

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE : TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE**  
**N° : RE-03.**



**DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE**  
**FILIERE : GENIE ELECTROTECHNIQUE**  
**OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES**

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master Académique**

**Par : HADRAOUI Moustafa**

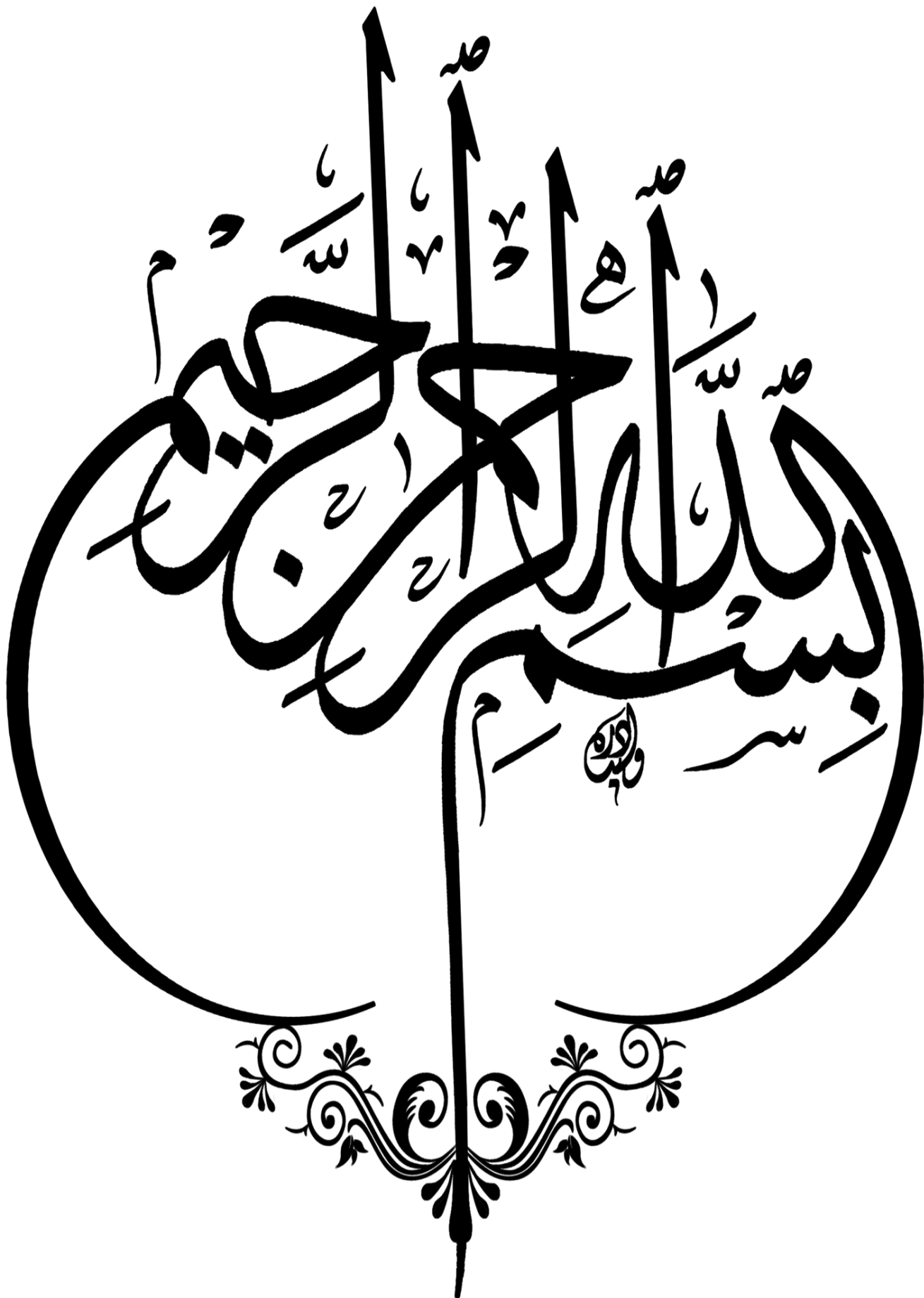
**Intitulé**

**Commande d'un convertisseur multi niveaux**  
**pour une application de filtrage actif**

**Soutenu devant le jury composé de :**

Mr. BEDBOUDI Mohammed	Université Mohammed Boudiaf – M'silla	Président
Mr. DJERIOUI Ali	Université Mohammed Boudiaf – M'silla	Rapporteur
Mr. GHADBANE Ismail	Université Mohammed Boudiaf – M'silla	Examinateur

**Année universitaire : 2018 / 2019**



## ملخص

أصبحت مشكلة التلوث التوافقي في شبكات التوزيع الكهربائية مصدر قلق أكثر فأكثر مع زيادة استخدام الأحمال غير الخطية. تعتبر تصفية الطاقة النشطة أحد أكثر الحلول فعالية لهذه المشكلة. من أجل القضاء على التلوث التوافقي، تم طلب مرشح نشط من قبل العاكس متعدد المستويات، ووضع إستراتيجية التحكم على أساس خطة التحكم المقترحة لتحسين أداء المرشح النشط ثلاثي المراحل. ثم قدمنا دراسة عن جودة الطاقة الكهربائية والاضطراب التوافقي بالتفصيل. بعد ذلك، نقدم أنواع العاكسات متعددة المستويات مع ظهور مقارنة بالوحدات الأخرى، لقد أظهرنا كيف تم تصميم دوائر التحكم الحالية والجهد لمرشح الطاقة النشط NPC العاكس من نوع بالإضافة إلى ذلك، سوف نقدم وصفاً لطرق التعرف التوافقي باستخدام محول جهد ثلاثي المستويات. بعد ذلك، لدينا عموميات على عامل التصفية النشط مع أنواعها. في الخطوة الأخيرة، قمنا أولاً بتطبيق تقنية التحكم التنبؤية لقيادة العاكس من ثلاثة مستويات من نوع، من أجل الحصول بالإضافة إلى تحسين جودة التصفية، أثبتت النتائج التي تم الحصول عليها كفاءة الخطة المقترحة، المطبقة NPC على الأحمال غير الخطية في هذه الذاكرة، عامل التصفية أثناء تطبيق حمل الملوثات التصحيحية.

**الكلمات المفتاحية:** التوافقي، NPC، QEE، FAP، السيطرة التنبؤية.

## Résumé

Le problème de la pollution harmonique dans les réseaux électriques de distribution devient de plus en plus préoccupant avec l'accroissement de l'usage des charges non-linéaires. Le filtrage actif de puissance est l'un des solutions les plus efficaces face a ce problème. Pour élimine les harmonique on a commende un filtre actif par un onduleur multi niveau, développement d'une stratégie de commande basée sur un schéma de contrôle proposé pour améliorer les performances du filtre actif triphasé. Ensuite, On a présente un étude sur la qualité d'énergie électrique et les perturbation harmonique en détail. Après, On présente les types des onduleurs multi niveaux avec l'avantage de onduleur de type NPC par rapport les autres module, on a montré comment se fait la conception des circuits de régulation du courant et de la tension d'un filtre actif de puissance. En autre, nous présenterons la description des méthodes d'identification des harmoniques en utilisant un onduleur de tension a trois niveaux. Après, On a présente des généralités sur le filtre actif avec leur types. Dans une dernière étape, on a d'une part appliquer la technique de commande prédictif pour commende un onduleur trois niveau de type NPC, afin d'obtenir en plus de l'amélioration de la qualité de filtrage, les résultats obtenus ont prouvé l'efficacité du plan proposé, appliqués aux charges non linéaires en cette mémoire on a applique le filtre tell que la charge polluante redresseur.

**Les mots clés :** L'harmonique, NPC, QEE, FAP, la commende prédictive.

## Abstract

The problem of harmonic pollution in electrical distribution networks is becoming more and more of a concern with the increase in the use of non-linear loads. Active power filtering is one of the most effective solutions to this problem. In order to eliminate the harmonic, an active filter has been ordered by a multi-level inverter, development of a control strategy based on a control scheme proposed to improve the performance of the three-phase active filter. Then, we presented a study on the quality of electrical energy and the harmonic perturbation in detail. After, We present the types of multilevel inverters with the advent of NPC-type inverter compared to the other modules, we showed how the design of current and voltage control circuits of an active power filter. In addition, we will present the description of harmonic identification methods using a three-level voltage inverter. After, we have generalities on the active filter with their types. In a last step, we first apply the predictive control technique to command a NPC type three-level inverter, in order to obtain in addition to the improvement of the quality of filtering, the results obtained proved the efficiency of the proposed plan, applied to the nonlinear loads in this memory, the filter as the rectifying pollutant load was applied.

**Key words:** The harmonic, NPC, QEE, FAP, predictive control.

## **REMAIRCEMENT**

*En premier lieu, je tiens à remercier et à exprimer ma gratitude à Monsieur **Mr. DJERIOUI Ali**, Maitre de conférence à l'université **Mohammed Boudiaf de M'silla**, qui a encadré et suivi ce travail. Que sa constante disponibilité et ses précieux conseils soient ici mille fois remerciés.*

*Je tiens aussi à remercier le chef de département de génie électrique **Mr. BENRABEH Fouad** qui nous ont aidés de proche ou de loin pour être les masters en réseaux électrique.*

*Mes remerciements vont également à Monsieur **Mr. BEDBOUDI Mohammed**, Professeur à université de m'silla de m'avoir fait honneur de présider le jury de ce mémoire, Monsieur **Mr. GHADBANE Ismail**, Professeur à université de m'silla pour l'honneur qu'ils me font de participer au jury de mon mémoire et d'avoir accepté de juger ce travail.*

*Je tiens aussi à remercier tous mes enseignants du département d'**Electrotechnique** de l'université **Mohammed Boudiaf** faculté de **technologie** à **M'silla** pour leurs conseils et surtout leur compréhension.*

*Nos remerciements mon père, ma mère et tous mes sœurs.*

*Enfin, Nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous les amis et collègues pour le soutien moral.*



# *Dédicaces*

*Je dédie ce fruit de travail :*

*A ma très chère maman (Ben chérif keltoum), sa tendresse, sa bienveillance, son  
Encouragement, pour ce qu'elle a fait depuis mon enfance jusqu'à ce jour.*

*A mon cher père (Mohemed ben soleyman) pour sa générosité, sa bonté, je te*

*Cher Papa du fond du cœur pour tout ce que tu as fait pour moi .*

*Et A mes chères sœurs Leïyla, Mabrouka, Hadjer et Oum Saad.*

*A mes amies Surtout khaled, Asma, Omar, Bilal, Hicham, Mohamed, Shahra*

*Et tous mes amis.*

*A tous mes amis sans exception en particulier Ceux de la promotion 2<sup>ème</sup>*

*Année master Réseaux électriques 2019 .*

*En fin à tout ce qui nous aime et qu'on aime*

**HADRAOUI MOUSTAFA**



## Table des matières

Résumé.....	I
Table des matières.....	II
Liste des figures.....	VI
Liste des tableaux.....	VIII
Notions et symboles.....	IX
Introduction Générale.....	1

### Chapitre I : La Qualité de l'énergie électrique et Les perturbations des réseaux électriques.

I.1. Introduction.....	3
I.2. Qualité de l'énergie électrique.....	3
I.2.1. Qualité de tension .....	5
I.2.1.1. La fréquence.....	5
I.2.1.2. Amplitude .....	5
I.2.1.3. Forme d'onde .....	5
I.2.1.4. Symétrie .....	6
I.2.2. Qualité du courant .....	6
I.2.3. Les perturbations électriques .....	7
I.2.3.1. Le creux de tension.....	7
I.2.3.2. Fluctuations de tension .....	7
I.2.3.3. Variation de fréquence.....	8
I.2.3.4. Variation de tension.....	8
I.2.3.5. Les surtensions .....	9
I.2.3.6. Harmoniques et inter-harmoniques .....	10
I.3. Solutions pour améliorer la QEE.....	11
I.3.1. Déséquilibre du Système Triphasé .....	11
I.3.2. Creux de tension .....	11
I.3.3. Fluctuations de la Tension .....	12
I.3.3.1. Installation d'équipements correcteurs .....	12
I.3.3.2. Approvisionnement permanent en énergie garanti.....	12
I.3.3.3. Des solutions dans l'usage domestique .....	12

I.3.4. Dépollution des Harmoniques .....	12
I.3.4.1 Solutions traditionnelles .....	12
I.3.4.2. Solutions modernes de dépollution .....	13
I.4. Les Perturbations Harmoniques.....	14
I.4.1. Sources des harmoniques .....	14
I.4.3. Les effets d’harmonique.....	15
I.4.3.1. Effet instantanée .....	16
I.4.3.2. Effet à long terme .....	16
I.4.4. Conséquences néfastes des harmoniques .....	16
I.4.5. Caractéristique de la pollution harmonique .....	17
I.4.5.1. Taux de distorsion d’harmonique THD .....	17
I.4.5.2. Taux d’harmonique de rang h .....	18
I.4.5.3. Facteur de puissance .....	18
I.4.5.4. Représentation spectrale .....	19
I.4.6. Normes et réglementations.....	20
I.4.7. Des solutions pour éviter la pollution d’harmonique sur le réseau électrique .....	21
I.5. Conclusion .....	22

## **Chapitre II : Les convertisseurs multiniveaux et leur commande.**

II.1. Introduction .....	23
II.2. Définition des onduleurs .....	23
II.2.1. Les types des onduleurs .....	24
II.2.1.1. Onduleur autonome .....	24
II.2.1.2. Onduleur non autonome .....	24
II.2.1.3. Onduleurs hybrides ou intelligents.....	25
II.2.2. Les applications des onduleurs.....	25
II.3. Les convertisseurs multiniveaux .....	26
II.3.1. Intérêt des onduleurs multi-niveaux.....	26
II.3.2. Fonctions de commutation.....	27
II.3.3. Commande complémentaire des interrupteurs .....	27
II.3.4. Principe des convertisseurs multiniveaux .....	27
II.3.5. Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux .....	28
II.3.5.1. Onduleur multi niveaux à diode de bouclage (NPC). .....	28

II.3.5.2. Onduleur multi niveaux à condensateurs flottants .....	40
II.3.5.3. Onduleur multi niveaux en cascade .....	41
II.3.6. La stratégie générale pour l'élimination d'harmonique .....	41
II.3.7. Nombre des composant nécessaire pour les onduleurs multiniveaux.....	42
II.4. Conclusion.....	46

### **Chapitre III : Le filtrage actif par les onduleurs multiniveaux de type NPC.**

III.1. Introduction .....	48
III.2. Les filtres actifs .....	48
III.3. Les avantages et les inconvénients du filtre actif .....	51
III.4. Filtre actif multi-niveaux.....	52
III.5. Les filtres passifs .....	52
III.6. Les avantages des filtres actifs par rapport aux filtres passifs .....	52
III.7. Comparaison entre le filtre actif et le filtre passif .....	53
III.8. Rôle du filtre actif.....	53
III.9. Classement des filtres actifs .....	54
III.10. Applications de filtre actif parallèle.....	55
III.11. Point de raccordement du filtre actif parallèle .....	56
III.12. Principe du filtrage actif parallèle.....	57
III.13. Description du système de filtre actif parallèle .....	58
III.13.1. Modèle du Réseau d'Alimentation.....	58
III.13.2. Modélisation de la charge polluante.....	59
III.13.3. Modélisation du filtre actif.....	61
III.14. Structure du Filtre Actif Parallèle .....	61
III.14.1. Etudes de la partie puissance .....	62
III.14.1.1. Le système de stockage de l'énergie .....	63
III.14.1.2. Filtre de sortie .....	64
III.14.2. Etudes de la partie commande.....	66
III.15. Conclusion.....	67

### **Chapitre IV : La commande prédictif d'onduleur trois niveau de type NPC pour application de filtre actif parallèle.**

IV.1. Introduction .....	67
IV.2. Principe de la commande prédictif .....	67

IV.3. La commande prédictive généralisé .....	68
IV.3. Commande prédictive de courant d'un filtre actif parallèle .....	69
IV.4. Résultat de simulation de filtre actif parallèle par un onduleur trois niveau.....	73
IV.4.1. Le résultat de simulation avec raccordée le filtre .....	73
IV.4.2. Résultat de simulation de la commande prédictif de filtre actif parallèle .....	74
IV.5. Interprétation des résultats .....	79
IV.6. La conclusion .....	80
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>81</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>83</b>

## La liste des figures

### Chapitre I :

Figure I.1. Système triphasée symétrique. ....	6
Figure I.2. Creux et coupures de tension .....	7
Figure I.3. Fluctuations de tension .....	8
Figure I.4. Variation de fréquence.....	8
Figure I.5. Déséquilibre de tension. ....	9
Figure I.6. Le fondamental avec signal harmonique. ....	10
Figure I.7. Filtre passif série. ....	13
Figure I.8. Digramme de Fresnel des puissances .....	19
Figure I.9. Spectre harmonique d'un signal.....	19

### Chapitre II :

Figuier II.1. Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC). ....	24
Figuier II.2. Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.....	26
Figuier II.3. Principe de convertisseur multiniveau. ....	27
Figure II.5. Etats de l'onduleur. ....	30
Figuier II.6. Structure d'un bras d'onduleur NPC.....	31
Figure II.7. Bras d'un onduleur NPC à trois niveaux.....	32
Figure II.8. 1 <sup>ère</sup> Configuration du 1er bras. ....	33
Figure II.9. 2 <sup>ème</sup> Configuration du 1 <sup>er</sup> bras.....	33
Figure II.10. 3 <sup>ème</sup> Configuration du 1er bras.....	34
Figure II.11. Forme d'onde de la tension de sortie d'un bras d'onduleur à trois Niveaux.....	35
Figure II.12. Le principe de la commande MLI.....	37
Figure II.13. Schéma de la régulation de $V_{dc}$ par un régulateur PI.....	38
Figuier II.14. Topologie d'onduleur multi niveaux à condensateurs flottants.....	40

### Chapitre III :

Figure III.1. Filtre actif parallèle (compensateur de courant).....	50
Figure III.2. La structure du filtre actif parallèle.....	50
Figure III.3. Filtre combiné parallèle - série (UPQC) .....	51
Figure III.4. Raccordement d'un filtre actif parallèle. ....	56
Figure. III.5. Schéma de principe du filtre actif parallèle.....	57
Figure III.6. Schéma du réseau électrique .....	58
Figure III.7. Schéma du charge polluante (Redresseur à diodes (pont de Graëtz) avec charge	59
Figure III.8. Schéma global du système. ....	60

## La liste des figures

---

Figure III.9. Tension de sortie du redresseur contenue les harmoniques. ....	60
Figure III.10. La structure générale du filtre actif parallèle.....	61
<b>Chapitre IV :</b>	
Figure IV.1. Schéma synoptique de la commande prédictive.....	70
Figure IV.2. Algorithme de la commande prédictive.....	72
Figure IV.3. Le courant de réseau avant raccordée le filtre $i_{fa}$ .....	73
Figure IV.4. Le spectre d'harmonique de courant de la source avant raccordée le filtre $i_{fa}$ ...	73
Figure IV.5. Schéma bloc de filtre actif parallèle par un onduleur trois niveau .....	74
Figure IV.6. Les trois tensions d'alimentation de réseau. ....	76
Figure IV.7. Le courant de référence $i_a^*$ .....	76
Figure IV.8. Le courant de la charge $i_c$ après raccorde le filtre. ....	76
Figure IV.9. Le spectre d'harmonique de courant de la charge $i_c$ après raccorde le filtre. ...	77
Figure IV.10. Le courant injecté par le filtre $i_{fa}$ .....	77
Figure IV.11. Le spectre d'harmonique de courant injecté par le filtre $i_{fa}$ .....	77
Figure IV.12. Le courant de la source après raccorde le filtre $i_{sa}$ .....	78
Figure IV.13. Le spectre d'harmonique de courant de la source après raccorde le filtre $i_{sa}$ .....	78

## **La liste des tableaux**

### **Chapitre I : La Qualité de l'énergie électrique et Les perturbations des réseaux électriques.**

Tableau I.1. Les perturbations électriques le plus courants dans les réseaux électriques .....	4
Tableau I.2. Quelques sources des perturbations harmoniques. ....	15
Tableau I.3. Le pourcentage des harmoniques en signal et leur conséquence.....	17
Tableau I.4. Limites des composantes harmoniques en courant.....	20

### **Chapitre II : Les convertisseurs multiniveaux et leur commande.**

Tableau II.1. Etat d'un bras de l'onduleur. ....	30
Tableau II.2 : Table de commutation de l'onduleur NPC 3 niveaux.....	34
Tableau II.3. Les composantes nécessaires pour les différentes topologies de l'onduleur .....	43
Tableau II.4. Les composantes nécessaires pour les différentes topologies de l'onduleur .....	43
Tableau II.5. Les composantes nécessaires pour les différentes topologies de l'onduleur .....	44
Tableau II.6. Comparatif pour les différentes topologies .....	44
Tableau II.7. Comparatif est alors modifié .....	45

### **Chapitre III : Le filtrage actif par les onduleurs multiniveaux de type NPC.**

Tableau III.1. Comparaison entre le filtre actif parallèle et le filtre actif série.....	50
Tableau III.2. Comparaison entre le filtre actif et le filtre passif.....	53

### **Chapitre IV : La commande prédictif d'onduleur trois niveau de type NPC pour application de filtre actif parallèle.**

Tableau IV.1. Paramètres de simulation d'un filtre actif à trois niveaux. ....	75
Tableau IV.2. Les valeurs de THD avant et après raccordée le filtre. ....	79

## La liste des symboles et notions

$V1(t)$ , $V2(t)$ et $V3(t)$	Les tension simple de système triphasée.
<b>f</b>	La fréquence.
<b>QEE</b>	La qualité d'énergie électrique
<b>UPS</b>	Uninterruptible Power Supply
<b>IGBT</b>	Insolâtes Gâte Bipolaire Transistor
<b>AC</b>	A courant alternative
<b>DC</b>	A courant continue
<b>MLI</b>	modulation de largeurs d'impulsions
<b>pq</b>	la puissance réactive instantanée
<b>Uf</b>	la tension de fourniture
<b>R</b>	Résistance
<b>C</b>	Capacité
<b>L</b>	Inductance
<b>D</b>	Puissance Déformante
<b>P</b>	Puissance active
<b>Q</b>	Puissance réactive
<b>S</b>	Puissance apparente
<b>THD</b>	Taux de Distorsion Harmonique
<b>CEI</b>	Commission d'électrotechnique internationale
<b>THD-F</b>	Taux de distorsion harmonique par rapport au fondamental
$Q_h$	la valeur efficace de l'harmonique au rang $h$ du courant / de la tension
$Q_1$	celle composante fondamentale
$Q_{HM}$	la valeur efficace des courants ou tensions harmoniques
<b>h</b>	le rang harmonique
<b>H</b>	le rang harmonique maximal
<b>Fp</b>	Facteur de puissance.
$\varphi$	Le déphasage
<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<b>Fij</b>	Fonction de commutation
<b>j</b>	Indicateur de phase
<b>i</b>	Numéro de l'interrupteur du bras
<b>NPC</b>	Neutral Point Clamped, La topologie à diode de bouclage
<b>MPC</b>	Multiple Point Clamped
<b>Vdc</b>	source continu de tension
<b>Sij</b>	Etat d'interrupteur
<b>N</b>	Le nombre de niveaux de tension obtenus à la sortie de l'onduleur.
<b>Vxo</b>	Tension phase point milieu

<b>I</b>	Le courant mesuré.
<b>C1</b>	Condensateur de filtrage en haut de l'onduleur NPC à trois niveaux.
<b>C2</b>	Condensateur de filtrage en bas de l'onduleur NPC à trois niveaux.
<b>E</b>	Tension principale de l'onduleur NPC
<b>S1, S2 et S3</b>	Tension phase point neutre
<b>SVM</b>	Space Vector Modulation
<b>m</b>	L'indice de modulation.
<b>n</b>	Le nombre de niveaux de tension.
<b>U<sub>ch</sub></b>	La tension redresse
<b>V<sub>ao</sub>, V<sub>bo</sub> et V<sub>co</sub>.</b>	Les tensions simples à la sortie de l'onduleur entre les phases de la charge et le point milieu o.
<b>V<sub>f</sub></b>	Tension simple efficace à la sortie du filtre
<b>FAP</b>	Filtre actif parallèle
<b>FAS</b>	Filtre actif série
<b>UPQC</b>	Filtre hybride (combinaison de FAP et FAS)
<b>R<sub>s</sub></b>	Résistance du réseau côté source ( $\Omega$ ).
<b>L<sub>s</sub></b>	Inductance côté source (H).
<b>R<sub>c</sub></b>	Résistance côté de charge ( $\Omega$ ).
<b>L<sub>c</sub></b>	Inductance côté source (H).
<b>L<sub>f</sub></b>	Inductance de filtre
<b>I<sub>s</sub></b>	Courant du source
<b>I<sub>f</sub></b>	Courant du filtre
<b>I<sub>h</sub></b>	Courant harmonique de la charge

## Notions et Symboles

$I_n$	le courant du neutre
$T_s$	la période d'échantillonnage.
$g$	fonction coût
$i_{fa}^*, i_{fb}^*$ et $i_{fc}^*$	les courants harmoniques de référence identifiés par la méthode modifiée
$i_{fa-predi}^*, i_{fb-predi}^*$ et $i_{fc-predi}$	les courants prédits pour l'instant suivante (k+1)
$V_a, V_b, V_c$	Les tensions simples aux bornes de la charge.
$K_p$	Gain du régulateur
$p$	Opérateur de Laplace
$K_I$	Gain intégral du régulateur.
$P_c$	La puissance à la sortie du régulateur
$\xi$	Dépassement.
$\omega$	La pulsation
$e_1, e_2, e_3$	Les tensions du réseau électrique
$\sin(\omega t)$	est le signal sinusoïdal.
$Z_{cc}$	Les impédances du réseau

### Introduction générale

Depuis de nombreuses années, le fournisseur d'énergie électrique s'efforce de garantir la qualité de l'énergie électrique, les premiers efforts se sont portés sur la continuité de service afin de rendre toujours disponible l'accès à l'énergie chez l'utilisateur. Aujourd'hui, les critères de qualité ont évolué avec le développement des équipements où l'électronique prend une place prépondérante dans les systèmes de commande et de contrôle et qui entraîne de plus en plus de problèmes de perturbations au niveau des réseaux électriques [1].

Les convertisseurs statiques absorbent des courants non sinusoïdaux même s'ils sont alimentés par des tensions sinusoïdales. Ils se comportent alors comme des générateurs de courants harmoniques et consomment généralement de l'énergie réactive. Le réseau quant à lui est parfaitement adapté à des courants sinusoïdaux. Ces deux phénomènes nouveaux sur le réseau ont engendré un certain nombre de perturbations allant du dysfonctionnement d'un équipement jusqu'à la destruction d'une partie des équipements connectés.

Le filtre actif parallèle est un onduleur multiniveaux commuté par des techniques dérivées soit MLI, Prédicatif, hystérise et commuté en pleine onde, commuté décalé  $180^\circ$  ou  $120^\circ$ ...etc. Dans cette mémoire on a utilisé le stratège de la commande prédictif pour commander la courante de la sortie d'onduleur multiniveaux.

Le but de ce mémoire est de démontrer l'efficacité du filtrage harmonique parallèle qui permet l'adaptation à la charge par un onduleur trois niveau de type NPC, On a commandé l'onduleur multiniveaux par la commande prédictive avec contrôle la courante produite à la sortie pour filtrer les harmoniques en courante de réseau, nous allons vérifier le résultat par le taux de distorsion harmonique (THD).

Ce mémoire comporte quatre chapitres :

Dans le premier, On a étudié la qualité d'énergie électrique en détail et les perturbations sur le réseau électrique, ainsi des solutions pour améliorer la QEE. Ensuite, On présentera des notions générales sur les harmoniques, leurs sources, leurs conséquences et les méthodes classiques et modernes pour les compenser.

Dans le deuxième chapitre, Nous présentons une étude générale sur les onduleurs : la structure, le principe général de fonctionnement et les différents types. Ensuite nous présentons les onduleurs multiniveaux à cause de leur domaine d'utilisation (moyenne et grande puissance)

## Introduction générale

---

et ces avantages. Le principe de fonctionnement, les différentes topologies et les différentes stratégies de sa commande.

Dans le troisième chapitre, On a présente le principe du filtrage actif parallèle nous établissons une méthode d'identification des courants harmoniques.

Dans le quatrième chapitre, On a présente la commande prédictive et appliquée cette méthode en onduleur trois niveau de type NPC pour injecte la courante produite à la sortie en réseau.

*Chapitre I : la qualité d'énergie électrique  
et perturbations des réseaux électriques.*

## **I.1. Introduction**

L'énergie électrique doit d'être délivrée sous forme d'un système des tensions sinusoïdaux triphasés et équilibrés qui possède quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et la symétrie. Cependant cet objectif semble idéal et n'est jamais facile à assurer, car le réseau électrique aujourd'hui est appelé à fonctionner sous un environnement de plus en plus perturbateur [10]. Après plusieurs années, les convertisseurs statiques (redresseurs, gradateurs) prolifèrent tant dans les équipements industriels et les dispositifs domestiques. Par exemple, ces dispositifs sont fréquemment employés dans la régulation de la vitesse des moteurs à courant continu et alternatif. Ils sont également utilisés dans les variateurs de lumière, les régulations de systèmes de chauffage électrique et les variateurs de vitesse des moteurs universels (lave-linge, aspirateurs, outillages électroportatifs,) [2]. La dégradation de qualité de l'énergie après ensemble des perturbations est démunie le rendement de matériel comme l'échauffement et la vibration de la ligne électrique après une surtension.

