

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  
كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique et Electronique



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

En : ELECTROTECHNIQUE

Spécialité : COMMANDES ELECTRIQUES

par : DJALANE Amira et BRAHIMI Hadjar

Sujet

Étude et simulation d'un convertisseur à sept niveaux en vue de la compensation des courants harmonique dans les réseaux électriques

Soutenu en juin 2024, devant le jury composé de

Mme. GHLAM Karima	MCB	Univ.Tlemcen	Président
Mr. BENHABIB Mohamed Choukri	Pr	Univ.Tlemcen	Examineur
Mr. BRIKCI NIGASSA Mohamed amine	MAA	Univ. Tlemcen	Encadreur

Année Universitaire 2023-2024

## **Remerciements**

*Nous remercions Dieu le Tout-Puissant de nous avoir donné la force d'atteindre nos objectifs et d'avoir pu achever notre travail.*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre encadrant, Monsieur BRIKCI NIGASSA Mohammed Amine, Maitre-assistant au département de génie électrique et électronique de la Faculté de Technologie de l'Université Aboubakar Belkaïd à Tlemcen, pour sa disponibilité, sa patience et pour ses conseils avisés qui nous ont permis de réaliser ce mémoire.*

*Nous souhaitons exprimer notre gratitude envers les membres du jury, Madame GHLAM Karima maitre assistante au département de génie électrique ainsi que Monsieur BENHABIB Mohamed Choukri , professeur au département de génie électrique pour avoir accepté de juger notre mémoire.*

## Dédicaces

*Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie que je dédie ce modeste travail :*

*A Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de ses longues années de sacrifices et de privations afin de m'aider à avancer dans ma vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit; Merci PAPA pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien indéfectible de ta part. Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, la profondeur de mon amour, le respect et la reconnaissance.*

*A ma chère mère, en lui exprimant mon amour, mon respect et ma vive gratitude pour sa patience, pour ses sacrifices durant ses les longs des années.*

*Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices que vous n'avez cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance jusqu'à aujourd'hui. Que dieu leur procure la bonne santé et la longue vie.*

*Exemples de persévérance, de courage et de générosité.*

*À mes sœurs Fatima Zohra, Soumia, Meriem*

*À mes frères Khaled, Hassen, Houcine*

*À mes très chers amis Chaïma, Nafisa,*

*A mes amis de l'université Noureddine, Zouhir ,Mehdi ,Mohammed*

*A mon cher binôme Amira*

*A tous mes enseignants et enseignantes depuis ma carrière scientifique`*

*Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.*

**B. Hadjar**



## Dédicaces

*Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie que je dédie ce modeste travail :*

*À la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ma mère celle qui a été le plus grand soutien tout au long de ma vie, ton amour ta patience et ta sagesse ont été d'une grande aide pour moi, me permettant d'affronter les turbulences de la vie, tu as toujours été là pour moi, soutenant chacun de mes pas avec tes conseils et ton amour inébranlable.*

*À mon PAPA qui m'a toujours poussé et encouragé pour aller de l'avant, qui a fait beaucoup de sacrifices pour me voir réussir, ta sagesse et tes conseils avisés sont des trésors que je chéris et que je transmettrai à mon tour.*

*À mes frères Samir et Ismail*

*À mes chers amis Chaïma, Noureddine, Zouhir et Mehdi*

*À ma chère binôme Hadjar*

*À tous mes amis, collègues et à tous ceux qui me connaissent.*

*À tous mes enseignantes et enseignants qui ont participé à ma formation à ce jour.*

*À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.*

D.Amira 

## Liste des symboles et des acronymes

$F_p$	Facteur de puissance.
$h$	Rang de l'harmonique
$Y_h$	Valeur efficace de l'harmonique au rang $h$
$\omega$	Pulsation fondamentale
$\varphi_h$	Phase de l'harmonique au rang $h$
$i_L(t)$	Courant de charge instantané.
$i_S(t)$	Courant de source instantané.
$i_h(t)$	Courant d'harmonique.
$\Phi$	Angle de déphasage
$THD_i$	Taux de distorsion du courant.
$V_{dref}$	Tension de référence du condensateur.
$V_{dc}$	La tension moyenne du condensateur
$C_{dc}$	Condensateur de stockage d'énergie
$\Delta V_c$	Variation de tension aux bornes du condensateur de stockage
$U_d$	Tension continue à la sortie du redresseur.
$I_d$	Courant instantané du condensateur.
$I_{loss}$	Le courant de référence additionnel
$R_d, L_d$	Résistance et inductance de la charge non linéaire.
$R_S, L_S$	Résistance et inductance de la source.
$R_f, L_f$	Résistance et inductance du filtre actif.
$V_S$	Tension de la source.
$Z_{cc}$	L'impédance de court-circuit.
$p(t)$	Puissance réelle instantanée
$\bar{P}$	Puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension.
$\tilde{p}$	Puissances alternatives liées aux composantes harmoniques perturbatrices du courant et de la tension
$p_0(t)$	Puissance homopolaire instantané
$q(t)$	Puissance imaginaire instantané
$\bar{q}$	Puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension.
$\tilde{q}$	Puissances alternatives liées aux composantes harmoniques perturbatrices du courant et de la tension
$S$	Puissance apparente
$D$	Puissance déformante
$R_{cc}, L_{cc}$	Résistance et inductance de court-circuit
$I_f$	Courant généré par l'onduleur.
$i_{dc}(t)$	Courant instantané de charge du condensateur.
$i_{ref}$	Courant de référence.
$\bar{i}_{ld}, \bar{i}_{lq}$	Composante continue (fondamentale) de courant de charge dans le repère $dq$
$\tilde{i}_{ld}, \tilde{i}_{lq}$	Composante alternative (harmonique) de courant de charge dans le repère $dq$
$\tilde{i}_{l\alpha}, \tilde{i}_{l\beta}$	Composante alternative (harmonique) de courant de charge dans le repère $\alpha\beta$
$i_{\alpha}, i_{\beta}$	Courant instantané de filtre.

$V_\alpha, V_\beta$	Ecart de la référence et les limites d'hystérésis.
$K_i$	Gain intégrateur.
$K_s$	Gain de proportionnalité.
$m_A(x)$	Fonction d'appartenance.
FAP	Filtre Actif Parallèle.
FAS	Filtre Actif série
UPQC	Conditionneur Universel de Qualité d'Onde.
TRMS	True Root Mean Square
CEI	Comité Electrotechnique Internationale
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
PCC	Point commun de connexion
TC	Transformateur du courant
TP	Transformateur de potentiel
RLF	Régulateur par logique floue
SCR	selective catalytic reduction
HCC	Hysteresis Current Control
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
GTO	Gate Turn-Off Thyristor
MLI	Modulation par largeur d'impulsion
PLL	Phased Locked Loop
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
RDFT	Transformée de Fourier discrète récursive
PI	Proportionnel intégrateur
RLF	Régulateur par logique floue
SCR	selective catalytic reduction
HCC	Hysteresis Current Control
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
GTO	Gate Turn-Off Thyristor
MLI	Modulation par largeur d'impulsion
PLL	Phased Locked Loop
DFT	Discrete Fourier Transform
RDFT	Transformée de Fourier discrète récursive
FFT	Fast Fourier transform

## Liste de Figures

### Chapitre I

- Figure I- 1 Composition d'un signal déformé
- Figure I- 2 Formes d'onde de la tension et du courant pour une charge non linéaire.
- Figure I- 3 Représentation d'interharmoniques et d'infraharmoniques.
- Figure I- 4 Diagramme de Fresnel des puissances.
- Figure I- 5 Raccordement d'un filtre passif sur le réseau électrique.
- Figure I- 6 Représentation simplifiée du raccordement d'un filtre actif série.
- Figure I- 7 Filtre actif parallèle
- Figure I- 8 Combinaison Parallèle-Série Actifs (UPQC)
- Figure I- 9 Filtre actif série en parallèle avec un filtre passif parallèle.
- Figure I- 10 Filtre actif série en série avec un filtre passif parallèle.
- Figure I 11 Schéma global du système de compensation
- Figure I 12 Redresseur avec une charge R-L
- Figure I 13 Structure générale du filtre actif parallèle
- Figure I 14 Onduleur de tension à deux niveaux
- Figure I 15 Système de commande du FAP
- Figure I 16 Principe de la technique de commande par hystérésis.
- Figure I 17 : Boucle de réglage de tension continu Vdc
- Figure I 18 : Techniques d'identification des harmoniques.
- Figure I-19 : Principe de la méthode (p q)
- Figure I 20 : Forme d'onde du courant de charge avant filtrage
- Figure I-21 : Spectre harmonique de courant de source avant filtrage.
- Figure I-22 : Forme d'onde du courant de la tension de la source
- Figure I.23 : la tension et le courant de la source après
- Figure I-24 : Courant de référence et courant injecté
- Figure I-25 : Réponses de la tension du bus DC avec un régulateur PI

### Chapitre II

- Figure II- 1 Schéma global du système de compensation
- Figure II- 2 Redresseur avec une charge R-L
- Figure II- 3 Structure générale du filtre actif parallèle
- Figure II- 4 Onduleur de tension à trois niveaux NPC
- Figure II- 5 Vecteurs de tension générés par le convertisseur à trois niveaux
- Figure II- 6 Bras d'un onduleur NPC à trois niveaux.
- Figure II-7 : 1ère Configuration du 1er bras.
- Figure II-8 : 2ème Configuration du 1er bras.
- Figure II-9 : 3ème Configuration du 1er bras.
- Figure II- 10 Forme d'onde de la tension de sortie d'un bras d'onduleur à trois Niveaux de Type NPC.
- Figure II-11 Un bras de l'onduleur à trois niveaux de tension.
- Figure II-12 Schéma de principe de la commande directe.

Figure II- 13 Schéma de la commande indirecte  
Figure **Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.**-14  
Schéma du model de simulation a étudié  
Figure **Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.**-15  
Forme d'onde du courant de charge avant filtrage  
Figure **Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.**-16  
Spectre de fréquence du courant de charge avant filtrage  
Figure **Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.**I-17  
Forme d'onde du courant de la source avec contrôle MLI  
Figure **Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.**-12  
Spectre de fréquence du courant de ligne avec commande MLI  
Figure **Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.**-3  
Forme d'onde de la tension du bus DC

### Chapitre III

Figure III-1 : Schéma de classification des convertisseurs multiniveaux  
Figure III-2 : Structure d'un onduleur NPC à sept niveaux  
Figure III-3 : Onduleur en pont H en Cascade  
Figure III-4 : Bras d'un onduleur NPC multi niveaux.  
Figure III. 6 : Onduleur multi niveaux multicellulaire à condensateur flottant.  
Figure III. 7 : Courbes de signal de la porteuse, de référence et les tensions de sortie d'un onduleur triphasé commandé en MLI sinus-triangle  
Figure III. 8: Modulation sinusoïdal avec un ensemble de porteuses  
Figure III. 9 : MLI à disposition en phase.  
Figure III. 10 :: Disposition à Opposition de Phase Alternative.  
Figure III.11 : Disposition en opposition de phase.  
Figure III. 12 : MLI à décalage de phase.  
Figure III.20 : La forme de tension et courant de source  
Figure III. 21 : la forme du courant de références et de injecte  
Figure III. 22 : spectre harmonique courant de source utilise  
Figure III. 23 : La forme d'onde de courant de charge varie à 0.1 s  
Figure III. 24 : la des puissances active et réactive référence  
Figure III. 25 : la des puissances active et réactive référence  
Figure III. 26: le comportement de bus continu à  $V_{sa} = 380v$   
Figure III. 27 : le comportement de bus continu à  $V_{sa} = 380v$

## **Liste de Tableaux**

### **Chapitre I**

Tableau I-1 : Perturbations électrique et leurs origines et solutions

Tableau I-2 : Tensions générées par l'onduleur de tension à deux niveaux.

Tableau I-3: Paramètres du système

### **Chapitre II**

Tableau II- 1 États de commutation pour une phase de l'onduleur

Tableau II- 2 Etat de commutation d'un bras de l'onduleur.

Tableau II- 3 Etat d'un bras de l'onduleur

Tableau II- 4 Paramètres du système

### **Chapitre III**

Tableau III-1 : États de commutation pour un onduleur NPC à 7 niveaux

Tableau III-2 : Nombre d'éléments des onduleurs multi-niveaux.

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	01
------------------------------------	----

## **Chapitre I**

I.1 Introduction .....	04
I.2 Qualité de l'énergie électrique .....	04
I.3 Harmoniques .....	06
I.3.1 Définition .....	06
I.3.2 Origines .....	06
I.3.3 Effets des harmoniques dans le réseau électrique .....	08
I.3.3.1 Effets instantanés .....	08
I.3.3.2 Effets à terme .....	08
I.3.4 Spectre harmonique .....	09
I.3.5 Taux de distorsion harmonique (THD) .....	10
I.3.6 Normes .....	12
I.4 Solution de dépollution harmonique .....	13
I.4.1 Filtrage passif .....	13
I.4.2 Filtrage actif de puissance .....	13
I.4.2.1 Principe de fonctionnement .....	14
I.4.2.2 Classification des Filtres Actifs de puissance .....	14
I.5 Etude et simulation d'un FAP à deux niveaux .....	17
I.5.1 Description du système .....	17
I.5.2 Principe de fonctionnement .....	18
I.5.3 Model du réseau d'alimentation .....	18
I.5.4 Model de la charge .....	18
I.5.5 Structure du filtre actif parallèle .....	19
I.5.6 Identification des harmoniques par un FAP .....	25
I.5.7 Résultats et discussion .....	29
I.6 : Conclusion .....	32

## **Chapitre II**

II.1 Introduction .....	34
II.2 Description du système .....	34
II.3 Principe de fonctionnement .....	35
II.4 Modèle du réseau d'alimentation .....	36
II.5 Modèle de la Charge .....	36
II.5.1 Etude du système de puissance .....	38
II.5.1.1 Principe de fonctionnement de l'onduleur NPC .....	40
II.6 Etats de l'onduleur .....	44
II.6.1 Relation entre les fonctions des demi-bras .....	44
II.6.2 Potentiels $V_{io}$ .....	45
II.6.2.1 Tension composée .....	46
II.6.2.2 Tensions simples .....	47
II.7 Système de stockage d'énergie .....	47

---

II.8 Filtre de sortie .....	47
II.9 Etude du système de commande .....	48
II.9.1 Commande du filtre actif parallèle .....	48
II.9.1.1 Méthode directe .....	48
II.9.1.2 Méthode indirecte .....	49
II.10 Résultats et discussion .....	50
II.11 Conclusion .....	54

### Chapitre III

III.1 Introduction .....	56
III.2 Les onduleurs multi-niveaux .....	56
III.3 Intérêt des onduleurs multiniveaux .....	57
III.4 Description du système FAP sept niveaux .....	57
III.5 Onduleur en pont H en Cascade .....	59
III.6 Onduleur NPC (Neutral Point Clamped Diode) .....	60
III.7 Onduleur multicellulaire .....	61
III.8 Comparaison entre différents types d'onduleurs multi-niveaux .....	62
III.9 Stratégies de commande des onduleurs multiniveaux .....	64
III.9.1 Modulation de largeur d'impulsion .....	64
III.9.2 Modulation MLI Sinusoïdale (SPWM) : Triangulo-sinusoidale .....	64
III.10 Types des méthodes de modulation MLI .....	66
III.10.1 Disposition de Phase PWM (PDPWM) .....	67
III.10.2 Disposition à Opposition de Phase Alternative (APOD) .....	67
III.10.3 Disposition en Opposition de Phase (POD ) .....	67
III.10.4 MLI à décalage de phase (PSPWM) .....	68
III.11 Résultats et discussion .....	69
III.12 Conclusion .....	72

Annexe

Bibliographie

## **Introduction générale**

La qualité de l'énergie des réseaux électriques est affectée principalement de l'augmentation de l'interconnexion des charges non linéaires, telles que les dispositifs de conversion statique, équipements informatiques, etc. Ces équipements absorbent des courants non conformes à la sinusoïde, introduisant ainsi des distorsions harmoniques dans le réseau électrique. Les harmoniques ainsi obtenues se retrouvent en aval de ses charges, perturbant considérablement de nombreux équipements, voire provoquant leur défaillance.

Face à ces défis, le traitement des signaux de courant et de tension est devenu une préoccupation majeure à la fois pour les fournisseurs et les consommateurs d'électricité. Parmi les solutions de dépollution disponibles, les filtres actifs parallèles (FAP) se distinguent comme une approche particulièrement efficace pour les installations électriques existantes. [1] Ces solutions actives offrent une réponse rapide. Qu'ils soient déployés dans des environnements industriels ou domestiques, les FAP présentent une souplesse pour les intégrer au réseau existant sans modification majeure des infrastructures tant du côté des fournisseurs que des consommateurs. [1]. Les FAPs sont constitués de convertisseurs (onduleur) à base d'interrupteurs de puissance, avec une partie commande.

L'identification et le filtrage des harmoniques peuvent utiliser différentes techniques, la plus utilisée étant s'elles des puissances instantanées.

L'étude des harmoniques (identification et filtrage) et la commande de l'onduleur seront développées théoriquement et validées par des simulations.

Pour cela, nous avons organisé notre travail en trois chapitres :

Le premier chapitre couvre la présentation de la qualité de l'énergie, suivie par certaines solutions de dépollution traditionnelles et modernes. Une attention particulière est donnée au principe de fonctionnement du filtre active de puissance (FAP) en détaillant ses des parties puissance et commande, en mettant en avant les critères d'extraction, de modulation et de contrôle de la tension du bus continue.

Le deuxième chapitre se concentre sur la présentation du (FAP) à trois niveaux. La régulation des courants se fera par le biais de la modulation de largeur d'impulsion (PWM), tout en exploitant la théorie des puissances instantanées (pq) pour identifier les harmoniques.

Le troisième chapitre consiste à tester le Filtre Actif de Puissance (FAP) avec un onduleur à sept niveaux. Les résultats de simulation ont obtenus en utilisant MATLAB, SimPower System.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur la qualité de l'énergie électrique**

## **I.1 Introduction**

La qualité de l'énergie électrique affecte grandement le bon fonctionnement des équipements électrique. Que ce soit les signaux de courants ou de tension pouvant aboutir à la destruction de ses équipements.

La présence de charge non linéaire affecte le réseau par l'injection de courants harmonique cote réseau provoquant une distorsion du courant, ce qui nécessite l'élimination des harmoniques les plus significatifs pour garantir une alimentation de haute qualité. En effet, la présence de ces harmoniques peut compromettre le fonctionnement optimal des équipements électriques.

## **I.2 Qualité de l'énergie électrique**

Les perturbations se traduisent par des écarts par rapport à la forme d'onde sinusoïdale nominale. Pour résoudre ces problèmes, les filtres actifs de puissance ont été développés. Ils corrigent activement les distorsions et déséquilibres des signaux électrique, assurant une alimentation électrique de haute qualité. [3]

La qualité de l'énergie électrique a une relation étroite avec la qualité des ondes de tension et courant. Les perturbations intègrent tous les phénomènes d'origine internes ou externes au réseau pouvant affecter à la fois ou séparément de façon transitoire ou permanente l'amplitude et la forme d'onde des grandeurs électriques du réseau.

Les tensions d'un réseau électrique se présentent généralement sous forme d'un système alternatif triphasé, caractérisé par :

- La fréquence de 50 Hz ou 60 Hz selon la norme du pays,
- L'amplitude des tensions triphasée,
- La forme la plus proche possible d'une sinusoïde de notre signal,
- La symétrie du système triphasé.

Les principaux phénomènes sont représentés dans le tableau I-1 :

<b>Perturbation</b>	<b>Origine</b>	<b>Conséquences</b>	<b>Solutions possibles</b>
<b>Coupure longue</b>	Court-circuit, surcharge, déclenchement intempestif, (maintenance)	Arrêts d'équipements, pertes de production, dégâts	Alimentation de secours (réseau), alimentation sans interruption (ASI)
<b>Creux de tension et coupure brève</b>	Court-circuit, (enclenchement de gros moteur)	Arrêts d'équipements, pertes de production, dégâts	Conditionneur de réseau, conception de l'équipement sensible, alimentation sans interruption
<b>Fluctuation rapide (flicker)</b>	Installations fluctuantes (four à arc, soudeuse, moteur à démarrage fréquent, éolienne...)	Papillotement de l'éclairage	Compensateur synchrone, compensateur statique de puissance réactive, conditionneur actif, condensateur série
<b>Harmonique</b>	Installations non linéaires (électronique de puissance, arcs électriques...)	Effets thermiques (moteurs, condensateurs, conducteurs de neutre...), diélectriques (vieillessement d'isolant) ou quasi instantanés (automatismes)	Filtrage actif ou passif, self anti-harmonique, déclassement d'appareil
<b>Inter harmonique</b>	Installations non linéaires et fluctuantes (four à arc, soudeuse, éolienne), changeurs de fréquence, télécommande centralisée	Papillotement de l'éclairage fluorescent, dysfonctionnement d'automatismes, dégâts mécaniques sur machines tournantes	Filtrage actif ou passif, amortissement de filtres anti-harmoniques, conception de l'équipement sensible
<b>Déséquilibre</b>	Installations déséquilibrées (traction ferroviaire...)	Echauffement de machines tournantes, vibrations, dysfonctionnement de protections	Dispositif d'équilibrage, conditionneur de réseau
<b>Surtension transitoire</b>	Court-circuit, commutations, foudre	Déclenchements, danger pour les personnes et pour les matériels	Séparation galvanique, parasurtenseur, enclenchement "synchronisé", résistance de pré-insertion

*Tableau I-1 : Perturbations électrique et leurs origines et solutions*

## I.3 Harmoniques

### I.3.1 Définition

Les signaux harmoniques sont considérés comme des perturbations permanentes altérant l'onde de tension et/ou de courant du réseau électrique. Elles se produisent lorsque des ondes sinusoïdales, ayant des fréquences multiples de la fondamentale (généralement 50 Hz), se superposent à l'onde principale. [5].

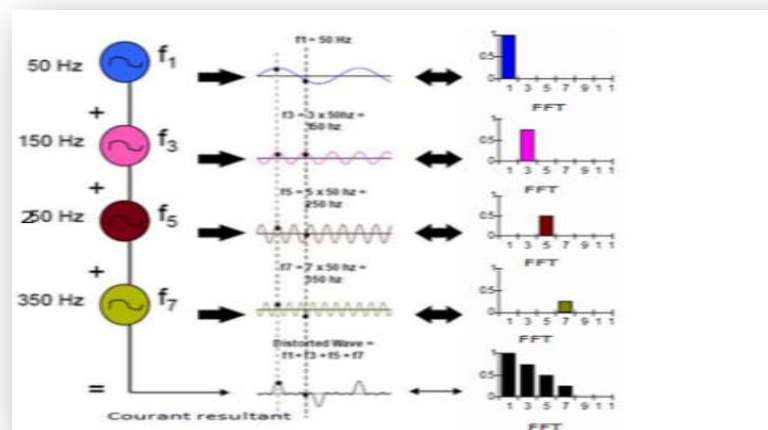


Figure I- 1 Composition d'un signal déformé [5]

### I.3.2 Origines

A l'origine la plupart des charges connectées au réseau électrique étaient considérées comme linéaires, ce qui signifie qu'elles demandaient un courant en phase avec la tension, généralement quasi sinusoïdal. C'était le cas, par exemple, des lampes à incandescence. [6].

Aujourd'hui avec l'utilisation des dispositifs à base d'électronique de puissance, les charges produisent des courants déformés dont l'allure n'est plus sinusoïdale.

Il convient de faire la distinction entre les charges linéaires et charges non-linéaires :

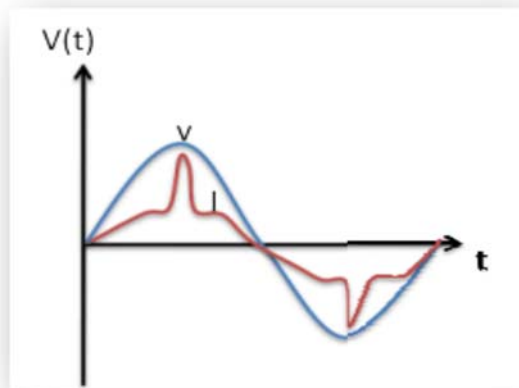
- La charge linéaire, soumise à une tension sinusoïdale, absorbe un courant de même allure ; il existe une proportionnalité instantanée entre tension et courant.

