

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras

Faculté des Sciences et de la Technologie



Mémoire de Magister

Spécialité : Electrotechnique

Option : Commande des Machines Electriques

Thème :

Contribution à l'Etude des Stratégies de Commande des Filtrés Actifs Triphasés

Présenté par

NEKKAR Djamel

Devant le jury composé de :

Président :	Khaled Khelil	MCA	Université de Souk Ahras
Rapporteur	Riad Toufouti	MCA	Université de Souk Ahras
Examineurs :			
Salah Saad	Professeur		Université d'Annaba
Hocine Labar	Professeur		Université d'Annaba

Dédicaces

Il m'est difficile d'exprimer tout ce que je dois à ma famille. Je pense particulièrement à mon Père et ma Mère pour l'incalculable soutien moral et logistique et les nombreux encouragements que j'ai toujours reçus de leur part.

Remerciement

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au sein de Laboratoire d'Electrotechnique et Energies Renouvelables (LEER) de Souk Ahras, A l'issue de ce travail je tiens à adresser ma reconnaissance et mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, chacune à leur manière, à l'accomplissement de ce mémoire.

*Tout d'abord, je tiens à remercier très chaleureusement mon directeur de mémoire Monsieur : **R.TOUFOUTI**, Maitre de conférence à l'Université de Souk Ahras, pour son encadrement, son suivi permanent et ses précieux conseils.*

*Je tiens également à remercier vivement les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et ce mémoire: Monsieur **K.KHELIL**, Maitre de conférence à l'Université de Souk Ahras, d'avoir accepté de juger mon travail et de présider le jury de soutenance de ce mémoire.*

*Messieurs: **H.LABAR** Professeur à l'Université d'Annaba, et Monsieur: **S. SAAD** Professeur à l'Université d'Annaba pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être les rapporteurs de ce mémoire.*

*J'exprime mes sincères remerciements à Monsieur **Z.CHELLI**, enseignant à l'Université de Souk Ahras, pour avoir co-dirigé ce mémoire, pour sa disponibilité et pour ses conseils avisés.*

*Mes remerciements vont aussi à mes amis et collègue, en particulier : **R.DABOUB**, **I.ABADLIA** et **K.MAAZI**, avec lesquels j'ai partagé beaucoup de moments.*

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	05
----------------------------	----

Chapitre I: Généralité et Etat de L'art de la Qualité de l'énergie Electrique

I. INTRODUCTION.....	07
I.1 DEGRADATION DE LA QUALITE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE.....	07
I.1.1 Creux de tension	07
I.1.2 Déséquilibre du système triphasé	08
I.1.3 Fluctuations de tension (ou flicker)	09
I.1.4 Harmoniques et inter-harmoniques	09
I.1.5 Inter-Harmoniques.....	10
I.2 SOLUTIONS POUR AMELIORER LA QUALITE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE	10
I.2.1 Creux de tension	10
I.2.2 Déséquilibre du système triphasé	11
I.2.3 Fluctuations de tension (ou flicker)	11
I.2.4 Dépollution des harmoniques.....	11
I.2.4.1 Solutions traditionnelles.....	11
a. Agir sur la structure de l'installation	11
b. Augmentation de la puissance de court-circuit	11
c. Placée une inductance de ligne.....	12
d. Rééquilibrage des courants du réseau électrique	12
e. Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique	12
f. Compensation de la puissance réactive	12
g. Les filtres passifs	12
I.2.4.2 Solutions modernes.....	15
a. Redresseur dodécaphasé	15
b. Les filtres actifs	15
c. Filtre hybride	18
I.3 ÉTAT DE L'ART	20
I.4 COMPARAISON DES DIFFERENTS TYPES DE PERTURBATIONS.....	26
I.5 CONCLUSION	27

Chapitre II: Filtre Actif Parallèle

II INTRODUCTION.....	28
II.1 DESCRIPTION DU SYSTEME.....	28
II.1.1 Modèle du Réseau d'Alimentation	28
II.1.2 Modèle de la Charge	28
II.1.3 Structure du Filtre Actif Parallèle	29
II.1.3.1 Etudes de la partie puissance	30
a. Modélisation de l'onduleur de tension deux niveaux	30
b. Système de stockage d'énergie	32
c. Filtre de sortie	32
II.1.3.2 Etude de la partie commande.....	32
a. Commande en pleine onde	33
b. Commande par hystérésis	34
c. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	35
d. Commande par MLI vectorielle	36
II.2 REGLAGE DE LA TENSION CONTINUE DE L'ONDULEUR	37

II.2.1	Difficulté de la Régulation.....	37
II.3	DIMENSIONNEMENT DES PARAMETRES DU FILTRE SHUNT ACTIF.....	38
II.3.1	Dimensionnement du condensateur.....	38
II.3.2	Dimensionnement du filtre de sortie.....	38
II.3	CONCLUSION	39

Chapitre III: Méthodes d'Identification des Harmoniques du FAP

III.	INTRODUCTION.....	40
III.1	TECHNIQUES D'IDENTIFICATION DES HARMONIQUES	40
II.1.1	Identification dans le Domaine Fréquentiel	41
III.1.1.1	<i>Transformée de Fourier rapide (FFT)</i>	41
III.1.1.2	<i>Transformée de Fourier discrète (DFT)</i>	41
III.1.1.3	<i>Transformée de Fourier discrète récursive (DFTR)</i>	42
III.1.2	Identification dans le Domaine Temporel.....	42
III.1.2.1	<i>Théorie de la puissance instantanée (pq)</i>	42
III.1.2.2	<i>Théorie du référentiel synchrone (dq)</i>	44
III.1.2.3	<i>Théorie des puissances instantanées dans le référentiel (pqr)</i>	47
III.2	SIMULATION NUMERIQUE SOUS MATLAB SIMULINK	50
III.2.1	Résultat de Simulation du FAP sans Régulation du Bus Continu	52
III.2.2	Résultat de Simulation du FAP avec Régulation du Bus Continu.....	59
III.2.3	Etudes Comparatives Entre les Méthodes de Commande.....	68
III.3	CONCLUSION.....	68

Chapitre IV: Filtre Actif Parallèle à Base des Onduleurs Trois Niveaux

IV.	INTRODUCTION	69
IV.1	ONDULEURS MULTI-NIVEAUX.....	69
IV.1.1	Topologies des Onduleurs Multi-Niveaux.....	69
IV.1.1.1	<i>Topologie basée sur la mise d'onduleurs 2-niveaux en cascade</i>	69
IV.1.1.2	<i>Topologie multicellulaire où à cellules imbriquées</i>	70
IV.1.1.3	<i>Topologie NPC (Neutral Point Clamped)</i>	70
IV.1.2	Les Avantages des Onduleurs Multi-Niveaux.....	70
IV.1.2.1	<i>Les Avantages technologiques</i>	70
IV.1.2.2	<i>Les Avantages fonctionnelles pour le convertisseur</i>	70
IV.1.2.3	<i>Les Avantages fonctionnelles pour les machines tournantes</i>	70
IV.2	ONDULEUR DE TENSION TROIS NIVEAUX N.P.C	71
IV.2.1	Structure de l'onduleur à Trois Niveaux N.P.C.....	71
IV.2.2	Fonctionnement et Configuration d'un Bras d'Onduleur à Trois Niveaux.....	72
IV.2.3	Algorithme de Commande de l'Onduleur Trois Niveaux.....	74
IV.3	SIMULATION NUMERIQUE SOUS MATLAB SIMULINK	74
IV.3.1.	Commande du FAP Trois Niveaux sans Régulation du Bus Continu.....	76
IV.3.2	Commande du FAP Trois Niveaux avec Régulation du Bus Continu.....	83
IV.4	ETUDES COMPARATIVES	92
IV.4.1.	Commande du FAP Trois Niveaux sans et avec Régulation du Bus Continu....	92
IV.4.2	Commande du FAP Deux et Trois Niveaux sans Régulation du Bus Continu...	92
IV.4.3	Commande du FAP Deux et Trois Niveaux avec Régulation du Bus Continu...	93
IV.5	CONCLUSION.....	94

CONCLUSION GENERALE	95
----------------------------------	-----------

SYMBOLES

U_{1i}	: Composante inverse de tension
U_{1o}	: Composante homopolaire de tension
U_{1d}	: Composante directe de Tension
ΔU_i	: Rapport de la composante inverse sur la composante directe
ΔU_0	: Rapport de la composante homopolaire sur la composante directe
v_s	: Tension de source
i_s	: Courant de source
R_s	: Résistance de court circuit de réseau
L_s	: Inductance de court circuit de réseau
R_c	: Résistance de ligne
L_c	: Inductance de ligne
R_d	: Résistance de la charge
L_d	: Inductance de la charge
R_f	: Résistance de filtre de sortie
L_f	: Inductance de filtre de sortie
C_{dc}	: Condensateur de stockage
v_{dc}	: Tension continue de l'onduleur
v_f	: Tension de filtre
i_f	: Courant de filtre
i_l	: Courant de charge
i_h	: Courant harmonique
i_{ref}	: Courant de référence
$v_{dc\ ref}$: Tension de référence
$X_\alpha ; X_\beta$: Valeur dans le repère ($\alpha\beta$)
p	: Puissance instantané active
q	: Puissance instantané réactive
\bar{p}, \bar{q}	: Puissance continue liée à la composante fondamentale active et réactive du courant
\tilde{p}, \tilde{q}	: Puissance alternative liées à la somme des composantes harmonique du courant.
v_u	: Vecteur unité
i_p	: Projection de courant sur l'axe p
i_q	: Projection de courant sur l'axe q
i_r	: Projection de courant sur l'axe r
v_p	: Projection de tension sur l'axe p
v_q	: Projection de tension sur l'axe q
v_r	: Projection de tension sur l'axe r
I_{loss}	: Le courant de référence additionnel
K_p, k_i	: Les termes du correcteur PI
ζ	: Coefficient d'amortissement
ω_c	: Fréquence de la coupure
f_c	: Fréquence de la commutation

Introduction Générale

Introduction Générale

En se propageant à travers les réseaux électriques, les tensions et les courants sont idéalement des ondes sinusoïdales à la fréquence fondamentale du réseau. Cependant, selon les travaux de recherches publiées dans la littérature, nous constatons que la qualité de l'onde électrique est loin d'être parfaite, à cause d'une large utilisation de charges non linéaires, telles que des redresseurs à diodes ou thyristors, des alimentations à découpage, etc.

En effet, ces charges non linéaires génèrent des harmoniques de courant et consomment de la puissance réactive, ce qui conduit à des conséquences directes sur la forme des ondes de tension et de courants qui deviennent non sinusoïdaux et donc une disfonctionnement de plusieurs appareils sensibles à ce genre de problèmes tels que les appareils médicaux, ordinateurs, automates programmables, machines tournantes...etc. Par conséquent, il est nécessaire de réduire les harmoniques dominants en dessous de 5% comme spécifié dans la norme harmonique IEEE.

Pour cette raison, des standards de délimitations d'harmoniques ont été recommandés pour limiter les harmoniques de courant injectés dans le réseau par des charges non linéaires. Pour réduire ces perturbations et ainsi améliorer la qualité de l'énergie distribuée, il existe plusieurs solutions, parmi elles: Les filtres passifs, qui sont souvent appelés filtres piègeurs d'harmoniques, ont été utilisés pour éliminer les harmoniques de courants et améliorer le facteur de puissance. Ces solutions sont très simples, à bas prix, mais les filtres passifs comme solution traditionnelle aux problèmes des harmoniques s'accompagnent de différents inconvénients dont la dépendance des caractéristiques de compensation sur les paramètres du réseau et la provocation de résonances, en plus ils ne fonctionnent plus lorsque les caractéristiques de la charge évoluent et ils peuvent altérer d'une manière indirecte la propagation des harmoniques puisque leur comportement dépend fortement de la structure du réseau, donc ils ne répondent pas toujours correctement aux résultats voulues.

C'est pourquoi la solution des filtres actifs de puissance s'est largement développée cette dernière décennie. Ils compensent, en temps réel, les perturbations dues à une charge non linéaire. Néanmoins, la commande des filtres actifs est délicate. Parmi les filtres actifs les plus utilisés, il existe le filtre actif parallèle, qui présente un filtre actif connecté en parallèle avec le système polluant, il injecte au réseau un courant de même amplitude que celle du courant harmonique à éliminer mais en opposition de phase. Le fonctionnement de filtre actif

parallèle est assuré par deux blocs : le premier, génère les signaux de référence de commande et le second, exécute le procédé de commande. Ainsi, la qualité de filtrage sera déterminée par la qualité de contrôle de ces deux blocs.

▣ Dans ce contexte, ce mémoire traite des différents aspects concernant la qualité de l'énergie électrique. Nous examinons les perturbations affectant la qualité de l'onde, les normes pour limiter l'émission des harmoniques et les principaux moyens de mitigation usuels. Nous développons des algorithmes et stratégies de commande des dispositifs de mitigation. Le travail présenté comporte quatre chapitres organisés comme suit :

▣ Dans le premier chapitre, nous abordons en premier lieu les différents problèmes affectant la qualité de l'énergie électrique, ce qui tend à montrer leurs origines et leurs conséquences sur les installations. Nous focalisons le point sur celui des harmoniques, compte tenu de sa gravité avec la prolifération des charges non-linéaires. Ensuite nous passons aux moyens de luttés et les différentes solutions traditionnelles et modernes de dépollution harmonique existantes. Dans la dernière partie de ce chapitre on présente un état de l'art actuel sur les filtres actifs.

▣ Dans le deuxième chapitre, nous décrivons la structure du filtre actif parallèle à deux niveaux. Ensuite, nous aborderons la modélisation et la mise en équation de l'ensemble réseau-charge polluante-filtre actif sont présentés avec une étude détaillé de la partie puissance et commande du filtre actif parallèle.

▣ Le troisième chapitre, représente l'objectif principal du travail présenté dans ce mémoire, où nous présenterons la description des méthodes d'identification des harmoniques à savoir: la méthode des puissances instantanées, la théorie de référentiel synchrone et la théorie des puissances instantanées dans le référentiel en utilisant un onduleur de tension à deux niveaux, des tests de simulation du système, de chacune des méthodes d'identification.

▣ Le quatrième chapitre, est consacré à l'étude du filtre actif en utilisant un onduleur de tension à trois niveaux, pour but d'améliorer le contenu total d'harmonique (THD). Les stratégies de commande présentées précédemment ont été implantées numériquement sur l'environnement Matlab/Simulink.

▣ Enfin, notre travail sera clôturé par une conclusion et quelques perspectives.

**Chapitre I:
Généralité et État de l'Art de
la Qualité de l'Energie
Electrique**

I. INTRODUCTION

La qualité de l'énergie électrique, au niveau de la distribution, se réfère largement à maintenir une tension sinusoïdale, d'une amplitude et fréquence nominales [1]. De ce fait la notion « qualité de l'énergie » est devenue très importante, en raison de l'utilisation à grande échelle de systèmes à base d'électronique de puissance à la fois par les utilisateurs et les fournisseurs [2]. L'énergie électrique doit d'être délivrée sous forme d'un système de tensions sinusoïdales triphasées et équilibrées. Ce système de tensions est caractérisé par :

- ✓ L'égalité de l'amplitude des trois tensions.
- ✓ La fréquence.
- ✓ La forme d'onde qui doit être sinusoïdale.
- ✓ La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et leurs déphasages relatifs.

La qualité de l'énergie délivrée aux utilisateurs dépend de ces quatre paramètres [3].

I.1. DEGRADATION DE LA QUALITE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

Les perturbations de tension sont la cause la plus fréquente d'un large éventail de perturbations dans les systèmes d'alimentation industriels et commerciaux [4]. Les perturbations peuvent être transitoires, de courte durée, de longue durée ou périodiques.

Toutefois, les problèmes les plus souvent rencontrés sont:

- ✓ Creux de tension;
- ✓ Déséquilibre du système triphasé;
- ✓ Fluctuations de tension (ou flicker);
- ✓ Harmoniques et inter-harmoniques.

N'importe quelle perturbation affecte un ou plusieurs paramètres suivants du système:

- ✓ Amplitude de tension ou de courant;
- ✓ Fréquence.
- ✓ Contenu spectral.

Deux facteurs ont une influence directe sur l'effet de la perturbation [5]:

- ✓ Durée de la perturbation.
- ✓ Impédance de la source.

I.1.1 Creux de Tension

Un creux de tension est une diminution de la tension à une valeur située entre 1 et 90% de la tension nominale et d'une durée allant de 10 ms jusqu'à 1 minute. Une coupure brève est un cas particulier du creux de tension voir la figure 1.1.

Sa profondeur est supérieure à 99% ; elle est caractérisée uniquement par sa durée (inférieure à 3 minutes). Les coupures longues sont supérieures à 3 minutes [6]. Les creux de tension sont dus à l'apparition de défauts sur l'installation ou sur le réseau de distribution. Les coupures brèves sont généralement la cause de manœuvres des automatismes des réseaux de distribution (réenclencher, isolations de défaut) [7].

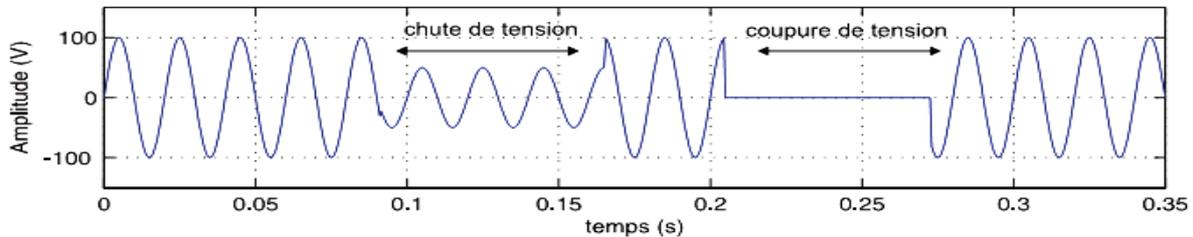


Figure 1.1: Creux et coupures de tension

- **Conséquences** : perturbation ou arrêt du procédé, pertes de données, données erronées, ouverture de contacteurs, verrouillage de variateurs de vitesse, ralentissement ou décrochage des moteurs et extinction de lampes à décharge [8].

I.1.2 Déséquilibre du Système Triphasé

Trois grandeurs de même nature et de même pulsation forment un système triphasé équilibré lorsqu'elles ont la même amplitude et lorsqu'elles sont déphasées de $\pm 120^\circ$. Lorsque les grandeurs ne vérifient pas ces conditions de phase et d'amplitude, on parle d'un système triphasé déséquilibré ce qui est bien démontré dans la figure.1.2 [9]. Le degré de déséquilibre est défini en utilisant la méthode des composantes de Fortescue par le rapport de la composante inverse (U_{1i}) (ou homopolaire (U_{1o})) du fondamental à celui de la composante directe (U_{1d}) du fondamental.

$$\Delta U_i = \frac{|U_{1i}|}{|U_{1d}|} \quad (1.1)$$

et

$$\Delta U_o = \frac{|U_{1o}|}{|U_{1d}|} \quad (1.2)$$

Les défauts monophasés ou biphasés provoquent des déséquilibres jusqu'au fonctionnement des protections [10].

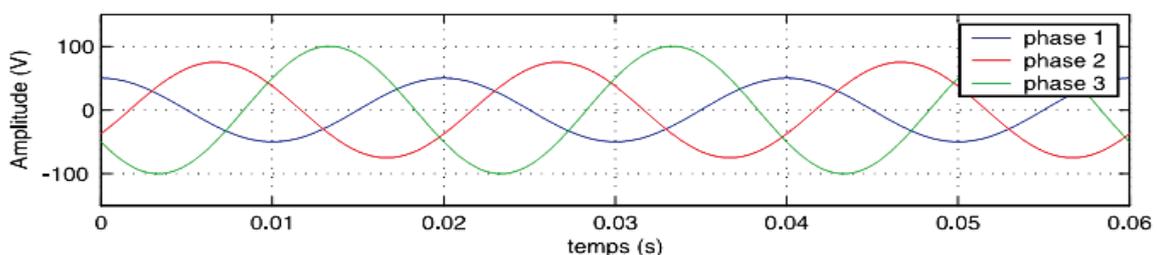


Figure 1.2: Déséquilibre du système triphasé de tension

- **Conséquences:** couples moteurs inverses (vibrations) et sur-échauffement des machines asynchrones [8].

I.1.3 Fluctuations de Tension (Flicker)

Les variations de tension sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10 % de la tension nominale et les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude [11]. Le terme Flicker est dérivé de l'impact visible sur les lampes (papillotement de la lumière) dû à la fluctuation de la tension. Parmi les causes les plus fréquentes de la fluctuation de la tension dans les réseaux de transmission et distribution sont les fours à arc [12].

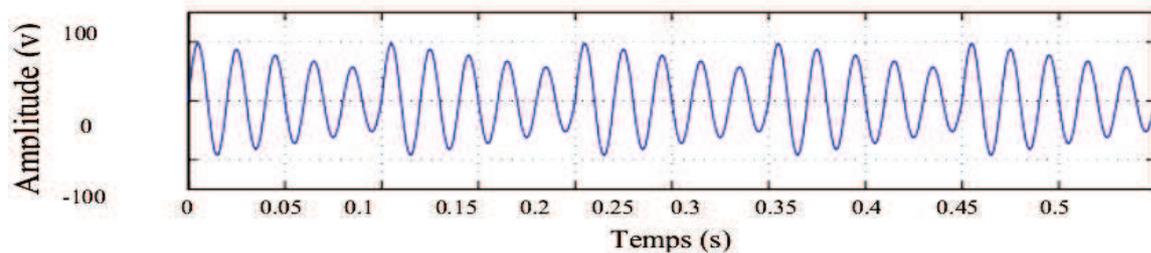


Figure 1.3: Fluctuations de tension

- **Conséquences :** Fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker) [8].

I.1.4 Harmoniques

Les principales sources d'harmoniques sont les dispositifs contenant des éléments qui commutent (les convertisseurs statiques), et les dispositifs à caractéristique tension- courant non linéaire (fours à arc inductances saturées, transformateurs, machines tournantes, etc.) [9]. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau [13].

- **Conséquences:** surcharges (du conducteur de neutre, des sources...), déclenchements intempestifs, vieillissement accéléré et dégradation du rendement [8].

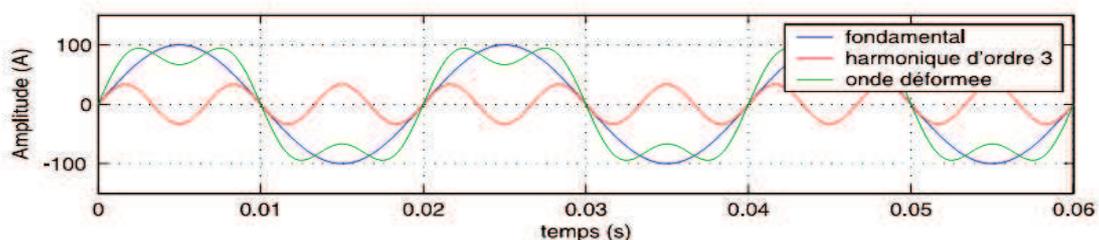


Figure 1.4: Harmoniques

- **Effets des harmoniques :** Bien que les susceptibilités des différents appareils à l'égard des harmoniques soient très diversifiées, on distingue schématiquement deux sortes d'effets possibles :
 - *Les effets quasi instantanés:* sur certains types d'appareillage, tels que l'électronique de puissance, calculateurs, relais, systèmes de contrôle et régulation, etc., la présence d'harmoniques sur les signaux provoque le déplacement du passage par zéro et des modifications de la valeur de crête de l'onde [6].
 - *Les effets à terme :* Dans les machines tournantes, les transformateurs et les condensateurs, ils se manifestent par des échauffements supplémentaires ; ce qui entraîne la destruction du matériel ou plus fréquemment une diminution de leur durée de vie par surcharge thermique [14].

I.1.5 Inter-Harmoniques

Les inter-harmoniques sont superposées à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau [11]. Les inter-harmoniques sont souvent produites par des convertisseurs statiques de fréquence, les cycloconvertisseurs, les moteurs asynchrones et les dispositifs à arc électrique [12].

- **Conséquences:** perturbation des signaux de tarification et papillotement (Flicker) [8].

I.2 SOLUTIONS POUR AMELIORER LA QUALITE DE L'ENERGIE

Le choix de la solution la plus appropriée dépend des caractéristiques de l'offre au niveau du point de connexion, les exigences de la charge et de l'économie [15]. 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 [12].

I.2.1 Les Creux de Tension [15]

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. Le compensateur série est capable de restaurer la tension au niveau du

côté de la charge en cas de chute de tension [16].

I.2.2 Déséquilibre du Système Triphasé

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension résultent généralement des charges monophasées et biphasées mal réparties [13], 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 [17].

I.2.3 Fluctuations de la Tension (Flicker)

Pour les fluctuations de la tension, 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 [18].

I.2.4. 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. Ils travaillent en combinaison avec le réseau, en superposant leur énergie à celle de ce dernier [19]. Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques peu ou moins polluants, tandis que la seconde réalise un filtrage des composantes harmoniques [20]. Deux groupes de solutions de dépollution pour compenser toutes les perturbations peuvent être distingués: les solutions traditionnelles et les solutions modernes [21].

1.2.4.1 Solutions traditionnelles

a) Action sur la structure de l'installation : Il est souhaitable d'alimenter un grand pollueur par un transformateur à part, afin de le séparer d'un récepteur sensible. Face à un pollueur moyen il est préférable d'effectuer l'alimentation par des câbles distincts au lieu de les connecter en parallèle. Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles [22].

b) Augmentation de la puissance de court-circuit : La puissance harmonique augmente lorsque la puissance de court circuit diminue si l'on ne prend pas en compte les phénomènes de résonance [23]. La diminution de l'impédance totale en amont de la charge non-linéaire permet de réduire la tension créée par les harmoniques de courant, et donc de diminuer le taux

de distorsion harmonique en tension au point de raccordement. En revanche, les courants harmoniques ne sont pas atténués [20].

c) Placement d'une inductance de ligne : Dans le but de limiter la prolifération des effets nocifs dans le réseau, il est possible de limiter les courants harmoniques de certains convertisseurs [24]. Cette solution est utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse) et les redresseurs triphasés. Elle consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non linéaire. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux [25].

d) Rééquilibrage des courants du réseau électrique : Répartition égale des charges sur les trois phases.

- Compensateur passif, par exemple montage de Steinmetz qui provoque un fort déséquilibre pour les fréquences différentes de 50HZ avec des résonances qu'il faut éviter d'exciter à proximité d'un générateur d'harmonique [26].

e) Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique : L'utilisateur ne souhaite pas résoudre les problèmes de pollution mais seulement le souci de la bonne santé de ses équipements. Cette approche, économiquement très contraignante ne s'applique que pour des nouvelles installations [23]. On procède généralement au surdimensionnement des équipements afin d'assurer leur tenue aux surcharges harmoniques. Cette solution n'agit pas sur les harmoniques qui ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur [22].

f) Compensation de la puissance réactive : La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance [27]. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau, à proximité des charges qui ont un mauvais facteur de puissance pour la compensation locale ou près d'un transformateur d'alimentation pour la compensation globale [26].

g). Les filtres passifs

g.1) Classification des filtres passifs : Les solutions conventionnelles aux problèmes de distorsion harmonique existent depuis longtemps. Le filtrage passif est la plus simple solution conventionnelle pour atténuer la distorsion harmonique [28]. Les filtres passifs sont des éléments à base d'inductance, capacité et résistance configurés et réglés pour contrôler les harmoniques. On peut classer les filtres passifs suivant leur fréquence de résonance, leur mode de connexion et leur emplacement sur le réseau. Cela permet de définir deux grands modes de filtres passifs: les filtres séries utilisés pour les charges

génératrices de tensions harmoniques et les filtres parallèles utilisé dans le cas des charges génératrices de courants harmoniques et suivant le modèle choisi, les harmoniques peuvent être : précisément bloqués par une grande impédance série entre le convertisseur, déviés par une faible impédance en parallèle ou une combinaison des deux.

g.2) Filtre passif série : Une façon d'atténuer les harmoniques générées par les charges non linéaires est d'introduire un filtre passif série (Figure 1.5), dans l'alimentation d'entrée ligne de sorte que le filtre offre une impédance élevée à la circulation des harmoniques à partir de la source à la charge non-linéaire. 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 [29].

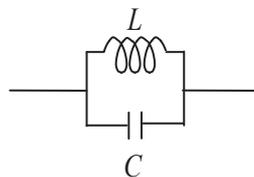


Figure 1.5: Filtre passif série

g.3) Filtre passif parallèle : Le filtre passif parallèle est montré sur la Figure 1.6. Il est constitué d'une inductance en parallèle avec un condensateur. Il présente une impédance faible pour tous les harmoniques et une impédance suffisamment importante par rapport au fondamental, ce qui empêche les courants harmoniques de se propager vers le réseau. Le filtre passif parallèle a un comportement inductif pour les fréquences inférieures à la fréquence fondamentale et un comportement capacitif pour les fréquences supérieures à la fréquence fondamentale, ce qui est un avantage majeur pour le contrôle du courant dans l'inductance [30].

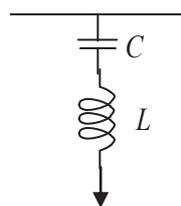


Figure 1.6: Filtre passif parallèle

En général dans l'usage, on rencontre deux types de filtres passifs parallèles : le filtre passif amorti et le filtre passif résonant.

❶ **Filtre passif amorti :** Le filtre amorti peut réduire le risque de résonance non souhaitée, et permet de réduire considérablement la taille du filtre passif, en fonctionnant sur une large gamme de fréquence. On distingue trois types de filtre amorti : le filtre de premier ordre est très peu utilisé car il exige une grande capacité et provoque des pertes de puissance élevées. Les filtres de deuxième et troisième ordres sont plus performants [31].

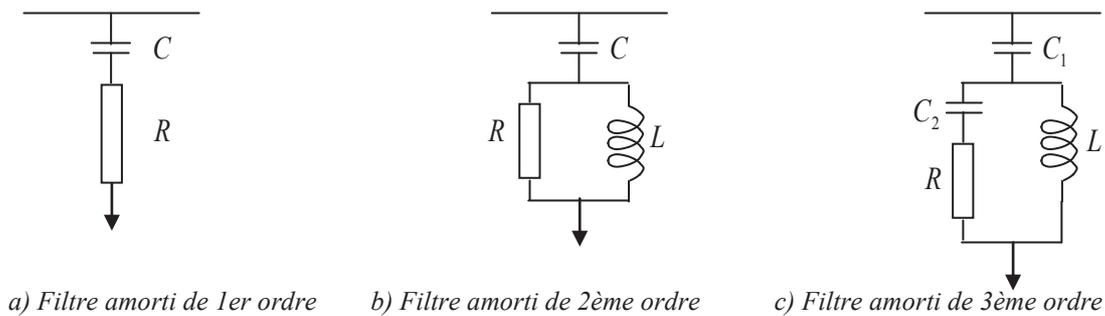


Figure 1.7: Filtre amorti

② **Filtre résonant** : Le filtre passif résonnant est constitué d'un circuit résonnant composé d'un condensateur et d'une inductance en série accordés sur la fréquence de l'harmonique que l'on veut éliminer. Ce filtre possède une impédance faible pour l'harmonique concerné et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau [32]. Lorsque l'on souhaite réaliser le filtrage d'un signal déformé entaché par plusieurs courants harmoniques, il est nécessaire de prévoir un ensemble de filtres où chacun d'entre eux agit sur le rang harmonique à éliminer voir la figure 1.8 [33].

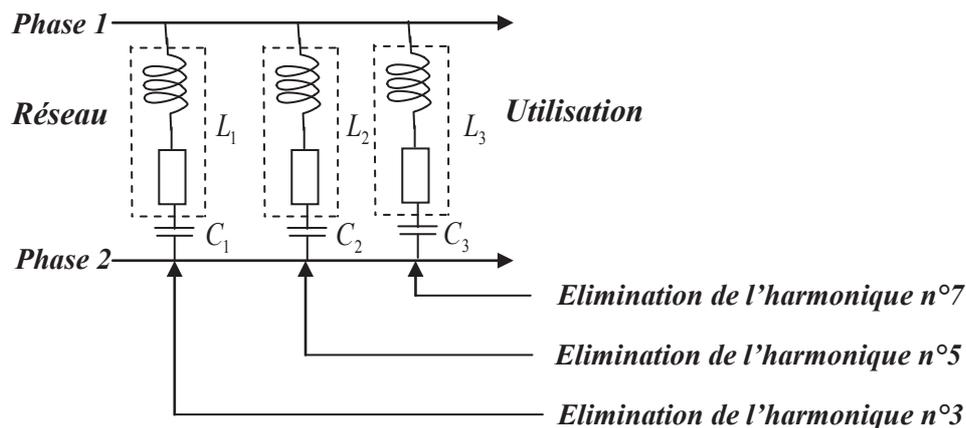


Figure 1.8: Filtrés résonants agissant sur plusieurs rangs harmoniques

g.4) Les avantages et les inconvénients des filtres passifs : Le filtrage passif a déjà largement fait ses preuves dans le milieu industriel grâce à son coût faible, son efficacité et son adaptation pour des réseaux de forte puissance [34]. Cependant Il présente les inconvénients suivants:

- ✓ L'impédance du réseau en présence des filtres passifs peut faire apparaître des résonances.
- ✓ Le filtrage passif peut absorber les courants harmoniques d'autres charges non linéaires et dans ce cas, le filtre passif peut être surchargé.
- ✓ Le filtrage passif est peu flexible et, en cas de modifications dans le réseau, il peut avoir du mal à s'adapter aux nouveaux besoins du filtrage.

- ✓ La conception des filtres passifs doit considérer la tolérance de fabrication et les dérives paramétriques qui apparaissent à l'usage.

Ainsi, avant d'installer un filtre de ce type, une étude détaillée doit être menée afin d'analyser, cas par cas, les risques de résonance et de surcharge [14].

1.2.4.2 Solutions modernes

a) Redresseur dodécaphasé : Leur principe consiste à utiliser un transformateur à deux secondaires délivrant des tensions décalées de 30° 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 Grêtz. On obtient ainsi un redresseur dit dodécaphasé (pont ayant douze bras) dont les redresseurs sont montés en série (Figure 1.9) [35]. Cette solution permet, par combinaison des courants, d'éliminer au primaire les harmoniques de rang les plus bas tels que 5 et 7 (souvent les plus gênants car de plus fortes amplitudes). Elle nécessite un transformateur à deux secondaires, l'un en étoile et l'autre en triangle ce qui permet de ne générer que les harmoniques de rang $12k \pm 1$ [10].