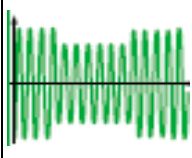
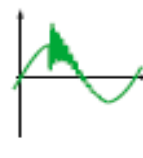
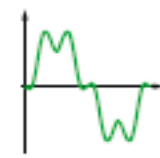
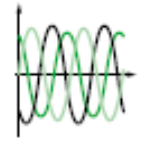
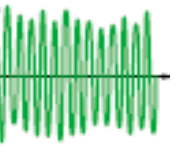
Le fonctionnement normal de tous les producteurs et tous les consommateurs de l'énergie électrique réside dans la supposition que le courant et la tension du système triphasé soient sinusoïdaux et symétriques, par conséquent, il est nécessaire de réduire les harmoniques en dessous de 5% comme spécifié dans la norme harmonique IEEE519 [3]. Le respect des normes de la qualité de l'énergie électrique impose, si une charge non linéaire est connectée au réseau électrique de concevoir un système qui restreint la dissipation des composantes harmoniques.

Dans ce chapitre, nous allons présenter définition générale sur la qualité d'énergie électrique avec les grandeurs et des valeurs impactée sur la qualité d'énergie, Ensuite, les origines des perturbations électriques et leur influence avec des solution sure les réseaux électriques. En fin, On à faire une présentation sur les perturbations harmoniques et leur conséquence avec la caractéristique.

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

Le problème de la qualité de l'énergie électrique est un occurrence manifeste comme les perturbations de tension, de courant ou de fréquence qui a des problèmes aux charges sensible et critiques comme les pannes, les pertes financières significatives et peu avoir même des défiances des équipements industriels important. Phénomène qualité de l'énergie comprend toutes les situations possibles dans lesquelles la forme d'onde de la tension d'alimentation (qualité de la tension) ou courant de charge (qualité du courant) s'écartent de la forme d'onde sinusoïdale à la fréquence nominale avec une amplitude correspondant à la valeur efficace pour les trois phases d'un système en triphasée. Alors, la découverte des FACTS est faite pour répondre à ces

problématiques [4]. La qualité de cette énergie dépend directement de la qualité de la tension aux points de raccordement de la charge au réseau. Le transport de l'énergie électrique depuis sa production (source) jusqu'à sa distribution (charge) est réalisé à travers trois fils conducteurs. Ce sont surtout les installations industrielles qui sont alimentées par du courant alternatif triphasé. Un circuit triphasé reçoit trois tensions sinusoïdales de même fréquence.

Perturbation	Creux de tension	surtension	Harmonique	Déséquilibre	Fluctuation de tension
Formes d'onde caractéristiques					
Origine de la perturbation					
⚡ Réseau					
Défaut d'isolement, rupture du conducteur de neutre...					
Manœuvres et Ferro résonance					
Foudre					
⚡ Equipements					
Moteur asynchrone					
Moteur synchrone					
Machine à souder					
Four à arc					
Convertisseur					
Charges informatiques					
Eclairage					
Onduleur					
Batterie de condensateurs					

Phénomène occasionnelle

Phénomène fréquent

Tableau I.1. Les perturbations électriques le plus courants dans les réseaux électriques [4].

## I.2.1. Qualité de tension

### I.2.1.1. La fréquence

Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon le pays. Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production, de l' pilotage d'un groupe sur ses auxiliaires ou son passage en réseau séparé, ou d'un défaut dont la chute de tension résultante entraîne une réduction de la charge, les perturbations au niveau de la charge non linéaire et le DC voltage continue.

Cependant, ces variations sont en général très faibles (moins de 1%) et ne nuisent pas au bon fonctionnement des équipements électriques ou électroniques [5]. C'est Westinghouse, probablement avec les conseils de Tesla, qui imposa progressivement le 60 Hz aux États-Unis. En Europe, après que AEG eut choisi le 50 Hz, cette fréquence se diffusa petit à petit. On conserve aujourd'hui cet historique et les réseaux actuels sont exploités soit à 50 Hz, soit à 60 Hz.

### I.2.1.2. Amplitude

Le système triphasé des tensions représenté par  $v_1(t)$ ,  $v_2(t)$  et  $v_3(t)$  est défini par les équations suivantes :

$$V_1(t) = V_1 \sqrt{2} \sin(\omega.t) \quad (I.1)$$

$$V_2(t) = V_2 \sqrt{2} \sin(\omega.t - 2\pi/3) \quad (I.2)$$

$$V_3(t) = V_3 \sqrt{2} \sin(\omega.t - 4\pi/3) \quad (I.3)$$

En théorie :

- les amplitudes des 3 tensions sont égales,
- les déphasages respectifs sont égaux (de 120°),
- les tensions sont parfaitement sinusoïdales.

En pratique, ces propriétés ne sont pas vérifiées. L'importance des défauts peut être quantifiée par des mesures de taux de déséquilibre et de taux de distorsion harmonique. Les tensions  $v_1(t)$ ,  $v_2(t)$  et  $v_3(t)$  sont appelées « tensions simples » ou « tensions phase-neutre ». Les tensions prises entre phases sont dites « tensions composées ».

Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude, qui est une constante. Cependant, plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter l'amplitude des tensions.

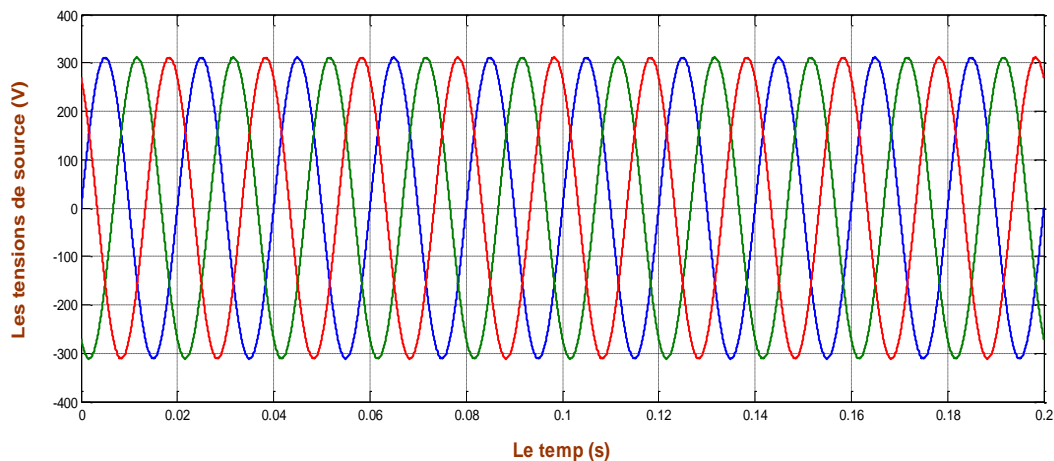
### I.2.1.3. Forme d'onde

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz appelées également harmoniques [7].

Tout comme les trois signaux de système triphasé sont plus sinusoïdale alors la qualité de l'énergie électrique est acceptée pour la charge. La solution la plus commode pour produire de manière industrielle de l'énergie électrique est l'entraînement d'un alternateur par une turbine, le tout en rotation autour d'un axe. De manière naturelle ces installations produisent des tensions sinusoïdales. En sens inverse et tout aussi naturellement, ces tensions sinusoïdales permettent l'entraînement régulier d'un moteur électrique. Cette facilité d'utilisation à la production et à l'usage dans les machines tournantes constitue les deux grands atouts de la tension sinusoïdale.

#### I.2.1.4. Symétrie

Un système triphasé est un ensemble de 3 grandeurs (tensions ou courants) sinusoïdales de même fréquence, déphasées les unes par rapport aux autres. Le système est symétrique si les valeurs efficaces des grandeurs sinusoïdales sont égales et si le déphasage entre deux grandeurs consécutives vaut  $2\pi/3$ .



**Figure I.1.** Système triphasé symétrique.

#### I.2.2. Qualité du courant

Les déformations du courant et de la tension peuvent perturber le fonctionnement normal d'autres équipements électriques. C'est pourquoi, les distributeurs d'énergie ayant la contrainte de fournir une tension sinusoïdale, prennent en charge l'atténuation des perturbations harmoniques au moyen d'installations de forte puissance [2].

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquence constante, déphasés de  $2\pi/3$  radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale [8].

### I.2.3. Les perturbations électriques

Dans le réseau électrique on a trouvé des perturbations diminuent le rendement de réseau, les consommateurs ou les récepteurs de l'énergie électrique sont demandeurs de bonne qualité d'énergie alors les gestionnaires de réseau font une recherche et déterminent les perturbations pour améliorer leur produit et continuer le réseau électrique.

#### I.2.3.1. Le creux de tension

Un creux de tension est une diminution brusque de la tension de fourniture  $U_f$ . Cette diminution, située entre 90% et 10% de la tension nominale  $U_n$ , est suivie du rétablissement de la tension après un court laps de temps. Un creux de tension peut durer de 10 ms à 3 mn.

Lorsque la tension est absente (baisse de tension de 100%) pendant 1s à 1mn on parle de « Coupure brève » et entre 10ms et 1s de « coupure très brève ».

Lorsque la durée est  $\geq 10$  ms, la coupure est généralement due à des phénomènes transitoires où volontaires, par exemple l'emploi de gradateur, les défauts de courts circuits [24].

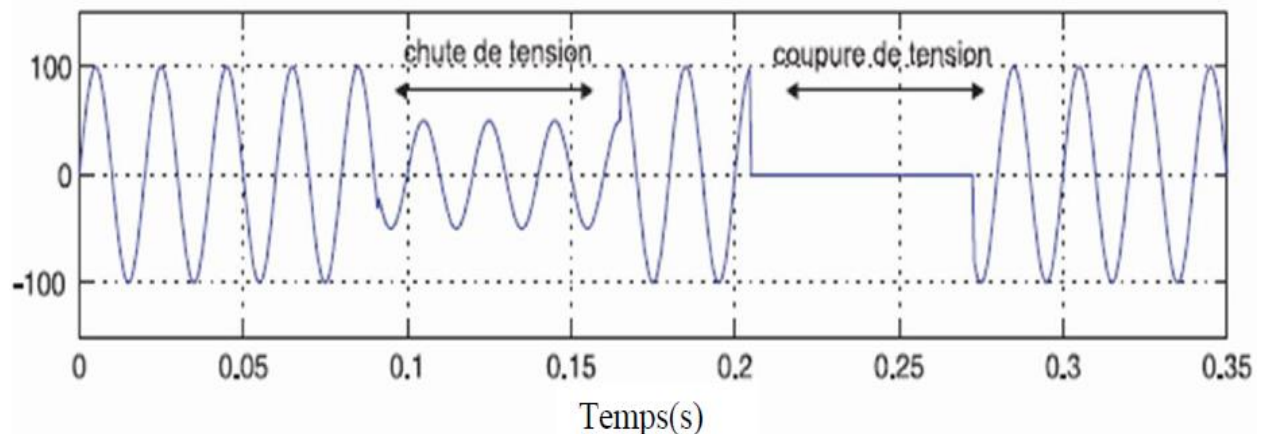


Figure I.2. Creux et coupures de tension [6].

#### I.2.3.2. Fluctuations de tension

Elles sont définies par des amplitudes inférieures à 10% de la tension nominale et par la durée séparant deux variations successives inférieures à une heure et peuvent être aléatoires ou périodiques [25].

Ces perturbations sont générées par deux types d'équipement :

- les fours à arcs qui produisent des variations erratiques permanentes de tension, dont le contenu spectral est situé dans la bande 0,5 à 25 Hz.
- Les machines à souder qui provoquent des variations souvent plutôt périodiques, à des intervalles de temps de quelques secondes.

Du fait de leur faible amplitude, ces fluctuations n'ont pas d'effet sur le fonctionnement des équipements électriques. Leurs conséquences sont plutôt d'ordres physiologique : il s'agit de la perception par l'œil des fluctuations de luminosité des appareils d'éclairage, liées aux fluctuations de tension [9].

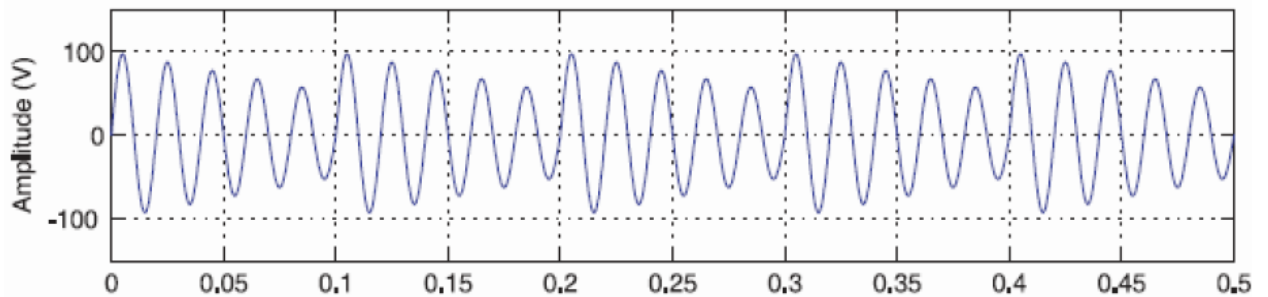


Figure I.3. Fluctuations de tension [6].

### I.2.3.3. Variation de fréquence

Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans les conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle  $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ . Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome, voir la figure (I.11).

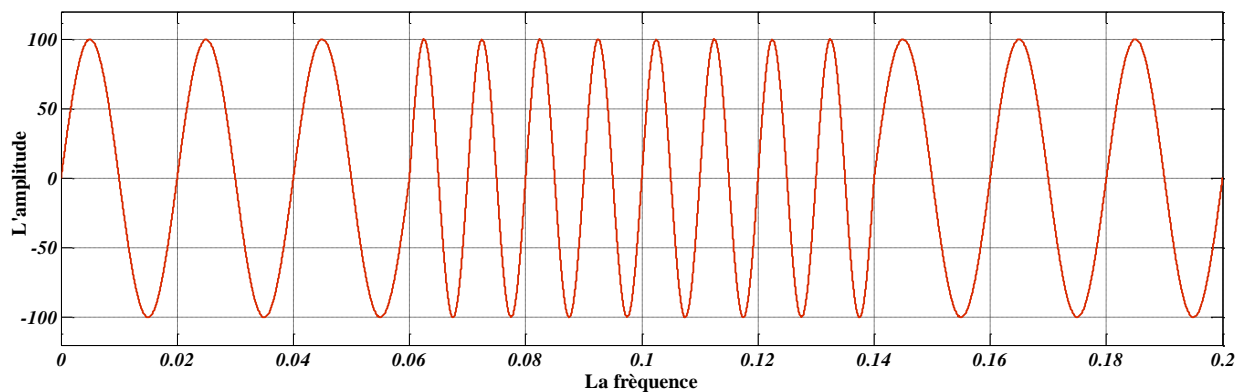
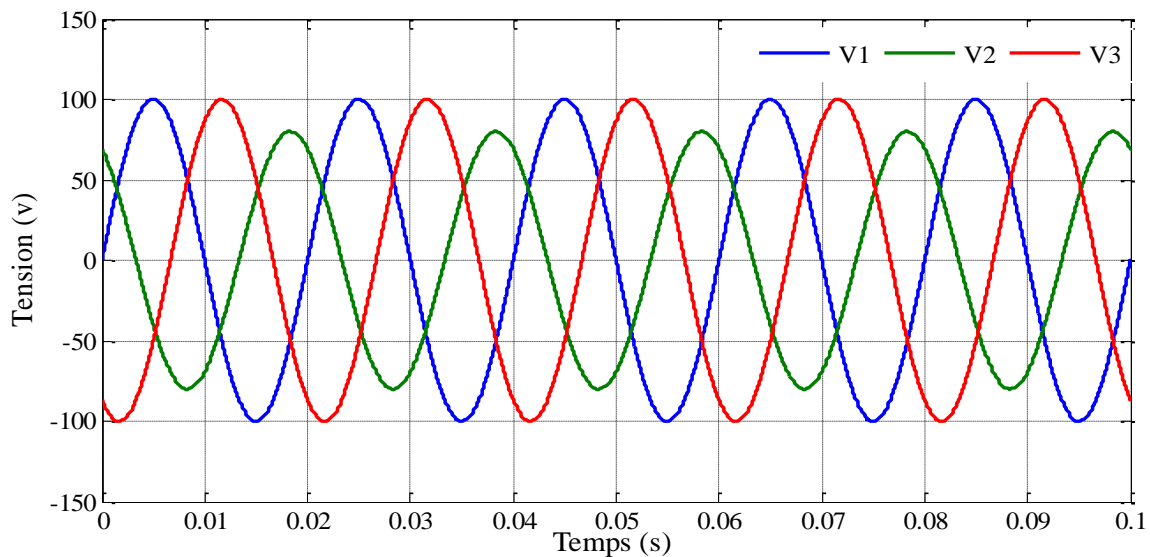


Figure I.4. Variation de fréquence.

### I.2.3.4. Variation de tension

La variation de la tension autour de la valeur nominale est fonction de la structure et de la charge du réseau (longueur des conducteurs et variation de la charge) et des systèmes régulateurs du réseau public (privé). En Europe, la norme indique qu'en exploitation normale, pour chaque période d'une semaine, 95% des valeurs efficaces moyennées sur 10 minutes doivent se situer dans une plage de tension  $U_n \pm 10\%$ .

Dans les pays en voie de développement, il est possible d'observer fréquemment des variations plus fortes que  $\pm 20\%$  [24].



**Figure I.5.** Déséquilibre de tension.

#### **I.2.3.5. Les surtensions**

Les gestionnaires de réseau avec respect les normes internationales sont déterminés de gabarits de variation de la tension nominale de l'ordre de 10% alors que l'on trouve un essai ou des phénomènes externes de réseau comme la foudre donc l'amplitude de tension est variée et dépasse le pourcentage de norme le réseau perturbé.

##### **I. 2.3.5.1. Surtensions de manœuvre**

Ce sont des surtensions dues aux manœuvres effectuées sur le réseau MT comme le déclenchement d'un transformateur ou l'enclenchement d'une batterie de condensateur.

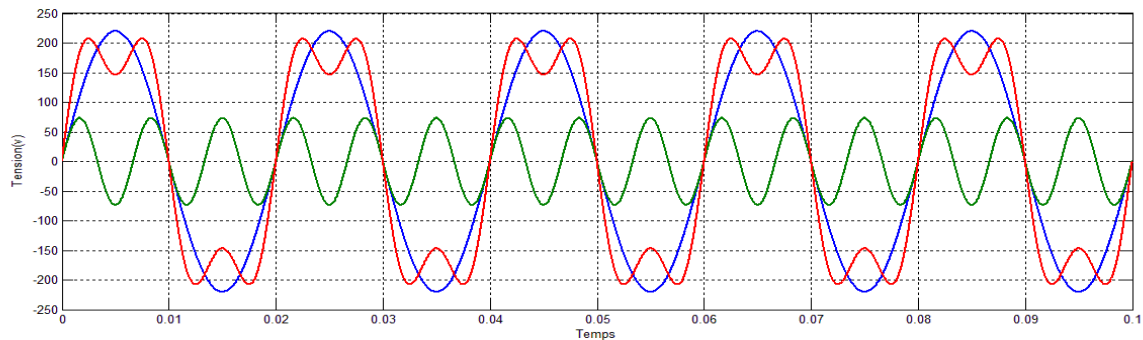
##### **I. 2.3.5.2. Surtensions atmosphériques**

Dans le monde, entre 2000 et 5000 orages sont constamment en formation. Ces orages sont accompagnés de coups de foudre qui constituent un sérieux risque pour les personnes et les matériels. Les éclairs frappent le sol à la moyenne de 30 à 100 coups par seconde, soit 3 milliards de coups de foudre chaque année. Le tableau de la figure I.17 indique les valeurs caractéristiques de foudroiement. Comme il peut être constaté, 50% des coups de foudre sont d'intensité supérieure à 33 kA et 5% d'intensité supérieure à 65 kA. L'énergie transportée par le coup de foudre est donc très élevée [27].

### I.2.3.6. Harmoniques et inter-harmoniques

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entier de celle du fondamental. La figure (I.17) montre la superposition de l'harmonique de rang 3 sur un courant fondamental de fréquence 50 Hz. La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipements de l'électronique de puissance à base de thyristors.

Les inter-harmoniques sont superposées à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau. L'apparition des inter-harmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle-commande [11].



**Figure I.6.** Le fondamental avec signal harmonique.

➤ Des charges industrielles

- Equipements d'électronique de puissance : redresseurs, onduleurs ;
- Charges utilisant l'arc électrique : machine à souder, éclairage (tube fluorescents), four à arc.
- Le bruit des appareils électriques provenant principalement de la magnétostriction.

➤ Des charges domestiques

- les onduleurs, Munie de convertisseurs ou d'alimentation à découpage est nécessaire pour transformer le courant alternatif du réseau en courant continu : four à micro-onde, ordinateur, imprimante, téléviseur, L'éclairage, plaque à induction et les variateurs (gradateurs), est une autre source d'harmoniques.
- Des moteurs électrique et les circuit magnétique de transformateurs électrique.

### **I.3. Solutions pour améliorer la QEE**

L'étude de QEE est très importée pour la continuité des systèmes électrique, les perturbations que trouve en réseau électrique sont des phénomènes impactés sur le rendement et faire des pannes sur le matérielles ; les entreprises et les utilisateurs d'énergie électrique sont étude basée sur l'amélioration de QEE et les méthodes pour évite les perturbations parce que le cout économique importe alors chaque charge dans le système est liée avec le produit.

Il existe deux possibilités pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, l'une est appelée conditionnement de la charge qui consiste à rendre les équipements du processus industriel moins sensibles aux problèmes de la qualité de l'énergie, en leur permettant ainsi de les surmonter, l'autre possibilité réside dans l'installation d'un dispositif de conditionnement capable de minimiser ou empêcher les perturbations provenant du réseau [13].

#### **I.3.1. Déséquilibre du Système Triphasé**

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension résultent généralement des charges monophasées et biphasées mal réparties, le système de distribution électrique peut être équilibré en changeant la configuration du système par des opérations manuelles et automatiques de commutation d'alimentation pour transférer des charges entre les circuits [10]. Dans les points de raccordement de réseau avec l'autre au bien réseau HT contenue des points de diviseur de courant vers des consommateurs ou poste d'interconnexion le système triphasé est déséquilibre en leur amplitude, fréquence et le déphasage.

#### **I.3.2. Creux de tension**

Les creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines Installations industrielles et tertiaires.

Pour les creux de courte durée, peu profondes, ils peuvent être atténués par l'amélioration des caractéristiques de la tolérance d'équipements, pour les creux de longue durée, ils peuvent être évités par le changement et/ou le fonctionnement de la structure de système d'alimentation. Une autre solution consiste à étendre un convertisseur électronique de puissance, utilisé pour connecter un système de grille de production décentralisée, avec un compensateur série [7].

Le compensateur série est capable de restaurer la tension au niveau du côté de la charge en cas de chute de tension [10].

### **I.3.3. Fluctuations de la Tension**

Pour les fluctuations de la tension, Nous vous proposons différents dispositifs et des solutions permettant d'éviter ses désagréments et de contrebalancer les variations pour garantir une stabilité de votre réseau et diminuer ainsi votre facture d'énergie.

#### **I.3.3.1. Installation d'équipements correcteurs**

Il est possible de compenser les fluctuations du réseau grâce à des éléments correcteurs permettant de maintenir une qualité d'énergie constante. En plaçant par exemple une batterie de condensateur de taille adéquate, la consommation d'énergie réactive d'électricité entraînée par les appareillages inductifs est diminuée, avec le même effet sur votre facture.

#### **I.3.3.2. Approvisionnement permanent en énergie garanti**

Les systems UPS (Uninterruptible Power Supply) sont des dispositives qui Assurant une alimentation électrique continue même en cas de fluctuations, de microcoupures ou de panne de courant. Ils sont composés d'un générateur, d'un system de stockage d'énergie dynamique, d'un moteur diesel et éliminent également les perturbations du réseau. Leur autonomie peut aller jusqu'à 24 h et même au-delà et leur fonctionnement est entièrement automatisé. Découvrez tous les avantages du processus en téléchargeant notre brochure UPS.

#### **I.3.3.3. Des solutions dans l'usage domestique**

Les solutions consistent à changer le mode d'éclairage ; installer des alimentations sans interruption ; modifier le perturbateur (le changement du mode de démarrage des moteurs à démarrages fréquents permet par exemple de réduire les surintensités), augmenter la puissance de court-circuit ; éloigner électriquement la charge perturbatrice des circuits d'éclairage [21].

### **I.3.4. Dépollution des Harmoniques**

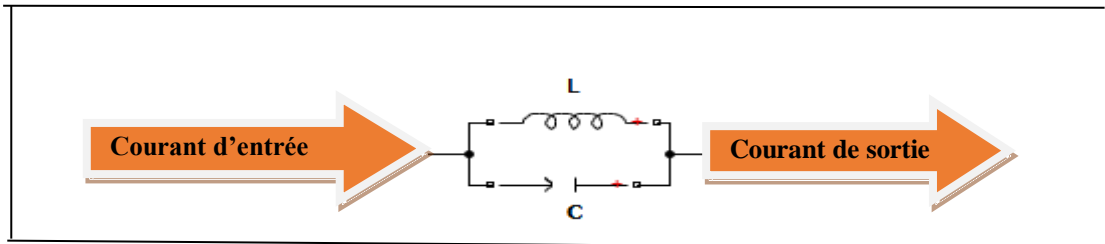
Les systèmes d'électronique de puissance utilisée pour l'amélioration de la qualité de l'énergie sont essentiellement des systèmes de compensation. Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques moins ou peu polluants, tandis que la seconde consiste en la mise en œuvre d'un filtrage des composantes harmoniques. La première classe de solutions s'intéresse à la conception tandis que la seconde consiste à compenser les courants ou les tensions harmoniques [22]. On a cité deux solution :

#### **I.3.4.1 Solutions traditionnelles**

- L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation des convertisseurs peu Polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique.
- L'utilisation de dispositif du filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par

Les charges non-linéaires.

- Filtre passif série : Depuis le filtre passif série est accordé sur une fréquence particulière, il offre une impédance élevée à sa seule fréquence d'accord. Selon la propriété physique de L et C choisie, il existe généralement une bande étroite autour de la fréquence d'accord lorsque l'impédance reste élevée.



**Figure I.7.** Filtre passif série.

### **I.3.4.2. Solutions modernes de dépollution**

Les solutions de dépollution traditionnelle ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger, comme nous venons de le décrire précédemment, d'autres solutions modernes ont été proposées. Suite aux effets néfastes, les recherches se sont ré-axées vers d'autres solutions présentant de moindres inconvénients. Alors, grâce au développement qu'a connu la technologie des semi-conducteurs de puissance entièrement commandables (GTO, IGBT, MOSFET ...), ont apparus les convertisseurs AC-DC (redresseur MLI) d'une part, permettant un meilleur contrôle du facteur de puissance et l'atténuation de certains harmoniques basses fréquences [7].

#### **I.3.4.2.1. Filtrage actif**

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal [9]. Les premiers principes du filtrage actif ont été présentés dès le début des années 1970. Les premières familles de filtres actifs parallèles et série (solution adaptée à la compensation des tensions) apparaissent en 1976 et sont réalisés avec des onduleurs à transistors contrôlés en MLI [23].

#### **I.3.4.2.2. Redresseur dodécaphasé**

Leur principe consiste à utiliser un transformateur à deux secondaires délivrant des tensions décalées de  $30^\circ$  entre elles (ou deux transformateurs dont les couplages entre les primaires et les secondaires doivent être couplés différemment (Y/Y et Y/D ou D/D et D/Y). Chacun de ces

secondaires alimentant un redresseur en pont de Grätz. On obtient ainsi un redresseur dit dodécaphasé (pont ayant douze bras) dont les redresseurs sont montés en série.