- La charge non-linéaire injecte dans le réseau des courants riches en harmonique avec un déphasage avec la tension

La qualité d'énergie peut être aussi caractérisée par l'apparition du facteur de puissance FP ainsi que du taux harmonique THD obtenue quand la charge non-linéaire est alimentée par une tension sinusoïdale. [6]

Une charge est dite non-linéaire lorsque le signal de courant qu'elle absorbe diffère de celui de la tension d'alimentation. Ce courant non linéaire est souvent caractérisé par l'existence de multiples composantes harmoniques, avec un spectre qui dépend de la nature spécifique de la charge.

Les courants générés par ces charges circulent de la charge vers la source. Parmi les charges non-linéaires, on trouve notamment les convertisseurs statiques, les alimentations à découpage, et d'autres équipements similaires.



**Figure I- 2 Formes d'onde de la tension et du courant pour une charge non linéaire.**

### I.3.3 Effets des harmoniques dans le réseau électrique

Les effets les plus remarquables pouvant aller jusqu'à la destruction des condensateurs ou des disjoncteurs sous l'impact de forts courants harmoniques amplifiés par des résonances. [7]

La présence de courants harmoniques de rang 3 a pour conséquence l'échauffement des transformateurs et des conducteurs neutres. On peut distinguer deux types d'effets : [7].

**I.3.3.1 Effets instantanés :** Dans certains appareillages, les effets instantanés se manifestent immédiatement

- Certains équipements électriques connaissent des défauts de fonctionnement.
- Les micro-ordinateurs subissent des troubles fonctionnels.
- Des erreurs sont observées dans les appareils de mesure.
- Les courants harmoniques engendrent des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques tels que les transformateurs, les inductances et les machines tournantes.[7]

**I.3.3.2 Effets à terme :** Exactement, ces effets se manifestent généralement après une exposition prolongée aux perturbations harmoniques. L'effet le plus significatif à long terme est de nature thermique, se traduisant par un échauffement excessif. Cela entraîne une fatigue prématurée des équipements, des lignes et peut même causer un déclassement des équipements, réduisant ainsi leur efficacité opérationnelle et leur durée de vie. [7]

➤ **Échauffement des câbles et des équipements :** Augmentation de la température des câbles et des équipements électriques due à la résistance rencontrée par le courant électrique lors de sa circulation à travers eux.

➤ **Échauffement des condensateurs :** Élément de chauffage des condensateurs causé par l'effet Joule dans le matériau diélectrique qui les sépare, lorsqu'ils stockent et libèrent de l'énergie électrique.

➤ **Échauffement dû aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs** : Augmentation de la température des machines électriques et des transformateurs résultant des pertes électriques supplémentaires, telles que les pertes par courant de Foucault, les pertes par hystérésis et les pertes par frottement dans les roulements.

### I.3.4 Spectre harmonique :

L'expression mathématique par développement par série de fourrier est de la forme :

$$y(t) = Y_0 + \sqrt{2} (Y_1 \cdot \sin(\omega t - \varphi_1) + Y_2 \cdot \sin(2\omega t - \varphi_2) + \dots + Y_h \cdot \sin(h \cdot \omega t - \varphi_h)) \quad (I.1)$$

$$y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} Y_h \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(h \cdot \omega t - \varphi_h) \quad (I.2)$$

Avec :

$Y_0$  : La moyenne ou la composante continue du signal  $y(t)$ .

$h$  : Le numéro d'ordre de l'harmonique.

$Y_h$  : L'amplitude efficace de l'harmonique à l'ordre  $h$ .

$\omega$  : La pulsation fondamentale, calculée en multipliant  $2\pi$  par la fréquence fondamentale ( $\omega = 2\pi f_1 = 2\pi/T$ ).

$\varphi_h$  : La phase de l'harmonique à l'ordre  $h$ .

Pour visualiser ces composantes, on utilise souvent un spectre, représenté sous forme d'un histogramme. Ce spectre affiche l'amplitude de chaque harmonique en fonction de son rang, permettant ainsi une analyse précise de la composition fréquentielle du signal Figure I- 2.

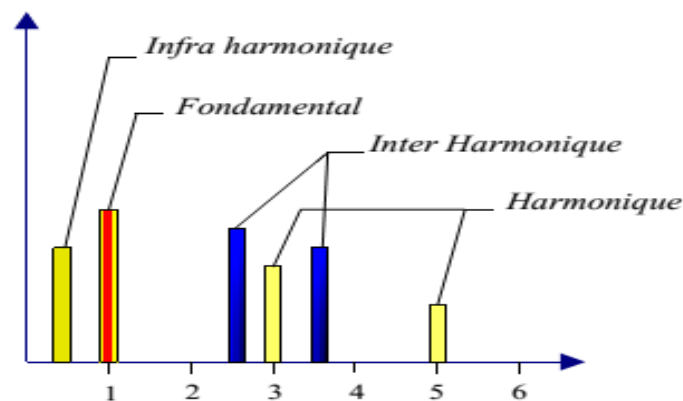


Figure I- 3 Représentation d'interharmoniques et d'infraharmoniques.

- **Intersharmoniques** : Ce sont des sinusoïdes qui ne sont pas des multiples entiers de la fréquence fondamentale.
- **Infraharmoniques** : Ce sont des composantes dont les fréquences sont en dessous de celle du fondamental.

### I.3.5 Rang l'harmonique :

Le rang harmonique est déterminé par le rapport entre sa fréquence  $f_n$  et la fondamentale  $f_1=50$  Hz.

Avec h étant le rang harmonique défini par :  $h = \frac{x_h}{x_1}$

Les harmoniques sont caractérisées par le fait qu'elle soit paire ou impaire, les harmoniques de rang pair (2, 4, 6, 8...) sont souvent négligeables en milieu industriel en raison de la symétrie du signal. En l'absence d'une composante continue, ces harmoniques tendent à s'annuler. En revanche, les harmoniques de rang impair (3, 5, 7, 9...) sont plus fréquemment présents sur le réseau électrique et peuvent avoir un impact significatif sur la qualité de l'énergie électrique.

### I.3.5 Taux de distorsion harmonique (THD)

Le taux de distorsion harmonique totale (THD), étant le rapport de la valeur efficace des harmoniques sur la valeur efficace du fondamental. Tel que :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n I_{ci}^2}}{I_{c1}} \quad (I. 4)$$

$I_{c1}$  : La valeur efficace de la composante fondamentale du courant de charge.

$I_{ci}$  : Les valeurs exactes des différentes composantes harmoniques du courant de charge.

### Bilan de puissance

Pour un signal sinusoïdal, le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S.

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}} \quad (I. 5)$$

$$P = V \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad (I. 6)$$

$$Q = V \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 \quad (\text{I. 7})$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Avec :

$V$  : Valeur efficace de la tension du réseau électrique.

$\varphi_1$  : Déphasage entre le courant de la fondamentale et de la tension

$P$  : Puissance active

$Q$  : Puissance réactive

$S$  : Puissance apparente

La puissance apparente  $S$  de la charge est définie par :

$$S u_{eff} \cdot I_{eff} \quad (\text{I. 8})$$

En présence des harmoniques, la puissance apparente  $S$  est composée de trois parties : active  $P$ , réactive  $Q$  et déformante  $D$ .

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (\text{I. 9})$$

En présence des harmoniques, la puissance déformante ( $D$ ) donnée par la relation.

$$D = 3 \cdot V \sqrt{\sum_{n=2}^{50} I_n^2} \quad (\text{I. 10})$$

Par définition le facteur de puissance vaut :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{I. 11})$$

Sachant que :

Pour un milieu permanent sinusoïdal  $F_p = \cos \varphi_1 \quad (\text{I. 12})$

Pour un milieu en présence d'harmonique  $F_p > \cos \varphi_1$

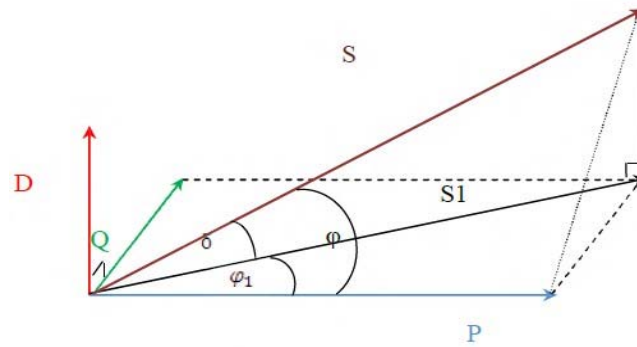


Figure I- 4 Diagramme de Fresnel des puissances.

Il est noté que la puissance déformante et la puissance réactive contribuent à la dégradation du facteur de puissance.

### I.3.6 Normes

Des organismes comme CEI (Comité Électrotechnique Internationale) en Europe et IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) en Amérique élaborent des normes et donnent des recommandations qui peuvent être regroupées en trois catégories : voir annexe 1

1) de comptabilité harmonique en amont du point commun de raccordement :	a. IEEE 519-1992 b. IEC 61000-2-2 c. IEC 61000-3-6
2) Limites sur l'émission harmonique des équipements :	a. IEC 61000-3-2 (appareils de moins de 16 A par phase) b. IEC 61000-3-4 (appareil de plus de 16 A par phase)
3) Guide pour la mesure des harmoniques :	a. IEC 61000-4-7

La norme IEEE-519 définit les limites pour les tensions et courants harmoniques au niveau du point commun de raccordement (PCC).

## I.4 Solution de dépollution harmonique

Pour réduire les perturbations électriques, deux solutions principales existent : la dépollution traditionnelle, utilisant des filtres passifs et la dépollution moderne employant le filtrage actif de puissance.

### I.4.1 Filtrage passif :

Le filtrage passif modifie l'impédance du réseau. constitués de composants capacitifs et inductifs en résonance série, ces filtres nécessitent une conception précise basée sur des simulations. Le type de filtre est choisi en fonction de l'atténuation harmonique désirée. [11]

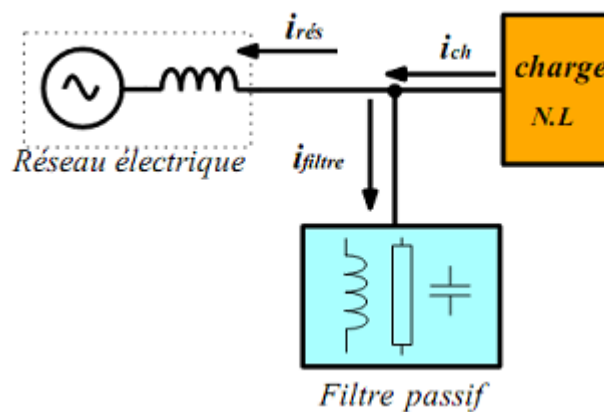


Figure I- 5 Raccordement d'un filtre passif sur le réseau électrique.

Le dimensionnement des filtres dépend des harmoniques, des performances requises, de la structure du réseau et des récepteurs. Ils éliminent plus facilement les harmoniques élevés que faibles. Malgré leur utilisation fréquente, ces filtres nécessitent une connaissance approfondie du réseau, sont affectés par les variations d'impédance, risquent de créer des résonances, sont volumineux et peuvent devenir inefficaces si les caractéristiques du réseau évoluent. [11]

## **I.4.2 Filtrage actif de puissance :**

Les filtres actifs de puissance sont devenus une solution clé pour compenser les harmoniques dans les réseaux électriques industriels. Contrairement aux filtres passifs, ils s'adaptent aux variations de charge et de réseau, évitant les résonances. Leur objectif est de générer des courants ou des tensions harmoniques pour ramener le courant ou la tension à une forme sinusoïdale. Ils peuvent être connectés en parallèle pour compenser les courants harmoniques, en série pour compenser les tensions harmoniques, ou associés à des filtres passifs pour des solutions hybrides.[12]

### **I.4.2.1 Principe de fonctionnement**

Les filtres actifs, constitués d'onduleurs, fonctionnent comme des convertisseurs statiques de puissance alimentés par une source de courant ou de tension continue. Leur rôle principal est de corriger les distorsions harmoniques dans le système électrique. Ces filtres peuvent agir de deux manières principales, en tant que source de tension ou de courant harmonique. Ils génèrent des signaux en opposition de phase avec les harmoniques présents dans le réseau, ce qui permet de les annuler ou de les réduire de manière significative. Ainsi, ils rétablissent un courant source quasi sinusoïdal, ce qui améliore la qualité globale de l'énergie dans le système.

### **I.4.2.2 Classification des Filtres Actifs de puissance**

Les filtres actifs de puissance peuvent être classifiés à partir du type de convertisseur qu'ils utilisent, ils peuvent être en série ou en parallèle ou encore mixtes.

**A. Filtre actif série (FAS) :** Tout à fait. Le filtre actif série, connecté en série sur le réseau, agit comme une source de tension générant des harmoniques qui, combinées avec la tension du réseau, produisent une onde sinusoïdale. Conçu pour protéger les installations sensibles, il atténue les perturbations de tension et les déséquilibres, tout en neutralisant les courants perturbateurs.[13] Cette topologie présente certaines difficultés et inconvénients lors de sa mise en œuvre. Par exemple, elle ne permet pas de compenser les courants harmoniques produits par la charge. [14].

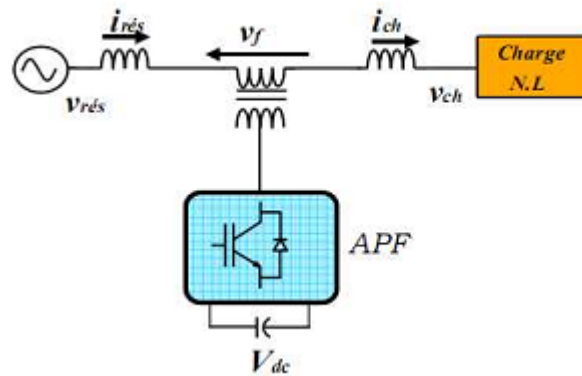


Figure I- 6 Représentation simplifiée du raccordement d'un filtre actif série.

**B. Filtre actif de puissance parallèle (FAP) :** Le filtre actif de puissance parallèle, ou compensateur shunt, Il se connecte en parallèle sur le réseau électrique entre la source de tension et la charge non linéaire. Son objectif est d'injecter dans le réseau le courant nécessaire pour compenser les harmoniques générées par la charge polluante. Ce dispositif, commandé comme un générateur de courant réglable, vise à compenser efficacement les perturbations telles que les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive, tout en s'adaptant aux variations du récepteur. [13] [16]

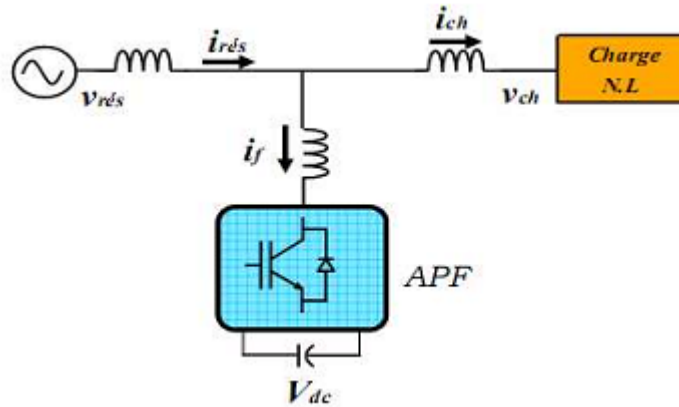


Figure I- 7 Filtre actif parallèle

**C. Combinaison Parallèle-Sériel des filtres actifs de puissance (UPQC) :** La combinaison parallèle-série, connue sous le nom de UPQC (Unified Power Quality Conditioner), intègre les filtres actifs de puissance parallèle et série. Malgré ses bonnes performances, le UPQC est coûteux et sa commande complexe, en raison du nombre élevé de semi-conducteurs. [17].

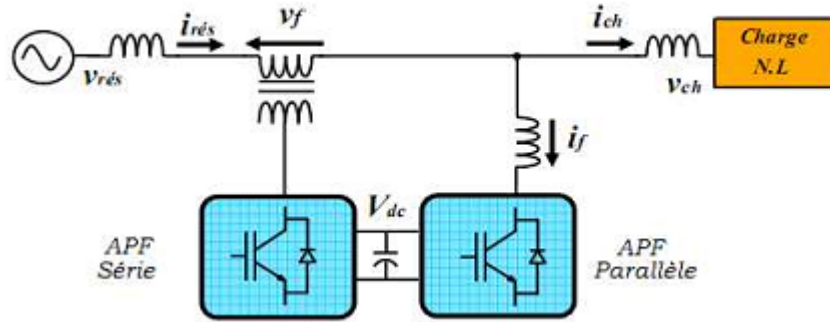


Figure I- 8 Combinaison Parallèle-Série Actifs (UPQC)

**Avantages :** Isolation d'harmoniques entre la charge sensible placée en aval et la charge non-linéaire placée en amont, régulation de la tension continue commune aux deux filtres actifs de puissance, correction des distorsions de la tension d'entrée.

**Inconvénients :** Incapacité de rééquilibrage des courants de charge et de compensation du courant du neutre [18].

**D. Filtre hybride :** Une nouvelle approche de filtrage devient populaire pour surmonter les inconvénients des filtres passifs, comme les résonances et la détérioration des performances en cas de variations de l'impédance du réseau. Cette méthode combine des filtres actifs de faible puissance avec des filtres passifs. Les filtres passifs éliminent les harmoniques les plus significatifs, ce qui réduit la taille des filtres actifs. Ces derniers ne compensent que les perturbations restantes, réduisant ainsi les besoins en dimensionnement et améliorant l'efficacité globale du système de filtrage.

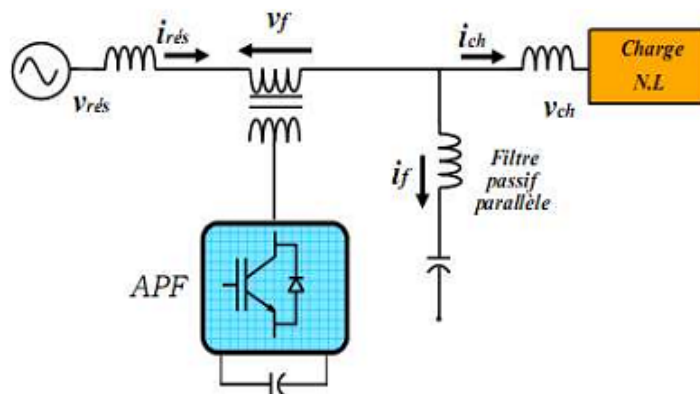


Figure I- 9 Filtre actif série en parallèle avec un filtre passif parallèle.

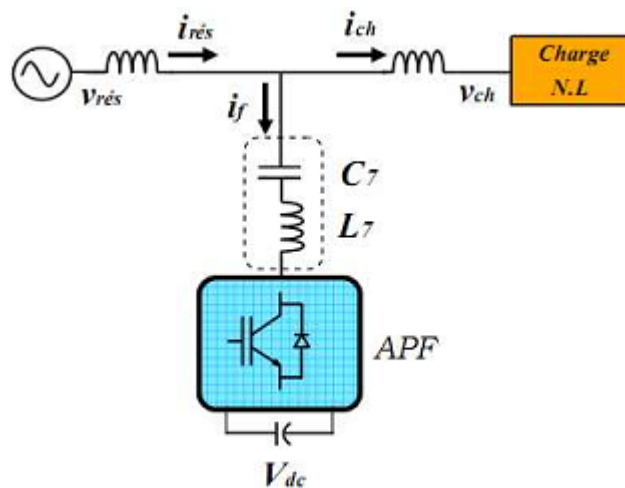


Figure I- 3 Filtre actif série en série avec un filtre passif parallèle.

## I.5 Etude et simulation d'un FAP à deux niveaux

**I.5.1 Description du système :** Soit un système composé d'une source d'alimentation triphasée, d'une charge non linéaire et d'un filtre actif parallèle. Le filtre utilise un onduleur de tension à trois bras avec des semi-conducteurs (IGBT) et un banc de condensateurs pour stocker l'énergie côté continu. Un filtre de connexion inductif est nécessaire pour filtrer les courants à haute fréquence lors de la connexion de l'onduleur au réseau et pour sa commande en courant. Un système de commande est également intégré pour contrôler le FAP.[10]

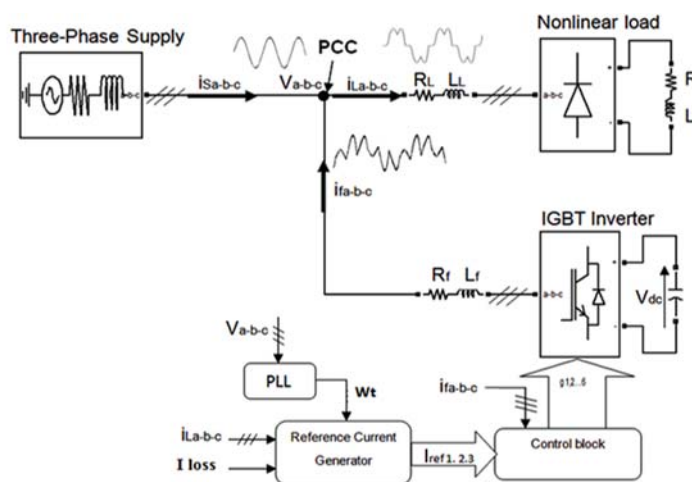


Figure 0-11 Schéma global du système de compensation

### I.5.2 Principe de fonctionnement

La figure I.13 illustre le principe de fonctionnement d'un filtre actif parallèle (FAP). En présence d'une charge non linéaire, des harmoniques se superposent au courant provenant de la source, créant ainsi un courant pollué.

On désigne par :

$i_L$  le courant de la charge;  $i_f$  : le courant filtré et  $I_{ref}$  : le courant de référence

En injectant des courants harmoniques égaux et en opposition de phase par rapport à ceux absorbés par la charge, le filtre actif parallèle génère un courant de ligne sinusoïdal.

### I.5.3 Model du réseau d'alimentation

Le réseau est représenté par une source triphasées équilibrées en série avec une impédance interne, décrit par l'équation II-1.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \sqrt{2} \cdot E \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{I-13})$$

Et pour l'impédance on peut écrire :

$$Z_{cc} = R_{cc} + jL_{cc}\omega \quad (\text{I-14})$$

### I.5.4 Model de la charge

La charge utilisée dans ce système est une charge non linéaire, représentée par un redresseur triphasé à diodes utilisant un pont de GrêtZ, associé à une charge inductive. La figure I-14 illustre le modèle de cette charge.

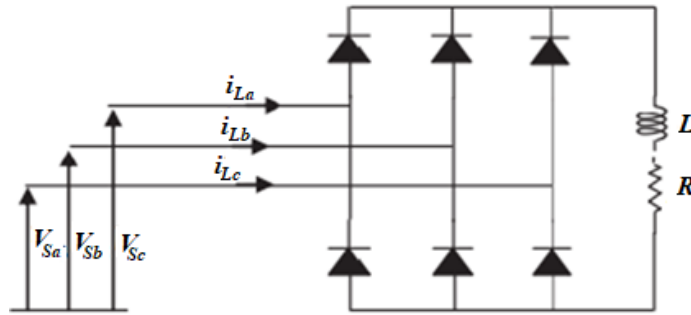


Figure I-12 Redresseur avec une charge R-L

Une charge non linéaire génère des harmoniques au niveau du réseau, et ces harmoniques en courant sur le côté alternatif peuvent avoir des répercussions néfastes sur le réseau d'alimentation. C'est pourquoi il est intéressant d'utiliser un filtre actif parallèle (FAP) pour améliorer la qualité de l'énergie.