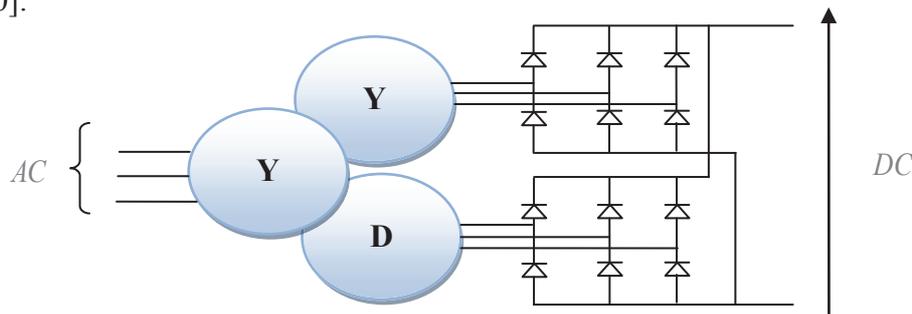


Figure 1.9: Pont dodécaphasé

b) Les filtres actifs : Traditionnellement, un filtre passif est utilisé pour éliminer les harmoniques, cependant cet équipement de compensation comporte certains inconvénients, pour cela les filtres actifs ont été proposés pour bien améliorer la qualité de l'énergie électrique [36]. Une des applications principales de filtres actifs est l'élimination ou la réduction des harmoniques de courant et de tension [37]. Le principe du filtrage actif est de compenser les harmoniques présents sur les réseaux électriques en injectant des harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase [38]. La Figure 1.10 présente les composants d'un système typique du filtre actif et de leurs connexions. L'information concernant les courants harmoniques et d'autres variables de système sont transmises à la compensation de (courant/tension) estimateur de signal de référence. Le signal de référence de compensation de l'estimateur conduit le contrôleur du système dans son ensemble et fournit la commande du générateur de signal de déclenchement. La sortie du générateur de signal de déclenchement

commande le circuit d'alimentation par l'intermédiaire d'une interface appropriée. Enfin, le circuit d'alimentation dans le diagramme généralisé peut être connecté en configuration parallèle, série ou parallèle –série « filtre actif universelle (UPQC) » [28].

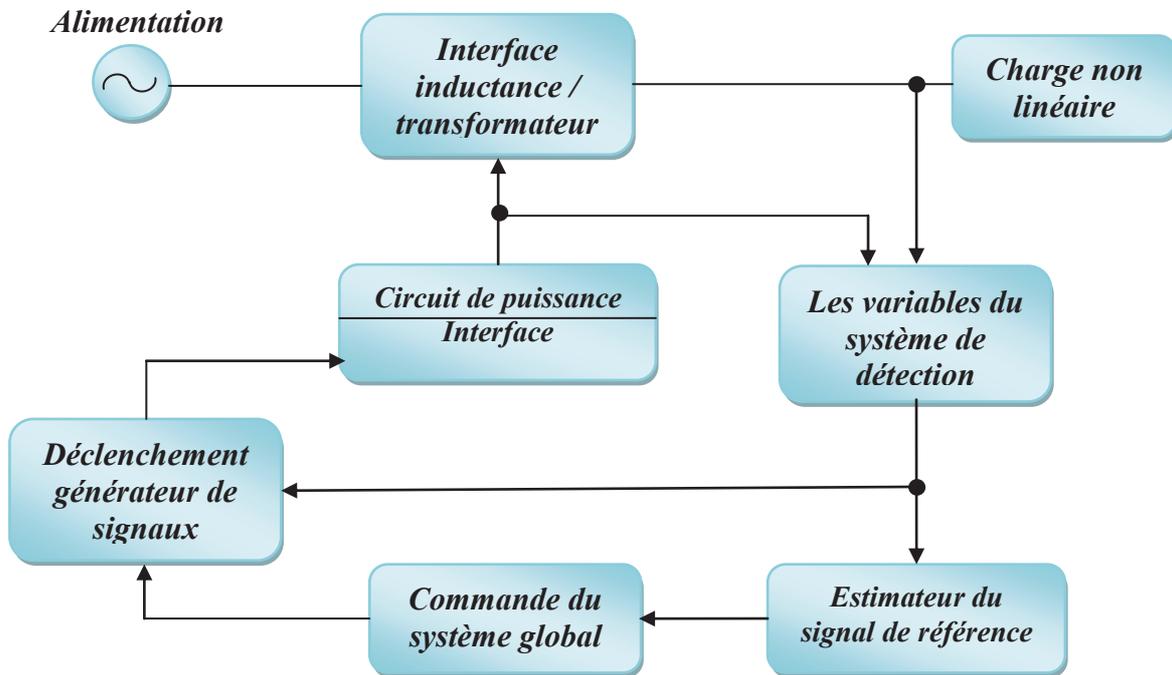


Figure 1.10: Schéma généralisé pour le filtre actif

b.1) Classification des filtres actifs : Dans la littérature il existe une grande variété de types de filtres actifs. Ils sont classés de différentes manières selon le nombre de phases «monophasés ou triphasés», la technologie de l'onduleur «avec ou sans neutre raccordé», et la topologie «l'onduleur de tension ou de courant» [33].

b.2) Filtre actif parallèle : Les filtres actifs parallèles sont les plus utilisés et les plus traités dans les travaux de recherches depuis plus de 30 ans [23].

Le système qui est montré dans la figure 1.11, comprend en balance sources d'alimentation de trois phases de tension, un redresseur triphasé à pont de diodes « charge non linéaire » et charge d'inductance L_c et de résistance R_c . Le filtre actif parallèle est connecté à la ligne triphasée à travers l'inductance L [39]. Ce filtre est le plus souvent commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec le réseau, afin que la somme avec ceux-ci soit nulle [26]. Ceci est réalisé par l'élaboration de la forme d'onde de compensation de courant (i_c), en utilisant les commutateurs de l'onduleur. La forme du courant de compensation est obtenue par la mesure du courant de charge (i_l) et en la soustrayant la référence sinusoïdale. Le but de filtre actif parallèle est d'obtenir une source de courant sinusoïdale (i_s) [28].

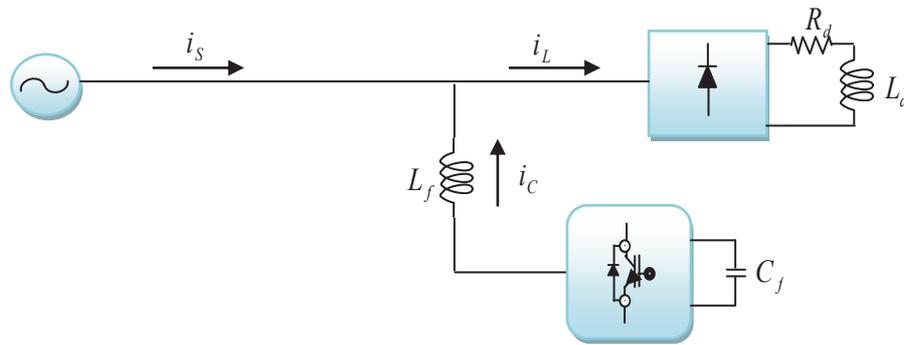


Figure 1.11: Principe de configuration de filtre actif parallèle

b.3) Filtre actif série : Le filtre actif série est connecté en série avec l'alimentation par l'intermédiaire d'un transformateur d'adaptation, de sorte qu'il est applicable à la compensation des harmoniques d'un redresseur à diodes de grande capacité avec un condensateur de liaison à courant continu. [40]. L'approche est basée sur le principe d'isolement harmonique en contrôlant la tension de sortie du filtre actif série [41]. Ceci est obtenu par l'injection de tensions harmoniques (v_c) à travers le transformateur d'interface.

Les tensions injectées harmoniques sont ajoutées / soustraites, à/de la tension de source afin de maintenir une forme d'onde de tension sinusoïdale pure à travers la charge non linéaire. Il est commandé de telle sorte qu'il présente une impédance nulle pour la composante fondamentale, mais apparaît comme une résistance à haute impédance pour les fréquences de composante harmoniques [28].

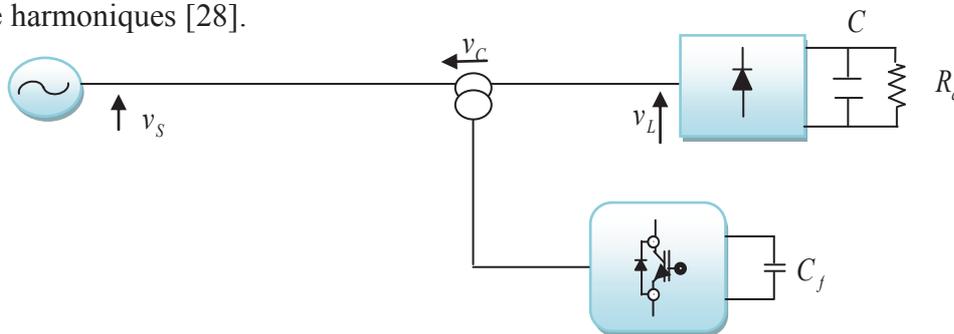


Figure 1.12: Principe de configuration de filtre actif série

b.4) Filtre actif universelle (UPQC) : La figure (1.13) montre la combinaison parallèle-série, elle est appelée UPQC (Unified Power Quality Conditioner), elle résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, [33]. Le but principal du filtre actif série est d'isoler les harmoniques entre un système de sous-transmission et un système de distribution. En outre, le filtre actif série a la capacité de compenser le déséquilibre de tension, ainsi que la régulation de tension et la compensation des harmoniques. Le but principal du filtre actif parallèle est d'absorber les harmoniques de courant, pour compenser la puissance réactive et le courant inverse, et de régler la tension continue intermédiaire entre les deux filtres actifs [42]. Le filtre actif universel présente de bonnes performances, cependant son

coût est élevé et sa commande est complexe. Du fait qu'il y a beaucoup de semi-conducteurs impliqués [30].

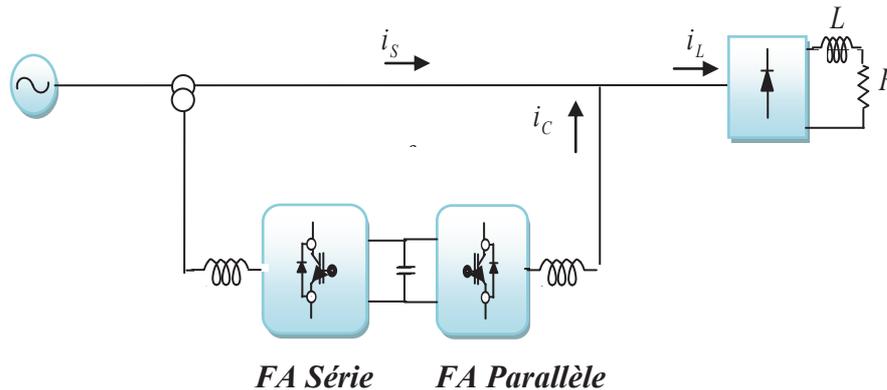


Figure 1.13: Principe de configuration de filtre actif universel «UPQC»

b.5) Les avantages et les inconvénients du filtre actif: Le filtre actif offre de nombreux avantages [32]:

- ⊕ Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques (dans la limite de sa bande passante);
- ⊕ Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau.
- ⊕ Il est insensible à la variation des caractéristiques du réseau.
- ⊕ Il n'y a aucun risque de surcharge lorsque le niveau de pollution harmonique à compenser dépasse le dimensionnement du filtre actif, puisque il fonctionne au maximum de ses capacités et tout risque de destruction est écarté;
- ⊕ La compensation de la puissance réactive est envisageable.
- ⊕ Le risque de résonance (amplification des harmoniques) entre filtre et impédance du réseau, qui existe avec un filtre passif est supprimé.

Toutefois, le filtrage actif présente quelques inconvénients [34]:

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

c) Filtre hybride : Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs à des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas on connectera en parallèle ou en série des filtres passifs pour compenser les harmoniques prépondérants [23]. Ainsi, les filtres passifs éliminent les harmoniques en basses fréquences, ce qui permet de réduire le dimensionnement du filtre actifs qui ne compense que le reste des perturbations. En conséquence, le filtre hybride est plus petit que pour un filtre actif et la réponse est bien meilleure qu'avec des filtres passifs seuls [19]. Cette structure permet d'améliorer les caractéristiques de compensation des filtres passifs et de réaliser ainsi une réduction de la valeur nominale du filtre actif [43]. Souvent le filtre passif est formé par deux

filtres réglés aux fréquences des harmoniques 5 et 7 et un filtre passe haut réglé autour de la fréquence de l'harmonique 11. Ainsi dans ce cas, le filtre actif permet d'éviter des résonances entre les éléments passifs et le réseau [14].

c.1) Association d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif parallèle : Dans cette topologie, le filtre actif est connecté en parallèle avec le filtre passif. Tous les deux sont également en parallèle avec la charge.

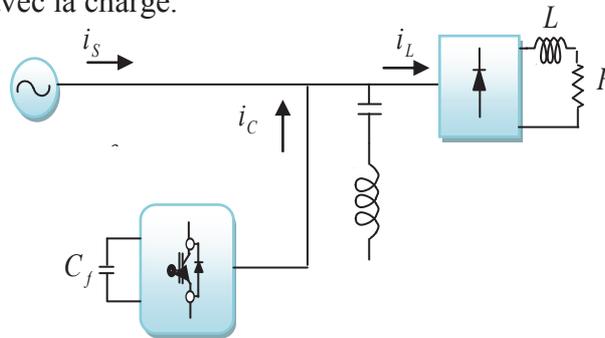


Figure 1.14: Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle

Le filtre actif parallèle sert à compenser les courants harmoniques de basses fréquences émis par la charge polluante, alors que le filtre passif accordé sur une fréquence harmonique élevée, permet de compenser les harmoniques de hautes fréquences [21].

c.2) Association d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif série : Dans cette configuration, les deux filtres actif et passif sont directement connectés en série, sans l'intermédiaire d'un transformateur. L'ensemble est connecté en parallèle sur le réseau comme il est présenté dans la figure 1.15.

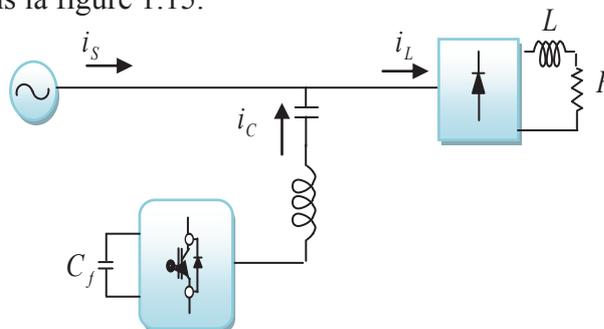


Figure 1.15: Filtre actif parallèle avec filtre passif série

Dans ce cas, le filtre passif se comporte comme une impédance faible à la fréquence d'accord et comme une grande impédance à la fréquence fondamentale. Ce système présente deux avantages : le dimensionnement en puissance du filtre actif est encore plus réduit du fait que le courant qui le traverse est plus faible et le filtre actif est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge [27][21].

c.3) Association d'un filtre actif série et un filtre passif parallèle : Le rôle du filtre actif série dans ce cas est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les

obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences [44].

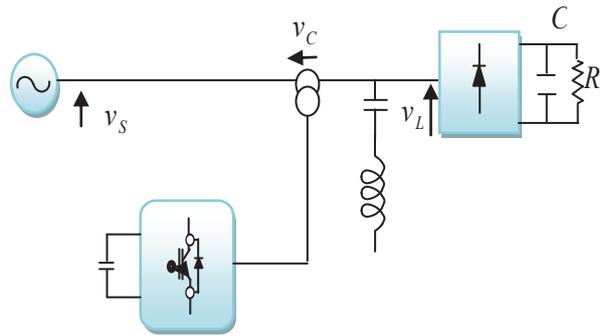


Figure 1.16: Filtre actif série avec filtre passif parallèle

c.4) Association d'un filtre actif série et un filtre passif parallèle : Le principe de fonctionnement de cette configuration est le même que le précédent. Il a l'avantage de réduire encore le dimensionnement du filtre actif série car le courant qui le traverse est faible, de plus, le filtre actif série est à l'abri d'un éventuel court circuit de la charge [45].

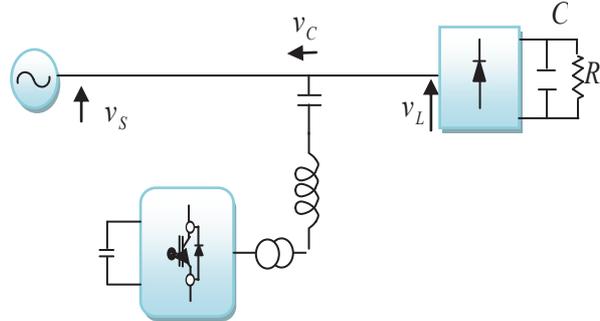


Figure 1.17: Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle

I.3 ÉTAT DE L'ART

La technologie de filtrage actif est désormais mature pour fournir une compensation des harmoniques et de la puissance réactive, dans les réseaux à courant alternatif, elle a évolué dans le dernier quart du vingtième siècle et le début de ce siècle, avec différentes configurations et stratégies de contrôle. Les filtres actifs sont également utilisés pour éliminer les harmoniques de tension, réguler la tension du secondaire, supprimer le flicker de tension améliorer l'équilibre de tension dans les systèmes triphasés.

Cette section décrit l'état de développement actuel de la technologie de filtrage actif.

Le filtrage actif a été introduit au début **des années 1970**, suite au développement de l'électronique de puissance ; pour cela plusieurs travaux de recherches ont été réalisés dans le domaine du filtrage actif [46].

Toutefois, la conception d'un premier prototype de filtre actif de puissance (FAP) à base de thyristors à commutation naturelle pour la compensation de courant harmonique a été

introduite **en 1977**, avec la commercialisation de composants d'électronique de puissance qui commutent à des puissances de plus en plus importantes avec des fréquences de commutation élevées [19].

Ainsi, en 1982, le premier FAP de 800kVA, composé d'un commutateur de courant à MLI et thyristors GTO, a été installé pour la compensation d'harmoniques [47].

En 1986, un système combiné d'un filtre actif parallèle de 900kVA, comprenant la tension de source par un onduleur MLI utilisant des transistors à jonction bipolaire, et un filtre passif de 6600kVA a été installé pour absorber les harmoniques générées par des cyclo-convertisseurs de grande capacité [48].

Par la suite, de nombreux onduleurs de puissance commandés par MLI ont été développés pour des applications de filtrage actif. En conséquence, les filtres actifs parallèles ont commencé à être commercialisés et installés à travers le monde et surtout au Japon, où **en 1996**, il y avait plus de cinq cents filtres actifs parallèles installés avec des puissances allant de 50kVA jusqu'à 2MVA [14].

Les premiers dispositifs ne compensaient que les perturbations harmoniques de courant. Toutefois, les filtres actifs ont évolué et des prototypes avec des fonctionnalités plus nombreuses sont apparus. Les filtres actifs modernes, en plus de compenser et amortir les courants harmoniques, compensent les déséquilibres de courant, contrôlent la puissance réactive et le Flicker [47].

Au cours de l'année 1997, l'auteur dans la référence [49] a examiné la stratégie de contrôle et de la sélection de l'emplacement d'un filtre actif dans un système de distribution de puissance. Il a conclut que :

- ✓ La méthode d'identification des harmoniques dans le domaine temporel est la plus appropriée dans la stabilité du filtre actif parallèle installé dans les systèmes de distribution d'énergie;
- ✓ Le filtre actif parallèle basé sur la détection des harmoniques de tension, qui est installé au voisinage d'une charge produisant des harmoniques, est efficace dans l'atténuation des harmoniques de tension.

Pour amortir la propagation des harmoniques à travers un dispositif d'alimentation, le filtre actif parallèle doit être installé à la borne d'extrémité de la ligne principale. En d'autres termes, le meilleur point d'installation est le nœud 9 dans la Figure 1.18.

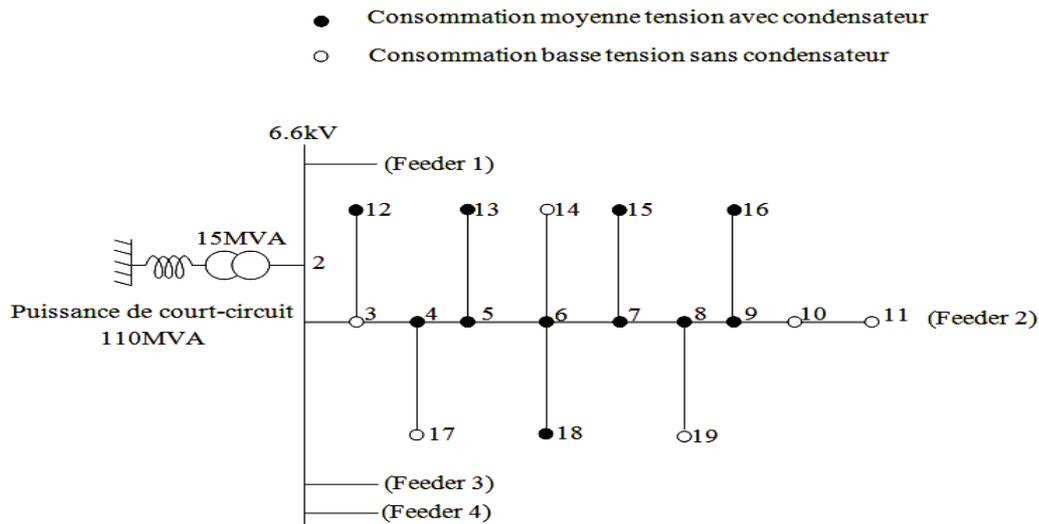


Figure 1.18 : Modèle pour le système de distribution radiale dans un quartier résidentiel

Dans la même année, le premier filtre à topologie multi niveaux à plus de deux composants semi-conducteur par bras fut proposé par Aburto et Al. Ce filtre actif avec un onduleur à point neutre clampé, présente deux avantages en termes de limitation des contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance et l'amélioration des qualités spectrales de la tension de sortie composée ici au moins à trois niveaux. Dès lors, l'intérêt aux filtres actifs multi niveaux, en vue de leur application industrielle en moyenne et forte puissance, n'a cessé de s'intensifier [19].

En 1998 l'auteur présente dans [50] des résultats expérimentaux d'un FAP obtenus à partir des essais au laboratoire évalué à 200V et 20kW, les résultats obtenus montrent que le filtre actif à une grande capacité d'amortissement des harmoniques à travers la ligne de distribution d'énergie. Dans la même année et afin de réduire la tension de mode commun (tension parasite) créé par l'onduleur de tension, une nouvelle topologie de convertisseur basée sur la MLI à hystérésis pour contrôler l'onduleur est présentée dans la référence [51]. Par la suite, dans [52] l'auteur propose une nouvelle méthode, pour générer le signal de compensation de courant par un filtre actif, qui utilise un onduleur trois niveaux, pour fournir une réponse transitoire rapide. Dans la même année, S. Round et al, proposent un filtre actif parallèle à base d'onduleurs trois niveaux susceptibles de dériver les harmoniques dans des sites commerciaux et industriels. Il a montré qu'un fonctionnement stable ne pouvait être atteint que si le filtre actif est connecté en aval des batteries de correction du facteur de puissance. Ils montrent que la topologie trois niveaux permet l'utilisation d'une inductance de sortie de plus petite valeur en comparant avec la topologie deux niveaux [53].

En 1999, l'auteur dans [54] a montré les bonnes performances du filtre actif en utilisant la MLI vectorielle pour la commande de l'onduleur de courant, avec une fréquence d'échantillonnage de 6 KHz, et que les méthodes proposées fonctionnent de manière satisfaisante, après la compensation de retard (dû au temps de réponse de l'onduleur commandé en courant ce qui conduit à un décalage de phase entre les courants de référence et les courants de sortie). En plus les tests expérimentaux ont montrés une meilleure minimisation des harmoniques jusqu'au 13^{ème} ordre. L'auteur dans [55] a déduit que la commande MLI du filtre actif permet un contrôle indépendant des harmoniques d'ordre inférieur, à la fois en amplitude et en phase, pour annuler les harmoniques générées par la charge et donc d'améliorer la qualité du courant.

En 2000, plusieurs travaux sur le filtre actif ont été présentées; Parmi eux, un système constitué d'un filtre actif parallèle triphasé et une réactance de lissage est proposé dans [56] ce système permet de réduire considérablement la bande passante de filtre actif parallèle. Dans [57] l'auteur a fait la conception, l'analyse et la simulation numérique d'un variateur de quatre branches en fonction de filtre actif, qui compense la puissance réactive et élimine les courants harmoniques en régime déséquilibré.

La première référence sur un filtre actif connecté à un réseau de moyenne tension **date de 2001.** Tan et Al ont proposés, la connexion d'un filtre actif parallèle monophasé à l'extrémité d'une ligne de traction de 25kV dans de but de diminuer les harmoniques de tension d'ordre 3, 5 et 7 au point de connexion du filtre et de fournir de la puissance réactive pour maintenir la tension sur la ligne [33]. Dans la même année, l'auteur propose dans [58] une nouvelle stratégie de commande du FAP est basée sur le contrôle de courant instantané est cela avec des composantes dans le domaine discret.

En 2002, l'auteur dans [59] a présenté une comparaison des performances entre un filtre actif installé directement à l'endroit de compensation d'harmonique avec un filtre hybride situé à une distance éloigné dans l'état d'équilibre. Les résultats sont similaires à ceux obtenus avec la compensation locale, donc la compensation à distance est une alternative qui peut être sérieusement envisagée et le coût peuve être sensiblement inférieur.

Par la suite, l'auteur dans [60] a traité, dans son travail, la conception et la mise en œuvre d'un régulateur numérique pour un filtre actif parallèle basé sur la détection de tension, les résultats obtenus montrent que le contrôleur numérique est préférable à un contrôleur analogique.

En 2003, l'auteur dans [61] propose une stratégie de contrôle du filtre actif monophasé à l'aide d'une transformation (dq) ou les harmoniques de tension et de courant peuvent être obtenues précisément à travers le filtre passe-bas.

En 2004, dans [37] l'auteur a présenté une méthode de calcul pour l'optimisation de coût du filtre actif par la minimisation de courant généré par l'onduleur et gardé le même THD, après il a appliqué cette méthode sur le filtrage local et le filtrage à distance. Les résultats de simulations obtenues avec un filtrage optimisé à distance sont satisfaisants. Dans la même année, l'auteur dans [62] a proposé un contrôleur adaptatif de la bande d'hystérésis de courant pour éliminer les harmoniques et pour compenser la puissance réactive du redresseur triphasé, avec l'utilisation de l'algorithme basé sur une extension de la théorie de référentiel synchrone pour l'identification des courants harmonique. Dans la même année, un système de distribution à base de filtre actif est proposé par l'auteur dans [63], ce système est composé de plusieurs unités de filtres actifs installées sur le même emplacement ou des emplacements différents dans le système d'alimentation afin de réduire la distorsion de la tension des lignes électriques. Par la suite, l'autre dans [64] a présenté une nouvelle stratégie pour l'optimisation de la commande MLI vectorielle, qui permet de commander l'onduleur du filtre actif parallèle et générer les courants harmoniques nécessaires à l'optimisation du nombre de commutation des semi-conducteurs utilisés.

À partir de 2005 les techniques intelligentes on été intégrées dans le contrôle du filtre actif parallèle, dans [65] l'auteur a proposé un filtre actif adaptatif contrôlé à l'aide des réseaux neuronaux artificiels, le réglage de la tension du condensateur est assuré par un régulateur PI. Ensuite, T. Jin et al, ont exposé une multitude de topologies d'onduleurs de tension trois niveaux pouvant être appliquées comme filtres actifs. Ces topologies, initialement conçues afin de manipuler des courants bidirectionnels, étaient empruntées aux systèmes de commande des moteurs électriques, et de compensation de l'énergie réactive [53].

En 2008 et dans [66] l'auteur a adapté un filtre actif par la mise en œuvre d'un bloc à hystérésis dans une carte DSP pour injecter le courant de compensation dans le système d'alimentation. Suite à cela, dans la référence [67] l'auteur a applique la théorie de la puissance réactive instantanée (pq) sur une filtré actif parallèle à 4 fils (Figure 1.19), les résultats obtenues montrent les bonnes performances de ce filtre.

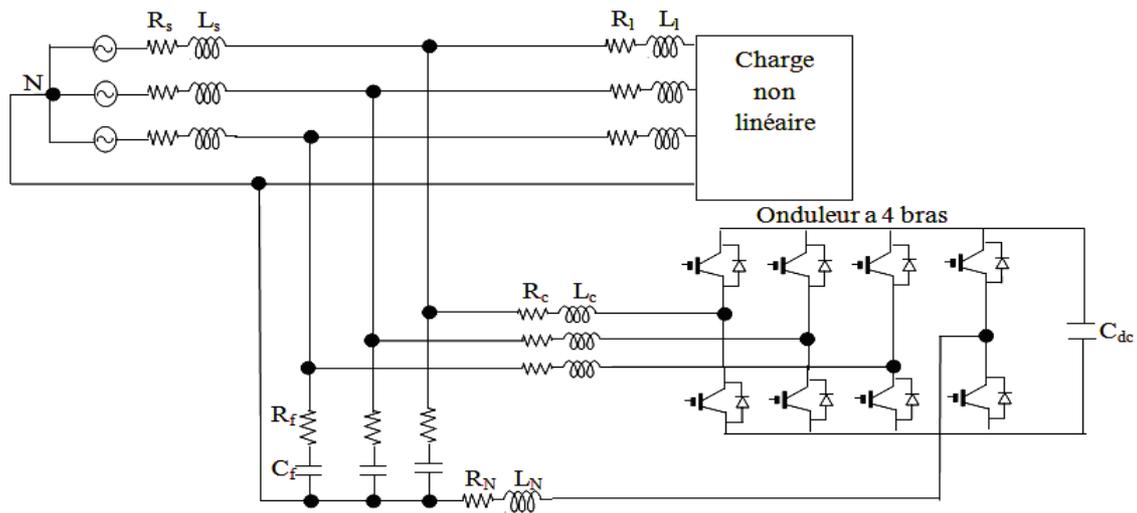


Figure 1.19: filtré actif parallèle à 4 fils

En 2009, l'auteur dans [68] a optimisé le système de filtre actif parallèle par l'utilisation des algorithmes génétiques, ce qui engendrent une amélioration considérable des performances du système.

En 2010, dans [69] l'auteur a présenté un nouveau système de contrôle de filtre actif et cela par l'utilisation d'un régulateur PI pour fournir des conditions qui suivent le courant de référence dans un cycle complet, afin de générer des impulsions d'amorçage par le procédé d'hystérésis.

Au cours de l'année 2012, l'auteur dans [70] a procédé à la critique et la comparaison entre les algorithmes d'identification et leur préférence dans les conditions idéales et non idéales de source de tension qui alimentent une charge non linéaire. Dans [71] l'auteur a procédé à un vaste examen de divers régulateurs, ainsi que les avantages et les inconvénients des techniques étudiées sont présentés, afin qu'il sera une référence utile pour les utilisateurs et les fabricants. Plus tard, dans [72] l'auteur a présenté une étude sur l'évaluation de performance de la méthode (pq) et la méthode de référentiel synchrone (dq) dans différentes conditions de tension source avec les régulateurs PI flou.

Durant cette année 2013, l'auteur dans [73] a présenté un nouveau algorithme de contrôle de filtre actif parallèle, fonctionnant dans les différent conditions, cette stratégie proposée ne nécessite pas de transformations de coordonnées ou de calculs compliqués.

I.4 COMPARAISON DES DIFFERENTS TYPES DE PERTURBATIONS

Le tableau.1.1 montre une comparaison des différents types de perturbations ainsi leurs solutions [13].

Types de perturbation	Origines	Conséquences	Exemples de solutions
Creux de tension	-Court-circuit, commutation de charges de forte puissance (démarrage moteur...).	- Perturbation ou arrêt du procédé: pertes de données, ouverture de contacteurs, verrouillage de variateurs de vitesse, ralentissement ou décrochage de moteurs.	- ASI, compensateur automatique en temps réel, Régulateur électronique dynamique de tension, démarreur progressif, compensateur électronique série - - Augmenter la puissance de court-circuit (Pcc).
Déséquilibre de tension	- Charges déséquilibrées (charges monophasées de forte puissance).	Couples moteurs inverses (vibrations) et sur échauffement des machines asynchrones.	- Equilibrer les charges. - Compensateur électronique shunt, régulateur électronique dynamique de tension. - Augmenter la Pcc.
Variations et Fluctuations de tension	- Variations importantes de charges (machines à souder, fours à arc...).	Fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker).	-Compensateur électromécanique d'énergie réactive, compensateur automatique en temps réel compensateur électronique série, régleur en charge.
Harmoniques	- Charges non linéaires (varianteurs de vitesse, fours à arc, machines à souder, lampes à décharge, tubes fluorescents...).	Surcharges (du conducteur de neutre, des sources...), déclenchements intempestifs, vieillissement accéléré, dégradation du rendement énergétique, perte de productivité.	-Self anti-harmonique, filtre passif ou actif, filtre hybride, -Inductance de ligne. -Augmenter la Pcc. -Confiner les charges polluantes. - Déclasser les équipements.
Inter-harmonique	- Charges fluctuantes (fours à arc, machines à souder...), convertisseur de fréquence.	- Perturbation des signaux de tarification, papillotement (flicker).	-Réactance série.

Tableau .1.1 : Les solutions des équipements spécifiques pour les différents types de perturbations

I.5 CONCLUSION

Comme nous avons pu le constater dans ce premier chapitre, la qualité de l'énergie électrique est affectée pas des les différents type des perturbations comme les creux de tension, le déséquilibre ainsi que les harmonique, qui engendrent la dégradation de la qualité de l'énergie et donc une mauvaise satisfaction et prestation du client.

Cependant aux perturbations elles subies des solutions existent, soit traditionnelles ou modernes, doivent être prise afin de minimiser les effets des perturbations et garantir une alimentation de qualité. Les solutions traditionnelles comme les filtres passifs qui ne sont pas très performants avec des charges non linéaire et variable. Pour cela et avec les progrès de l'électronique de puissance et de l'informatique, les travaux de recherches ont été orientés vers des nouvelles solutions à savoir les filtres actifs : série, parallèle et hybride, dans ce contexte un état de l'art actuel des filtres actifs a été dressé dans ce chapitre pour qui il nous aide à déterminer la stratégie et les points de contributions de notre travail.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons l'étude détaillée du filtre actif parallèle ainsi que leurs stratégies de commande.

Chapitre II: Filtre Actif Parallèle

II. INTRODUCTION

Le filtrage actif, comme moyen de compensation des harmoniques, est de plus en plus utilisé pour réaliser des interfaces de dépollution entre les réseaux électriques et les récepteurs polluants. Le rendement économique des filtres actifs est important pour le fournisseur d'énergie qui éprouve à cause des harmoniques des pertes considérables dans les transformateurs et les lignes et de l'interaction entre la source et les charges. Le consommateur est aussi concerné car la pollution harmonique et l'interaction entre les charges provoquent des défaillances du secteur et des récepteurs, et détériorent la productivité. La bonne exploitation d'un filtre actif parallèle est liée de façon significative aux choix des techniques de contrôle appliqué. Afin d'avoir la capacité de suivre les variations de courant de référence et la réalisation d'un niveau de performance satisfaisant de filtrage [5][74].

Dans ce chapitre nous présentons la description générale des différentes parties du système étudié tel que le modèle du réseau d'alimentation, la charge et le filtre actif.

II.1 DESCRIPTION DU SYSTEME

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

II.1.1 Modèle du Réseau d'Alimentation

Le réseau est comparable à un système de f.é.m. triphasées équilibrées en série avec une impédance dite de court-circuit, il est exprimé par l'équation (2.1)

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \sqrt{2} \cdot E \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Et pour l'impédance de court-circuit on peut écrire :

$$Z_{cc} = R_{cc} + jL_{cc}\omega \quad (2.2)$$

II.1.2 Modèle de la Charge

La figure 2.1 montre le modèle de la charge utilisée. La charge utilisée dans ce système est une charge non linéaire. Elle représente un redresseur triphasé à diode « pont de Grêtz »

associé à une charge inductive.

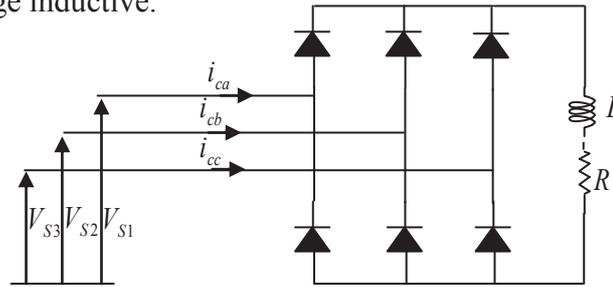


Figure 2.1: Redresseur ayant une charge R-L

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 FAP pour améliorer les performances du réseau d'alimentation.