#### **I.4. Les Perturbations Harmoniques**

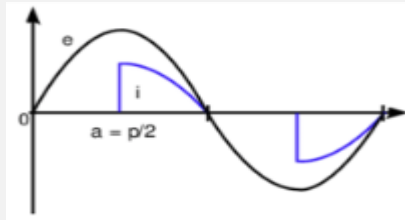
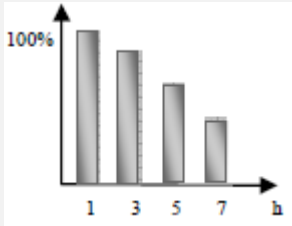
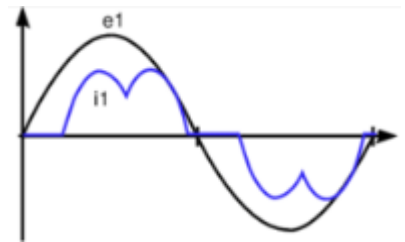
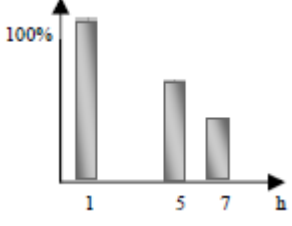
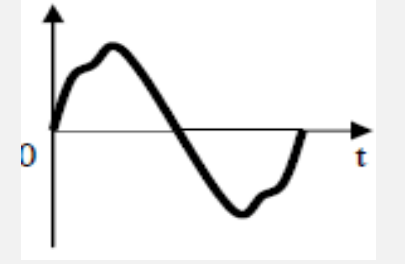
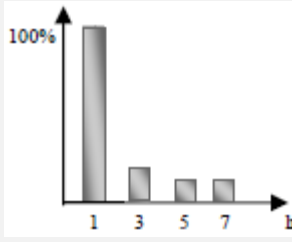
Les harmoniques générées par les charges non linéaires circulent dans les réseaux électriques et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau. Pour les autres équipements électriques connectés en ces points, cette pollution harmonique à des effets néfastes peuvent apparaître instantanément ou se produire en différé, on peut notamment citer la déformation de la tension réseau au point de raccordement alors que le distributeur d'énergie est Tenu de fournir une tension propre. Cette pollution peut également conduire à l'échauffement des câbles et peuvent perturber le fonctionnement normal de certains équipements électriques ou bien encore à l'arrêt soudain de machines tournantes [9].

##### **I.4.1. Sources des harmoniques**

L'utilisation des équipements électriques comportant des convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique. Ils ont contribué à la détérioration de la qualité du Courant et de la tension des réseaux de distribution.

Les principales sources à l'origine des harmoniques sont les appareils d'éclairage fluorescent, les appareillages informatiques, les appareils domestiques (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre), les arcs électriques et tous les convertisseurs statiques raccordés aux réseaux tels que les redresseurs et les onduleurs.

Tous ces systèmes contribuent à la pollution harmonique du réseau auquel ils sont connectés [9]. Le tableau (I.2) montre quelques sources des harmoniques.

Type de charge	Appareille concerné	Courant absorbé	Spectre harmonique correspondront
<b>Gradateur monophasée</b>	-Régulation de puissance de fours à résistances, -Modulation de puissance des lampes halogènes.		
<b>Redresseur triphasée à thyristor</b>	-Variateur de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs synchrones.		
<b>Moteur asynchrone</b>	-Machines-outils, -Appareils électroménagers, -Ascenseur.		

**Tableau I.2.** Quelques sources des perturbations harmoniques.

- ✚ Pour :  $n=1$  → la sinusoïdale est dite fondamentale.
- ✚ Pour :  $n > 1$  → les sinusoïdales sont dites harmoniques d'ordre supérieur.

### I.4.3. Les effets d'harmonique

La présence d'harmoniques de courant ou de tension conduit à des effets néfastes sur le réseau de distribution, comme par exemple :

- ✚ L'échauffement des conducteurs, des câbles, des condensateurs et des machines dû aux pertes cuivre et fer supplémentaires.
- ✚ Le dysfonctionnement de certains équipements électriques comme les dispositifs de commande et de régulation. En présence d'harmoniques, le courant et la tension peuvent changer plusieurs fois de signe au cours d'une demi-période. Par conséquent, les équipements sensibles au passage par zéro de ces grandeurs électriques sont perturbés.
- ✚ Des phénomènes de résonance. Les fréquences de résonance des circuits formés par les inductances du transformateur et les capacités des câbles sont normalement assez élevées,

mais celles peuvent coïncider avec la fréquence d'un harmonique. Dans ce cas, il y aura une amplification importante qui peut détruire les équipements raccordés au réseau.

✚ La dégradation de la précision des appareils de mesure [9].

#### **I.4.3.1. Effet instantané [14]**

- Déclenchements intempestifs des protections ;
- Perturbations induites des systèmes à courants faibles (télécommande, téléviseur, écran d'ordinateur, ) ;
- Vibrations et bruits acoustiques anormaux (tableaux BT, moteurs, transformateurs) ;
- Perte de précision des appareils de mesure.

#### **I.4.3.2. Effet à long terme**

- Une surcharge en courant provoque des échauffements supplémentaires donc un vieillissement prématuré des équipements ;
- Echauffement des transformateurs et des alternateurs (par augmentation des pertes Joule, des pertes fer...) ;
- Fatigue mécanique (couples pulsatiles dans les machines asynchrones,...);
- Echauffement des récepteurs : des conducteurs de phases et du neutre par augmentation des pertes Joule et diélectriques ;
- Destruction de matériels (condensateurs, disjoncteurs, ...) ;
- Rayonnement électromagnétique perturbants les écrans (micro-ordinateur, les appareils de laboratoire, ...) [15].

#### **I.4.4. Conséquences néfastes des harmoniques**

Les harmoniques dans le réseau électrique sont grand perturbation alors pour les entreprises de production d'énergie électrique les harmoniques sont faite la vibration et bruit forte de champ magnétique dans les conducteurs, pour l'alternateur les harmonique danger pour l'arbre de rotor et diminuée le rendement de système.

- **Moteur à courant alternatif** : pertes supplémentaires dans le fer et les enroulements principalement liées aux harmoniques de tension et faire un impact sur le rendement de moteur ;
- **Lignes** : pertes ohmiques supplémentaires comme l'échauffement des câbles et bruit haut ;
- **Transformateurs** : pertes supplémentaires dans les enroulements par effet joule et dans le noyau par courant de Foucault ;
- **Condensateur de puissance** : pertes diélectrique supplémentaires conduisant aux vieillissements rapide du condensateur ;
- **Lignes téléphoniques** : génération des bruits importants liés au couplage électromagnétique entre les lignes de puissance et les circuits de communication [14].

- **Equipement de l'électronique de puissance** : dysfonctionnement lié à la déformation de la tension ;
- **Ordinateurs** : trouble fonctionnels liés à la distorsion de la tension ;
- **Group de production (Alternateur)** : des pannes en l'arbre de rotor ;

Taux de distorsion harmonique en tension	Conséquences d'une exposition à long terme
TDH < 5%	Problèmes inexistant dans la plupart des cas.
5% < TDH < 7%	Des problèmes peuvent survenir sur des matériels, anormalement, sensibles.
7% < TDH < 10%	Des problèmes commencent à apparaître sur des appareils de conception plus robuste.
TDH > 10%	Les effets à long terme sont, pratiquement, certains, Variateurs de vitesse , Alimentation de micro-ordinateur.
TDH > 100 %	Tubes fluorescents

**Tableau I.3.** Le pourcentage des harmoniques en signal et leur conséquence.

#### I.4.5. Caractéristique de la pollution harmonique

Le récepteur d'énergie se comporte comme une charge polluante, s'il absorbe des courants non-sinusoïdaux ou déséquilibrés ou consomme de l'énergie réactive. La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique défini pour la tension ou le courant par rapport à une onde sinusoïdale [16], [17]. Pour connue la quantité des harmoniques dans le système ont utilisée des grandeurs comme THD, taux de distorsion d'harmonique de rang h et facteur de puissance et pourcentage d'harmonique.

##### I.4.5.1. Taux de distorsion d'harmonique THD

Le taux de distorsion global (Total Harmonic Distorsion : THD) s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de signal déformée.

Il est un paramètre qui définit globalement la déformation de la grandeur alternative :

$$THD(\%) = \left( \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} x_{h=2}^2} / x_1 \right) \times 100 \quad (I.4)$$

Certains auteurs emploient les abréviations *THD-G* (**Taux de distorsion harmonique global**) pour la définition par rapport à la valeur efficace du signal de sortie et *THD-F* (**Taux de distorsion harmonique par rapport au fondamental**) pour la définition du taux par rapport à l'harmonique (le fondamental), qui Donne la formule suivante :

$$THD - F = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=H} \left( \frac{Q_h}{Q_1} \right)^2} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=H} Q_h^2}}{Q_1} = \frac{Q_{HM}}{Q_1} \quad (I.5)$$

Où  $Q_h$  est la valeur efficace de l'harmonique au rang  $h$  du courant / de la tension ;  $Q_1$  est celle composante fondamentale ;  $Q_{HM}$  est la valeur efficace des courants ou tensions harmoniques ;  $h$  est le rang harmonique et  $H$  est le rang harmonique maximal, en théorie infini, en pratique, le plus élevé dans la bande passante.

#### I.4.5.2. Taux d'harmonique de rang $h$

Taux d'harmonique de rang  $h$  est défini par :  $S_h = x_h / x_1$

Où :  $x_h$  : la composante harmonique de rang  $h$ .

$x_1$  : la composante fondamentale.

#### I.4.5.3. Facteur de puissance

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

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos(\phi_n)}{\left( \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \right) \cdot \left( \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \right)} \quad (I.6)$$

Où représente la puissance réactive  $Q$ .

$$P = 3 \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos \phi_n \quad (I.7)$$

$$Q = 3 \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin \phi_n \quad (I.8)$$

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

$$D = 3V \sqrt{I_{ch}^2 - I_{ch1}^2} \quad (I.10)$$

$P$  : La puissance active.

$Q$  : La puissance réactive est associée au courant fondamental.

$D$  : La puissance déformante est due aux harmoniques de courant ( $I_{ch}$  est la valeur efficace du courant de la charge et est la valeur efficace du courant fondamental).

L'expression du facteur de puissance peut alors se mettre sous la forme suivante :

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

D'après le diagramme de Fresnel des puissances représentées sur la figure (I.8), le facteur de puissance peut être écrit sous une autre forme :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \theta' \cdot \cos \phi_n \quad (\text{I.12})$$

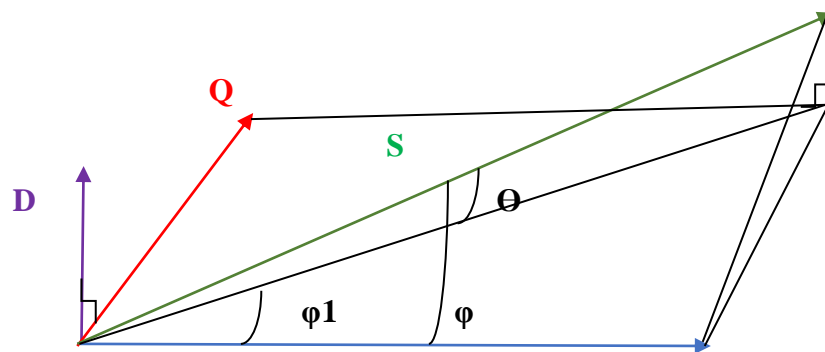


Figure I.8. Diagramme de Fresnel des puissances

#### I.4.5.4. Représentation spectrale

C'est un histogramme donnant l'amplitude de chaque harmonique en fonction du rang. L'amplitude est donnée en valeur relative par rapport au fondamental en un point spécifié. La figure ci-dessous montre un exemple de spectre [19]. Le premier rang est présent signalé fondamental et les autres rangs sont les signaux harmoniques et leur amplitude par rapport le fondamental.

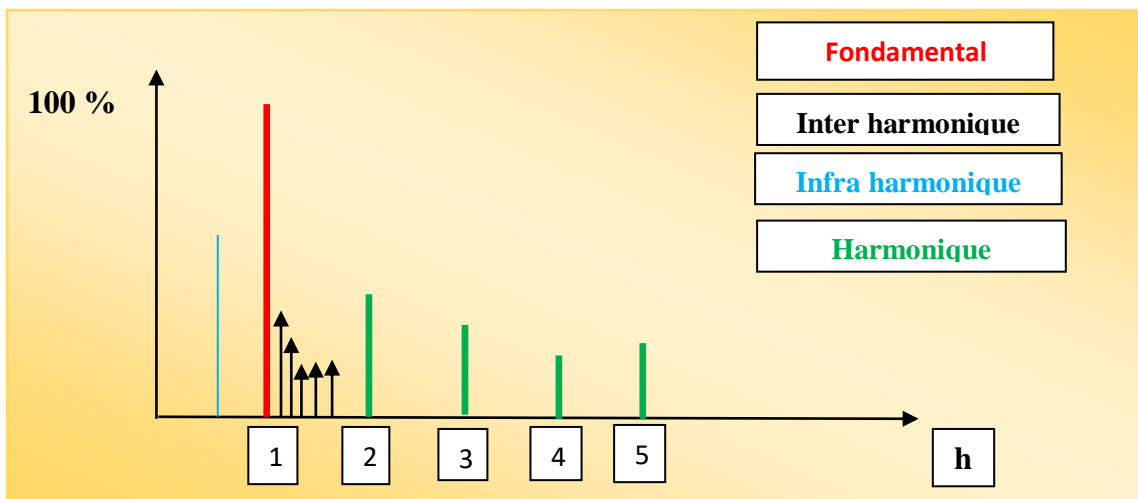


Figure I.9. Spectre harmonique d'un signal.

#### I.4.6. Normes et réglementations

La CEI (*Commission Electrotechnique Internationale*) et l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) sont les deux principaux organismes de normalisation internationaux

dans le domaine de l'électrotechnique. La *CEI* est un organisme officiel composé de comités nationaux de 63 pays, tandis que l'*IEEE* est une association professionnelle. Ces deux organismes réalisent la principale activité de normalisation dans le domaine des perturbations électriques au niveau mondial mais n'ont pas une uniformité de critères en ce qui concerne la définition des interactions entre le réseau et les charges connectées.

Afin de faciliter la connaissance des normes pour chaque domaine, les normes *CEI* qui couvrent tous les domaines de l'électrotechnique sont numérotées et référencées comme par exemple *CEI*

*61000* sur la compatibilité électromagnétique et *CEI 60063* qui définit les séries de valeurs Normalisées pour les résistances et condensateurs [7].

- au niveau international par la CEI.
- au niveau européen par le CENELEC.
- au niveau français, par l'UTE et le CEF.

Le Tableau présente la norme *CEI-1000-3-2* qui fixe la limitation des courants injectés dans un réseau public basse tension pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16 A, Il s'agit là des appareils du domaine domestique. Aussi, du fait de leur puissance, les équipements industriels sont exclus du champ d'application de cette norme [20].

Harmoniques impaires		Harmoniques paires	
Rang	COURANT HARMONIQUE ADMISSIBLE MAXIMAL (A)	Rang	COURANT HARMONIQUE ADMISSIBLE MAXIMAL (A)
3	2.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	8 ≤ h ≤ 40	0.23*8/h
11	0.33		
13	0.21		
15 ≤ h ≤ 39	0.5*15/h		

**Tableau I.4.** Limites des composantes harmoniques en courant [20]

Au niveau international (CEI), les normes *CEI 61000* publiées dans le domaine de la compatibilité électromagnétique (CEM) sont divisées en plusieurs parties, conformément à la structure suivante :

- 1- Généralités,
- 2- Environnement,
- 4- Techniques d'essais et de mesures,
- 5- Guide d'installation et d'atténuation,
- 6- Normes génériques.

Les normes internationales publiées par la CEI dans les domaines de l'électricité et de l'électronique ont pour objectifs de :

- contribuer à la sécurité lors de l'utilisation des produits,
- assurer la qualité des produits,
- faciliter les échanges dans le monde en supprimant les barrières techniques,
- garantir l'interopérabilité des produits et des systèmes,
- contribuer à la protection de l'environnement et à la qualité de vie.

#### **I.4.7. Des solutions pour éviter la pollution d'harmonique sur le réseau électrique**

Afin de dépolluer les réseaux électriques, il Ya plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature, dont le but est de limiter la propagation de perturbation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques. Pour chaque type de perturbation les gestionnaires de réseau appliquent des méthodes pour diminuer et annuler la perturbation, On cas des harmoniques on peut citer :

- Pour éviter les harmoniques on a assuré source d'harmonique comme onduleur pour envoyer les signaux inverse alors la perturbation d'harmonique dans ce cas est détectée.
- Protection des équipements électriques contre les effets néfastes des courants harmoniques.
- L'utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par les charges non-linéaires et protéger les autres équipements.
- L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation des convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique [18].
- Augmenter le facteur de puissance pour diminuer le taux de distorsion d'harmonique.
- Toujours on a vérifié le THD surtout dans les cas d'utilisation des charges non linéaires.
- Les systèmes d'électronique de puissance utilisés pour l'amélioration de la qualité de l'énergie sont essentiellement des systèmes de compensation alors contre les harmoniques dans les réseaux électriques.
- Filtre passif : le plus ancien pour le traitement des harmoniques de courant. Il consiste à piéger les courants harmoniques pour empêcher qu'ils ne se propagent dans le reste du réseau.
- Action sur la structure de l'installation
- Placement d'une inductance de ligne

### **I.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, On a exposé une idée générale sur la qualité d'énergie électrique et sur la notion d'harmoniques, et l'influence de leur dégradation sur le réseau électrique et sur les récepteurs raccordés au réseau de distribution. Ensuite, On a proposé les solutions pour améliorer la qualité d'énergie électrique avec des méthodes différentes. Enfin, On a présenté les perturbations harmoniques en détail et le rôle de filtre actif pour faire l'élimination de cette perturbation.

Les perturbations sur le réseau électrique ont diminué la qualité d'énergie électrique alors pour améliorer le rendement des réseaux électriques on a utilisé soit des dispositifs comme les compensateurs ou le filtrage (FA) ou bien utilise des techniques pour prévoir les variations sur la charge de son réseau par contact des services de météorologique par exemple en été la demande d'électricité est importante, les foudres, dure de vie de sa matérielle...etc.

Puis nous allons mettre en évidence l'importance de différentes structures des filtres actifs : parallèle, série, et leur combinaisons (filtre hybride), en plus, la structure des convertisseurs multiniveaux. Ces topologies peu encombrantes n'occasionnent aucune résonance avec les éléments passifs du réseau et font preuve d'une grande flexibilité. Elles peuvent être installées pour compenser toutes les perturbations de courant telles que les harmoniques, les déséquilibres ainsi que pour compenser la puissance réactive.

***Chapitre II :Les convertisseur multniveau  
et leur commende.***

### II.1. Introduction

Grâce aux progrès technologiques réalisés ces dernières années dans le domaine de l'électronique de puissance, les convertisseurs statiques voient progressivement leur champ d'applications s'élargir. Certaines de ces nouvelles applications, telles que le filtrage actif et la dépollution de réseaux électriques, ou l'alimentation de machines à courant alternatif pour des applications particulières comme le système de production d'énergie éolienne, ou pour améliorer l'énergie électrique produit à base d'énergie solaire, sont très exigeantes en termes de performances dynamiques.

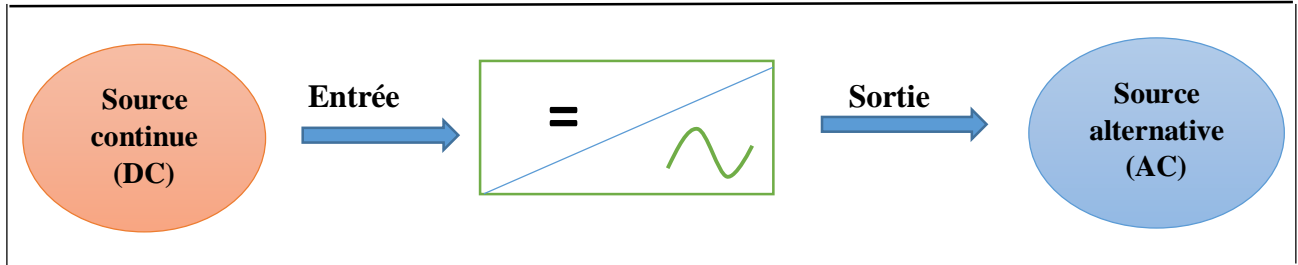
Au début des années 90, l'évolution des propriétés des semi-conducteurs de puissance a stimulé la croissance du marché des convertisseurs dédiés aux applications moyenne et forte puissance allant de quelques kilowatts à plusieurs mégawatts dans la gamme du kilovolt. Cette évolution a influencé principalement le domaine de l'industrie, mais a également eu un impact significatif sur les systèmes de génération d'énergie électrique [28]. La forme d'onde de la tension de sortie des onduleurs multi-niveaux se compose d'un certain nombre de niveaux intermédiaires. Ils sont obtenus à partir de tensions aux bornes de condensateurs. La topologie la plus utilisée est basée sur la connexion en série des onduleurs monophasés à deux niveaux [29] [30] [31]. Pour fournir une tension de sortie acceptable on a contrôlé la tension de condensateur par une alimentation stable et faire un montage économe par profiter le nombre des composants des semi-conducteurs.

Dans ce chapitre, On a présenté la définition de l'onduleur et leur type avec les applications dans le domaine industriel. Ensuite, On a cité les différentes topologies des onduleurs multiniveaux à diode de bouclage NPC, L'onduleur MPC, à condensateur flottant et l'onduleur en cascade avec les états possibles pour chaque bras, ainsi que leur principe de fonctionnement. Nous présentons les techniques de commande des convertisseurs multiniveaux.

### II.2. Définition des onduleurs :

L'onduleur est convertisseur statique et un dispositif d'électronique de puissance utilisé dans certains systèmes électriques pour faire la conversion d'énergie et la protection par coupure l'alimentation. Il est assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). Cette conversion basée sur des composants d'électronique de puissance les semi-conducteurs commande par système de commande organe l'état de l'interrupteur soit ouvert ou fermé par des techniques spéciales avec la complémentarité entre

deux interrupteurs dans un bras pour donner une tension de sortie alternative acceptable avec un fréquence ou amplitude variable Au détriment de type de l'onduleur et leur fonctionnement avec la charge.



**Figurier II.1.** Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC).

### II.2.1. Les types des onduleurs

On a classé les onduleurs en trois grande catégorie autonome, non autonome et intelligent ou hybride. Cette classement Par un jeu de commutations commandées de manière appropriée

#### II.2.1.1. Onduleur autonome

Un onduleur est dit autonome s'il utilise l'énergie d'un circuit auxiliaire propre à lui pour la commutation des thyristors ou l'autre semi-conducteurs dans ce cas nous commandons la fréquence la forme d'onde de la tension de sortie. On distingue deux types d'onduleurs autonomes [32] [33] :

- ✚ Les onduleurs de tension alimentée par une source de tension continue.
- ✚ Les onduleurs de courant alimentés par une source de courant continue.

#### II.2.1.2. Onduleur non autonome

C'est le nom donné au montage redresseur tous les thyristor (pont de Graëtz) qui, en commutation naturelle assistée par le réseau auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur (par exemple par récupération de l'énergie lors des périodes de freinage dans les entraînements à moteurs électriques. À la base du développement des entraînements statiques à vitesse variable pour moteurs à courant continu et alternatif, cyclo convertisseurs, onduleurs de courant pour machines synchrones et asynchrones, jusqu'à des puissances de plusieurs MW [32] [33].

### II.2.1.3. Onduleurs hybrides ou intelligents

Les onduleurs hybrides ou intelligents sont une nouvelle génération dédiée aux applications d'énergie renouvelable pour l'autoconsommation et en particulier pour les panneaux solaires photovoltaïques (onduleur solaire). L'énergie des panneaux solaires photovoltaïques est active seulement pendant la journée et essentiellement lorsque le Soleil est au zénith: elle est donc fluctuante et non synchronisée avec la consommation des habitations. De ce fait, il est nécessaire de :

- ✚ Stocker l'excédent de production avant utilisation.
- ✚ En France métropolitaine, par exemple, il est possible de vendre l'intégralité de sa production à EDF à un tarif préférentiel ce qui évite les contraintes du stockage de l'excédent de production.

### II.2.2. Les applications des onduleurs

Les onduleurs sont des équipements d'électronique de puissance très importants, surtout pour un système avec une fréquence déterminée.

On a Parmi les nombreux domaines d'emploi des onduleurs autonomes, on trouve Principalement Les onduleurs à fréquence fixe à commutation forcée : Alimentés le plus souvent Par une batterie d'accumulateur, ils jouent d'ordinaire le rôle d'alimentation de sécurité, ils Constituent à ce titre, le principe débouclé actuel des onduleurs autonomes [32] [33]. Les onduleurs à fréquence variable à commutation forcée : Alimentés à partir du réseau Industriel par l'intermédiaire d'un montage redresseur, ils délivrent une tension de fréquence et de valeurs efficaces nécessaires pour faire tourner à vitesse variable un moteur à courant alternatif [34].

L'onduleur de secours pour le matériel informatique permet d'assurer la continuité de L'alimentation en cas de coupures sur le réseau, Il permet aussi de filtrer les éventuels défauts de la tension du réseau (parasites ou Surtensions), les nouvelles techniques basées sur le temps de décharge de batterie de micro-ordinateur, L'onduleur est un maillon important dans la sécurité des systèmes informatiques. On a présente certaine application :

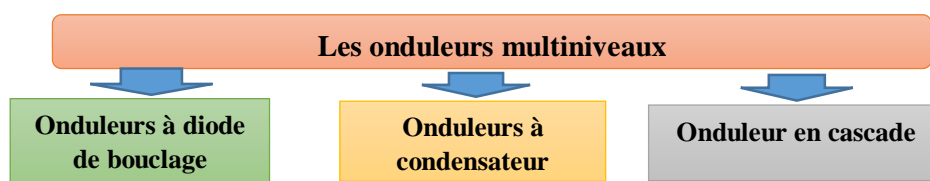
- ✚ Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.
- ✚ Alimentation de secours.
- ✚ Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone.

- ✚ Les générateurs d'ultrasons ou d'électricité utilisés dans le domaine médical.
- ✚ L'alimentation des lampes dites à cathode froide pour le rétro-éclairage des afficheurs à cristaux liquides.
- ✚ Dans le domaine de la soudure à l'arc les onduleurs sont parfois appelés *inverters*, suivant la terminologie anglo-saxonne. Les onduleurs dans les postes à l'arc vont générer un courant alternatif monophasé à moyenne fréquence (entre 5 et 20 kHz), ce qui permet d'utiliser des transformateurs élévateurs de courant nettement plus petits et légers que ceux employés traditionnellement à la fréquence du réseau, soit 50 ou 60 Hz. Dans le domaine de la réception hertzienne nomade TV grand public, les onduleurs (12 V > 230 V) permettent, par exemple, de brancher un téléviseur sur la prise allume-cigare d'une automobile ou d'un camion.

### II.3. Les convertisseurs multiniveaux

#### II.3.1. Intérêt des onduleurs multi-niveaux

Un convertisseur statique est dit « multi niveaux » lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux. Ce type de convertisseur présente essentiellement deux avantages. D'une part les structures multi niveaux permettent de limiter les contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance : chaque composant, lorsqu'il est à l'état bloqué, supporte une fraction d'autant plus faible de la pleine tension continue que le nombre de niveaux est élevé. D'autre part, la tension de sortie délivrée par les convertisseurs multi niveaux présente d'intéressantes qualités spectrales. Le fait de multiplier le nombre de niveaux intermédiaires permet de réduire l'amplitude de chaque front montant ou descendant de la tension de sortie. L'amplitude des raies harmoniques est, par conséquent, d'autant moins élevée. Dans le cas plus précis d'un fonctionnement en modulation de largeur d'impulsion, le recours à un convertisseur multiniveaux associé à une commande judicieuse des composants de puissance permet en outre de supprimer certaines familles de raies harmoniques [35]. La figure (II.2) représente les trois topologies principales des onduleurs multiniveaux les plus récentes.



**Figurier II.2.** Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.

### II.3.2. Fonctions de commutation

Pour chaque interrupteur  $S_{ij}$  ( $i= 1, 2,3$  et  $j= 1, 2$  et  $3$ ) on a défini une fonction de commutation  $F_{ij}$  de la manière suivante :

$$F_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } S_{ij} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } S_{ij} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

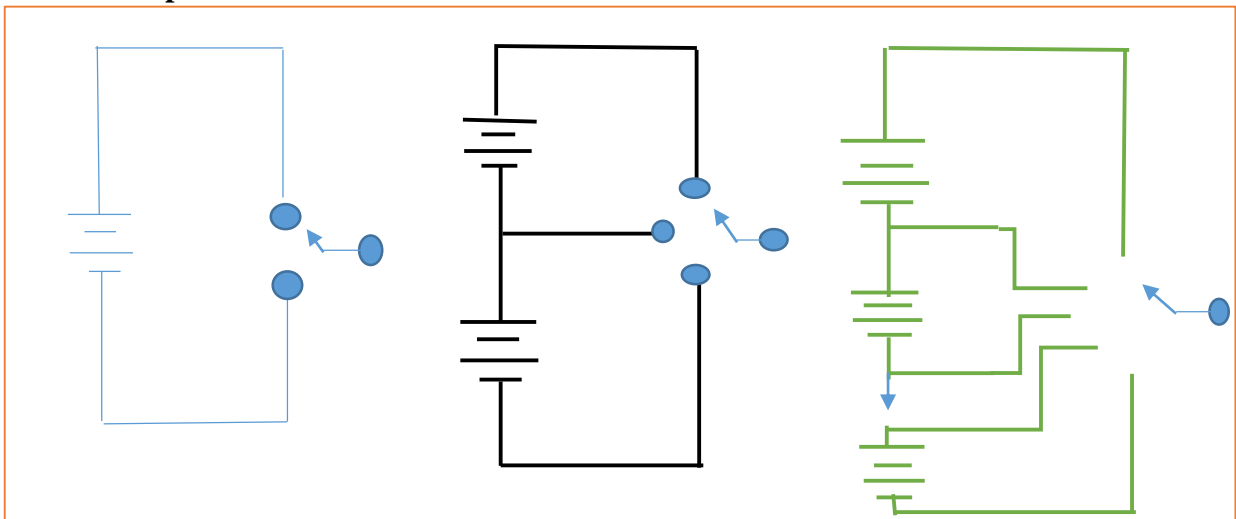
Avec :  $j= 1,2,3$  Indicateur de phase, Numéro de l'interrupteur du bras  $i= 1,2$   $F_{ij}$  = fonction de connexion.

