurs supérieurs sont actifs et les commutateurs inférieurs sont inactifs, la tension de sortie V_s est positive par rapport à la référence de terre. Le courant circule de la source d'alimentation à travers la charge.
- **Une configuration basse tension** : Lorsque les commutateurs supérieurs sont inactifs et que les commutateurs inférieurs sont actifs, la tension de sortie V_s devient négative par rapport à la référence terrestre. Le courant circule ensuite de la charge vers la source d'alimentation.
- **Une configuration neutre** : Le courant ne circule pas dans les circuits lorsque tous les interrupteurs sont désactivés, alors $V_s = 0$.

La séquence de commutation des commutateurs pour passer d'une configuration à une autre est géré par un circuit de commande qui génère des signaux appropriés pour contrôler les transistors (MOSFET ou IGBT) de l'onduleur [30] , [31].

- **Configurations possibles des interrupteurs d'un seule pont d'onduleur H-Bridge**
 - ✓ **Première configuration**

Si S1a et S2a sont passant et S3a et S4a sont bloquée comme le montre la figure II.9, alors la tension de sortie $V_s = V_{dc}$.

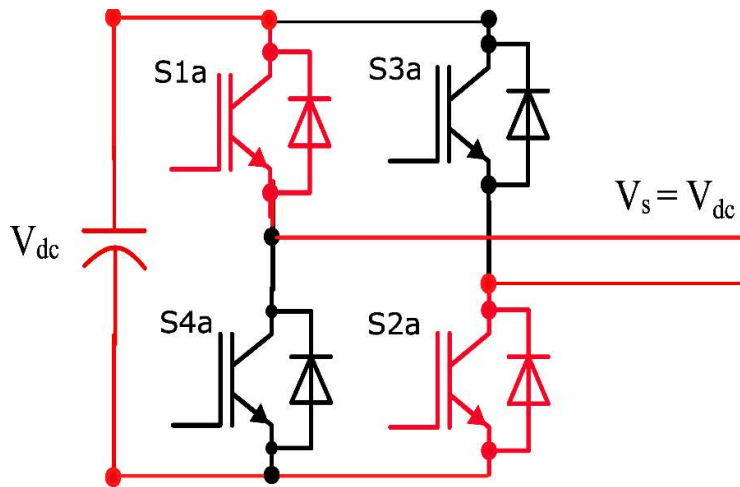


Figure II. 9: État des interrupteurs pour la première configuration.

- ✓ **Deuxième configuration**

Si S1a et S3a sont passant et S2a et S4a sont bloquée comme le montre la figure II.10, alors la tension de sortie $V_s=0$

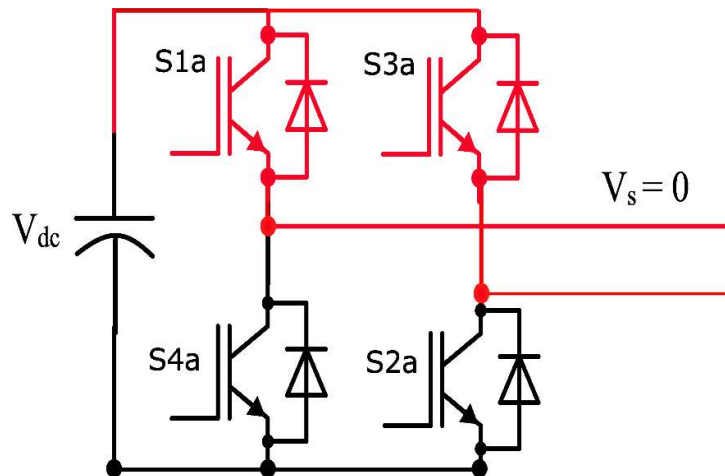


Figure II. 10: État des interrupteurs pour la deuxième configuration.

✓ **Troisième configuration**

Si S2a et S4a sont passant et S1a et S3a sont bloquée, comme le montre la figure II.11, alors la tension de sortie $V_s = 0$

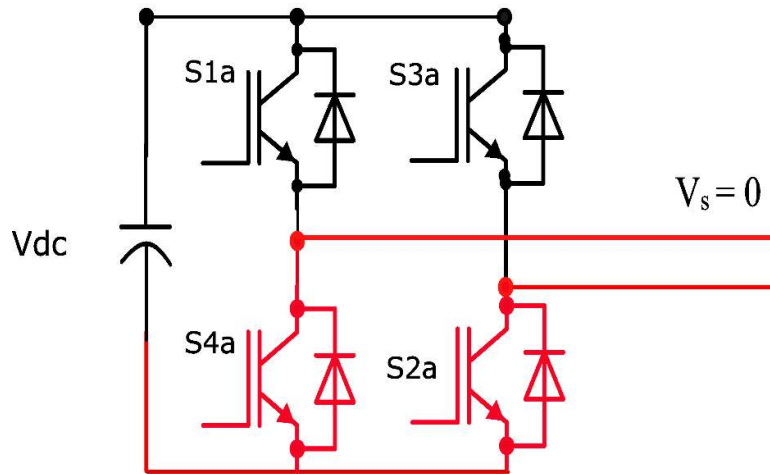


Figure II. 11: État des interrupteurs pour la troisième configuration.

✓ **Quatrième configuration**

Si S3a et S4a sont passant et S1a et S2a sont bloquée, alors la tension de sortie $V_s = -V_{dc}$ (figure II.12).

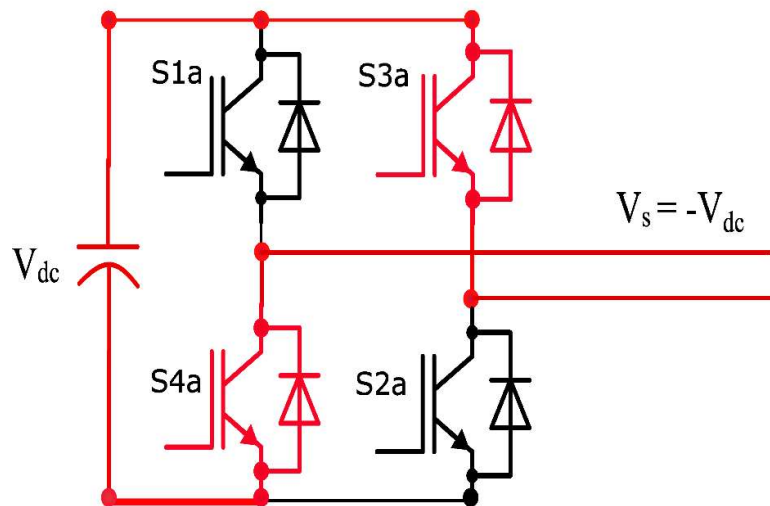


Figure II. 12: État des interrupteurs pour la quatrième configuration.

Le tableau suivant montre les configurations de cette topologie.

L'état des interrupteurs d'un seul pont	S1a	1	1	0	0
	S2a	1	0	1	0
	S3a	0	1	0	1
	S4a	0	0	1	1
La valeur de la tension de sortie		V_{dc}	0	0	$-V_{dc}$

Tableau II. 3: États des interrupteurs de l'onduleur trois niveaux de type H-bridge.

II.3.4 Onduleur trois niveaux de type FC

L'onduleur à capacité flottante (FC), connu sous le nom de Flying Capacitor, a été développé au début des années 1990 et un brevet avait été déposé par Henri Foch et Thierry Meynard au laboratoire LAPLACE [32].

Ce convertisseur repose sur la disposition en série de cellules de commutation, chacune équipée de deux interrupteurs complémentaires. Ces cellules sont reliées entre elles par une source de tension, avec des condensateurs intermédiaires qui sont connectés entre elles, comme le montre la figure II.13. Ces condensateurs fournissent les niveaux de tension intermédiaires nécessaires au fonctionnement du convertisseur multi-niveau [33].

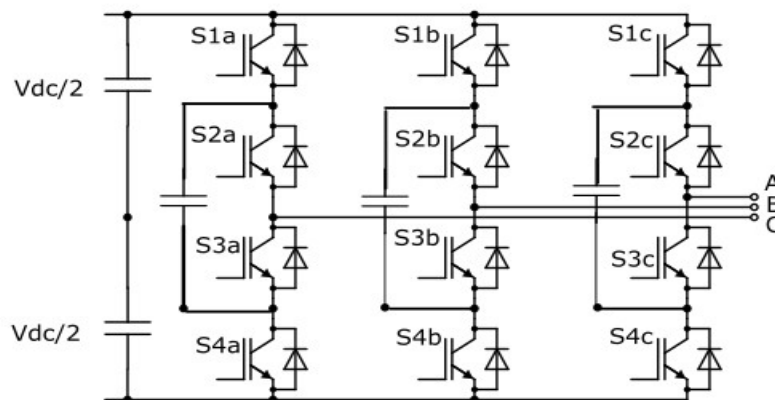


Figure II. 13: Onduleur à trois niveaux de type FC.

Cette configuration à trois niveaux confère des avantages tels que la réduction des harmoniques et des distorsions de la tension de sortie, améliorant ainsi la qualité de l'alimentation électrique. En outre, elle offre un meilleur rendement que les onduleurs

conventionnels à deux niveaux. Ces avantages en font une solution convaincante pour les applications d'électronique de puissance et de systèmes d'alimentation [34].

- **Les configurations possibles des interrupteurs d'un seul bras d'onduleur FC**

- ✓ **Première configuration**

Lorsque S1a et S2a est passant et S3a et S4a sont bloquée, comme montre la figure II.14, alors la tension de sortie $V_s = V_{dc}/2$.

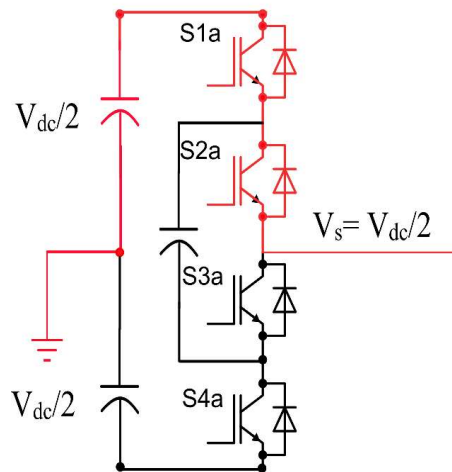


Figure II. 14: État des interrupteurs pour la première configuration.

- ✓ **Deuxième configuration**

Lorsque S3a et S2a sont passant et S1a et S4a sont bloquée comme le montre la figure II.15, alors la tension de sortie $V_s = 0$.

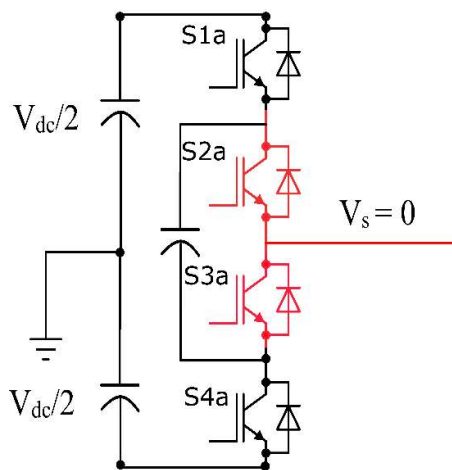


Figure II. 15: État des interrupteurs pour la deuxième configuration.

✓ **Troisième configuration**

Lorsque S3a et S4a sont passant et S1a et S2a sont bloquée comme le montre la figure II.16, alors la tension de sortie $V_s = -V_{dc}/2$.

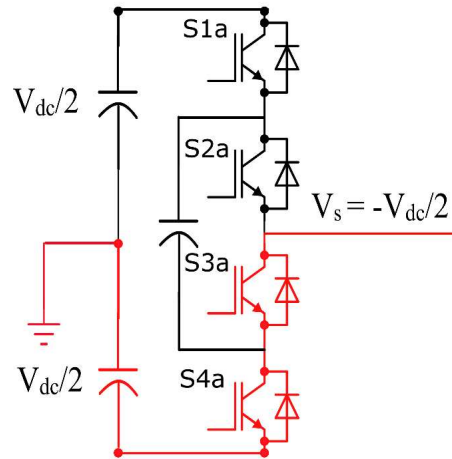


Figure II. 16 : État des interrupteurs pour la troisième configuration.

Le tableau suivant montre les configurations de cette topologie.

L'état des interrupteurs d'un seul bras	S1a	1	0	0
	S2a	1	1	0
	S3a	0	1	1
	S4a	0	0	1
La valeur de la tension de sortie		$V_{dc}/2$	0	$-V_{dc}/2$

Tableau II. 4: États des interrupteurs de l'onduleur trois niveaux de type FC

II.4 MLI pour les différentes topologies

Pour que l'onduleur à trois niveaux fonctionne correctement, il est important de gérer correctement les commutateurs IGBT. Cela permet un contrôle précis des niveaux de tension à la sortie. Le principe de base implique de créer des signaux de référence de tension, souvent sous la forme d'ondes sinusoïdales. Ces signaux sont ensuite comparés à une forme d'onde porteuse triangulaire à haute fréquence. Cette comparaison détermine combien de temps les commutateurs de chaque branche doivent être activés. Quand le signal de référence dépasse la forme de l'onde porteuse, les commutateurs supérieurs sont activés, tandis que les

commutateurs inférieurs sont désactivés. Cela laisse passer le courant dans la branche correspondante. Et le contraire, lorsque le signal de référence est en dessous de la forme d'onde porteuse, les commutateurs inférieurs s'activent et les commutateurs supérieurs se désactivent. En ajustant le temps d'activation des commutateurs, nous pouvons régler la tension de sortie avec précision [30].

II.4.1 Commande MLI de l'onduleur H bridge

La régulation de la tension de sortie implique quatre interrupteurs (S1, S2, S3 et S4). Pour cela, la commande MLI utilise des signaux PWM. Elle compare les signaux de référence de tension à une forme d'onde porteuse triangulaire à haute fréquence. Quand le signal de référence dépasse la forme d'onde porteuse, les interrupteurs appropriés S1 ou S2 s'activent. Les autres (S3 et S4) se désactivent. Au contraire, si le signal de référence est inférieur à la forme d'onde porteuse, les interrupteurs correspondants S3 ou S4 s'activent, tandis que les autres S1 et S2 se désactivent. Ce processus permet un contrôle précis de la tension de sortie. Il ajuste sélectivement l'état des interrupteurs en fonction du signal de référence et de la forme d'onde porteuse. Ainsi, il assure une régulation efficace de la tension de sortie de l'onduleur [35].