Les performances du filtre actif parallèle sont déterminés à partir du taux global de distorsion harmonique (THD) qui doit être dans la norme IEEE 519 avec :

$$THD\% = \frac{100 \sqrt{\sum_{i=2}^n I_{si}^2}}{I_{s1}} \quad (2.3)$$

Avec :

I_{s1} la valeur efficace du courant fondamental et I_{si} les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant.

II.1.3 Structure du Filtre Actif Parallèle

La structure des filtres actifs se compose essentiellement de deux parties, une partie puissance et une partie commande (Figure 2.2). La partie puissance se compose d'un onduleur, d'un filtre de couplage et d'un élément passif lui servant de source d'énergie. La partie commande, sert à contrôler la commutation des semi-conducteurs formant l'onduleur [76].

La partie puissance : est constituée d'un onduleur de tension deux niveaux à basse d'interrupteur de puissance (IGBT) avec une diode antiparallèle ; d'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif et d'un filtre à la sortie de l'onduleur.

La partie commande : elle est constituée de l'algorithme de détection de courant de référence (qui sera développé dans le troisième chapitre) et de la commande de l'onduleur de tension.

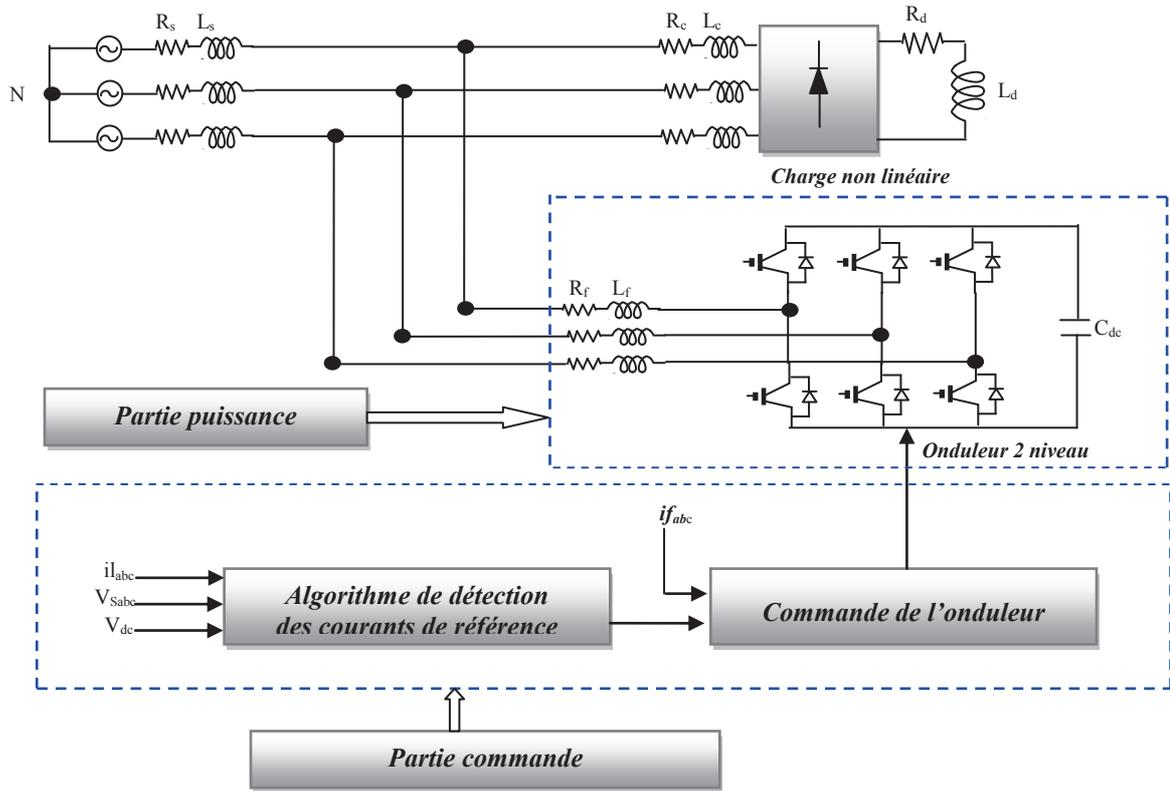


Figure 2.2: structure d'un filtre actif parallèle

II.1.3.1 Etudes de la partie puissance

a) *Modélisation de l'onduleur de tension deux niveaux*: L'onduleur de tension, contrairement à celui de courant est caractérisé par son élément d'alimentation en énergie qui est un condensateur (Figure 2.3). La tension aux bornes de ce condensateur doit être maintenue constante [24].

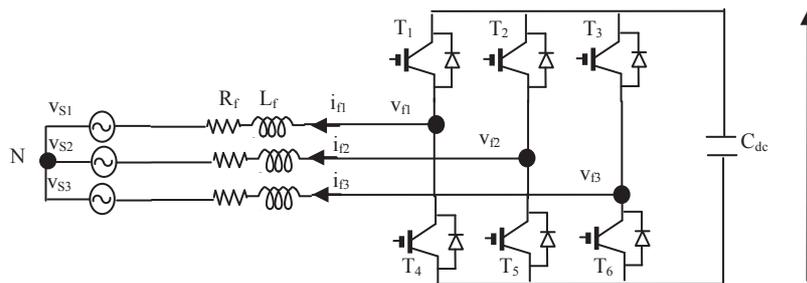


Figure 2.3: Onduleur de tension deux niveaux

Les interrupteurs sont unidirectionnels en tension et doivent être réversibles en courant. Pour y parvenir, les éléments semi-conducteurs composant l'onduleur sont associés en parallèle avec des diodes. Ces semi-conducteurs sont commandés à la fermeture et à l'ouverture [76]. Les semi-conducteurs d'un même bras de l'onduleur sont commandés de façon alternée, la conduction de l'un entraînant le blocage de l'autre. Le fonctionnement de l'onduleur se déroule de manière à ce que les semi-conducteurs d'un même bras ne sont jamais

fermés simultanément, au risque de court-circuiter le condensateur. En effet, les semi-conducteurs du même bras peuvent être ouverts pendant un temps défini comme étant un temps mort afin d'éviter ce risque [24].

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la Figure 3.2 dépendent de l'état des signaux de commande (S_1, S_2, S_3) comme il est défini par [45]:

$$S_1 = \begin{cases} 1 & T_1 \text{ fermé} & T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & T_1 \text{ ouvert} & T_4 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_2 = \begin{cases} 1 & T_2 \text{ fermé} & T_5 \text{ ouvert} \\ 0 & T_2 \text{ ouvert} & T_5 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_3 = \begin{cases} 1 & T_3 \text{ fermé} & T_6 \text{ ouvert} \\ 0 & T_3 \text{ ouvert} & T_6 \text{ fermé} \end{cases}$$

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

$$\begin{bmatrix} v_{f1} - v_{f2} \\ v_{f2} - v_{f3} \\ v_{f3} - v_{f1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 - S_2 \\ S_2 - S_3 \\ S_3 - S_1 \end{bmatrix} v_{dc} \quad (2.4)$$

Les tensions de sortie de l'onduleur, posés par v_{fx} ; avec ($x = \{1, 2, 3\}$), sont référencées par rapport au neutre du réseau et vérifient l'équation suivante :

$$v_{fx} = v_{sx} + L_f \frac{di_{fx}}{dt} + R_f i_{fx} \quad (2.5)$$

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

$$\begin{cases} v_{S1} + v_{S2} + v_{S3} = 0 \\ i_{f1} + i_{f2} + i_{f3} = 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

Nous pouvons donc déduire des équations (2.5) et (2.6) la relation suivante :

$$v_{f1} + v_{f2} + v_{f3} = 0 \quad (2.7)$$

A partir des équations (2.4) et (2.7), nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} v_{f1} \\ v_{f2} \\ v_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_1 & -S_2 & -S_3 \\ -S_1 & 2S_2 & -S_3 \\ -S_1 & -S_2 & 2S_3 \end{bmatrix} \frac{v_{dc}}{3} \quad (2.8)$$

Puisque les grandeurs S_1, S_2 et S_3 peuvent prendre chacune deux valeurs (0 ou 1), il en résulte huit commandes possibles, présentées dans le tableau 2.1.

État	S_1	S_2	S_3	v_{f1}	v_{f2}	v_{f3}
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	$2v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$
2	0	1	0	$-v_{dc}/3$	$2v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$
3	1	1	0	$v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$	$-2v_{dc}/3$
4	0	0	1	$-v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$	$2v_{dc}/3$
5	1	0	1	$v_{dc}/3$	$-2v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$
6	0	1	1	$-2v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$
7	1	1	1	0	0	0

Tableau 2.1: Tensions générées par l'onduleur de tension deux niveaux.

b) Système de stockage d'énergie : La source continue de l'onduleur de tension est un condensateur (C_{dc}) qui joue le rôle d'une source de tension continue V_{dc} [77]. Une certaine quantité de l'énergie doit être emmagasinée en permanence dans la source continue. Mais à cause des pertes dans les interrupteurs et dans le condensateur, la source continue doit recevoir son énergie du réseau continuellement à travers le convertisseur. Pour son fonctionnement, la tension V_{dc} est maintenue constante afin de remédier aux fluctuations qui peuvent affecter la qualité du filtrage [24].

c) Filtre de sortie : Le filtre de sortie à pour rôle d'assurer la liaison entre le réseau et l'onduleur de tension. Le dimensionnement de ce filtre doit tenir compte les deux points important suivants:

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

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{di_{ref}}{dt} \quad (2.9)$$

Un filtre de sortie du premier ordre est le plus souvent utilisé dans la littérature, il est composé d'une inductance L_f et de résistance interne R_f . Une valeur relativement faible de L_f permet d'obtenir une bonne dynamique du FAP en satisfaisant l'égalité (2.9) [76-77].

II.1.3.2 Etude de la partie commande

La commande est mise en œuvre en trois étapes. Dans la première étape, la tension de réseau et le courant de la charge sont détectés à l'aide de transformateurs de mesures (le TC et le TP). Dans la deuxième étape, on détermine le courant de référence à partir des méthodes d'identifications approuvées. Dans la troisième étape de commande, les signaux de commutation de semi-conducteur de l'onduleur de l'FAP sont générés en utilisant, l'hystérésis, MLI classique ou vectorielle, en mode glissant, ou des techniques de contrôle à base de logique floue [75]. Donc la commande d'un filtre actif parallèle triphasé est basée sur

la division du système en deux boucles [5]. Le premier sert à générer les courants de références, que l'onduleur doit injecter dans le point de raccordement, quant au deuxième, il sert à contrôler les courants injectés par l'onduleur de sorte qu'ils suivent le plus fidèlement possible ceux de la référence comme présenté dans la Figure 2.4 [31].

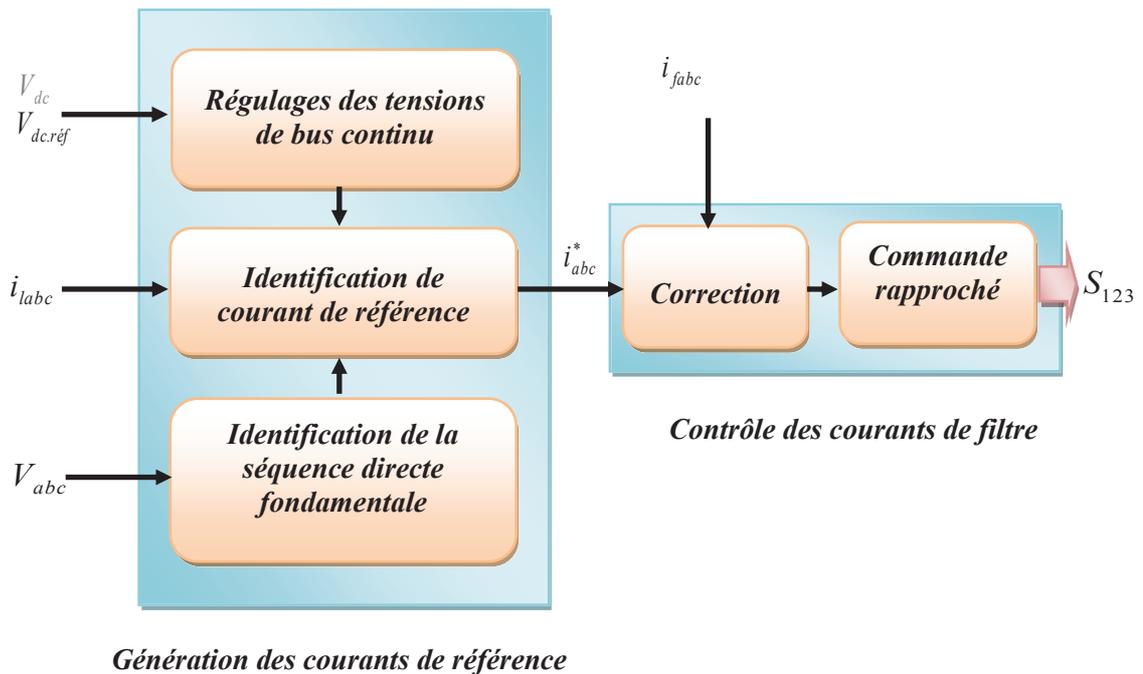


Figure 2.4: Commande du FAP

La commande du filtre actif parallèle est basée sur la nature de l'onduleur qui produit le courant à injecter dans le réseau et la commande choisi pour contrôler cet onduleur.

a) Commande en pleine onde : C'est la stratégie de commande la plus simple à mettre en œuvre. Par contre la tension de sortie est très riche en harmoniques de rang faible et donc de fréquence basse. Le filtrage est difficile dans ce mode de commande, les interrupteurs travaillent à la fréquence des grandeurs électriques de sortie [78]. Pour un convertisseur à deux états, un seul point de fonctionnement est possible en pleine onde ; la durée de conduction est égale à une demi-période [79].

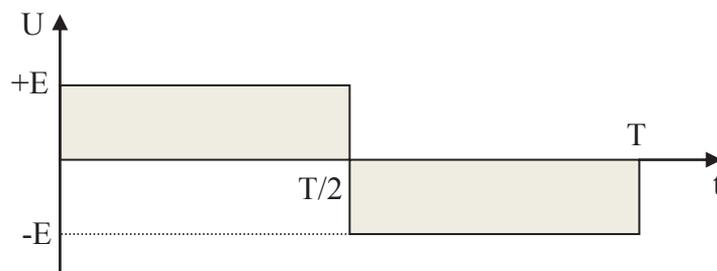


Figure 2.5: Allure des potentiels de phase lors d'un fonctionnement en pleine onde

T_1 est commandé entre 0 et π , non commandé entre π et 2π .

Les commandes de T_2 et T_3 sont respectivement décalées de $2\pi/3$ et $4\pi/3$ en arrière.

Les commandes de T_4 ; T_5 et T_6 : sont respectivement complémentaires de celles de T_1 ; T_2 ; T_3 .

b) Commande par hystérésis : L'objectif de la commande par hystérésis, encore connue sous la dénomination de commande en tout ou rien, est de contrôler les courants de compensation en les forçant à suivre ceux de référence. Un système de base pour le contrôle de la bande d'hystérésis est représenté sur la Figure 2.6.

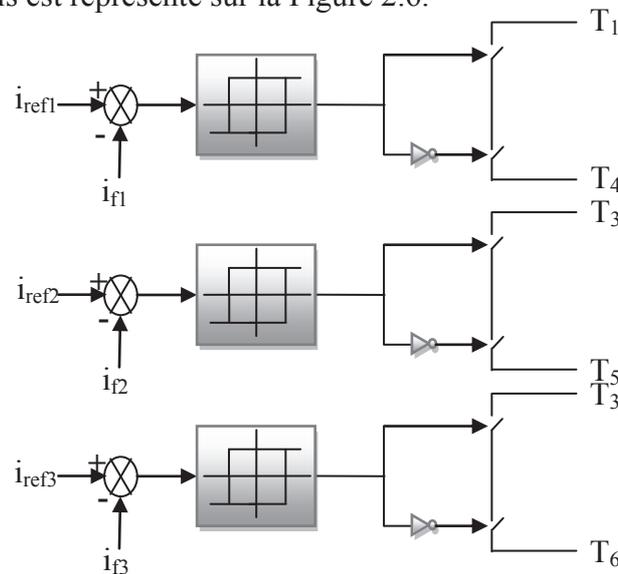


Figure 2.6: Principe de commande par hystérésis

Les courants de charge réels sont détectés et comparés avec leurs composants non actifs.

Cette technique peut être caractérisée par une bande d'hystérésis qui est le seul paramètre de contrôle de courant de chaque bras de l'onduleur. Les signaux de sortie des comparateurs à hystérésis sont utilisés pour commander l'ordre de commutation des interrupteurs de chaque bras de l'onduleur. Le courant de compensation va rester dans une bande autour du signal de référence, voir la Figure 2.7.

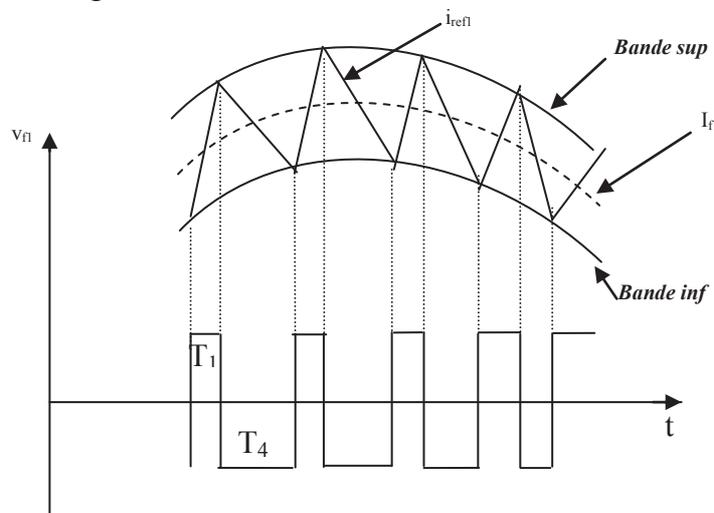


Figure 2.7: Commande des interrupteurs par hystérésis

La simplicité de la mise en œuvre, est le principal atout de cette technique. En revanche, les commutations évoluent librement à l'intérieur de bande d'hystérésis, on ne peut maîtriser correctement le spectre de haute fréquence dû aux fréquences de commutations.

c) Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) : Le schéma de principe de la MLI est donné par la Figure 2.8. La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) est la technique de commande la plus utilisée, elle résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur. 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 (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence.

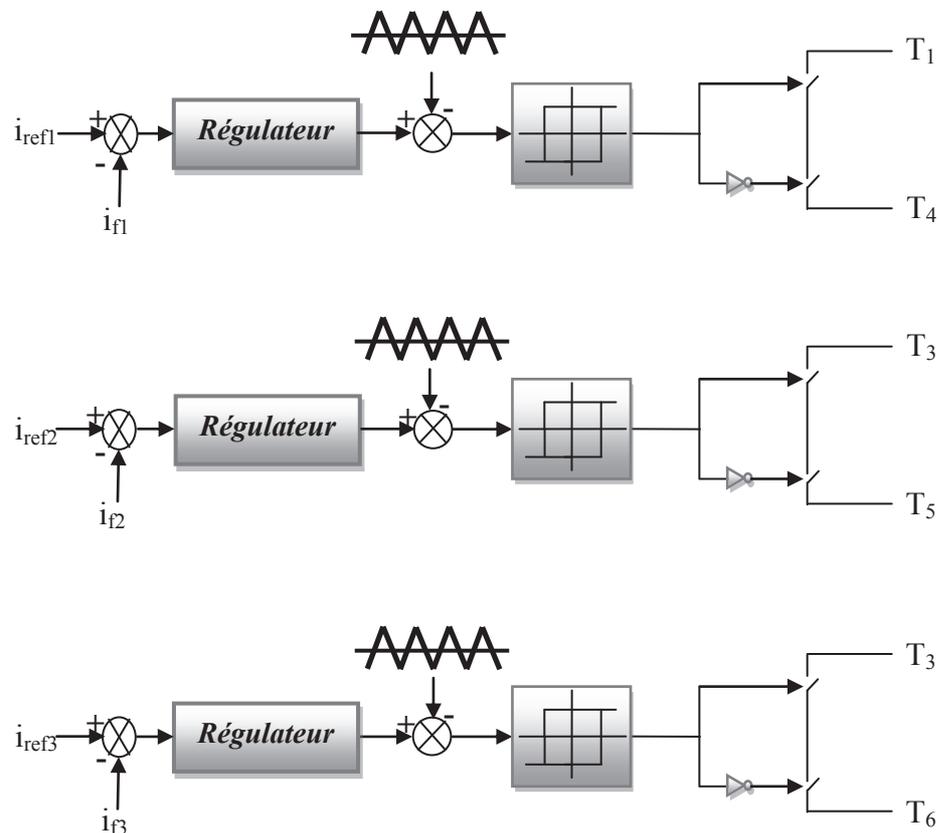


Figure 2.8: Principe de commande des courants par MLI

L'erreur à la sortie des régulateurs est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs comme il est présenté dans la Figure 2.9.

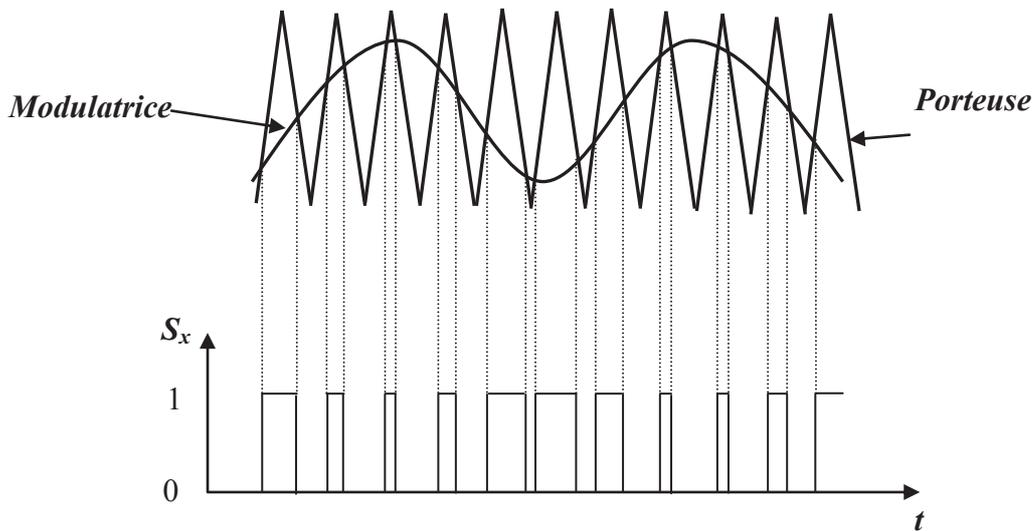


Figure 2.9 : Commande des interrupteurs par MLI naturelle

d) **Commande par MLI vectorielle** : Cette technique de commande divise le référentiel α - β des courants et des tensions en six régions avec un décalage courant/tension de 30° comme il est illustré sur la Figure 2.10.

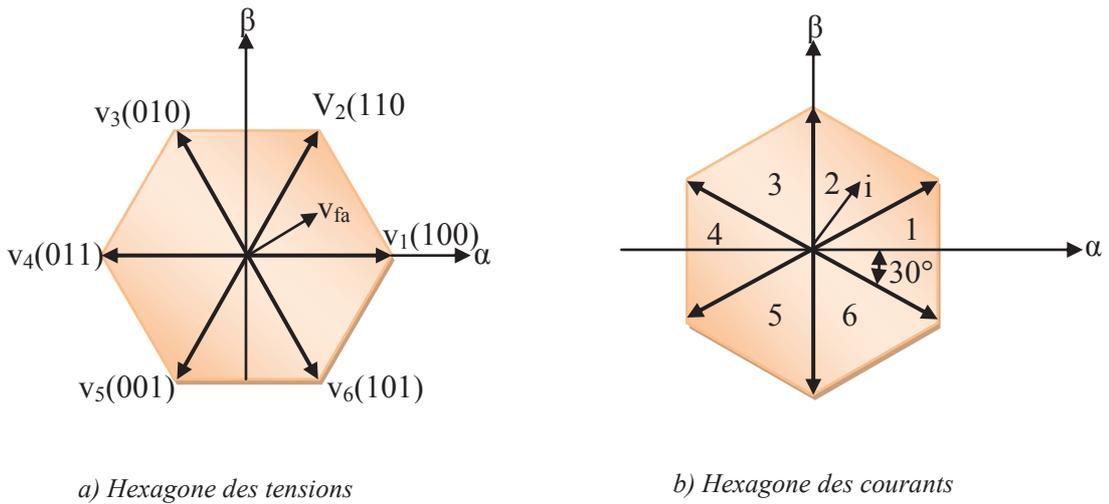


Figure 2.10: Hexagones des tensions et courants définis dans le plan α - β

L'hexagone de tension de la Figure. 3.10. a est la représentation vectorielle des vecteurs non nuls \vec{V}_1 à \vec{V}_6 (\vec{V}_0 et \vec{V}_7 étant les vecteurs nuls correspondant aux états 000 et 111 respectivement).

Ensuite, l'algorithme de commande doit identifier la région, parmi les six régions de l'hexagone de courant où l'erreur de courant Δi se situe, puis sélectionner le vecteur de tension de sortie du filtre actif v_{FA} appartenant à l'hexagone de tension ceci a pour rôle de forcer l'erreur Δi à varier dans la direction opposée, afin de maintenir le courant de sortie proche de sa consigne [80] [53].

II.2 REGLAGE DE LA TENSION CONTINUE DE L'ONDULEUR [24] [33]

L'onduleur est tenu de fournir en tout temps les courants de compensation harmonique dans le réseau. Et pour atteindre ce but, il faut qu'il soit alimenté par une source d'énergie stable. La boucle d'asservissement de la tension V_{DC} permet de réaliser cette stabilité car le courant de compensation injecté présente des erreurs en estimation, à cause de la perte d'énergie due aux :

- Pertes statique et dynamique dans les semi-conducteurs de puissance de l'onduleur;
- Pertes Joule dans les inductances de découplage L_f et la capacité C_{dc} ;
- L'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante.

II.2.1 Difficulté de la Régulation [33] [31]

La variation de tension ΔV_c aux bornes du condensateur de stockage dépend principalement de la valeur de la capacité C_{dc} . En effet, une diminution de C_{dc} entraîne l'augmentation de ΔV_c et inversement. L'objectif principal de la régulation de tension revient donc à limiter la variation de la tension ΔV_c en utilisant une capacité de valeur aussi faible que possible. De cette façon, le dimensionnement du condensateur pourra être optimisé.

Pour cela la régulation du niveau de tension V_{dc} est faite par un régulateur de type proportionnel intégral (PI). Le courant de référence additionnel I_{loss} est généré par le régulateur PI comme suit :

$$I_{loss} = k_p (V_{dc}^* - V_{dc}) + k_i \int (V_{dc}^* - V_{dc}) dt \quad (2.9)$$

Avec k_p et k_i les termes du régulateur PI. Ils sont déterminés à partir de l'étude de la fonction de transfert en boucle fermée élaborée sur la Figure 2.11.

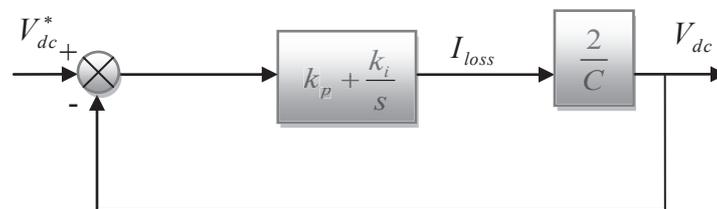


Figure 2.11: Boucle de réglage de tension continu V_{dc} .

La fonction de transfert est donnée par:

$$\frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = \frac{2\xi\omega_c s + \omega_c^2}{s^2 + 2\xi\omega_c s + \omega_c^2} \quad (2.10)$$

Où le coefficient d'amortissement ζ et la fréquence de coupure ω_c sont donnés par :

$$\begin{cases} \omega_c = \sqrt{\frac{2k_i}{C}} \\ \zeta = k_p \sqrt{\frac{1}{2k_i C}} \end{cases} \quad (2.11)$$

II.3 DIMENSIONNEMENT DES PARAMETRES DU FILTRE PARLLELE ACTIF

II.3.1 Dimensionnement du condensateur [53]

Les variations brusques de la puissance instantanée absorbée par la charge entraînent des perturbations de la tension de bus continu aux bornes du condensateur. Ces perturbations fluctuation peuvent être maîtrisées par un choix judicieux de la valeur du condensateur. La surtension maximale que peut subir le condensateur est donnée par :

$$V_{dc_{max}} = \frac{1}{C} \cdot \int_{\theta_1}^{\theta_2} i_{dc}(t) dt + v_{dc} \quad (2.12)$$

Avec:

θ_1, θ_2 : Angles existant à l'intervalle $[0, 2\pi]$.

La capacité du condensateur C s'exprimera par l'expression suivante :

$$C = \frac{1}{\Delta V_{dc}} \cdot \int_{\theta_1}^{\theta_2} i_{dc}(t) dt \quad (2.13)$$

La valeur moyenne du courant i_{dc} absorbé par le condensateur est donnée par :

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} i_{dc}(t) dt = I_{FAm} \int_{\theta_1}^{\theta_2} [\sin(\omega t) + \sin(\omega t + 2\pi/3)] dt \quad (2.14)$$

I_{fm} étant l'amplitude max du courant i_f , ainsi que les fluctuations de la tension du bus continu ΔV_{dc} sont de 5 % V_{dc} .

II.3.2 Dimensionnement du filtre de sortie [99]

Pour but d'absorber les harmoniques hautes fréquences dues aux commutations de l'onduleur, on introduit un filtre passif d'inductance L_f à la sortie du filtre actif. Le dimensionnement de L_f est réalisé avec la contrainte que pour une fréquence de commutation donnée, la pente du courant i_f est plus petite que celle d'une porteuse triangulaire définissant cette fréquence de commutation. La pente de la porteuse triangulaire est définie par :

$$\alpha = 4 \cdot \varepsilon \cdot f_c \quad (2.15)$$

Telle que: ε est l'amplitude de l'onde triangulaire, f_c , est la fréquence de commutation des interrupteurs du filtre actif.

La pente maximale de i_f , dans le cas d'un filtre actif à point milieu, est donnée par:

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{0,5 \cdot V_{dc} + V_{sm}}{L_f} \quad (2.15)$$

D'où une valeur de L_f estimée à:

$$L_f = \frac{0,5 \cdot V_{dc} + V_{sm}}{4 \cdot \varepsilon \cdot f_c} \quad (2.16)$$

II.3 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe du filtre actif parallèle comme une solution de dépollution des réseaux électriques des courants perturbateurs comme le courant harmonique, la partie puissance et la partie commande ont été présentés d'une manière détaillée. Nous avons présenté successivement l'onduleur de tension deux niveaux ainsi que l'élément de stockage et le filtre de sortie pour la partie puissance et les techniques de commandes de l'onduleur pour la partie commande.

Dans le chapitre qui suit on va étudier les principaux algorithmes de commande du filtre actif parallèle en utilisant un onduleur tension deux niveaux.

**Chapitre III:
Méthodes d'Identification des
Harmoniques du FAP**

III. INTRODUCTION

Les performances de la compensation des harmoniques d'un filtre actif parallèle dépendent principalement de la technique utilisée pour calculer le courant de référence [39]. La méthode de détection harmonique est la partie importante de FAP elle a la capacité de déterminer les attributs spécifiques des harmoniques (fréquence, amplitude, phase, le temps d'occurrence, de la durée et de l'énergie) à partir d'un signal d'entrée (qui peut être tension ou courant) en utilisant un algorithme mathématique particulier [81]. Il existe deux grandes approches qui ont émergé pour la détection harmonique, à savoir les méthodes dans le domaine temporel et les méthodes dans le domaine fréquentiel [82]. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées :

- ✓ 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.

La première méthode est la plus appropriée au filtre actif parallèle [27].c'est pourquoi cette méthode de détection sera employée dans notre travail.

Dans ce chapitre on va présenter la commande du filtre actif parallèle à base d'un onduleur de tension deux niveaux, pour différentes méthodes d'identification des harmoniques à savoir: la méthode des puissances instantanées (pq), la théorie de référentiel synchrone (dq) et la théorie des puissances instantanées dans le référentiel (pqr), par la suite nous présentons des tests de simulation du système, de chacune des méthodes d'identification.

III.1 TECHNIQUES D'IDENTIFICATION DES HARMONIQUES

Le courant de référence est l'élément clé qui assure le bon fonctionnement de l'FAP. L'estimation du signal de référence est initiée par la détection de signaux de tension / courant essentiels afin de recueillir les informations nécessaire pour les variables de système d'identification. Les variables de tension à détecter sont la tension de la source (v_s), la tension du bus continu de l'onduleur (v_{dc}) et la tension de référence ($v_{dc\ ref}$). Pour le courant les variables typiques de courant ils sont le courant de charge (i_l) et le courant injecter par l'onduleur (i_f).

Sur la base de ces variables de système, les signaux sont estimés dans le domaine fréquentiel ou temporel. La Figure 3.1 illustre les techniques d'estimation de signal de référence pris en considération.

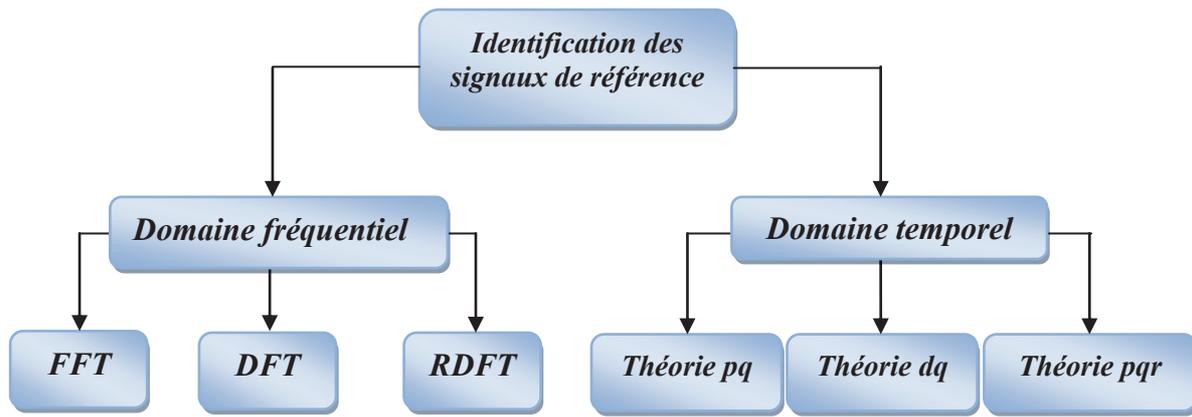


Figure 3.1: Les techniques d'identification des harmoniques

III.1.1 Identification dans le Domaine Fréquentiel

Les stratégies de contrôle dans le domaine fréquentiel sont basées sur l'analyse fréquentielle de la tension ou du courant non sinusoïdaux, pour en extraire les harmoniques de compensation [31]. L'utilisation de la transformation de Fourier, nous permet de séparer les composantes harmoniques des signaux pollués et combinées pour générer les commandes de compensation [75]. Les méthodes du domaine fréquentiel nécessitent une grande capacité de mémoire de calcul et les résultats prévus au cours de l'état transitoire peuvent être imprécises [82].