### II.3.3. Commande complémentaire des interrupteurs

Les interrupteurs de chaque bras sont complémentaires :  $F_{ij} = 1 - F_{(i-2)j}$   $i=3,4$   $j=1,2,3$ .

Les onduleurs sont basés sur une structure en pont en H, constituée le plus souvent d'interrupteurs électroniques tels que les IGBT, transistors de puissance ou thyristors. Par un jeu de commutations commandées de manière appropriée (généralement une modulation de largeur d'impulsion), on module la source afin d'obtenir un signal alternatif de fréquence désirée.

### II.3.4. Principe des convertisseurs multiniveaux



Figurier II.3. Principe de convertisseur multiniveaux.

La figure II.9 Peut-être donner une simplification a le travail de convertisseur multiniveaux. Le schéma à gauche représenter le convertisseur de deux niveaux, le schéma ou centre représenter L'onduleur trois niveaux et le schéma à droit représenter l'onduleur de N niveau.

### II.3.5. Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

L'ondeur de tension multi-niveaux possède trois ou plusieurs niveaux. Le but de cette partie est de donner une vue générale des trois topologies de base des onduleurs multi-niveaux, Ils sont utilisables parce que on a produit des tensions différentes, le nombre des tensions est produite dépend le niveau de l'ondeur. Les principales topologies sont :

- ✚ La topologie à diode de bouclage (NPC),
- ✚ La topologie au condensateur flotteur (à cellules imbriquées),
- ✚ La topologie en cascade,

#### II.3.5.1. Onduleur multi niveaux à diode de bouclage (NPC).

La première topologie la plus pratique d'ondeur de tension multi niveaux est le NPC (Neutral Point Clamped). Cette topologie à été initialement proposé par A.Nabac en 1981 pour la génération de N niveaux de tension. La figure II.10 montre un convertisseur NPC trois niveaux ainsi que les séquences de fonctionnement du convertisseur. Afin d'avoir une tension de 220 V,  $L = 3(N-1) (N-2)$ , L est le nombre des diodes. Pour N=5, on a besoin de 36 diodes, cependant ces diodes non seulement augmentent le cout de ce type du convertisseur mais créent un problème d'encombrement. Pour l'obtention d'une tension de N niveaux, N-1 capacités. Les

tensions aux bornes des condensateurs sont toutes égales à  $\frac{E}{(N-1)}$ , E est la tension totale du

bus continu. Chaque couple d'interrupteur (STD, STD') forme une cellule de commutation, les deux interrupteurs sont donc commandés de façon complémentaire. L'objectif était de réduire l'amplitude des harmoniques injectés par l'ondeur dans la charge pour des applications de type alimentation de moteur.

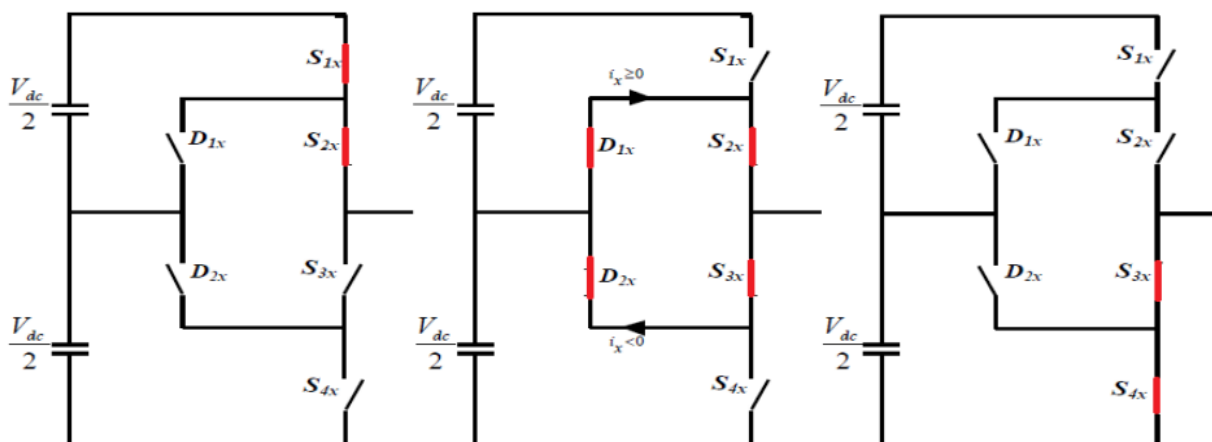


Figure II.4. La tension de première phase d'ondeur NPC trois niveau.

### Les états d'un seul bras de l'onduleur

Les onduleurs multiniveaux sont comportés des bras pour système triphasée il Ya trois bras et le niveau d'onduleur sont calculé par opération mathématique soit par les nombres des condensateurs d'alimentation ou nombre des interrupteurs, Les états possibles d'un seul bras de quatre interrupteurs est de  $2^4 = 16$  états que l'on peut représenter par un quadruplet de 0 et de 1 suivant l'état des interrupteurs  $S_{x1}$   $S_{x2}$   $S_{x3}$  et  $S_{x4}$  L'analyse topologique d'un bras de l'onduleur montre l'existence de quatre configurations possibles, dont une est inutile, c'est là où les deux interrupteurs  $S_{x1}$  et  $S_{x4}$  sont commandés puisqu'elle déconnecte totalement la charge de la source continue. Donc il reste trois états utiles définis comme suit :

**Etat 0:** Les deux interrupteurs du bas  $S_{x3}$  et  $S_{x4}$  sont fermés, tandis que les deux interrupteurs du haut  $S_{x1}$  et  $S_{x2}$  sont ouverts. La tension de sortie par rapport au neutre de la source (o) est  $V_{xo} = -V_{dc}/2$  Si le courant  $i_x$  est négatif, il passera par les deux transistors  $S_{x3}$  et  $S_{x4}$  ou par les deux diodes principales s'il est positif.

Les autres configurations sont à éviter :

- Soit, elles provoquent le court-circuit des sources continues  $U_{c1}$ ,  $U_{c2}$  ou  $V_{dc}$  .
- Soit, elles n'assurent pas la connexion de la charge au point neutre des sources continues.

La correspondance entre les états du bras, les états des interrupteurs et la tension de sortie est résumée au tableau II.1. On définit pour chaque bras (j) trois fonctions de connections, correspondantes au trois états du bras.[48]

$$F_{c1j} = F_{1j} \cdot F_{2j} \quad (\text{II} .2)$$

$$F_{c2j} = F_{2j} \cdot F_{3j} \quad j= 1,2,3 \quad (\text{II} .3)$$

$$F_{c3j} = F_{3j} \cdot F_{4j} \quad (\text{II}.4)$$

**Etat 1 :** Les deux interrupteurs du milieu  $S_{x2}$  et  $S_{x3}$  sont fermés, tandis que les deux interrupteurs des extrémités  $S_{x1}$  et  $S_{x4}$  sont ouverts. La tension de sortie par rapport au neutre de la source (o) est  $V_{xo}=0$  Si le courant  $i_x$  est positif, il passera par le transistor  $S_{x2}$  et la diode de clamp  $D_{x1}$  ou par le transistor  $S_{x3}$  et la diode de clamp  $D_{x2}$  s'il est négatif.

**Etat 2 :** Les deux interrupteurs du haut  $S_{x1}$  et  $S_{x2}$  sont fermés, tandis que les deux interrupteurs du bas  $S_{x3}$  et  $S_{x4}$  sont ouverts. La tension de sortie par rapport au neutre de la source (o) est

$V_{xo}=V_{dc}/2$  Si le courant  $i_x$  est positif, il passera par les deux transistors, ou par les deux diodes antiparallèles s'il est négatif.

Tableau II.1. Etat d'un bras de l'onduleur.

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	$-\frac{V_{dc}}{2}$

Etats de l'onduleur :

Ces 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 (Fig.II.5) 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.

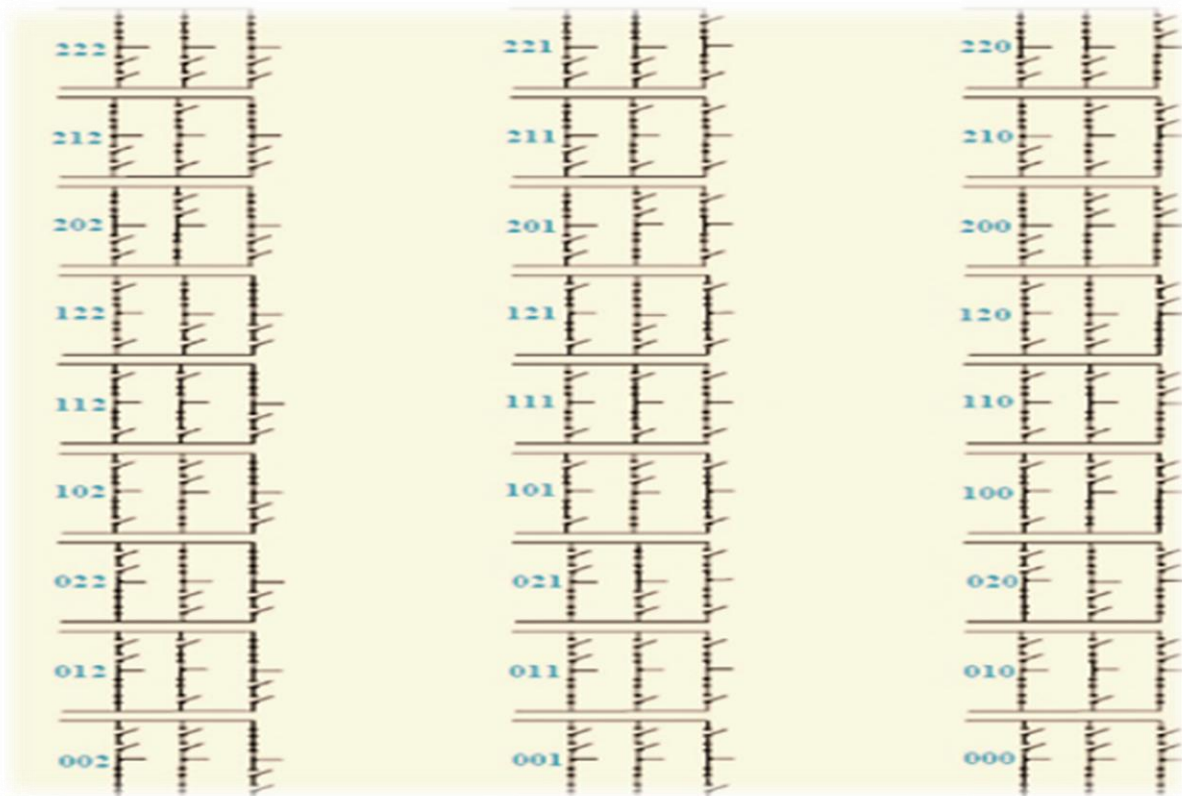


Figure II.5. Etats de l'onduleur.

Tensions de sortie de l'onduleur :

Les tensions de sortie par rapport au point neutre de la source continue (o) sont exprimées par :

$$\begin{pmatrix} V1_o \\ V2_o \\ V3_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Fc_{11} & Fc_{21} & Fc_{31} \\ Fc_{12} & Fc_{22} & Fc_{32} \\ Fc_{13} & Fc_{23} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{V_{dc}}{2} \\ 0 \\ -\frac{V_{dc}}{2} \end{pmatrix} \quad (II.5)$$

A un instant donné, une seule des trois fonctions de connexions des bras prend la valeur 1. Les autres fonctions sont à zéro. Ainsi, on peut avoir trois niveaux de tension pour chacune des tensions  $V1_o$ ,  $V2_o$  et  $V3_o$  ce qui est à l'origine de l'appellation : onduleur à trois niveaux. Les tensions composées entre les phases de la charge sont :

$$\begin{pmatrix} V12 \\ V23 \\ V31 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V1_o & V2_o \\ V2_o & V3_o \\ V3_o & V1_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Fc_{11} - Fc_{12} & Fc_{21} - Fc_{22} & Fc_{31} - Fc_{32} \\ Fc_{12} - Fc_{13} & Fc_{22} - Fc_{23} & Fc_{32} - Fc_{33} \\ Fc_{13} - Fc_{11} & Fc_{23} - Fc_{21} & Fc_{33} - Fc_{31} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{V_{dc}}{2} \\ 0 \\ -\frac{V_{dc}}{2} \end{pmatrix} \quad (II.6)$$

Chaque couple d'interrupteur (STD, STD') forme une cellule de commutation, les deux interrupteurs sont donc commandés de façon complémentaire [35].

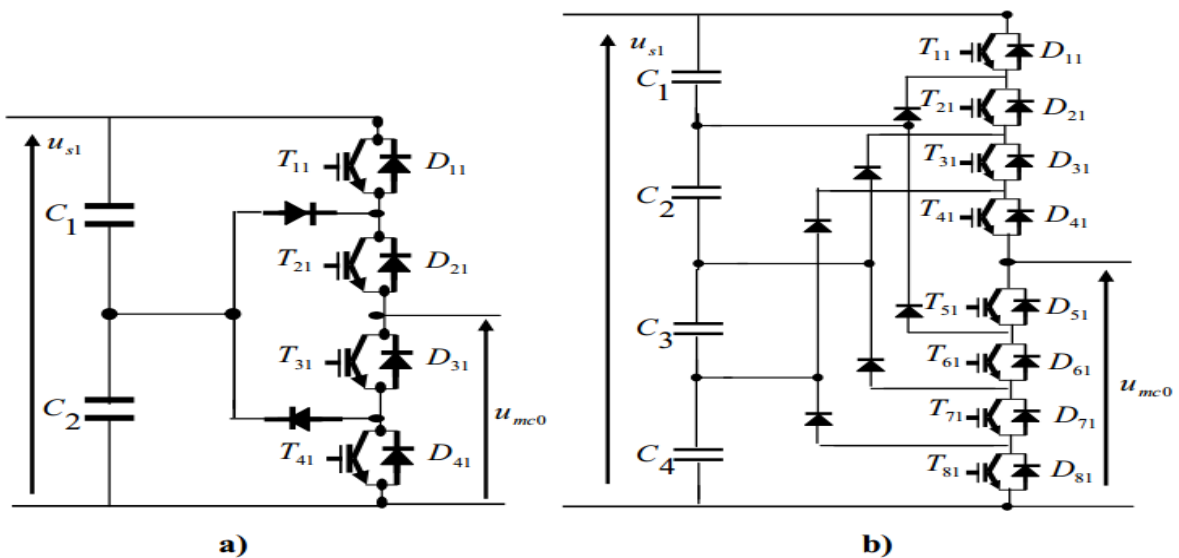


Figure II.6. Structure d'un bras d'onduleur NPC : (a) onduleur trois niveaux (b) onduleur cinq niveaux [38].

### II.3.5.1.1. Onduleur à trois niveaux de type NPC

L'idée de base de l'onduleur NPC est l'obtention d'une tension de sortie à trois niveaux par la superposition de deux interrupteurs élémentaires alimenté chacun par une source de tension continue distincte. Elle est composée de trois bras monophasés [44]. A partir de la source principale de tension continue, et à l'aide d'un diviseur de tension capacitif formé par les condensateurs de filtrage C1 et C2 de même capacité, on obtient deux sources secondaires de tension continue délivrant chacune une demi tension ( $E/2$ ). Cette structure crée alors un point neutre (o) entre les deux condensateurs. Ces derniers sont identiques de manière à éviter le déséquilibre de charge ( $C1=C2$  c'est-à-dire  $UC1=UC2$ ).

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). Une diode en antiparallèle est montée sur chaque interrupteur pour assurer la réversibilité des courants dans la charge. L'onduleur multi-niveaux de type NPC permet d'avoir une tension plus proche de la sinusoïde que celle issue de l'onduleur classique à deux niveaux. Il permet également, par la mise en série des interrupteurs, une meilleure maîtrise des contraintes en tension sur les composants.

Principe de fonctionnement de NPC trois niveau :

Grâce à la symétrie de ces derniers, on considère un seul bras dont la structure est représentée par la figure (II.13).

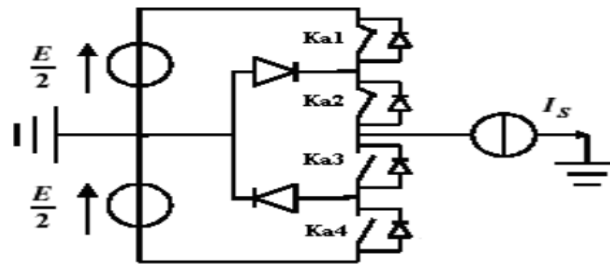


Figure II.7. Bras d'un onduleur NPC à trois niveaux.

Il faut déterminer les valeurs que peut prendre la tension simple  $V_{ao}$  entre la borne (a) de la charge et le point neutre o. Cette tension est entièrement définie par l'état (0 ou 1) des quatre interrupteurs  $K_{a1}$ ,  $K_{a2}$ ,  $K_{a3}$  et  $K_{a4}$  du bras. Sur les  $2^4=16$  configurations possibles, seules trois configurations sont mises en œuvre. Toutes les autres séquences ne sont pas

fonctionnelles, et sont donc à éviter. En effet, elles provoquent, soient, des court-circuit des sources de tension continue, soient, elles provoquent la déconnexion de la charge.

✚ Première configuration {1100}

Ka1, Ka2 sont passants et Ka3, Ka4 sont bloqués (figure (II.8)), on a la valeur de la tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = +E/2 \quad (II.7)$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka3} = V_{Ka4} = +E/2 \quad (II.8)$$

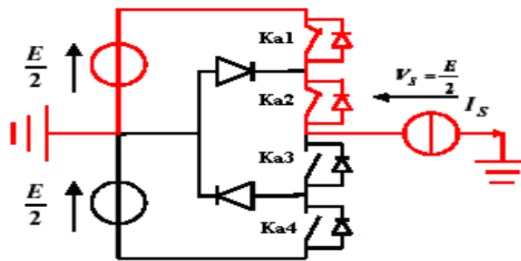


Figure II.8. 1<sup>ère</sup> Configuration du 1er bras.

✚ Deuxième configuration {0110}

Ka2, Ka3 sont passants et Ka1, Ka4 sont bloqués (figure (II.9)), le point a est relié directement au point neutre o. alors, la tension de sortie  $V_{ao}$  est nulle :

$$V_{ao} = 0 \quad (II.9)$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka1} = V_{Ka4} = +E/2 \quad (II.10)$$

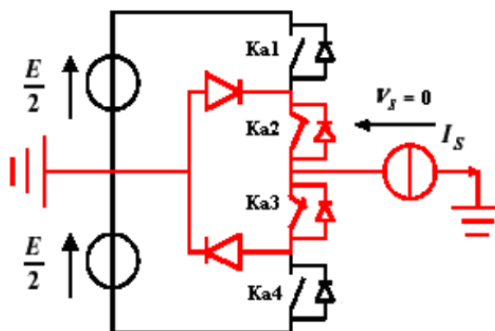


Figure II.9. 2<sup>ème</sup> Configuration du 1<sup>er</sup> bras.

✚ Troisième configuration {0011}

Ka3, Ka4 sont passants et Ka1, Ka2 sont bloqués (figure (III.10)), on a la valeur de la tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = -E/2 \quad (\text{II.11})$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka1} = V_{Ka2} = +E/2 \quad (\text{II.12})$$

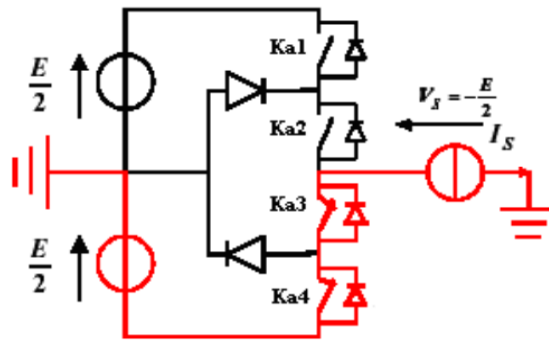


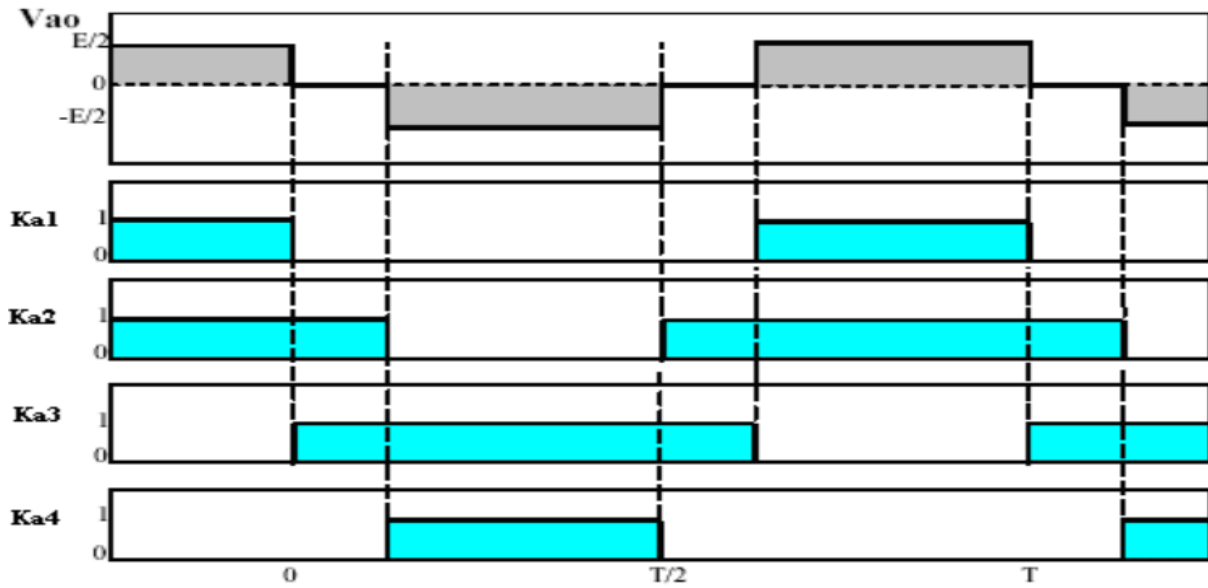
Figure II.10. 3<sup>ème</sup> Configuration du 1er bras.

L'autre les variations du potentiel du point milieu, la tension aux bornes des interrupteurs de puissance n'excède jamais la moitié du bus d'entrée.

Tableau II.2 : Table de commutation de l'onduleur NPC 3 niveaux.

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	$-E/2$

Pour visualiser l'enchaînement des configurations décrites ci-dessus, la figure (II.11) représente les signaux de commande de chaque interrupteur, ainsi que la forme d'onde de la tension de sortie  $V_{ao}$ .



**Figure II.11.** 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. Ainsi que, plus le nombre de niveaux augmente, la tension de sortie en forme d'escalier possède plusieurs paliers. Ceci permet de mieux approcher la sinusoïde.

### II.3.5.1.2. Stratégies de commande de l'onduleur NPC multiniveaux

Les interrupteurs de l'onduleur sont commode par des techniques différents pour induit une tension de sortie désiré vers la charge connecte. L'objectif principal consiste à réinjecter les courants de référence dans le réseau électrique. Cette opération se fait à travers des ordres de commande appliqués aux divers interrupteurs [37]. Et intégral(PI), semble, être suffisante pour obtenir des performances acceptables. C'est pour cette raison que ce travail est plutôt consacré à l'étude des différentes lois de commande pour la boucle interne des courants.

La commande est assure la génération des courants à injecter dans le réseau. Pour un filtre actif parallèle on à faire la commande pour diminue THD de système.

Dans ce paragraphe, Nous présentons les commandes, La commande SVM, La commande MLI et la commande prédictif nouveau technique et la commande hystérésis.

Modulation vectorielle (SVM) :

Représente la méthode de modulation ou de commande la plus adoptée au contrôle des machines à courant alternatif beaucoup plus les machines asynchrones.

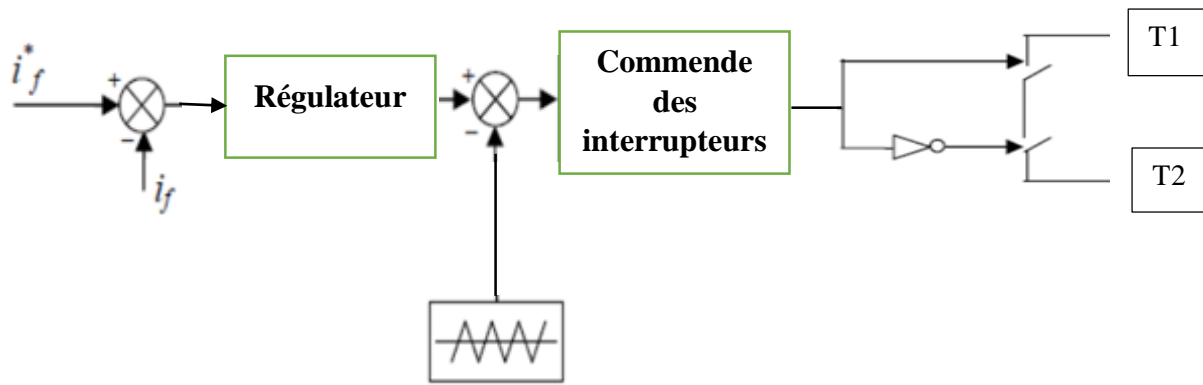
L'utilisation des technologies numériques permet le recours à des stratégies de modulation triphasée spécifiques, non déduites des techniques analogiques initialement conçues en monophasé. Parmi ces technologies numériques on trouve la modulation vectorielle (Space Vector Modulation).

En effet, contrairement à la modulation sinusoïdale, la MLI vectorielle ne s'appuie pas sur des calculs séparés des modulations pour chacun des bras de l'onduleur. Mais elle traite les signaux directement dans le plan diphasé de la transformée de Concordia. Donc le principe de base de cette modulation consiste à reconstruire le vecteur de tension de sortie de l'onduleur à partir des huit vecteurs de tension correspondant aux huit états possibles de l'onduleur de tension [45].

La commande MLI (La modulation de largeur d'impulsion) :

La modulation de largeur d'impulsion MLI (Pulse Width Modulation) consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeur convenable.

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette tension est ensuite comparée avec un signal en dent de scie (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. La modulation de largeur d'impulsion permet de repousser vers des fréquences, élevées les harmoniques de la tension de sortie ; ce qui facilite le filtrage, la multiplication du nombre des impulsions, formant chacune des alternances d'une tension de sortie, faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie. Offre la possibilité de moduler la forme de cette tension et obtenir une forme d'onde approximant de la sinusoïde.



Signale triangulaire (porteuse)

Figure II.12. Le principe de la commande MLI.

### II.3.5.1.3. Régulation de la tension du bus continu

La source d'alimentation du filtre n'est pas une source de tension autonome mais une capacité qui se charge et se décharge. La tension à ses bornes n'est pas constante, d'où la nécessité de réguler la tension du bus continu à un niveau constant, cette régulation doit se faire par l'adjonction de courants actifs ne produisant pas de puissance réactive. La sortie du régulateur

$P_c$  s'ajoute à un signe près, à la puissance active perturbatrice et donne lieu à un courant fondamental actif corrigeant ainsi la tension du bus continu.

Les principales causes susceptibles de modifier cette tension sont :

- L'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante.
- Les pertes de commutation et par conduction des interrupteurs de puissance.
- Les pertes par effet joule dans les composantes passives L et C.
- Les pertes dans le filtre actif.

Régulateur PI :

Le Régulateur Proportionnel-Intégral PI est beaucoup utilisé en raison de sa simplicité d'implémentation et sa possibilité d'obtenir une bonne réponse dynamique, quand ses paramètres sont bien réglés. Le principe de régulateur PI, En agissant avec une force proportionnelle à l'écart entre l'ambiance et la consigne, un écart subsiste en permanence. On décide dès lors que la force d'intervention aura deux composantes. La première, c'est la force proportionnelle à l'écart, comme dans la première solution ci-dessus. Mais une deuxième force

la complète : une force proportionnelle à l'intégration de l'écart dans le temps, c'est-à-dire proportionnelle à la somme de tous les écarts mesurés en permanence.

La relation suivante donne l'expression générale du régulateur PI utilisé dans notre étude :

$$K(p) = \frac{K_p \cdot p + K_1}{p} \quad (\text{II.13})$$

Tell que :

$K_p$  : Gain proportionnel du régulateur

$K_1$  : Gain intégral du régulateur.