Les performances du FAP sont évaluées à partir du taux global de distorsion harmonique (THD).[10] :

$$THD\% = 100 \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^n I_{Si}^2}{I_{S1}^2}} \quad (I-15)$$

$I_{S1}$  : la valeur efficace du courant fondamental

$I_{Si}$  : les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant.

### I.5.5 Structure du filtre actif parallèle

Le filtre actif parallèle se divise en deux parties principales. La partie puissance comprend un pont de six transistors de puissance avec des diodes en antiparallèle, pour une conversion bidirectionnelle de la puissance. Du côté continu, une capacité  $C_{dc}$  stocke l'énergie, agissant comme source de tension pour le fonctionnement du montage en redresseur ou en onduleur. [23].

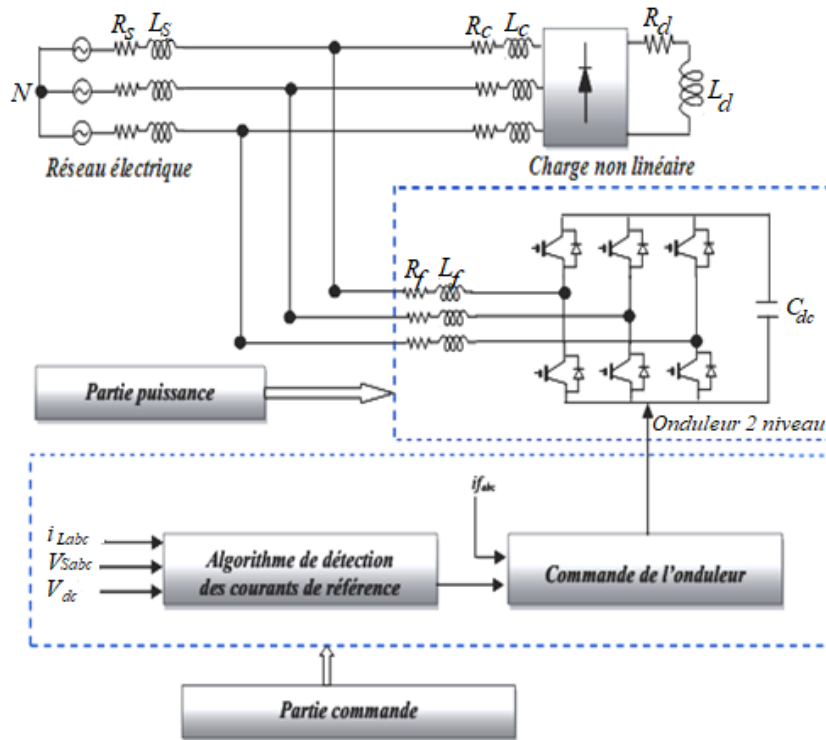


Figure I-13 Structure générale du filtre actif parallèle

La génération des signaux de référence est réalisée par la méthode du référentiel synchrone, tandis que les instants de commutation des interrupteurs de l'onduleur sont déterminés par la méthode de commande par hystérésis, Etude du système de puissance

La partie puissance comporte trois étages essentiels :

**A. Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux :** Le modèle d'onduleur triphasé à structure de tension est constitué de trois bras, chacun comportant deux semi-conducteurs montés en série, tels que des IGBT, avec des diodes en antiparallèle pour la circulation du courant. Un condensateur à la sortie de l'onduleur assure le stockage d'énergie et maintient la tension à une valeur quasi-constante, permettant ainsi la régulation du bus continu.

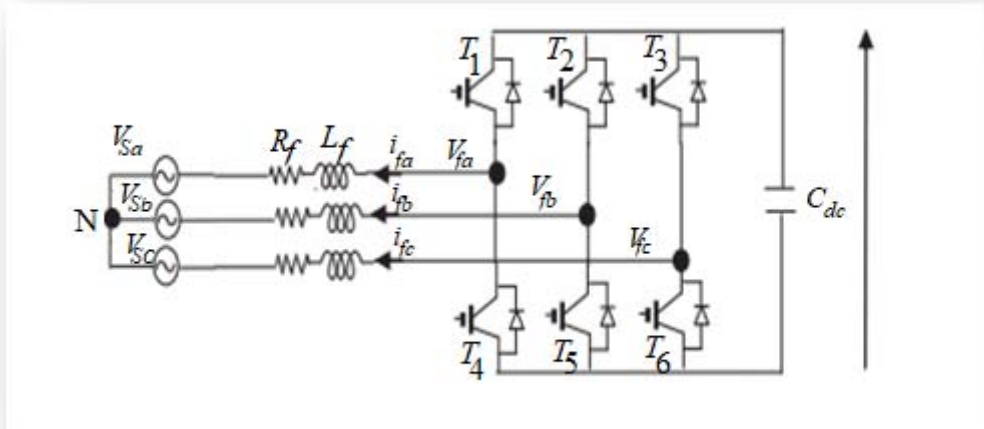


Figure I-14 Onduleur de tension à deux niveaux

Les semi-conducteurs d'un même bras de l'onduleur sont commandés de manière complémentaire. Un temps mort est introduit où les semi-conducteurs du même bras sont tous deux ouverts, évitant ainsi tout court-circuit du condensateur.[21]. L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la Figure I.16 dépendent de l'état des signaux de commande ( $S_a, S_b, S_c$ ) comme il est défini par [12] :

$$\begin{aligned}
 S_a &= \begin{cases} 1 & T_1 \text{ fermé et } T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & T_1 \text{ ouvert et } T_4 \text{ fermé} \end{cases} \\
 S_b &= \begin{cases} 1 & T_2 \text{ fermé et } T_5 \text{ ouvert} \\ 0 & T_2 \text{ ouvert et } T_5 \text{ fermé} \end{cases} \\
 S_c &= \begin{cases} 1 & T_3 \text{ fermé et } T_6 \text{ ouvert} \\ 0 & T_3 \text{ ouvert et } T_6 \text{ fermé} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{I-16}$$

Les tensions de ligne, imposées par l'onduleur, sont alors définies par :

$$\begin{bmatrix} V_{fa} - V_{fb} \\ V_{fb} - V_{fc} \\ V_{fc} - V_{fa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_a - S_b \\ S_b - S_c \\ S_c - S_a \end{bmatrix} V_{dc} \tag{I-17}$$

Les tensions de sortie de l'onduleur sont données par :

$$V_{fx} = V_{sx} + L_f \frac{di_{fx}}{dt} + R_f i_{fx} \quad (\text{I-18})$$

avec ( $x = \{a, b, c\}$ ),

Les tensions du réseau étant supposées équilibrées et sachant que la somme des courants injectés par l'onduleur est nulle, on peut écrire :

$$\begin{cases} V_{Sa} + V_{Sb} + V_{Sc} = 0 \\ i_{fa} + i_{fb} + i_{fc} = 0 \end{cases} \quad (\text{I-19})$$

Nous pouvons donc déduire des équations (I.18) et (I.19) la relation suivante :

$$V_{fa} + V_{fb} + V_{fc} = 0 \quad (\text{I-20})$$

A partir des équations (I.17) et (I.20), nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_a - S_b - S_c \\ S_a - 2S_b - S_c \\ S_a - S_b - 2S_c \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{3} \quad (\text{I-21})$$

Puisque les grandeurs  $S_a$ ,  $S_b$  et  $S_c$  peuvent prendre chacune deux valeurs (0 ou 1), il en résulte huit commandes possibles, présentées dans le tableau **II.1**.

État	$S_a$	$S_b$	$S_c$	$V_{fa}$	$V_{fb}$	$V_{fc}$
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$
2	0	1	0	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$
3	1	1	0	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{-2V_{dc}}{3}$
4	0	0	1	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{2V_{dc}}{3}$
5	1	0	1	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{-2V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$
6	0	1	1	$\frac{-2V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$
7	1	1	1	0	0	0

**Tableau 0-2 : Tensions générées par l'onduleur de tension à deux niveaux.**

**B. Système de stockage d'énergie :** Le condensateur représente la source continue de tension de l'onduleur ( $V_{dc}$ ). Une quantité d'énergie doit être continuellement emmagasinée dans cette source. Cependant, en raison des pertes dans les interrupteurs et dans le condensateur, cette source doit être constamment alimentée en énergie depuis le réseau via le convertisseur. Pour maintenir son bon fonctionnement, la tension  $V_{dc}$  est maintenue constante afin de compenser les fluctuations qui pourraient affecter la qualité du filtrage.

**C. Filtre de sortie :** Pour assurer la liaison entre le réseau et l'onduleur de tension, il est nécessaire d'ajouter un filtre de sortie. Le dimensionnement de ce filtre doit prendre en compte deux points importants :

a) Il doit fournir une atténuation suffisante des rebondissements causés par la commutation des semi-conducteurs de l'onduleur du filtre actif.

b) Il doit préserver les performances du filtre actif, définies par...

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{di_{ref}}{dt} \quad (I-22)$$

Un filtre de sortie du premier ordre est le plus souvent utilisé dans la littérature, il est composé d'une inductance  $L_f$  et de résistance  $R_f$ . Une valeur relativement faible de  $L_f$  permet d'obtenir une bonne dynamique du FAP en satisfaisant l'égalité (II-9) [15, 5].

#### D. Etude du système de commande

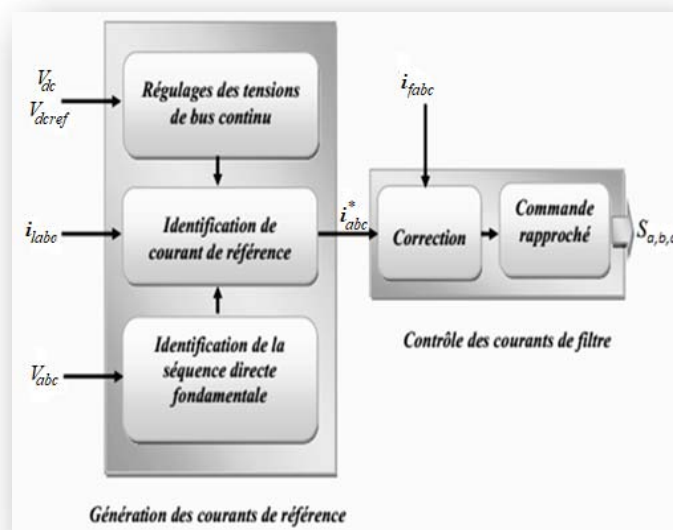


Figure 0-15 Système de commande du FAP

**E. Contrôle de courant par hystérésis :** Cette méthode compare l'écart entre les courants de référence et le courant produit par l'onduleur avec une bande de tolérance appelée bande d'hystérésis. [27] Lorsque l'erreur dépasse les limites de la bande d'hystérésis, un signal de commande est envoyé à l'onduleur pour maintenir le courant à l'intérieur de cette bande comme illustre dans la figure I.17.

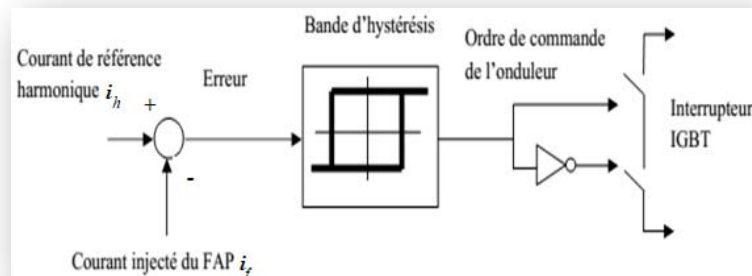


Figure 0-16 Principe de la technique de commande par hystérésis.

Après la détection des courants harmoniques, ceux-ci sont comparés aux courants injectés par l'onduleur en utilisant la commande par hystérésis. Cette technique, qui utilise une bande d'hystérésis comme unique paramètre de contrôle pour chaque bras de l'onduleur, génère des signaux de commutation pour les interrupteurs. la figure I.17.[28].

Réglage de la tension continu de l'onduleur

**F. Utilisation d'un régulateur PI :** Le réglage précis de  $K_p$  et  $K_i$  est crucial pour obtenir les performances souhaitées du FAP, en assurant à la fois une réponse rapide et précise à la consigne tout en minimisant les erreurs en régime permanent. Les techniques de réglage des gains incluent l'analyse fréquentielle, les méthodes empiriques basées sur les essais en laboratoire, et les approches plus avancées telles que l'optimisation des performances du système (figure I.17).

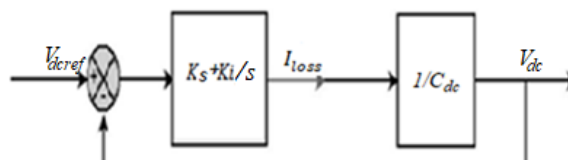


Figure 0-17 : Boucle de réglage de tension continu  $V_{dc}$

La fonction de transfert est donnée par :

$$\frac{V_{dc}}{V_{dcref}-V_{dc}} = \frac{2\xi\omega_c s + \omega_c^2}{s^2 + 2\xi\omega_c s + \omega_c^2} \quad (I-22)$$

Où le coefficient d'amortissement  $\zeta$  et la fréquence de coupure  $\omega_c$  sont donnés par

$$\begin{cases} K_i = \omega_c^2 C_{dc} \\ K_p = 2\xi\omega_c C_{dc} \end{cases} \quad (I-23)$$

### I.5.6 Identification des harmoniques par un FAP :

Les algorithmes pour générer les signaux de référence contrôlant les semi-conducteurs de l'onduleur varient selon différentes approches, certains dans le domaine temporel, d'autres dans le domaine fréquentiel, et d'autres encore utilisant des méthodes différentes.

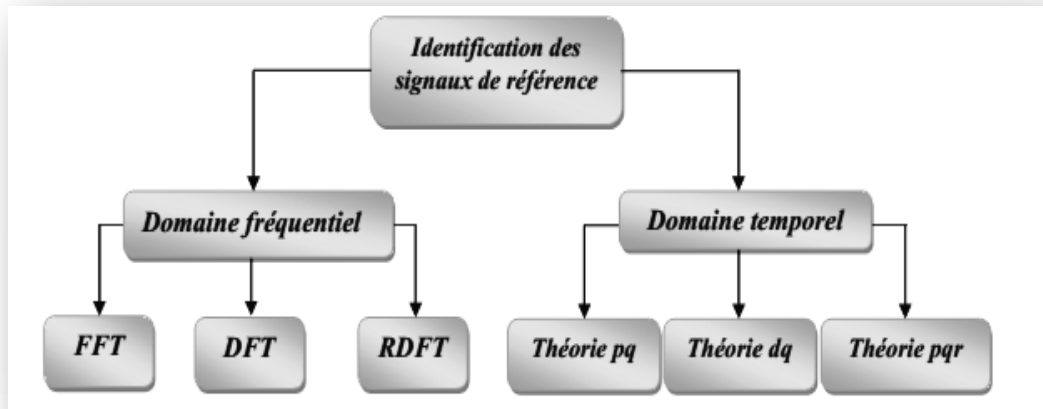


Figure 0-18 : Techniques d'identification des harmoniques.

Les algorithmes de contrôle des signaux de référence pour l'onduleur se divisent en deux catégories, ceux opérant dans le domaine temporel et ceux dans le domaine fréquentiel.

**Méthode basée sur les puissances instantanées :** La méthode des puissances instantanées de H. Akagi utilise la transformation de Concordia pour convertir les grandeurs électriques triphasées en un système diphasé (repère  $\alpha$ - $\beta$ ), puis calcule les puissances instantanées réelles et imaginaires. Cette approche permet de détecter les courants harmoniques en transformant la composante fondamentale en continu et les harmoniques en alternatif, offrant ainsi une mesure précise des harmoniques sans les complexités des méthodes fréquentielles. [36] [37].

Tel que :

$$\begin{bmatrix} V_{S0} \\ V_{S\alpha} \\ V_{S\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{bmatrix} \quad (\text{I.24})$$

De même, les courants peuvent être exprimés comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_{S0} \\ i_{S\alpha} \\ i_{S\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Sa} \\ i_{Sb} \\ i_{Sc} \end{bmatrix} \quad (\text{I-25})$$

Les composantes avec l'indice (0) représentent les séquences homopolaires du système triphasé de courant et de tension.

La puissance active instantanée, notée  $p(t)$ , est définie par la relation suivante :

$$p(t) = V_{Sa}i_{Sa} + V_{Sb}i_{Sb} + V_{Sc}i_{Sc} = V_{S\alpha}i_{S\alpha} + V_{S\beta}i_{S\beta} = p(t) + p_0(t) \quad (\text{I-26})$$

avec :

$p(t)$  : la puissance réelle instantanée,  
 $p_0(t) = V_0 \cdot i_0$  désigne la puissance homopolaire instantanée.

De la même manière, la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante :

$$q(t) = \frac{1}{\sqrt{3}}[(V_{Sa} - V_{Sb})i_{Sc} + (V_{Sb} - V_{Sc})i_{Sa} + (V_{Sc} - V_{Sa})i_{Sb}] = V_{S\alpha}i_{S\alpha} - V_{S\beta}i_{S\beta} \quad (\text{I-27})$$

Contrairement à la puissance réactive, qui ne considère que la fréquence fondamentale, la puissance imaginaire prend en compte toutes les composantes harmoniques de courant et de tension. C'est pourquoi on lui donne une autre dénomination (puissance imaginaire) avec comme unité le *volt-ampère imaginaire (VAI)*.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{S\alpha} & V_{S\beta} \\ -V_{S\beta} & V_{S\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{S\alpha} \\ i_{S\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{I-28})$$

Dans le cas général, chacune des puissances  $p$  et  $q$  comporte une partie continue et une partie alternative, ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{I-29})$$

avec :

- $\bar{P}$  : Puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension.
- $\bar{q}$  : Puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension.
- $\tilde{p}, \tilde{q}$  : Puissances alternatives liées aux composantes harmoniques perturbatrices du courant et de la tension.

Dans la méthode des puissances instantanées, on utilise généralement, soit un filtre passe-haut, soit un filtre passe-bas afin de ne garder que la composante harmonique du signal. Ce dernier est le plus utilisé car il ne présente pas une amplification aux

fréquences voisines de la fréquence de résonance et son résidu harmonique est moins important afin de ne garder que la composante harmonique du signal.

Pour le filtre passe-bas, la fonction de transfert est :

$$F_B(p) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (I-30)$$

Dans cette étude, le choix d'un filtre passe-bas du deuxième ordre est motivé par la nécessité d'optimiser à la fois la dynamique et l'efficacité de la méthode d'identification. Opter pour un ordre supérieur entraînerait inévitablement des temps de calcul plus longs, ce qui pourrait compromettre la faisabilité pratique de l'approche.

Quant à la fréquence de coupure  $\omega_0 = 2\pi f_0$ , elle est soigneusement sélectionnée pour deux objectifs majeurs. Tout d'abord, elle doit être ajustée de manière à ce que le filtre puisse filtrer efficacement toutes les composantes perturbatrices des puissances instantanées. Ensuite, elle doit permettre le passage des composantes continues représentant les puissances active et réactive à la fréquence fondamentale.

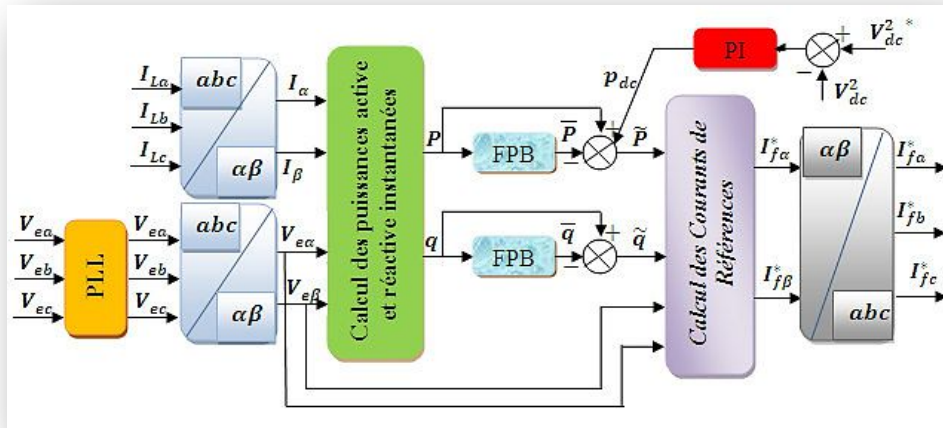


Figure I-19 : Principe de la méthode (p q)

### I.5.7 Résultats et discussion

Les résultats de simulation ont été obtenus sous l'environnement Matlab/Simulink avec les paramètres suivant :

Réseau d'alimentation						
Paramètre	Vs	F	R s	L s	L <sub>i</sub>	R <sub>i</sub>
Valeurs	380 v	50 Hz	0.1 Ω	0.05mH	0.25mH	1 Ω
Charge non-linéaire						
Paramètre	Rd	L d				
Valeurs	1mH	7 Ω				
Filtre actif parallèle						
Paramètre	L f	R f	V dc	C dc		
Valeurs	3mH	0.1Ω Ω	700 v	2200uf		

Tableau I.3 : Paramètres du système

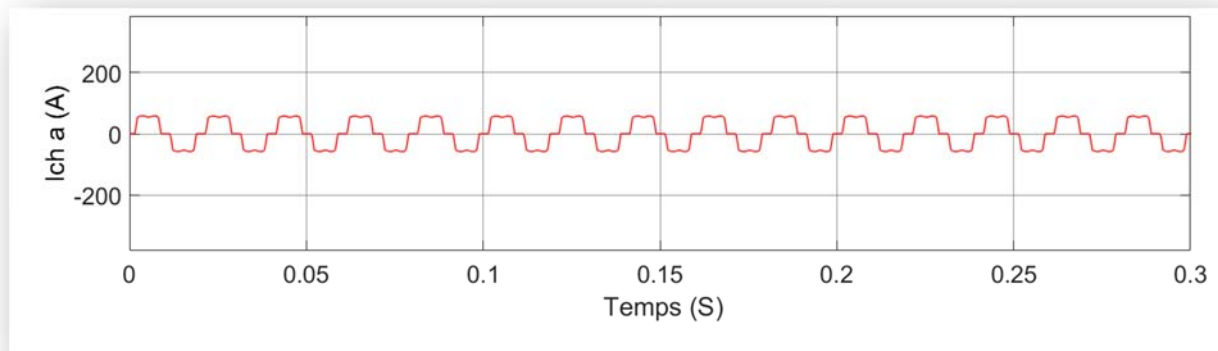


Figure 0-20 : Forme d'onde du courant de charge avant filtrage

Cette figure montre le THD du courant de charge avant le filtrage avec un tau de 24,20 %, ce qui confirme la présence d'harmoniques.

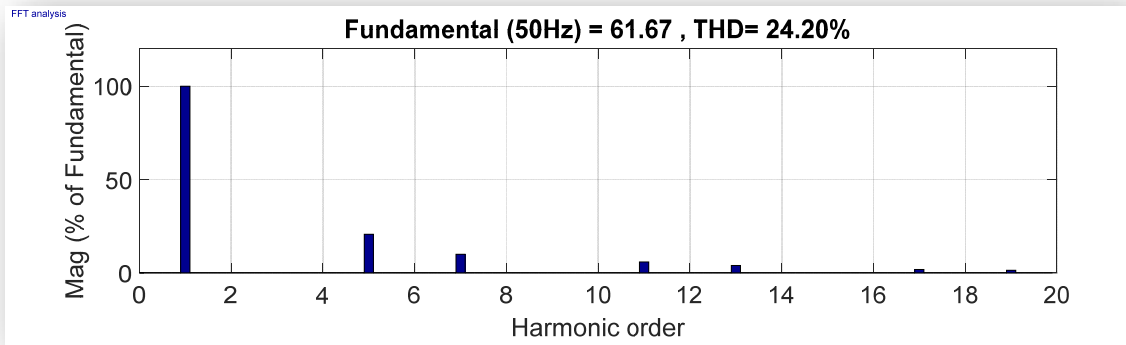


Figure I-21 : Spectre harmonique de courant de source avant filtrage.