III.1.1.1 Transformée de Fourier rapide (FFT)

Dans son principe, la transformée de Fourier est appliquée au signal capté de tension ou de courant. Les composantes harmoniques du signal sont d'abord séparées en éliminant la composante fondamentale après on applique la transformée de Fourier inverse pour estimer le signal de référence de compensation dans le domaine temporel. Le principal inconvénient de cette technique est le calcul difficile des coefficients de Fourier. ceci fait qu'il est impossible pour une application en temps réel avec différentes charges dynamiques [82-83].

III.1.1.2 Transformée de Fourier discrète (DFT)

Est une transformation mathématique des signaux discrets qui donne à la fois l'amplitude et la phase de l'harmonique souhaité.

$$\bar{X}_h = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot h \cdot n}{N}\right) - j \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot h \cdot n}{N}\right) \quad (3.1)$$

$$\bar{X}_h = X_{hr} + j \cdot X_{hi} \quad (3.2)$$

$$|\bar{X}_h| = \sqrt{X_{hr}^2 + X_{hi}^2} \quad (3.3)$$

Avec

$$\varphi_h = \arctan\left(\frac{X_{hi}}{X_{hr}}\right) \quad (3.4)$$

Où:

- ✚ N est le nombre d'échantillons fondamentale par période; $x(n)$ est le signal d'entrée (tension ou courant) au point N;
- ✚ X_h est le vecteur de Fourier complexe de la h^{em} harmonique du signal d'entrée ;
- ✚ X_{hr} est la partie réelle de X_h ; X_{hi} est la partie imaginaire de X_h . $|X_h|$ est l'amplitude du vecteur; φ_h est la phase du vecteur [81].

III.1.1.3 Transformée de Fourier discrète récursive (DFTR)

La transformée de Fourier discrète récursive (DFTR) utilise le même principe que la DFT, mais la (DFTR) est calculée sur une fenêtre glissante. La fenêtre décale chaque temps d'échantillonnage avec un nombre fixe d'échantillons. Ainsi, l'analyse DFT peut effectivement être effectuée sur les échantillons nouvellement obtenus. La seule différence entre le réel et les fenêtres précédentes sont les premiers et derniers échantillons. Tous les autres échantillons sont les mêmes par conséquent, il n'est pas nécessaire d'échantillonner à nouveau [84].

III.1.2 Identification dans le Domaine Temporel

Le principe de la stratégie d'identification dans le domaine temporel est d'extraire par filtrage les harmonique de tension ou de courant en temps réel, en séparant le fondamental des harmoniques. Cette technique utilise des formules algébriques faciles à implanter et réduit considérablement l'effort de calcul; s'ajoute à cela le fait qu'elle permet d'identifier tous les harmoniques [31]; d'autre part elles sont largement utilisées pour le calcul de courant de référence [85]. Les algorithmes principalement utilisés dans le domaine temporel sont : la théorie de puissance instantanée active-réactive (pq) et la théorie du référence synchrone (dq), ainsi que la théorie des puissances instantanées dans le référentiel (pqr).

III.1.2.1 Théorie de la puissance instantanée (pq)

En 1983, Akagi et al, ont proposé «La théorie généralisée de la puissance réactive instantanée en circuits triphasés » également connu comme la théorie (pq). Elle est basée sur les valeurs instantanées dans les systèmes d'alimentation triphasés avec ou sans neutre, en plus elle est valable pour les opérations en régime permanent ou transitoire [86].

La théorie (pq) met en œuvre une transformation d'un système de référence stationnaire en coordonnées abc, à un système de coordonnées (α, β) . Elle correspond à une transformation algébrique, connu sous le nom de la transformation de Clark, qui produit

également un système de référence fixe, où les coordonnées (α - β) sont orthogonales les unes aux autres [87].

La transformation se fait à partir de la relation suivant:

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Si on applique cette relation sur le courant de charge et la tension de la source on trouve :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Pour la puissance active et réactive dans le plan α - β il sera:

$$\begin{cases} p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \\ q = v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha \end{cases} \quad (3.8)$$

En remplaçant les tensions et les courants diphasés par leurs homologues triphasés on trouve :

$$\begin{cases} p = v_{sa} i_{la} + v_{sb} i_{lb} + v_{sc} i_{lc} \\ q = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(v_{sa} - v_{sb}) i_{lc} + (v_{sb} - v_{sc}) i_{la} + (v_{sc} - v_{sa}) i_{lb}] \end{cases} \quad (3.9)$$

On pose:

$$\Delta = v_\alpha^2 + v_\beta^2 \quad (3.10)$$

Et à partir de l'expression (3.8) on a:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Dans le cas où les tensions sont sinusoïdales et alimentent une charge non linéaire, les puissances instantanées p et q ont pour expression:

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (3.12)$$

Avec

- ✚ \bar{p}, \bar{q} : Puissance continue liée à la composante fondamentale active et réactive du courant.
- ✚ \tilde{p}, \tilde{q} : Puissance alternative liées à la somme des composantes harmoniques du courant.
- ✚ Pour l'extraction de puissance alternative on utilise la méthode de filtrage illustré sur la Figure 3.2.

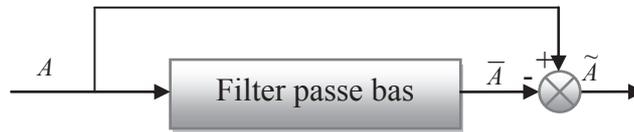


Figure 3.2: Principe de l'extraction des composantes alternative de p et q

On remplace (3.12) dans (3.11) on trouve:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_\alpha \\ \dot{i}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Donc le courant harmonique sera déterminé par la relation:

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Si on applique la transformation inverse de Clark (Figure 3.3) on trouve:

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

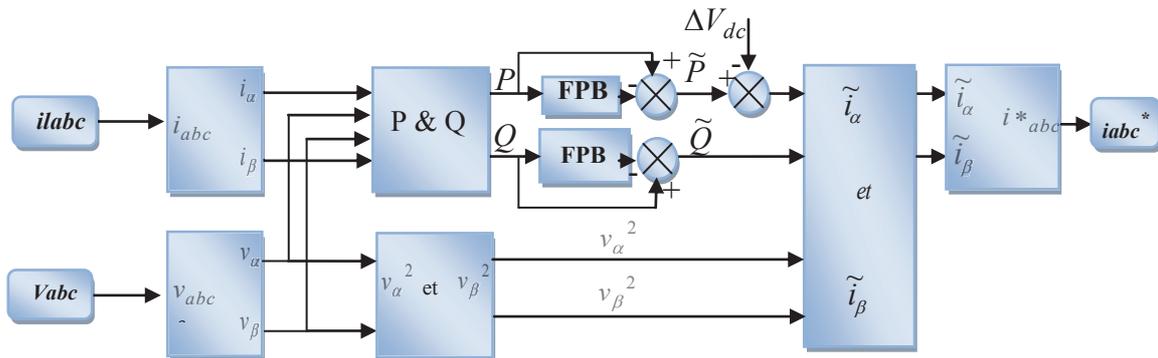


Figure 3.3: Principe de la méthode (pq)

III.1.2.2 Théorie du référentiel synchrone (dq)

Le terme fondamental de la théorie (dq) est le résultat de la transformation vectorielle des signaux d'entrée (les courants de charge pour notre cas) qui sont initialement réalisés dans les

coordonnées abc (repère de référence fixe) vers les coordonnées (dq) (repère tournant avec la fréquence fondamentale) par la transformation de Park (Figure 3.5) [81].

Il y a cinq étapes pour calculer les courants de référence pour un filtre actif parallèle [88]:

- 1) **Étape 1:** Transformer les courants de charge triphasés (i_{la} , i_{lb} , i_{lc}) à ($i_{l\alpha}$, $i_{l\beta}$, i_{l0}) en utilisant l'équation (3.16):

$$\begin{bmatrix} i_{l\alpha} \\ i_{l\beta} \\ i_{l0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

- 2) **Étape 2:** Transformer les courants $i_{l\alpha}$ et $i_{l\beta}$ à i_{ld} et i_{lq} par:

$$\begin{bmatrix} i_{ld} \\ i_{lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{l\alpha} \\ i_{l\beta} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Où ω est la pulsation électrique.

Le schéma vectoriel de passage du repère (abc) vers le repère (dq) est représenté dans la Figure 3.4.

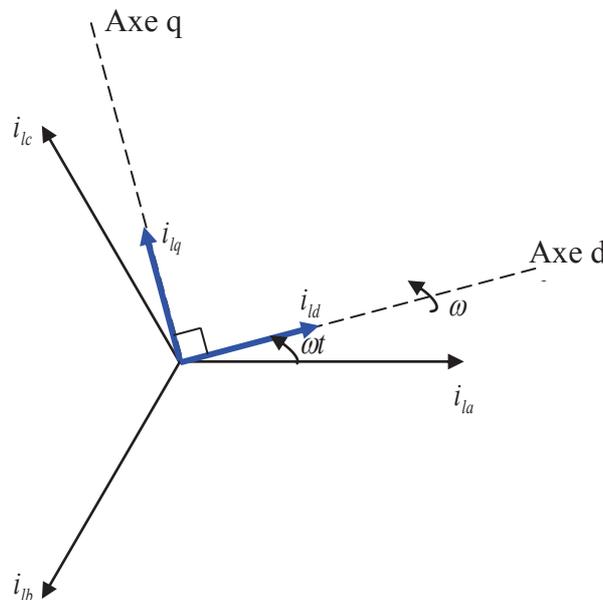


Figure 3.4 : Représentation vectorielle de passage de repère abc vers le repère (dq)

On peut décomposer les courants i_{ld} et i_{lq} en deux termes, les composantes fondamentales et harmoniques. Les harmoniques se comportent comme une composante alternative et les termes fondamentaux se comportent comme une composante continue, donc on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} i_{ld} \\ i_{lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_{ld} + \tilde{i}_{ld} \\ \bar{i}_{lq} + \tilde{i}_{lq} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Avec :

- ✚ $\bar{i}_{id}, \bar{i}_{iq}$: Composante continue (fondamentale) de courant de charge dans le repère dq.
- ✚ $\tilde{i}_{id}, \tilde{i}_{iq}$: Composante alternative (harmonique) de courant de charge dans le repère dq.

3) **Étape 3**: De l'étape 2, il est montré que les courants de charge se composent de deux termes. Pour cette étape, le filtre passe-bas (FPB) est utilisé pour séparer les composantes harmoniques $\tilde{i}_{id}, \tilde{i}_{iq}$ comme le montre la Figure 3.5.

4) **Étape 4**: Le passage des composantes harmoniques ($\tilde{i}_{id}, \tilde{i}_{iq}$) de repère dq vers le repère $\alpha\beta$ ($\tilde{i}_{i\alpha}, \tilde{i}_{i\beta}$) en utilisant l'équation suivant :

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_{i\alpha} \\ \tilde{i}_{i\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{id} \\ \tilde{i}_{iq} \end{bmatrix} \tag{3.19}$$

5). **Étape 5** : Calcule des courants de référence triphasés (i_a^*, i_b^*, i_c^*) à partir de l'équation (3.20) :

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{i\alpha} \\ \tilde{i}_{i\beta} \\ \tilde{i}_{i0} \end{bmatrix} \tag{3.20}$$

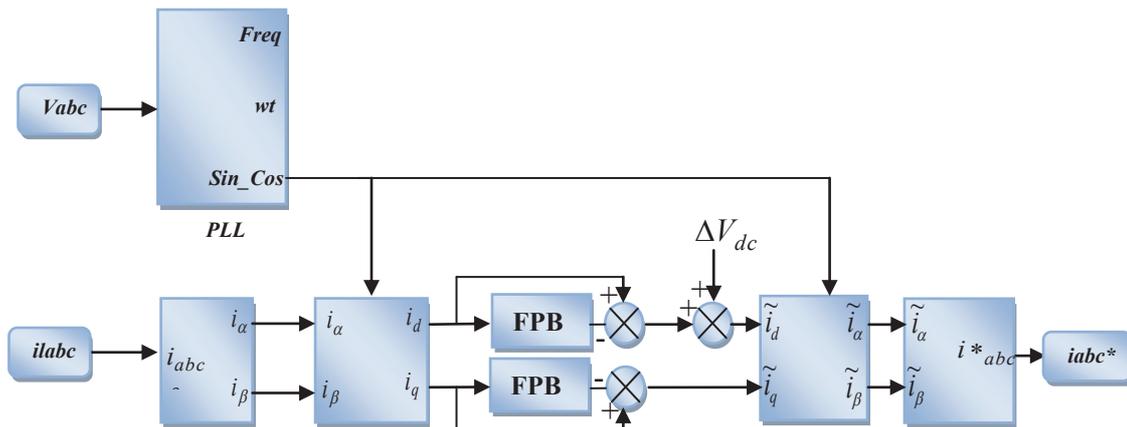


Figure 3.5: Principe de la méthode (dq)

Afin d'échanger une puissance contrôlée, l'onduleur doit toujours être synchronisé avec le réseau. Le but du bloc de synchronisation est d'obtenir la phase de la tension instantanée du réseau. Plusieurs techniques sont utilisées, le choix le plus commun consiste à utiliser une boucle à verrouillage de phase (PLL: Phase locked loop) [14].

III.1.2.3 Théorie des puissances instantanées dans le référentiel (pqr)

Cette théorie a été introduite par H .Kim et al, dont le principe n'est pas très différent de la théorie (pq) sa structure générale est représentée sur la figure 3.6.

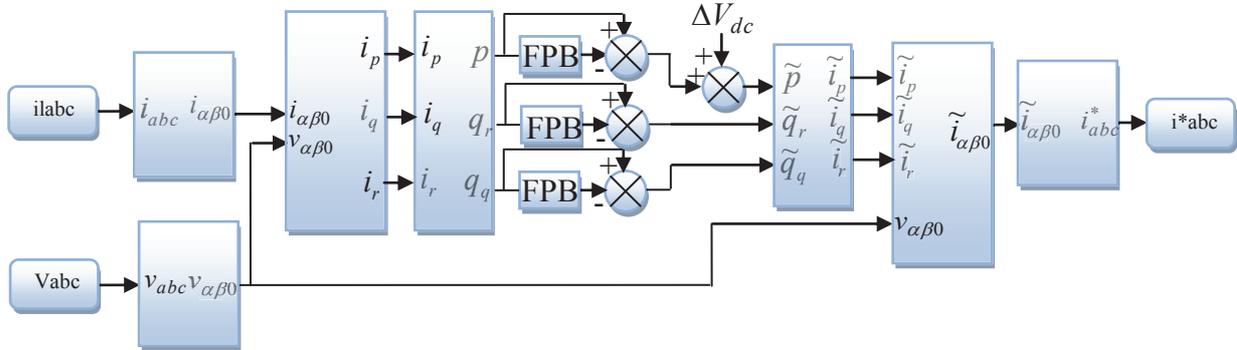


Figure 3.6: Principe de la méthode (pqr)

La théorie propose un référentiel spatial (pqr) pour exposer les grandeurs électriques et identifier les harmoniques à compenser. L'axe p est placé sur le vecteur tension, q est un axe situé sur le plan ($\alpha\beta 0$) et perpendiculaire à p et r est perpendiculaire aux deux axes p et q comme présenté dans la Figure 3.7 [67] [31].

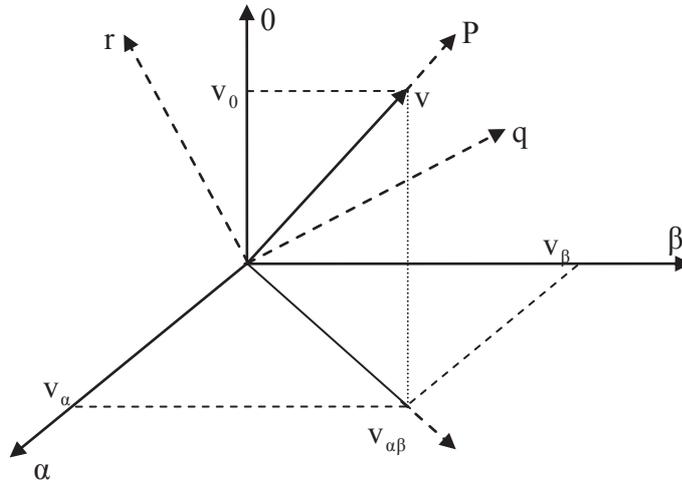


Figure 3.7: Relation entre le plan ($\alpha\beta 0$) et le plan (pqr)

Le passage du repère abc au repère ($\alpha\beta 0$) est assuré par la relation :

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Donc:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$v_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Ainsi, le vecteur unité sur l'axe p qui à la même direction que le vecteur de tension est donné par l'équation suivante :

$$v_{up} = \frac{1}{v_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Avec :

$$v_{\alpha\beta 0} = \sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2 + v_0^2} \quad (3.25)$$

Et pour toute vecteur unité v_{uq} sur le plan $(\alpha\beta)$ qui est orthogonal à v_{up} , est donné par:

$$v_{uq} = \frac{1}{v_{\alpha\beta}} \begin{bmatrix} -v_\beta \\ v_\alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Avec:

$$v_{\alpha\beta} = \sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \quad (3.27)$$

Donc, si v_{uq} est le vecteur unité sur l'axe q, alors le vecteur unité sur l'axe r est donné par:

$$v_{ur} = v_{up} \cdot v_{uq} \quad (3.28)$$

Alors:

$$v_{ur} = \frac{1}{v_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} \frac{-v_0 v_\alpha}{v_{\alpha\beta}} \\ \frac{-v_0 v_\beta}{v_{\alpha\beta}} \\ v_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Dans ce cas il est possible de faire la projection de tous les vecteurs sur les vecteurs unitaires v_{up} , v_{uq} et v_{ur} . Le vecteur courant dans le système $(\alpha\beta 0)$ est donné par:

$$i_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Donc les projections i_p , i_q et i_r sur les axes p, q et r, seront données par:

$$i_{pqr} = \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (u_{up} \cdot i_{\alpha\beta 0}) u_{up} \\ (u_{uq} \cdot i_{\alpha\beta 0}) u_{uq} \\ (u_{ur} \cdot i_{\alpha\beta 0}) u_{ur} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

On remplace les équations (3.24); (3.26) & (3.29), dans l'équation (3.31) on trouve:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta & V_0 \\ -V_{\alpha\beta 0} V_\beta & V_{\alpha\beta 0} V_\alpha & 0 \\ V_{\alpha\beta} & V_{\alpha\beta} & \\ -V_0 V_\alpha & -V_0 V_\beta & \\ V_{\alpha\beta} & V_{\alpha\beta} & V_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Pour le passage inverse de repère (pqr) vers $(\alpha\beta 0)$ il sera de la forme suivante:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_{\alpha\beta 0} V_\beta & -V_0 V_\alpha \\ V_\beta & V_{\alpha\beta 0} V_\alpha & -V_0 V_\beta \\ V_0 & 0 & V_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Pour les projections du vecteur tension sur les vecteurs unitaires sont obtenues de la même façon:

$$V_{pqr} = \begin{bmatrix} V_p \\ V_q \\ V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (u_{up} \cdot V_{\alpha\beta 0}) u_{up} \\ (u_{uq} \cdot V_{\alpha\beta 0}) u_{uq} \\ (u_{ur} \cdot V_{\alpha\beta 0}) u_{ur} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

donc:

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_q \\ V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha\beta 0} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Les puissances active et réactive dans le référentiel (pqr) sont définies respectivement par :

$$p = V_p \cdot i_p = V_p i_p \quad (3.36)$$

et

$$q_{pqr} = V_{pqr} \times i_{pqr} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_p i_r \\ V_p i_q \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

donc:

$$\begin{bmatrix} p \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix} = v_p \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

avec: q_q la puissance réactive sur l'axe q, q_r la puissance réactive sur l'axe r.

On peut aussi exprimer les courants en fonction des puissances comme suite :

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \frac{1}{v_p} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

III.2 SIMULATION NUMERIQUE SOUS MATLAB SIMULINK

Dans cette partie, nous présenterons les résultats de simulation obtenus pour les trois méthodes d'identification des courants de référence précédemment étudiées, à savoir la théorie pq, la méthode dq et pqr, dans les conditions idéales « c'est à dire lorsque les tensions de source sont équilibrées et ne contiennent pas d'harmonique et lorsque la charge est équilibrée », pour les courants de charge et/ou les tensions réseau.

La charge polluante est constituée par un pont redresseur triphasé à diodes et le réseau d'alimentation est un réseau triphasé. Le réseau d'alimentation est modélisé par phase par une f.é.m. sinusoïdale en série avec une inductance (L_s) et une résistance (R_s) caractérisant l'impédance de court-circuit du réseau, voir Figures 3.11. Le redresseur débite dans une charge (R_L). L'inductance (L_c) et la résistance (R_c) à l'entrée du redresseur modélisent l'impédance de ligne et les éventuelles inductances additionnelles mises en œuvre pour limiter les variations de courant. Un filtre actif parallèle triphasé à structure tension, Pour la commande de l'onduleur du filtre actif parallèle, nous avons utilisé la commande par hystérésis.

Les paramètres de simulation sont rassemblés dans le Tableau 3.1.

Réseau d'alimentation						
Paramètre	vs	F	Rs	Ls	Rc	Lc
Valeurs	380 V	50 Hz	3,5 mΩ	00 H	0,82mΩ	0,023mH
Charge non-linéaire						
Paramètre	Rd		Ld			
Valeurs	0,78Ω		2,6mH			
Filtre actif parallèle						
Paramètre	Lf	Rf	Vdc	Cdc		
Valeurs	0,15mH	5mΩ	700V	10mF		

Tableau 3.1 : Paramètres du système

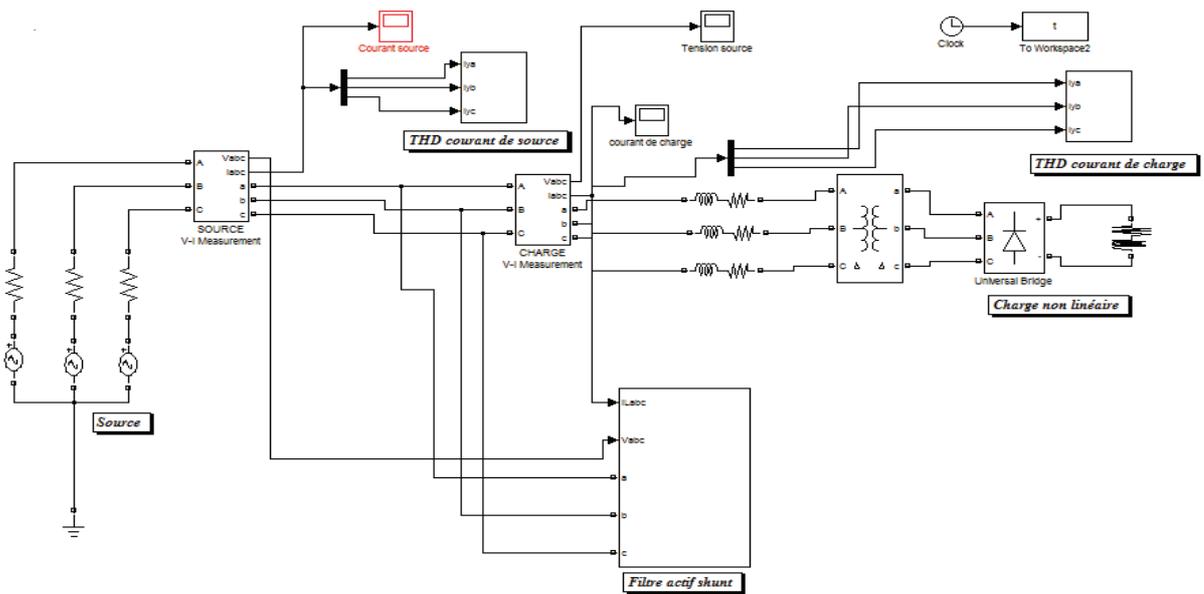


Figure 3.11: Modèle de simulation établi sous Simulink

Les figures (3.12 et 3.13) montrent respectivement le courant et la tension de la source avant l'insertion du filtre actif.

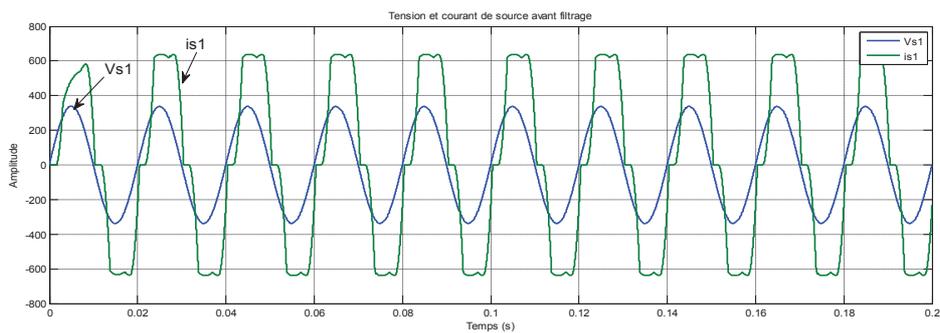


Figure 3.12: Tension et courant de source avant filtrage

On remarque que la charge non linéaire génère des courants non sinusoïdaux qui provoque la pollution du réseau étudié; En effet, on constate des déformations dans l'onde du courant de source qui perd sa forme sinusoïdale.

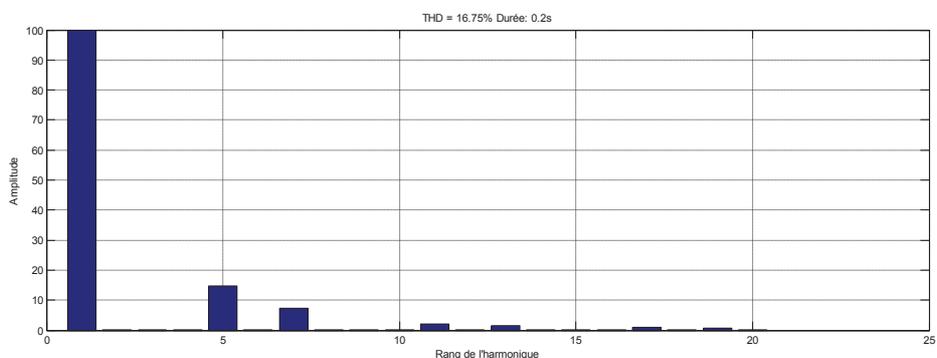
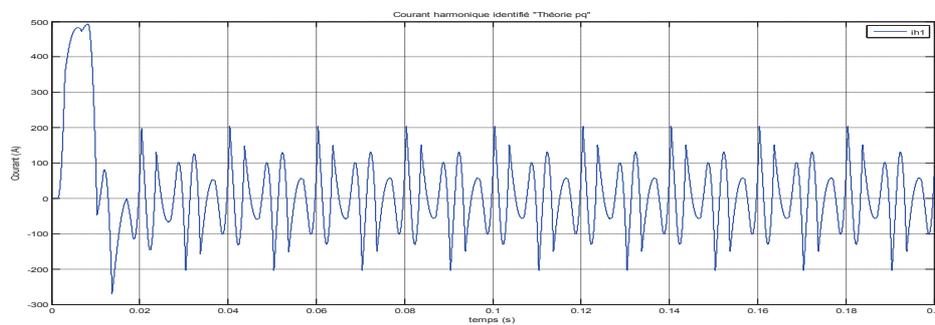


Figure 3.13: Spectre harmonique de courant de source avant filtrage

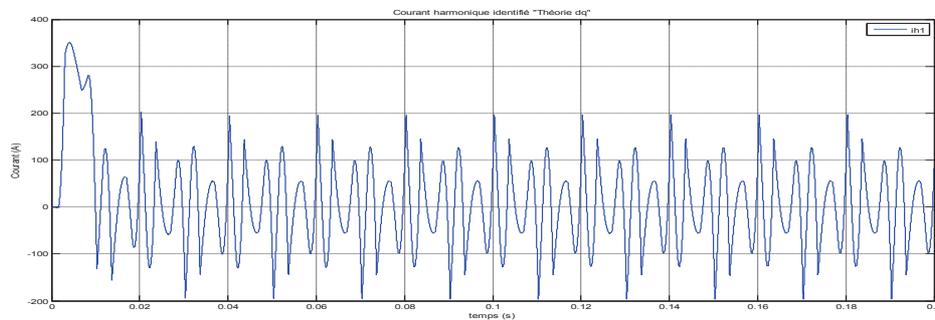
L'analyse spectrale du courant absorbé par la charge est représentée dans la figures 3.13, cette dernière montre la présence, en plus de la fondamentale (rang 1), des harmoniques de rang. 5, 7, 11, 13, 17, 19 ...etc. Le taux de distorsion (THD) est de 16.75%.

III.2.1 Résultat de Simulation du FAP sans Régulation du Bus Continu

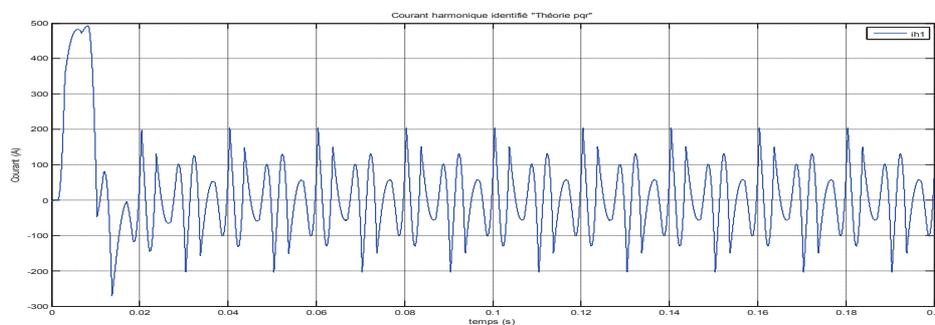
Après l'insertion du filtre actif parallèle, on obtient pour les trois techniques d'identification les résultats donnés par les figures (3.15-3.22), ces figures représentent successivement, le courant harmonique identifié (i_h), commutation du premier interrupteur 'Sa' de l'onduleur du FAP, le courant (i_f) injecté par le filtre, la superposition du courant identifié et le courant injecté, les tensions à la sortie de l'onduleur, le courant de source (i_s), les allures du courant et de la tension après filtrage actif et le spectre harmonique du courant de la source.



a) *Théorie pq.*



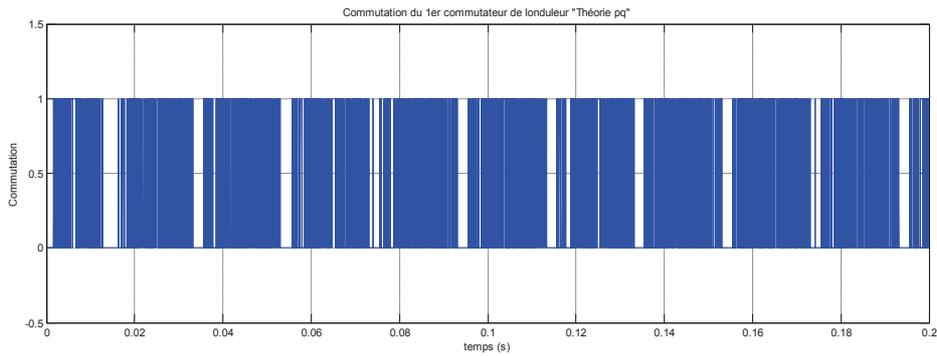
b) *Théorie dq.*



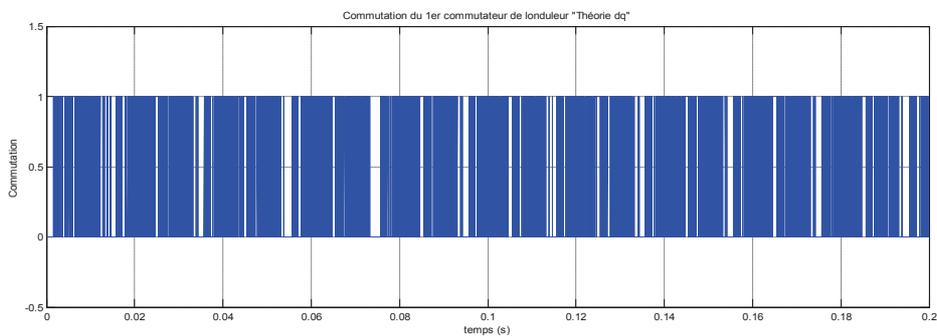
c) *Théorie pqr.*

Figure 3.15: Courant harmonique identifié de phase a

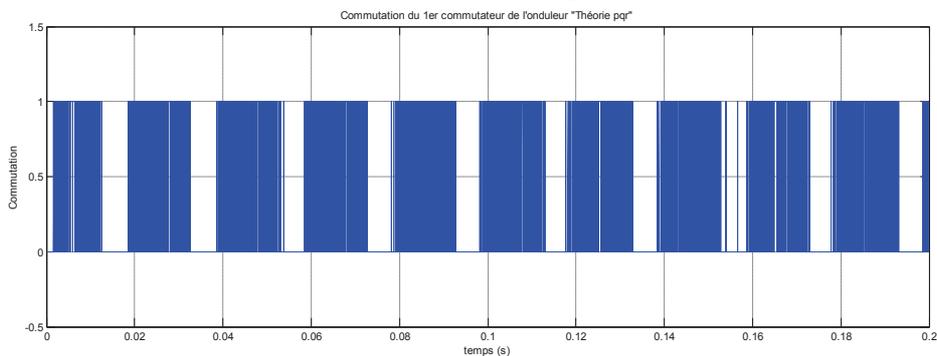
La figure 3.15, montre le courant harmonique identifié qu'il faut éliminer pour dépolluer le réseau, pour les trois algorithmes d'identification, ce courant à une forme non sinusoïdale.



a) *Théorie pq.*



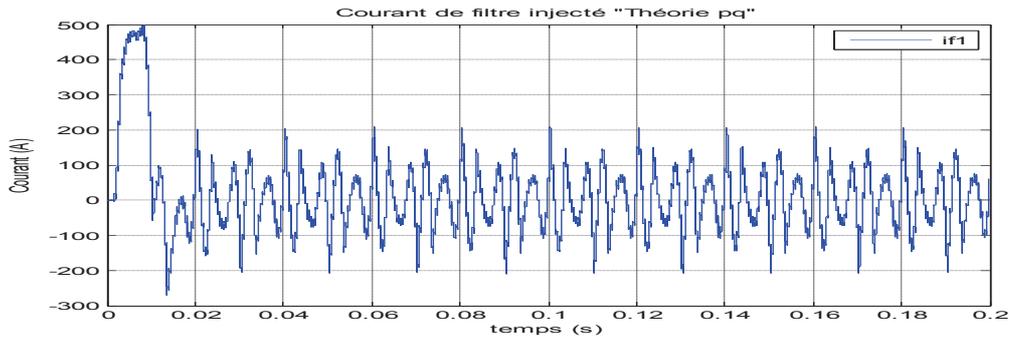
b) *Théorie dq.*



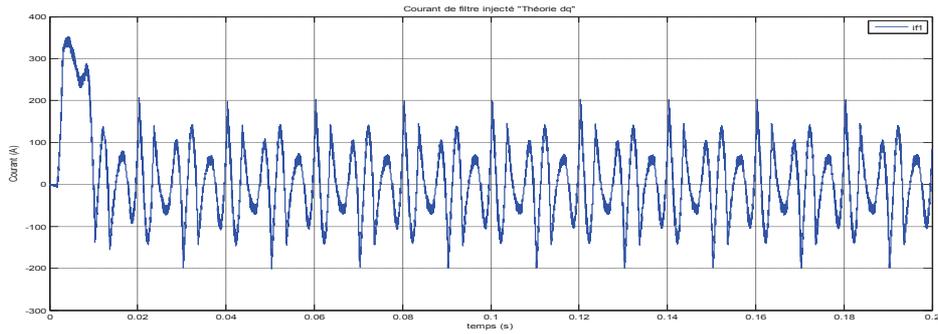
c) *Théorie pqr.*

Figure 3.16: Commutation du 1^{er} commutateur de l'onduleur du FAP sans régulation du bus continu

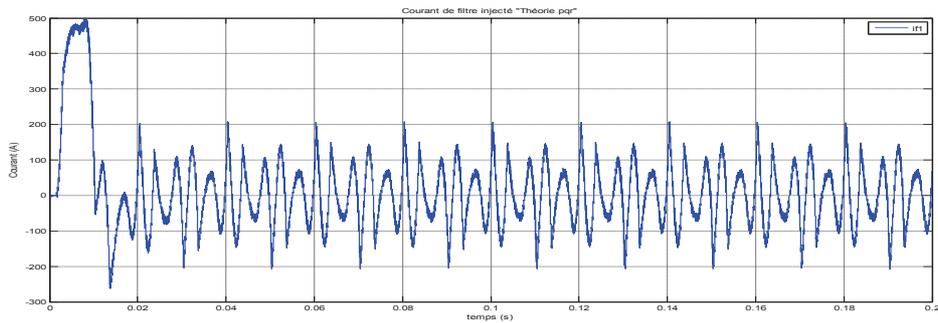
La Figure 3.16, montre que la commutation du premier interrupteur de l'onduleur est presque régulière pour les trois techniques, le calcul du nombre de commutation donne la fréquence de commutation moyenne de $f_c=22.53$ kHz pour la théorie (pq), $f_c=24.71$ kHz pour la théorie (dq) et $f_c=22.60$ kHz pour théorie (pqr).



a) *Théorie pq.*



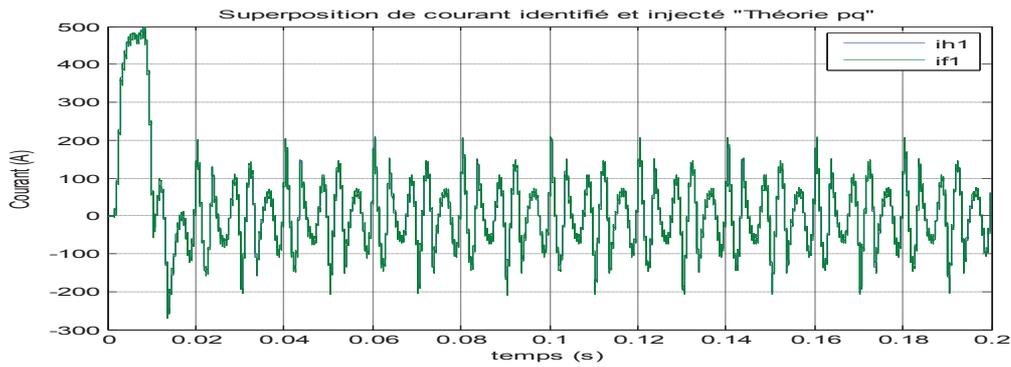
b) *Théorie dq.*



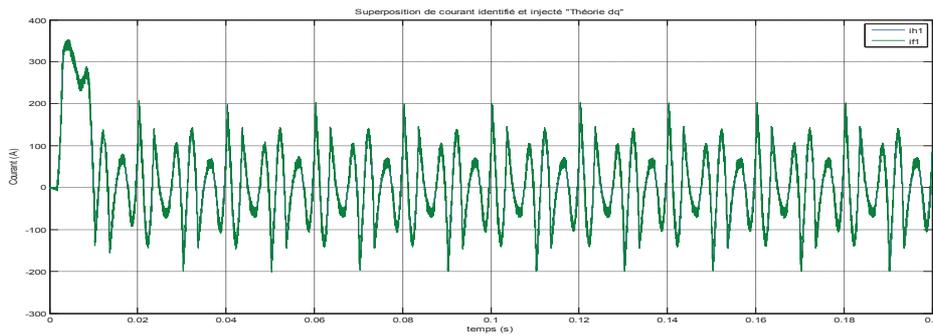
c) *Théorie dq.*

Figure 3.17: Courant de la phase 'a' injecté par le filtre au réseau

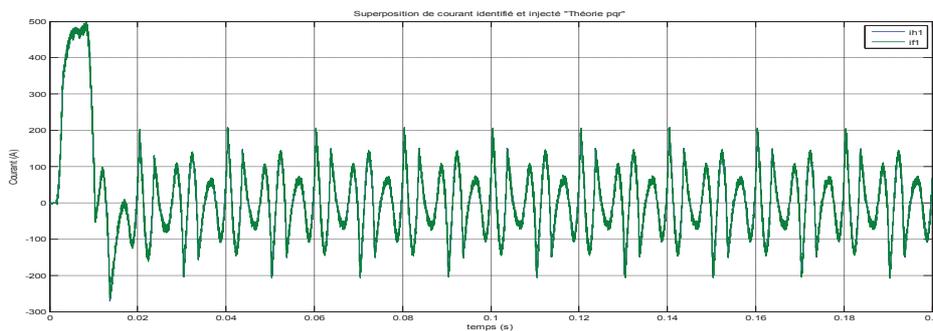
La Figure 3.17, illustre le courant à injecté par filtre actif parallèle dans le réseau pour les trois méthodes. On remarque que ce courant à presque la même forme que le courant identifié de la figure 4.16.



a) Théorie pq.