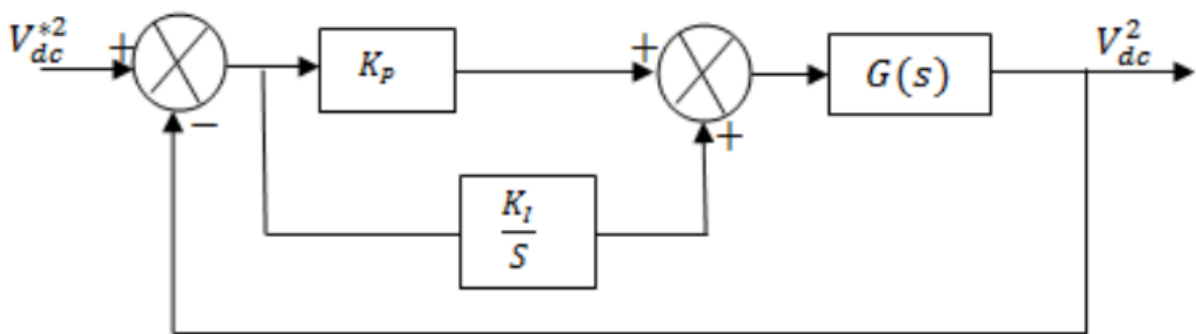
La relation entre la puissance active absorbée par le condensateur et la tension aux bornes de celui-ci s'écrit :

$$P_c = \frac{d\left(\frac{1}{2} C \cdot V_{dc}^2\right)}{dt} \quad (\text{II.14})$$

Soit après la transformation de Laplace :

$$P_p = \frac{1}{2} C \cdot p \cdot V_{dc}^2(p) \quad (\text{II.15})$$

La figure (II.29) présente le schéma de la régulation de  $V_{dc}$  . Le bloc  $G(s)$  est défini par :



**Figure II.13.** Schéma de la régulation de  $V_{dc}$  par un régulateur PI.

Le terme  $G(s)$  de la figure (II.13) a pour expression :

$$G(p) = \frac{2}{C \cdot p} \quad (\text{II.16})$$

Après calcul, la fonction de transfert en boucle fermée est de la forme :

$$F(p) = \frac{\omega_0^2}{p^2 + 2.\xi_c.\omega_0.p + \omega_0^2} \quad (\text{II.17})$$

Un calcul simple en boucle fermée du système de régulation, nous permet de déterminer les paramètres du régulateur PI comme suit :

$$K_1 = \omega_0^2.C \quad \text{Et} \quad K_p = 2.\xi_c.\sqrt{K_1.C} \quad (\text{II.18})$$

Un bon choix de  $\xi_c$  et  $\omega_c$  nous permet d'obtenir des bons résultats.

#### II.3.5.1.4. Les avantages de topologie NPC par rapport les autres topologies des onduleurs multiniveaux

Cette topologie présente plusieurs avantages dans quelques-uns sont énumérés ci-dessous :

- Toutes les phases partagent le même bus continu., cette topologie peut être généralisée et les principes employés dans la topologie d'onduleur à trois niveaux peuvent être étendus pour l'utilisation dans des topologies avec n'importe quel nombre de niveaux.
- La forme d'onde de trois niveaux résultante à une meilleure qualité spectrale par rapport à celle d'un onduleur triphasé classique, ce qui rend les filtres passifs peu volumineux, voire inexistants, Le déséquilibre des tensions aux bornes des condensateurs lors de leur mise en série et la fréquence fondamentale assure un haut rendement.
- Elle est configurable de façon à obtenir un nombre élevé de niveaux, permettant de réduire la tension bloquée par chaque interrupteur ; celle-ci est donnée par  $U_{s1}/(n-1)$ , Où  $U_{s1}$  est la tension totale du bus continu et n est le nombre de niveaux.
- les composants de puissance à semi-conducteur bloquent une tension inverse égale seulement à la moitié de la tension de la source continue.

Cependant, en utilisant cette topologie, l'expérience pratique a révélé plusieurs difficultés techniques qui compliquent ses applications dans le cas des grandes puissances. Ce sont :

- Pour les topologies avec plus de trois niveaux, les diodes de bouclage (clamping diodes) peuvent augmenter les contraintes en tension jusqu'à une valeur égale à  $E(n-1)/n$ , où est le nombre de niveaux.

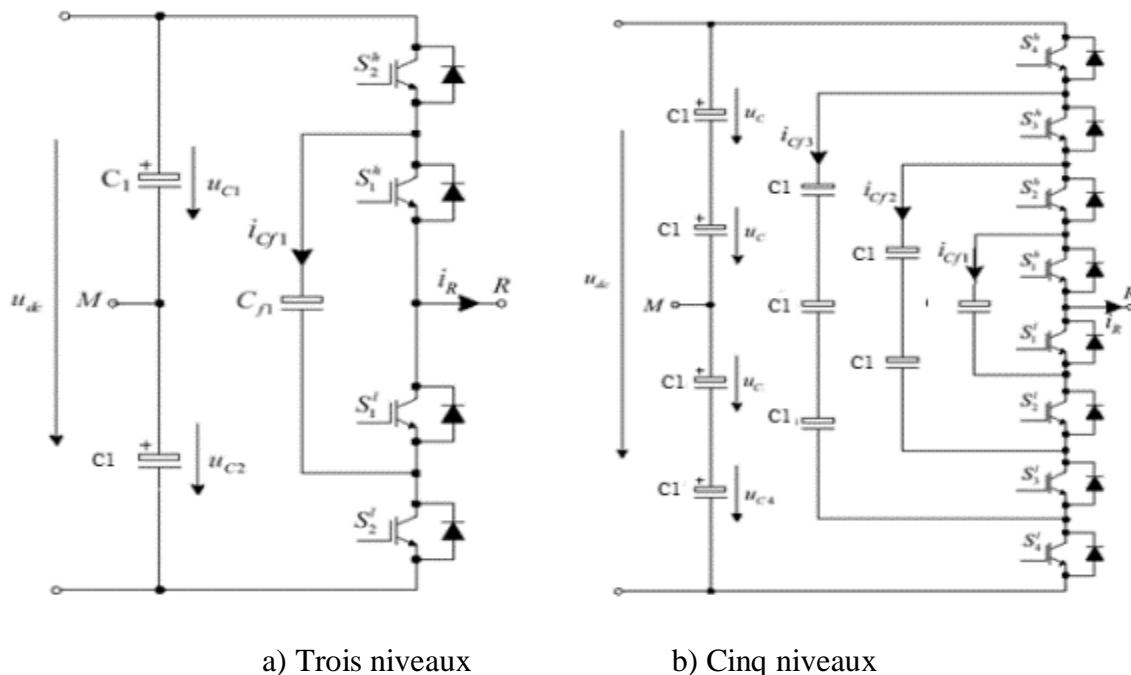
- Lorsque le nombre de niveaux est supérieure à trois, l'équilibrage des tensions aux bornes des condensateurs dévient très complexe, car il est intimement lié au facteur de puissance de la charge.

- Pour plus de trois niveaux, les diodes de blocage (clamping diodes) sont soumises à des tensions directes élevées, donc, une mise en série des diodes est nécessaire ; ce qui complique la conception et pose des problèmes de fiabilité et le coût du montage.

Le sens positif ou négatif des courants  $I_{d0}$  ;  $I_{d1}$  et  $I_{d2}$  . Fixe le sens du transfert de l'énergie du convertisseur. Lorsque la source de tension est génératrice et la charge est réceptrice, le courant passe à travers les transistors. Lorsque le transfert d'énergie s'effectue de la charge vers la source d'entrée, ce sont les diodes antiparallèles qui assurent le passage du courant. Bien que le l'onduleur NPC à trois niveaux fonctionne avec un facteur de puissance élevé, il est employé surtout dans les circuits de compensation. Cela est dû au problème d'équilibrage des capacités.

### II.3.5.2. Onduleur multi niveaux à condensateurs flottants

Cette architecture a été introduite par Meynard et Foch (1992). Dans cette Topologie les deux diodes de calage du convertisseur NPC ont été remplacées par un condensateur, d'où le nom de convertisseur à condensateur flotteur. Les combinaisons de fonctionnement sont les mêmes que pour la topologie NPC [24].



Figurier II.14. Topologie d'onduleur multi niveaux à condensateurs flottants.

### II.3.5.3. Onduleur multi niveaux en cascade

Une des premières applications des connexions en série des topologies des convertisseurs monophasés en pont était pour la stabilisation de plasma en 1988. Sans conteste, les complications et le coût des sources isolées pour chaque pont n'est pas un inconvénient sérieux parce qu'il est compensé par les avantages de la construction modulaire. L'avantage principal de cette approche est que la topologie de ce type d'onduleur facilite la maintenance, en plus elle permet de donner une façon très pratique pour augmenter le nombre de niveaux dans le système [41].

### II.3.6. La stratégie générale pour l'élimination d'harmonique

Le principe de la stratégie d'élimination d'harmoniques consiste à imposer des angles de commutation, ces angles sont choisis de manière à enclencher et éteindre un niveau qu'une seule fois par demi-période, et de telle manière à avoir un taux de distorsion minimal, et d'éliminer les harmoniques dominantes de fréquences plus basses. Cette stratégie consiste à imposer ces instants tel que le spectre d'harmoniques de la tension simple de l'onduleur ne contienne pas (C-1) harmoniques indésirables. Pour cela, il faut d'abord imposer un motif de tension de bras contenant C angles de commutation par le quart de la période afin d'éliminer (C-1) harmoniques. Ensuite, extraire l'expression générale de l'amplitude des harmoniques en fonction de C angles de commutation. Ceci est obtenu par la décomposition en série de Fourier de tension du bras déjà imposée.

La décomposition en série de Fourier de cette tension est donnée par la relation suivante :

$$V_{ao} = \sum_{n=1}^c U_n \cdot \sin(n\omega t) \quad (\text{II.19})$$

$$U_n = \frac{4 \cdot E}{n\pi} \sum_{n=1}^c \cos(n\omega t) \quad (\text{II.20})$$

Un: Amplitude de l'harmonique de rang n (n : impaire).

c : Nombre total de commutations sur un quart de période, C= (N-1)/2.

$\alpha_i$  : Angles de commutation (i=1, 2, .....C). Après intégration, et moyennant quelques calculs, on aboutit à un système algébrique d'équations non linéaires :

$$\left. \begin{aligned}
 & \text{Cos}(\alpha_1) + \text{Cos}(\alpha_2) + \text{Cos}(\alpha_3) + \dots + \text{Cos}(\alpha_n) = (n\pi/4) r. \\
 & \text{Cos}(5\alpha_1) + \text{Cos}(5\alpha_2) + \text{Cos}(5\alpha_3) + \dots + \text{Cos}(5\alpha_i) = 0. \\
 & \text{Cos}(7\alpha_1) + \text{Cos}(7\alpha_2) + \text{Cos}(7\alpha_3) + \dots + \text{Cos}(7\alpha_i) = 0. \\
 & \dots\dots\dots \\
 & \dots\dots\dots \\
 & \text{Cos}(n\alpha_1) + \text{Cos}(n\alpha_2) + \text{Cos}(n\alpha_3) + \dots + \text{Cos}(n\alpha_i) = 0.
 \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.21})$$

$r = U_1/n \cdot E$

$r$  = taux de réglage.

$U_1$  : la valeur maximale désirée de la tension de phase.

$E$  : tension d'entrée de l'onduleur. La solution recherchée doit satisfaire la condition suivante :

$$\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_i$$

Ces angles sont calculés de telle manière à avoir un THD minimal, ce dernier est définis par :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^c \cos(n\alpha_i) \right)^2}}{\sum_{i=1}^c \cos(\alpha_i)} \quad (\text{II.22})$$

### II.3.7. Nombre des composant nécessaire pour les onduleurs multiniveaux.

A l'aide des tableaux suivants, nous comparons le nombre de composants nécessaires pour réaliser une branche d'onduleur, de tension de service et de nombre de niveaux donné, avec les 3 principales topologies d'onduleurs multiniveaux. Les composants sont supposés de taille identique. Tous les onduleurs sont supposés alimentés par une source de tension continue DC, les condensateurs intermédiaires ne sont donc pas comptabilisés pour les onduleurs en pont et pour les onduleurs à cellules imbriquées. Les condensateurs se trouvant à l'étage intermédiaire des onduleurs NPC sont partagés par les différentes phases, leur nombre est donc divisé par le nombre de branches. L'onduleur en pont est ajouté à la liste comme base de comparaison :  $m$  transistors sont mis en série pour former les macro-interrupteurs utilisés. Pour le cas le plus simple permettant d'obtenir 3 niveaux par branche, nous obtenons :

Tell que :

- $m$  : le nombre d'étages ou de cellules.
- $b$  : le nombre de branches, 2 en monophasés, 3 en triphasé.

- T : le nombre de transistors.
- D : le nombre de diodes.
- C : le nombre de condensateurs,
- n : nombre de niveaux obtenus,
- NE : nombre d'états de commutation,

**Tableau II.3.** Les composantes nécessaires pour les différentes topologies de l'onduleur (m+1 niveaux).

Topologie	m	T	D	C	n	$N_E$
NPC	m	2m	$m^2 + m$	$\frac{2m}{b}$	m+1	m+1
Cellule imbriquées	m	2m	2m	$\frac{m^2 - m}{2}$	m+1	$2^m$
Cascade	m	2m	2m	m	m+1	$3^{\frac{m}{2}}$
Pont simple	m	2m	2m	0	2	2

**Tableau II.4.** Les composantes nécessaires pour les différentes topologies de l'onduleur (5 niveaux).

Topologie	m	T	D	C	n	$N_E$
NPC	4	8	20	$\frac{4}{b}$	5	5
Cellule imbriquées	4	8	8	3	5	16
Cascade	4	8	8	2	5	9
Pont simple	4	8	8	0	2	2

**Tableau II.5.** Les composantes nécessaires pour les différentes topologies de l'onduleur (7 niveaux).

Topologie	m	T	D	C	n	$N_E$
NPC	6	12	56	$\frac{6}{b}$	7	7
Cellule imbriquées	6	12	12	6	7	64
Cascade	6	12	12	3	7	27
Pont simple	6	12	12	0	2	2

Pour les applications triphasées et pour un petit nombre de niveaux, les onduleurs NPC sont intéressants, car les condensateurs sont partagés par les différentes branches, ce qui permet un Lorsque le convertisseur doit échanger de l'énergie entre une source continue et une source alternative, il faut munir le convertisseur à cellules en cascade d'autant d'alimentations isolées les unes des autres qu'il y a de cellules.

Pour une solution non-réversible en puissance, cela signifie l'ajout de  $m/2$  transformateurs triphasés à fréquence du réseau et autant de redresseurs, soit approximativement  $4m$  diodes La charge des 6 diodes est équivalente à celle des 4 transistors.

**Tableau II.6.** Comparatif pour les différentes topologies est alors modifié comme suit :

Topologie	m	T	D	C	n	$N_E$	Autre comp.
NPC	m	2m	$m^2 + m$	$\frac{2m}{b}$	m+1	m+1	
Cellule imbriquées	m	2m	2m	$\frac{m^2 - m}{2}$	m+1	$2^m$	
Cascade	m	2m	4m	m	m+1	$\frac{m}{3^2}$	$\frac{m}{2}$ transfo b.f
Pont simple	m	2m	2m	0	2	2	

Le convertisseur réversible en puissance nécessaire à l'alimentation des cellules de l'onduleur cascadié requiert  $m/2$  transformateurs moyenne ou haute fréquence Ou éventuellement un seul avec de multiples enroulements, et  $m/2$  convertisseurs AC-DC soit  $4m$  transistors et  $4m$  diodes. Le nombre de composants actifs est triplé. Le tableau comparatif est modifié comme suit :

**Tableau II.7.** Comparatif est alors modifié comme suit :

Topologie	<b>m</b>	<b>T</b>	<b>D</b>	<b>C</b>	<b>n</b>	$N_E$	Autre comp.
NPC	m	2m	$m^2 + m$	2m	m+1	m+1	
Cellule imbriquées	m	2m	2m	$\frac{m^2 - m}{2}$	m+1	$2^m$	
Cascade	m	6m	6m	m	m+1	$3^{\frac{m}{2}}$	$\frac{m}{2}$ transfo b.f
Pont simple	m	2m	2m	0	2	2	

Cette première comparaison basée sur le nombre de composants de l'onduleur permet de tirer quelques conclusions et de séparer les champs d'applications de ces différents convertisseurs. L'onduleur multiniveaux sont utilisée à base de la demande ou la charge, chaque topologie est différente à l'autre par les nombre ou la nature de composant et la tension gainerie à la sortie.

### II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, On a présente généralité sur le l'onduleur et étudie les déférente type avec les applications de cette équipement, nous avons passé en revue les principales structures multiniveaux que nous avons comparées du point de vue de leur structure, et on a étudié différentes stratégies de commande des onduleurs de tension triphasés multiniveaux à structure NPC.

Les onduleurs NPC sont intéressants pour les applications triphasées nécessitant peu de niveaux. L'énergie stockée à l'étage intermédiaire peut être réduite. Les structures permettant une conversion directe, telles que NPC, est avantageuses pour les applications avec échange de puissance active, la commande prédictive à base d'un modèle NPC est souvent utilisé dans des applications de commande de courant des onduleurs, Il est applicable dans les repère fixe et tournant pour des applications diverses telles que le filtrage actif parallèle et série, les systèmes connectés au réseau et des sources d'alimentation sans interruption. La technique de commande est importée pour faire bon filtrage active tell que la diminution d'harmonique (THD) et liée avec les signaux inverse présente par l'onduleur.

***Chapitre III :Le filtrage actif par les  
onduleurs mutniveau de type NPC.***

### III.1. Introduction

Aujourd'hui, la situation au niveau des réseaux d'énergie électrique est devenue très préoccupante, la qualité du courant dans les installations électriques se dégrade incontestablement. Elle devient donc une préoccupation importante pour les distributeurs de cette énergie et pour leurs clients. Cette dégradation découle directement de la prolifération des charges qui consomment un courant non sinusoïdal, appelées « charges non linéaires ». Ce type de charge est utilisé pour assurer la conversion, la variation et la régulation du courant électrique dans les installations commerciales, industrielles et résidentielles [49].

Ensuite, Les charges non linéaires sont très importantes dans les systèmes électriques mais ils produisent les signaux d'harmoniques en réseau électrique alors perturbent le système et diminuent leur rendement.

Les gestionnaires de réseau utilisent des solutions pour stabiliser le système, le filtrage actif est une solution disponible pour éliminer les harmoniques et par des dispositifs adaptés et réglables comme les onduleurs multiniveaux ; les développements récents dans la technologie de l'électronique de puissance apportent une capacité sans précédent de compensation et de correction de la distorsion harmonique générée par les charges non linéaires en utilisant un compensateur actif parallèle, permettant de dépolluer les réseaux électriques.

Dans ce chapitre, On présente la définition de filtre actif et leur type puis les avantages et l'inconvénient de ce système par rapport au module passif, avec étude du filtre actif parallèle en détail. Ensuite, Nous allons définir le filtre passif.

Enfin, On a déterminé et étudié la partie puissance et la partie commande de filtre actif parallèle.

### III.2. Les filtres actifs

Pour fournir aux consommateurs une énergie électrique de qualité, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions de dépollution des réseaux électriques. Le but de ces filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal.

Les besoins en termes de dépollution harmonique sont divers, parce qu'on espère toujours garantir :

- ✓ La non pollution d'un réseau propre alimentant une charge sensible.
- ✓ Le bon fonctionnement d'une charge sensible dans un environnement pollué.

Dans la suite, différentes topologies de filtres actifs usuels sont présentées :

#### a) Filtre actif série (F.A.S)

Il est destiné à protéger les installations sensibles aux perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques en tension, les surtensions, ... etc. Dans cette configuration, le filtre est placé en série sur le réseau. Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension réseau est une onde sinusoïdale.

#### b) Filtrage actif parallèle (F.A.P)

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Comme La figure (III.2). Le filtre actif parallèle est divisé en deux types :

##### ❖ Filtre compensateur de courant

Le filtre actif parallèle compensateur de courant, injecte un courant ( $I_f$ ) qui s'oppose au Courant harmonique émis par la charge ( $i_{ch-h}$ ) Le courant ( $I_s$ ) est alors sinusoïdal.

S'il y a peu de tensions harmoniques préexistantes coté source, on obtient une tension coté charge sinusoïdale puisque la chute de tension harmonique dans l'impédance du réseau est nulle [7]. L'ensemble charge/filtre se présente comme une charge qui n'absorbe qu'un courant sinusoïdale.

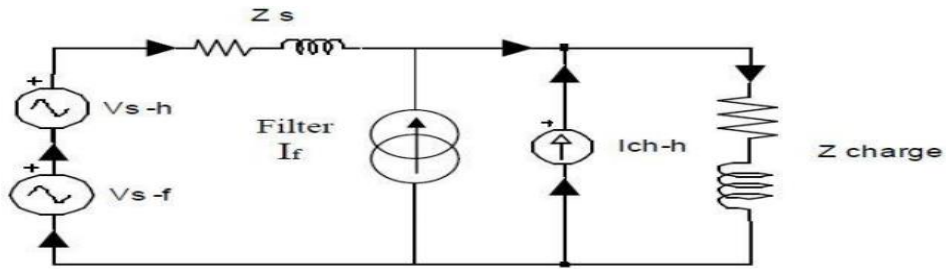


Figure III.1. Filtre actif parallèle (compensateur de courant) [23].

❖ Filtre compensateur de tension

Cette stratégie de filtrage convient lorsque l'impédance ( $Z_s$ ) est suffisamment grande. En effet le dimensionnement en courant du filtre actif dépende du rapport  $(V_{ch-h})/Z_s$ .

La figure (III.2) apparaît le synoptique d'un filtre actif parallèle.

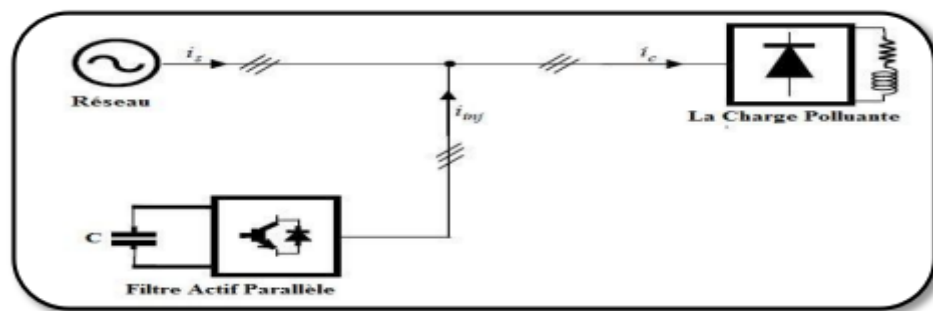


Figure III.2. La structure du filtre actif parallèle [13].

Tableau III.1. Comparaison entre le filtre actif parallèle et le filtre actif série [23].

	Filtre actif parallèle	Filtre actif série
<b>Circuit de puissance du filtre actif.</b>	Onduleur de tension à MLI avec boucle de courant	Onduleur de tension à MLI sans boucle de courant
<b>Filtre actif fonctionnent comme</b>	Source de courant $i_{af}$	Source de tension $V_{af}$
<b>Type de charge non linéaire</b>	Redresseurs à diodes ou à Thyristors à charge inductive et cyclo convertisseurs	Redresseurs à diodes à Charge capacitive au coté continue
<b>Fonction additionnelle</b>	Compensation de la puissance réactive	Régulation de la tension Alternative

c) La combinaison parallèle-série actif (UPQC)

D'après ce qui précède, ni l'un ni l'autre des deux types de filtre actif n'est capable de réaliser un filtrage complet donnant une tension sinusoïdale côté charge et un courant côté réseau exempt d'harmonique. Comme le montre la figure (III.3). Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallèle-série actifs ou Unified Power Quality Conditioner (UPQC). [13].

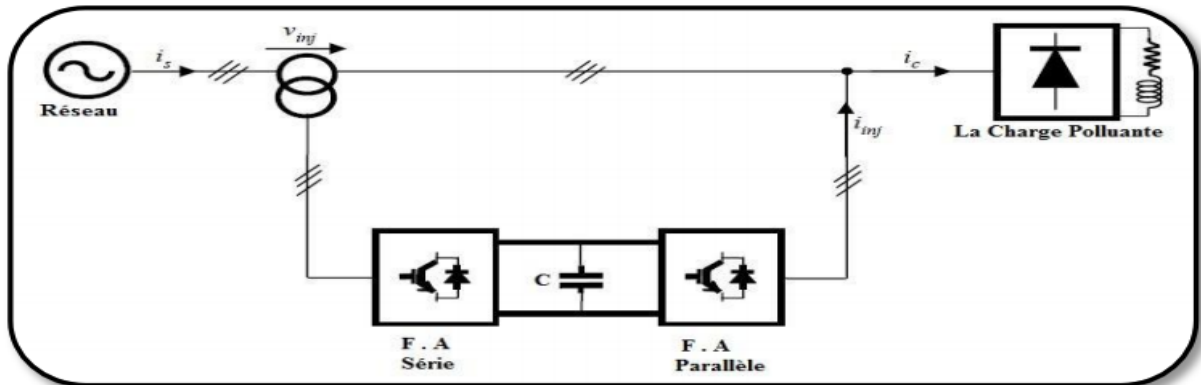


Figure III.3. Filtre combiné parallèle - série (UPQC) [13].

III.3. Les avantages et les inconvénients du filtre actif

Les avantages de filtre actif :

- \* Il est insensible à la variation des caractéristiques du réseau.
- \* Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau.
- \* Il n'y a aucun risque de surcharge lorsque le niveau de pollution harmonique à compenser dépasse le dimensionnement du filtre actif, puisqu'il fonctionne au maximum de ses capacités et tout risque de destruction est écarté.
- \* Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques (dans la limite de sa bande passante).
- \* La compensation de la puissance réactive est envisageable.

Toutefois, le filtrage actif présente quelques inconvénients :

- \* Il permet la compensation de l'énergie réactive, mais à un coût très élevé par rapport au filtrage passif. Le filtrage actif n'est possible que dans le cas des réseaux de faible puissance.
- \* Son coût est beaucoup plus élevé que celui du filtre passif.

### III.4. Filtre actif multi-niveaux

De nombreuses configurations possibles des filtres actifs à base d'onduleur multi-niveaux ont été étudiées dans la littérature. Les onduleurs multi-niveaux présentent comme principal avantage la réduction des contraintes en tension sur les interrupteurs de puissance [13].

Pour les applications de filtrage actif, ces topologies ont donc été sujets de recherche très tôt avec la topologie NPC. De nombreuses publications concernent. Les applications multi-niveaux avec les différentes topologies NPC, multicellulaire, ou à convertisseurs imbriqués.

### III.5. Les filtres passifs

Le filtrage passif se fait par la mise en parallèle avec l'impédance du réseau d'un circuit de très faible impédance devant l'impédance du réseau à la fréquence de l'harmonique que l'on veut éliminer, le courant choisit le chemin le moins résistant et de ce fait l'harmonique pour lequel le filtre a été dimensionné, sera dévié à travers ce dernier. Le facteur de qualité, le rapport de la résistance ou de la capacitance résonante par rapport à la résistance du filtre, que détermine la précision de l'accord doit être assez élevé, supérieur à 50, toutefois la bande passante étant inversement proportionnel au facteur de qualité, de forte valeur de ce dernier peut être gênante dans le cas d'un filtre même légèrement désaccordé.

Les types de filtre passif :

- Filtre passif série : Comme un résistance et inductance en série.
- Filtre passif parallèle : Comme un résistance et inductance en parallèle.

### III.6. Les avantages des filtres actifs par rapport aux filtres passifs

- \* la capacité de filtrage est supérieure.
- \* la flexibilité, adaptabilité sont très supérieures et le volume physique du filtre est plus réduit.

Avec, ils possèdent aussi quelques inconvénients :

- \* les pertes sont légèrement plus élevées.
- \* leur coût élevé a limité leur implantation dans l'industrie.
- \* l'absence de réglementation spécifique n'incite pas leur intégration.

### III.7. Comparaison entre le filtre actif et le filtre passif

	<b>Filtre actif</b>	<b>Filtre passif</b>
<b>Action sur les courants Harmoniques</b>	Agit simultanément sur plusieurs fréquences	Nécessite un filtre pour chaque fréquence (encombrant)
<b>Influence d'une variation de Fréquence</b>	Aucune conséquence	Efficacité réduit
<b>Influence d'une modification de l'impédance</b>	Aucune conséquence	Risque de résonance
<b>Influence d'une augmentation de courant</b>	Aucun risque de surcharge, mais efficacité diminuée	Risque de surcharge et de détérioration
<b>Ajout de matériel (augmentation de charge)</b>	Aucune problème	Nécessite des modifications sûres le filtre, dans certaines cas
<b>Modification de la fréquence Fondamentale</b>	Possible, grâce à la Reconfiguration	Modification impossible

Tableau III.2. Comparaison entre le filtre actif et le filtre passif [23]

### III.8. Rôle du filtre actif

En pratique, on ne peut pas obtenir un courant de ligne purement sinusoïdal comme dans le cas idéal mais le but est d'avoir un courant qui sera le plus proche possible de la sinusoïde parce que il Ya des erreurs soit couté filtrage ou l'alimentation de réseau.