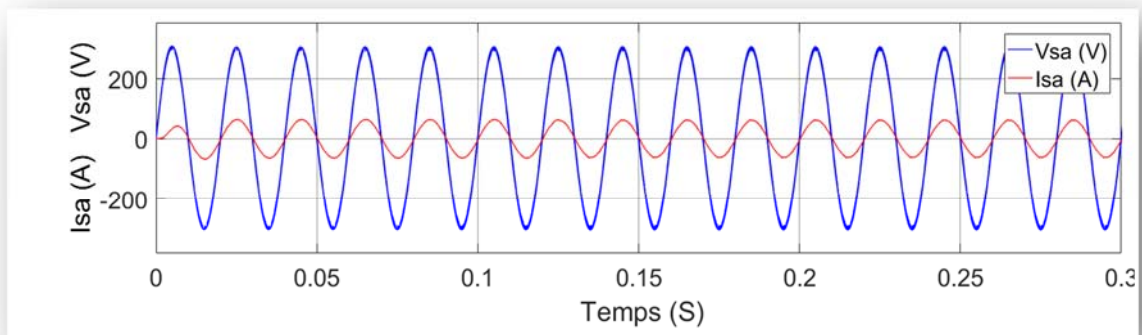


Figure I-22 : Forme d'onde du courant de la tension de la source

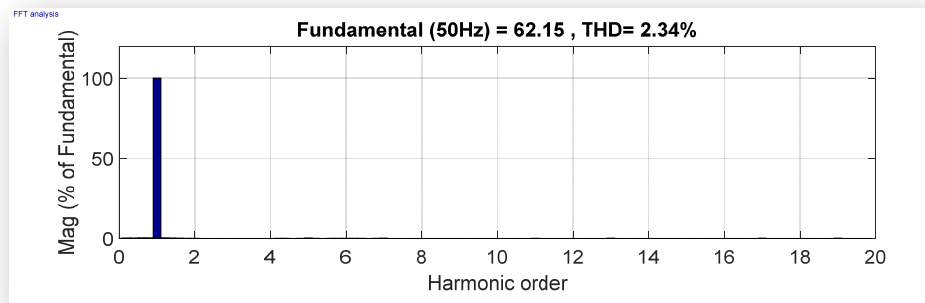
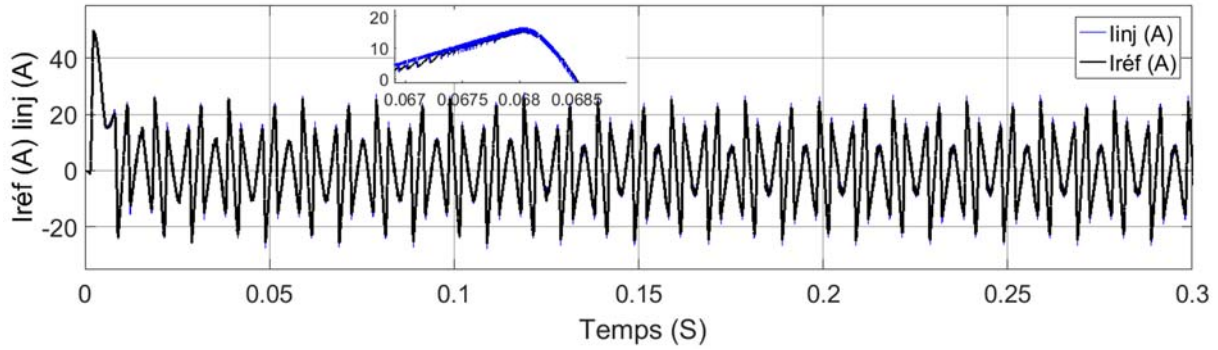


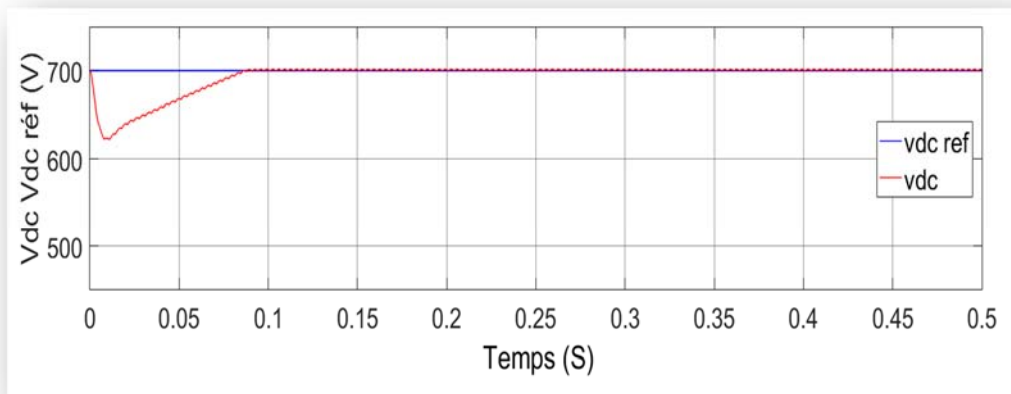
Figure I.23 : la tension et le courant de la source après le filtrage et le spectre du courant  $i_{sa}$  (théorie (p q)).

Ainsi, le filtrage a permis de rendre le courant de source quasiment sinusoïdal grâce au FAP et à sa commande, atteignant un THD de 2,34 %. Cela est conforme à la norme IEEE qui exige un THD inférieur à 5 %.



**Figure I-24 : Courant de référence et courant injecté**

Le courant de référence est suivi par le courant injecté, ce qui démontre un bon contrôle des interrupteurs de commutation du convertisseur AC-DC, garantissant ainsi la stabilité énergétique du réseau.



**Figure I-25 : Réponses de la tension du bus DC avec un régulateur PI**

La partie du bus continu a été bien réglée, notamment en régime permanent, ce qui confirme la stabilité du comportement du FAP en termes de stabilisation et de précision de l'énergie qui passe du filtre au réseau, permettant ainsi d'éliminer les harmoniques et de compenser l'énergie réactive.

## **I.6 : Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons examiné les perturbations qui altèrent les ondes de courant dans les réseaux électriques. Sachant que ce type de perturbations peuvent provoquer des dysfonctionnements, voire la destruction des équipements dans certains cas.

Pour remédier à ces problèmes, plusieurs solutions de dépollution traditionnelles et modernes ont été développées. Nous nous concentrons ici sur les filtres actifs de puissance. Nous avons également étudié et simulé un FAP à deux niveaux, qui se compose de deux parties : la commande et la puissance. Nous avons appliqué la théorie de la puissance instantanée active et réactive pour l'extraction des courants harmoniques, et utilisé la commande par hystérésis pour la modulation, ainsi qu'un régulateur PI pour la régulation du bus continu. Les résultats de simulations ont été très probants conformes aux normes en vigueur.

# **Chapitre II**

## **Filtre actif parallèle à trois niveaux**

## **II.1 Introduction**

De nombreuses configurations de filtres actifs à base d'onduleur multiniveaux existent dans la littérature. Les onduleurs multiniveaux présentent comme principal avantage la réduction des contraintes en tension sur les interrupteurs de puissance. Pour les applications de filtrage actif, ces topologies ont donc été sujets de recherche très tôt avec la topologie NPC. [19]

Dans ce chapitre, nous présenterons une description générale des différentes parties du système de filtrage étudié, à savoir : le modèle du réseau d'alimentation électrique, le filtre actif parallèle et sa structure ainsi que la charge polluante. L'intérêt se portera également sur la modélisation et le contrôle du filtre actif de puissance en se basant sur la commande d'un FAP a sept niveaux.

## **II.2 Description du système**

Pour raccorder l'onduleur au réseau et le commander en courant il est nécessaire d'utiliser un filtre de raccordement de nature inductive pour filtrer les courantes hautes fréquences. [16] Le système utilisé dans cette partie est constitué d'une source de tension triphasée, d'une charge non linéaire (charge polluante) et d'un filtre actif parallèle formé par un onduleur de tension a trois niveaux de type (NPC) sans neutre. Le stockage de l'énergie du côté continu est réalisé par un banc de condensateurs.

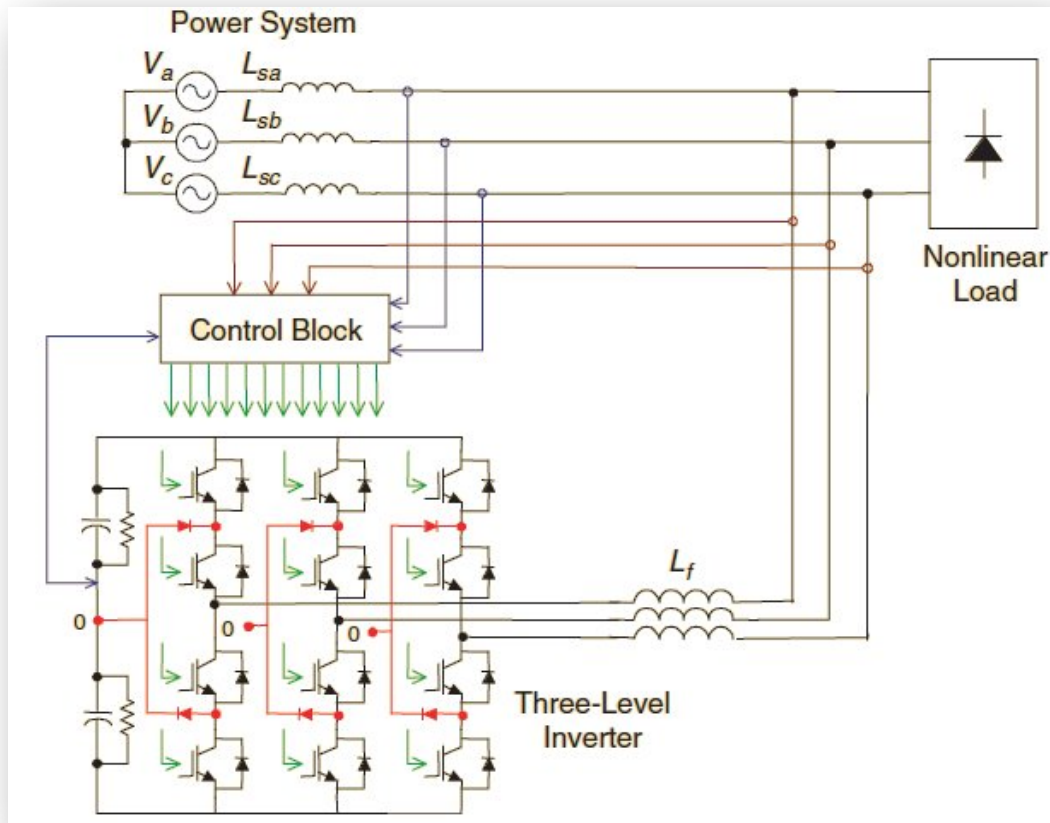


Figure II- 1 Schéma global du système de compensation

### II.3 Principe de fonctionnement

Dans le schéma illustré dans la Figure (II.1), le filtre actif est intégré en parallèle au réseau électrique. Il est généralement commandé comme un générateur de courant, injectant ainsi dans le réseau des courants perturbateurs équivalents à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ces derniers. Cette stratégie a pour effet de rendre le courant du côté réseau quasi-sinusoïdal.

Le courant harmonique  $I_h$  que doit fournir le filtre est égal à la différence entre le courant d'entrée  $I_{ch}$  du convertisseur polluant et le courant sinusoïdal  $I_S$  fourni par le réseau.

## II.4 Modèle du réseau d'alimentation

Le réseau est un système de f.é.m. triphasées équilibrées en série avec une impédance (dite de court-circuit). Il est régi par l'équation II-1

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \sqrt{2} \cdot E \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II-1})$$

Et pour l'impédance :

$$Z_{cc} = R_{cc} + jL_{cc}\omega \quad (\text{II-2})$$

## II.5 Modèle de la Charge

La charge utilisée dans ce système est une charge non linéaire, représentée par un redresseur triphasé à diodes « pont de Grêtz » associé à une charge inductive. La figure II-2 illustre le modèle de charge utilisée.

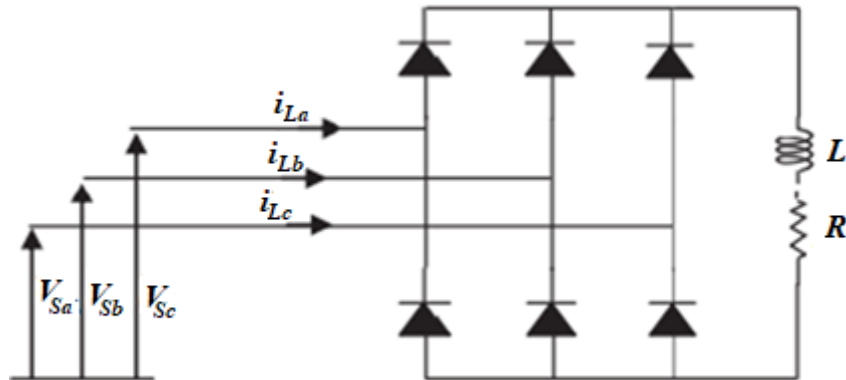


Figure II- 2 Redresseur avec une charge R-L

Une charge non linéaire injecte des courants harmoniques au niveau du réseau, ces harmoniques peuvent avoir des répercussions néfastes sur le réseau d'alimentation. Pour cela l'utilisation de FAP pour améliorer la qualité d'énergie d'un réseau d'alimentation constitue une solution adéquate.

Les performances du filtre actif parallèle sont déterminés à partir du taux global de distorsion harmonique (THD):

$$THD\% = 100 \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^n I_{si}^2}{I_{S1}^2}} \quad (II-3)$$

$I_{S1}$  : la valeur efficace du courant fondamental et  $I_{si}$  : les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant.

### II.5 Structure du Filtre Actif Parallèle trois niveaux NPC

Pour réduire l'ondulation causée par le fonctionnement en commutation du filtre actif, il est nécessaire de le connecter au réseau à travers un filtre passif, typiquement de premier ordre. Ce filtre passif est composé d'une inductance  $L_f$  et d'une résistance  $R_f$ , agissant ensemble pour atténuer les fluctuations de courant résultant du processus de commutation.

Côté continu, une capacité  $C_{dc}$  est placée en parallèle pour stocker l'énergie. Cette capacité agit comme une source de tension, facilitant le fonctionnement du montage en tant que redresseur ou onduleur. En stockant l'énergie, la capacité  $C_{dc}$  assure une tension continue plus stable, limitant ainsi les variations indésirables dans le circuit. La tension  $V_{dc}$  est maintenue constante afin de remédier aux fluctuations qui peuvent affecter la qualité du filtrage [21].

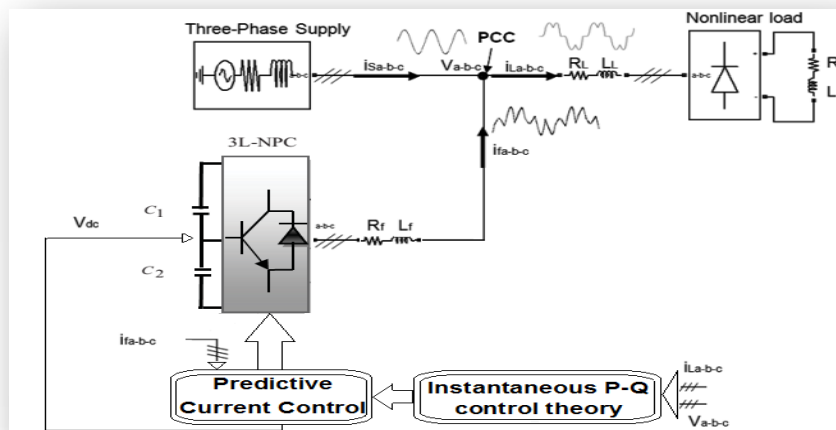


Figure II- 3 Structure générale du filtre actif parallèle

La génération des signaux de référence est assurée par la méthode des puissances instantanée active et réactive. Les instants de commutation des interrupteurs de l'onduleur sont générés par la méthode de la modulation de largeur impulsion (MLI).

### II.5.1 Etude du système de puissance

La partie puissance se compose de trois étages essentiels :

Modélisation de l'onduleur de tension à trois niveaux NPC : La topologie SAPF triphasée et à trois niveaux utilisés dans notre étude est illustrée par l'onduleur NPC et est composée de 12 commutateurs actifs et de 6 diodes de blocage, la partie continue DC est composée de deux condensateurs identiques, et leur point médian (point neutre) est désigné par "n". Pour les trois phases de l'onduleur NPC, 27 états de commutation sont générés, qui produisent 19 vecteurs de tension différents comme illustré dans Figure II-4. [22]

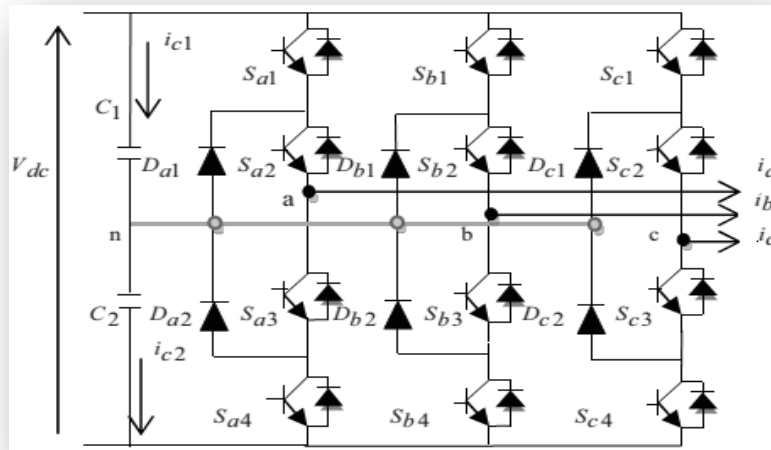


Figure II- 4 Onduleur de tension à trois niveaux NPC

Les états de commutation  $S_x$  représente l'état de commutation de la phase x, avec x égal à {a, b, c}, et peut avoir trois valeurs possibles désignées par +, 0 et - qui représentant les combinaisons de commutation qui génèrent respectivement une tension DC divisée par deux, zéro et une tension DC divisée par deux négatives, à la sortie de la phase du convertisseur. [23]

Les états de commutation et les tensions aux bornes du convertisseur correspondants sont indiqués dans le tableau suivant :

$S_x$	$S_{x1}$	$S_{x2}$	$S_{x3}$	$S_{x4}$	$V_{xn}$
+	1	1	0	0	$V_{dc}/2$
0	0	1	1	0	0
-	0	0	1	1	$-V_{dc}/2$

Tableau II- 1 États de commutation pour une phase de l'onduleur

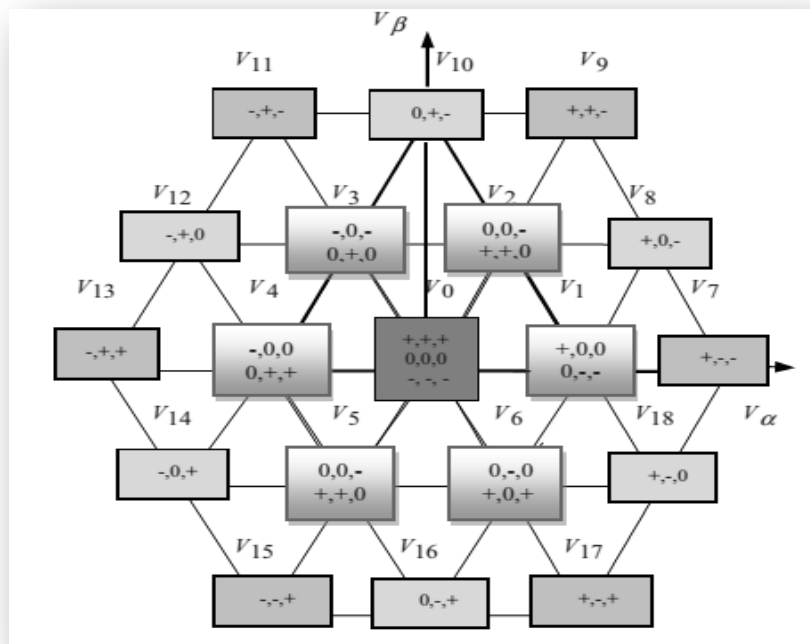


Figure II- 5 Vecteurs de tension générés par le convertisseur à trois niveaux

La figure II-5 montre que 27 états de commutation sont générés, qui produisent 19 vecteurs de tension différents. Les vecteurs de tension sont divisés en quatre groupes qui sont respectivement [23] :

- Vecteurs de tension nulle ( $V_0$ ).
- Vecteurs de petite tension ( $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$ ).
- Vecteurs de tension moyenne ( $V_8, V_{10}, V_{12}, V_{14}, V_{16}, V_{18}$ ).
- Vecteurs de grande tension ( $V_7, V_9, V_{11}, V_{13}, V_{15}, V_{17}$ )

### II.5.1.1 Principe de fonctionnement de l'onduleur NPC

L'objectif principale de l'emploi d'un onduleur NPC est l'obtention en sortie d'une tension à trois niveaux par la superposition de deux interrupteurs alimentés de façon individuel par une source de tension continue. Elle est composée de trois bras monophasés [24]. L'emploi de deux condensateurs identique  $C_1$  et  $C_2$  permet la délivrance a notre système deux tension de valeur  $(E/2)$ .

Chaque demi-bras de l'onduleur se compose de deux interrupteurs ( $K_{ij}$ ) en série avec leur point commun relié par une diode de bouclage au point neutre des sources ( $o$ ) positionné entre les deux condensateurs. Une diode montée en antiparallèle sur chaque interrupteur assure la réversibilité des courants dans la charge.

Soit la structure d'un bras représentée dans la figure II-6.

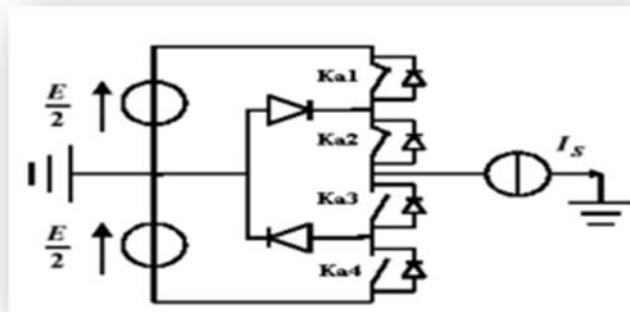


Figure II- 6 Bras d'un onduleur NPC à trois niveaux.

Il est nécessaire de déterminer les valeurs possibles que peut avoir la tension  $V_{a0}$ . Cette tension dépend de l'état des quatre interrupteurs  $K_{a1}$ ,  $K_{a2}$ ,  $K_{a3}$  et  $K_{a4}$  du bras. Avec  $2^4 = 16$  configurations possibles, seules trois d'entre elles seront implémentable, le reste présentent des risques de courts-circuits des tensions continue, ou de déconnexion de la charge.

**A Première configuration** (figure II-7)

$K_{a1}$ , $K_{a2}$ sont passants	La valeur de la tension de sortie est : $V_{a0} = +E/2$ (II.4)
$K_{a3}$ , $K_{a4}$ sont bloqués	

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{K_{a3}} = V_{K_{a4}} = +E/2 \quad (II.5)$$

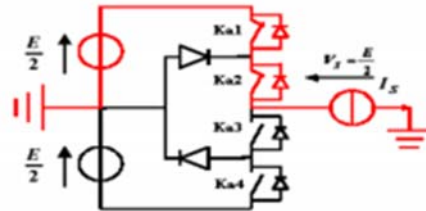


Figure II-7 : 1<sup>ère</sup> Configuration du 1<sup>er</sup> bras.

**B. Deuxième configuration** (figure II-8)

$K_{a2}$ , $K_{a3}$ état passants	Le point a est relié directement au point neutre 0 la tension de sortie $V_{a0}$ est nulle $V_{a0} = 0$ (II-6)
$K_{a1}$ , $K_{a4}$ état bloqués	

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$VKa_1 = VKa_4 = +E/2 \quad (II-7)$$

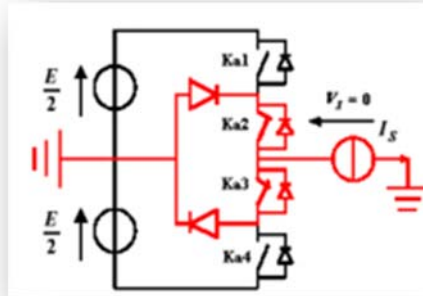


Figure II-8 : 2<sup>ème</sup> Configuration du 1<sup>er</sup> bras.