Les signaux de contrôle des commutateurs de l'onduleur du pont H sont obtenus à partir des intersections de trois signaux de référence sinusoïdaux déphasés de 120° les uns par rapport aux autres, avec un signal triangulaire. Les figures suivantes montrent la commande MLI du pont H et les signaux correspondants.

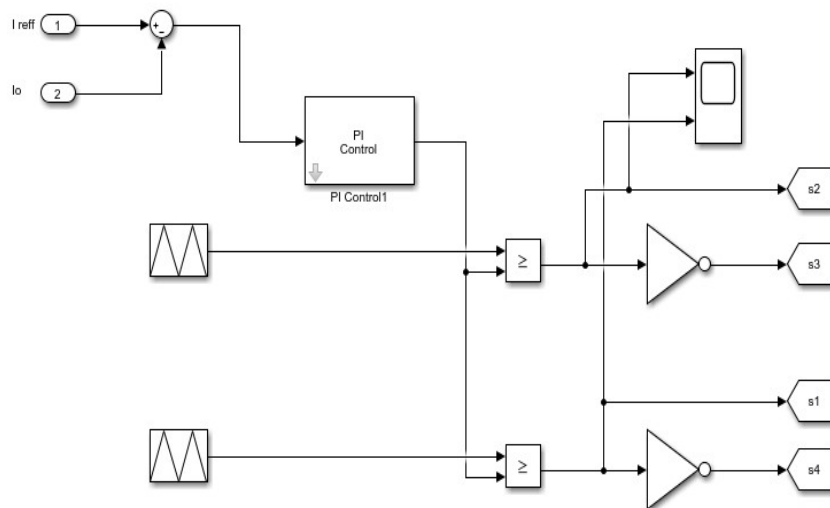


Figure II. 17: Commande MLI du H-bridge

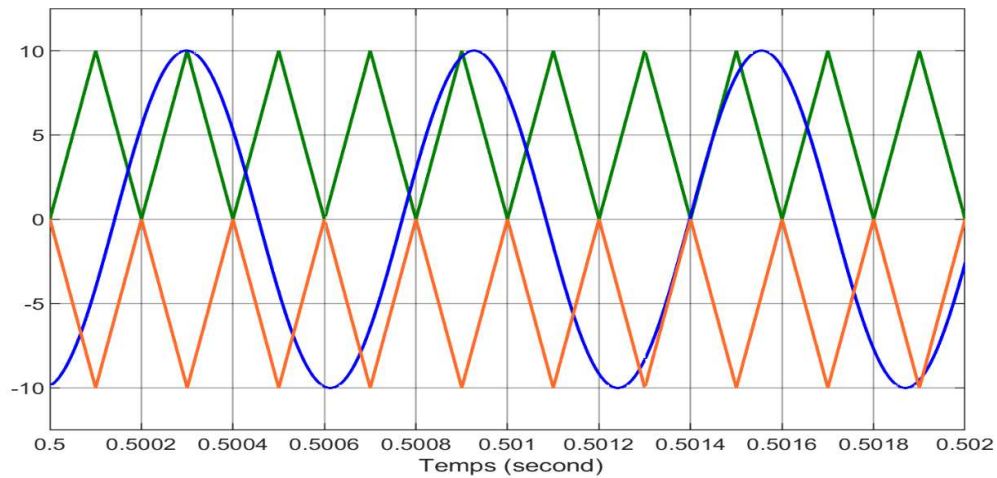


Figure II. 18: Signaux de la MLI-sinusoidale multi porteuses de l'onduleur H-bridge.

II.4.2 Commande MLI de l'onduleur T bridge

Avec une simple comparaison entre le signal de référence et les porteuses, on peut générer le signal de commande (figure II.19) [36]. Les figures suivantes montrent la commande MLI du pont en T et les signaux correspondant.

Le schéma général de notre simulation sera présenté dans le dernier chapitre 3.

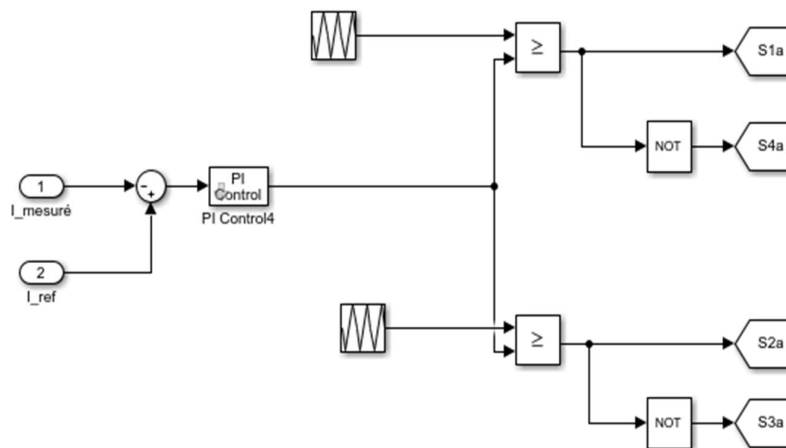


Figure II. 19 : Commande MLI du T-bridge.

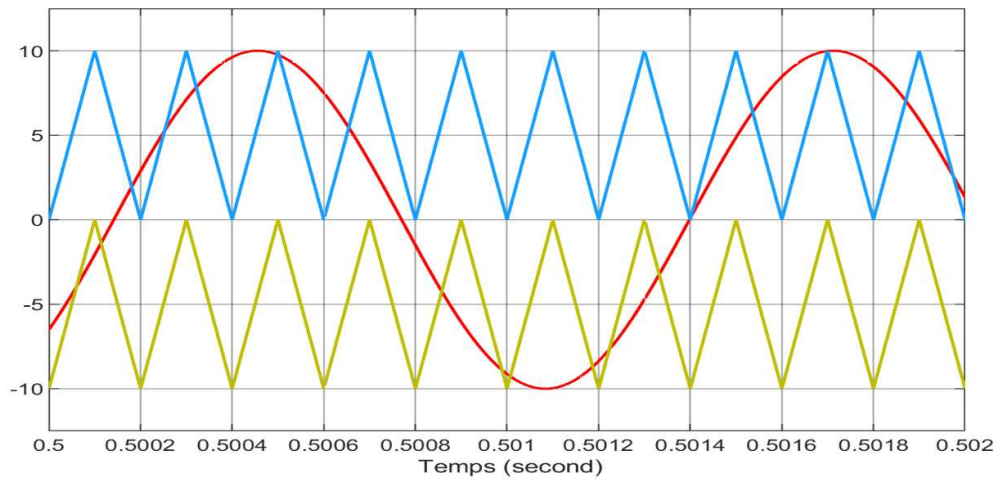


Figure II. 20: Signaux de la MLI-sinusoidale multi porteuses de l'onduleur de type T Bridge.

II.4.3 Commande MLI de l'onduleur NPC et FC

La MLI de l'onduleur NPC est la même que celui de l'onduleur FC. Cette technique est basée, dans son principe, sur la comparaison du signal de référence de courant à un double forme d'onde porteuse à haute fréquence, c'est la modulation sinusoidale à double triangle. Lorsque le signal de référence est supérieur à la forme d'onde porteuse de signal triangle, les deux interrupteurs S1a et S1b sont activés, tandis que les deux autres interrupteurs S1e et S1f sont désactivés.

Les figures suivantes montrent la commande MLI de l'onduleur NPC ou FC et les signaux correspondant.

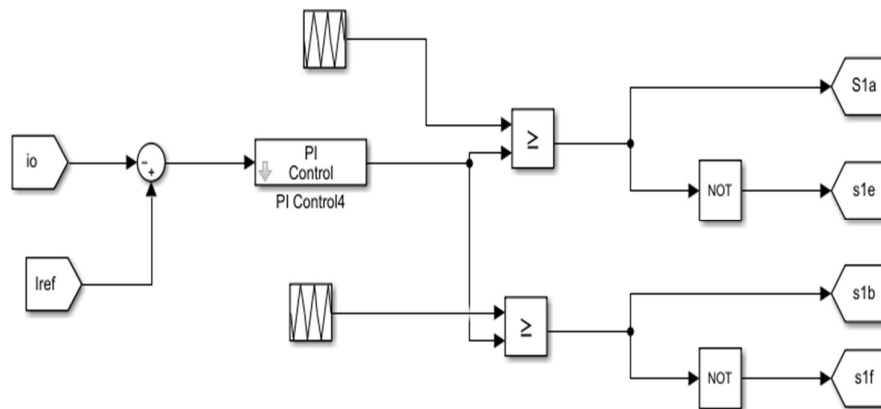


Figure II. 21 : Commande MLI du NPC et FC.

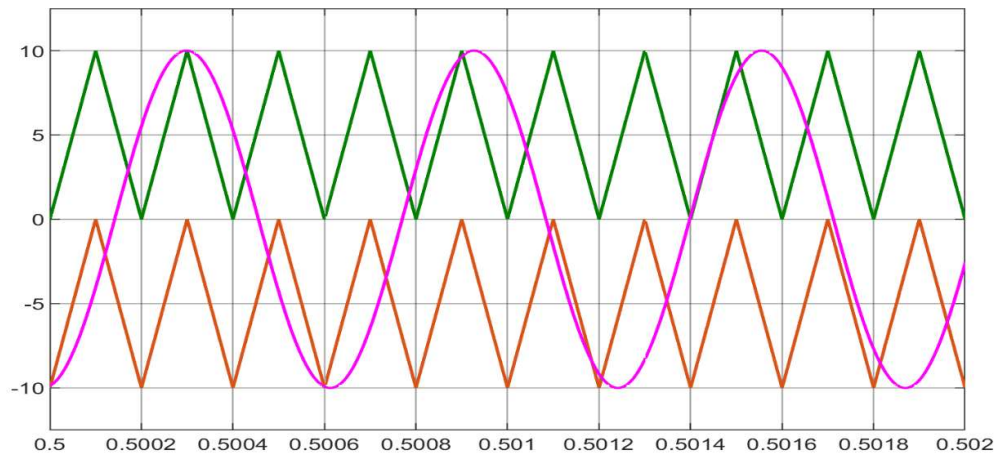


Figure II. 22: Signaux de la MLI-sinusoïdale multi porteuses de l'onduleur NPC et FC.

II.5 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre nous avons présenté le principe de fonctionnement du FAPPs à trois niveaux comme une solution de dépollution du réseau électrique pour la moyenne tension et des courants élevés, avec ces différentes topologies à savoir l'onduleur du type T-bridge, H-bridge, NPC et le FC. Nous avons également cité les points positifs obtenues pour chaque topologie. Nous avons aussi présenté les configurations possibles des interrupteurs pour chaque topologie. En dernier, nous avons présenté le principe de la commande MLI pour chaque topologie étudiée, on se propose d'effectuer une série de simulation pour les différentes topologies étudiées.

Chapitre III : Simulation des différents FAPPs trois niveaux

III.1 Introduction

Après la présentation que nous avons fait dans les chapitres précédents concernant les FAPPs 3 niveaux, nous allons maintenant présenter les stratégies de commandes utiliser dans les simulations, lorsque nous connectons le FAPP 3 niveaux à un réseau électrique ayant un niveau de tension qui égale a 5,5 KV. Nous ferons une simulation pour chacune des topologies décrites au chapitre II. Puis nous présenterons et interpréterons les résultats de simulation, suivie d'une étude comparative.

III.2 Étude de notre système

La figure III.1 illustre le schéma d'un FAPP à trois niveaux. Il est composé d'un réseau électrique triphasé alimentant un pont redresseur. Un FAPP à commande directe dont la stratégie de commande utilisé et de type $d-q$ sera utilisé.

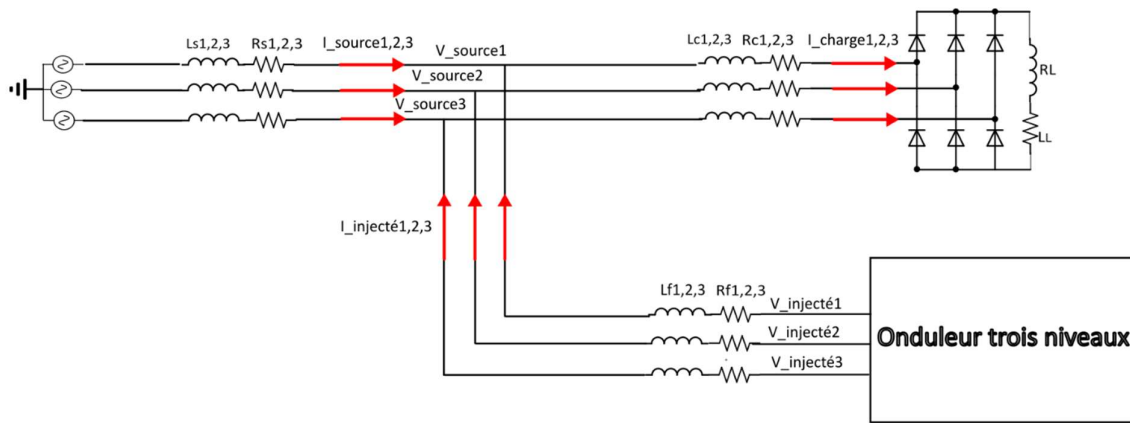


Figure III. 1: FAPP à trois niveaux

Pour pouvoir réussir à simuler un FAPP 3 niveaux, il était important de suivre des étapes pour obtenir aucune erreur. Ces étapes sont des étapes que nous avons suivi lors des simulations. Ainsi, la première partie de notre simulation, a commencer par la simulation d'un FAPP deux niveaux, relié à un réseau électrique triphasé à trois fils, de 230 V alimentant une charge non linéaire de type (PD3). Nous avons utilisé au début un FAPP dont à ces bornes cotées continue, a une source de tension continue de 700V. Après cela nous avons fait la commande directe utilisant la méthode des puissances instantanées et la MLI pour ce type d'onduleur. Après que la simulation a fonctionnée correctement avec résultats satisfaisant, nous avons remplacé la source continue par un condensateur et nous lui avons ajouté une régulation en utilisant un régulateur de type PI. Ce dernier va réguler la tension continue du condensateur.