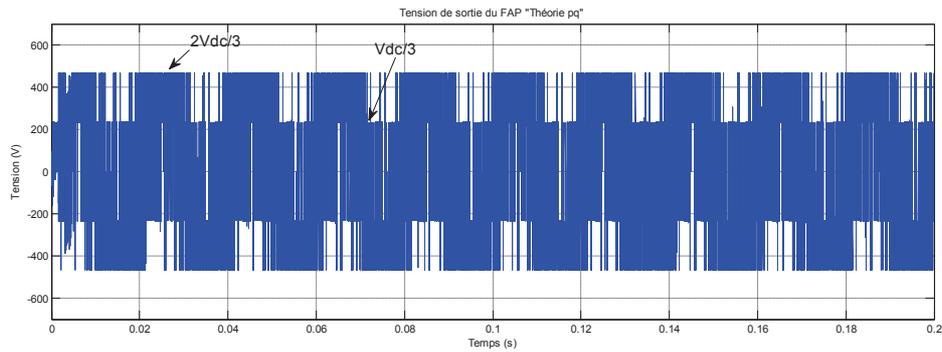
b) Théorie dq.



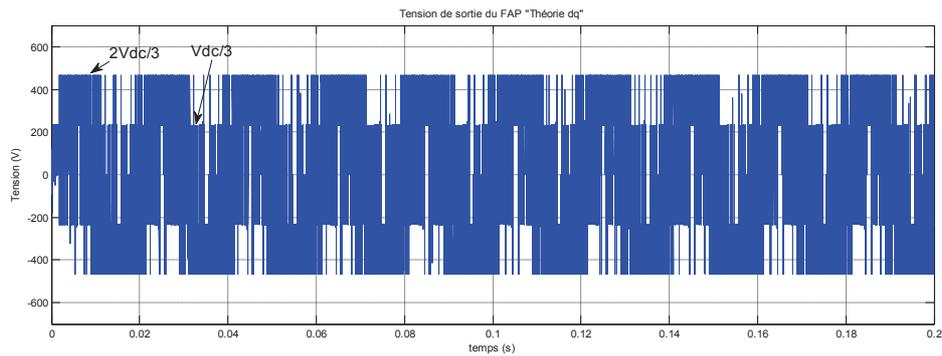
c) Théorie pqr.

Figure 3.18: Courant de référence et le courant généré par le filtre actif

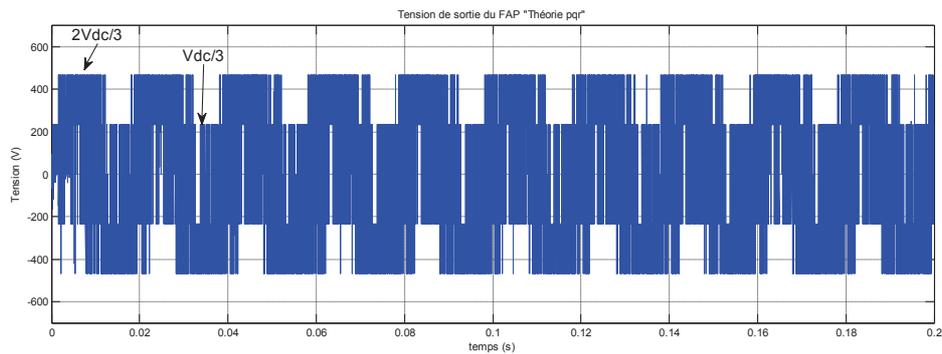
La figure (3.18), présente le courant de référence (en vert) et le courant généré par le filtre actif (en bleu) de la phase 'a' pour les trois techniques. On voit bien que le filtre actif à bien reproduit le courant de référence. Ces courants doivent être injectés sur le réseau afin d'éliminer ces harmoniques.



a) Théorie pq.



b) Théorie dq.

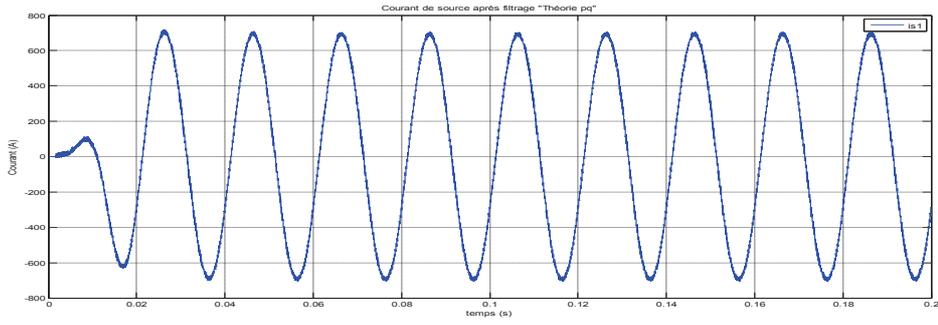


c) Théorie pqr.

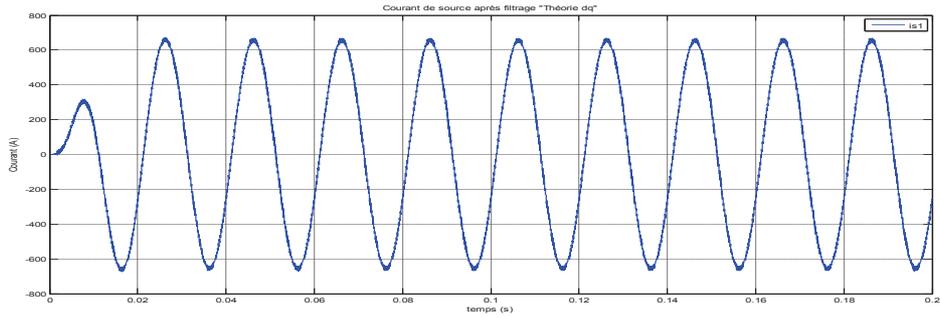
Figure 3.19: Tension d'une phase de l'onduleur deux niveaux

La Figure 3.19, illustre la tension d'une phase à la sortie de l'onduleur, la figure montre qu'on a deux niveaux de tension: $v_{dc}/3$ et $2.v_{dc}/3$ apparaissent clairement et correspondent à correspondent respectivement à 233V et 466V.

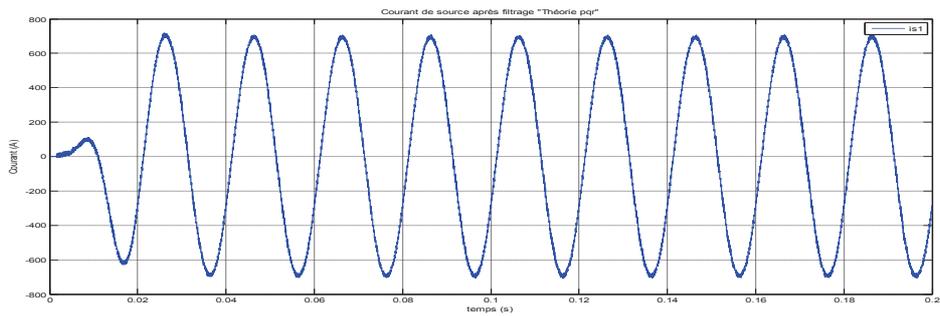
La figure. 3.20, montre le nouveau courant de la source après insertion du filtre actif parallèle pour les trois méthodes.



a) Théorie pq.

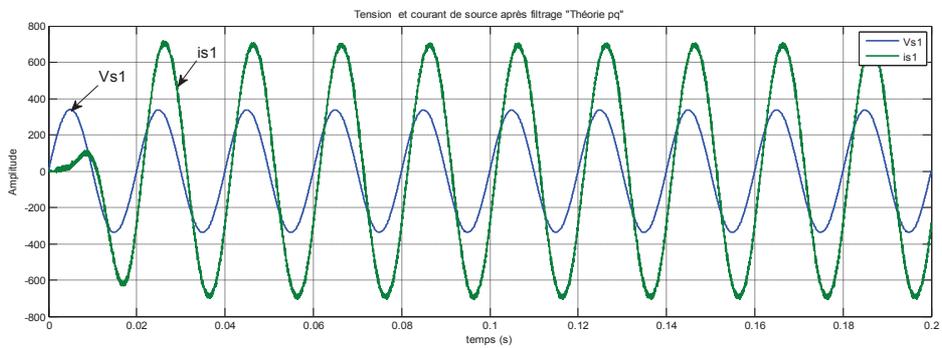


b) Théorie dq.

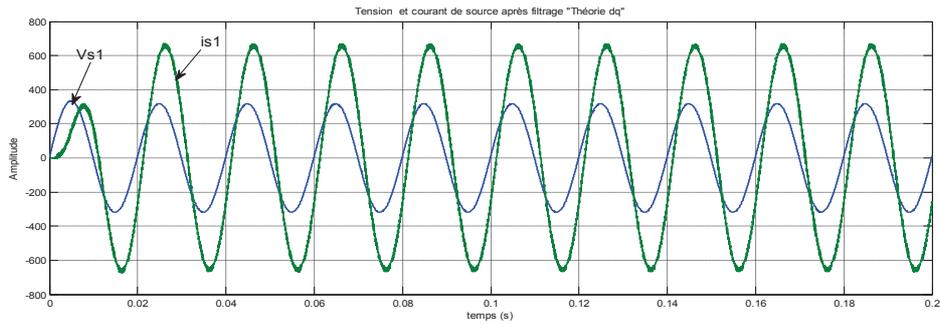


c) Théorie pq.

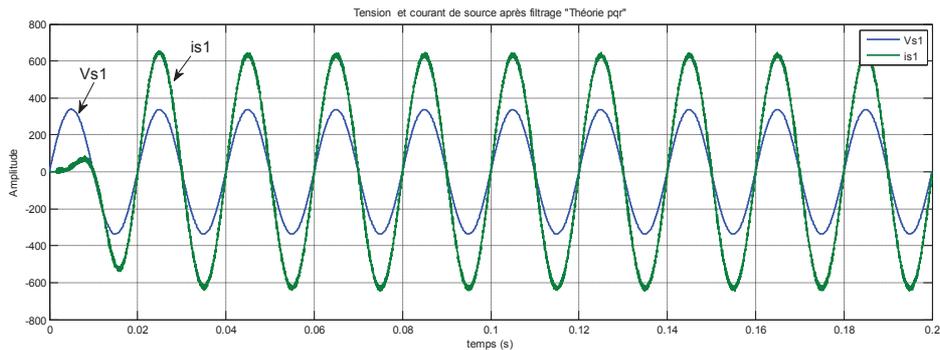
Figure 3.20: Courant dans une phase de la source après filtrage



a) Théorie pq.



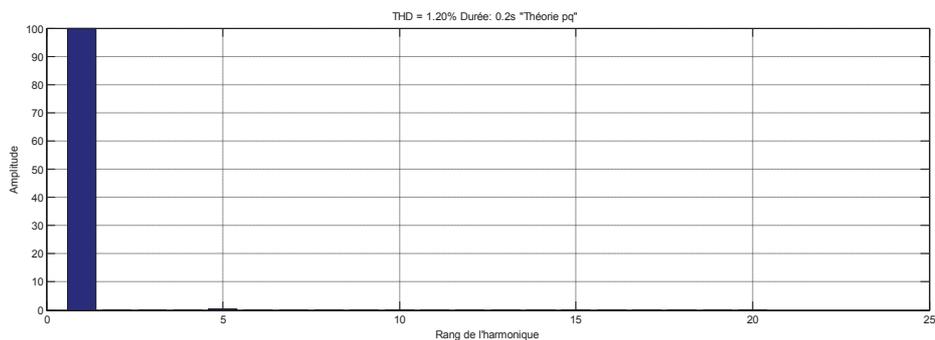
b) Théorie dq.



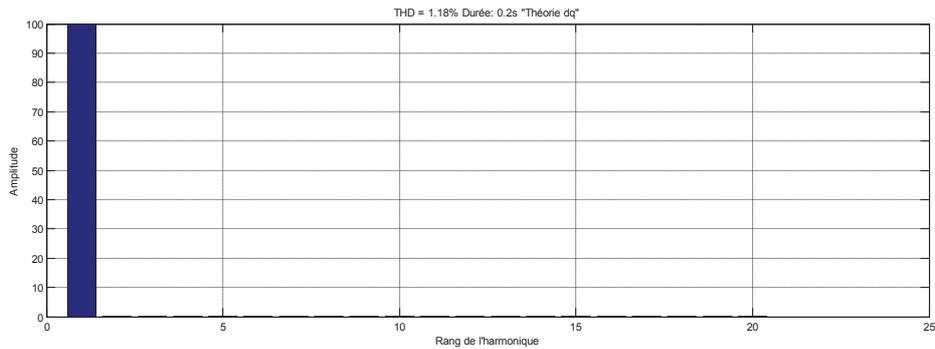
c) Théorie pqr.

Figure 3.21: Allures du courant et la tension dans une phase après filtrage actif

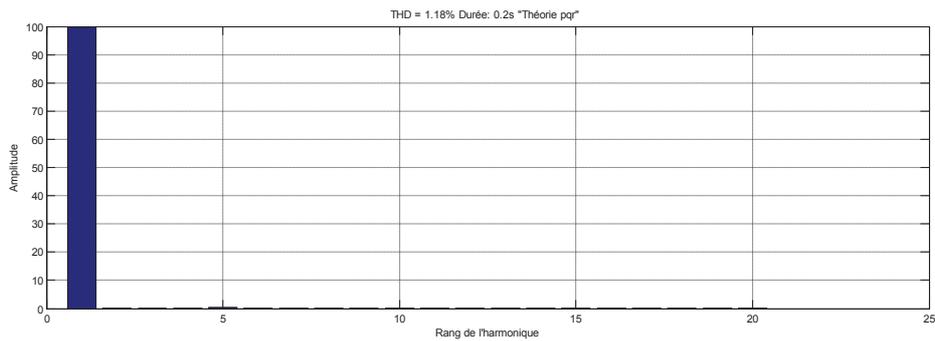
Après l'injection du courant de référence reproduit par le filtre actif dans le réseau, on peut constater qu'une fois le filtre actif parallèle est mis en marche, le courant du réseau y est désormais sinusoïdal et exempt de toutes perturbations harmoniques pour les trois méthodes d'identification. Le fait que le courant de source à récupérer son allure sinusoïdale, ce qui traduit que si notre onduleur puisse injecter un courant qui suit sa référence, on aura un courant de source sinusoïdale. La figure. 3.21, montre le nouveau courant et la tension de source. Les deux ondes sont presque en phase, malgré la existence d'un léger décalage (retard de i_{s1} par rapport à v_{s1}).



a) Théorie pq.



b) Théorie dq.



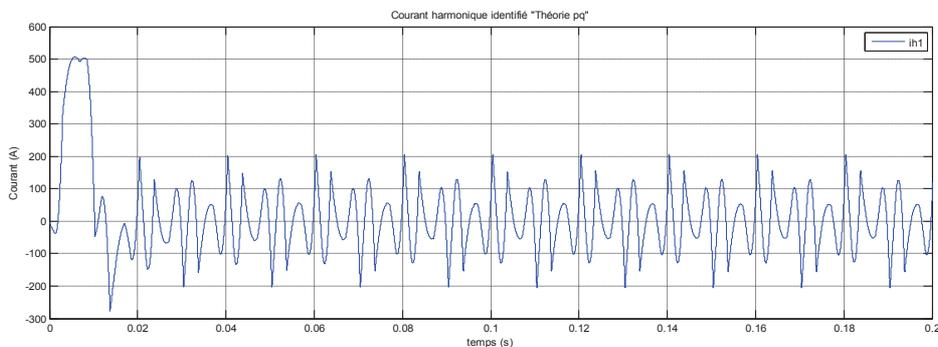
c) Théorie dq.

Figure 3.22: Spectre harmonique de courant de source après filtrage

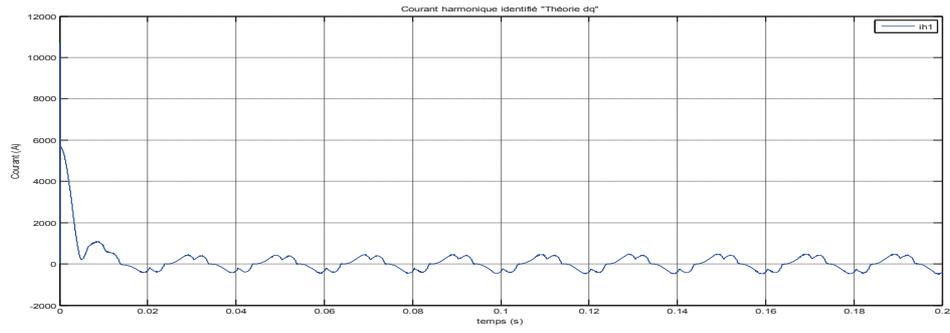
La figure 3.22 présente l'analyse spectrale de courant de source effectuée sur la 1ère phase. Cette représentation spectrale confirme le non présence des harmoniques, ces dernières sont compensées. Le TDHi qui était à 16,75%, est réduit après filtrage à un taux très faible de 1.20 % pour la théorie (pq), 1.18% pour les théories (dq) et (pqr), ce qui confirme la validité des méthodes proposées.

III.2.2 Résultat de Simulation du FAP avec Régulation du Bus Continu

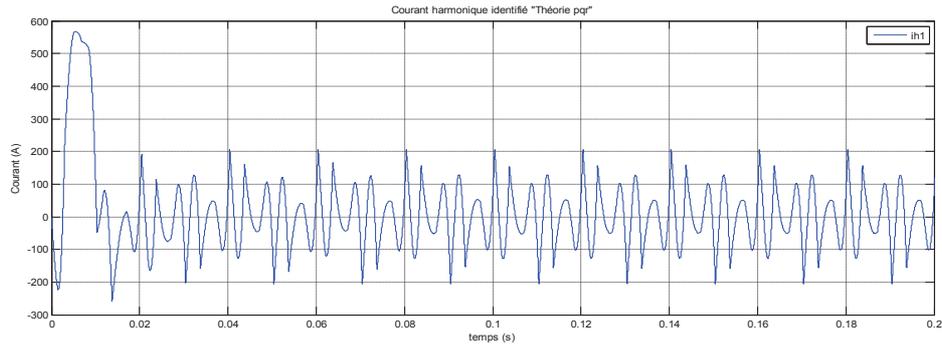
Maintenant, nous allons présenter les résultats de simulation avec le filtre actif et pour les trois méthodes de contrôle présentées auparavant, avec régulation de la tension de bus continu sont illustrés par les figures (3.23-3.31).



a) Théorie pq.



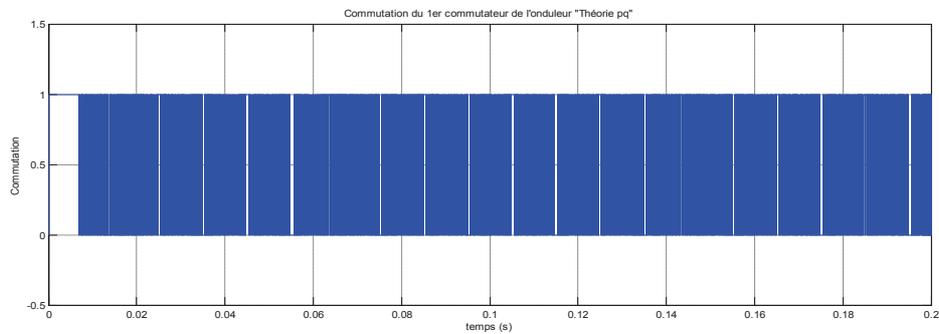
b) Théorie dq.



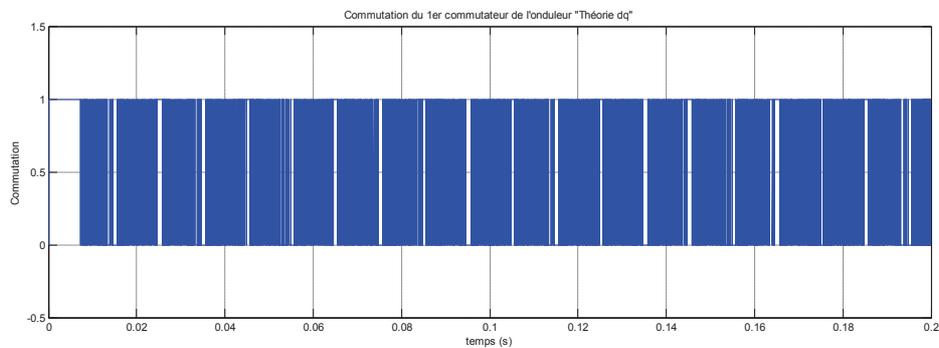
c) Théorie pqr.

Figure 3.23: Courant harmonique identifié d'une phase

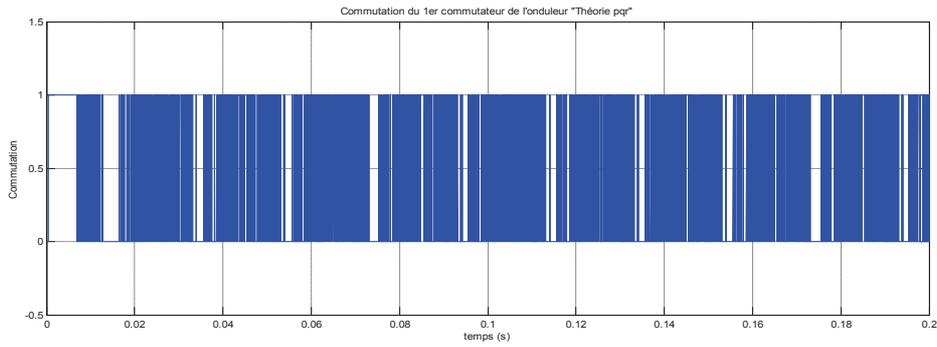
La Figure 3.23, présente les formes de courant harmoniques identifié d'une phase qu'il faut éliminer pour dépolluer le réseau, pour les trois algorithmes d'identification.



a) Théorie pq.



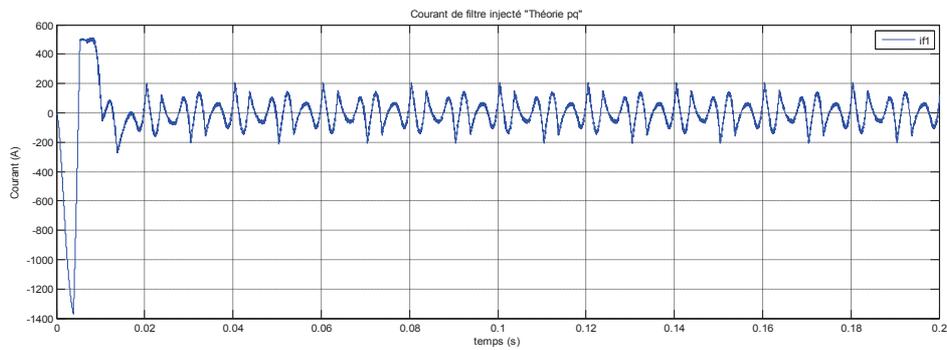
b) Théorie dq.



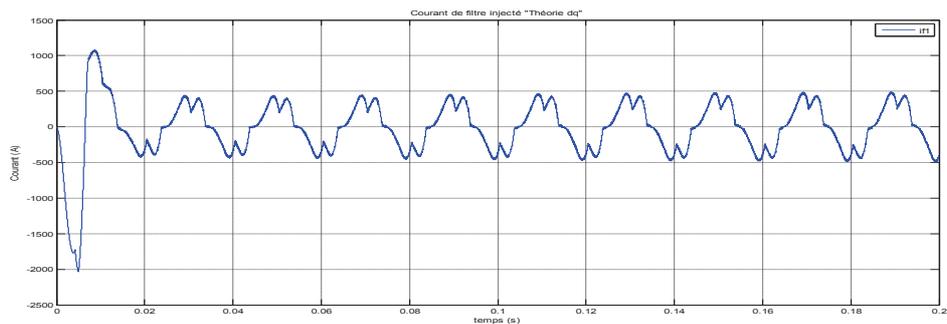
c) Théorie pqr.

Figure 3.24: Commutation d'un interrupteur de l'onduleur

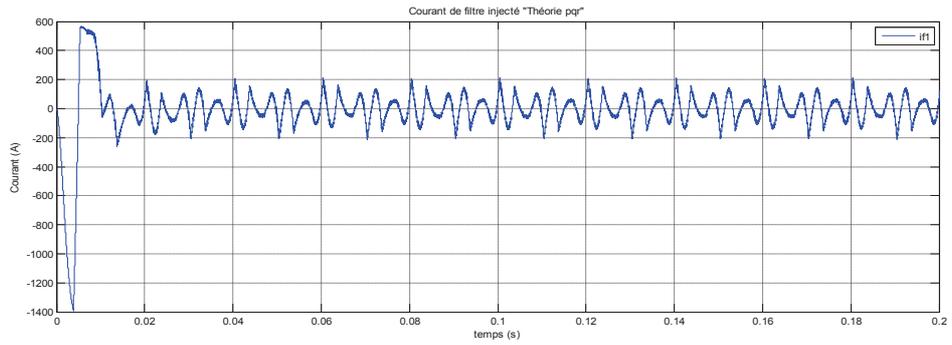
La Figure 3.24, montre que la commutation du premier interrupteur de l'onduleur est presque régulière pour les trois techniques, le calcul du nombre de commutation donne une fréquence de commutation de $f_c=30.28$ kHz pour la théorie (pq), $f_c=25.71$ kHz pour la théorie (dq) et $f_c=21.30$ kHz pour théorie (pqr).



a) Théorie pq.

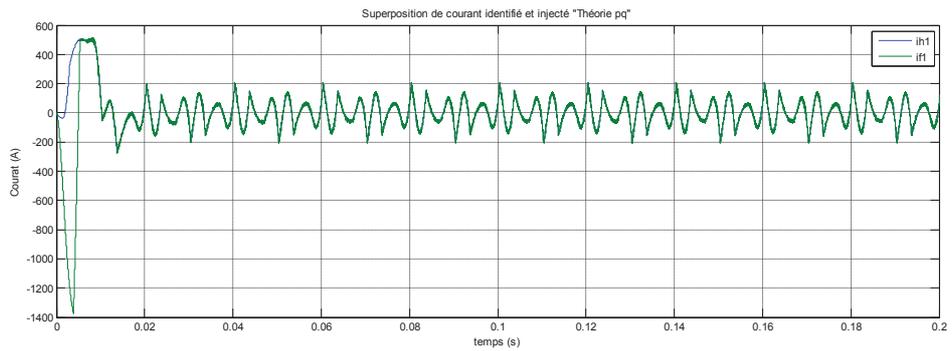


b) Théorie dq.

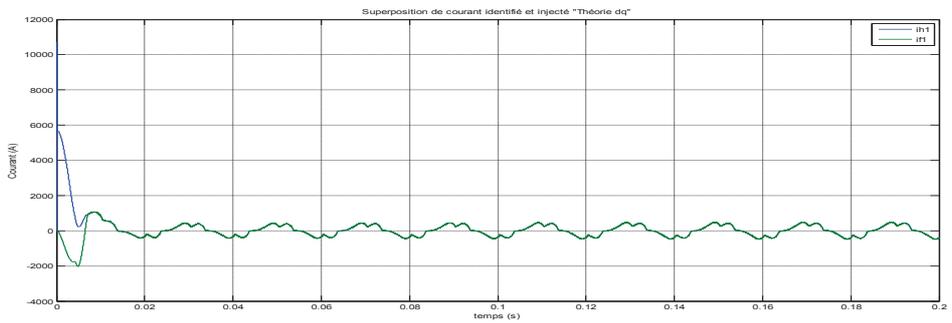


c) *Théorie pqr.*

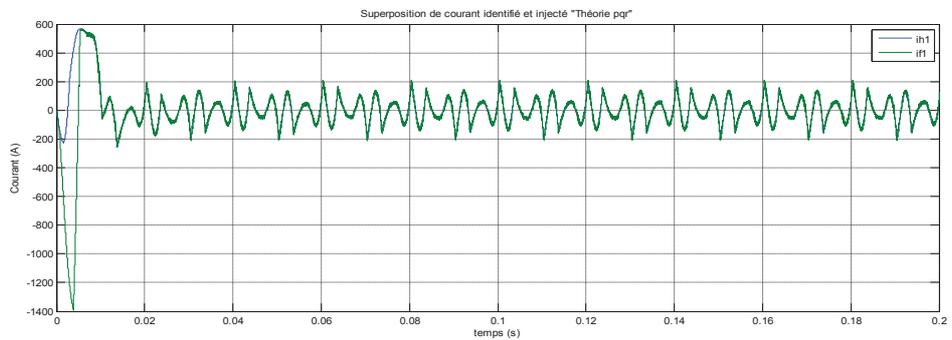
Figure 3.25: Courant de filtre injecté d'une phase au réseau



a) *Théorie pq.*



b) *Théorie dq.*

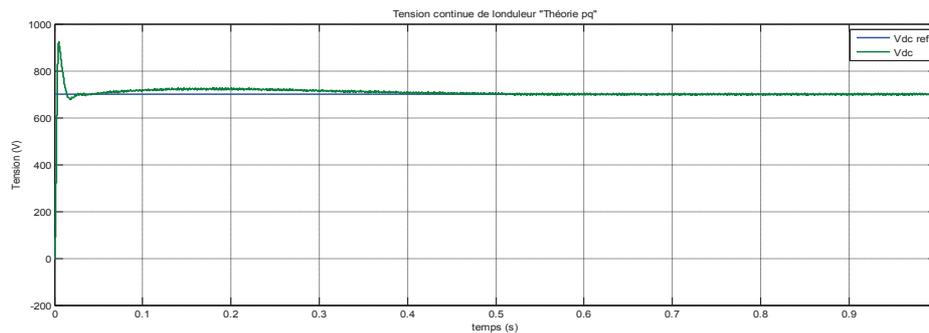


c) *Théorie pqr.*

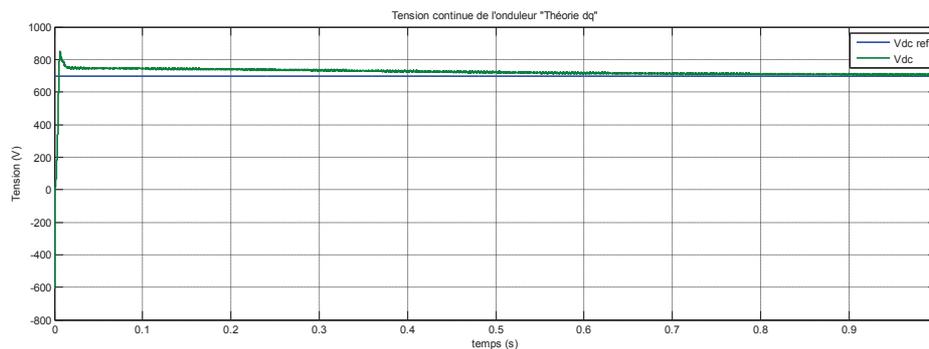
Figure 3.26: Courant de référence et le courant généré par le filtre actif

Pour s'assurer du bon fonctionnement du système de filtrage, nous avons montré dans la Figure 3.26, la superposition de courant identifié et injecté. Il est évidemment clair qu'ils sont complètement identiques.