### C. Troisième configuration :

Ka3, Ka4 sont passants et Ka1, Ka2 sont bloqués (figure (II.9)), on a la valeur de la tension simple de sortie est :

$$Va_0 = -E/2 \quad (II-8)$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$VKa_1 = VKa_2 = +E/2 \quad (II-9)$$

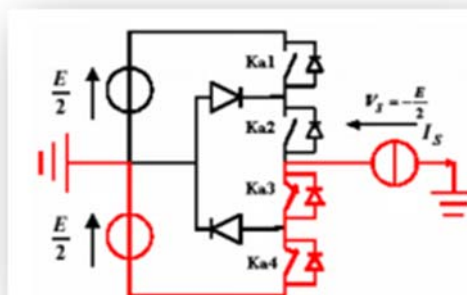


Figure II-9 : 3<sup>ème</sup> Configuration du 1<sup>er</sup> bras.

La tension aux bornes des interrupteurs de puissance ne devrait pas excéder la moitié de la valeur du bus d'entrée.

Etat des interrupteurs				Tension de sortie $V_{ao}$
Ka1	Ka2	Ka3	Ka4	
1	1	0	0	$E/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-E/2$

Tableau II- 2 Etat de commutation d'un bras de l'onduleur.

Pour visualiser l'enchaînement des configurations décrites ci-dessus, la figure II-10 représente les signaux de commande de chaque interrupteur, ainsi que la forme d'onde de la tension de sortie

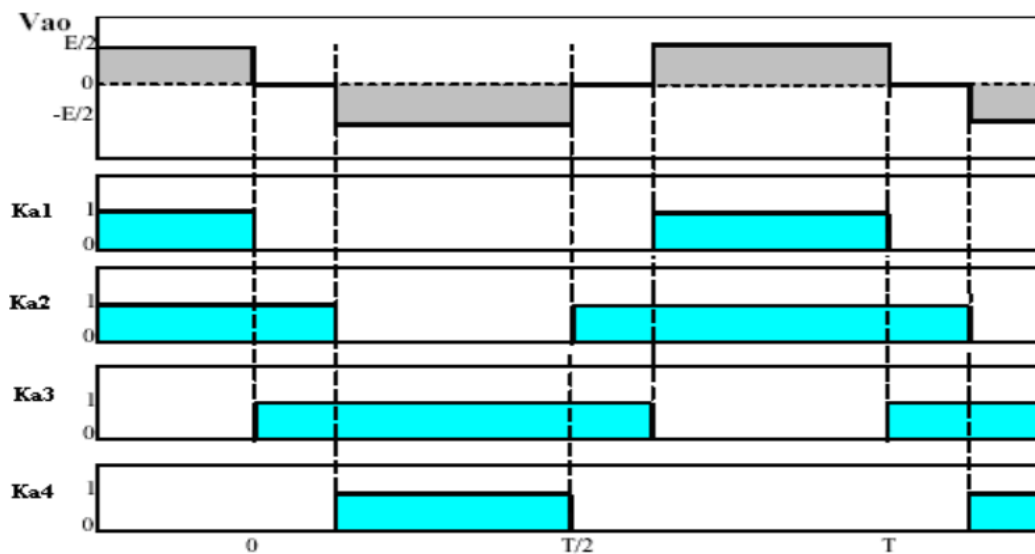


Figure II- 10 Forme d'onde de la tension de sortie d'un bras d'onduleur à trois Niveaux de Type NPC.

La structure de l'onduleur à trois niveaux limite à  $E/2$  la tension imposée à chaque interrupteur lorsqu'il est bloqué, alors que dans la structure classique de l'onduleur, cette tension vaut la tension continue complète  $E$ . C'est cette caractéristique de l'onduleur à

trois niveaux qui permet de monter en puissance, dans le cas des applications de forte puissance.

Donc, la tendance vers l'augmentation du nombre de niveaux est dictée par le besoin de tensions plus élevées pour les applications de forte puissance. Plus le nombre de niveaux augmente, plus le nombre de palier la tension de sortie augmente, ce qui permet de se rapprocher le plus d'une sinusoïde.

### II.6 Etats de l'onduleur

Ses états sont identifiés en indiquant les états des trois bras. Par exemple, l'état (210) indique que le premier bras est à l'état (2), le deuxième est à l'état (1), et le troisième est à l'état (0). La Figure II-11 résume les états de l'onduleur triphasé à trois niveaux. Chaque bras de l'onduleur peut prendre trois états. Ainsi l'onduleur triphasé a  $3^3 = 27$  états possibles.

Etat du bras	Etat des interrupteurs du bras				Tension de sortie
	$S_{x1}$	$S_{x2}$	$S_{x3}$	$S_{x4}$	
2	1	1	0	0	$\frac{V_{dc}}{2}$
1	0	1	1	0	0
0	0	0	1	1	$-\frac{V_{dc}}{2}$

Tableau II- 3 Etat d'un bras de l'onduleur

#### II.6.1 Relation entre les fonctions des demi-bras

La fonction de connexion du demi bras noter  $F_k^Z$  avec

$Z = h$	pour le demi-bras du haut
$Z = b$	pour le demi-bras du bas.

Les fonctions de connexions des interrupteurs expriment les fonctions de connexions des demi-bras, pour un bras k, tel que :

$$F_k^h = F_{k1} \cdot F_{k2} \quad (\text{II-10})$$

$$F_k^b = F_{k3} \cdot F_{k4} \quad (\text{II-11})$$

$F_k^h$  est affectée au demi-bras du haut.

$F_k^b$  est affectée au demi-bras du bas {Citation}.

La modélisation du système a étudié sera baser sur l'association d'une charge triphasé équilibrée et un onduleur de tension triphasé. Soient  $V_a, V_b, V_c$ , les tensions simples aux bornes de chaque phase de la charge. Les tensions  $V_{ao}, V_{bo}$  et  $V_{co}$  définies entre le point milieu « k » de chaque bras de l'onduleur et le point milieu « o » de l'alimentation continue de l'onduleur.

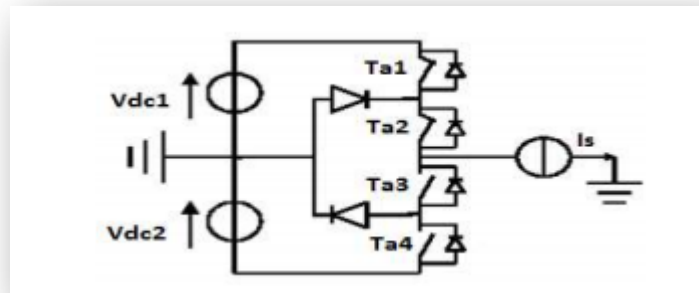


Figure II-11 Un bras de l'onduleur à trois niveaux de tension.

### II.6.2 Potentiels $V_{io}$

Les tensions aux nœuds a, b et c de notre onduleur par rapport au point milieu « o », sont exprimées comme suites :

$$\begin{cases} V_{ao} = F_{a1} \cdot F_{a2} \cdot V_{dc1} - F_{a3} \cdot F_{a4} \cdot V_{dc2} = \frac{V_{dc}}{2} (F_{a1} \cdot F_{a2} - F_{a3} \cdot F_{a4}) \\ V_{bo} = F_{b1} \cdot F_{b2} \cdot V_{dc1} - F_{b3} \cdot F_{b4} \cdot V_{dc2} = \frac{V_{dc}}{2} (F_{b1} \cdot F_{b2} - F_{b3} \cdot F_{b4}) \\ V_{co} = F_{c1} \cdot F_{c2} \cdot V_{dc1} - F_{c3} \cdot F_{c4} \cdot V_{dc2} = \frac{V_{dc}}{2} (F_{c1} \cdot F_{c2} - F_{c3} \cdot F_{c4}) \end{cases} \quad (\text{II-12})$$

Cas de l'onduleur triphasé, l'expression des fonctions de connexions des demi-bras sont :

$$\begin{cases} F_a^h = F_{a1} \cdot F_{a2} & F_b^h = F_{b1} \cdot F_{b2} & F_c^h = F_{c1} \cdot F_{c2} \\ F_a^b = F_{a3} \cdot F_{a4} & F_b^b = F_{b3} \cdot F_{b4} & F_c^b = F_{c3} \cdot F_{c4} \end{cases} \quad (\text{II-13})$$

Ce qui permettra d'avoir :

$$\begin{cases} V_{ao} = F_a^h \cdot V_{dc1} - F_a^b \cdot V_{dc2} = \frac{V_{dc}}{2} (F_a^h - F_a^b) \\ V_{bo} = F_b^h \cdot V_{dc1} - F_b^b \cdot V_{dc2} = \frac{V_{dc}}{2} (F_b^h - F_b^b) \\ V_{co} = F_c^h \cdot V_{dc1} - F_c^b \cdot V_{dc2} = \frac{V_{dc}}{2} (F_c^h - F_c^b) \end{cases} \quad (\text{II-14})$$

### II.6.2.1 Tension composée

Les différentes tensions composées de notre onduleur à trois niveaux s'expriment en fonction des états de connexions des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} = (F_{a1} \cdot F_{a2} - F_{b1} \cdot F_{b2}) \cdot V_{dc1} - (F_{a3} \cdot F_{a4} - F_{b3} \cdot F_{b4}) \cdot V_{dc2} \\ V_{bc} = V_{bo} - V_{co} = (F_{b1} \cdot F_{b2} - F_{c1} \cdot F_{c2}) \cdot V_{dc1} - (F_{b3} \cdot F_{b4} - F_{c3} \cdot F_{c4}) \cdot V_{dc2} \\ V_{ca} = V_{co} - V_{ao} = (F_{c1} \cdot F_{c2} - F_{a1} \cdot F_{a2}) \cdot V_{dc1} - (F_{c3} \cdot F_{c4} - F_{a3} \cdot F_{a4}) \cdot V_{dc2} \end{cases} \quad (\text{II-15})$$

Avec  $V_{dc1} = V_{dc2} = \frac{V_{dc}}{2}$ , le système devient :

$$\begin{cases} V_{ab} = \frac{V_{dc}}{2} [(F_{a1} \cdot F_{a2} - F_{b1} \cdot F_{b2}) - (F_{a3} \cdot F_{a4} - F_{b3} \cdot F_{b4})] \\ V_{bc} = \frac{V_{dc}}{2} [(F_{b1} \cdot F_{b2} - F_{c1} \cdot F_{c2}) - (F_{b3} \cdot F_{b4} - F_{c3} \cdot F_{c4})] \\ V_{ca} = \frac{V_{dc}}{2} [(F_{c1} \cdot F_{c2} - F_{a1} \cdot F_{a2}) - (F_{c3} \cdot F_{c4} - F_{a3} \cdot F_{a4})] \end{cases} \quad (\text{II-16})$$

Les différentes tensions composées de l'onduleur triphasé à trois niveaux s'expriment à l'aide des fonctions des demi-bras comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_a^h - F_a^b \\ F_b^h - F_b^b \\ F_c^h - F_c^b \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{2} \quad (\text{II-17})$$

### II.6.2.2 Tensions simples

Pour le cas d'une charge triphasé équilibré, la somme des trois tensions simples à la sortie de l'onduleur sera nulle :

$$V_a + V_b + V_c = 0$$

$$\begin{cases} V_a = (2V_{ao} - V_{bo} - V_{co})/3 \\ V_b = (-V_{ao} + 2V_{bo} - V_{co})/3 \\ V_c = (-V_{ao} - V_{bo} + 2V_{co})/3 \end{cases} \quad (\text{II-18})$$

### II.7 Système de stockage d'énergie

L'onduleur doit fournir en tout temps les courants injectés de compensation harmonique dans le réseau. Et pour atteindre ce but, il faut qu'il soit alimenté par une source d'énergie stable. Le condensateur représente une source de tension continue ( $V_{dc}$ ). Une certaine quantité d'énergie doit être stockée en permanence dans la source de courant continu. Mais en raison des pertes dans les interrupteurs et dans le condensateur, la source de courant continu doit recevoir son énergie du réseau en permanence par l'intermédiaire de l'onduleur. Pour son fonctionnement, la tension  $V_{dc}$  est maintenue constante afin de surmonter les fluctuations qui peuvent affecter la qualité du filtrage [25].

### II.8 Filtre de sortie

Pour assurer la connexion entre le réseau et l'onduleur de tension, il faut ajouter un filtre de sortie. Le dimensionnement de ce filtre doit tenir compte des deux points importants suivants :

- Il doit fournir une atténuation suffisante du rebondissement causé par la commutation des semi-conducteurs de l'onduleur du filtre actif,
- Il doit préserver les performances du filtre actif, défini par :

$$\frac{d_{if}}{dt} = \frac{d_{i_{ref}}}{dt} \quad (\text{II-19})$$

$i_f$  : Courant du filtre.

$i_{ref}$  : Courant de référence.

Un filtre passif du premier ordre est le plus souvent utilisé dans la littérature, il est composé d'une inductance  $L_f$  et de résistance  $R_f$ . Une valeur relativement faible de  $L_f$  permet d'obtenir une bonne dynamique du FAP en satisfaisant l'égalité [12] [26].

## II.9 Etude du système de commande

La partie de commande est mise en œuvre en trois étapes :

A. Détecter la tension du réseau et le courant de la charge par l'utilisation de transformateurs de mesures (TC : transformateur de courant et le TP : transformateur de potentiel).

B. Déterminer les courants de références en appliquant des méthodes d'identification approuvées.

C. Les signaux de commutation des semi-conducteurs de l'onduleur sont générés en utilisant l'hystérésis, MLI classique.

Donc la commande d'un filtre actif parallèle triphasé est basée sur la division du système en deux boucles, la première sert à générer les courants de référence, lesquels l'onduleur doit injecter au point commun de connexion (PCC). Quant au deuxième, il sert à contrôler les courants injectés par l'onduleur de sorte qu'ils suivent le plus fidèlement possible ceux de la référence. [27]

### II.9.1 Commande du filtre actif parallèle

Il existe principalement deux stratégies de commande pour supprimer les courants harmoniques du réseau dépendant du courant mesuré [28].

#### II.9.1.1 Méthode directe

Cette méthode est basée sur la mesure du courant de la charge polluante puis de l'extraction des composantes harmoniques de ce courant [29]. La figure II-13 représente le schéma de la stratégie de commande directe. De cette manière, le filtre actif de puissance injecte les courants de compensation sans information sur les courants du réseau. Toutes les erreurs dans le système comme l'incertitude des paramètres, les

erreurs de mesure ou de commande apparaîtront dans le réseau sous formes des harmoniques non-filtrés.

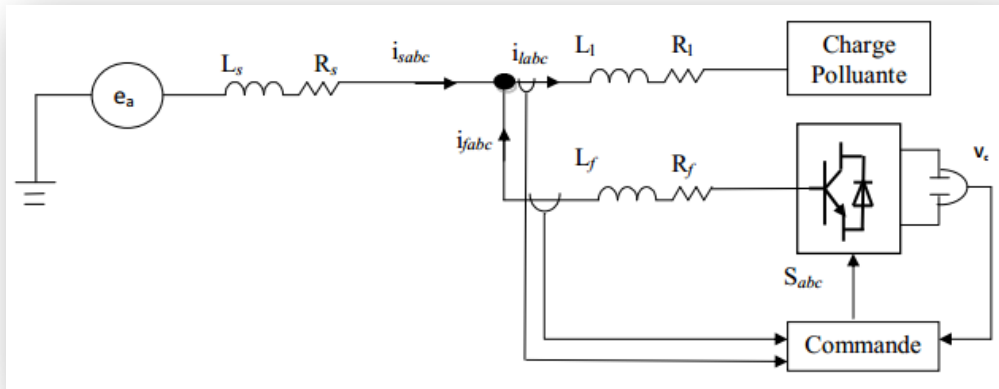


Figure II-12 Schéma de principe de la commande directe.

### II.9.1.2 Méthode indirecte

Cette méthode consiste à mesurer les courants du côté source, et d'imposer la forme sinusoïdale sur ces courants. L'algorithme de commande est plus au moins compliqué et demande moins capteurs que celui dans la méthode directe. La figure II-14 montre le schéma de la commande indirecte du filtre actif.

Dans notre étude, on ne traitera que la commande directe

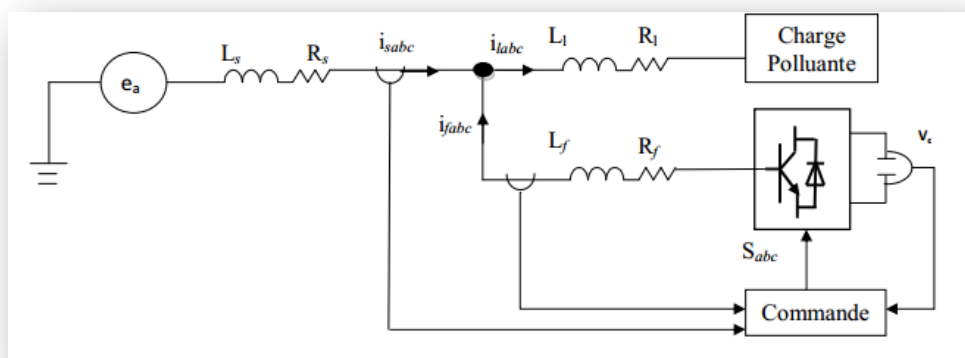


Figure II-13 Schéma de la commande indirecte

## II.10 Résultats et discussion

Les résultats de la simulation ont été obtenus sous environnement Matlab/Simulink. La technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) et la théorie des puissances active et réactive instantanées sont utilisées dans les parties d'identification et de modulation. La tension du condensateur C est régulée par un régulateur PI classique. Les figures II-2 et II-3 montrent respectivement la forme d'onde du courant de ligne et son spectre de fréquence. Le THD du courant de ligne avant compensation est de 28,51%.

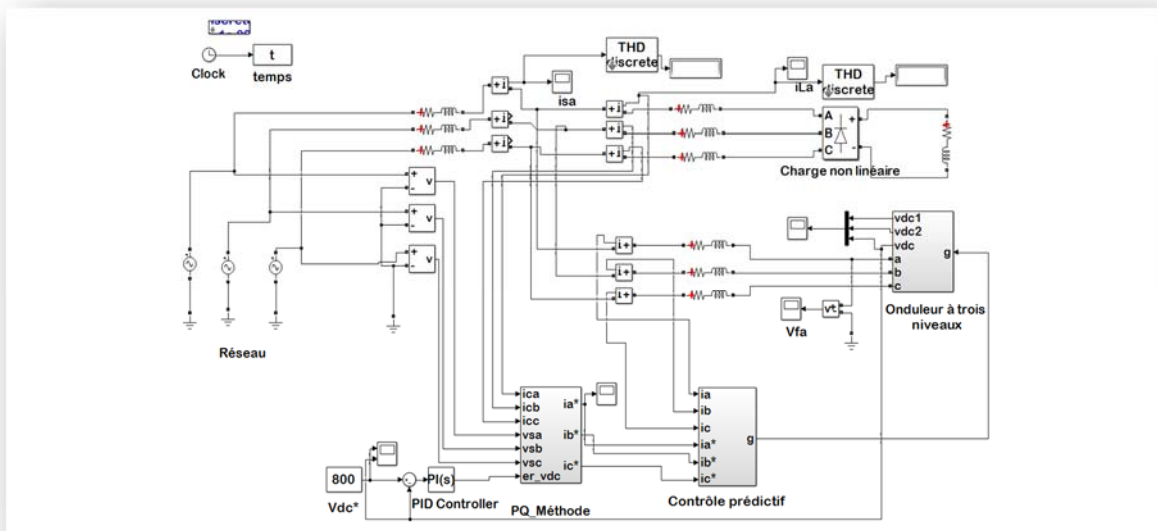


Figure 0-14 Schéma du model de simulation a étudié

Power grid						
Parameter	Source Voltage	Frequency	Source resistor	Source inductance		
Values	380v	50Hz	0.25e-3Ω	19.4e-6H		
Non-Linear load						
Parameter	Rectifier resistor	Rectifier inductance	Load inductance	Load resistor		
Values	26Ω	10e-3H	0.3e-3H	1.2e-3Ω		
Shunt active power filter						
Parameter	Filter inductance	Filter resistor	VDC 1	VDC 2	C1	C2
Values	5e-3H	5e-3Ω	400v	400v	3300 e-6F	3300 e-6F

Tableau II- 4 Paramètres du système

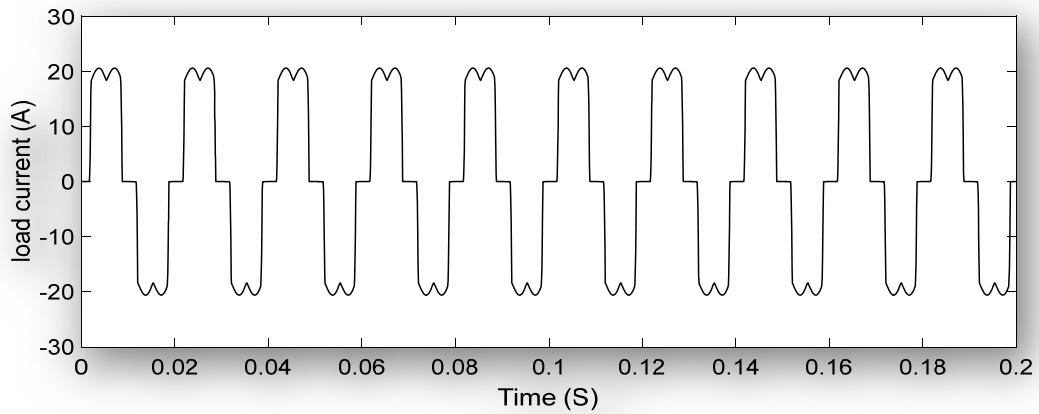


Figure 0-15 Forme d'onde du courant de charge avant filtrage

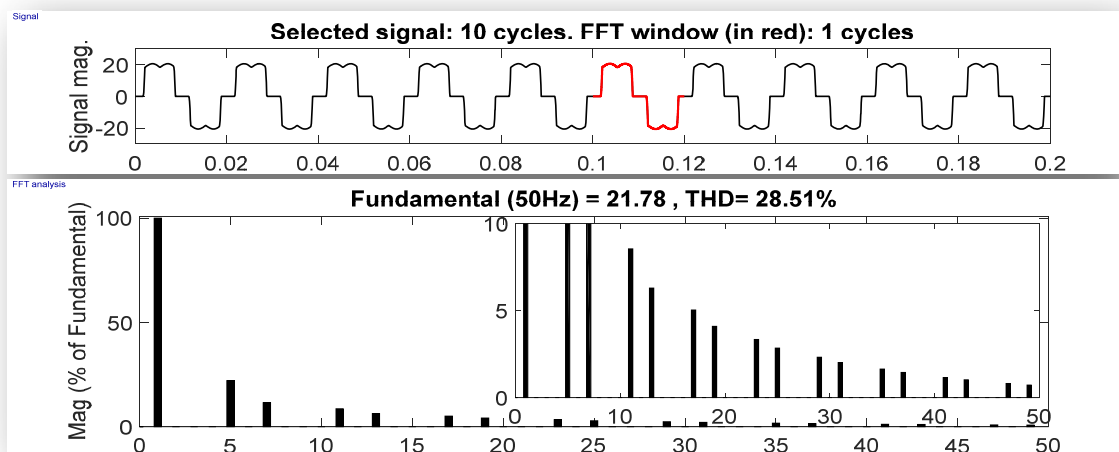


Figure 0-16 Spectre de fréquence du courant de charge avant filtrage

Les deux figures représentent le courant de charge et son spectre harmonique. On constate qu'il est fortement perturbé, ce qui se traduit par un THD de 28,51 %.