Dans le cas idéal le rôle du filtre actif consiste à éliminer tous les harmoniques produits par la charge non linéaire en fournissant à tout instant des harmoniques égaux en amplitude et en opposition de phase à ceux produits par la charge, et ceci afin que le courant dans la ligne reste purement sinusoïdal et égal au fondamental du courant de charge [51].

### III.9. Classement des filtres actifs

Les filtres actifs sont classés de différentes manières selon le nombre de phases, la technologie de l'onduleur et la topologie :

- Filtres actifs monophasés ou triphasés.
- Filtres actifs avec ou sans neutre raccordé.
- Filtres actifs basés sur l'onduleur de tension ou sur le commutateur de courant.

Pour le première classement , si les filtres actifs monophasés ont été largement étudiés dans la littérature, dans les applications industrielles, ce sont les filtres actifs triphasés qui sont les plus répandus (pour des applications de type variateurs ou redresseurs à dépolluer) du fait que les filtres monophasés sont normalement limités aux applications en basse puissance (les redresseurs des sources d'alimentation en continu), sauf dans le cas de la traction électrique. Les filtres actifs triphasés sont utilisés pour des applications de type variateurs ou redresseurs à dépolluer.

La deuxième classification se fait autour de la topologie, avec ou sans neutre raccordé : Les filtres actifs avec neutre raccordé ont été développés afin de pouvoir injecter et compenser les composantes homopolaires. Dans la littérature la plupart des filtres sont connectés sans neutre raccordé. Toutefois, on trouve plusieurs filtres avec neutre raccordé : certains avec un onduleur à trois bras et d'autres avec un onduleur à quatre bras [52]. En ce qui concerne la technologie de l'onduleur, les filtres actifs sont soit basés sur l'onduleur de tension avec un condensateur du côté continu et un filtre de raccordement inductif du côté réseau, soit sur un commutateur de courant avec une inductance du côté continu et un filtre de raccordement capacitif du côté réseau [52].

Actuellement, même si l'on trouve des articles basés sur le commutateur de courant, l'onduleur de tension est généralement préféré à cause son meilleur rendement, de son moindre cout et de son volume plus réduit (si l'on compare le condensateur et l'inductance du coté continu) [53]. Par ailleurs, un aspect vient clore provisoirement le choix : le commutateur de courant ne peut pas être utilisé avec des topologies multi-niveaux classique, De plus, les modules à IGBTs disponibles actuellement sur le marché sont bien adaptés aux onduleurs de tension car en général une diode en antiparallèle est rajouté pour chaque IGBT. Le

commutateur de courant a quant à lui besoin de mettre en série avec chaque IGBT une diode anti-retour. En conséquence, presque tous les filtres actifs qui sont sur le marché sont composés d'onduleurs de tension. Ainsi, le choix le plus commun dans la plupart des applications consiste à utiliser un filtre actif triphasé basé sur un onduleur de tension sans neutre raccordé.

### III.10. Applications de filtre actif parallèle

La principale charge polluante, le redresseur à diodes ou à thyristors, est très utilisée que cela pour alimenter des charges continues à partir du réseau ou comme un élément d'interfaçage au réseau dans une conversion à étage intermédiaire continu. De plus en plus de dispositifs de ce type se connectent au réseau électrique. De ce fait, les filtres actifs parallèles ont un champ d'utilisation naturel dans les applications de réseau, notamment dans les réseaux faibles avec plusieurs charges polluantes et dans les réseaux à courant continu en haute tension (HVDC) [52].

Les filtres actifs sont également utilisés dans des applications industrielles, afin de dépolluer Une zone avec plusieurs charges non linéaires (redresseurs, certains éclairages, etc.). En fin, le filtrage actif est également employé dans les applications tertiaires car les filtres actifs peuvent être intéressants dans les bâtiments commerciaux, hôpitaux, etc. dans lesquels il y a de nombreuses charges polluantes comme des ordinateurs, éclairage économique, imprimantes lasers, etc. Ces filtres actifs compensent les courants harmoniques, les courant réactifs et les déséquilibres des charges.

Les applications réseau, industrielles, tertiaires et en télécommunications apparaissent comme des environnements particulièrement pollués par les harmoniques. On peut tout de même préciser que quelques fabricants proposent sur leurs catalogues des filtres actifs parallèles : ABB, Siemens, MGE UPS, AIM Européen Mesta Electronics [52].

Tous ces fabricants utilisent des composants suffisamment rapides comme les transistors IGBT. La puissance de ces filtres varie selon le fabricant et selon le modèle avec des gammes allant de 10 à 2000 KVA. La quasi-totalité des filtres actifs sont triphasés, ils se connectent tous en basse tension ( $V < 690V$ ), supportent des courants entre 300A à 480A et donnent le

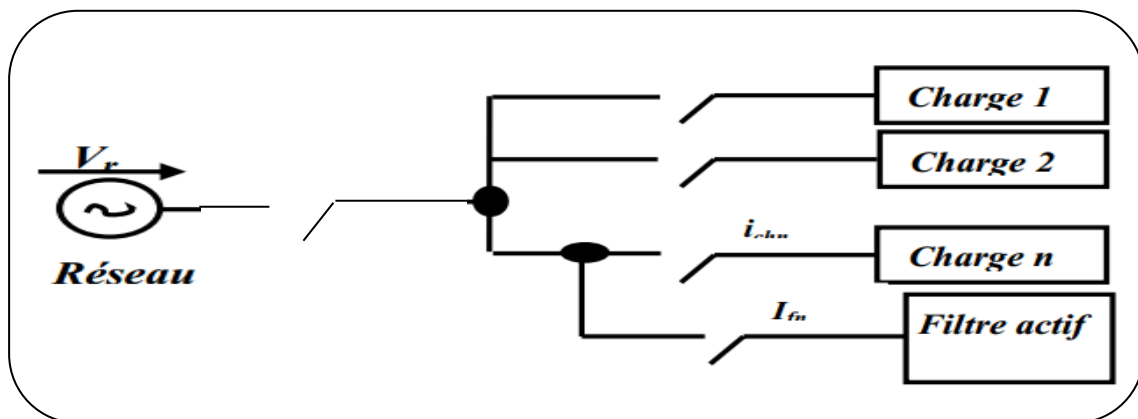
choix de se connecter avec ou sans neutre raccordé. Les filtres permettent une compensation globale des harmoniques, souvent jusqu'à l'harmonique 50 [52].

### **III.11. Point de raccordement du filtre actif parallèle**

On distingue deux types de compensation des filtres actifs : La compensation globale et la compensation locale.

Le filtre actif est situé entre le réseau et la (les) charge(s) polluante(s) comme le montre la figure (III.7). En effet, comme le montre cette figure plusieurs charges sont interconnectées au réseau électrique, on dit que la compensation est globale lorsque le filtre actif est raccordé sur l'entrée du tableau de distribution. Ce type de compensation est favorisé lorsque le nombre de charges non linéaires est considérable avec faible puissance [54].

On dit que la compensation est locale lorsque le filtre actif est raccordé aux bornes d'une seule charge polluante, et en fait appel à cette compensation lorsque le nombre de charges polluantes connectées au réseau est limité mais avec une puissance significative par rapport à la puissance globale [54].



**La figure III.4.** Raccordement d'un filtre actif parallèle.

Dans l'idéal, la correction des harmoniques doit être effectuée à leur point d'origine. Un certain nombre de critères financiers et techniques sont pris en compte pour assurer le choix optimal.

### III.12. Principe du filtrage actif parallèle

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la Figure (III.8), est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Une mesure du courant de la charge non linéaire permet de connaître le courant harmonique à fournir. L'injection peut être réalisé par différents types de convertisseurs.

Le courant harmonique  $i_{har}$  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 comme le montre la figure (III.5).

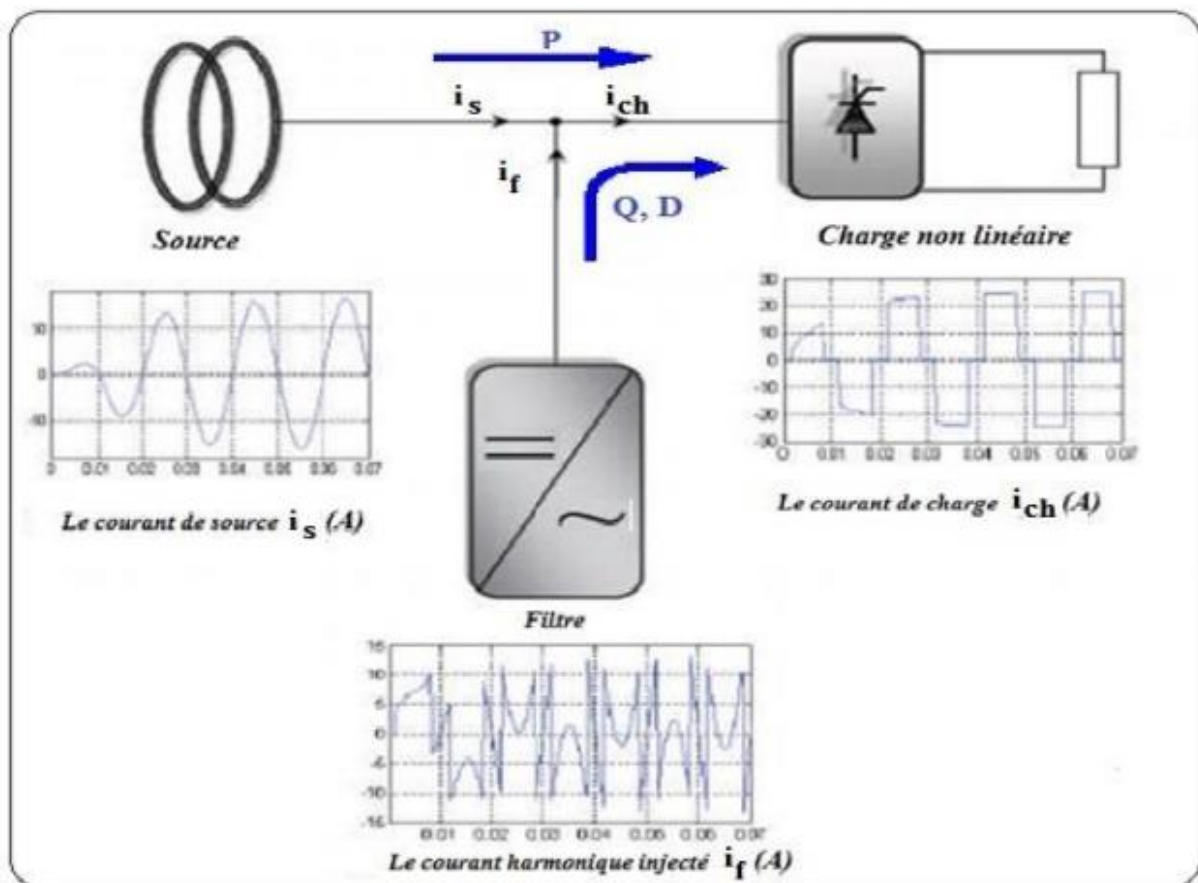


Figure. III.5. Schéma de principe du filtre actif parallèle [10].

### III.13. Description du système de filtre actif parallèle

Pour raccorder l'ondeur au réseau et le commander en courant il est nécessaire d'utiliser un filtre de raccordement de nature inductive pour filtrer les courants hautes fréquences. Bien sûr un système de commande s'ajoutera dans le système global pour commander le filtre actif parallèle [10]. Le système utilisé dans cette partie est conçu 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 à trois bras avec des semi-conducteurs (IGBT) et sans neutre raccorde. Le stockage de l'énergie du côté continu est réalisé par un banc de condensateurs.

#### III.13.1. Modèle du Réseau d'Alimentation

Le réseau est assimilable à une source de tension triphasée sinusoïdale et équilibrée  $e_i(t)$  en Série avec une impédance, dite de court-circuit  $Z_{cc}$  comme le montre par la figure suivante.

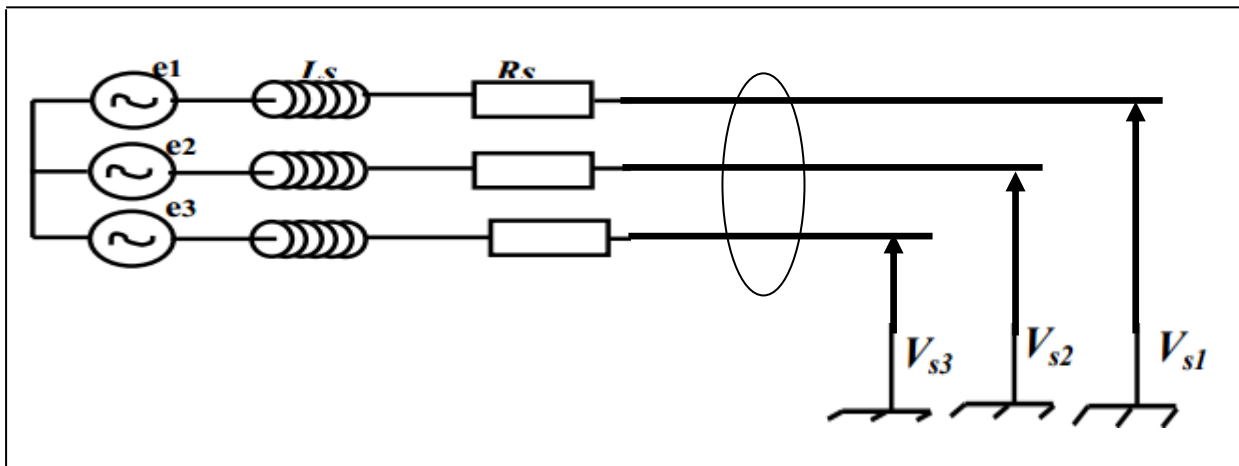


Figure III.6. Schéma du réseau électrique.

$$e_i(t) = \sqrt{2}.E.\sin(\omega t - (i-1)\frac{2\pi}{3}) \quad (\text{III.1})$$

$$Z_{cc} = R_s + j.L_s.\omega \quad (\text{III.2})$$

Avec :  $\omega$  : Pulsation du réseau.

Tell que :  $\omega = 2\pi f_s$

Les tensions du réseau électrique sont données par l'équation ...

$$\begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{pmatrix} = \sqrt{2}.V \begin{pmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{pmatrix} \quad (\text{III.3})$$

### III.13.2. Modélisation de la charge polluante

Les charges polluantes sont des charges non linéaires absorbent un courant perturbé, La plupart ils sont des convertisseurs statiques parce qu'ils comportent des interrupteurs d'électronique de puissance.

La charge polluante utilisée est un redresseur triphasé à diodes (pont de Graëtz), connectée au réseau par l'intermédiaire d'une impédance de ligne ( $L_{ch}$ ,  $R_{ch}$ ), et alimentant une charge inductive ( $L_d$ ,  $R_d$ ) côté continu, figure (III.7). Pour simplifier, on suppose que le redresseur est idéal et l'empilement est nul.

Deux diodes de même bras ne peuvent pas conduire simultanément.

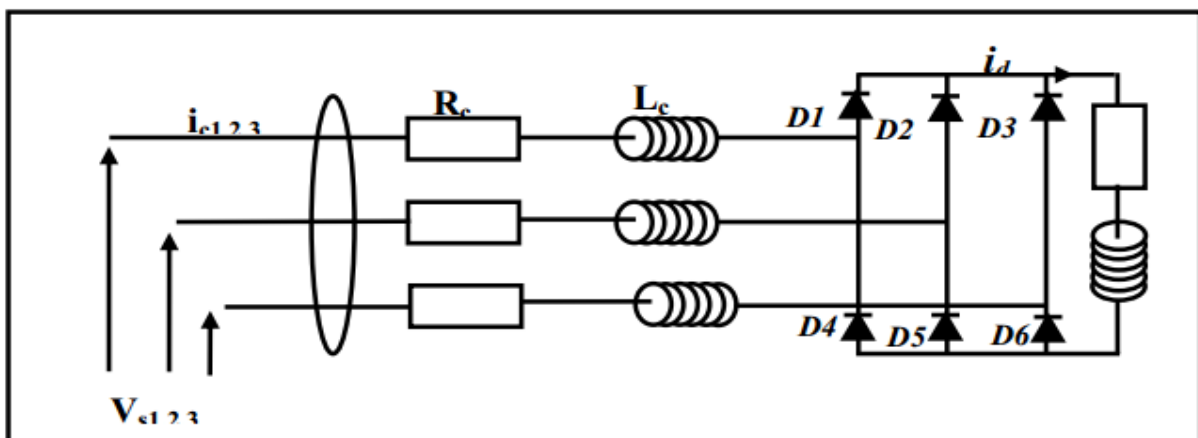


Figure III.7. Schéma du charge polluante (Redresseur à diodes (pont de Graëtz) avec charge RL).

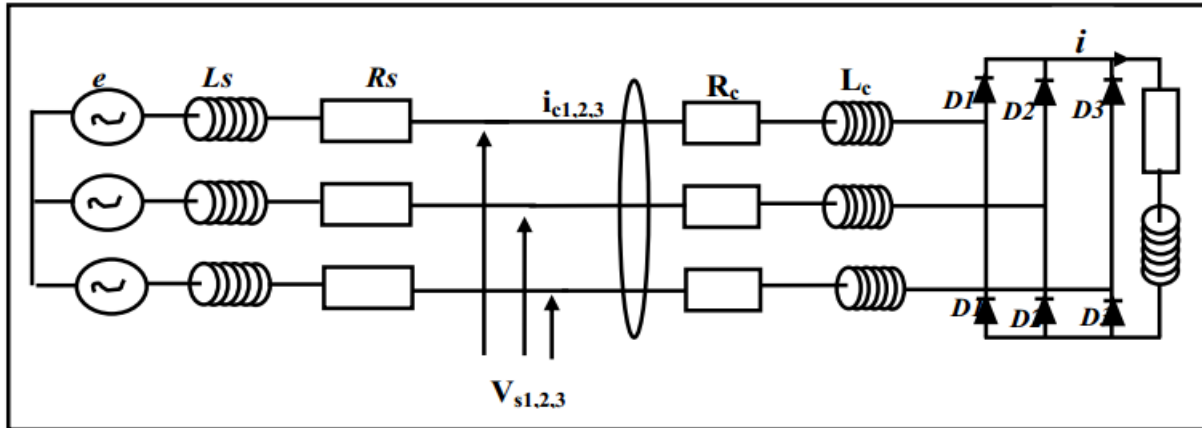


Figure III.8. Schéma global du système.

Le système des tensions triphasées ( $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ ) ainsi que la tension redressée  $U_{ch}$  sont Représentés par la figure (III.9).

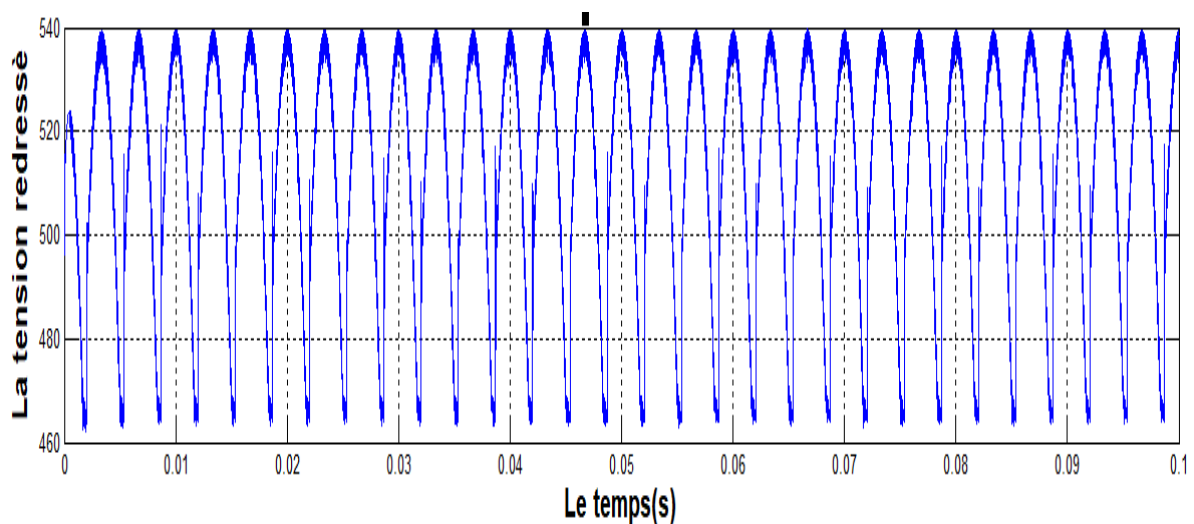


Figure III.9. Tension de sortie du redresseur contenant les harmoniques.

On sait qu'une charge non linéaire produit des harmoniques et les transmet sur le réseau. Ces harmoniques en courant et en tension au côté alternatif peuvent avoir des répercussions néfastes sur le réseau d'alimentation, pour cela il est intéressant d'utiliser un filtre actif parallèle pour améliorer les performances du réseau d'alimentation. Le redresseur est source d'harmonique et impacté sur les signaux de réseau.

III.13.3. Modélisation du filtre actif

Le modèle mathématique du filtre actif est donné par les équations suivantes :

$$L_f \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{f1} \\ i_{f2} \\ i_{f3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} \frac{V_0}{3} - \begin{pmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \\ V_{r3} \end{pmatrix} \quad (III.4)$$

$$C \frac{dV_0}{dt} = \sum_{i=1}^3 u_i \cdot i_{fi} - \frac{V_0}{R} \quad (III.5)$$

III.14. Structure du Filtre Actif Parallèle

La structure des filtres actifs se compose essentiellement de deux parties, une partie puissance et une partie commande. La partie puissance se compose d'un onduleur, d'un filtre de couplage et d'un élément passif lui servant de source d'énergie (Elément de stockage d'énergie), Son schéma de principe est illustré sur la Figure (III.10).

La partie commande, sert à contrôler la commutation des semi-conducteurs formant l'onduleur.

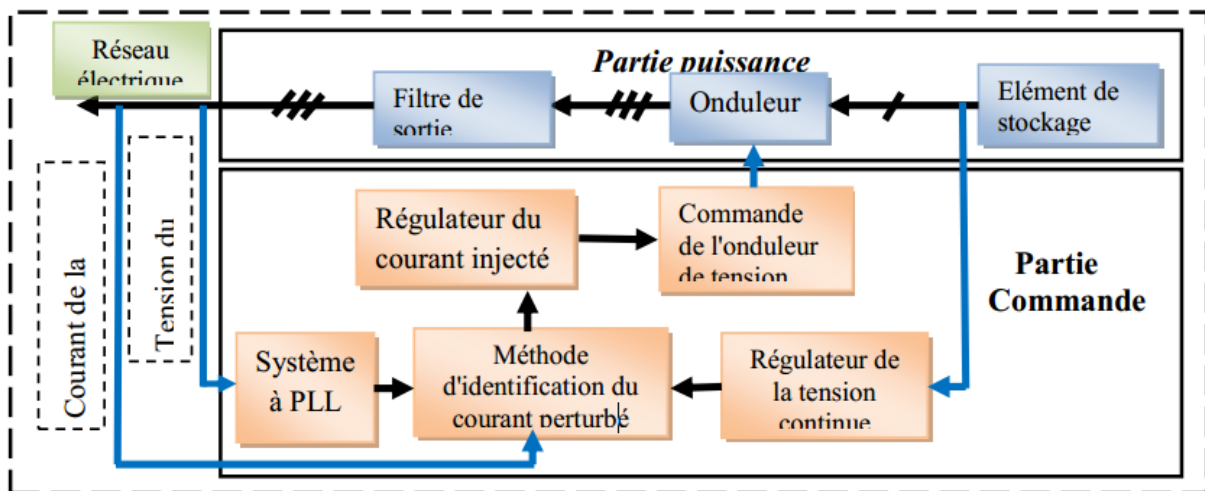


Figure III.10. La structure générale du filtre actif parallèle [10].

La partie commande : elle est constituée de l'algorithme de détection de courant de référence et de la commande de l'onduleur de tension.

- Dans l'algorithme de détection de courant de référence on trouve :
- D'un circuit d'identification des courants perturbés.
- D'un système à base PLL (boucle de verrouillage de phase) qui sera intégré dans la méthode d'identification des courant.
  
- De la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
- De la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.

La partie puissance est constituée de :

- D'un onduleur de tension (par exemple : deux niveaux a basse d'interrupteur de Puissance (IGBT) avec une diode antiparallèle).
- D'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif.
- D'un filtre à la sortie de l'onduleur.

### III.14.1. Etudes de la partie puissance

Il a deux objectifs générer des courants harmoniques à partir de la différence des tensions entre la sortie du pont onduleur et le réseau, Le filtre actif parallèle est une structure de tension connectée en parallèle au réseau. Le filtre entre l'onduleur et le réseau est un filtre de premier ordre qui est en réalité une simple inductance mais avec des spécificités au niveau de son circuit magnétique (introduction de noyaux en ferrites).

A ce titre, l'inductance (  $L_f$  ) intervient dans la commande du courant du filtre. Réduire au point de raccordement au réseau, l'amplitude des créneaux de tension générés. Les interrupteurs sont bidirectionnels en courant. Ils sont formés par des composants semi-conducteurs commandés à la fermeture et à l'ouverture (IGBT, thyristors GTO), en antiparallèle avec une diode. Dans ce cas également, l'onduleur de tension est raccordé entre deux types de sources [10] :

Source de courant côté alternatif et source de tension côté continu.

La présence de ces deux types de sources impose les conditions suivantes [10] :

- Un seul interrupteur d'un bras doit conduire pour éviter des court-circuités de la source de tension.
- Le courant de ligne doit toujours trouver un chemin libre d'où la mise en antiparallèle des diodes avec les interrupteurs pour éviter l'ouverture du circuit de la source de courant.

$V_{sn}$  : tension au point de raccordement commun.

$i_{sn}$  : courant de la source d'alimentation.

$V_{fn}, i_{fn}, L_f$  : tension, courant et inductance du filtre actif.

#### III.14.1.1. Le système de stockage de l'énergie

Le condensateur électrique est un composant très important du circuit de stockage d'énergie et les systèmes de filtrage comme le filtre passif, Il est fournie la tension ce forme continue.

Le choix des paramètres du système de stockage n'est pas arbitraire car ils ont une influence sur la dynamique et la qualité de compensation du filtre actif parallèle.

Le choix de C se fait de manière à ce que les ondulations de la tension  $V_0$  causées par les courants engendrés par le filtre actif soient limitées, car plus ces ondulations sont importantes plus l'amplitude du courant du filtre est grande, sa fréquence est faible et sa qualité de compensation est dégradée [54] :

Ainsi on peut estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres de stockage. Pour démontrer ceci deux méthodes peuvent être utilisées [54] :

- ✓ La première méthode est basée sur le calcul de l'énergie fournie par le filtre actif pendant une demi période de la pulsation de puissance liée aux deux premiers harmoniques (5 et 7) pour un redresseur en pont de Gratèz En choisissant un taux d'ondulation acceptable ( $\epsilon$ ) généralement de l'ordre de 5%de  $V_0$ , La capacité C est calculée à partir de la relation suivante :

$$C = \frac{V_s \sqrt{I_5^2 + I_7^2 + 2I_5 I_7 (5\alpha - 7\alpha)}}{2\omega \epsilon V_0^2} \quad (\text{III.7})$$

$V_s$  : La valeur efficace de la tension simple du réseau.

$\alpha$  : L'angle d'allumage des thyristors du pont de Gratöz

- ✓ La deuxième méthode, plus simple, se base sur la mesure du courant harmonique  $I_h$  du rang le plus faible. La capacité C se calcule de la façon suivante :

$$C = \frac{I_h}{\epsilon V_0 \omega_h}$$

$\omega_h$  : La plus faible pulsation des harmoniques à compenser.

$I_h$  : le courant harmonique du rang h.

#### III.14.1.2. Filtre de sortie

Le filtre de sortie est un filtre passif composé d'une inductance  $L_f$  de résistance  $R_f$  généralement négligeable, utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique, Il est dimensionné de manière à satisfaire les deux critères suivants [57] :

- ✓ Assurer la dynamique du courant :

$$\frac{d}{dt} \vec{i}_{ch} = \frac{d}{dt} \vec{i}_f \quad (\text{III.8})$$

Avec :  $i_{ch}$  : le courant harmonique de la charge.

$i_f$  : le courant du filtre actif.

- ✓ Garantir le filtrage, pour un certain niveau de qualité, des harmoniques de courant dus à la commutation.

- ✓ Limiter la chute de tension au courant maximal, a une valeur inferieure a 20% de la tension cote source, niveau de potentiel au point PCC.
- ✓ Empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique.

L'inconvénient du filtre de sortie utilisé, filtre de premier ordre, c'est qu'il ne peut pas vérifier les deux critères au même temps, car pour satisfaire l'égalité ( $\frac{di_{ch}}{dt} = \frac{di_f}{dt}$ ), Et donc améliorer les performances de compensation, inductance  $L_f$  doit être relativement faible. Néanmoins, cela entraine la propagation de ses composants sur le réseau ce qui affecte les installations et équipements électriques voisins [58].

Le dimensionnement de  $L_f$  est réalisé avec la contrainte que pour une fréquence de commutation donnée, la pente du courant if est plus petite que celle d'une porteuse triangulaire définissant cette fréquence de commutation.