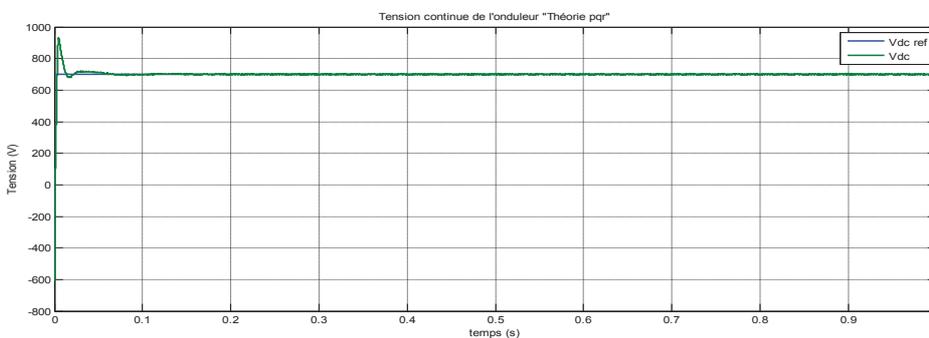
La Figure 3.27, illustre la de tension de référence et la tension du bus continu de l'onduleur, on remarque qu'après le régime transitoire, la tension du bus continu coïncide avec la tension de référence sur l'effet de boucle de régulation intégré dans le système de filtrage. Notons que la théorie (pq) et (dq) présente un temps de réponse plus rapide que celui de la théorie (pqr).



a) *Théorie pq.*

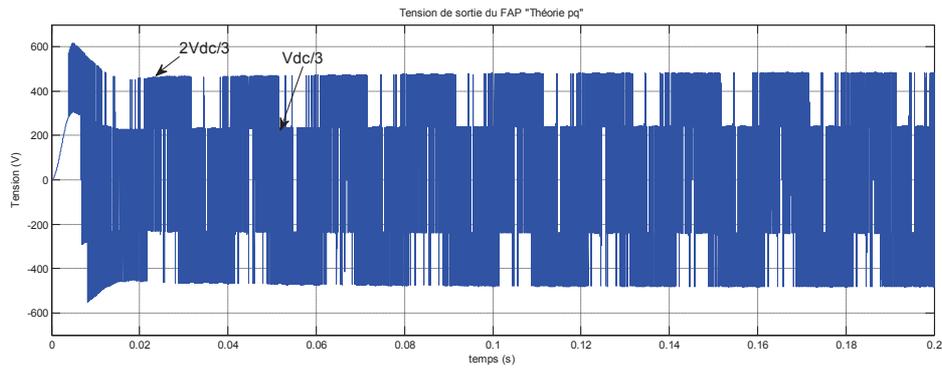


b) *Théorie dq.*

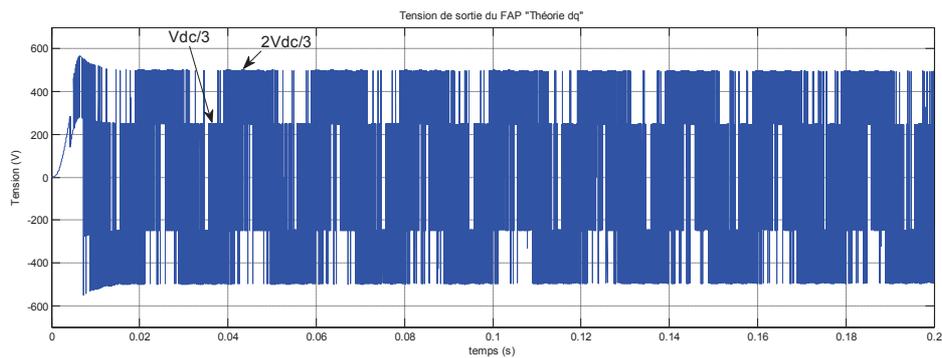


c) *Théorie pqr.*

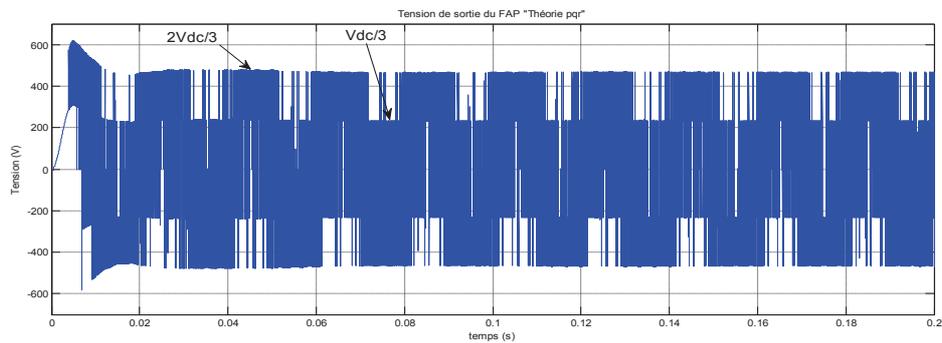
Figure 3.26: La tension de référence et la tension mesurée à l'entrée de l'onduleur



a) Théorie pq.



b) Théorie dq.



c) Théorie pqr.

Figure 3.28: Tension dans une phase de l'onduleur deux niveaux

La Figure 3.28, illustre la tension de sortie du FAP avec régulation du bus continu. Les deux niveaux de tension (tension du Tableau 2.1) $v_{dc}/3$ et $2.v_{dc}/3$ apparaissent clairement et correspondent à 233 V et 466 V respectivement.

La figure. 3.29, montre le nouveau courant de la source après insertion du filtre actif parallèle pour les trois méthodes d'identification.

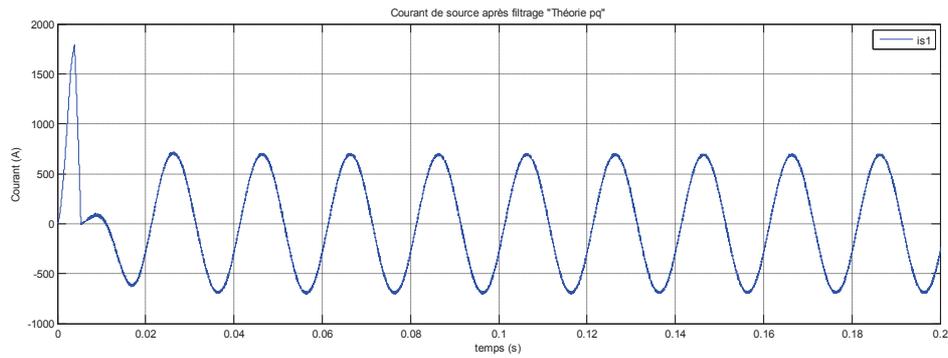
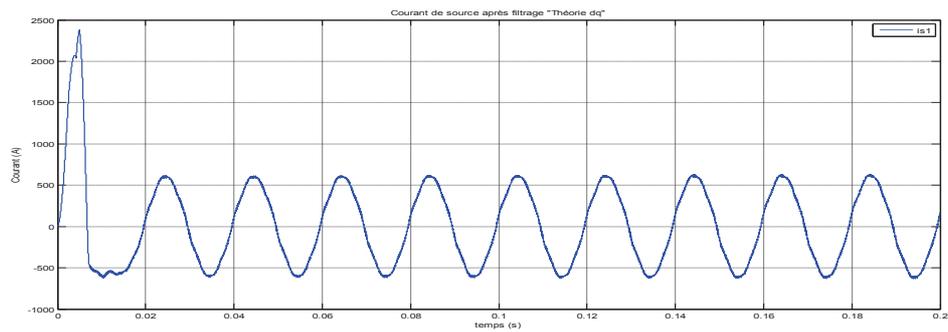
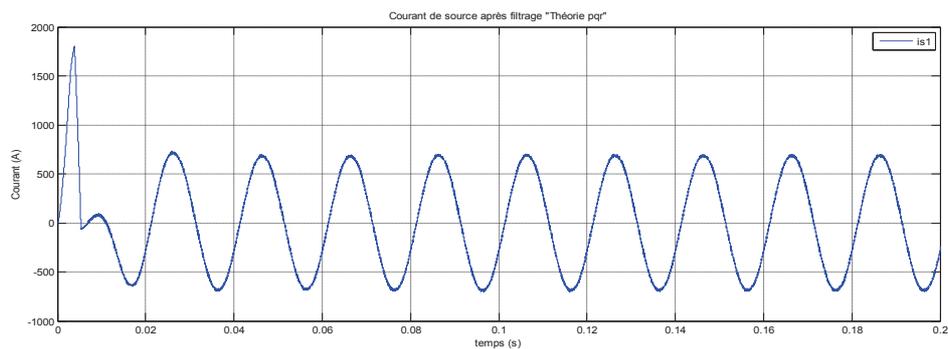
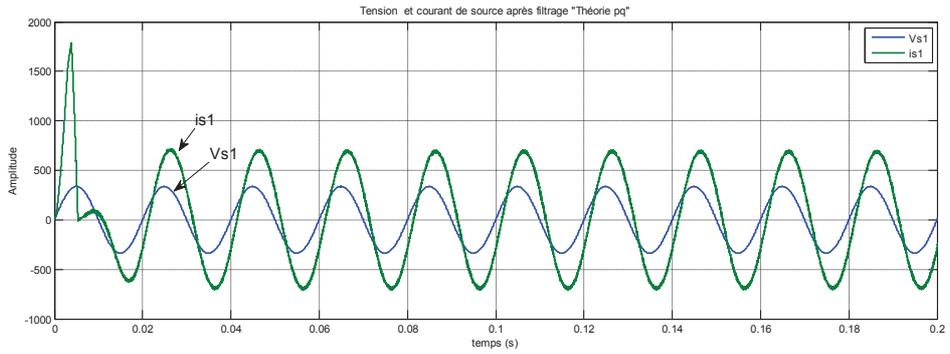
a) *Théorie pq.*b) *Théorie dq.*c) *Théorie pqr.*

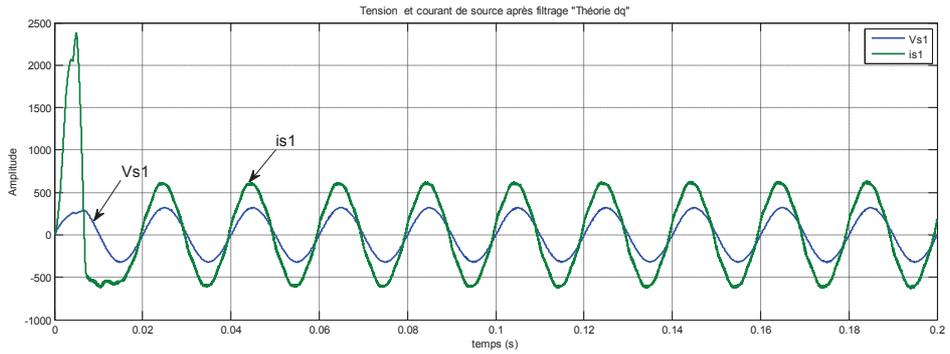
Figure 3.29: Courant dans une phase de la source après filtrage

On remarque qu'une fois le filtre actif parallèle est mis en fonctionnement, le courant du réseau y est désormais quasi-sinusoïdal et libre de toutes perturbations harmoniques pour les trois cas de commande du FAP malgré la présence d'un courant fort dans la période transitoire du à la régulation du bus continu de l'onduleur.

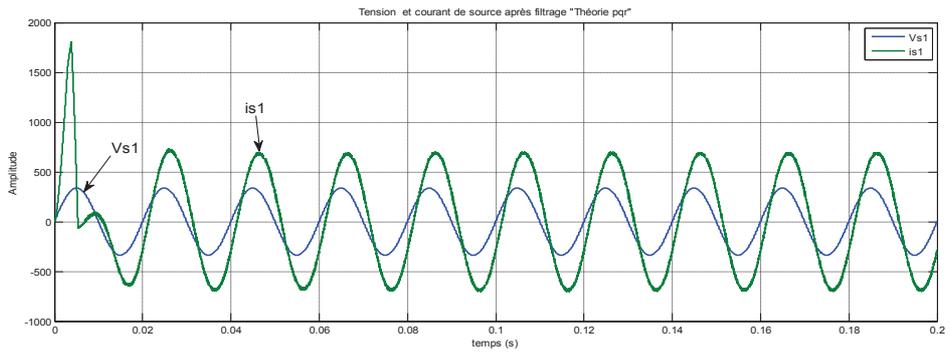
Le fait que le courant de source a récupéré son allure sinusoïdale nous rassure que le filtre actif parallèle a généré un courant qui suit bien sa référence.



a) Théorie pq.



b) Théorie dq.

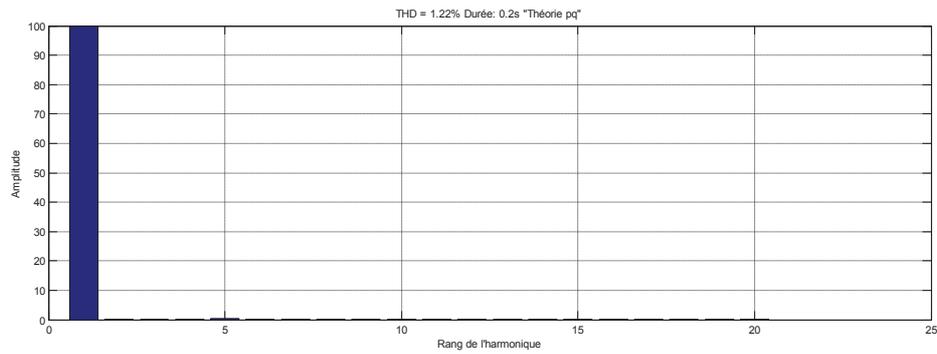


c) Théorie pqr.

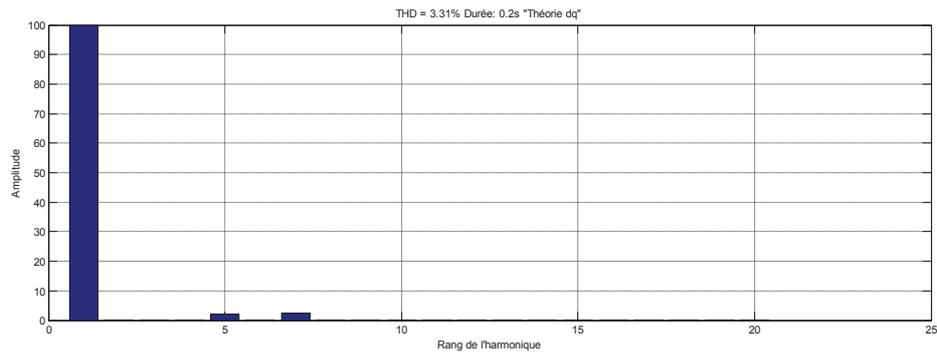
Figure 3.30: Allures de courant et tension après filtrage actif

Dans la Figure. 3.30, on montre le nouveau courant i_{s1} et la tension de source v_{s1} . Les deux ondes sont en phase, malgré la présence d'un léger décalage (retard de i_{s1} par rapport à v_{s1}).

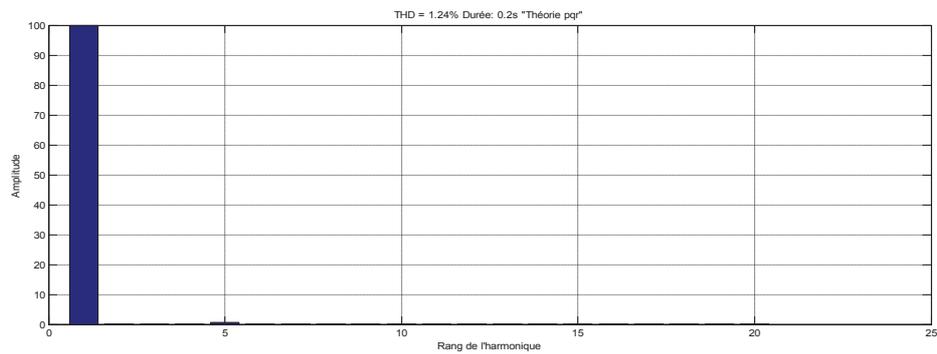
La Figure 3.31 présente l'analyse spectrale de courant de source effectuée sur la 1^{ère} phase après filtrage, pour les trois méthodes de commande du FAP.



a) *Théorie pq.*



b) *Théorie dq.*



c) *Théorie pqr.*

Figure 3.31: Spectre harmonique du courant de la source après filtrage

On remarque bien que la méthode (pq) et la théorie (pqr), que le spectre présente le fondamental, avec l'harmonique d'ordre 5 de très basse amplitude, ce qui confirme une très bonne qualité de filtrage avec un THD de 1.22 % pour la méthode (pq) et de 1.24% pour la méthode (pqr).

Par contre pour la méthode (dq), on constate que le spectre du courant présente en plus du fondamental, les harmoniques d'ordre 5 et 7, avec un THD de 3.31%.

III.2.3 Etudes Comparatives Entre les Méthodes de Commande

Afin de mieux exploiter les résultats obtenus, on se propose de faire une comparaison entre les résultats de simulation du le filtre actif pour les trois méthodes de contrôle présentées auparavant comme il est représentée dans le tableau 3.2.

Méthode d'identification	Commande sans régulation du bus continu			Commande avec régulation du bus continu		
	PQ	DQ	PQR	PQ	DQ	PQR
THDi %	01,20	01,18	01,18	01,22	03,31	01,24
Fréquence de commutation KHz	20,86	23,15	20,80	23,55	25,81	21,04

Tableau 3.2: Comparaison entre le deux mode de commande

D'après les résultats qui figurent dans le tableau 3.2, on constate que le THDi est dans les normes pour les deux méthodes (pq) et (pqr), presque les mêmes valeurs pour les deux modes de fonctionnement (sans et avec régulation de la tension du bus continu), Cependant la méthode (dq) avec régulation de la tension du bus continu présente un THDi de 3.31% qui dépasse la valeur limitée par les normes IEEE.

Pour la fréquence de commutation, on remarque une augmentation de la fréquence de commutation dans le fonctionnement avec régulation à celle utilisée sans régulation. On peut conclure que le bon réglage de la tension continu de l'onduleur nous donne une meilleure protection de l'onduleur contre les perturbations.

III.3 CONCLUSION

Dans ce travail, un filtre actif à base d'un onduleur de tension deux niveaux, est étudié avec différentes stratégies de détection des harmoniques basées respectivement sur la méthode des puissances instantanées (pq), la théorie de référentiel synchrone (dq) et la théorie des puissances instantanées dans le référentiel (pqr). Ces méthodes donnent directement la forme d'onde harmonique à compenser et ont une réponse adéquate pour le traçage des harmoniques variant dans le temps. Les résultats de simulations obtenus sur l'interface Simulink du logiciel Matlab, confirment l'efficacité des méthodes proposées.

Dans le chapitre suivant nous essayons d'étudier le filtre actif parallèle à base des onduleurs de tension trois niveaux, pour but d'améliorer les formes d'ondes de la tension et de courant, afin de minimiser le contenu en harmoniques.

Chapitre IV:
Filtre Actif Parallèle à Base
des Onduleurs Trois Niveaux

IV. INTRODUCTION

Au cours des dernières années, les onduleurs multi-niveaux sont beaucoup utilisés dans les domaines d'application de moyenne tension et grande puissance, en raison de leurs divers avantages tels que: la bonne qualité de l'alimentation, une bonne compatibilité électromagnétique, les pertes de commutation faibles et leur capacité en haute tension, ainsi que, la diminution de contenu harmonique dans la tension et courant de sortie [89] [90].

On distingue alors plusieurs types des convertisseurs [23] :

- Les convertisseurs “clampés par le neutre” qui ont comme désavantage le nombre des composants semi-conducteurs (4 interrupteurs et deux diodes pour trois niveaux).
- Les convertisseurs multicellulaires laissent espérer de bonnes performances dynamiques en jouant sur les degrés de liberté mais nécessitent des lois de commande plus complexes.

De nombreuses publications concernent les applications multi-niveaux ont été sujets de recherche très tôt avec les différentes topologies NPC, multicellulaire, ou à convertisseurs imbriqués. Néanmoins la topologie dominante pour les applications du filtrage actif, reste actuellement la structure NPC, vu la simplicité de la commande pour le cas des onduleurs trois niveaux. Au delà de trois niveaux, le contrôle de ces onduleurs reste très délicat [91]. En élevant le nombre de niveaux de l'onduleur, les tensions de sortie ont plusieurs niveaux induisent une forme d'onde de plus en plus proche d'une sinusoïde échantillonnée. Par conséquent, en comparant avec l'onde de la tension de sortie de l'onduleur deux niveaux, celle de l'onduleur trois niveaux à un taux de distorsion plus réduit et donc une moindre pollution harmonique [53].

Dans la première partie de ce chapitre nous aborderons la modélisation des onduleurs multi-niveaux en vue de l'application à la commande du FAP, par la suite nous présenterons des simulations numériques sous Matlab/Simulink du filtre actif trois niveaux pour les trois méthodes d'identifications vues dans le chapitre 3.

IV.1 ONDULEURS MULTI-NIVEAUX

IV.1.1 Topologies des Onduleurs Multi-Niveaux

Nous présentons ci-dessous, d'une manière brève, les principales topologies des onduleurs multi-niveaux évoquées dans la littérature [94].

IV.1.1.1 Topologie basée sur la mise d'onduleurs 2-niveaux en cascade

L'une des premières réalisations de cette topologie avait déjà été réussie en recourant aux onduleurs polygonaux, dans un bras à N -niveaux (N impair ≥ 3).

Chaque pont onduleur monophasé, d'indice n , peut générer une tension de sortie de valeurs $(-E, 0, +E)$. Les tensions de sortie de chaque pont sont ensuite additionnées par l'intermédiaire des transformateurs.

IV.1.1.2 Topologie multicellulaire où à cellules imbriquées

Cette topologie a été inventée en début des années 90, Le principe de génération des niveaux de tension intermédiaires est basé sur la connexion de plusieurs sources de tension continues, matérialisées par des condensateurs flottants en agissant sur les états logiques, des cellules de commutation.

IV.1.1.3 Topologie NPC (Neutral Point Clamped)

Cette topologie est connue depuis la fin des années 70, puis au début des années 80, étant l'une des premières publications contribuant largement à sa diffusion. C'est le cas que nous allons étudier dans ce qui suit

IV.1.2 Avantages des Onduleurs Multi-Niveaux

Les onduleurs multi-niveaux offrent d'énormes avantages par rapport aux onduleurs 2-niveaux. Ces avantages sont visibles, d'une part d'un point de vue technologique et d'autre part d'un point de vue fonctionnel [95-94] [97]:

IV.1.2.1 Les Avantages technologiques

Dans les onduleurs multi niveaux, la répartition de la tension est obtenue de manière naturelle en régime établi, ce qui permet de commuter chaque semi-conducteur indépendamment des autres. Ceci rend le convertisseur plus robuste et plus performant pendant les commutations. La tension commutée est d'amplitude réduite et la commutation est donc plus simple à gérer

IV.1.2.2 Les Avantages fonctionnelles pour le convertisseur

Possibilité d'accéder à des applications de plus forte puissance [95,97]. Possèdent de meilleurs compromis entre performances statiques (tension de saturation) et performances dynamiques (temps de commutation, pertes par commutation, fréquence de découpage) [96].

IV.1.2.3 Les Avantages fonctionnelles pour les machines tournantes

Le nombre de tension généré par un onduleur multi-niveaux plus élevé que celui d'ondeur 2-niveaux de tension, permet d'améliorer la qualité de sa forme d'onde, qui se traduira par une réduction de sa distorsion harmonique [95,97]. Ceci peut entraîner des avantages considérables comme la diminution des pertes fer, l'augmentation du temps de vie des isolants ou la diminution du rayonnement électromagnétique issu des bobinages de la machine.

IV.2 ONDULEUR DE TENSION TROIS NIVEAUX N.P.C

Il existe différentes compositions d'onduleurs multi niveaux, selon le type d'application. Pour de faibles et moyennes puissances, on utilise des onduleurs à deux niveaux. Pour des applications de haute tension et/ou fortes puissances, on utilise des onduleurs multi-niveaux [92] [93].

IV.2.1 Structure de l'onduleur à Trois Niveaux N.P.C

La figure 4.1, présente le schéma général de l'onduleur de tension trois niveaux, de structure appelée à point neutre "clampé" (*NPC Neutral-Point-Clamped*), C'est l'une des structures d'onduleur à 3-niveaux de tension. Elle présente beaucoup d'avantage, tels que le nombre de tension généré est plus élevé, moins d'harmonique de distorsion et faible fréquence de commutation [98]. Chaque bras de l'onduleur est constitué de 4 interrupteurs: S_i , S_i' , S_j , S_j' . Les interrupteurs S_i et S_i' ont un fonctionnement complémentaire.

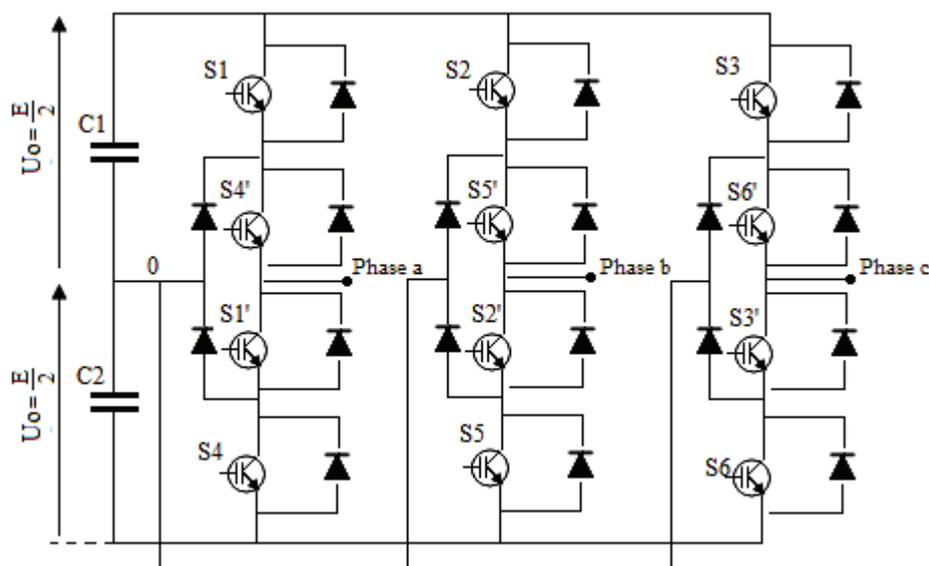


Figure. 4.1. Structure d'un onduleur de tension trois niveaux

Il comporte deux sources de tension continue et trois bras symétriques. Chaque bras est constitué de quatre interrupteurs bidirectionnels et deux diodes médianes, permettant d'avoir le niveau zéro de la tension de sortie de l'onduleur. La structure N.P.C utilise deux tensions d'entrée. Elle consiste à créer un point milieu sur l'étage de tension continue de valeur U_c , permettant de générer des créneaux d'amplitude $-U_c/2$, 0 , $+U_c/2$ dont la combinaison permet d'avoir une onde proche de la sinusoïde qu'avec la structure classique d'onduleur à deux niveaux [98].

Pour une tension d'entrée U_c , les interrupteurs d'un onduleur à trois niveaux supportent la moitié de la tension supportée par ceux d'un onduleur à deux niveaux.

IV.2.2 Fonctionnement et Configuration d'un Bras d'Onduleur à Trois Niveaux

Dans un premier temps, on définit un modèle global d'un bras sans a priori sur la commande (Figure 4.2), vu que l'onduleur triphasé à trois niveaux est symétrique, puis on déduit celui de l'onduleur complet.

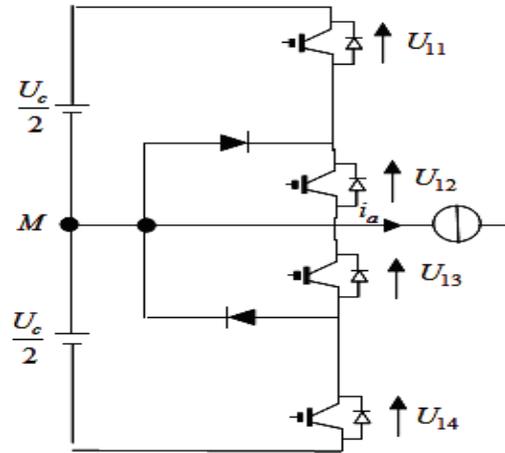


Figure 4.2 : Structure d'un bras de l'onduleur à 3-niveaux de type NPC

Lorsque la source de tension et génératrice et la source de courant est réceptrice, la liaison des deux sources s'effectue à travers les transistors ; lorsque le transfert d'énergie s'opère de la sortie vers la source d'entrée, ce sont les diodes qui assurent le passage du courant.

Pour la configuration de l'onduleur trois niveaux, on a cinq configurations pour chaque bras comme il est présenté dans les figures ci-dessous :

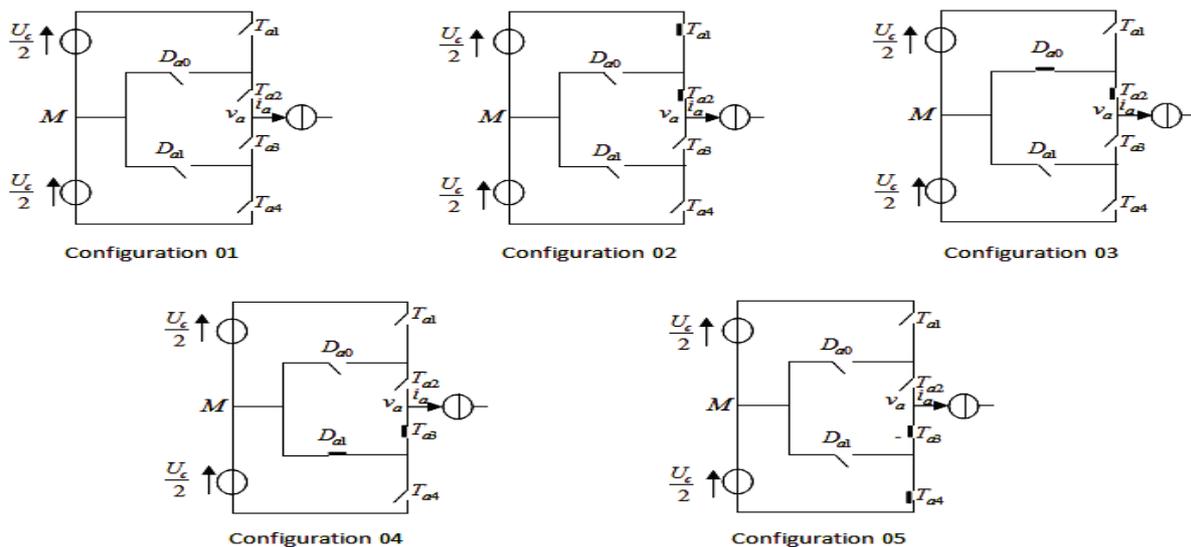


Figure 4.3 : Les différents configurations d'un bras d'onduleur trois niveaux

Chaque configuration est caractérisée par une grandeur électrique comme suite :

- ❖ Configuration 01: $V_a = 0$.

- ❖ Configuration 02 : $V_a = U_c/2$.
- ❖ Configuration 03 & 04 : $V_a = 0$.
- ❖ Configuration 05 : $V_a = -U_c/2$.

La combinaison des 4 interrupteurs d'un même bras (S_i, S'_j, S'_i, S_j), on peut imposer à la phase 3-niveaux de tension différentes: $(0,0,1,1) \rightarrow -E/2, (0,1,1,0) \rightarrow 0, (1,1,0,0) \rightarrow E/2$ les combinaisons $(1,1,1,0)$ et $(0,1,1,1)$ réalisent un court-circuit de l'une des deux demies sources de tension continue pour cela elles sont interdites. L'ensemble des vecteurs tensions délivrées par un onduleur à trois niveaux ainsi que les séquences de niveaux de phase correspondantes sont représentés dans la figure. 4.4.

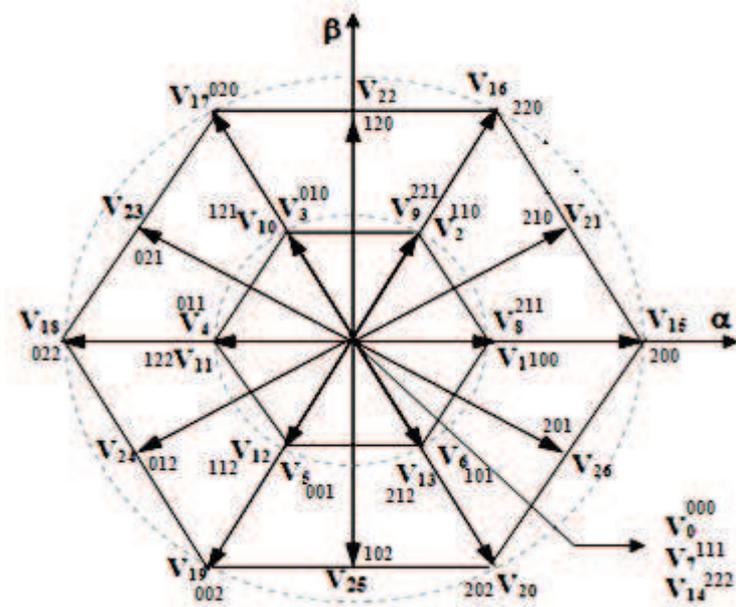


Figure.4.4. Vecteurs tension que peut fournir l'onduleur à 3-niveaux de tension

✚ **Le groupe des vecteurs "tension nulle"** : Ils sont obtenus par trois combinaisons différentes des états des 3 bras: $(1, 1, 1), (-1, -1, -1)$ et $(0, 0, 0)$, et qu'on a nommé respectivement V_7, V_{14} et V_0 . Ils n'ont pas d'influence sur la tension du point milieu de l'onduleur.

✚ **Le groupe des vecteurs "demie tension"** : on peut décomposer ce groupe en 2 autres sous-groupes:

- ⊕ Le premier est constitué des vecteurs nommés V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 et V_6 .
- ⊕ L'autre est constitué des vecteurs $V_8, V_9, V_{10}, V_{11}, V_{12}$ et V_{13} .

Ces vecteurs constituent l'hexagone interne "demie tension". L'application d'un vecteur de l'un ou l'autre sous-groupe a un effet contraire sur l'évolution de la tension du point milieu E, En effet, l'application d'un vecteur du premier sous-groupe (respectivement du deuxième) va entraîner une décharge du condensateur d'entrée C_1 (respectivement du condensateur C_2) [27].