Ensuite nous avons remplacé l'onduleur deux niveaux par un onduleur à trois niveaux, nous avons également remplacé la commande MLI pour chaque topologie, afin qu'il fonctionne correctement. Au début nous avons alimenté le FAPP trois niveaux par une source continue et lorsque ce dernier lors des simulations a fonctionné correctement, nous l'avons remplacé par un condensateur avec une régulation (un régulateur de type PI).

Lorsque les simulations nous ont donné des résultats satisfaisants. Nous avons augmenté la tension du réseau de 230V à 5500 V. Ce qui a impliqué le changement des paramètres du FAPP. Après cela nous avons amélioré notre commande en remplaçant la stratégie de commande utilisant les puissances instantanées par la méthode du référentiel synchrone utilisant une PLL.

Remarque : Pour les simulations qui suit nous allons présenter en première la commande du référentiel liée au synchronisme qui sera appliqué à toutes les topologies du FAPP 3 niveaux. Ensuite, nous allons présenter les résultats de simulations de chacune des topologies du FAPP 3 niveaux.

La figure suivante présente le schéma de la stratégie de commande du référentiel liée au synchronisme ($d-q$)

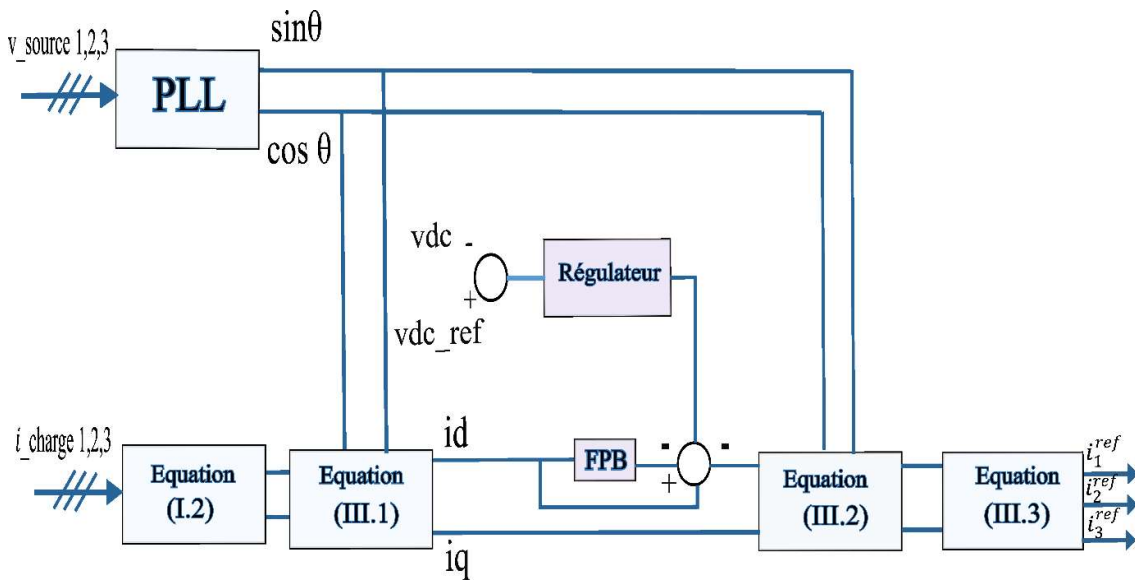


Figure III. 2: Commande basé sur la méthode du référentiel lié au synchronisme ($d-q$).

Dans le chapitre I, nous avons d'écrits cette commande et nous avons dit que lorsque nous utilisons une PLL nous allons obtenir :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (III.1)$$

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

Nous obtenons ainsi après l'utilisation d'un filtre passe haut, puis faire la transformée inverse pour obtenir une transformation de ($d-q$) vers ($\alpha-\beta$), l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^{ref} \\ i_\beta^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (III.2)$$

En appliquant ensuite la transformé inverse de Concordia nous obtenons alors :

$$\begin{bmatrix} i_1^{ref} \\ i_2^{ref} \\ i_3^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha^{ref} \\ i_\beta^{ref} \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

III.3 Simulation des FAPPs à trois niveaux

Nous allons maintenant avant de présenter les résultats de simulation de chacun des topologies, présenter les paramètres de simulation de chaque élément utiliser dans nos simulations. Ces paramètres seront identiques à chaque topologie. Ainsi, nous avons pour :

- ✓ Le réseau électrique : $f = 50 \text{ HZ}$, $V_{source} = 5500V$, $R_{source} = 10^{-4} \Omega$ et $L_{source} = 5 \times 10^{-4} H$
- ✓ Le pont de redresseur : $R_{charg} = 10^{-4} \Omega$, $L_{charge} = 5 \times 10^{-4} H$, $R_L = 50 \Omega$ et $L_L = 5 \times 10^{-4} H$
- ✓ Le FAPP : $R_{filtre} = 5 \times 10^{-4} \Omega$, $L_{filtre} = 5 \times 10^{-4} H$, $L_{filtre}^{NPC} = 1 \times 10^{-2} H$ $C1 = C2 = 0.5 \times 10^{-3} F$

III.3.1 FAPP de type NPC utilisant la commande (p-q)

Le schéma de simulation de notre FAPP trois niveaux utilisant la commande p-q, qui est illustré sur la figure III.3. Elle est composée d'un réseau électrique triphasé alimentant un pont redresseur. Un FAPP trois niveaux de type NPC est connecté à ce même réseau en parallèle.

Les figures 4 à 7 présentent les schémas de simulation de notre système en détail

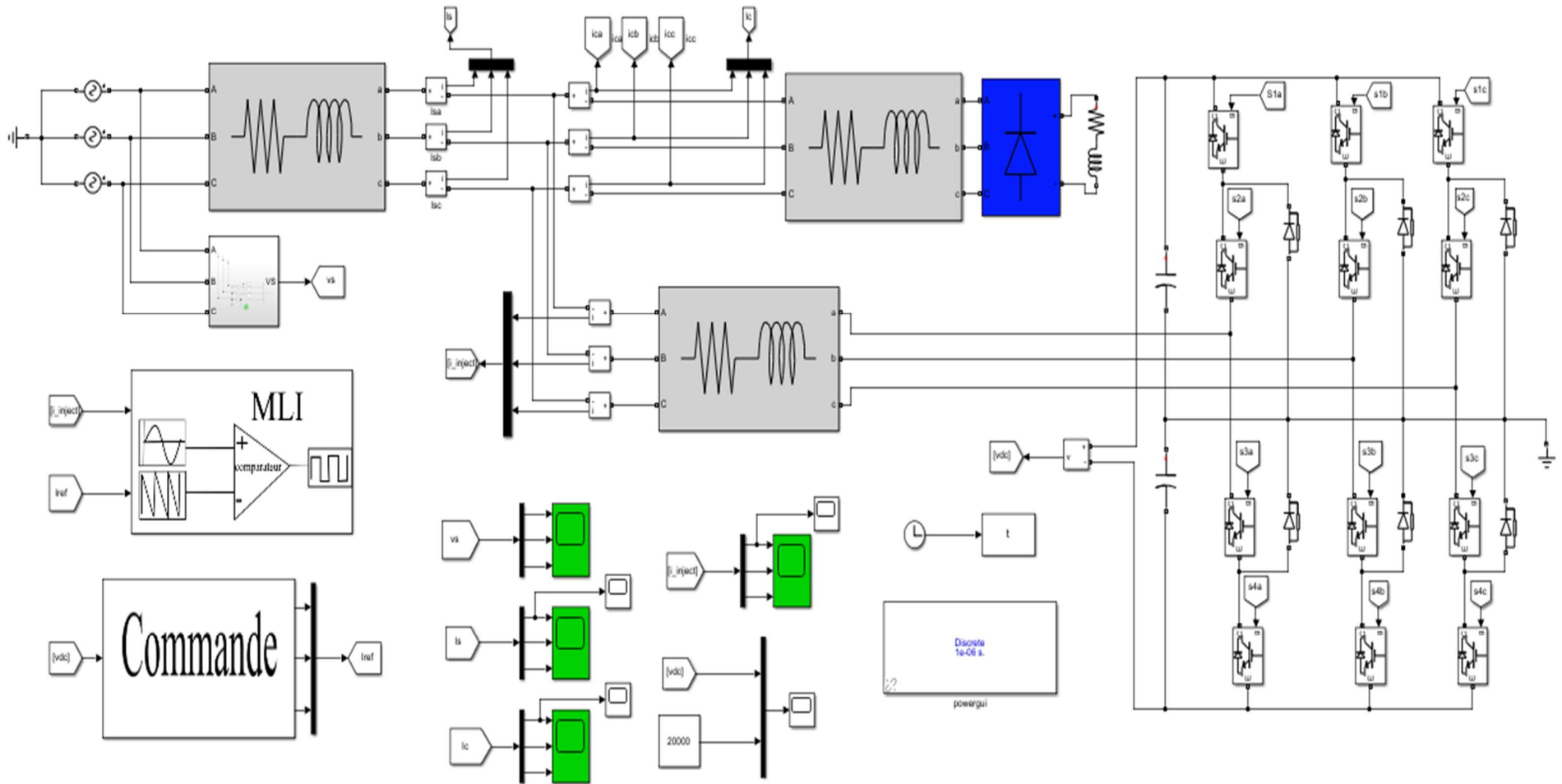


Figure III. 3:Schéma générale de la simulation du FAPP 3 niveaux type NPC.

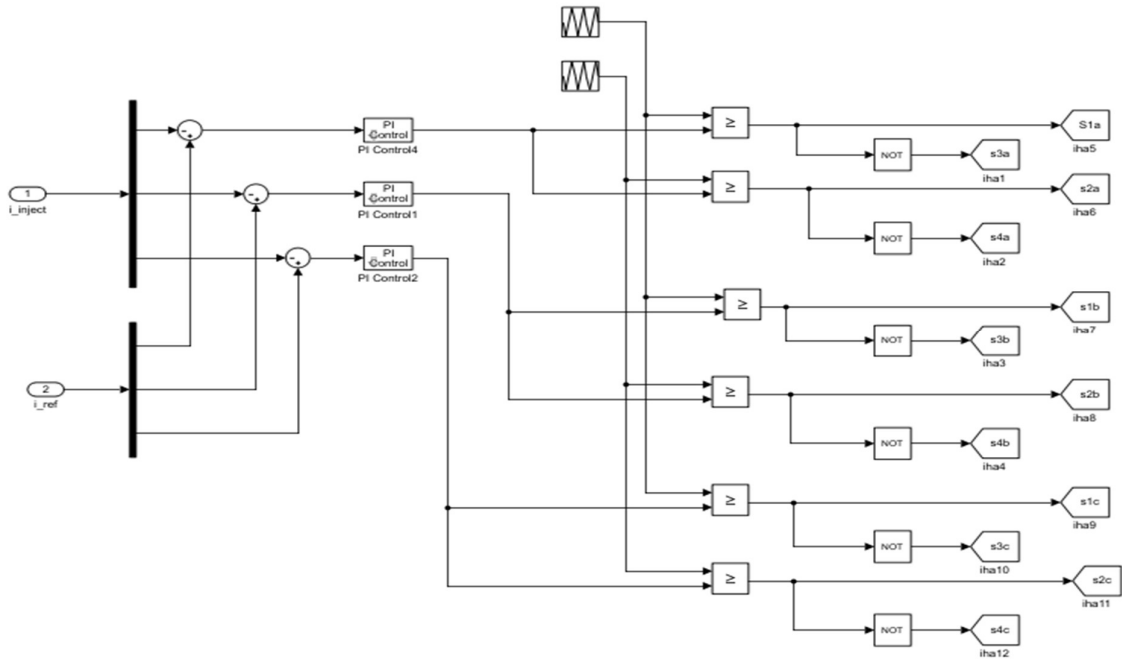
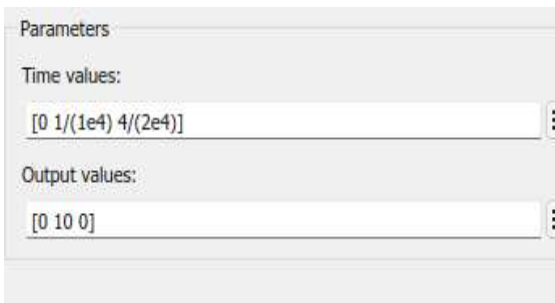


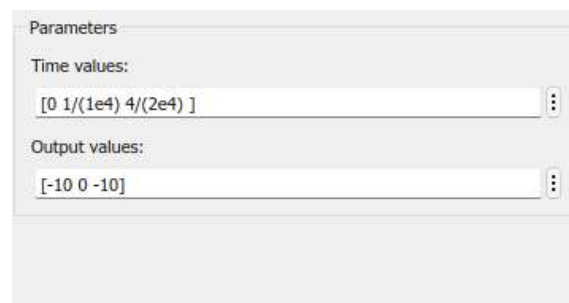
Figure III. 4: Commande MLI de l'onduleur NPC à trois niveaux.



a) Paramètre de PI.



b) Paramètre de la porteuse1.



c) Paramètre de la porteuse2.

Figure III. 5: Paramètre de simulation.