La pente de la porteuse triangulaire est définie par :  $\alpha = 4 \cdot \varepsilon \cdot f_c$

Avec :

$\varepsilon$  : est l'amplitude de l'onde triangulaire.

$f_c$  : est la fréquence de commutation des interrupteurs du filtre actif La pente maximale de If, dans le cas d'un filtre actif à point milieu, est donnée par :

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{0,5 \cdot V_{dc} + V_{sm}}{L_f} \quad (\text{III.9})$$

D'où une valeur de  $L_f$  estimée à:

$$L_f = \frac{0,5 \cdot V_{dc} + V_{sm}}{4 \cdot \varepsilon \cdot f_c} \quad (\text{III.10})$$

Ainsi le bon dimensionnement du filtre de sortie utilisé dépend du compromis à trouver entre la dynamique et l'efficacité du filtre actif parallèle.

Pour bon compromis il Ya une solution et qui consiste en l'installation d'un filtre passif auxiliaire :

Soit en amont du coté réseau, dans ce cas les harmoniques à filtrer sont ceux du courant de l'onduleur et le signal utile est constitué de l'ensemble des contres harmoniques.

Néanmoins, le filtre auxiliaire engendre des effets indésirables sur le réseau tel que la résonance avec d'autres éléments passifs voisins, sa consommation de la puissance active à travers sa résistance d'amortissement et la dégradation de leurs performances à cause du vieillissement de leurs composants [10].

#### III.14.2. Etudes de la partie commande

L'objectif de la commande est de compenser l'ensemble des harmoniques de courant générés par la charge non linéaire. Le rôle est la génération de courants harmoniques produits par le filtre actif afin qu'ils suivent en temps réel leurs références harmoniques. Dans un premier temps, il faut donc déterminer ces courants harmoniques de référence.

La stratégie de commande se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel, trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées [59] :

- ✓ Identification à partir de la détection du courant de la charge polluante.
- ✓ Identification à partir de la détection du courant de la source.
- ✓ Identification à partir de la détection de la tension de la source.

Pour les applications de filtrage la commande est jouer rôle principale pour détecte les harmoniques, parce que le courant délivre par l'onduleur commendable a base de THD de système avent connecte le filtre.

### III.15. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié présenté en détail le fonctionnement du filtre actif parallèle pour un onduleur deux niveau (Le principe de fonctionnement et sa structure avec la tension gainerie par l'onduleur), le filtre actif est solution pour améliore la qualité d'énergie électrique et élimination des harmoniques. Ensuite, On a présente le schéma de filtre actif parallèle avec étude la partie puissance en détail et la partie commande par une idée générale.

Les harmonique sont perturbation important, Ils sont diminuée le rendement de réseau et faire un bruit huit sur les équipement avec des échauffement en des arbres de générateur de production, les solutions classiques présentent de nombreuses contraintes pour répondre à un besoin actif de dépollution, elles sont souvent pénalisées en termes d'encombrement, de résonance et d'une mauvaise adaptation face à l'évolution du réseau et aux charges polluant, le filtre actif parallèle est la solution le plus précise parce que liée avec des technique de commande développé comme la commande prédictif.

*Chapitre IV : La commande predictive d'onduleur  
trois niveau de type NPC pour application de filtre  
actife parallèle .*

### IV.1. Introduction

Les onduleurs multiniveaux à structure NPC ont montrées que l'onduleur multiniveau offrent une grande amélioration sur la qualité des tensions de sortie avec un taux d'harmoniques réduit (donc amélioration de la qualité d'énergie électrique), Ces améliorations ont pour objectif à éliminer certains rangs d'harmoniques. Les études faites dans le domaine du filtrage actif et la compensation de l'énergie réactive sont développe avec des techniques de commande améliore le courant gainerie par le filtre.

L'amplitude et l'angle de phase des courants harmoniques produits par les charges non Linéaires changent selon les paramètres, L'onduleur multiniveau permet de contrôler la tension du bus continu et les puissances actives et réactives échangée avec le réseau.

Dans ce chapitre, On a présente la commande prédictive des convertisseurs multiniveaux puis on va simule le filtre actif parallèle par onduleur de type NPC trois niveau. Ensuite, On a appliqué la commande prédictive sur cette système.

### IV.2. Principe de la commande prédictif

La commande prédictive peut être utilisée pour commander des systèmes complexes comportant plusieurs entrées et sorties où le simple régulateur PID est insuffisant. Cette technique est particulièrement intéressante lorsque les systèmes possèdent des retards importants, des réponses inverses et de nombreuses perturbations. Les principaux utilisateurs de la commande prédictive sont les raffineries de pétroles, l'industrie chimique et agroalimentaire, la métallurgie, l'aérospatiale. La commande prédictive réalise à chaque période d'échantillonnage du contrôleur les mêmes étapes :

- 1- Calcul des prédictions des variables contrôlées jusqu'à un horizon de temps  $N_2$  grâce au modèle interne.
- 2- Élaboration d'une trajectoire de référence à suivre.
- 3- Calcul de la future loi de commande à appliquer sur les variables manipulées jusqu'à un horizon temporel  $N_u$ .
- 4- Seul le premier élément de la loi de commande calculée est appliqué sur le système au coup d'horloge suivant. Toutes ces étapes se répéteront ensuite, c'est le principe de l'horizon fuyant.

### IV.3. La commande prédictive généralisé

Le principe de la commande prédictive est d'utiliser un modèle du système commandé à l'intérieur du contrôleur en temps réel pour la prédiction du comportement futur des grandeurs réglées. Cette information est utilisée par le contrôleur pour obtenir la commande optimale souhaitée, bien sûr en prenant en compte le critère d'optimisation prédéfini auparavant. Sa structure générale est basée sur les idées suivantes [46] :

- Utilisation d'un modèle du système pour prévoir les sorties à des instants futurs (notion d'horizon de prédiction).
- Calcul des actions optimales de commande basé sur la minimisation d'une fonction de coût. Dans le futur (notion d'horizon de commande) ;
- À chaque instant d'échantillonnage, l'horizon de prédiction est déplacé vers le futur, et seule la première des commandes calculées est effectivement appliquée au système (notion d'horizon fuyant).

La commande prédictive présente un certain nombre d'avantages, par rapport aux autres méthodes, parmi lesquels on trouve [46] :

- ✚ Le correcteur obtenu est une loi de commande linéaire facile à implémenter et qui requiert peu de temps de calcul.
- ✚ Son principe est intuitif et facile à comprendre.
- ✚ Elle est capable intrinsèquement de compenser les retards ou les temps morts.
- ✚ Elle est très utile lorsque les consignes à suivre sont connues à l'avance.
- ✚ Permet de respecter les contraintes sur les variables commandées et manipulées.
- ✚ Autorise l'adaptation automatique du système en cas de perturbations mesurables.

### IV.3. Commande prédictive de courant d'un filtre actif parallèle

La modélisation la plus simple considère le convertisseur comme un commutateur avec seulement deux états de commutation : fermé et ouvert. Lors de la modélisation du convertisseur statique, l'élément de base est l'interrupteur d'alimentation. Il peut être un transistor IGBT, un thyristor, un GTO ...etc. En règle générale, le nombre d'états de commutation possibles  $n$  est :

$$n = x^y \quad (\text{IV.1})$$

Où  $x$  est le nombre d'états possibles de chaque bras du convertisseur et  $y$  est le nombre de phases du convertisseur.

Chaque application impose plusieurs exigences en matière de contrôle sur les systèmes tels que le contrôle du courant, le contrôle de puissance, le contrôle du couple ... etc. Ces exigences peuvent être exprimées comme une fonction de coût à minimiser. La fonction de coût la plus fondamentale à définir est celle qui évalue l'erreur entre la référence et la variable prédite [46].

Pour obtenir un modèle à temps discret, il est nécessaire d'utiliser des méthodes de discrétisation. Afin d'approximer les dérivées, on utilise la méthode d'Euler, dont la dérivée d'une variable  $x$  peut être exprimée par :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{x(k+1) - x(k)}{T_s} \quad (\text{IV.2})$$

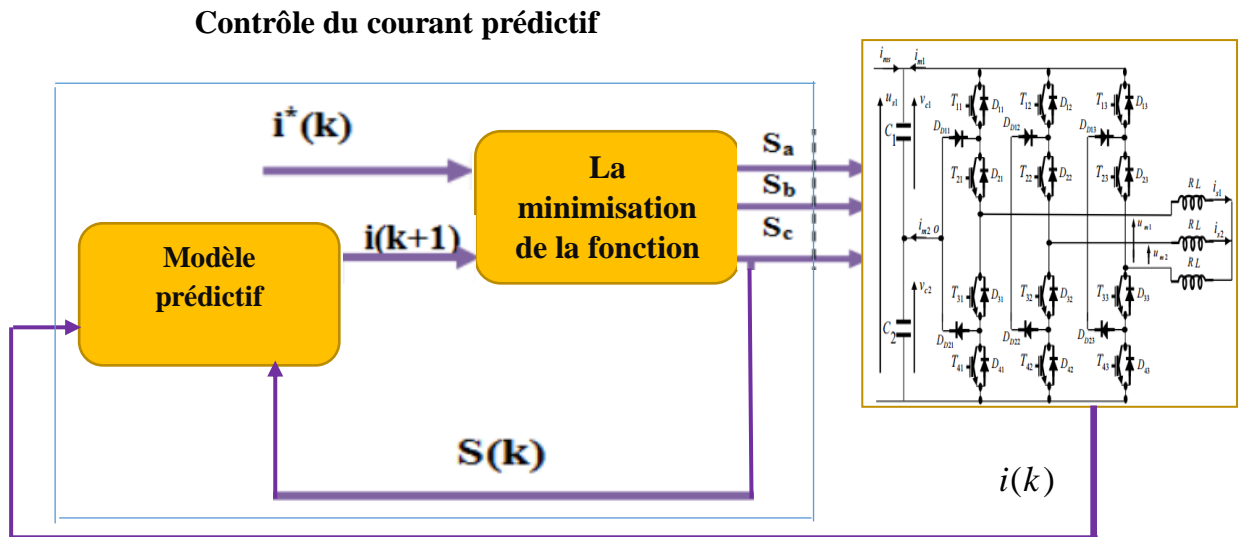
Où  $T_s$  est la période d'échantillonnage.

Afin de réaliser cette commande (MPC), les tâches suivantes sont nécessaires [46].

- 1- Prédire le comportement futur des variables contrôlées (courants injectés par le filtre actif) pour tous les états de commutation.
- 2- Evaluer la fonction coût (erreur quadratique des courants harmoniques de références et les courants injectée prédits par le FAP) pour chaque prédiction.
- 3- Sélectionner l'état de commutation optimal qui minimise le coût de la fonction.

Le volume de calcul est directement lié au nombre d'états de commutation possibles. Pour sélectionner l'état de commutation minimisant la fonction de coût, tous les états possibles sont évalués et l'état optimal sera stocké pour être appliqué par la suite.

Le schéma de principe de la stratégie de commande prédictive appliquée aux courants d'un onduleur triphasé travaillant comme un filtre actif est présenté dans la figure (IV.1) [46].



**Figure IV.1.** Schéma synoptique de la commande prédictive.

Dans ce schéma les variables mesurées  $i(k)$  sont utilisées dans le modèle pour calculer les prédictions  $i(k+1)$  des variables commandées pour chacune des itérations possibles (n), c'est-à-dire l'état de commutation.

Ces prédictions sont évaluées en utilisant une fonction de coût qui tient compte des valeurs de référence  $i(k)_f^*$ . Ainsi, l'état optimal de commutation S est sélectionné et appliquée au convertisseur statique.

Nous basons sur la structure générale d'un filtre actif parallèle (Onduleur de tension à trois bras), connecté à un réseau électrique à trois fils donnée par la figure (IV.2) Par la loi des mailles, nous pouvons écrire pour la phase :

$$Lf \frac{di_{fa}(t)}{dt} = V_{fa}(t) - e_{sa}(t) - R_f i_{fa}(t) \quad (IV.3)$$

Par discrétisation de l'équation précédente (équation IV.3) sur une période de commutation  $T_s$ , en utilisant la méthode d'Euler (équation IV.2), la variation du

Courant injecté par le filtre actif entre deux instants d'échantillonnage successifs 'K' et 'K+1' est exprimée par la relation ci-dessous :

$$i_{fa}(k+1) - i_{fa}(k) = \frac{T_s}{L_f} [V_{fa}(t) - e_{sa}(t) - R_f i_{fa}(t)] \quad (IV.4)$$

De cette équation, on peut exprimer le courant prédit comme suit :

$$i_{fa}(k+1) = i_{fa\text{-prédicatif}} = \frac{T_s}{L_f} [V_{fa}(t) - e_{sa}(t)] + \left(1 - R_f \cdot \frac{T_s}{L_f}\right) * i_{fa}(t) \quad (IV.5)$$

Un calcul similaire permet de déterminer les deux courants prédits  $i_{fb\text{-prédicatif}}$  et  $i_{fc\text{-prédicatif}}$

Comme suit :

$$i_{fb}(k+1) = i_{fb\text{-prédicatif}} = \frac{T_s}{L_f} [V_{fb}(t) - e_{sb}(t)] + \left(1 - R_f \cdot \frac{T_s}{L_f}\right) * i_{fb}(t) \quad (IV.6)$$

$$i_{fc}(k+1) = i_{fc\text{-prédicatif}} = \frac{T_s}{L_f} [V_{fc}(t) - e_{sc}(t)] + \left(1 - R_f \cdot \frac{T_s}{L_f}\right) * i_{fc}(t) \quad (IV.7)$$

Dans notre étude, l'équation suivante (équation IV.7) est l'expression mathématique de la fonction coût qui minimise l'erreur quadratique des courants harmoniques de références et les courants injectée prédits par le FAP) pour chaque prédiction.

$$g = (i_{fa}^* - i_{fa\text{-predi}})^2 + (i_{fb}^* - i_{fb\text{-predi}})^2 + (i_{fc}^* - i_{fc\text{-predi}})^2 \quad (IV.8)$$

Avec :

$i_{fa}^*, i_{fb}^*$  et  $i_{fc}^*$  sont les courants harmoniques de référence identifiés par la méthode modifiée étudiée dans la section identification des courants de référence du deuxième chapitre de notre travail.

$i_{fa\text{-predi}}, i_{fb\text{-predi}}^*$  et  $i_{fc\text{-predi}}$  sont les courants prédits pour l'instant suivante (k+1).

Après cette brève initialisation à ce genre de commande (MPC), l'algorithme de la commande prédictive dans notre cas (FAP) est donné par la figure (IV.2).

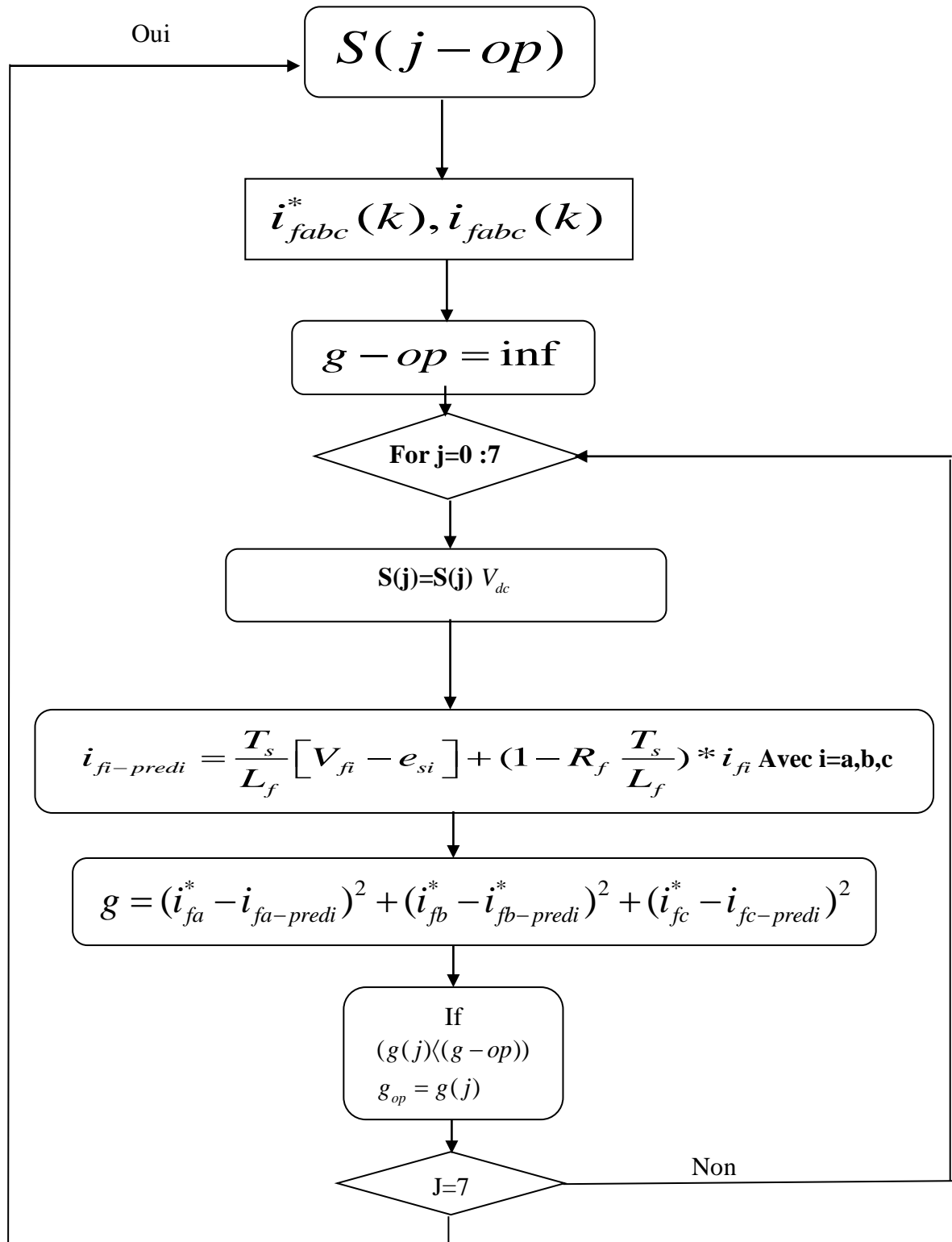


Figure IV.2. Algorithme de la commande prédictive.

#### IV.4. Résultat de simulation de filtre actif parallèle par un onduleur trois niveau de type NPC

Dans ce paragraphe, nous allons présenter les résultats de simulation obtenus Pour la commande présentée, Dans cette système on a appliqué la commande prédictive.

La structure générale du système étudié est décrite à la figure (IV.3). On y retrouve :

- ✓ Réseau d'alimentation triphasée.
- ✓ La ligne électrique est (RL).
- ✓ La charge polluante (Redresseur) débitant dans une charge de type RL.
- ✓ Le filtre actif parallèle à structure de tension.

##### IV.4.1. Le résultat de simulation avant raccordée le filtre

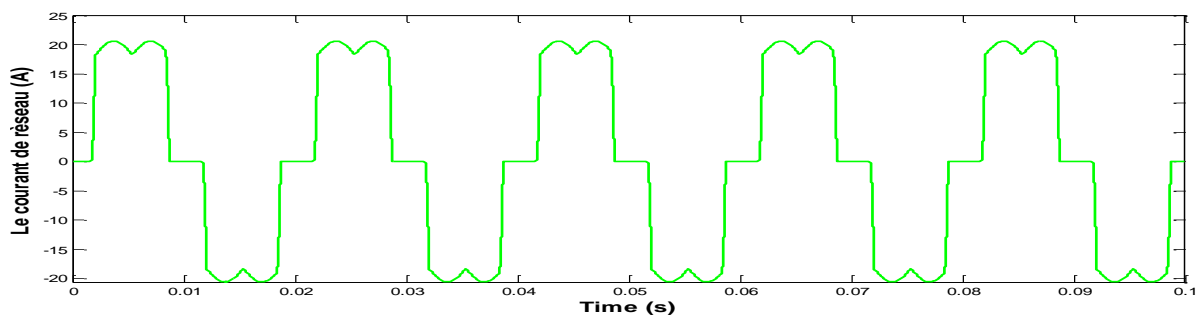


Figure IV.3. Le courant de réseau avant raccordée le filtre  $i_{fa}$

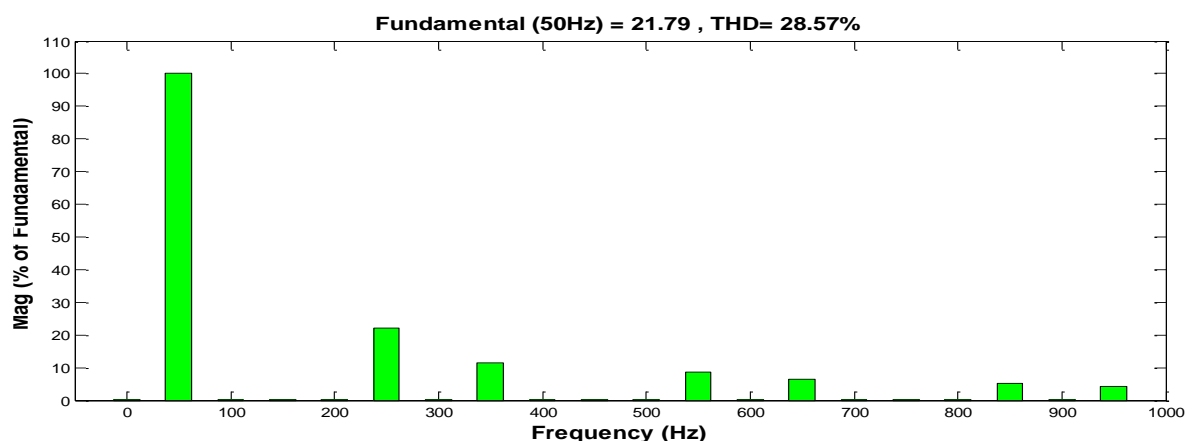


Figure IV.4. Le spectre d'harmonique de courant de la source avant raccordée le filtre  $i_{fa}$ .

IV.4.2. Résultat de simulation de la commande prédictif de filtre actif parallèle

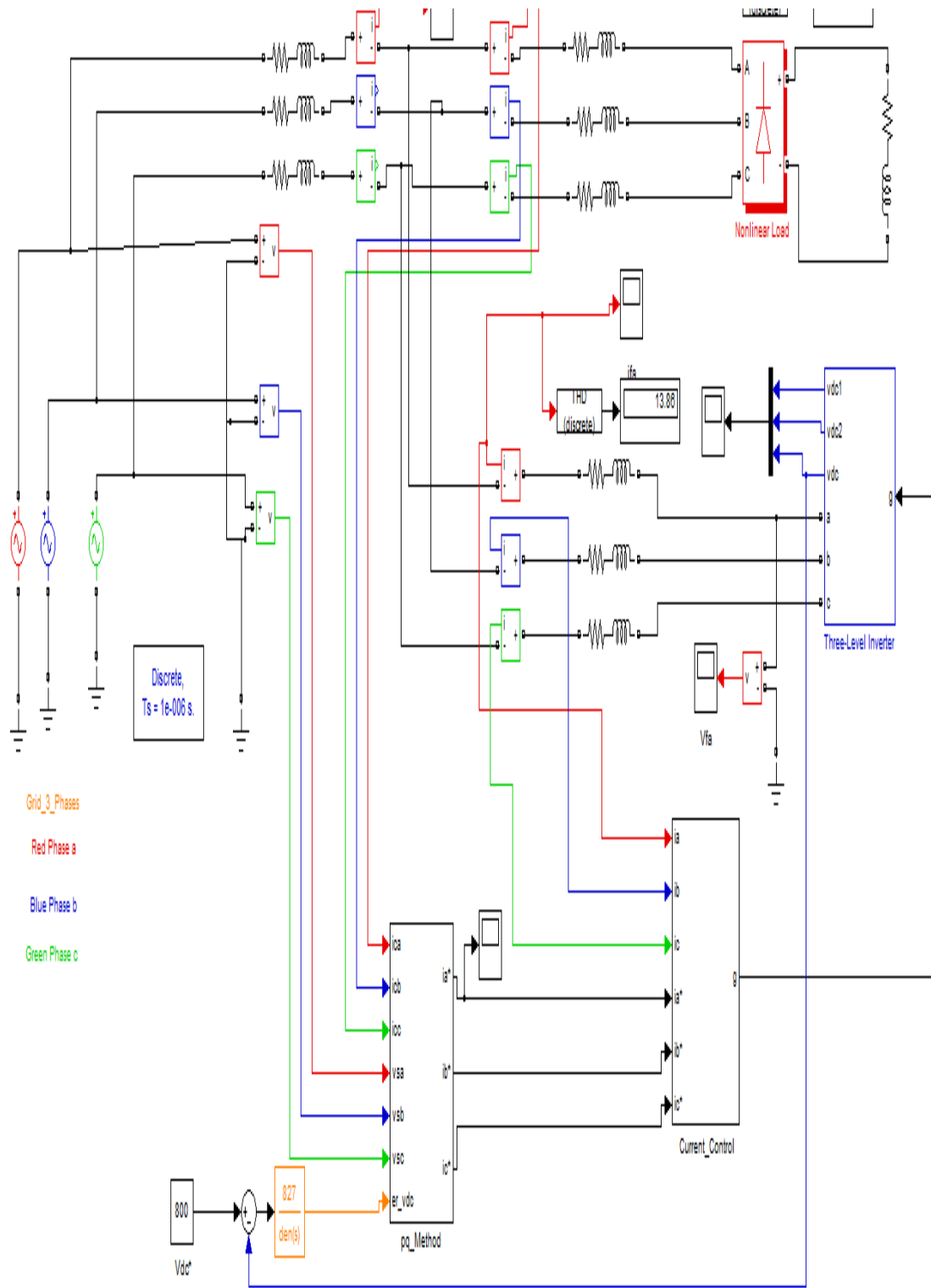


Figure IV.5. Schéma bloc de filtre actif parallèle par un onduleur trois niveau de type NPC avec stratégie de commande prédictif.

**Tableau IV.1.** Paramètres de simulation d'un filtre actif à trois niveaux.

Les paramètres		Valeur numérique
<b>Réseau électrique</b>	Tension $V_s$	$220\sqrt{2}$ V
	La fréquence f	50 HZ
	Résistance $R_s$	$0.25e-3 \Omega$
	Inductance $L_s$	$19.4e-6$ H
<b>La charge polluante</b>	Résistance $R_c$	$1.2e-3 \Omega$
	Inductance $L_c$	$0.3e-3$ H
	Résistance $R_d$	$26 \Omega$
	Inductance $L_d$	$10e-3$ H
<b>Filtre actif parallèle</b>	Résistance $R_f$	$5e-3 \Omega$
	Inductance $L_f$	$5e-3$ H
	Tension E	800 V
	Tension de condensateur 1	400 V
	Tension de condensateur 2	400 V

Après simulée le système de la figure (IV.3). On a présente les résultats obtenus, remarque le rôle de convertisseur multiniveaux pour applique un filtre actif et déduire l'avantage d'utilisation du stratège de la commande prédictive.

Pour la simulation du modèle de la figure (IV.3) sous Matlab/Simulink, on a utilisé les paramètres du Tableau (IV.1). On a obtenu les résultats suivants :

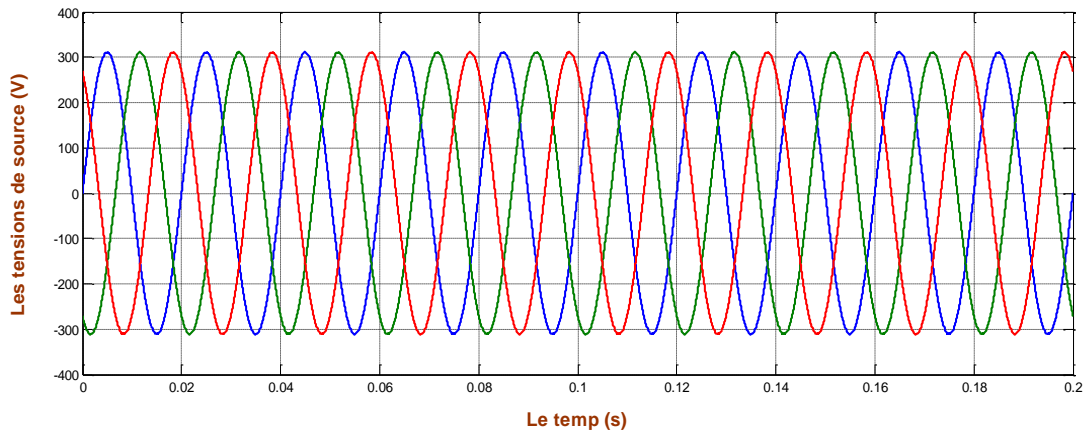


Figure IV.6. Les trois tensions d'alimentation de réseau.