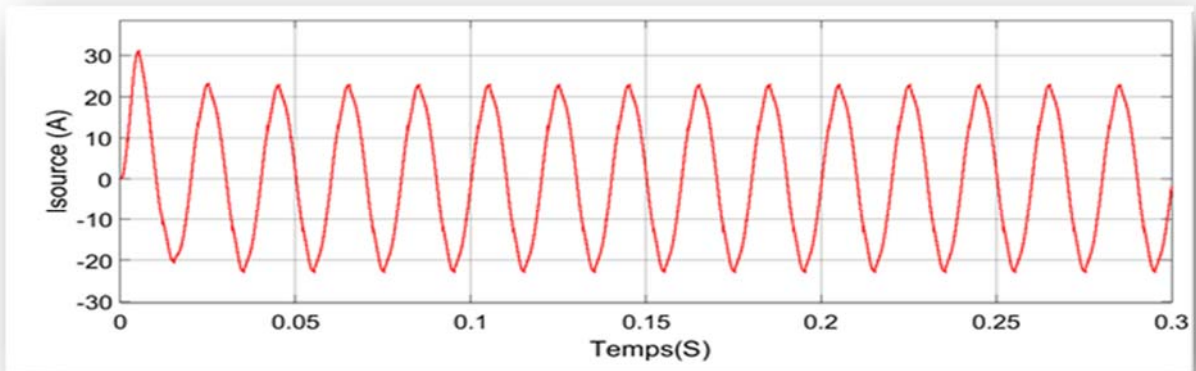


Figure 0-17 Forme d'onde du courant de la source avec contrôle MLI

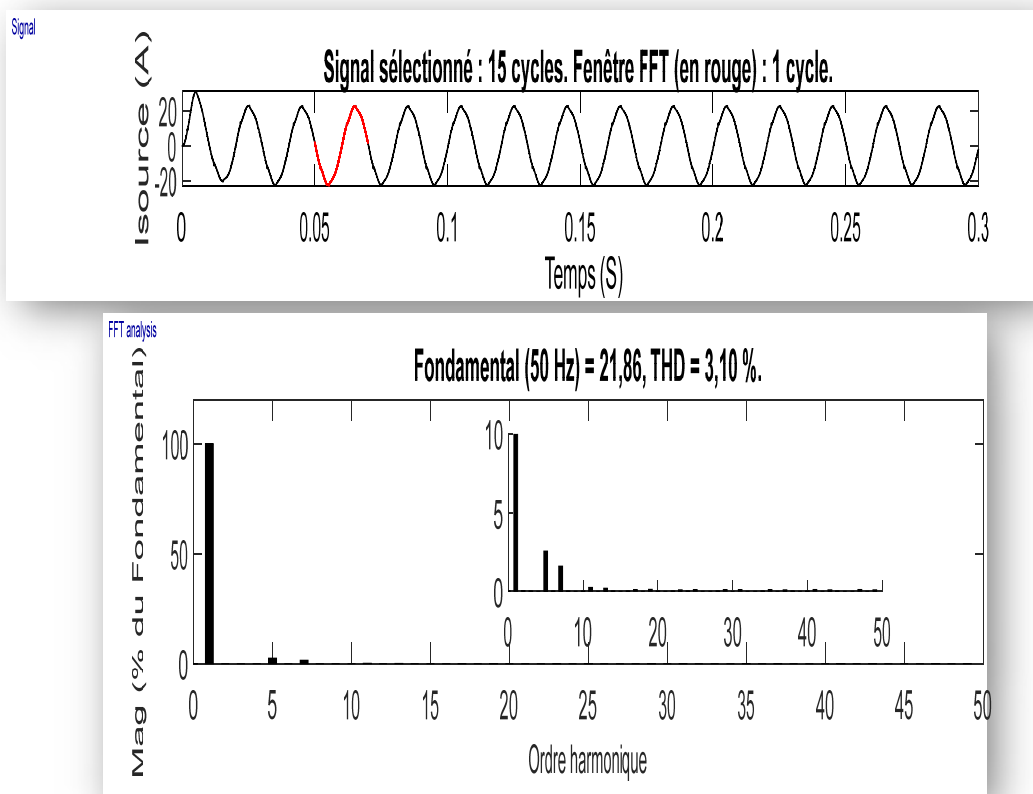
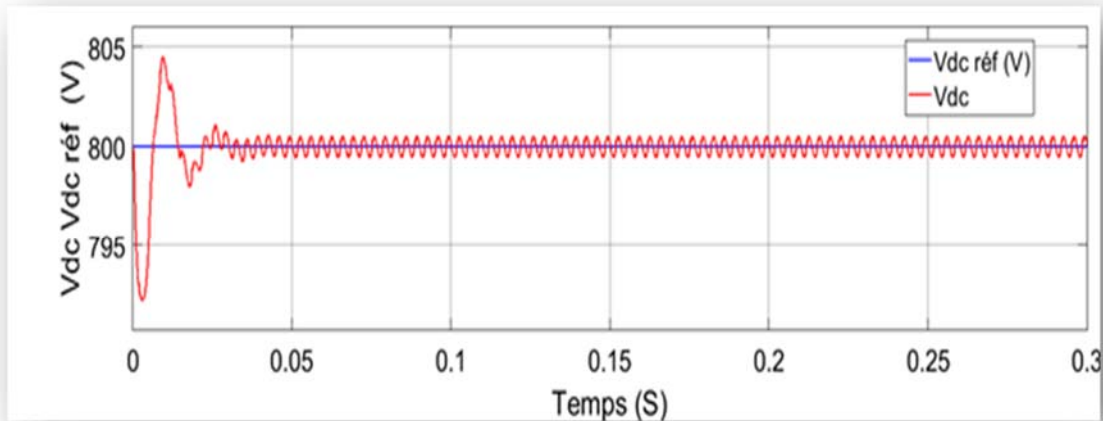


Figure 0-12 Spectre de fréquence du courant de ligne avec commande MLI

Après avoir utilisé le FAP a trois niveaux, nous avons amélioré la qualité du signal du courant de source, la rendant la plus proche d'une sinusoïde en préservant la précision du signal original sans perturbations. Cela a été possible grâce à la capacité de notre FAP à atténuer les harmoniques et à réguler le courant de manière efficace, permettant ainsi d'obtenir une forme d'onde sinusoïdale avec un THD = 3.10 % et conforme aux caractéristiques idéales du signal électrique. En éliminant les perturbations et en régulant le courant de manière appropriée, le FAP a permis d'obtenir une réponse précise et propre, assurant ainsi le bon fonctionnement des équipements électriques connectés au réseau.



**Figure 0-3** *Forme d'onde de la tension du bus DC*

La partie de tension continue a bien suivi sa référence grâce à un régulateur PI classique placé à l'entrée du convertisseur AC-DC. Ce régulateur assure la circulation optimale de la puissance à travers les interrupteurs de l'onduleur vers le réseau. En régulant la tension continue de manière appropriée, le régulateur PI maintient la stabilité du système en ajustant continuellement la commande des interrupteurs de l'onduleur pour répondre aux variations de charge et de tension du réseau. Cela garantit que la puissance est transférée efficacement du convertisseur vers le réseau.

## **II.11 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons intégré un convertisseur DC-AC à trois niveaux dans le FAP et appliqué les commandes et contrôles dans ses parties de puissance et de commande afin de présenter ses performances, notamment dans les applications nécessitant de grandes puissances.

Le convertisseur DC-AC à trois niveaux offre plusieurs avantages, tels qu'une meilleure qualité de l'onde de sortie, une réduction des harmoniques, une meilleure gestion de la puissance. En intégrant ce convertisseur dans le FAP, nous avons pu exploiter ses capacités pour fournir un contrôle plus précis du courant, ce qui est crucial dans les applications industrielles nécessitant des niveaux élevés de puissance.

En appliquant des techniques de commande dans les parties de puissance et de commande du FAP, nous avons pu démontrer sa capacité à réguler efficacement le courant et la tension, à réduire les perturbations et les harmoniques, et à garantir une alimentation électrique de haute qualité aux équipements industriels sensibles. Cette intégration du convertisseur DC-AC à trois niveaux dans le FAP ouvre la voie à de nouvelles applications dans divers secteurs industriels où la qualité du signal l'alimentation électrique sont essentielles.

---

# **Chapitre III**

## **Filtre actif parallèle à sept niveaux - NPC**

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons élaborer une conception générale du filtre actif parallèle à niveaux multiples de type NPC (Neutral Point Clamped) à 7 niveaux. Nous aborderons les parties essentielles de ce filtre, à savoir la partie commande et la partie puissance, en nous basant sur la topologie du convertisseur DC-AC.

### III.2 Les onduleurs multi-niveaux

L'histoire de la conversion multiniveau remonte aux années 1960. [24] La première structure décrite était la connexion en série de pont en H. Par la suite, et à la fin des années 1970 est apparue la configuration de convertisseur à point neutre (NPC) [25], représentant ainsi le premier convertisseur multiniveau pour les applications de moyenne puissance. Depuis lors, de nombreuses études ont été menées pour examiner ses caractéristiques et les éventuelles évolutions de cette structure. Dans les années 1990, de nouvelles recherches ont conduit à la conception des convertisseurs multicellulaires [26].

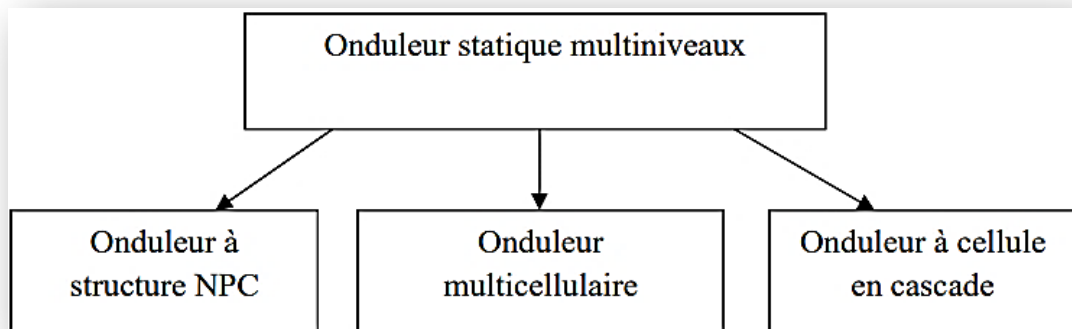


Figure III-1 : Schéma de classification des convertisseurs multiniveaux [19]

### III.3 Intérêt des onduleurs multiniveaux

Ces structures peuvent être considérées comme les structures de base de la conversion multiniveaux, elles présentent des avantages énergétiques parmi lesquels on peut citer :

- Générer des tensions proches de la forme sinusoïdale,
- Une qualité améliorée du courant par la diminution des harmoniques,
- Souplesse de la partie contrôle/commande grâce aux nombreuses stratégies de modulations permettant d'optimiser l'utilisation de ces convertisseurs,
- Pour certaines applications nécessitant un contrôle rapide du courant, la fréquence de commutation peut être élevée à faible puissance et peut atteindre plusieurs dizaines de kHz. [27]

### III.4 Description du système FAP sept niveaux

Le circuit de puissance de l'onduleur à sept niveaux à point neutre (NPC) est illustré par la Figure III-2. Le bus DC est divisé en six condensateurs, fournissant trois points neutres. Chaque bras de l'onduleur est constitué de douze dispositifs IGBT (Transistor Bipolaire à Grille Isolée) bidirectionnels [21]. Ces interrupteurs ne doivent pas être simultanément ouverts ou fermés afin d'éviter le court-circuit de la source DC à l'entrée de l'onduleur. Chaque interrupteur est composé d'un transistor avec une diode en antiparallèle et de dix diodes de clamping connectées au point neutre ; ces diodes de clamping sont utilisées pour bloquer la tension inverse et pour créer la connexion avec le point de référence afin d'obtenir des tensions intermédiaires.

Notez que le nombre de diodes de clamping requises est assez élevé et que pour un nombre plus important de niveaux de tension, la topologie NPC deviendrait impraticable pour cette raison. Cette structure permet aux interrupteurs de supporter une tension d'entrée DC plus élevée, à condition que les interrupteurs ne dépassent pas leur niveau de tension de claquage.

Le circuit de puissance des onduleurs à sept niveaux (NPC) est présenté dans la figure ci-dessous.

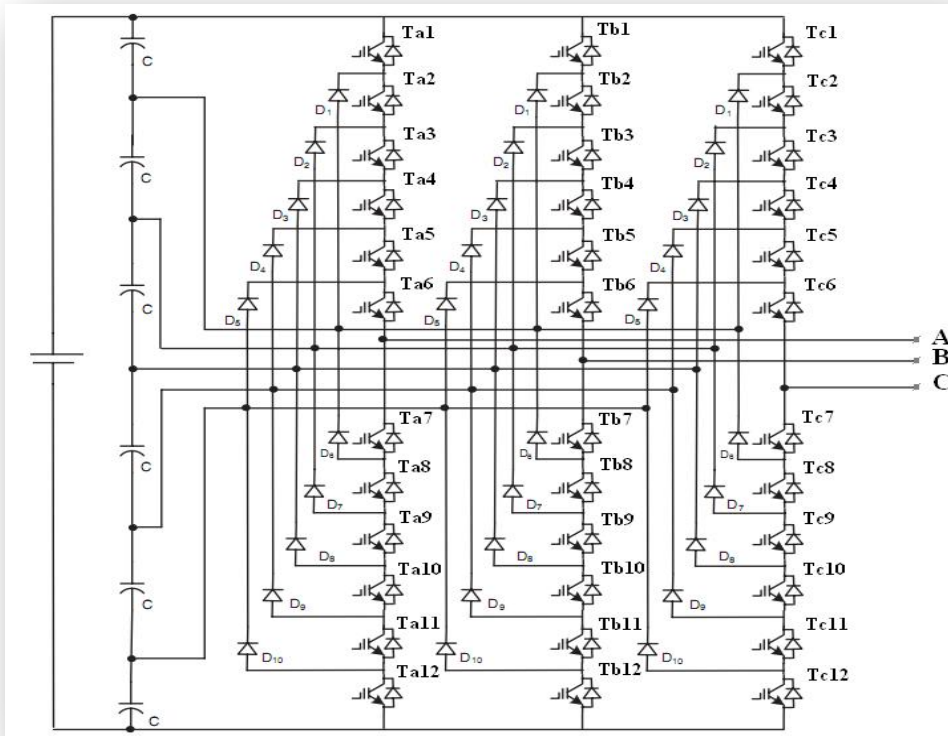


Figure III-2 : Structure d'un onduleur NPC à sept niveaux

États de commutation	S <sub>i</sub>	A	B	C	0	D	E	F
	S1	1	0	0	0	0	0	0
	S2	1	1	0	0	0	0	0
	S3	1	1	1	0	0	0	0
	S4	1	1	1	1	0	0	0
	S5	1	1	1	1	1	0	0
	S6	1	1	1	1	1	1	0
	S7	0	1	1	1	1	1	1
	S8	0	0	1	1	1	1	1
	S9	0	0	0	1	1	1	1
	S10	0	0	0	0	1	1	1
	S11	0	0	0	0	0	1	1
S12	0	0	0	0	0	0	1	
<b>Tension</b> E = U <sub>dc</sub>		+	+	+	0	-	-	-
		E/2	E/3	E/6	0	E/6	E/3	E/2

Tableau III-1 : États de commutation pour un onduleur NPC à 7 niveaux

### III.5 Onduleur en pont H en Cascade

Cette topologie consiste à mettre en cascade plusieurs onduleurs en pont H (CHB) monophasés de trois niveaux [27]. Chaque pont est alimenté par une source de tension continue distincte. Ce qui fait que pour N onduleurs en cascade, la tension de sortie peut être constituée de  $(2N + 1)$  niveaux. Cette topologie nécessite, pour chaque paire de niveaux additionnelle une source de tension supplémentaire, ce qui représente un inconvénient majeur pour cette topologie

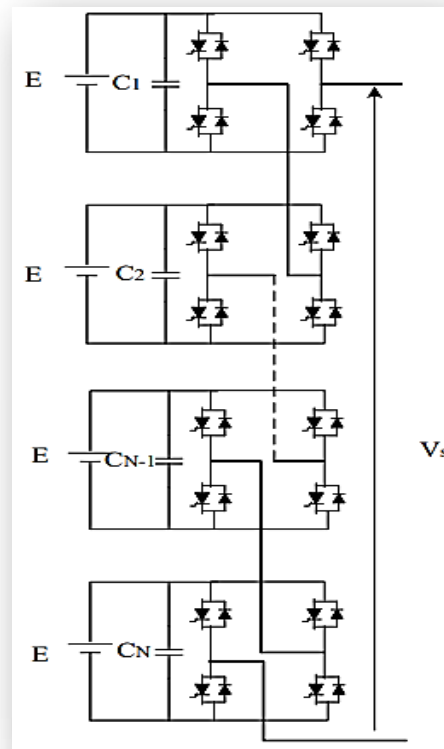


Figure III-3 : Onduleur en pont H en Cascade

#### Avantages et limitations :

Les avantages de cette structure sont :

- Expansion facile du nombre de niveaux.
- Plus facile à commander.
- Adapté pour des applications où plusieurs sources de tensions sont disponibles.
- Celle-ci utilise moins de composants pour le même nombre de niveaux.

- La sommation des tensions produites par chaque onduleur monophasé nous permet d'avoir la tension de sortie total de phase.

Il faut une source de tension indépendante pour chaque pont, ce qui limite l'application de ce type de structure.

- Pour un système triphasé, il faut plus de commutateurs que dans un onduleur traditionnel.
  - Nécessité d'équilibrer les sources DC entre les différents niveaux.
  - Besoin de plusieurs connecteurs/câbles pour connecter les sources DC.
- [28]

### III.6 Onduleur NPC (Neutral Point Clamped Diode) :

Nabae et H. Akagi ont proposé cette structure en 1981. Elle est configurée pour obtenir un nombre élevé de niveaux et de meilleur qualité spectrale par rapport à celle d'un onduleur triphasé, et de réduire les harmoniques injectés dans la charge.[19]

#### **Structure :**

Cette structure est la plus ancienne, elle est connue sous le nom de convertisseur clampé par le neutre, la répartition de la tension d'entrée continue sur les différents interrupteurs en série est assurée par les diodes (clamps) connectées à des points milieux capacitifs [19].

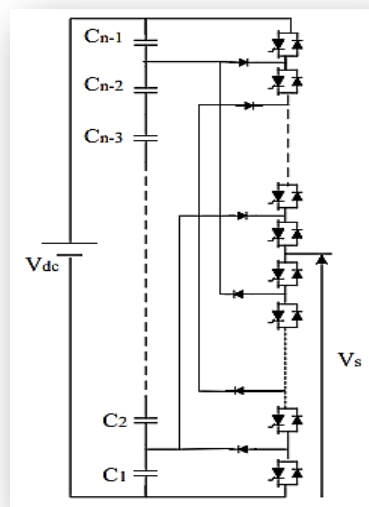


Figure III-4 : Bras d'un onduleur NPC multi niveaux. [27]

### Avantages et limitations :[19] [28]

- La topologie NPC à trois niveaux de tension présente plusieurs avantages par rapport à la topologie d'onduleur à deux niveaux.
- Adaptée pour les applications haute tension, réduction de la contrainte de tension sur les interrupteurs (proportionnellement aux nombres de niveaux).
- Topologie généralisée et les principes employés dans la topologie d'onduleur à trois niveaux peuvent être étendus pour l'utilisation avec n'importe quel nombre de niveaux.
- La fréquence fondamentale assure un haut rendement.
- Amélioration de la forme d'onde de tension de sortie par rapport à celle d'un onduleur triphasé classique, ce qui rend les filtres passifs peu volumineux.
- Pourtant dans les cas de grandes puissances cette topologie présente des inconvénients tel que :
  - La tension du point milieu capacitif peut avoir des variations très importantes ce qui entraîne un déséquilibre de la tension des condensateurs. Donc il faut prévoir une stratégie de commande pour assurer la stabilité de cette tension. Ce problème augmente avec le nombre de niveaux.
  - La tension inverse des diodes est variable selon le point de potentiel de référence qu'elles fixent.
  - Exigence de diodes de bouclage à vitesse de commutation élevée capable de supporter le courant de la pleine charge.

### III.7 Onduleur Multicellulaire :

Le convertisseur multicellulaire est basé sur la connexion de P cellules de commutation en pont en H séparés les unes des autres par (P-1) sources de tensions flottantes pour obtenir (P+1) niveaux de tension de sortie, les interrupteurs de chaque cellule sont complémentaires. Chaque paire constitue une cellule de commutation. Le fonctionnement de chaque cellule de commutation est similaire à celui d'un onduleur à deux niveaux classiques avec une source de tension égale à  $E/P$  et une source de courant

$I_{dc}$ . Chaque interrupteur bloqué doit maintenir à ses bornes une tension maximum égale à  $E/P$  [27]

**Avantages et limitations : [27]**

Ses avantages sont :

- Extension facile à un nombre élevé de cellules sur chaque phase, sans complexité supplémentaire ;
- Les tensions sont équilibrées naturellement, si bien que la commande des interrupteurs en devient aisée ;
- Les interrupteurs supportent la même tension de blocage ;
- Possibilité d'alimenter une charge en haute ou moyenne tension à partir d'une ou plusieurs alimentations basse tension (cas d'une énergie photovoltaïque). Et ses difficultés :

Les sources de tension continue doivent être galvaniquement isolées pour chaque pont H, qui limite les possibilités d'application ;

- En triphasé, ce type d'onduleur exige plus d'interrupteurs de puissance qu'un onduleur traditionnel (et par conséquence l'augmentation du coût).

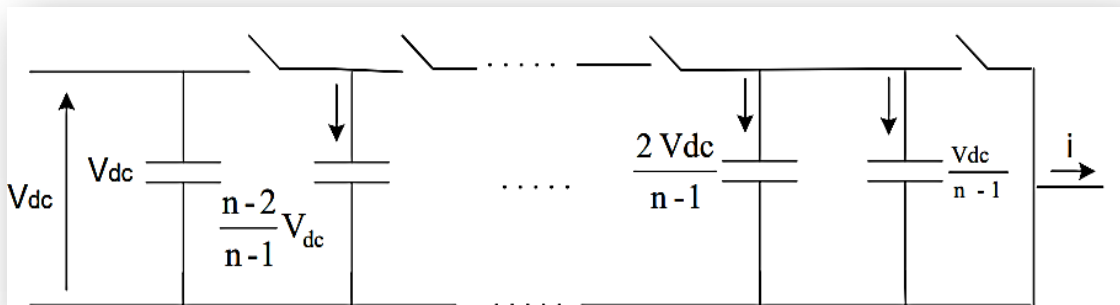


Figure III. 6 : Onduleur multi niveaux multicellulaire à condensateur flottant.[27]

**III.8 Comparaison entre différents types d'onduleurs multi-niveaux :**

Pour générer le même niveau de tension, le nombre d'éléments de commutation principales est le même pour toutes les structures. La structure NPC est plus simple, ce qui conduit à un plus faible encombrement. [27]

<b>Composants Type d'onduleur</b>	<b>Interrupteurs de commutation</b>	<b>Diodes</b>	<b>Condensateurs</b>	<b>Diodes de blocage</b>	<b>Capacités de bouclage</b>
<b>NPC</b>	2 (N-1)	2(N-1)	(N-1)	(N-1) (N-2)	0
<b>Cascade</b>	2 (N-1)	2 (N-1)	(N-1)	0	0
<b>Condensateurs flottants</b>	2 (N-1)	2 (N-1)	(N-1) /2	0	(N-1) (N-2) /2

*Tableau III-2 : Nombre d'éléments des onduleurs multi-niveaux.[27]*

À travers la comparaison dans le tableau II-2, nous identifions deux options technologiques pour les onduleurs multi-niveaux : soit utiliser des composants haute tension avec un nombre restreint de niveaux, soit opter pour un grand nombre de niveaux avec des composants de tension plus faible. Cependant, cette comparaison ne favorise pas une topologie spécifique de manière absolue ; le choix dépend plutôt des conditions opérationnelles. Les topologies comme les onduleurs NPC et les onduleurs à cellules imbriquées divisent la tension d'alimentation : la sortie est inférieure ou égale à la tension d'entrée continue, et elles peuvent fonctionner à partir d'une seule alimentation continue. En revanche, les structures telles que les onduleurs à cellules en série augmentent la tension d'alimentation, avec une tension de sortie maximale supérieure à chaque alimentation individuelle, mais inférieure ou égale à la somme des tensions d'alimentation. Les configurations multicellulaires sont particulièrement adaptées aux applications triphasées, offrant généralement une conversion directe et étant avantageuses pour les applications nécessitant un échange d'énergie active sans isolation galvanique entre les sources.