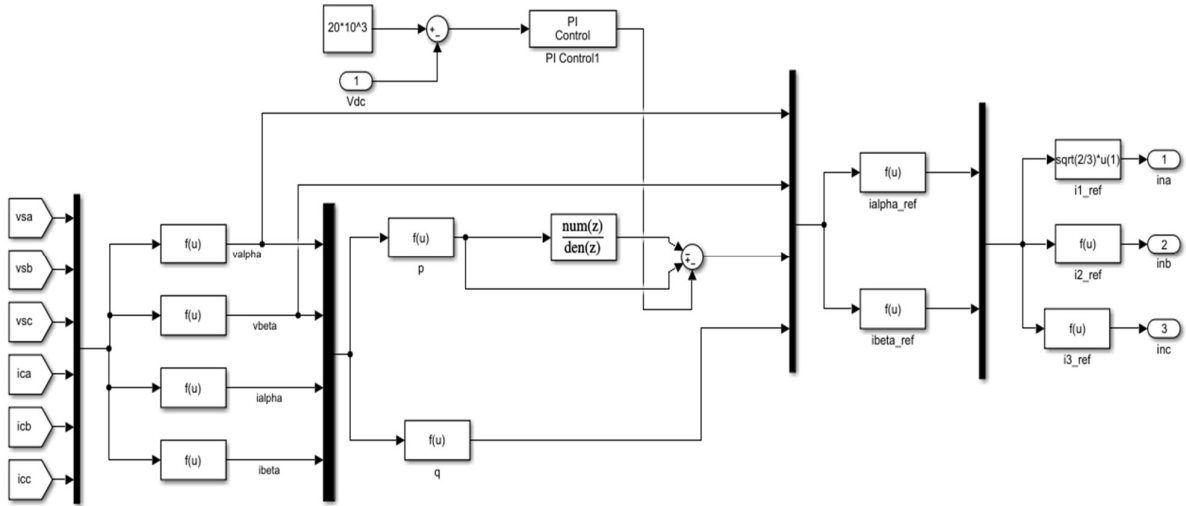


Figure III. 6: Schéma de la commande directe basée sur la méthode des puissances instantanées.

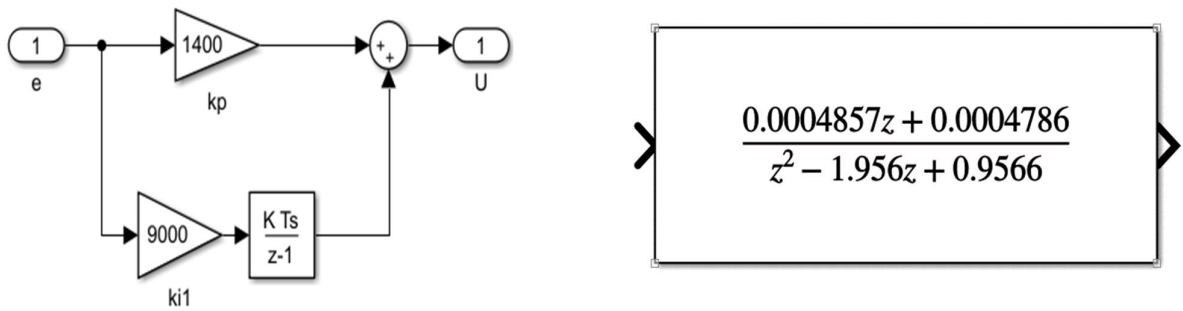
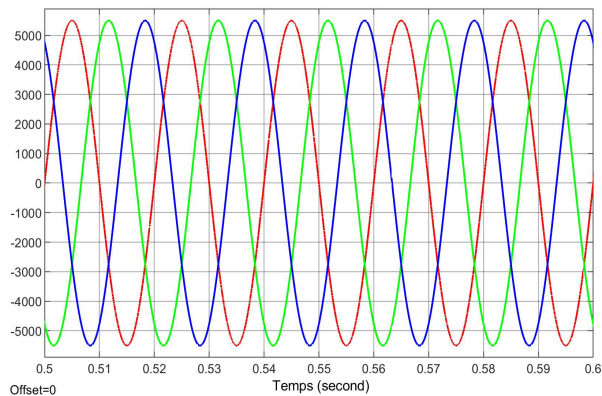
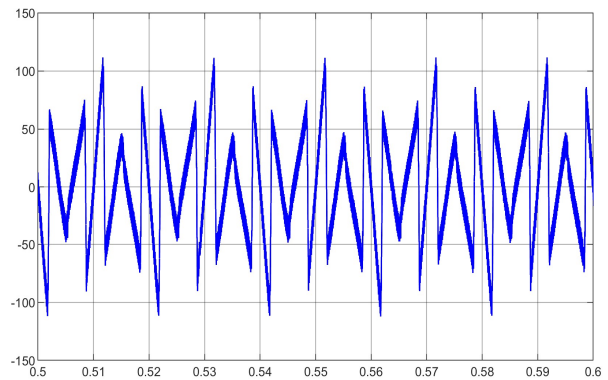


Figure III. 7 : Paramètre de la commande.

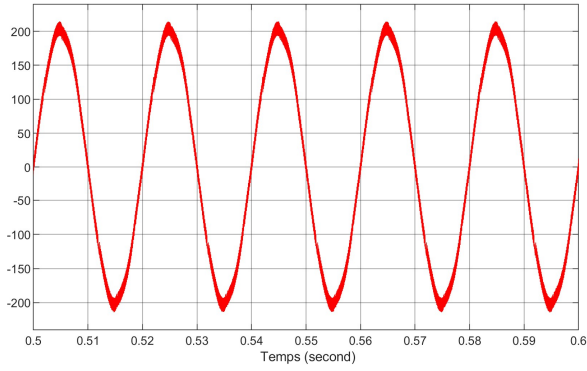
Après avoir fait la simulation, nous obtenons les figures suivantes :



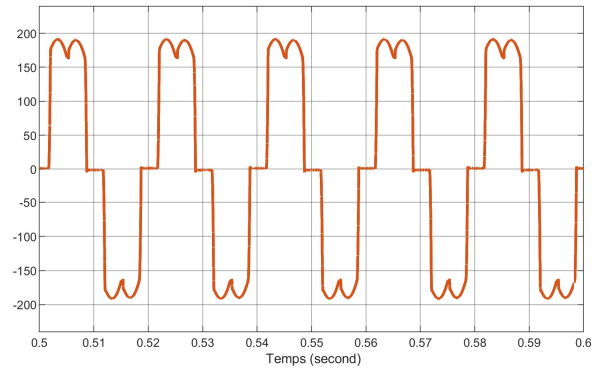
a) Tensions aux bornes de la source.



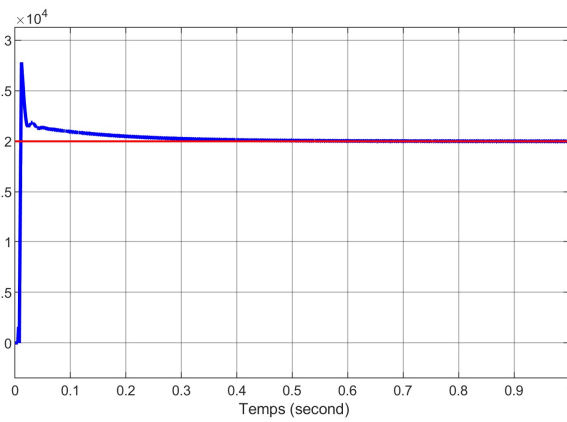
b) Courant injecté par le filtre.



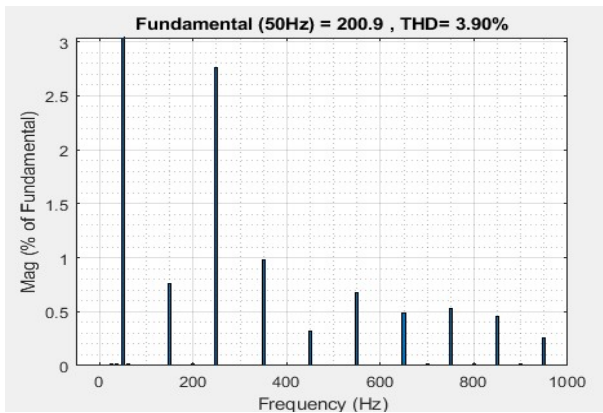
c) Courant de la source après filtrage.



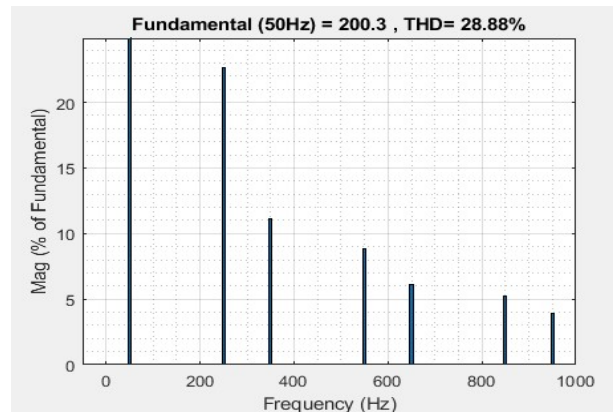
d) Courant de la charge.



e) Tension V_{dc} du condensateur.



f) Spectre harmonique du courant de la source.



g) Spectre harmonique du courant de la charge.

Figure III. 8 : Résultat de simulation du FAPP 3 niveaux type NPC par l'utilisation de la méthode des puissances instantanées.

La figure III.8.a présenté les courbes de la tension de source des trois phase A, B, C, qui sont d'une forme sinusoïdale.

Les figures (III.8.b, III.8.c et III.8.d) montrent respectivement le courant injectée par le FAPP, le courant de la source après filtrage et le courant de charge d'une seule phase. La figure III.8.e illustre la tension aux bornes du condensateur. Cette dernière est quasi-constante car la régulation de la tension V_{dc} fonctionne correctement. Les figures (III.8.f et III.8.g) indiquent l'analyse spectral des harmoniques des courants avant et après le filtrage. Nous remarquons que la valeur du THD diminue après le filtrage de 28.95% à 4,35 %. Le FAPP a ainsi jouer son rôle et nous donne un bon résultat.

III.3.2 FAPP de type NPC utilisant la commande ($d-q$)

Maintenant nous allons présenter le schéma de simulation de notre FAPP trois niveaux utilisant la commande ($d-q$), illustré sur la figure III.9.

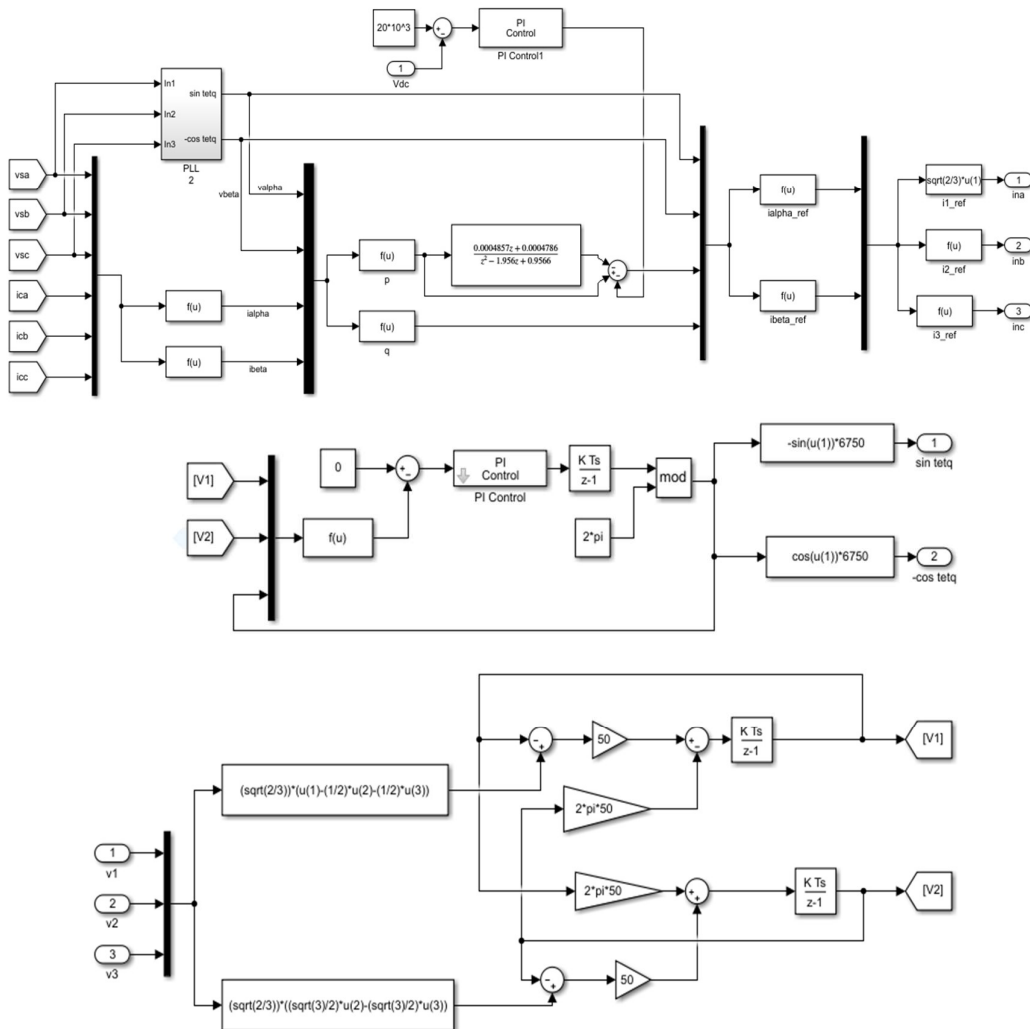
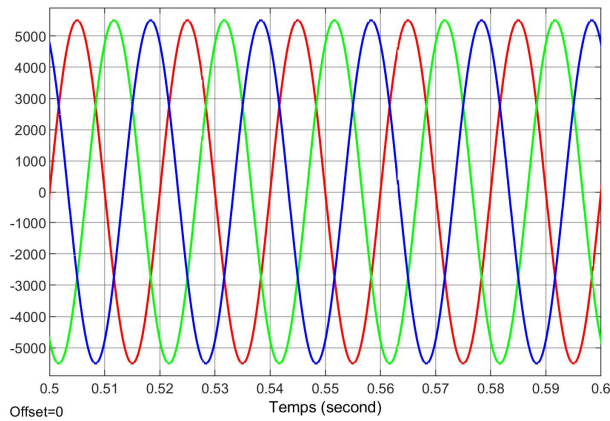
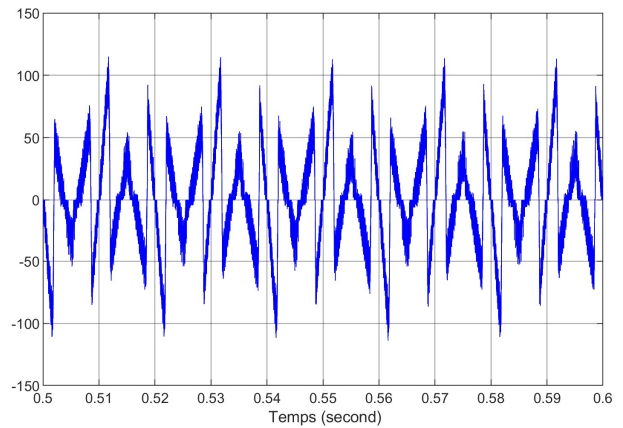