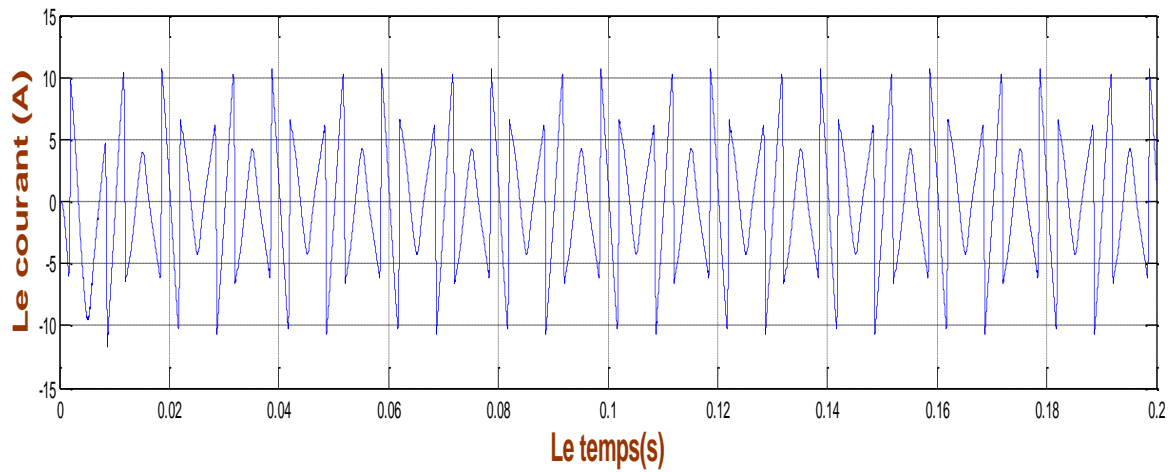


Figure IV.7. Le courant de référence  $i_a^*$ .

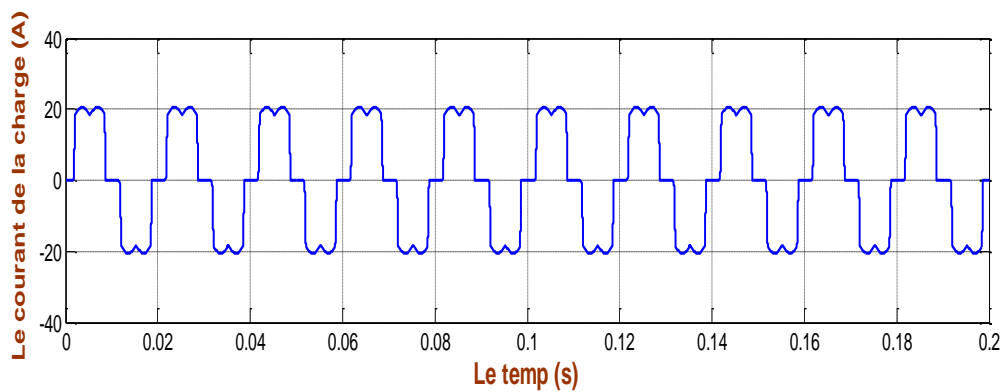


Figure IV.8. Le courant de la charge  $i_c$  après raccorde le filtre.

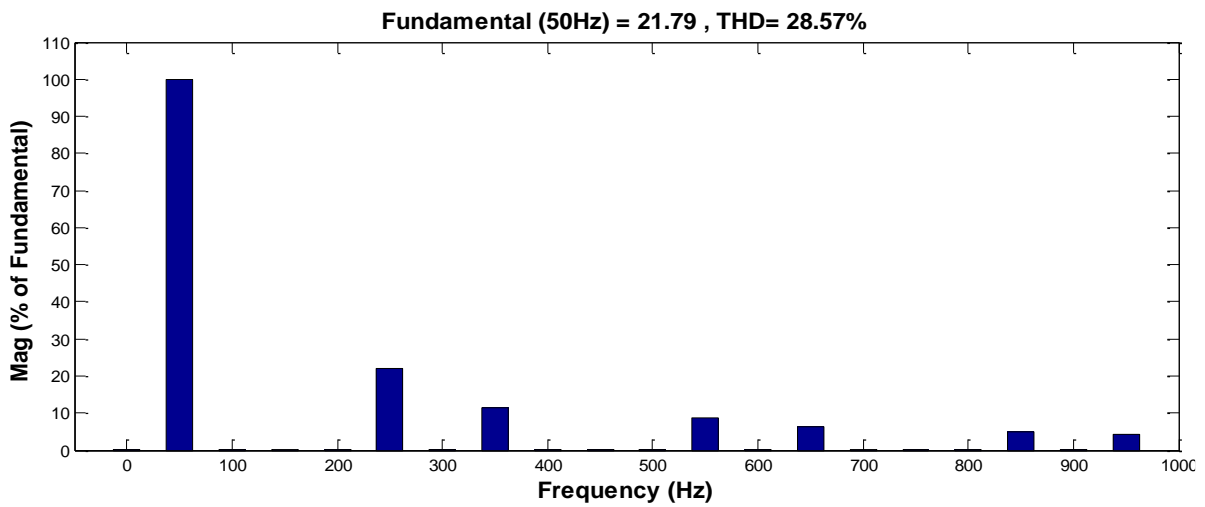


Figure IV.9. Le spectre d'harmonique de courant de la charge  $i_c$  après raccorde le filtre.

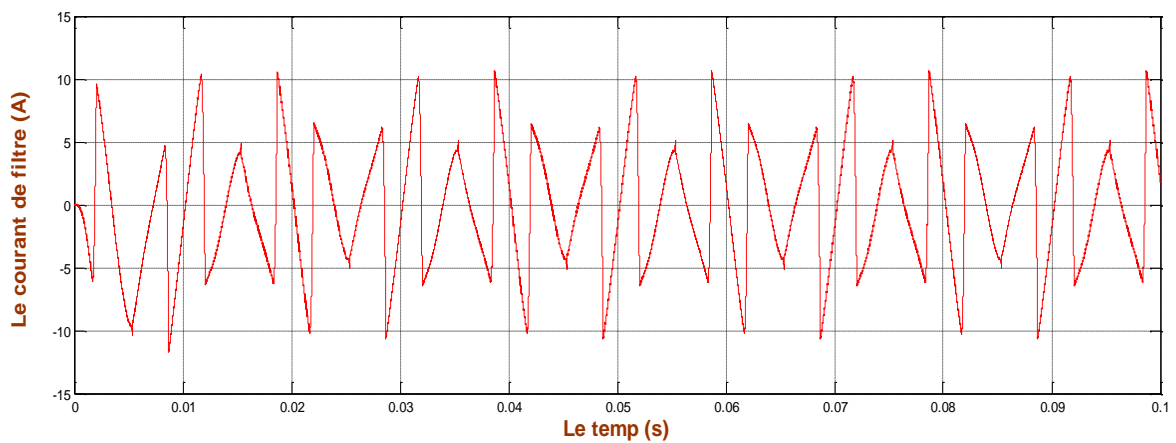


Figure IV.10. Le courant injecté par le filtre  $i_{fa}$ .

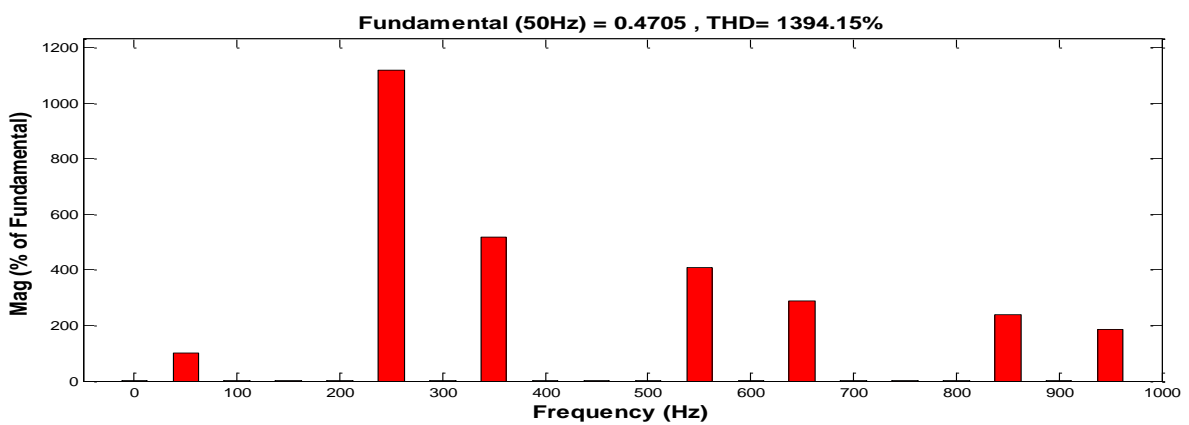


Figure IV.11. Le spectre d'harmonique de courant injecté par le filtre  $i_{fa}$ .

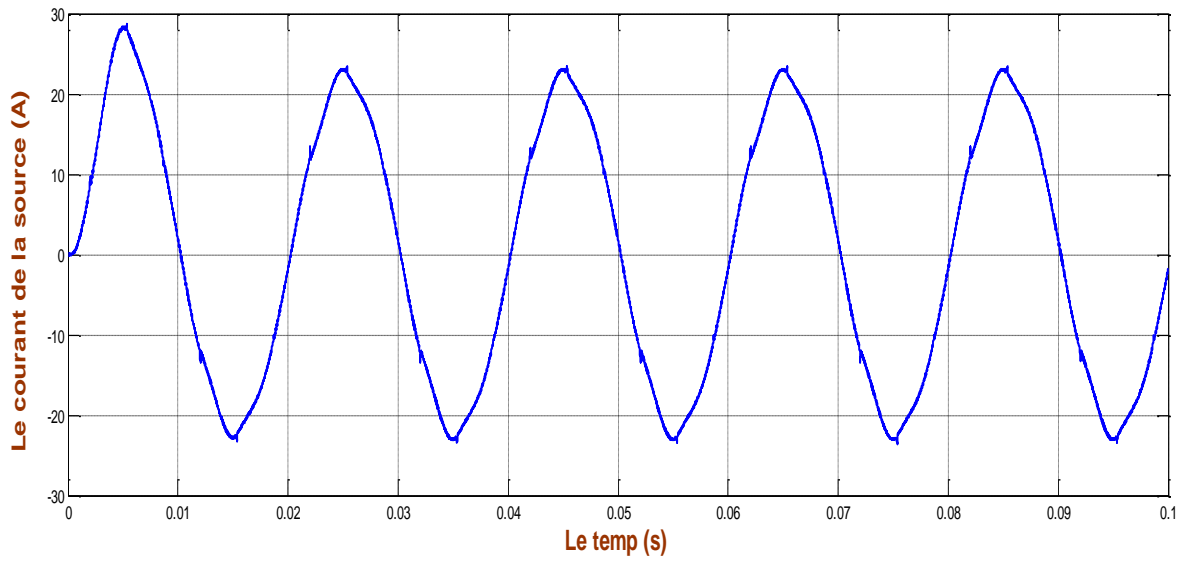


Figure IV.12. Le courant de la source après raccorde le filtre  $i_{sa}$ .

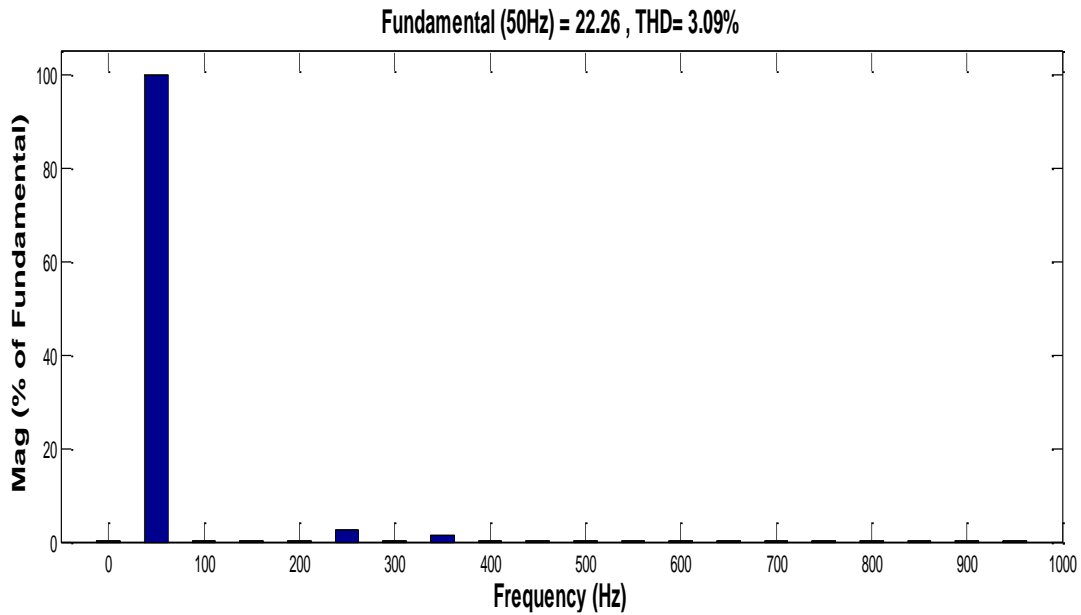


Figure IV.13. Le spectre d'harmonique de courant de la source après raccorde le filtre  $i_{sa}$ .

#### IV.5. Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus par la simulation faite sous les mêmes conditions de fonctionnement du FAP suivant la méthode par la commande prédictive ont montrent :

- Le THD de courant de réseau avant raccordée le filtre est 28.57%, Après raccordée le filtre le THD est 3.09%. Donc le filtre est injecte l'inverse des harmoniques crée par la charge polluante.
- Ont détectées le courant perturbateurs.
- La commande prédictif est bien adaptée la valeur de THD diminue et important.
- L'amélioration de la forme des courants de source et la tension au point de connexion de la charge polluante après le filtrage.
- On a utilisé une inductance après le point de raccordement du filtre actif pour éliminer la présence des pics au niveau des courants de source.
- La commande prédictive est bien précise parce que base sur un algorithme toujours améliore le courant injecte.
- La valeur de THD après raccorde le filtre est accepté dans cette système est (THD=0.3%).

Ces résultats sont présentés le rôle de filtre pour élimine les harmoniques.

**Tableau IV.2.** Les valeurs de THD avant et après raccordée le filtre.

<b>Le courant de réseau</b>	<b>THD</b>
Avant raccordée le filtre	28.57%
Après raccordée le filtre	3.09%

#### **IV.6. La conclusion**

Dans ce chapitre nous avons d'abord présenté un aperçu des différentes méthodes de commande prédictive en général. Nous avons également exposé le principe de base de contrôle prédictif basé sur le modèle du système contrôlé et son application pour le contrôle des systèmes de l'électronique de puissance, spécialement l'onduleur de tension trois niveau de type NPC que nous avons utilisé dans notre travail comme un filtre actif afin de compenser simultanément l'ensemble des harmoniques en courant et la puissance réactive consommée par la charge non-linéaire. Ensuite, On a présente le modèle de simulation de FAP avec la commande prédictive et simule pour remarque l'élimination d'harmonique.

Ainsi, Pour compenser ces courants harmoniques et la puissance réactive consommée, nous avons présenté la commande prédictif d'un filtre actif parallèle Les résultats de simulation du système complet en tenant compte du déséquilibre de la tension au point de raccordement, montrent bien que la commande prédictive donne d'excellents résultats avec THD acceptable après raccorde le filtre. Alors cette technique de commande est donne bon résultat pour détecte les harmoniques crée par la charge polluante.

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

Dans ce projet de fin d'étude, on a étudié une stratégie de dépollution des réseaux électriques, appelée filtrage actif parallèle qui a vu son développement avec l'évolution des organes de l'électronique de puissance. L'utilisation des convertisseurs multiniveaux et leur rôle avec leur commande qu'adapté le courant injecte en réseau, Ils sont éliminés les harmoniques produits par les charges polluantes alors l'injection de l'inverse de cette harmonique par le filtre est restaure la forme sinusoïdale de courant de réseau. Il existe toujours en parallèle des techniques classiques qui sont utilisées pour diminuer les effets des harmoniques par contre les techniques modernes ont pour but d'éliminer ces perturbations complètement.

La consommation de l'énergie électrique est très réponde en courant continu, pour cela les redresseurs sont les plus utilisés. Mais le besoin croissant enduit automatiquement une multiplication de ces équipements, qui, à leurs tours provoquent des perturbations, de plus en plus présentes sur le réseau. Ces convertisseurs provoquent une dégradation du facteur de puissance du réseau et génèrent des courants très riches en harmoniques.

Les techniques de commande des onduleurs multiniveaux sont détermine l'efficacité de filtre alors le taux de distorsion d'harmonique est présente le pourcentage d'harmonique en signale, pour adapte le filtre on a applique un type de commande avec remarque le THD de courant à la sortie (courant injecte) et la courante de réseau.

La commande prédictive est nouveau technique de commande de filtre actif, après applique cette type de commande sur un onduleur trois niveau de type NPC on remarque que la valeur de THD est importée, le résultat obtenu par le modèle de simulation est présent la fiabilité de contrôle prédictif à base d'une opération utilise la courante de référence.

Dans un premier temps, On a étudié la qualité d'énergie électrique en détail et les perturbations sur le réseau électrique, ainsi des solutions pour améliore la QEE. Ensuite, On présentera des notions générales sur les harmoniques, leurs sources, leurs conséquences et les méthodes classiques et modernes pour les compenser.

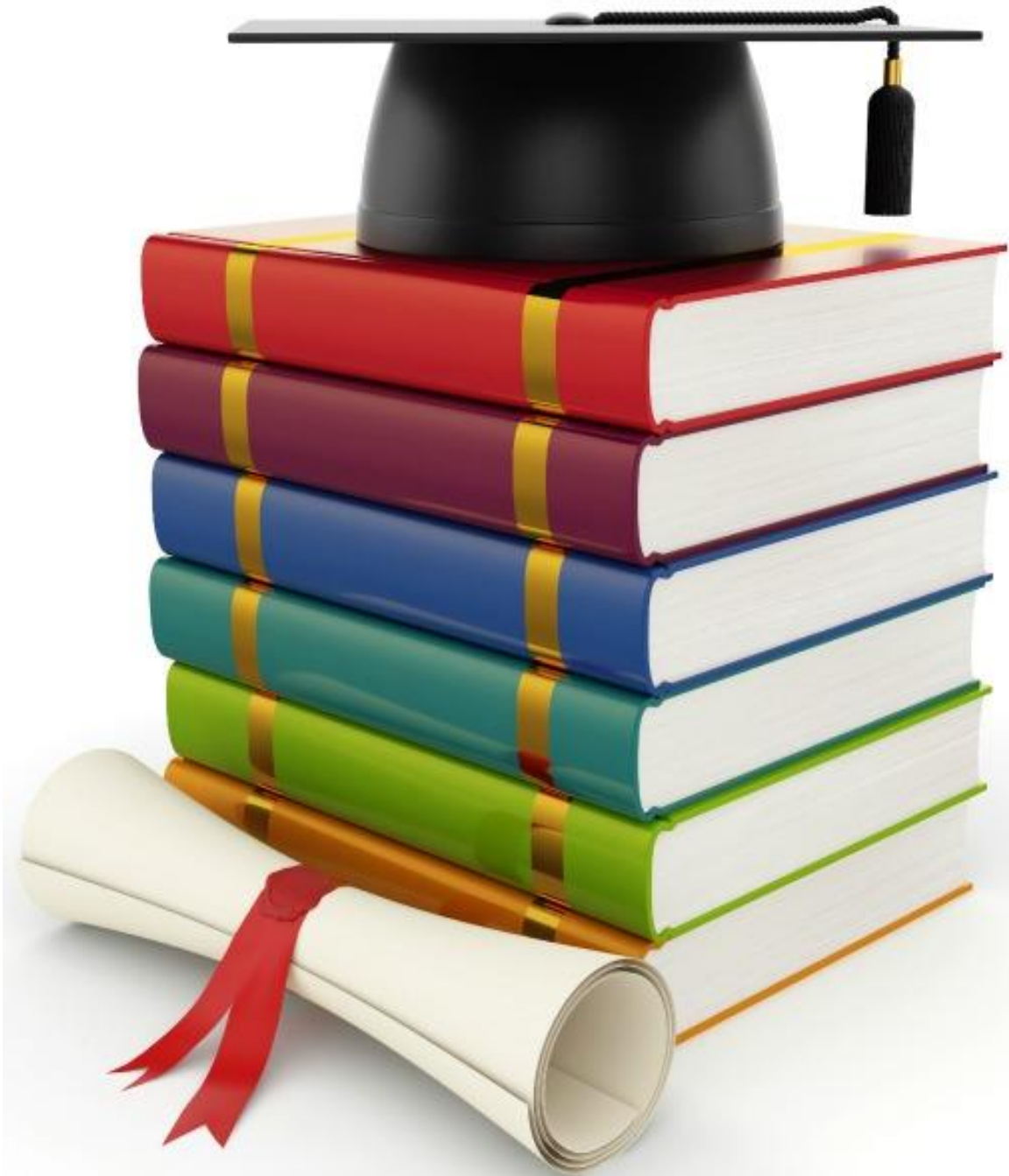
Dans le deuxième chapitre, On a présente une définition générale de l'onduleur et leur type. Ensuite, On a étudié les onduleurs multiniveaux avec leur type et la commande de cette dispositif. Ainsi, On a détail sur le type NPC d'onduleur multiniveaux et leur commande.

## Conclusion générale

---

Dans le troisième chapitre, On a présente le principe du filtrage actif parallèle nous établissons une méthode d'identification des courants harmoniques.

Dans le quatrième chapitre, On a présente la commande prédictive et appliquée cette méthode en onduleur trois niveau de type NPC pour injecte la courante produite à la sortie en réseau.



### Les références bibliographiques

- [1] AMROUNE Mourad " Commande et diagnostic d'un filtre actif parallèle ", Mémoire de Master en génie électrique, Option Commande des Systèmes Electriques, Université de M'silla 2015/2016.
- [2] G. Nabil et R. Noui, "Application de filtrage actif parallèle sur une charge dynamique non linière," Mémoire d'ingénieur, Université de M'sila, 2007.
- [3] DUFFEY, Christopher K. et STRATFORD, Ray P. Update of harmonic standard IEEE-519: IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems. *Industry. Applications, IEEE Transactions on*, 1989, vol. 25, no 6, p. 1025-1034.
- [4] Tandjaoui Mohammed Nasser, Benachaibachellali, AbdelkhalekOthmane, Banoudjafer Cherif " Amélioration de la qualité de l'énergie électrique d'une charge sensible par un DVR – Modélisations et simulation ", Université de Béchar, 2015.
- [5] VANYA IGNATOVA, « Méthodes d'analyses de la qualité de l'énergie électrique, application au creux de tension et à la pollution harmonique », Thèse de doctorat de l'UDF. Université JOSEPH FOURIER Octobre 2006.
- [6] BENSLIMANE TARAK." Commande numérique d'un filtre actif parallèle autonome « Mémoire de Magister en Electrotechnique, Option systèmes d'entrainements électrique. Ecole Militaire Polytechnique, 2004.
- [7] TIAIBA Abd elbassit "Utilisation d'un onduleur multi niveau pour la compensation de l'énergie électrique », Mémoire de master, Université de M'silla 2015/2016.
- [8] François Defay " commande prédictive directe d'un convertisseur multicellulaire triphasé pour une application de filtrage actif". Thèse de doctorat, l'institut national polytechnique de Toulouse, décembre 2008.
- [9] GHADBANE Ismail" Etude Et Réalisation D'un Filtre Actif Parallèle En Utilisant Différentes Stratégies De Contrôle ", Université Mohamed Khider – Biskra, Soutenue publiquement le 05/05/2016.
- [10] NEKKAR DJAMEL." Contribution à l'étude des Stratégies de Commande des Filtres Actifs Triphasés" Mémoire de Magister en Electrotechnique, Option de Commande des Machines Electrique. Université Mohamed Chérif Messaadia de SOUK-AHRAS, 2013-2014.
- [11] Djaffar Ould Abdeslam, "Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension," Thèse Doctorat, Université haut alsace, 2005.
- [12] Steeve Beaulieu, "Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmonique en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique," Mémoire de Fin d'Etudes, Université Québec à Chicoutimi, Mai 2007.

## Les références bibliographiques

---

- [13] MESBAHI NADHIR." Contribution à l'Etude des Performances des Onduleurs Multi-niveaux sur les Réseaux de Distribution" Thèse de Doctorat, Option Réseaux Electriques. Université Badji Mokhtar de ANNABA, 2014.
- [14] AMROUNE Mourad " Commande et diagnostic d'un filtre actif parallèle «, Mèmoire de master en genie électrique , universitèe de m'sila, 2015/2016.
- [15] K. Med Racim et B. Karim, "Paramètres de la qualité de la tension d'un réseau électrique étude et analyse," Mémoire d'ingénieur, Ecole nationale Polytechnique, Alger2008.
- [16] M. Fatiha, "Etude et commande d'un filtre actif parallèle à structure de tension," Mémoire de Magister, Université d'Oran, Octobre 2001.
- [17] Kamil Mohammed et Nouri Salih, "Commands non linéaires d'un filter active parallel," Memories d'Ingénieur, Universite de M'sila, 2010.
- [18] M.A. Alali, "Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension", Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg I,Septembre 2002.
- [19] CHALAH Samira "Analyse Stochastique De La Résultante De L'Injection De Courants Harmoniques Dans Un Réseau Electrique", Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU 2012
- [20] KAMEL ALIOUANE, "Contribution à l'étude du filtrage d'harmoniques des réseaux de distribution à l'aide de l'association de filtres actif et passif parallèle", Thèse de doctorat l'INP de lorraine, Nancy, 1995.
- [21] H. Sakkou « Conception d'une compensatrice active multifonction corrigeant toutes les perturbations en tension générées par les charges non linéaires et les fours à arc », Mémoire comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise en génie électrique. Université de Québec 2007.
- [22] I. ETXEBERRIA, « Actionneurs réseaux dédiés à la qualité d'énergie ». Thèse de Doctorat de l'INPG, Grenoble, France, (2003).
- [23] ZELLOUMA LAID." Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé » Mémoire de Magister, Option de Commande des machines électrique. Université de BADJI MOKHTAR-ANNABA, 2006.
- [ 24] R.Calvas ; « Les Perturbations Electriques » ; Merlin Guerin N°141., Mai 2001.
- [27] " La protection contre les surtensions" Cahier technique Schneider, Schneider Electric - Guide de l'installation électrique 2010.
- [28] BRIGHEN Haroun et HALAIMIA Safouane "Etude et analyse de la commande des onduleurs Multi-niveaux par MLI sinusoïdale" Mèmoire pour obtenir diplôme de master, UNIVERSITE LARBI TEBSSI-TEBESSA- , Promotion 2015-2016.

- [29] F.S. Kang S. Park S. E. Cho, C. Kim and T. Ise, "Multilevel PWM Inverters Suitable for the Use of Stand-Alone Photovoltaic Power Systems", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.20, n°4, Décembre 2005, pp. 906-915.
- [30] F. Kang, S. Park, M. Lee and C. Kim, "An Efficient Multilevel-Synthesis Approach and Its Application to a 27-Level Inverter", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.52, n°6, December 2005, pp. 1600-1606.
- [31] José Rodriguez, Jih-Sheng Lai and Fang Zheng Peng, "Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, No. 4, August 2002, pp. 724-736.
- [32] S. Guy, B. Robert, Labrique Francis, Les convertisseurs de l'électronique de puissance la conversion alternatif (volume 4). Edition tec&doc, 1995.
- [33] T. Wildi : Electrotechnique, 3eme édition, éditions de Boeck université (1999).
- [34] BOUKAROURA Abdelkader « Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond-Graph », Mémoire pour l'obtention du Diplôme de magister en électrotechnique, Université ferhat abbes Sétif ,Soutenu le 02/ 12 / 2009.
- [38] Madi yazid « Etude des onduleurs multiniveaux dans les chaines de production d'énergie éolienne », Mémoire de magister, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2009.
- [41] Omar Bouhali, contribution des convertisseurs multiniveaux au raccordement de la production d'origine éolien sur un réseau électrique, thèse de doctorat soutenue le 19 Avril 2007.
- [44] 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.
- [45] C. Canudas de Wit, Modélisation, Contrôle vectoriel et DTC.Commande des moteurs asynchrones 1Editions Hermès.
- [46] 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.
- [49] BAKHI Hamza « Commande d'un filtre actif triphasé shunt par logique floue» mémoire de Master. Université de M'sila, 2015.
- [51] KIFOUCHE REZKI."Identification des harmoniques et génération du courant de référence: application au convertisseur statique " Mémoire de Magister en Electricité, Option de équipements électriques industriels. Université M'HAMED BOUGUARRA BOUMERDES, 2005.
- [52] tadjer AHMED." Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque "GPV"" thèse de Magister en Génie Electrique, Option de équipements Electriques Industriels. Université de M'HAMED BOUGUARRA BOUMERDES, 2008.

## Les références bibliographiques

---

[53] YAHIAOUI Ahmed Lamine« Détection de défaut des convertisseurs de puissance : Application au filtre actif parallèle » mémoire de Master. Université de M'sila, 2014.

[54] KEBIRI SAMIA." Modélisation et simulation d'un filtre actif multiniveaux " Mémoire de Magister en Electrotechnique, Option Machine Electrique. Université Mouloud mammeri de TIZIOUZOU, 2009.

[57] KIFOUCHE REZKI."Identification des harmoniques et génération du courant de référence: application au convertisseur statique " Mémoire de Magister en Electricité, Option de équipements électriques industriels. Université M'HAMED BOUGUARRA BOUMERDES, 2005.