### III.9 Stratégies de commande des onduleurs multiniveaux

Les stratégies de commande des convertisseurs multiniveaux sont généralement des adaptations de celles appliquées aux convertisseurs à deux niveaux tel que.

- Commande symétrique
- Commande décalée
- Commande MLI (Modulation de largeur d'impulsion)
- Commande MLI vectorielle
- Commande MLI précalculée
- Commande MLI aléatoire
- Elimination des harmoniques sélectifs

La méthode la plus courante dans les applications industrielles est celle à MLI à porteuse sinusoïdale (SPWM) qui utilise la technique du déphasage pour réduire les harmoniques de la tension de charge.

#### III.9.1 Modulation de largeur d'impulsion :

La modulation de largeur d'impulsion (MLI), également connue sous le nom de Pulse Width Modulation (PWM), est une technique cruciale issue du développement de l'électronique de puissance à la fin du siècle dernier. Elle constitue le cœur du contrôle des convertisseurs statiques. En choisissant la MLI pour contrôler un onduleur de tension, l'objectif est d'obtenir une réponse rapide et des performances élevées. La MLI implique la génération d'impulsions dont la largeur dépend des choix faits pour la stratégie de modulation.

#### III.9.2 Modulation MLI Sinusoïdale (SPWM) : Triangulo-sinusoidale

La technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) sinusoïdale est une approche largement utilisée dans l'industrie et largement documentée dans la littérature.

Le principe de cette technique implique la comparaison d'un signal de référence (ou modulant) avec une porteuse, comme illustré dans la figure III.7

Le signal de référence représente l'image de la sinusoïde souhaitée en sortie de l'onduleur. Ce signal peut être modulé en amplitude et en fréquence pour obtenir le comportement souhaité. En revanche, la porteuse définit le rythme de commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur. Il s'agit d'un signal à haute fréquence par rapport au signal de référence.

Les méthodes de MLI sont préférées en raison de leur fréquence de commutation fixe, de leur faible courant d'ondulation et de leurs caractéristiques de spectre harmonique bien définies. Ces stratégies assurent une "tension de sortie moyenne par cycle" égale à la tension de référence. L'avantage principal réside dans leur capacité à générer une relation linéaire entre les tensions de référence et de sortie dans une plage spécifique.

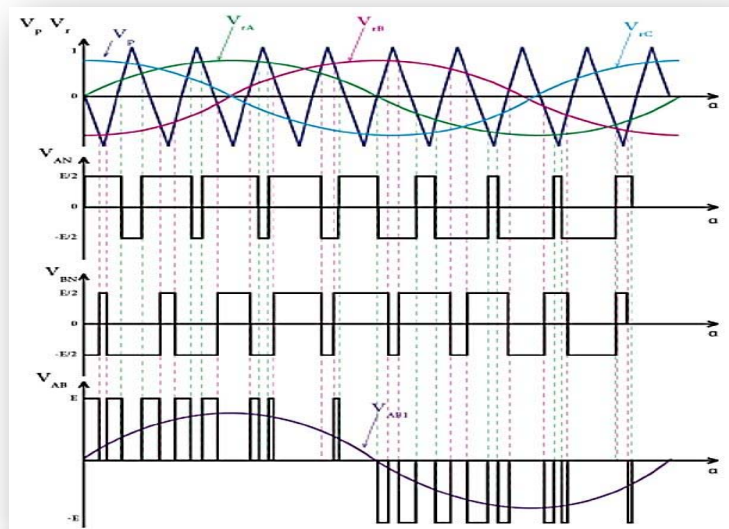


Figure III. 7 : Courbes de signal de la porteuse, de référence et les tensions de sortie d'un onduleur triphasé commandé en MLI sinus-triangle [28]

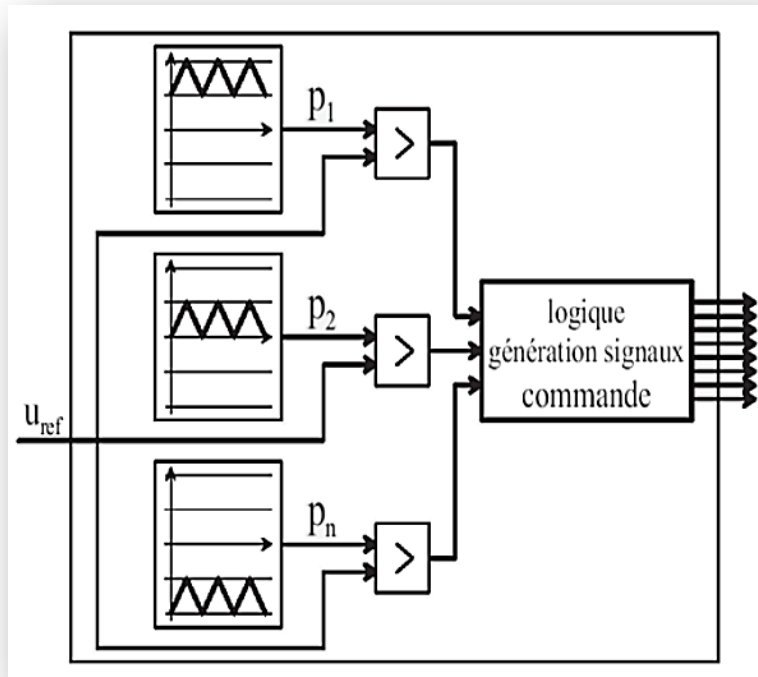


Figure III. 8: Modulation sinusoidal avec un ensemble de porteuses [28]

### III.10 Types des méthodes de modulation MLI

La méthode de modulation sinusoidale à deux niveaux peut être étendue à la commande des onduleurs multi-niveaux. Pour commander un convertisseur à  $N$  niveaux de tension,  $(N-1)$  porteuses triangulaires sont générées. Les méthodes de modulation MLI peuvent être classées selon la disposition des porteuses : techniques de PWM à décalage de niveau (LS-PWM) et PWM à décalage de phase (PS-PWM). Les porteuses en MLI à décalage de niveau (LS-PWM) sont soit en disposition de phase (PD), disposition d'opposition de phase (POD) ou disposition alternative d'opposition de phase (APOD).

### III.10.1 Disposition de Phase PWM (PDPWM)

Dans cette méthode, (N-1) porteuses triangulaires sont générées, toutes les porteuses au-dessus et au-dessous de la ligne de zéro sont dans la même phase. La méthode est connue sous le nom de la méthode disposition en phase (PD), comme indiqué sur la Figure II.25

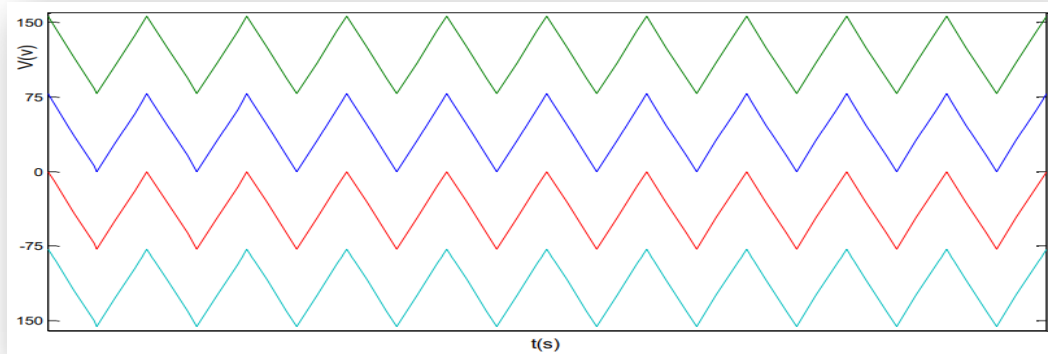


Figure III. 9 : MLI à disposition en phase.

### III.10.2 Disposition à Opposition de Phase Alternative (APOD)

Dans cette méthode, toutes les porteuses ont la même fréquence et l'amplitude réglable (Différente ou inégale Amplitudes) comme dans la figure III.10. Tous les porteurs sont déphasés entre eux de 180°

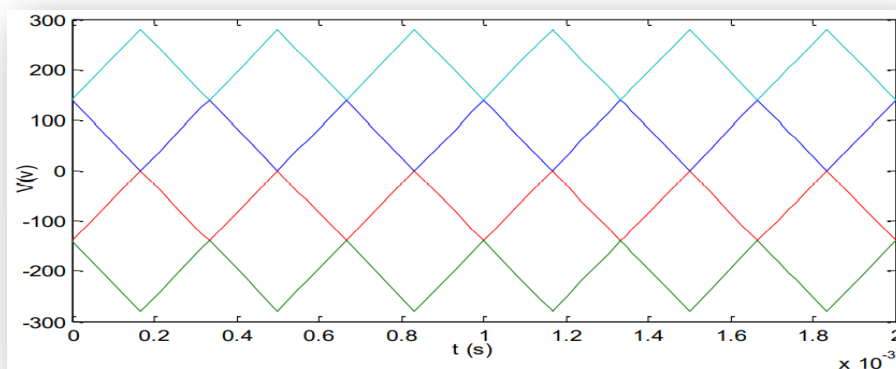


Figure III. 10 :: Disposition à Opposition de Phase Alternative.

### III.10.3 Disposition en Opposition de Phase (POD )

Dans cette méthode, toutes les porteuses ont la même fréquence et l'amplitude réglable (différente ou inégale Amplitudes). Mais toutes les porteuses au-dessus du zéro

sont en phase parmi eux mais en opposition ( $180^\circ$  degrés déphasés) avec ceux au-dessous du zéro.

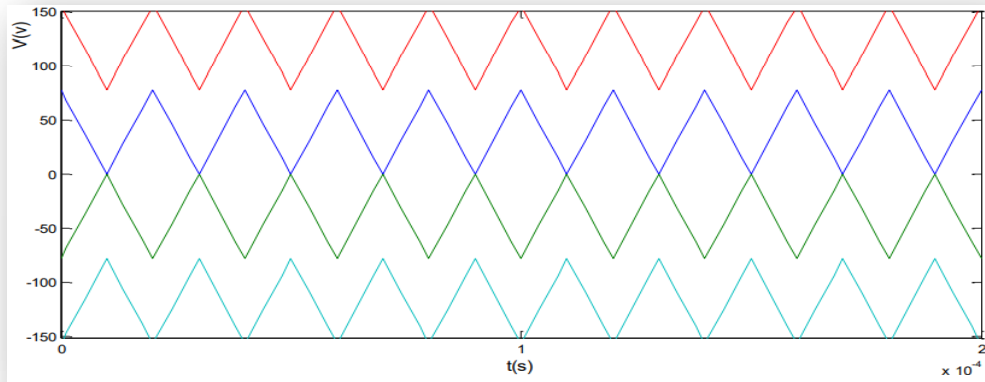


Figure III.11 : Disposition en opposition de phase.

#### III.10.4 MLI à décalage de phase (PSPWM)

Dans la technique PSPWM à déplacement de phase (PSC), les porteuses sont décalées en phases tout en conservant la même fréquence et amplitude (figure II.28). Comparée à d'autres techniques, cette méthode a suscité davantage d'intérêt dans la recherche sur la modulation des convertisseurs multi-niveaux en raison de sa symétrie.

Le décalage de phase entre les porteuses est de  $360^\circ/N$ . Contrairement au PWM à décalage de niveau, les commutateurs peuvent contribuer à toutes les parties du signal de référence, car toutes les porteuses peuvent traverser le signal de référence en tout point. Par conséquent, la MLI déphasée offre une meilleure répartition de la commutation par rapport à la MLI à décalage de niveau, ce qui améliore les performances d'équilibrage individuelles des tensions.

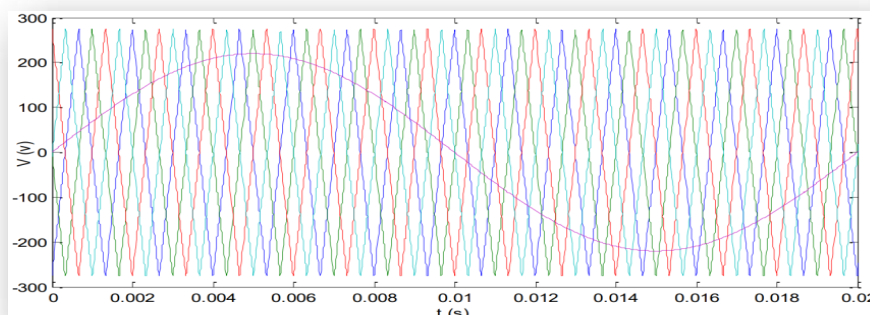


Figure III.12 : MLI à décalage de phase.

### III.11 Résultats et discussion

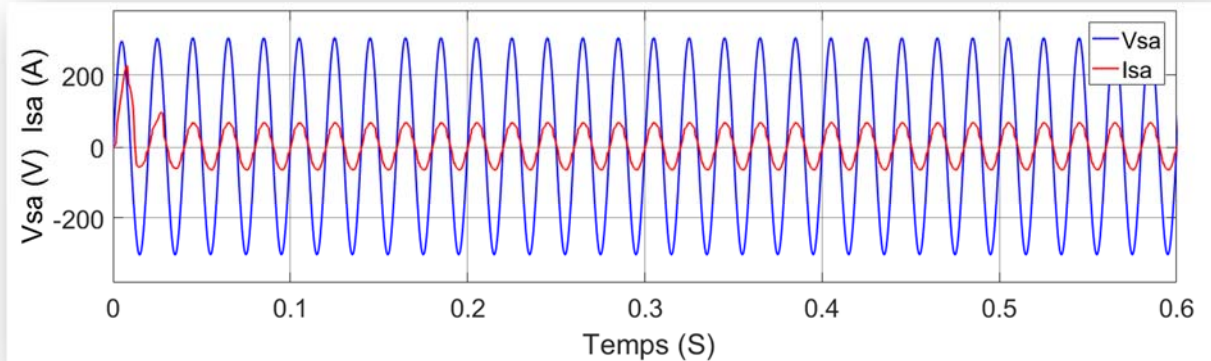


Figure III.20 : La forme de tension et courant de source

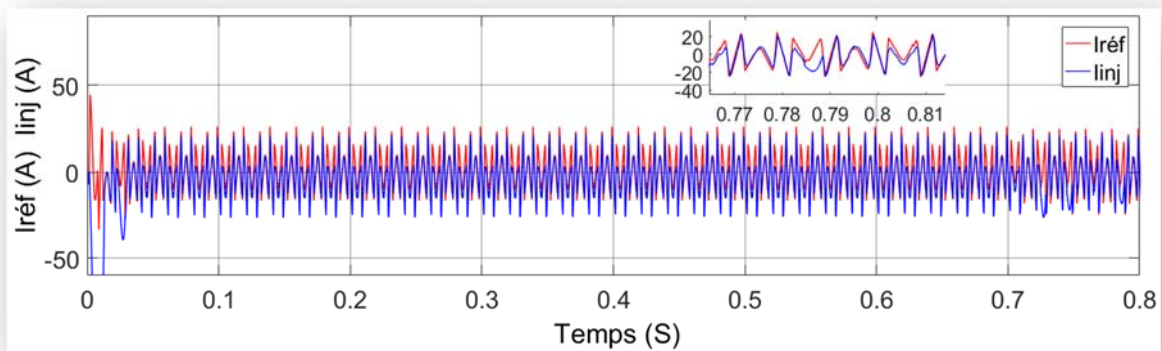


Figure III. 21 : la forme du courant de références et de injecte

La figure III-20 montre que la déformation du courant de ligne a été corrigée à la suite de l'intervention du FAP à 3 niveaux. La distorsion harmonique totale (THD) du courant de ligne est réduite de 24,07 % à 6.72%, Figures III-20 et III-22 en utilisant le contrôle MLI de courant. Le suivi de la référence de courant est excellent et le contenu harmonique du courant de ligne est le plus faible

La valeur de référence de  $V_{dc}$  suit bien le comportement du système  $V_{dc}$ , notamment lorsque l'on modifie le pas d'amplitude de  $V_{dc}$  en le diminuant de 700 à 690. Nous avons remarqué une bonne poursuite. Qu'est-ce que cela signifie pour la performance du régulateur utilisé

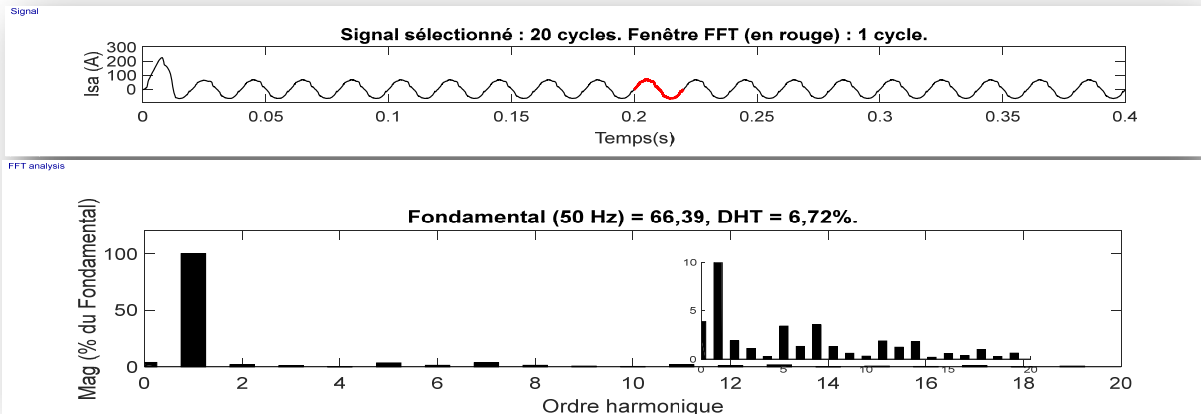


Figure III. 22 : spectre harmonique courant de source utilisée

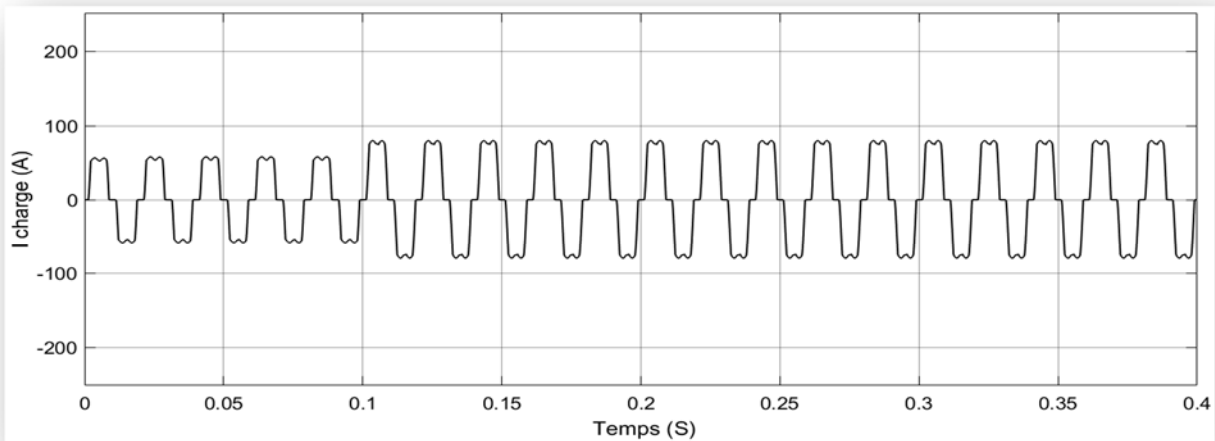


Figure III. 23 : La forme d'onde de courant de charge varie à 0.1 s

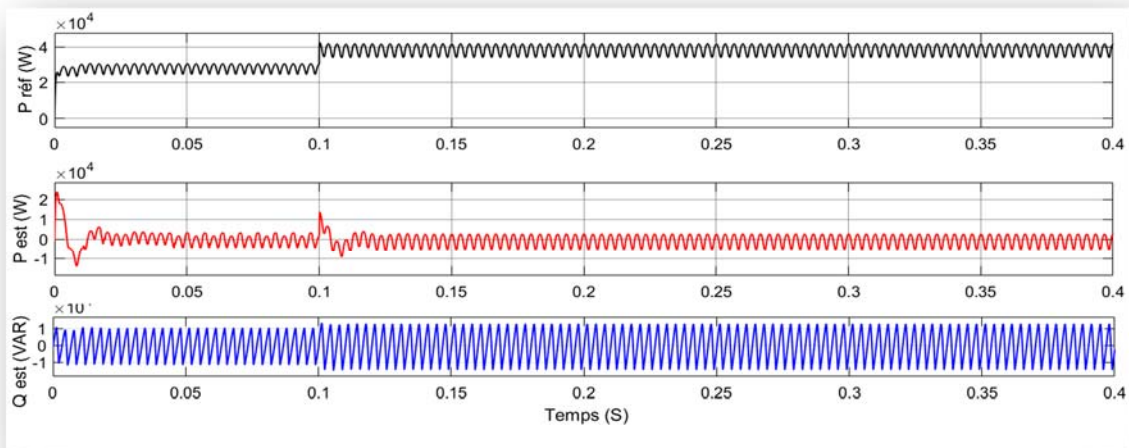


Figure III. 24 : la des puissances active et réactive référence

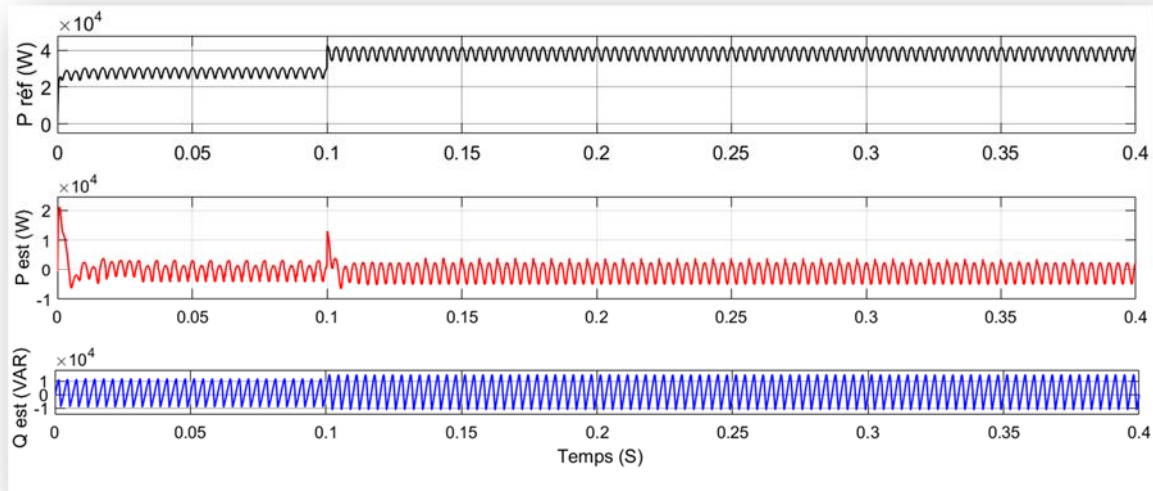


Figure III. 25 : la des puissances active et réactive référence

Les signaux de la puissance active et réactive, nt une amélioration significative par rapport au filtre passe-bas. Dans le cas de la puissance active, l'utilisation du filtre conduit à des temps de réponse rapides et à des perturbations de moindre amplitude, en contraste avec le filtre passe-bas qui présente des perturbations de grande amplitude et un temps de réponse plus lent, comme illustré dans la figure III-24. En ce qui concerne la puissance réactive, les filtres offrent une meilleure compensation par rapport au filtre passe-bas, comme indiqué dans la figure III-25. L'avantage clé réside dans sa capacité à estimer individuellement les courants harmoniques, ainsi que tous les courants harmoniques considérés dans les entrées des deux filtres.