- ✚ **Le groupe des vecteurs "pleine tension"** : Ce groupe contient les vecteurs tensions nommés $V_{15}, V_{16}, V_{17}, V_{18}, V_{19}$ et V_{20} . Ces vecteurs constituent l'hexagone extérieur "pleine tension" [86,98]. La tension du point milieu E, n'est pas affectée par l'application de ces vecteurs, car le courant qui circule dans C_1 et dans C_2 est le même.
- ✚ **Le groupe des vecteurs "tension intermédiaire"** : les vecteurs tensions de ce groupe se nomment $V_{21}, V_{22}, V_{23}, V_{24}, V_{25}$ et V_{26} . Pendant l'application de ces vecteurs, on ne peut pas savoir s'il va augmenter ou diminuer la tension du point milieu E, où l'on va solliciter les deux condensateurs, mais les courants qui les traverseront ne seront pas égaux [27,86, 98]. Il y aura un déséquilibre de E qui dépend des courants circulant dans les phases pendant ce fonctionnement.

IV.2.3 Algorithme de Commande de l'Onduleur Trois Niveaux

Pour éviter la conduction simultanée des quatre interrupteurs d'un bras, ce qui peut causer leur destruction par augmentation du courant lors du court-circuit, ou une surtension dans le cas de l'ouverture de tous les interrupteurs ; pour cela on décrit la commande complémentaire, qui permet d'avoir les trois tensions : $U_c/2, 0, -U_c/2$ pouvant être appliquées sur un bras de l'onduleur comme suit:

$$\begin{cases} T_{a1} = \bar{T}_{a4} \\ T_{a2} = \bar{T}_{a3} \end{cases} \quad (4.1)$$

Cette commande complémentaire donne les cas suivants :

T_{a1}	T_{a2}	T_{a3}	T_{a4}	V_a
0	0	1	1	$-U_c/2$
0	1	0	1	inconnue
1	0	1	0	0
1	1	0	0	$U_c/2$

Tableau 4.1: Table d'excitation

Pour le cas inconnu il sera éliminé lors de l'établissement de l'algorithme de commande.

IV. 3 SIMULATION NUMERIQUE SOUS MATLAB SIMULINK

Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats de simulation d'un filtre actif parallèle à base d'un onduleur trois niveaux (Figure 4.4), obtenus pour les trois méthodes d'identification des courants de référence étudiées dans le chapitre 3, en gardant les mêmes conditions et paramètre de simulation.

On va procéder à la commande du FAP dans la 1^{er} étape lorsque la source de tension continue est autonome du réseau d'alimentation (sans régulation), en 2^{ème} étape avec régulation du bus continu de l'onduleur lorsque la source continue est liée au réseau d'alimentation par la capacité C_{dc} (avec régulation).

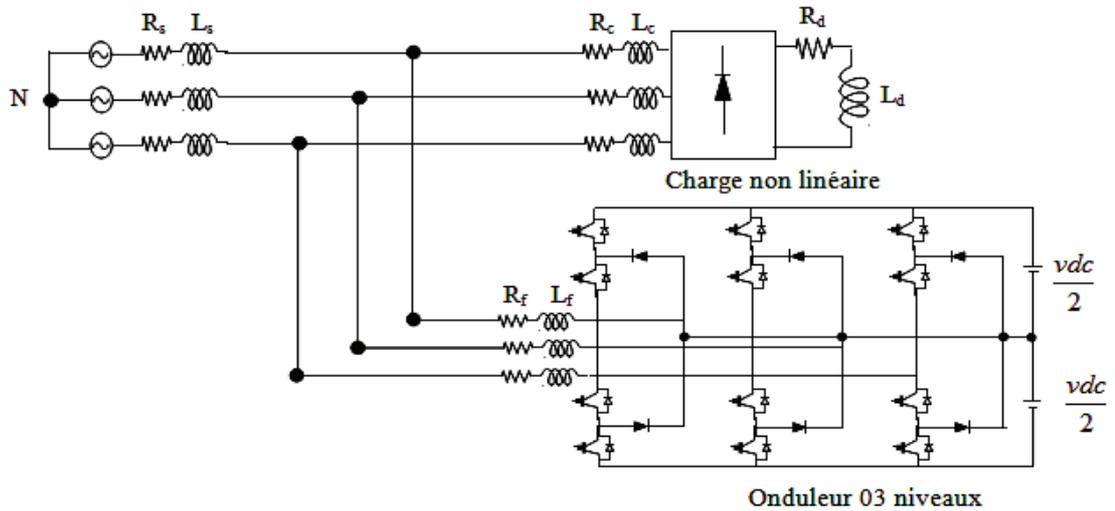


Figure 4.4 : Filtre actif parallèle trois niveaux

Les figures (4.5 et 4.6) montrent respectivement le courant et la tension de la source avant compensation.

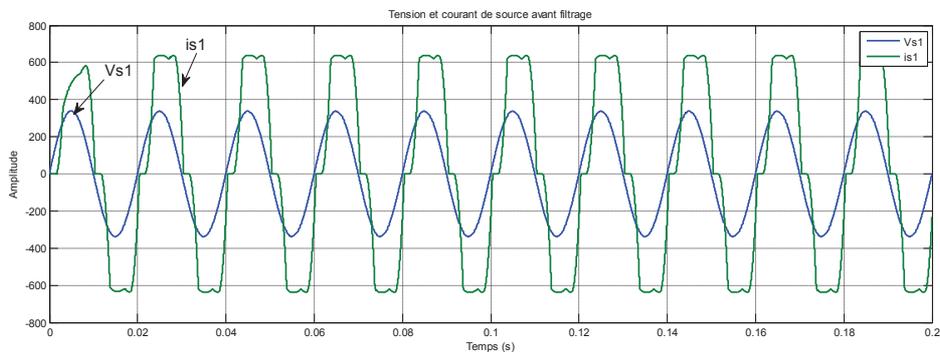


Figure 4.5 : Tension et courant de source avant filtrage

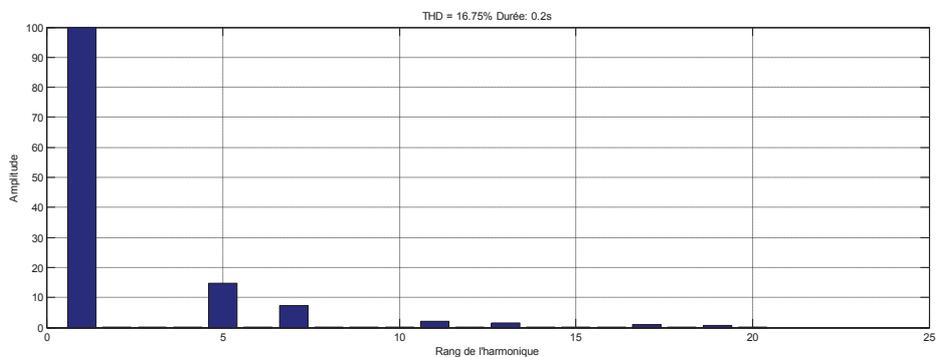


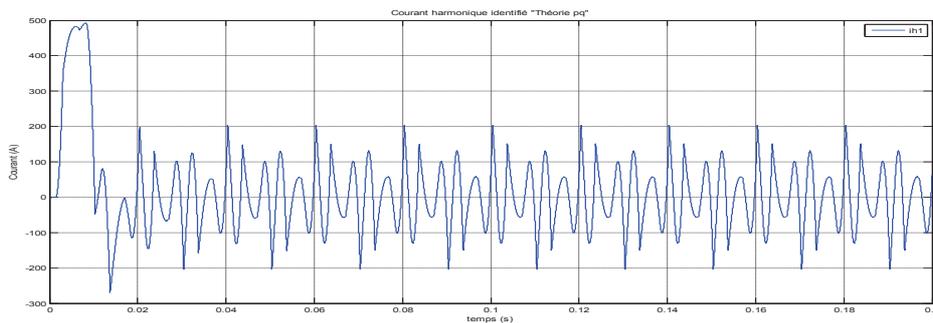
Figure 4.6: Spectre harmonique de courant de source avant filtrage

La charge non linéaire génère des courants non sinusoïdaux qui polluent le réseau étudié; ce qui est bien montré sur la forme de courant de la source représenté par la figure 4.5 (en vert) (courant coté charge et coté source).

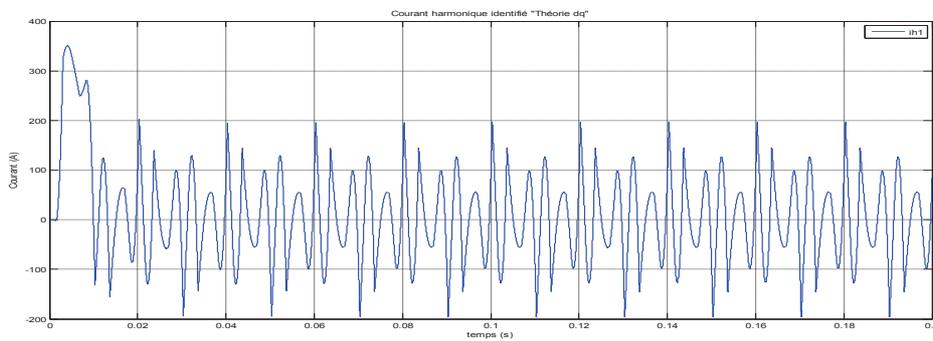
D'après la figure 4.6 qui représente l'analyse spectrale du courant de source, on remarque que plus le fondamentale l'existence des harmoniques d'ordre 5 ; 7 ; 11 ; 13 ; 17 et 19, ce qui traduit par un THD de 16.75%.

IV. 3.1. Commande du FAP Trois Niveaux sans Régulation du Bus Continu

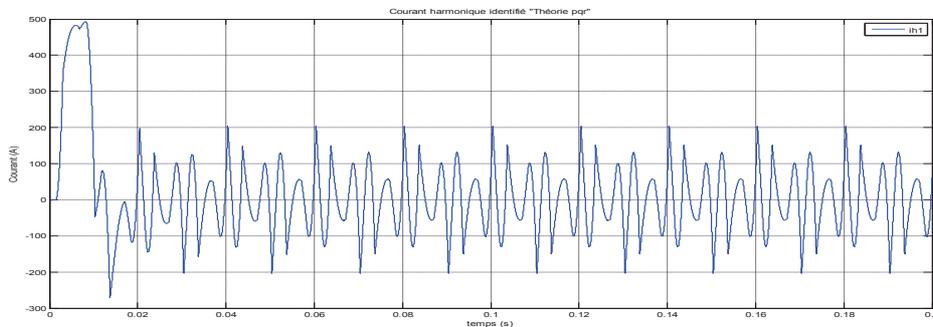
Les résultats de simulation obtenus pour les trois méthodes d'identification (pq) (dq) et (pqr) sont illustrés successivement par les figures (4.7-4.14).



a) *Théorie pq.*



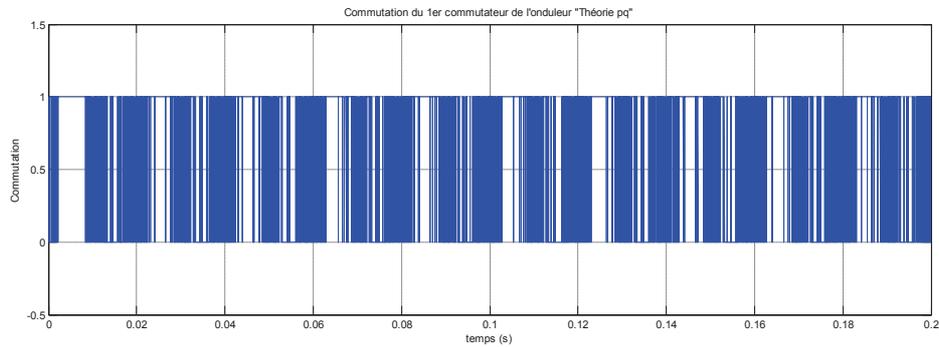
b) *Théorie dq.*



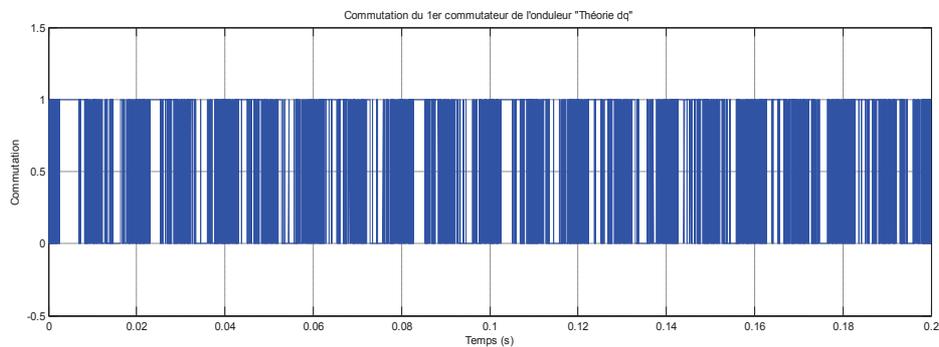
c) *Théorie pqr.*

Figure 4.7: Courant harmonique identifié dans une phase

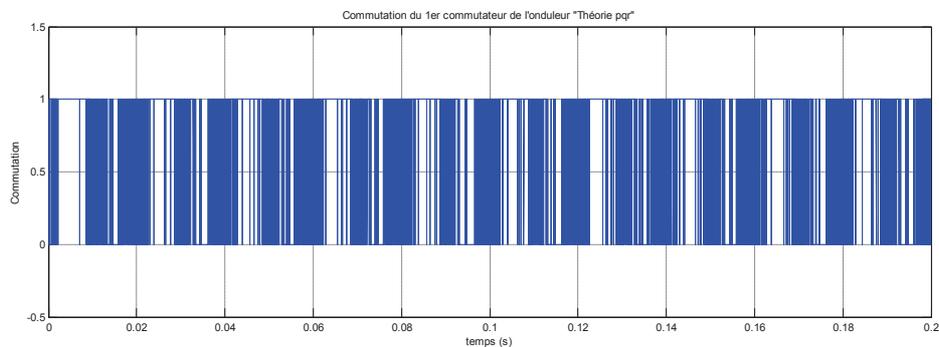
D'après la figure 4.7, on remarque que le courant harmonique identifié qu'il faut éliminer pour dépolluer le réseau à une forme non sinusoïdale, et cela pour les trois algorithmes d'identification.



a) *Théorie pq.*



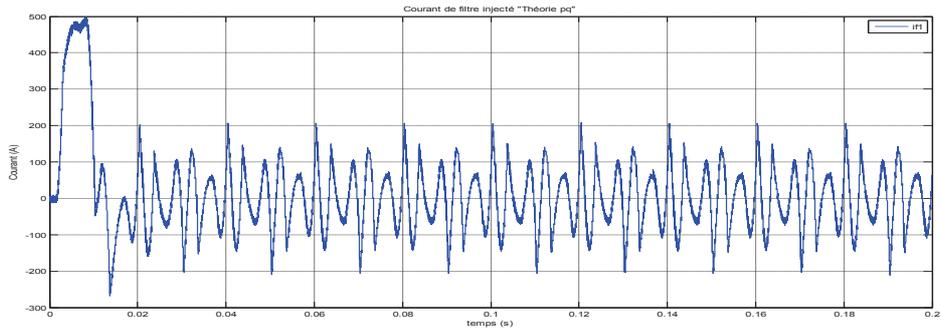
b) *Théorie dq.*



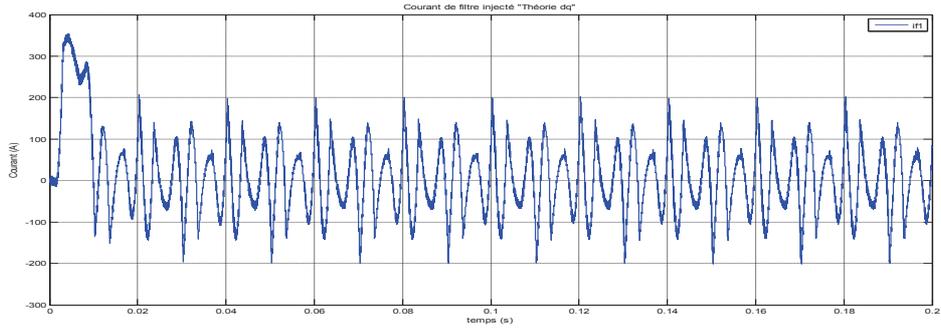
c) *Théorie pqr.*

Figure 4.8: Commutation de l'interrupteur 'Sa' de l'onduleur

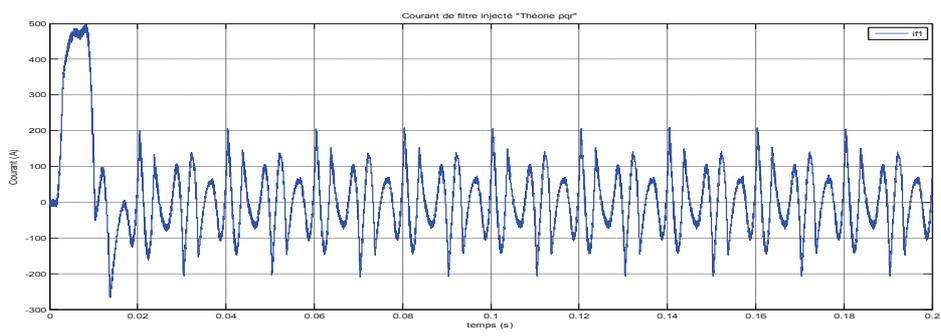
La Figure 4.8, montre la commutation du premier interrupteur de l'onduleur, on remarque la bonne maîtrise de la fréquence de commutation pour les trois techniques, par conséquent la minimisation de l'échauffement des semi-conducteurs. Le nombre de commutation nous a permis de calculer la fréquence de commutation moyenne de $f_c=16.76$ kHz pour la théorie (pq), $f_c=19.12$ kHz pour la théorie (dq) et $f_c=16.68$ kHz pour théorie (pqr).



a) Théorie pq.



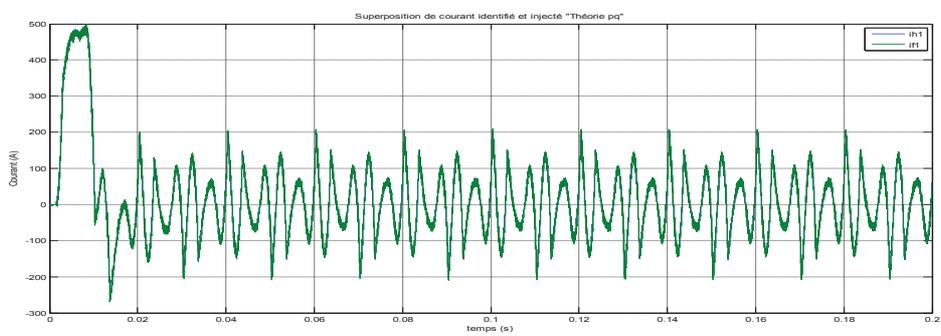
b) Théorie dq.



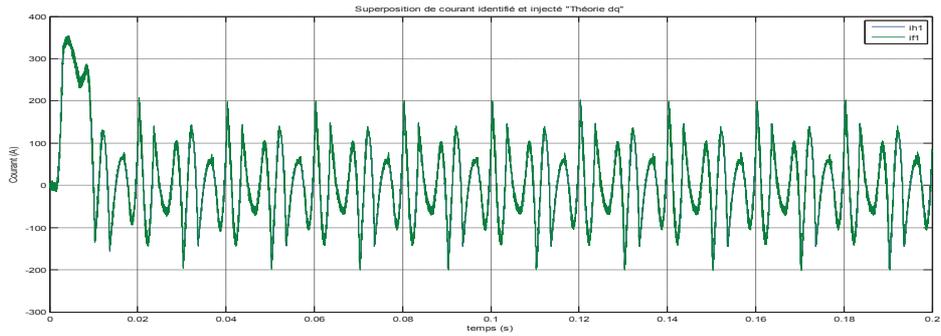
c) Théorie pq.

Figure 4.9: Courant de la phase 'a' injecté par le filtre au réseau

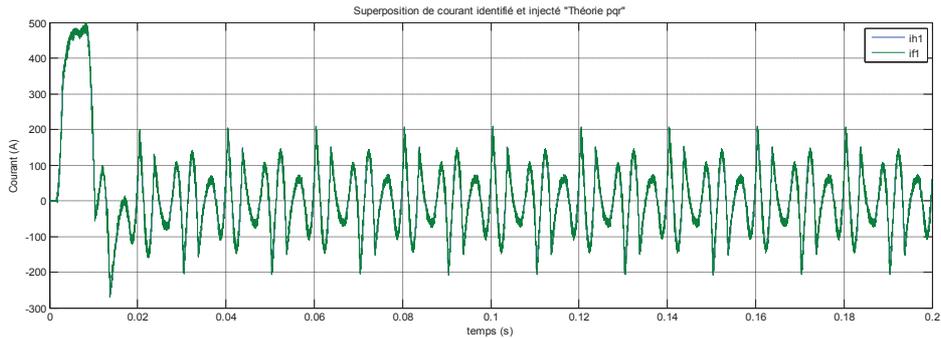
La Figure 4.9, illustre le courant à injecter à la sortie du filtre actif parallèle dans le cas des trois commandes.



a) Théorie pq.



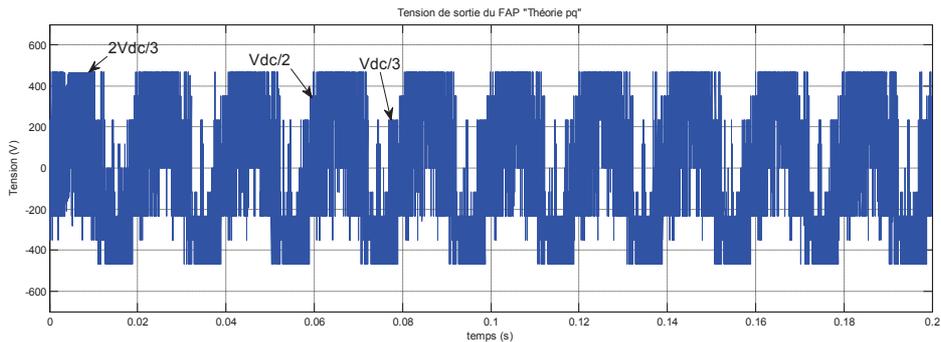
b) Théorie dq.



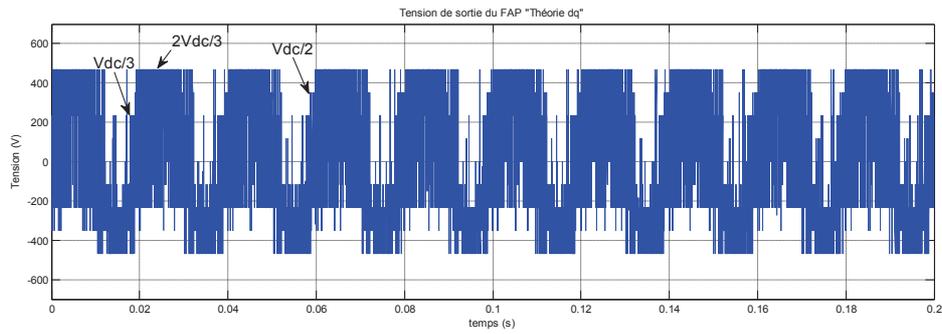
c) Théorie pq.

Figure 4.10: Courant de référence et le courant généré par le filtre actif

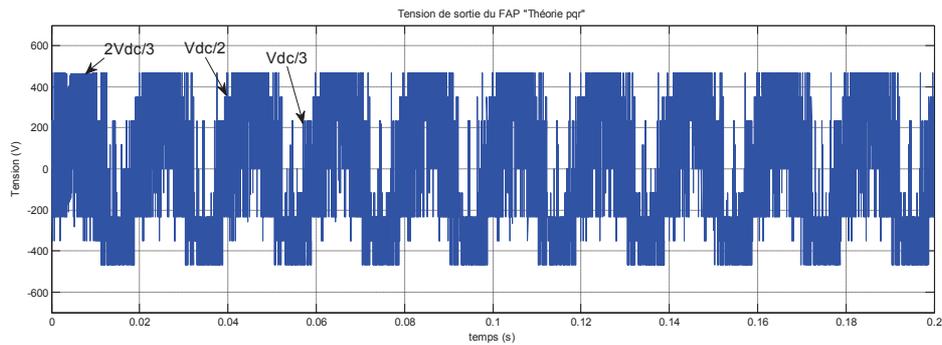
La figure (4.10), présente le courant de référence (en vert) et le courant généré par le filtre actif (en bleu) la phase ‘a’ de pour les trois techniques. On voit bien que le filtre actif à bien reproduit le courant de référence. Ces courants doivent êtres injecté sur le réseau afin d’éliminer ces harmoniques.



a) Théorie pq.



b) Théorie dq.

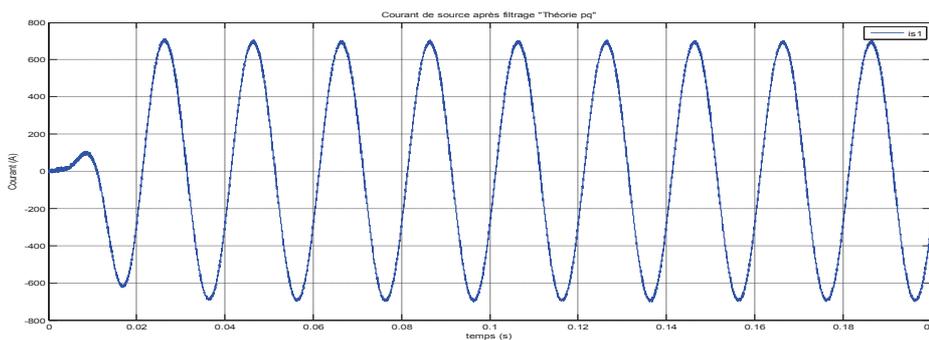


c) Théorie pq.

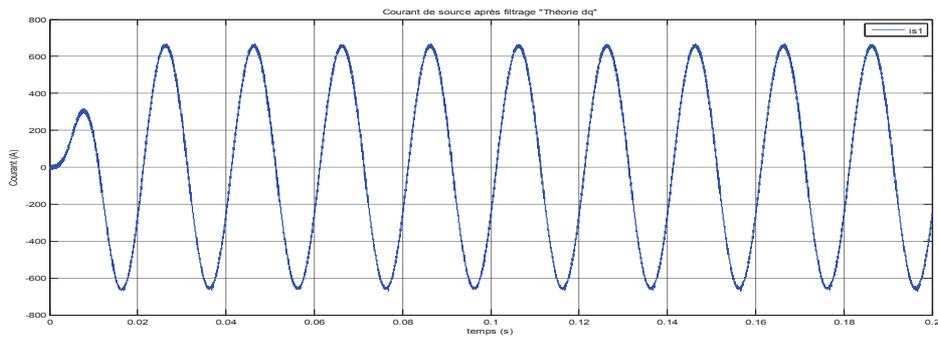
Figure 4.11: Tension de sortie d'une phase de l'onduleur trois niveaux

La Figure 4.11, illustre la tension de sortie d'une phase de l'onduleur trois niveaux, on remarque les trois niveaux de tension $2.Vdc/3$, $Vdc/2$ et $Vdc/3$ correspondant respectivement à 466V, 350V et 233V.

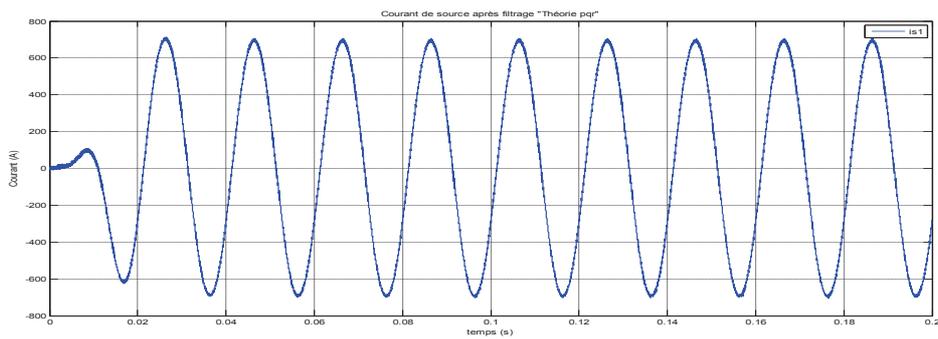
La figure. 3.12, montre le nouveau courant de la source après insertion du filtre actif parallèle pour les trois méthodes d'identification.



a) Théorie pq.



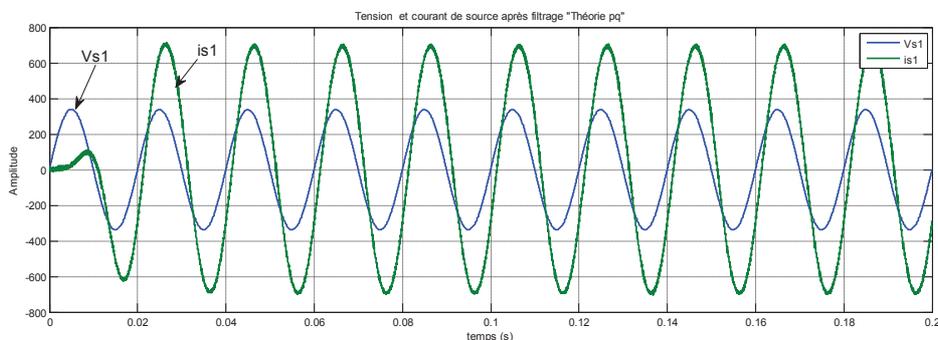
b) Théorie dq.



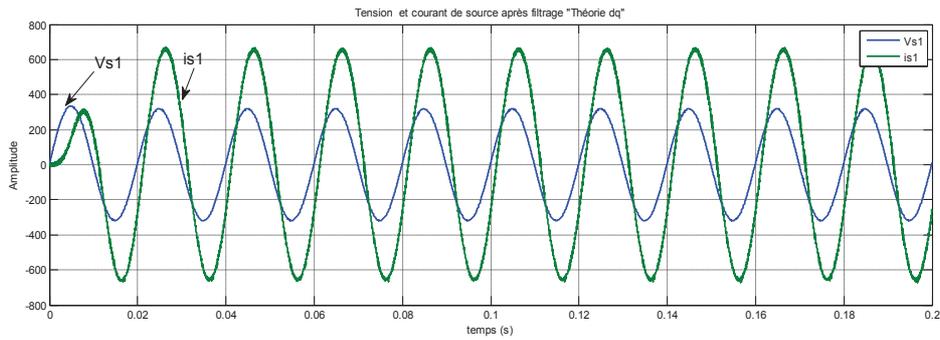
c) Théorie pq.

Figure 4.12: Courant de la source d'une phase après filtrage

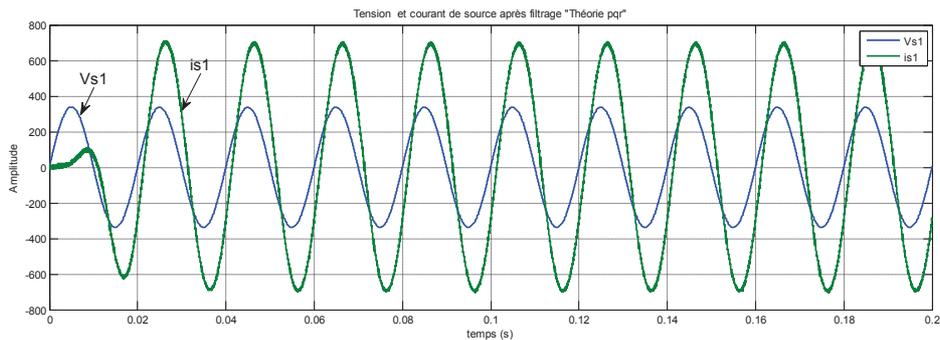
Après l'injection du courant de référence reproduit par le filtre actif dans le réseau, on peut constater qu'une fois le filtre actif parallèle est mis en marche, le courant du réseau y est désormais sinusoïdal et exempt de toutes perturbations harmoniques pour les trois méthodes d'identification. Le fait que le courant de source à récupérer son allure sinusoïdale, ce qui traduit que si notre onduleur puisse injecter un courant qui suit sa référence, on aura un courant de source sinusoïdale. La figure. 4. 13, montre le nouveau courant et la tension de source. Les deux ondes sont presque en phase, malgré la existence d'un léger décalage (retard de i_{s1} par rapport à v_{s1}).



a) Théorie pq.



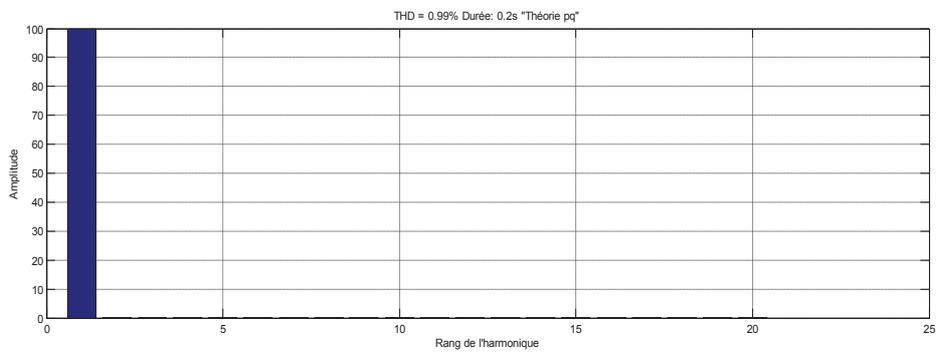
b) Théorie dq.



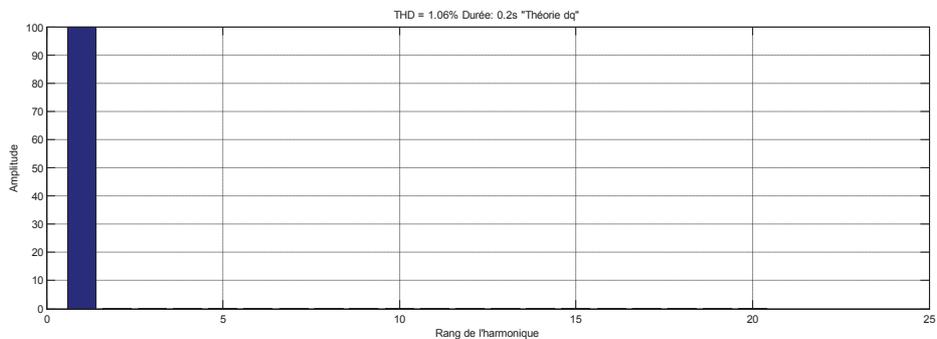
c) Théorie pqr.

Figure 4.13: Allures du courant et la tension dans une phase après filtrage actif

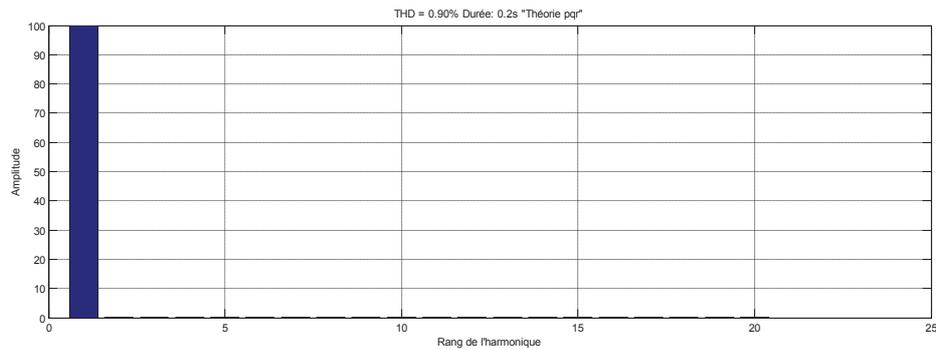
La figure 4.14 présente l'analyse spectrale de courant de source effectuée sur la 1ère phase.



a) Théorie pq.



b) Théorie dq.