Figure III. 9 : Schéma de la commande directe basée sur la méthode du référentiel lié au synchronisme

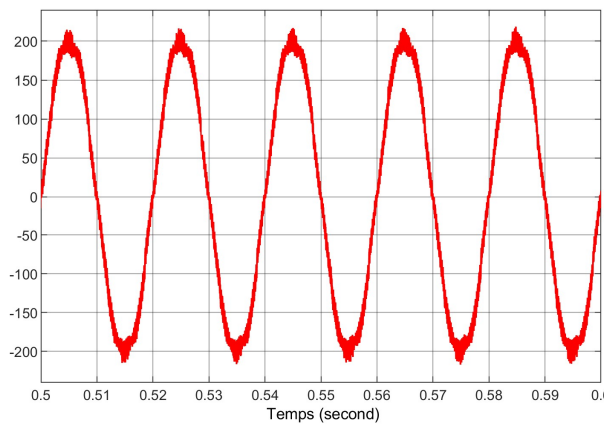
Après avoir fait la simulation, nous obtenons les figures suivantes :



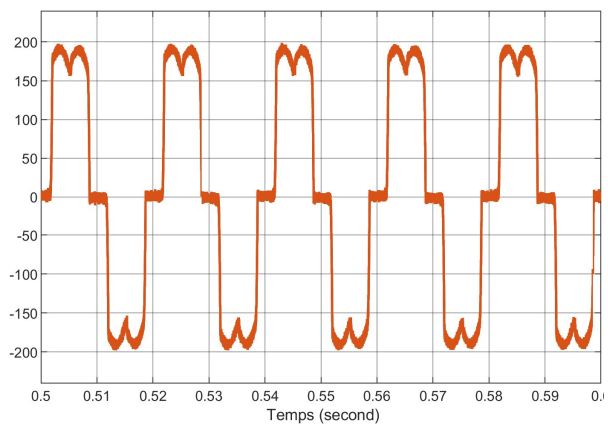
a) Tensions aux bornes de la source.



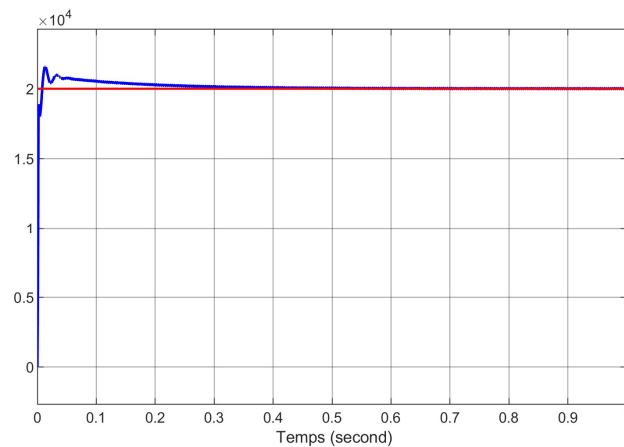
b) Courant injecté par le filtre.



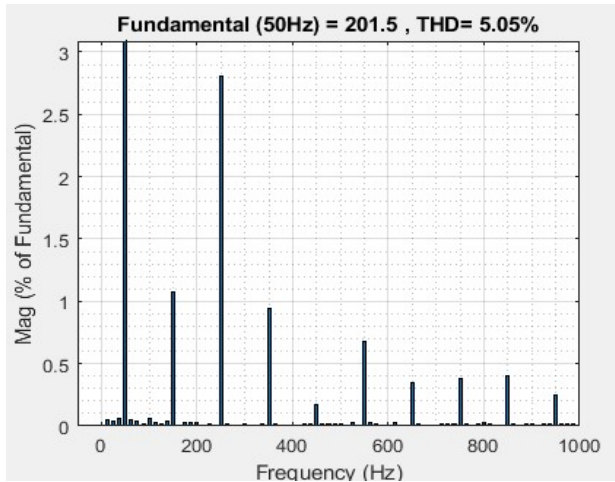
c) Courant de la source après filtrage.



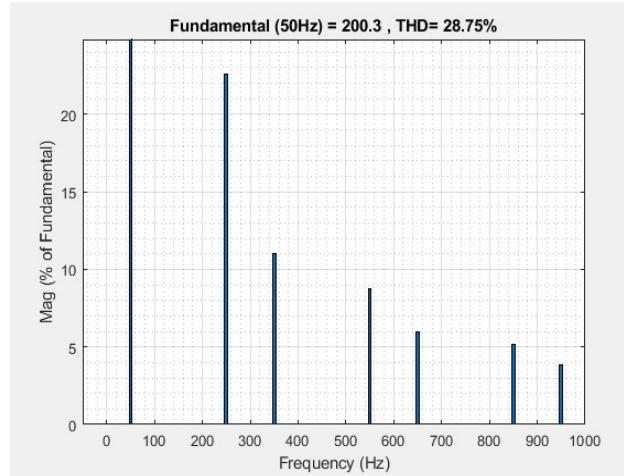
d) Courant de la charge.



e) Tension V_{dc} du condensateur.



f) Spectre harmonique du courant de la source.



g) Spectre harmonique du courant de la charge.

Figure III. 10: Résultat de simulation du FAPP 3 niveaux type NPC par l'utilisation de la méthode du référentiel lié au synchronisme.

La figure III.10.a présenté les courbes de la tension de source des trois phase A, B, C, qui sont d'une forme sinusoïdale.

Les Figures (III.10.b, III.10.c et III.10.d) montrent le courant injectée par le FAPP, le courant de la source après filtrage et le courant de la charge d'une seule phase respectivement. La Figure III.10.e présente la tension aux bornes du condensateur. Cette dernière est constante car la régulation de la tension V_{dc} fonctionne correctement. Les Figures (III.10.f et III.10.g) montrent l'analyse spectral d'harmonique des courants avant et après le filtrage, on remarque que la valeur du THD diminue après filtrage de 28.75% à 5,05%.

III.3.3 FAPP de type T-bridge utilisant la commande (d-q)

Les figures suivantes présentent les schémas de simulation de notre système, ainsi que le contrôle MLI que nous avons changé.

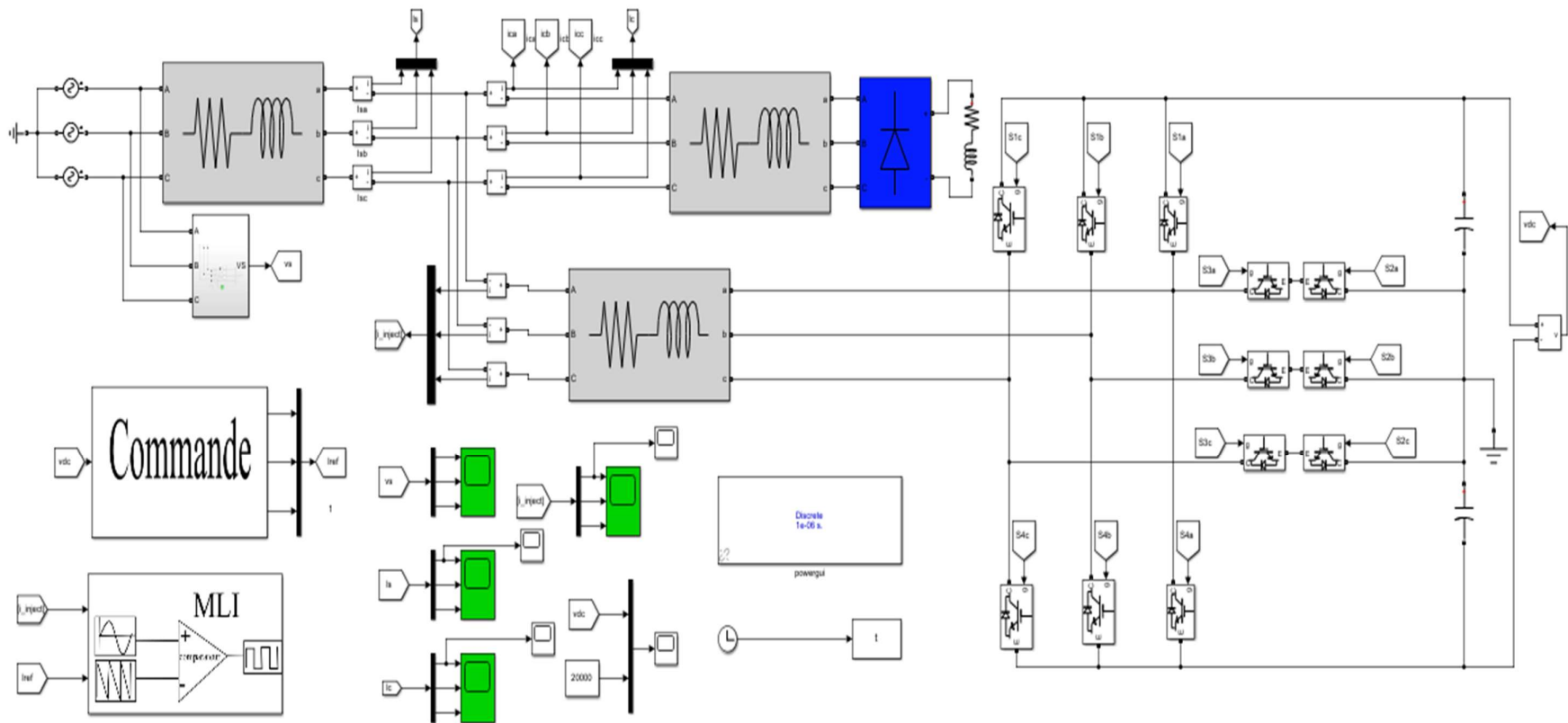


Figure III. 11: Schéma générale de la simulation du FAPP 3 niveaux type T-bridge.

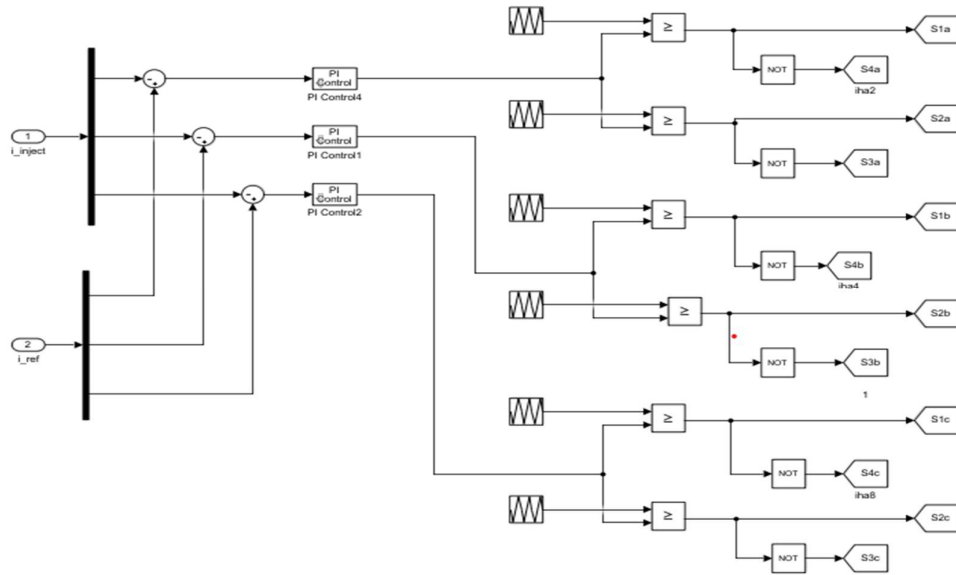
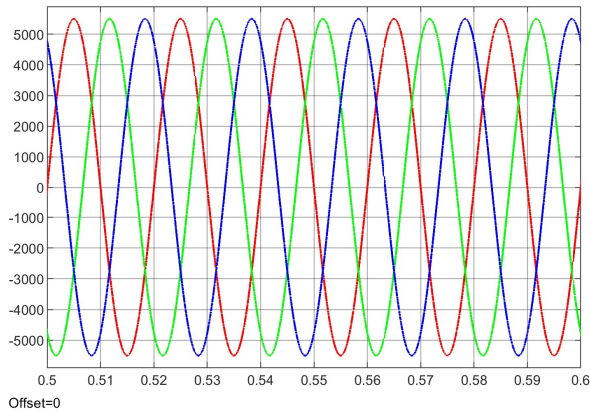
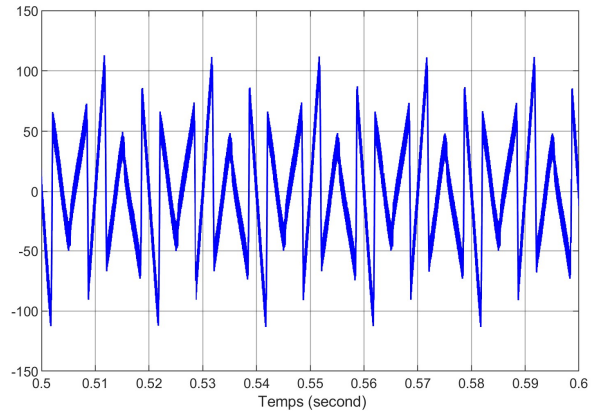


Figure III. 12 : Commande MLI de l'onduleur T-bridge à trois niveaux.