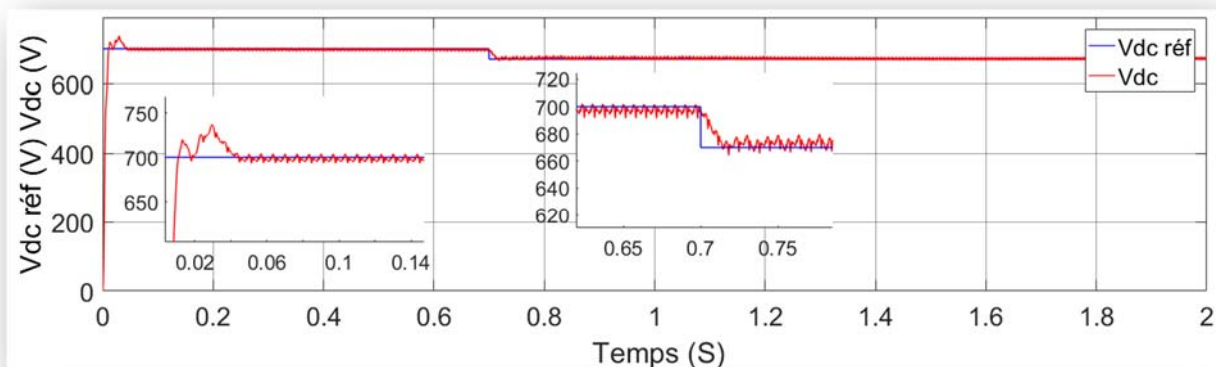
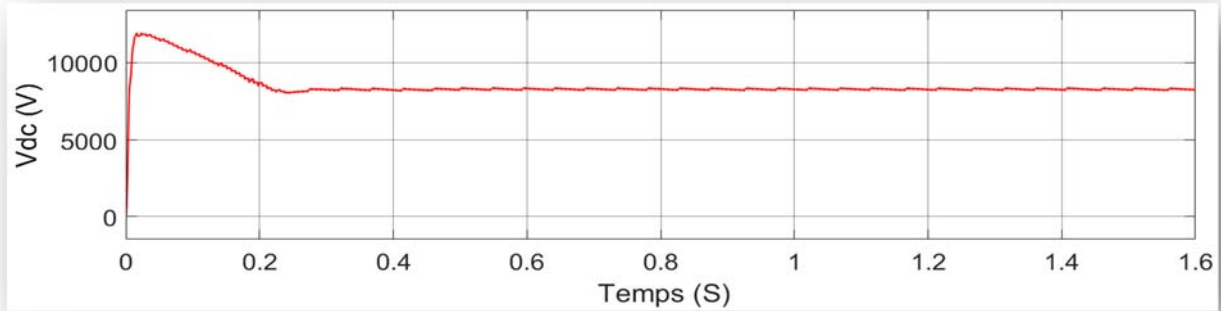


Figure III. 26: le comportement de bus continu à  $V_{sa} = 380v$



*Figure III. 27 : le comportement de bus continu à  $V_{sa} = 380v$*

La tension continue ( $V_{dc}$ ) et de son comportement par rapport à une référence de tension (700 V). Vous mentionnez ensuite une augmentation de la tension d'alimentation jusqu'à 6000 V, ce qui conduit à remarquer que le bus continu réglable atteint une tension de 8000V. Cela suggère que les onduleurs multiniveaux sont adaptés aux grandes tensions.

Dans ce cas, les onduleurs multiniveaux sont conçus pour gérer des tensions plus élevées. Lorsque la tension d'alimentation augmente, le système d'onduleur multiniveau est capable de suivre cette augmentation et de réguler la tension continue ( $V_{dc}$ ) à des niveaux plus élevés, dans ce cas jusqu'à 8000 V. Cela démontre la capacité des onduleurs multiniveaux à s'adapter et à fonctionner efficacement dans des systèmes à haute tension, ce qui les rend appropriés pour de telles applications.

### **III.10 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons élaborer une conception générale du filtre actif parallèle à niveaux multiples de type NPC (Neutral Point Clamped) à 7 niveaux. Nous avons présenté les principales parties de ce filtre, à savoir la partie commande et la partie puissance, en nous basant sur la topologie du convertisseur DC-AC. Suivie par une série de simulation qui nous a donnée des résultats très intéressant qui mettent en évidence l'importance et l'utilité de l'utilisation de ce type de configuration pour les réseaux avec des tensions importante

## Conclusion Générale

La dépollution des réseaux électriques est une problématique qui ne peut être négligée vu alimentant des charges non linéaires, telles que les convertisseurs multiniveaux statiques. L'utilisation d'un filtre actif parallèle semble être la solution proposée, avec une stratégie de commande adaptée.

Dans votre travail, vous avez effectué une étude théorique sur la modélisation et les techniques de commande traditionnelles, avant de présenter des approches plus récentes basées sur l'intelligence artificielle, spécifiquement sur les convertisseurs multiniveaux sept niveaux. Enfin, vous avez réalisé une étude comparative entre les techniques classiques et celles basées sur l'intelligence artificielle. Les simulations effectuées à l'aide du logiciel Matlab/Simulink ont probablement été cruciales pour mieux comprendre le fonctionnement du système et évaluer ses performances.

La première approche de dépollution implique la structuration du filtre actif parallèle en deux niveaux, avec une attention particulière portée sur le contrôle et la modélisation. Vous avez choisi d'utiliser un régulateur PI dans la boucle de contrôle de tension de l'unité de stockage d'énergie, principalement constituée d'un condensateur. Les résultats de simulation que vous avez obtenus ont permis d'observer les performances du système de filtrage. Vous avez noté une réduction des harmoniques circulants dans le réseau électrique, ainsi qu'une diminution significative du taux de distorsion. Cela semble être réalisé grâce à l'implémentation d'une commande hystérésis à bande fixe pour la théorie de la puissance instantanée réelle et imaginaire.

Cette approche semble prometteuse pour améliorer la qualité de l'alimentation électrique en réduisant les harmoniques et en minimisant la distorsion.

La deuxième idée consiste à utiliser un filtre actif parallèle (FAP) à trois niveaux de tension, en appliquant la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour contrôler les interrupteurs de l'onduleur. L'objectif est d'augmenter le niveau de tension

du convertisseur tout en maintenant la partie de puissance et la commande avec les mêmes réglages que pour un FAP à deux niveaux.

En utilisant un FAP à trois niveaux, vous pouvez obtenir un niveau de tension plus élevé, ce qui peut être bénéfique dans certaines applications où une tension plus élevée est nécessaire. La technique de MLI est utilisée pour ajuster les interrupteurs de l'onduleur afin de produire la tension souhaitée. L'avantage de cette approche est qu'elle permet d'augmenter le niveau de tension sans avoir à modifier significativement la partie de puissance et la commande du système, ce qui peut simplifier le processus de conception et de mise en œuvre.

A la fin de votre travail, vous avez testé une configuration où le niveau de l'onduleur est augmenté à sept niveaux, et vous avez appliqué la commande de modulation de largeur d'impulsion (MLI). De plus, vous avez introduit une amélioration significative dans la théorie de la puissance active et réactive (PQ) en utilisant deux filtres adaptatifs de type Adaline, les remplaçant par des filtres passe-bas, pour faciliter la séparation de la puissance active et réactive dans les composantes continue et alternative.

Les filtres Adaline sont des filtres adaptatifs qui ajustent automatiquement leurs coefficients en fonction des données d'entrée. En utilisant ces filtres dans votre système, vous pouvez obtenir une séparation plus précise entre la puissance active et réactive, ce qui peut être particulièrement utile dans la théorie de la PQ pour comprendre et contrôler les flux de puissance dans le système. En remplaçant les filtres passe-bas par des filtres ADALINE, afin de améliorer la capacité du système à détecter et à réagir aux fluctuations de la puissance active et réactive de manière plus dynamique et précise.

La simulation de ce système nous a montré également son efficacité en termes de dépollution harmonique du réseau d'alimentation et l'amélioration appréciable de la qualité du courant. Par ailleurs une étude comparative des techniques classiques et intelligentes, nous a permis de conclure que :

- L'approche neuromimétique (réseau Adaline) est mieux adaptée aux essais pratiques selon les travaux réalisés, ce qui donne aux réseaux de

neurones un rôle très intéressant dans le domaine industriel notamment le réseau électrique.

Afin de valider les résultats de simulation et d'apprécier concrètement les performances de le FAP et son intérêt pratique, il serait nécessaire de procéder à son implémentation sur un banc d'essais dans des travaux futures.

## **Bibliographie**

- [1] « Machmoum M., « Compensation sélective des courants harmoniques à l'aide d'un filtre actif parallèle », Revue des Systèmes, Série Revue Internationale de Génie Electrique (RS-RIGE), vol. 6, n° 3-4, p. 457-483, 2003. »
- [2] « B. N, Etude et commande généralisées de filtres actifs parallèles, Compensation globale ou sélective des harmoniques, Régime équilibré ou déséquilibré, Thèse de doctorat,, Université de Nantes,, 1999. »
- [3] « Tandjaoui Mohammed Nasser, " Amélioration de la qualité de l'énergie électrique d'une charge sensible par un DVR – Modélisations et simulation " ,, Université de Béchar, 2015.. »
- [4] « M. S. Khood, : “Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs Actifs : série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques”, Thèse de, doctorat de l'école Polytechnique de l'université de Nantes, Nantes, 2006.. »
- [5] « L. BENCHAITA, Etude, par simulation numérique et expérimentation, d'un filtre actif Parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle - commande », Thèse de docteur de l'université Henri Poincaré, Nancy 1, 1998. »
- [6] « A. SBA, ,« Commande en Temps réel d'un Filtre Actif de Puissance utilisant la technique par Logique Floue : Simulation par MATLAB/ Simulink » Thèse de Magistère, l'univrsité, Farhat Abbas , Sétif, UFAS Algérie, (2005).. »
- [7] « M. Th.Deflandre et Ph, «les harmonique sur les réseaux électriques». Livre,, 61,Bd saint-Germaine Paris 5°, ,1998.. »
- [8] « Omeiri .Amar, « Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques du courant ». Thèse de doctorat de l'université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, (2007). ».
- [9] « Zellouma.laid, « Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé ». Thèse de doctorat de Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, (2006). »

- [10] « Hanane.Kouara, « Contribution au contrôle d'un filtre actif parallèle triphasé à quatre fils dans un milieu perturbé »,Thèse de Doctorat ,Université de Batna,(2015) ».
- [11] « N. W. «. P. s. h. ». S. E. 2. J. W. J. Arrillaga. »
- [12] « M. Youcef, « Commande floue adaptative de la machine asynchrone », thèse de Doctorat,, université d'Oran,, 2012. »
- [13] « A.amara & Y.Benganaadil,« Etude et simulation d'un circuit de commande pour un filtre actif de puissance parallèle à deux bras à point milieu pour un réseau électrique à trois fils », thème de Master Université Abou BekrBelkaid de Tlemcen 2015. »
- [14] « Ismail bouyakoub, « identification des courant harmonique par la stratégie neuromimétique : application au filtre actif parallèle », thèse doctorat. Université d'Oran le 1 mai 2016. ».
- [15] « A. Bouisfi Y. Belrhali,« Etude en simulation d'une régulation thermique par logique flou ». Université sidi Mohamed ben Abdallah. 2010 ».
- [16] « Nekkar Djamel, « Contribution à l'Etude des Stratégies de Commande des Filtres Actifs Triphasés », thèse Magister Université de Souk-Ahras. 2013-2014. »
- [17] « F.hadj djilani et A.laissaoui, « Onduleur à cinq niveaux utilisé en filtrage actif parallèle »Thème de master. Université djilali bounaama – khemis miliana 2014/2015. »
- [18] « Melle hinddje ghloud, « filtrage actif de puissance », Thèse de Doctorat en sciences En électrotechnique. Université mentouri constantine 2007. »
- [19] « NADHIR, MESBAHI" Contribution à l'Etude des Performances des Onduleurs Multiniveaux sur les Réseaux de Distribution" Thèse de Doctorat, Option Réseaux Electriques Université Badji Mokhtar de ANNABA, 2014. »
- [20] « «B. Singh, K. AL-Haddad, et A. Chandra,<<A review of active filters for power quality improvement ».
- [21] « M.A.E. Alali , « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », Thèse Doctorat. Université Strasbourg I 2002. »

- [22] « O. Vodyakho, D. Hackstein, A. Steimel, and T. Kim, “Novel direct current-space-vector control for shunt active power filters based on the three-level inverter,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, pp. 1668– 1678, Jul. 2008. »
- [23] « A. M. Almaktoof, A. K. Raji, and M. T. E. Kahn, “Capacitor Voltages Balancing for Three-Level NPC Inverters,” pp. 224– 229, 2014 ».
- [24] « P. Purkait, R.S. Sriramakavacham, « A New Generalized Space Vector Modulation Algorithm for Neutral Point Clamped Multilevel Converters », *Progress in Electromagnetics Research Symposium, Cambridge*, pp. 330-335, March 2006. »
- [25] « CHOUKRI, « BENHABIB MOHAMED ‘Contribution à l’étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension thèse de Doctorat de l’université de Poincaré Nancy-I, 2004. ».
- [26] « K.Pourhosseini, M.S.Naderi, “surge suppression using à fuzzy hysteresis-band controlled resistor array” *Iranian Journal of Science and Technology*,vol.33(issue2) :179-189, February 2009. »
- [27] « N.Aouchar,C.Bekhaled, « Aplication des systèmes hybrids neuro-flou au diagnostique des huiles de transformateur », *Ingéniorat, Ecole plytechnique ,Algérie, (2005). »*
- [28] « M. Fatiha, «Etude et Commande d’un Filtre Actif Parallèle à Structure de Tension », *Mémoire de Magister, Univ. Oran, Octobre 2001. »*
- [29] « B. Mohamed Choukri, «Contribution à l’Etude des Différentes Topologies et Commandes des Filtres Actifs Parallèles à Structure Tension : Modélisation, Simulation et Validation Expérimentale de la Commande », *Thèse de Doctorat, Univ. H. Poincaré, Nancy-I, Décembre 2004. »*
- [30] « BENZAIIOUA AMMAR ‘ Contribution à la commande directe de couple d’un machine asynchrone triphasée’ l’université du Québec à Chicotini comme exigence partielle du doctorat en ingénierie, 2014. ».
- [31] « AMMAR, BENZAIIOUA Contribution à la commande directe de couple d’un machine asynchrone triphasée’ l’université du Québec à Chicotini comme exigence partielle du doctorat en ingénierie, 2014 ».

- [32] « Mohamad Alaa Eddin Alali, Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur –Strasbourg I, Soutenance le 12/12/2002 ».
- [33] « S.Mariethoz & A.C. Rufer, “Open loop and closed loop spectral frequency active filtering” IEEE transactions on power electronics, vol. 17, No. 4, 07/02, pp 564-573. »
- [34] « T.C. Green and J.H. Marks “Control techniques for active power filters”, IEE Proc.-Electr. Power Appl. 2004, pp 1-13 ».
- [35] « V. Soares & all, “An instantaneous active and reactive current component method for active filters” IEEE transactions on Power Electronics, vol. 15, no. 4, July 2000, pp 660-669. »
- [36] « S.Rechka & all “a comparative study of harmonic detection algorithms for active filters and hybrid active filters” IEEE 2002, pp 357-363. »
- [37] « F. Labrique, « Etude de stratégies de commande d'un filtre actif de type parallèle en vue d'assurer la compensation des harmoniques et du déséquilibre », mémoire de fin d'étude, université catholique de Louvain Belgique, 2006. »
- [38] « N.K Nguyen, "Approche neuromimétiques pour l'identification et la commande des systèmes électriques: application au filtrage actif et aux actionneurs synchrones"; Thèse de doctorat, Université de Haute Alsace de Mulhouse – France-, 2010. »
- [39] « Mohamed Muftah Abdusalam « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales » thèse de doctorat, université de Nancy I (France), 2008. »
- [40] « H. Akagi & all “instantaneous power theory and applications to power conditioning”, IEEE press, a John Wiley & sons, Inc.2007. »
- [41] « Ghabbane Ismail, « Commande d'un Filtre Actif Triphasé Parallèle Par Différents Régulateurs », Mémoire de Magistère, Université Mohamed Kheider - Biskra, 24 /02/2011. »
- [42] « Houcine BELOUAAR, « Modélisation D'une Approche Basée Agent Et Logique Floue Pour La Qualité Des Services Web », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider BISKRA, 2018 – 2019. »

- [43] « Allahoum Rabie, « Contribution À L'étude Du Filtre Actif Parallèle De Puissance À Trois Niveaux », Magister en Électrotechnique, Université d'El-Oued Faculté des Sciences et Technologie Filière de génie électrique, 2012. »
- [44] « Farid Hamoudi, « Commande Robuste d'un Filtre Actif Shunt `a Quatre Fils », Mémoire de Magistère, Université EL Hadj Lakhder Batna, le 01 Juillet 2008. »
- [45] « Amieur Toufik, « Commande des Systèmes Non Linéaires par Mode Glissant Flou », Mémoire de Magister, Université Mohamed Kheider De Biskra, le 20/06/2009. »
- [46] « Dernoncourt, Franck, and Elisabeth Métais. “La Logique Floue: le raisonnement humain au cœur du système décisionnel.” Memory NFE211 engineering decision systems Paris (February 2011). »
- [47] « N.Aouchar,C.Bekhaled, « Application des systèmes hybrides neuro-flou au diagnostic des huiles de transformateur ». Ingéniorat, Ecole polytechnique ,Algérie, (2005). »
- [48] « Bai, Ying, and Dali Wang. “Fundamentals of fuzzy logic control—fuzzy sets, fuzzy rules and defuzzifications.” Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications. Springer, London, 2006. 17-36. »
- [49] « Abdelhamid Hamadi, « Amélioration Des Performances Du Filtre Actif: Application Du Régulateur Proportionnel Intégral Et Du Régulateur Flou », Pour L'obtention De Maitrise En Génie Électrique, École De Technologie Supérieure Université Du Québec, Le 30 Novembre 2004. »
- [50] « Meradi Samir, « Estimation Des Paramètres Et Des États De La Machine Asynchrone En Vue De Diagnostic Des Défauts Rotoriques », mémoire de Magister, Université de Biskra, 2007. »
- [51] « [http://projets.developpez.com/attachments/download/660/Tr-logique-floux4\\_1\\_.pdf](http://projets.developpez.com/attachments/download/660/Tr-logique-floux4_1_.pdf), consulté le 14/05/2019. »
- [52] « Aguilar-Martin Joseph. « La Logique Floue Et Ses Applications Industrielles ». In: Quaderni, n°25, Printemps 1995. Intelligence artificielle et entreprise : l'entreprise intelligente, pp. 75- 78. »
- [53] « B. BELABBAS.« Intégration de l'énergie éolienne dans un réseau électrique local ». Mémoire de Magister, université Ibn Khaldoun, Tiaret, 2012 . »

- [54] « LATRECH Mohamed ,« Commande floue de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) utilise dans un système éolien ». Mémoire de Magister, université Ferhat Abbès de Sétif UFAS, soutenu le 24/06/2012. »
- [55] « Sahli\_Abdeslem(2) ,« Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau »,Mémoire Magister universite Ferhat Abbas - Sétif UFAS (Algerie) . »
- [56] « KADDARI Faiza, « Contribution à l'étude d'un compensateur actif associé à des sources d'énergies nouvelles ». »
- [57] « Ould Abdesalam Djaffar, « Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension », Mém  
oire de doctorat Universite de Haute-Alsace U.F.R. des Sciences et Techniques. »
- [58] A. Bouisfi Y. Belrhali,« Etude en simulation d'une régulation thermique par logique flou ». Université sidi Mohamed ben Abdallah. 2010 ».
- [59] B. BELABBAS.« Intégration de l'énergie éolienne dans un réseau électrique local ». Mémoire de Magister, université Ibn Khaldoun, Tiaret, 2012 .
- [60] LATRECH Mohamed ,« Commande floue de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) utilise dans un système éolien ». Mémoire de Magister, université Ferhat Abbès de Sétif UFAS, soutenu le 24/06/2012.
- [61] N.Aouchar,C.Bekhaled, « Aplication des systèmes hybrids neuro-flou au diagnostique des huiles de transformateur », Ingéniorat, Ecole plytechnique ,Algérie, (2005).
- [62] MIHOUB Youcef, « Commande floue adaptative de la machine asynchrone », thèse de Doctorat, université d'Oran, 2012.
- [63] Aouchar Najet, Bekhaled Chafika , « Application des systèmes hybrides neuro-flou au diagnostic des huiles de transformation ». Mémoire d'ingénieur, école national poly technique, juin 2005.

- [64] HADJ DJILANI Fouad ,« LAISSAOUI Abdellah «Onduleur à cinq niveaux utilisé en filtrage actif parallèle.pdf»,Mémoire master Université Djilali BOUNAAMA - Khemis Miliana .
- [65] LAHOUAZI Farhat , « Mise en œuvre d'une stratégie de commande neuro floue application à un pendule inversé ». Mémoire de Magister, université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, soutenu le 16/03/2011.
- [66] Khami .Mohamed, « Amélioration des performances de régulation d'une machine asynchrone à double alimentations par la technique Neuro-Flou ». Master Académique, Université du Biskra, Algérie ,(2013) .
- [67] Aouchar Najet, Bekhaled Chafika , « Application des systèmes hybrides neuro-flou au diagnostic des huiles de transformation » mémoire d'ingénieur , école national polytechnique , Juin 2005.

## ملخص

يتناول العمل المقدم في هذه المذكرة دراسة الاضطرابات الناجمة عن استخدام الأحمال غير الخطية، والتي لها آثار ضارة على المعدات الكهربائية. الحل المقترح والفعال هو استعمال المرشح النشط التوازي لتقليل التوافقيات وتعويض الطاقة غير الفعالة. تم استخدام الطريقة PQ الكلاسيكية. تم تطوير اختبارات المحاكاة باستخدام Matlab Simulink و SimPowerSystems. أكدت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها مع تطبيق مرشح نشط من مستويين، ثلاثة مستويات وسبعة مستويات.

## كلمات مفاتيح

توافقيات، مرشح طاقة نشط توازي (مستويان، سبعة مستويات)، تعبئة عرض نبضي، تذبذب هستيري، مُنظم PI.

## Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude des perturbations dues à l'utilisation des charges non linéaires, qui ont des effets néfastes sur les équipements électriques. La solution proposée et efficace est le l'emploi de filtre actif shunt, pour réduire les harmoniques de courant et compenser l'énergie réactive. Les réseaux neuronaux artificiels ont été utilisés pour développer la partie d'extraction de la méthode PQ classique. Des essais de simulation ont été développés avec Matlab Simulink et SimPowerSystems. Les résultats de simulation obtenus avec l'application d'un filtre actif de deux, trois et sept niveaux avec la méthode Adaline ont confirmé la supériorité des commandes proposées.

## Mots clés

Harmoniques, filtre de puissance actif shunt (deux, trois, sept niveaux), MLI, Hysteresis, régulateur PI, réseaux neuronaux THD,

## Abstract

The work presented in this thesis concerns the study of disturbances caused by the use of nonlinear loads, which have detrimental effects on electrical equipment. The proposed and effective solution is the shunt active filter, to reduce harmonics and compensate for reactive power. Artificial neural networks were used to develop the extraction part of the classical PQ method. Simulation tests were conducted using Matlab Simulink and SimPowerSystems. The simulation results obtained with the application of a two, three, and seven-level active filter using the Adaline method confirmed the superiority of the proposed controls..

## Key words

Harmonics, shunt active power filter (two, three, seven levels), PWM, hysteresis, PI controller, neural networks, THD.