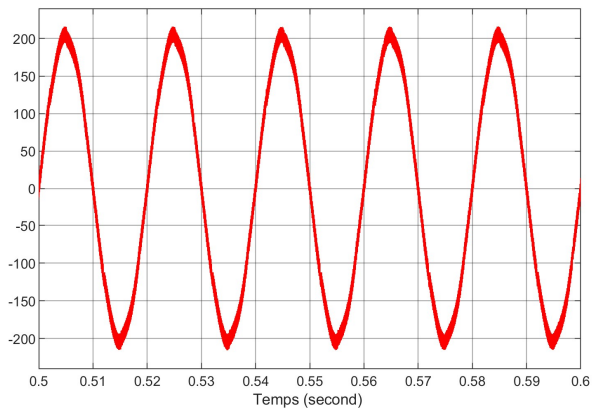
Après avoir fait la simulation, nous obtenons les figures suivantes :



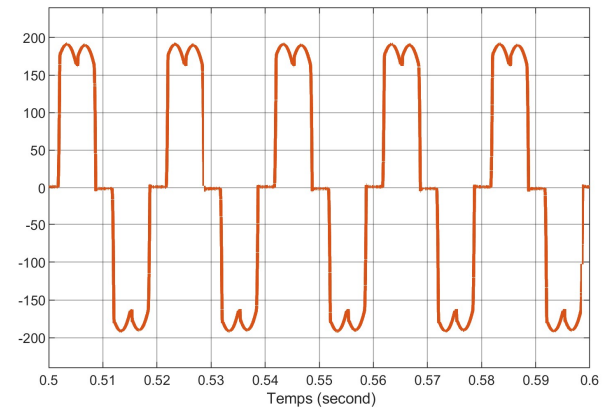
a) Tensions aux bornes de la source.



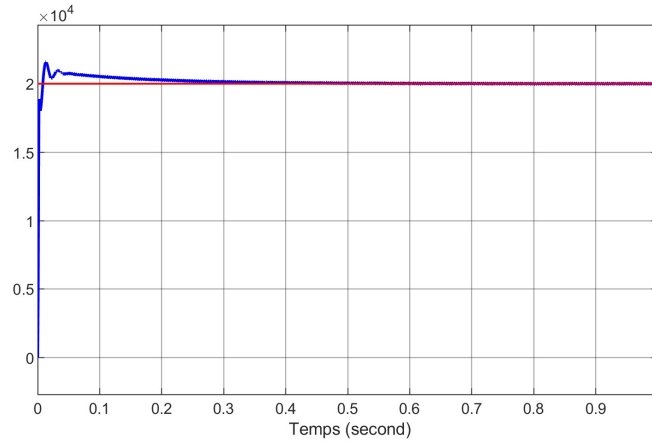
b) Courant injecté par le filtre.



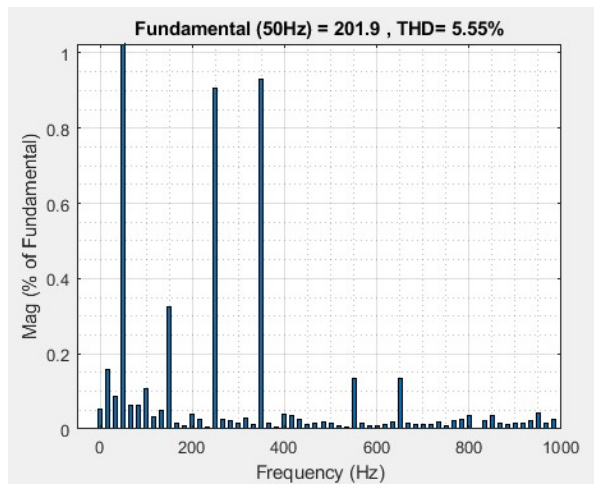
c) Courant de la source après filtrage.



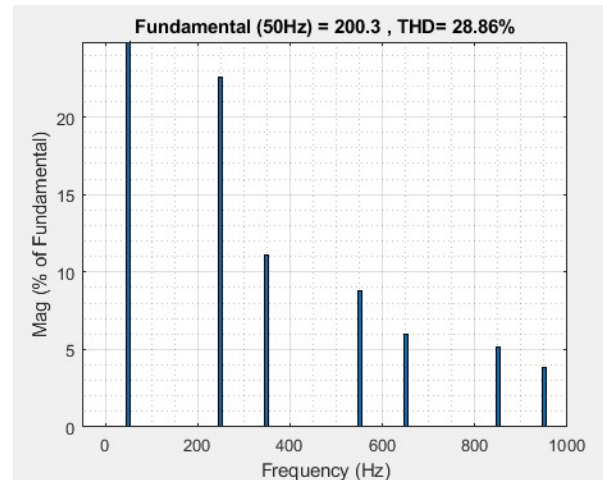
d) Courant de la charge.



e) Tension V_{dc} du condensateur.



f) Spectre harmonique du courant de la source.



g) Spectre harmonique du courant de la charge.

Figure III. 13 : Résultat de simulation du FAPP 3 niveaux type T Bridge par l'utilisation de la commande du référentiel lié au synchronisme.

La figure III.13.a présenté les courbes de la tension de source des trois phase A, B, C, qui sont d'une forme sinusoïdale.

Les figures (III.13.b, III.13.c et III.13.d) montrent le courant injectée par le FAPP, le courant de la source après filtrage et le courant de charge d'une seule phase respectivement. La figure I.13.e illustre la tension aux bornes du condensateur. Cette dernière est constante car la régulation de la tension V_{dc} fonctionne correctement. Les figures (III.13.f et III.13.g) indiquent l'analyse spectral des harmoniques des courants avant et après le filtrage. Nous remarquons que la valeur du THD diminue après le filtrage de 28.86% à 5,55 %. Le FAPP a ainsi jouer son rôle et nous donne un bon résultat.

III.3.4 FAPP de type H-bridge (pont en H) utilisant la commande (d-q)

Les figures suivantes présentent les schémas de simulation de notre système, ainsi que la topologie et le contrôle MLI qui diffère

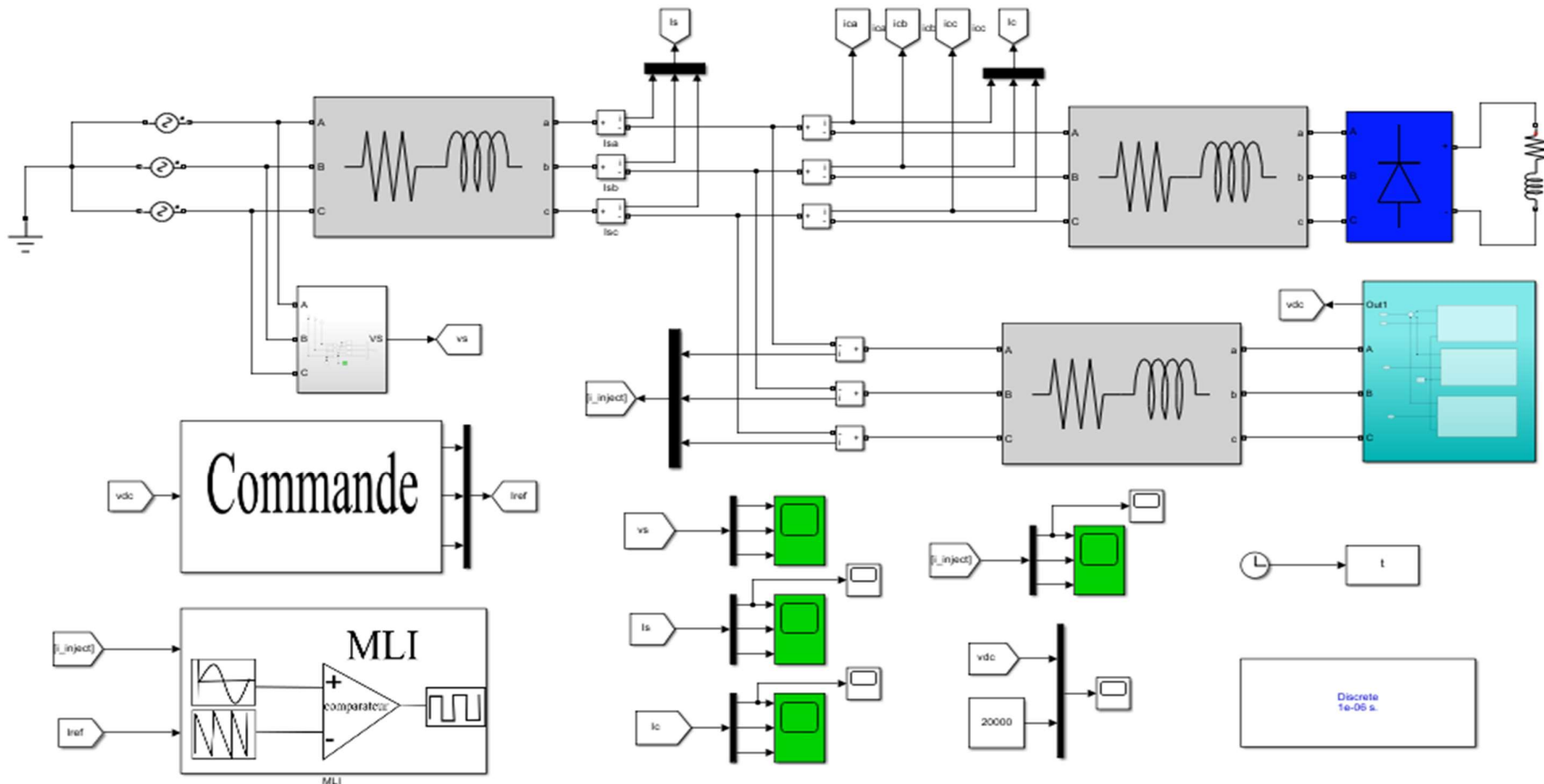


Figure III. 14 : Schéma générale de la simulation du FAPP 3 niveaux type H-bridge.

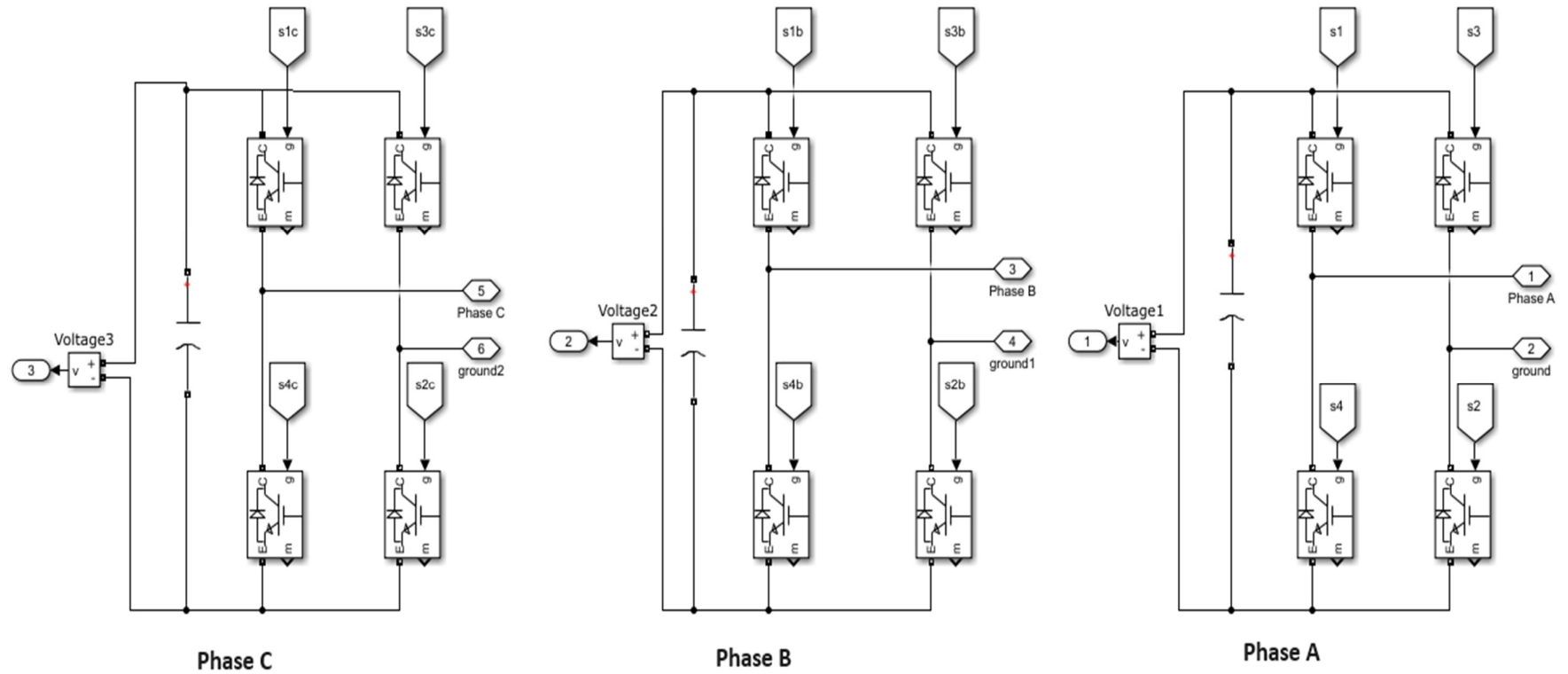


Figure III. 15 : Schéma d'un pont H (H-bridge) trois niveaux.

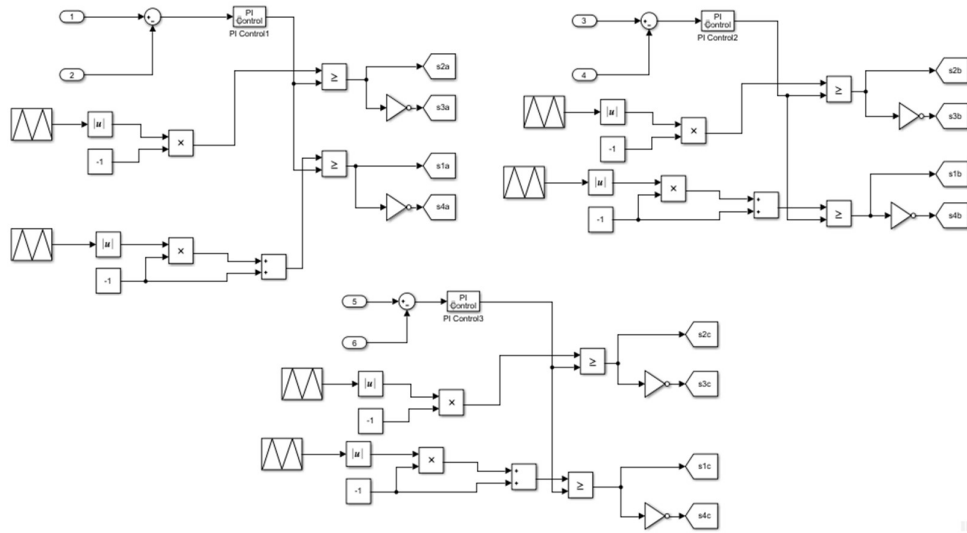
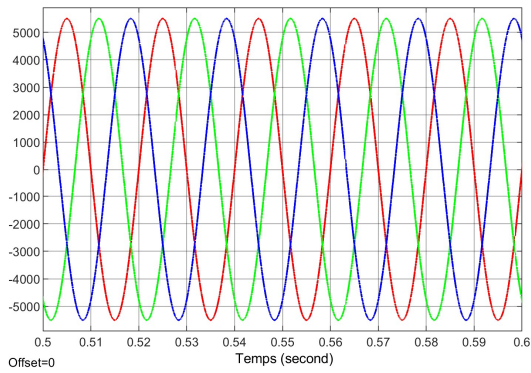
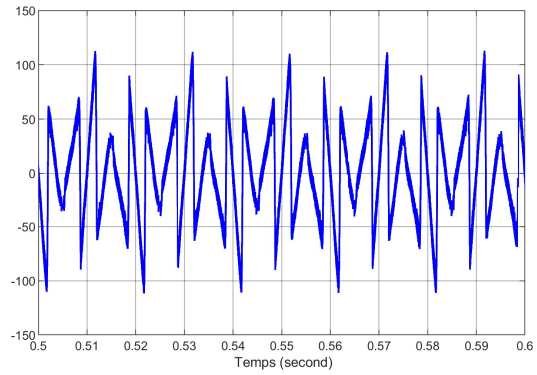


Figure III. 16 : Commande MLI de l'onduleur H-bridge à trois niveaux.

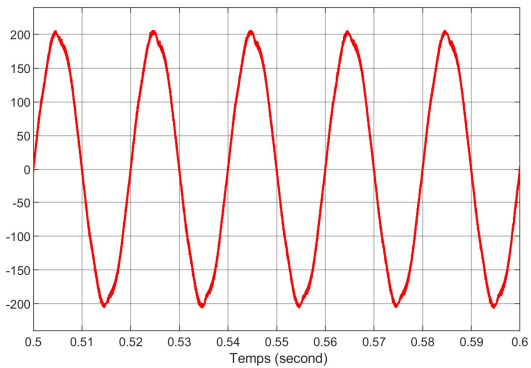
Après avoir fait la simulation nous obtenons les figures suivantes :



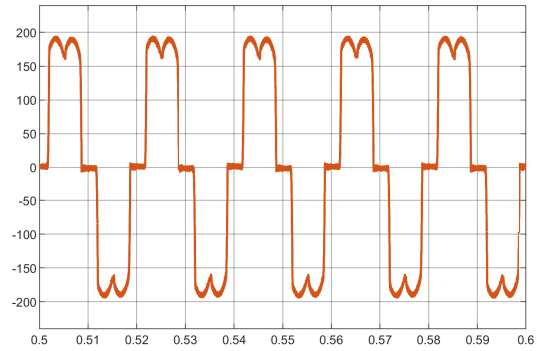
a) Tensions aux bornes de la source.



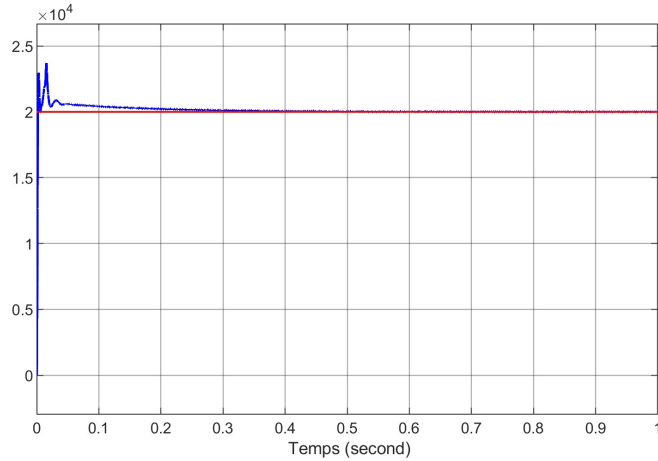
b) Courant injecté par le filtre.



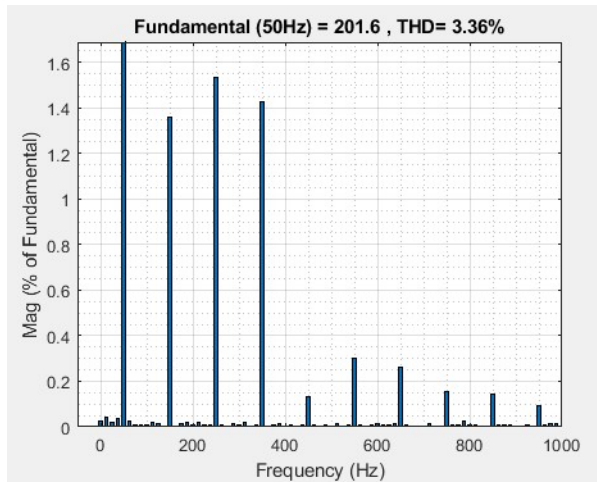
c) Courant de la source après filtrage.



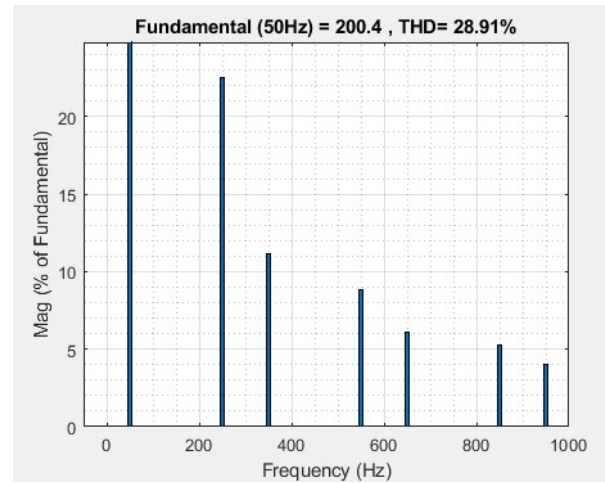
d) Courant de la charge.



e) Tension V_{dc} du condensateur.



f) Spectre harmonique du courant de la source.



g) Spectre harmonique du courant de la charge.

Figure III. 17 : Résultat de simulation du FAPP 3 niveaux type H-Bridge par l'utilisation de la commande du référentiel lié au synchronisme.

La figure III.17.a a présenté les courbes de la tension de source des trois phase A, B, C, qui sont d'une forme sinusoïdale.

Les figures (III.17.b, III.17.c et III.17.d) montrent respectivement le courant injectée par le FAPP, le courant de la source après filtrage et le courant de charge d'une seule phase. La figure III.17.e illustre la tension aux bornes du condensateur. Cette dernière est constante car la régulation de la tension V_{dc} fonctionne correctement. Les figures (III.17.f et III.17.g) indiquent l'analyse spectral des harmoniques des courants avant et après le filtrage. Nous remarquons que la valeur du THD diminue après le filtrage de 28.91% à 3,36 %. Le FAPP a ainsi jouer son rôle et nous donne un bon résultat.

III.3.5 FAPP de type FC utilisant la commande (d-q)

Les figures suivantes présentent les schémas de simulation de notre système, ainsi que la topologie et le contrôle MLI qui diffère

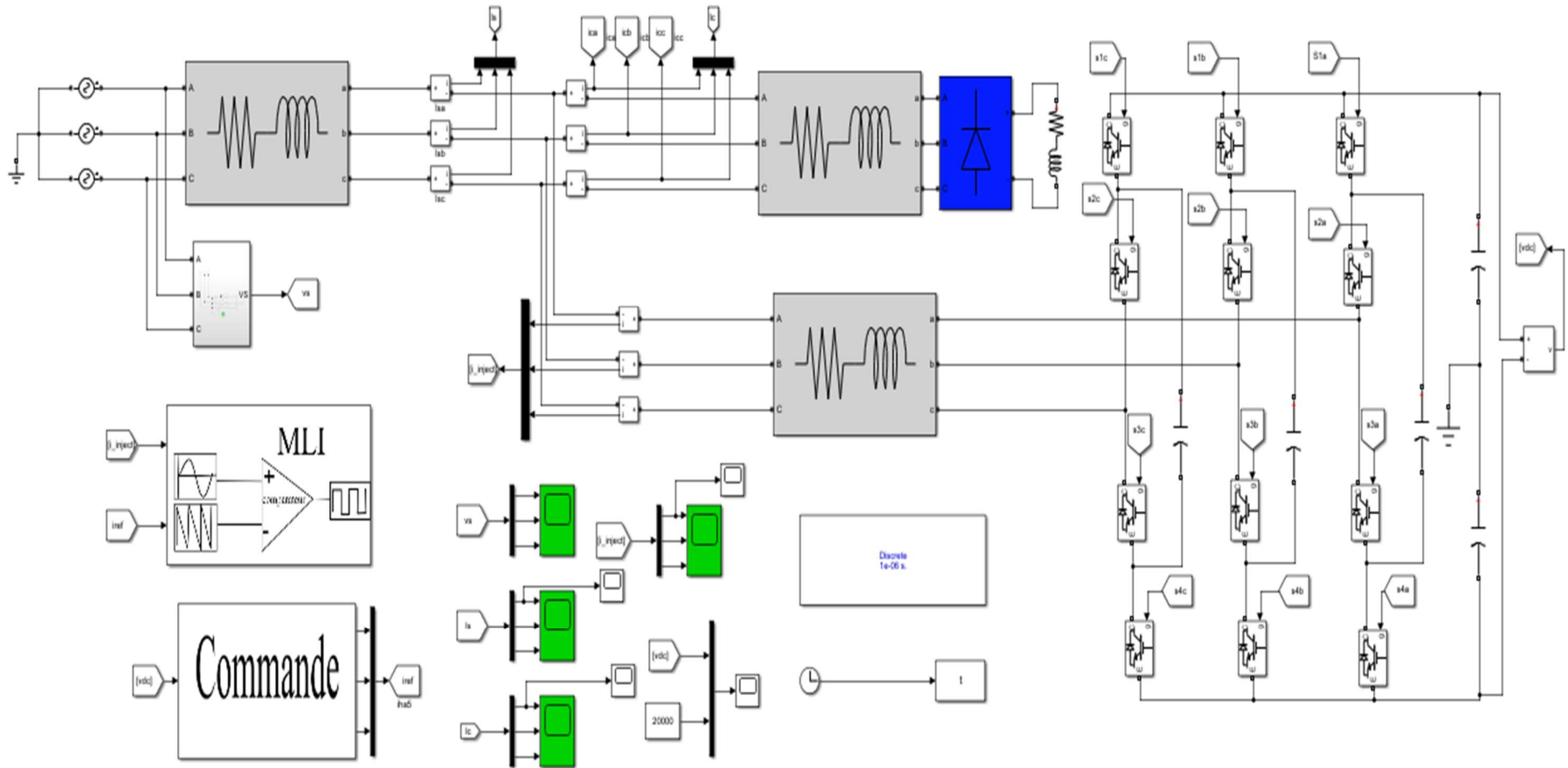
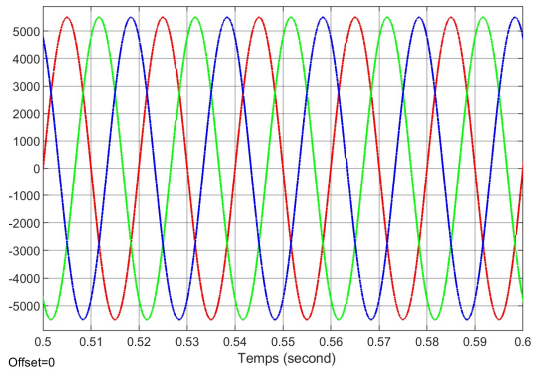
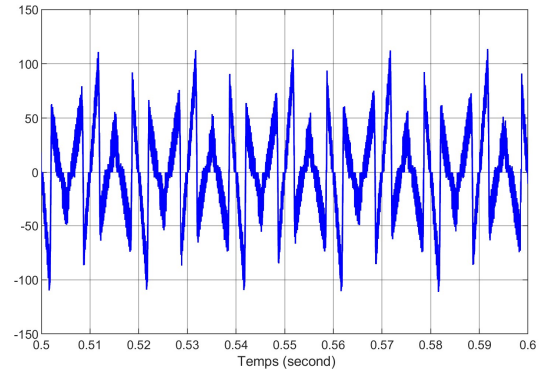


Figure III. 18 : Schéma générale de la simulation du FAPP 3 niveaux type FC.

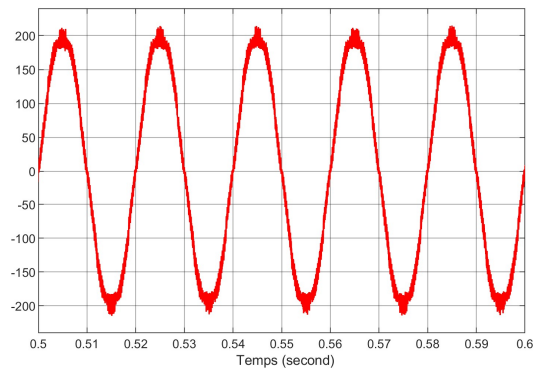
Après avoir fait la simulation nous obtenons les figures suivantes :



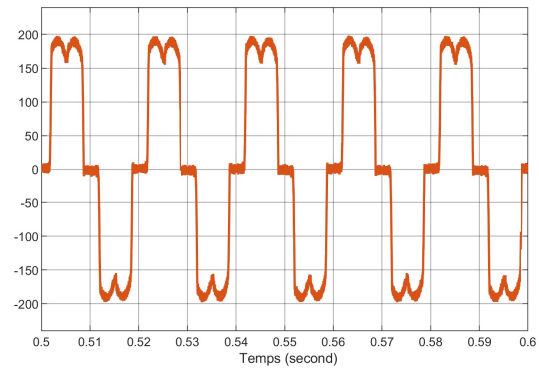
a) Tensions aux bornes de la source.



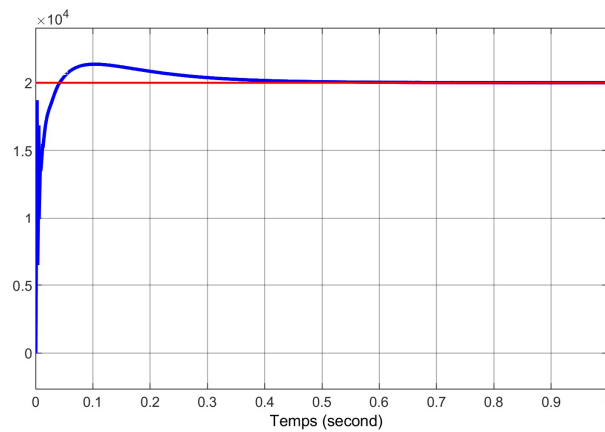
b) Courant injecté par le filtre.



c) Courant de la source après filtrage.



d) Courant de la charge.



e) Tension V_{dc} du condensateur.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons simulé quatre FAPPs à trois niveaux afin de compenser les harmoniques de courant lorsque ces derniers sont connectés à un réseau électrique ayant un niveau de tension de 5,5 kV. Les résultats de simulation nous ont montré que les quatre topologies nous ont donné un très bon THD après filtrage, avec un meilleur résultat pour la topologie de type H-Bridge.

Conclusion générale

Ce mémoire a été consacré à l'étude et la simulation des filtres actifs de puissances parallèle trois niveaux commandés par un MLI. Il a été divisé en trois chapitre. Dans le premier chapitre nous avons étudié le filtre actif de puissance parallèle à deux niveaux avec ses différentes topologies. Nous avons aussi vu les méthodes d'identifications utiliser, tel que la méthode p-q et la méthode d-q. Puis nous avons terminé par une simulation de cette topologie. Les résultats obtenus montrent que le FAPP deux niveaux compense bien les harmoniques de courant, et donnant un THD inférieur à 5%, Ce qui montre leurs efficacités.

Ensuite, nous avons dans le chapitre deux donné un aperçu des différentes topologies multi-niveaux de FAPP, tel que le NPC, le T-bridge, le H-bridge et le FC afin de compenser les harmoniques de courant pour les réseaux électriques ayant une tension plus élevée. Nous avons présenté les avantages de chaque topologie et les configurations possibles. Nous avons terminé ce chapitre par la présentation de la commande MLI pour chaque topologie étudiée.

Dans le troisième et dernier chapitre, nous avons simulé les quatre topologies de FAPP trois niveaux. Les résultats de simulations nous ont montré que quelque soit la topologie étudiée nous obtenons toujours des très bons résultats avec un THD inférieur ou dans les environs de 5 % qui est conforme aux normes CEI, avec un très bon résultat pour le FAPP 3 niveaux de type H-Bridge.

Références bibliographie

- [1] **Salem. H.**, «Commande d'un filtre actif parallèle à quatre bras par des techniques avancées», Mémoire de Magister Université Mohamed Khider Biskra, 2015.
- [2] **Bouari Ahmed et Tlitli Abdenacer.**, «Etude et simulation d'un filtre actif parallèle en utilisant un onduleur à trois niveaux avec la commande MLI vectorielle», Mémoire de Master Université Asidi Merbah Ouargla, 2015.
- [3] **M.C.Benhbib.**, «Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèle à structure tension», Thèse de doctorat en génie électrique Université Henri Poincaré Nancy 1, 17 décembre 2004.
- [4] **Bhim Singh et Kamal Al-Haddad and Chandra Ambrish.**, «A review of active filters for power quality improvement», IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 46, n° 5. pp. 960-971, 1999.
- [5] **M.H.Rashid.**, «Power electronics handbook»,Book University of West Florida Joint Program and Computer Engineering. Pensacola, Florida : Academic Press, 2001.
- [6] **T. Gouraud.**, «Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique», Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes Université de Nantes, Janvier 1997.
- [7] **I.Bourenane et S.Bouguerra.**, «Filtrage actif parallèle des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive», Mémoire d'ingénieur, Université de M'sila, 2007.
- [8] **Boubakeur, Boughazi.**, «Etude et réalisation d'un filtre actif parallèle de puissance», Mémoire de Magistère, Université-Oran,2013.
- [9] **Salem Rahmani, Kamal Al-Haddad, Farhat Fnaiech.**, «Reduced switch number single-phase shunt active power filter using an indirect current control technique», IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Maribor, Slovenia, pp. 1107-1112, 2003.
- [10] **B. Singh, K. Al-Haddad and A.Chandra.**, « Computer-aided modeling and simulation of active power filters ». Electric Machines and Power Systems, vol. 27, n° 11. pp. 1227-1241. 1999.
- [11] **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.
- [12] **Bhattacharya.** «synchronous frame harmonic isolator using active series filtre», EPE91, PP.3.030-3.35,1991.
- [13] **Zergoug Nawel et Messaoud Omar.**, «Etude et simulation d'un filtre de puissance parallèle multi-niveaux et modulaire», Mémoire de Master Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen, 2023.

-
- [14] **Benmeya Ahmed.**, «Etude comparative entre deux topologies d'onduleurs triphases a deux niveaux et trois niveaux», Mémoire de Master Université Mohamed Khider Biskra, 10 Juillet 2019.
- [15] **Titouche Nacer.**, «Etude et commande d'un onduleur a trois niveaux », Mémoire de Master, école Nationale Polytechnique Alger, Juin 2014.
- [16] **Mahioussi Fouzia, Matallah Nebia.**, «Rapport des convertisseurs multi niveaux dans la production décentralisée», Mémoire de Master université Ibn Khaldoun Tiaret, 2015.
- [17] **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.
- [18] **Rjem Fethi, Lechab Abdelghani.**, «Commande d'onduleur multiniveaux ssymétrique application à la conduite de la machine asynchrone double étoile», Mémoire de Master Université Kasdi Merbah Ouargla, 2020.
- [19] **Larbes Chérif , Bouchekouk Oussama.**, «Etude comparative entre les différentes topologies et les commandes des onduleurs», Mémoire de Master Ecole Nationale Polytechnique, 2015.
- [20] **D. Beriber, E. M. Berkouk, M.O. Mahmoudi, A. Talha.**, «association onduleur a trois niveaux a structure NPC machine asynchrone a double stator», JTEA article, 2004.
- [21] **M. Nadhir.**, « Contribution à l'étude des performances des onduleurs multiniveaux sur les réseaux de distribution », Thèse de Doctorat en Sciences, université Badji Mokhtar, Annaba, 2014.
- [22] **Becker, Florent.**, «Contribution à la continuité de service des convertisseurs statiques multiniveaux», Thèse de Doctorat, Université de Lorraine Décembre 2017.
- [23] **F.Labrique, G.Séguier, R.Bausière.**, «Les convertisseurs de l'électronique de puissance, la conversion continu alternatif », Livre, Paris, 1995.
- [24] **M.Schweizer, J.W.Kolar.**, «Design and implementation of a highly efficient three-level T-type converter for low-voltage applications» IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 2, pp 899–907, February 2013.
- [25] **Bouttefara Housem.**, «Problème d'équilibrage de la tension des deux condensateurs des bus continu dans l'onduleur trois niveaux T-NPC», Mémoire de Master Ecole National Supérieure des Technologies Alger, 2021.
- [26] **Zorig Abdelmalik.**, «Commandes non linéaire d'une source décentralisée photovoltaïque à base de convertisseurs de puissance entrelacés et parallèles», Thèse de doctorat, Université Amar Telidji Laghouat novembre 2017.

-
- [27] **Abdelrahmane Hideb, Zergoune Mohamed Abdelaziz.**, «Commande d'onduleur multiniveaux à structure en cascade par stratégie d'élimination d'harmonique sélective», Mémoire de Master Université Asidi Merbah, Ouargla 2017.
- [28] **Chen, S., Wang, L. & Zhang, Q.**, «Three-level H-Bridge inverter for renewable energy applications», *Journal of Power Electronics*, vol. 15(4), pp. 223-235, 2020.
- [29] **Wang.H., Liu.M, Li.X.**, «Flexible power management strategies for three-level H-Bridge inverters», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 45(1), 55-68,2019.
- [30] **Rodriguez, J., Lai, J.S., Peng, F.Z.**, «Multilevel inverters : a survey of topologies, controls, and applications», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49(4), 724-738, 2002.
- [31] **Mohan, N., Undeland, T.M., & Robbins, W.P.**, «Power Electronics: Converters, Applications, and Design», Book John Wiley & Sons, pp 802, 2003.
- [32] **P. Sochor and H. Akagi.**, «Theoretical and experimental comparison between phase-shifted PWM and level-Shifted PWM in a modular Multilevel SDBC Inverter for Utility-Scale Photovoltaic Applications», *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.53, no. 5, pp. 4695-4707, 2017.
- [33] **Youssef Babkrani.**, «Étude, conception et réalisation d'un onduleur multiniveaux avec techniques de commande optimisées», Thèse de doctorat Université hassan 1^{er}, 2021.
- [34] **Marafão, F.P. and Al.**, «A Three-level flying capacitor inverter topology for high power applications», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(11), 8842-8852, 2017.
- [35] **Akira Nabae, Satoshi Ogasawara and Hirofumi Akagi.**, « A novel control scheme for current controlled PWM Inverters», *IEEE Transactions on Industry Applications* ,Volume: IA-22, pp 697 - 701, 1986.
- [36] **Bouhadba A.A, Boukertas.S.**, «Étude et commande d'un système PV connecté au réseau utilisant un onduleur T-type à trois niveaux», Mémoire de Master Ecole Nationale Polytechnique El-Harrach Alger, 2020.
- [37] **Benhabib.M.C, Saadate.S.**, «A new robust experimentally validated phase locked loop for power electronic control», *EPE Journal*, volume15, France 2005.

الملخص

التلوث التوافقي هو ظاهرة كهربائية تتولد بشكل رئيسي عن الأحمال غير الخطية التي تؤدي مباشرة إلى تدهور جودة الطاقة. شرعنا في تسليط الضوء على حل مخصص لتحسين جودة تيارات جانب المصدر من خلال القضاء على التيارات التوافقية التي تنتجها الأحمال غير الخطية. بحثت دراستنا في نوعين من مرشحات الطاقة الموازية على مستويين وثلاثة مستويات. أثناء العمل في المقام الأول مع الأمر بناءً على طريقة الطاقة الفورية في حالة مرشحات الطاقة الموازية ذات المستويين والطريقة المرجعية المتعلقة بالتزامن في حالة مرشحات الطاقة الموازية ذات الثلاث مستويات. بعد اقتراح طوبولوجيات عاكسة مختلفة، أجرينا عمليات محاكاة لكل منها تليها تفسيرات لأدائهم. تم بناء عمليات المحاكاة في ظل

بيئة MATLAB، نظام SimPower System.

أبرزت النتائج التي تم الحصول عليها على هذا النحو الأداء العالي لهذا النوع من التعويضات التوافقية الحالية مع

THDs التي تفي بالمعايير الدولية المعمول بها حالياً.

الكلمات المفتاحية :

مرشح الطاقة النشط المتوازي (FAPP)، عاكس متعدد المستويات، تعويض توافقيات التيار، تحكم PQ و SFR، مرشح الطاقة النشط ثلاثي المستوى.

Résumé

La pollution harmonique est un phénomène électrique générés principalement par des charges non linéaires ayant comme conséquence directe la dégradation de la qualité d'énergie. Nous nous sommes attelés à mettre en évidence une solution dédiée à l'amélioration de la qualité des courants coté source et ce par l'élimination des courants harmonique produits par des charges non-linéaire. Notre étude s'est penchée sur deux types de filtres actifs de puissance parallèle FAPPs à deux niveaux et à trois niveaux. Tout en travaillant en premier lieu avec la commande se basant sur la méthode de puissance instantané dans le cas des FAAP à deux niveaux et la méthode du référentiel liée au synchronisme pour le cas des FAPP à trois niveaux. Après avoir proposé différentes topologies d'onduleur, nous avons effectué des simulations pour chacune d'elles suivie par des interprétations de leurs performances. Les simulations ont été établie sous l'environnement MATLAB, SimPower System. Les résultats ainsi obtenus ont mis en évidences des performances élevé pour ce type de compensation de courant harmonique avec des THDs qui respectent les normes en vigueur.

Mots clés :

Filtre actif de puissance parallèle (FAPP), onduleur multi-niveaux, compensation des harmoniques de courant, commande PQ et SRF, Filtre actif de puissance trois niveaux.

Abstract

Harmonic pollution is an electrical phenomenon generated mainly by non-linear loads, with the direct consequence of degrading power quality. We set out to highlight a solution dedicated to improving the quality of source-side currents by eliminating the harmonic currents produced by non-linear loads. Our study focused on two types of parallel active power filters: two-stage and three-stage FAPPs. While working first with control based on the instantaneous power method in the case of two-level FAPPs, and the reference frame method linked to synchronism in the case of three-level FAPPs. After proposing different inverter topologies, we carried out simulations for each of them, followed by interpretations of their performance. The simulations were carried out in the MATLAB environment, SimPower System. The results showed high performance for this type of harmonic current compensation, with THDs in line with current standards.

Keywords :

Parallel active power filter (PAPF), multi-level inverter, current harmonics compensation, PQ and SRF control, Active power filter Three-level.