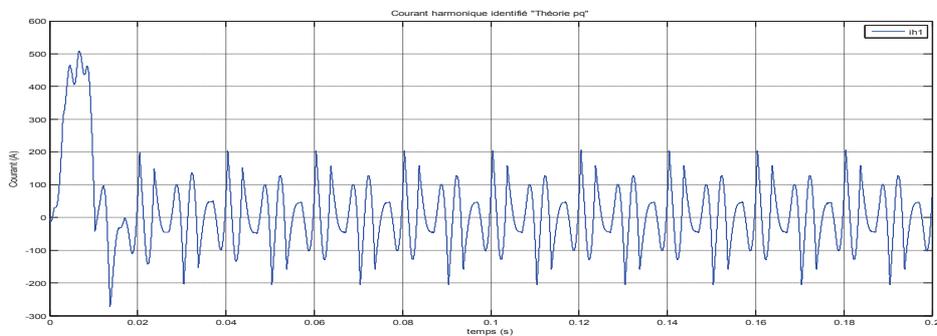
c) Théorie pqr.

Figure 4.14: Spectre harmonique du courant d'une phase de la source après filtrage actif

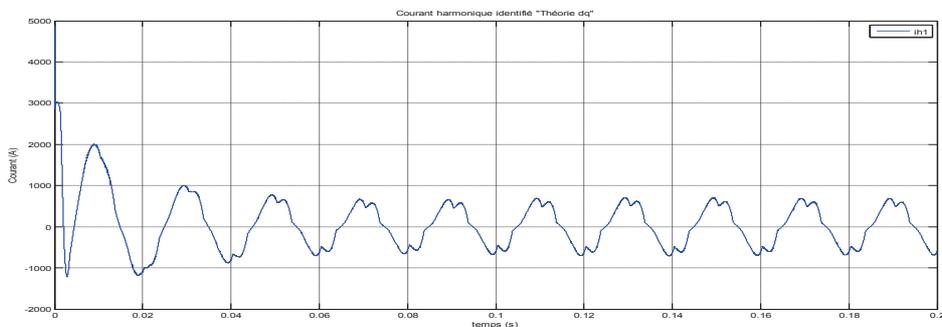
Cette représentation spectrale confirme la présence que du fondamental, les autres harmoniques sont compensées. Le TDH qui était à 16.75% , est réduit après filtrage à un taux très faible de 0.99 % pour la théorie (pq) et de 1.06% pour la théorie (dq) et de 0.90% pour la théorie (pqr), ce qui confirme la bonne compensation des harmoniques par le filtre actif basé sur l'onduleur trois niveaux.

IV.3.2 Commande du FAP Trois Niveaux avec Régulation du Bus Continu

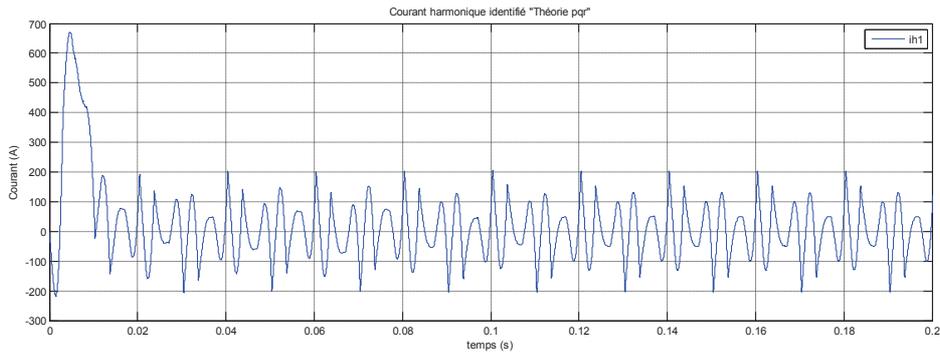
Maintenant, nous allons présenter les résultats de simulation avec le filtre actif et pour les trois méthodes de contrôle présentées auparavant, avec régulation de la tension de bus continu sont illustrés par les figures (4.15-4.23).



a) Théorie pq.



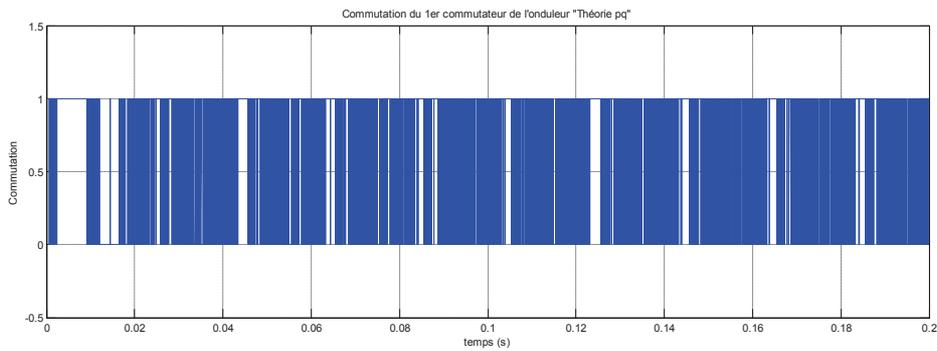
b) Théorie dq.



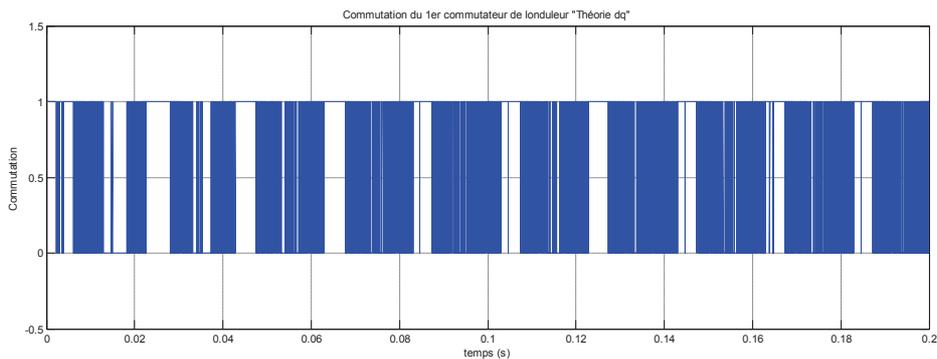
Théorie pqr.

Figure 4.15: Courant harmonique identifié de phase a

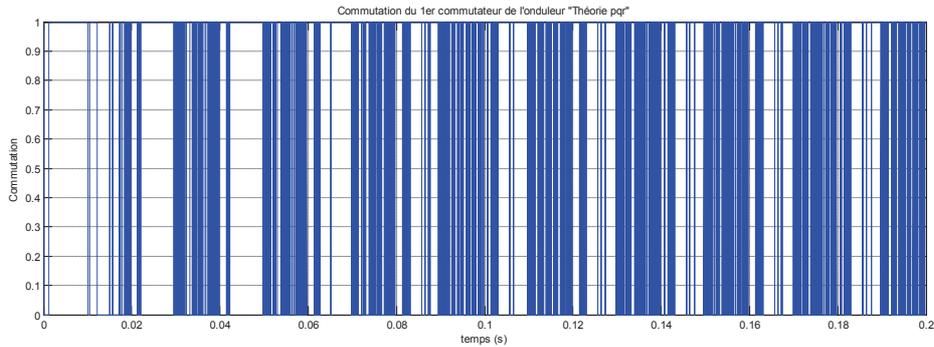
D'après la figure 4.15, on remarque que le courant harmonique identifié qu'il faut éliminer pour dépolluer le réseau à une forme bruité non sinusoïdale, pour les trois algorithmes d'identification.



a) Théorie pqr.



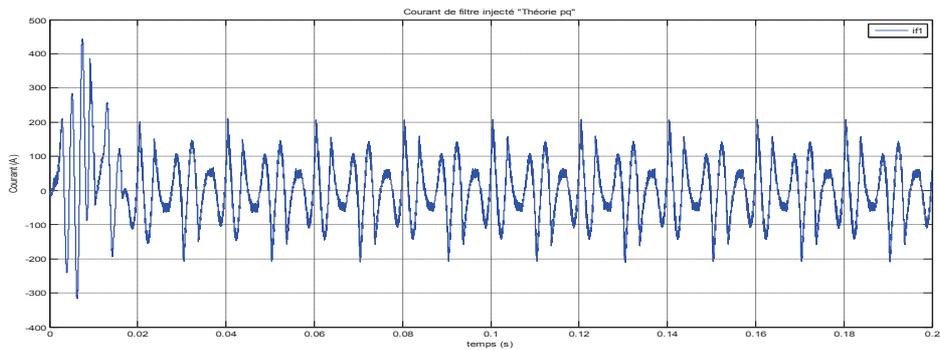
b) Théorie dq.



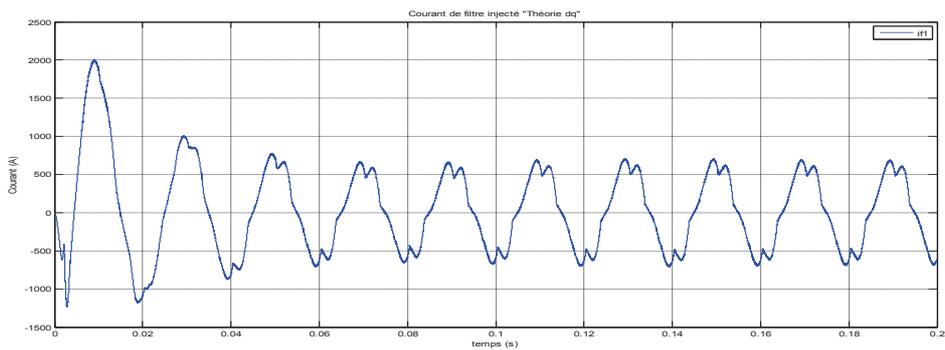
c) Théorie pqr.

Figure 4.16: Commutation de l'interrupteur 'Sa' de l'onduleur

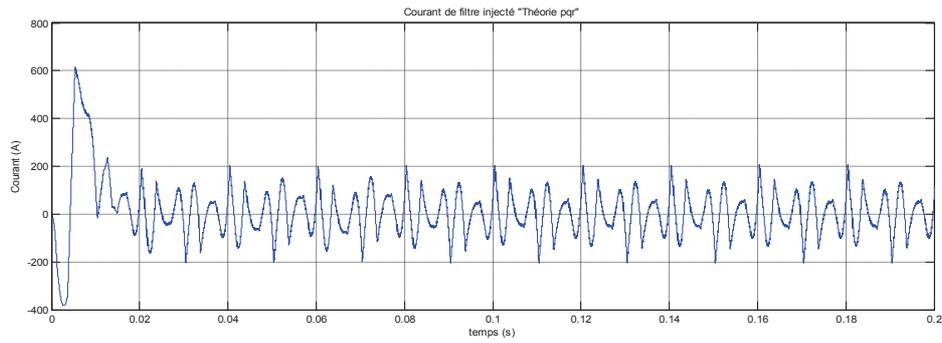
La figure 4.16, montre la commutation du premier interrupteur de l'onduleur. Le nombre de commutation nous a permis de calculer la fréquence de commutation moyenne de $f_c=21.60$ kHz pour la théorie (pq), $f_c=19.31$ kHz pour la théorie (dq), on remarque bien que la théorie (pqr) présente une fréquence de commutation minimale de $f_c=5$ KHz.



a) Théorie pq.



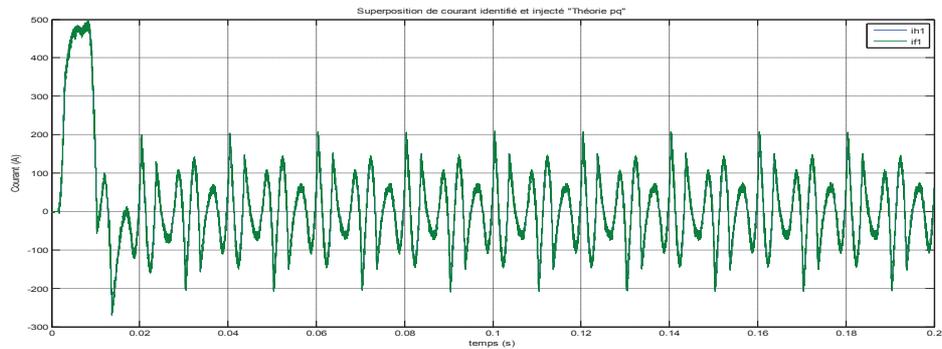
b) Théorie dq.



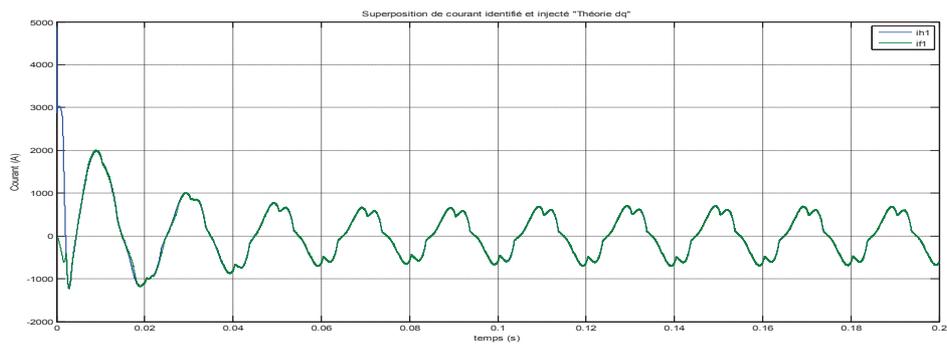
c) *Théorie pq.*

Figure 4.17: Courant de la phase 'a' injecté par le filtre au réseau

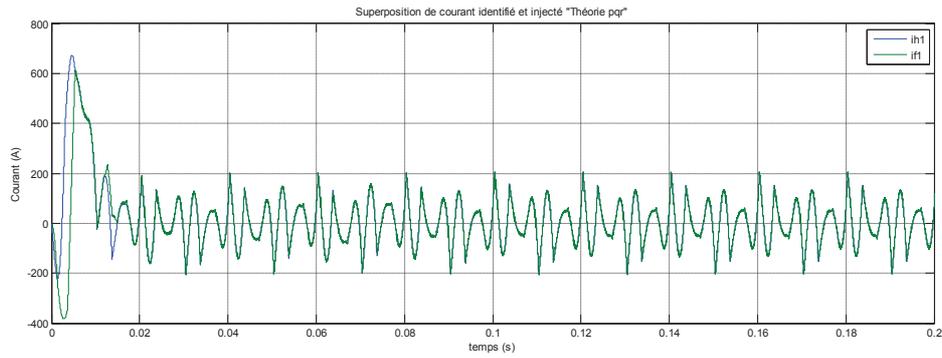
La figure 4.17, illustre le courant à injecté par filtre actif parallèle dans le réseau pour les trois méthodes. On remarque que ce courant à presque la même forme que le courant identifié de la figure 4.15



a) *Théorie pq.*



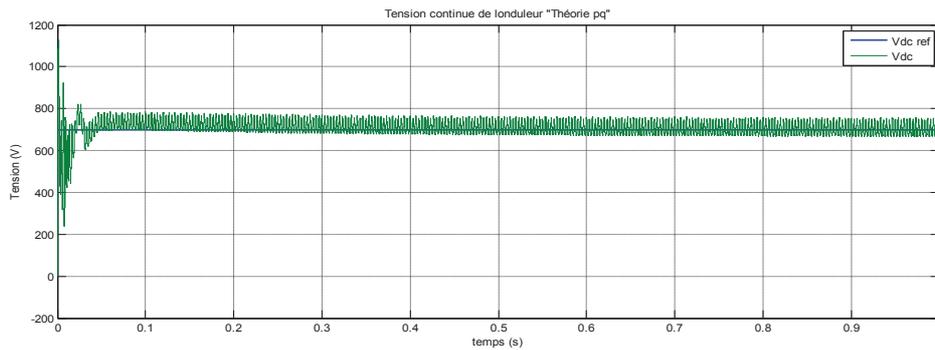
b) *Théorie dq.*



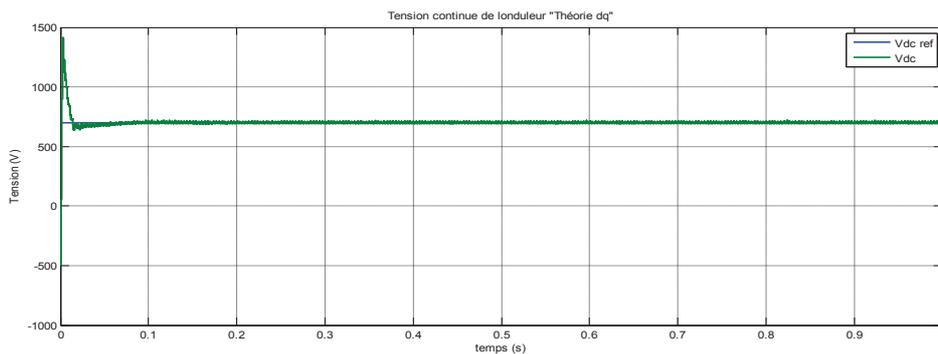
c) *Théorie pq.*

Figure 4.18: Courant de référence et le courant généré par le filtre actif

Pour s’assurer du bon fonctionnement du système de filtrage, nous avons montré dans la figure 4.18, la superposition de courant identifié et injecté. Il est évidemment clair qu’ils sont complètement identiques, ce qui montre que le filtre actif a bien reproduit le courant de référence.



a) *Théorie pq.*



b) *Théorie dq.*

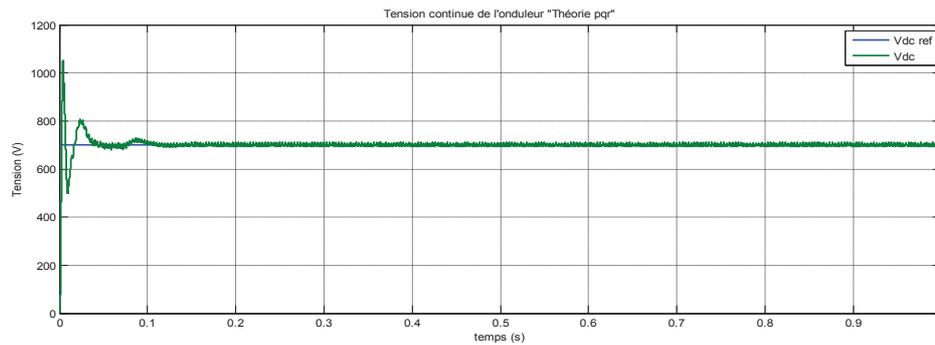
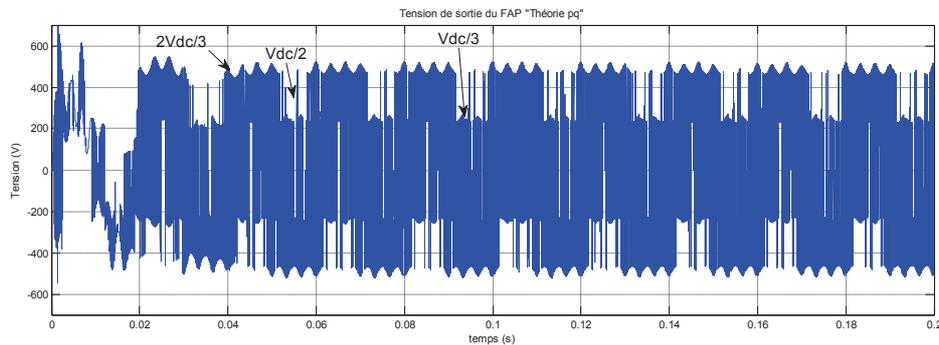
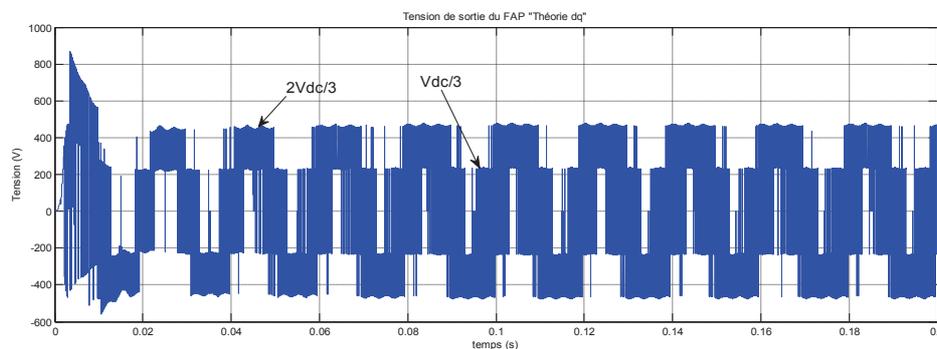
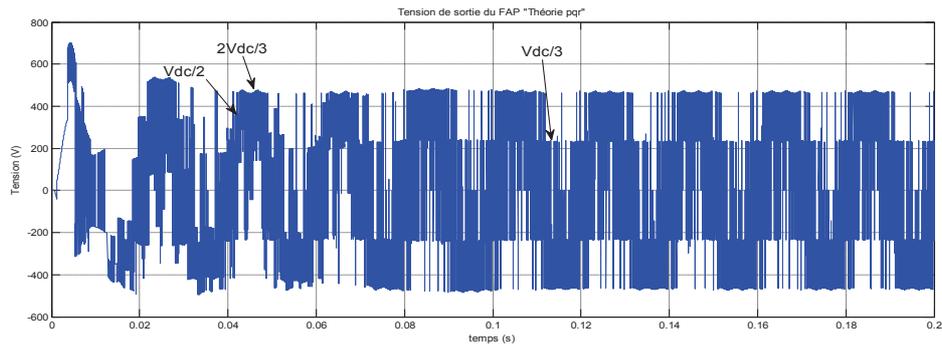
c) *Théorie pqr.*

Figure 4.19: La tension de référence et la tension mesurée à l'entrée de l'onduleur

La Figure 3.19, illustre la de tension de référence et la tension du bus continu de l'onduleur trois niveaux, on remarque qu'au régime permanent, la bonne poursuite de la tension du bus continu coïncide avec sa tension de référence pour méthode (dq) et (pqr), le temps de réponse plus rapide que celui de la théorie (pqr). Cependant la méthode (pq) présente une réponse avec des oscillations au régime permanent avec des pics au régime transitoire, ce qui entraine des perturbations de la tension à l'entrée de l'onduleur puis au courant et tension de la source cela risque de détériorer les semi-conducteurs de l'onduleur.

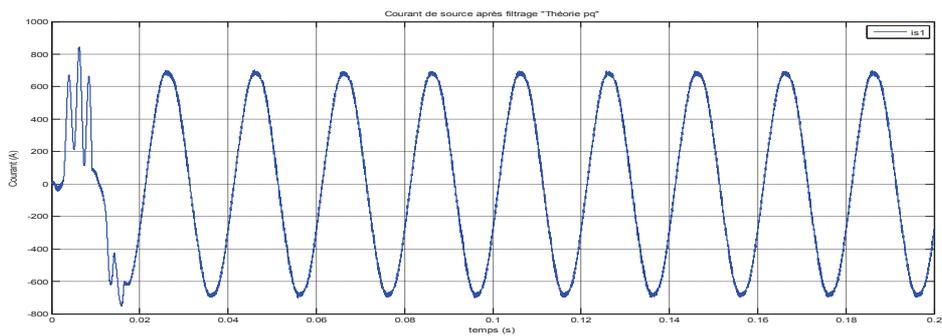
a) *Théorie pq.*b) *Théorie dq.*



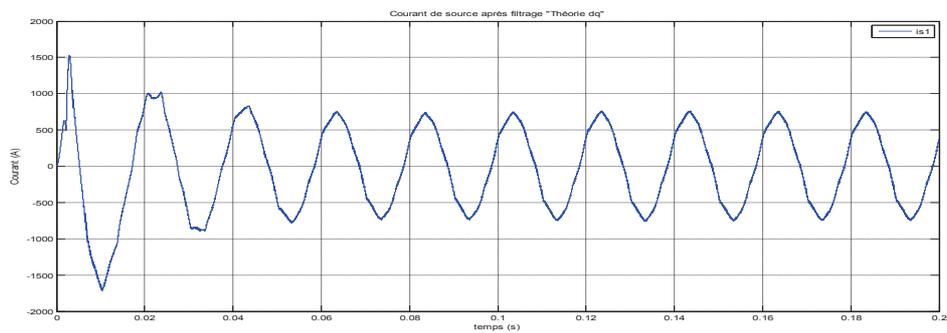
c) Théorie pqr.

Figure 4.20: Tension d'une phase de l'onduleur trois niveaux

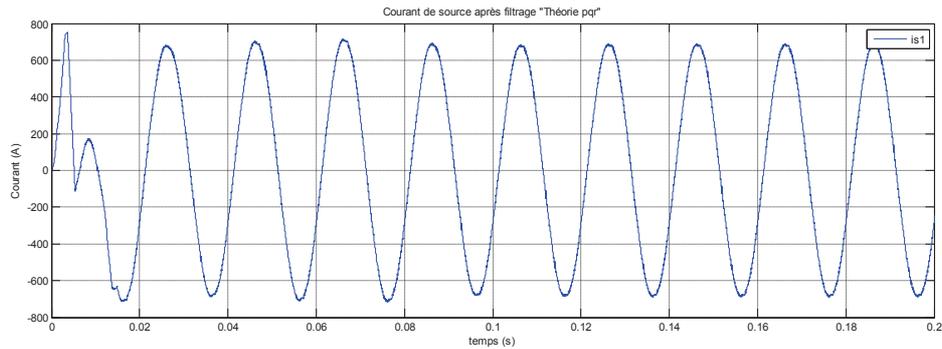
La Figure 4.20, illustre la tension de sortie d'une phase de l'onduleur trois niveaux, on remarque les trois niveaux de tension $2.Vdc/3$, $Vdc/2$ et $Vdc/3$ correspondant respectivement à 466V, 350V et 233V.



a) Théorie pq.



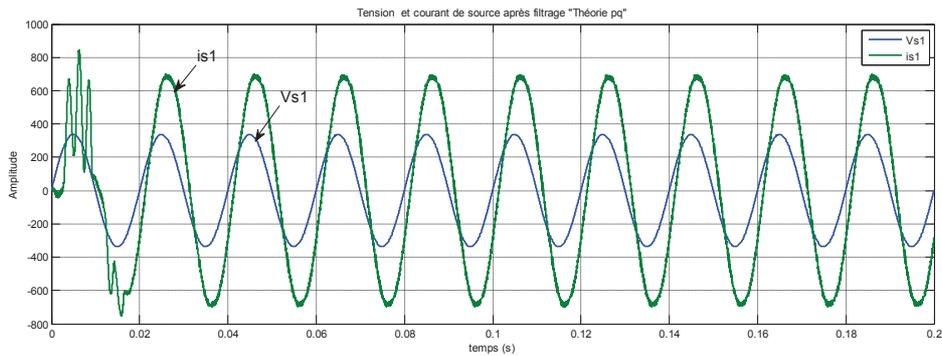
b) Théorie dq.



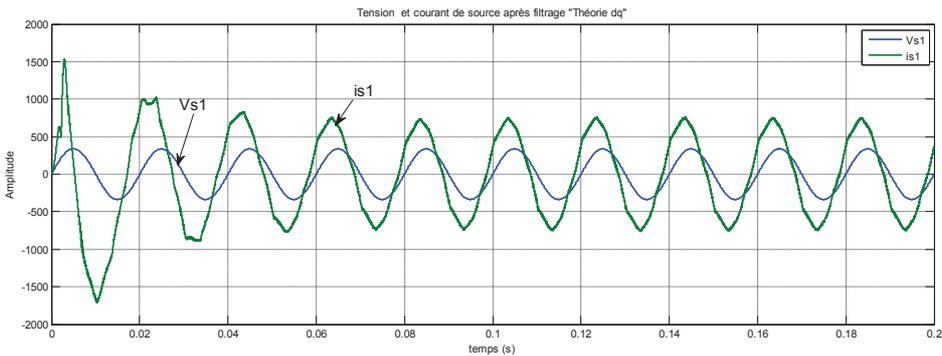
c) *Théorie pq.*

Figure 4.21: Courant de la source d'une phase après filtrage

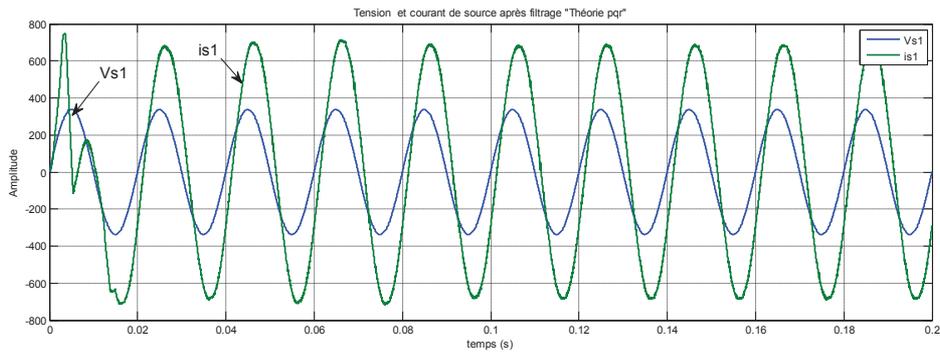
On remarque qu'une fois le filtre actif parallèle est mis en fonctionnement, le courant du réseau y est désormais et quasi-sinusoïdaux et libre de toutes perturbations harmoniques, au régime permanent, on remarque qu'au régime transitoire la présence des pics de courant à cause de la réponse transitoire de la tension de bus continu à l'entrée de l'onduleur, notamment pour la méthode (pq).



a) *Théorie pq.*



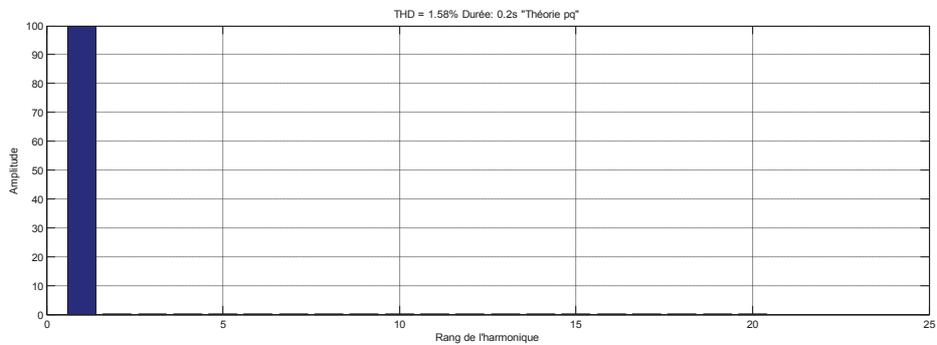
b) *Théorie dq.*



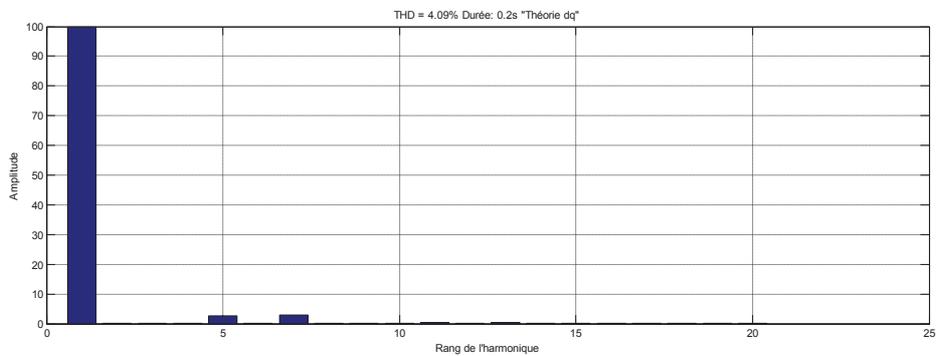
c) Théorie pqr.

Figure 4.22: Allures du courant et la tension dans une phase après filtrage actif

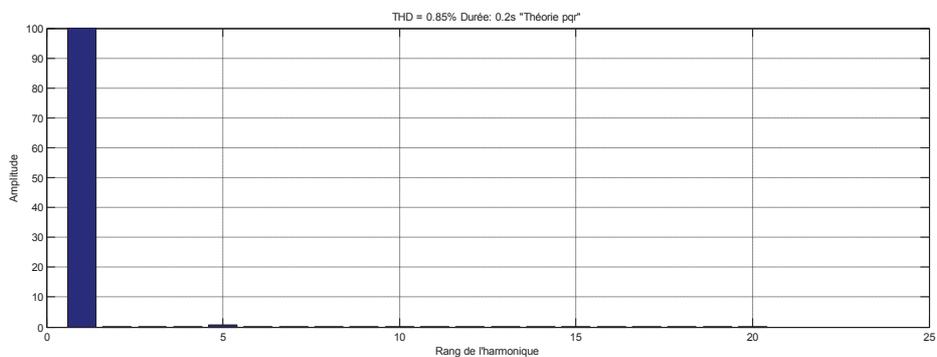
Dans la Figure. 4.22, on montre le nouveau courant i_{s1} et la tension de source v_{s1} . Les deux ondes sont en phase, malgré la présence d'un léger décalage (retard de i_{s1} par rapport à v_{s1}).



a) Théorie pq.



b) Théorie dq.



c) Théorie pqr.

Figure 4.23: Spectre harmonique du courant d'une phase de la source après filtrage

La Figure 4.23 présente l'analyse spectrale de courant de source effectuée sur la première phase après filtrage, pour les trois méthodes d'identification des courants de référence du FAP trois niveaux. Le THD du courant de la source avant compensation était au départ de 16.75% est réduit après filtrage actif à 1.58 % pour la méthode «pq» et 4.09% pour la méthode «dq» et 0.85% pour la méthode «pqr». Concernant la méthode (dq), on constate que le spectre présente en plus de la composante fondamentale les harmoniques d'ordre 5 et 7 a base amplitude voir la figure 4.23b.

IV.4 ETUDES COMPARATIVES

Dans cette partie, on se propose de faire une étude comparative entre les résultats de simulation obtenus pour la commande filtre actif avec les trois méthodes de contrôle présentées auparavant à base de l'onduleur deux niveaux et trois niveaux.

IV.4.1. Commande du FAP Trois Niveaux sans et avec Régulation du Bus Continu

Les résultats de simulation obtenus pour la commande filtre actif trois niveaux avec les trois méthodes de contrôle présentées auparavant sans et avec régulation du bus continu sont représentée dans le tableau 4.2.

Méthode d'identification	Commande sans régulation du bus continu			Commande avec régulation du bus continu		
	PQ	DQ	PQR	PQ	DQ	PQR
THDi %	00,99	01,06	00,90	01,58	04,09	00,85
Fréquence de commutation KHz	20,97	23,32	20,67	21,99	19,31	5,00

Tableau 4.2: Comparaison des résultats du filtre actif trois niveaux

Suivant les résultats présentés dans le tableau 4.2, pour le mode de fonctionnement du filtre sans régulation de la tension du bus continu, on remarque que les trois méthodes possèdent presque le THDi. Cependant dans le cas de la tension du bus continu, la théorie (dq) présente une grande augmentation du THDi, cela est dû à la difficulté du réglage de la tension continue de l'onduleur, qui influe sur la qualité du filtrage.

Pour la fréquence de commutation, on constate que la méthode (pqr) avec régulation présente la meilleure fréquence de commutation par rapport aux autres méthodes.

IV.4.2 Commande du FAP Deux et Trois Niveaux sans Régulation du Bus Continu

Les résultats de simulation obtenus pour la commande filtre actif deux et trois niveaux avec les trois méthodes de contrôle présentées auparavant sans régulation du bus continu sont représentée dans le tableau 4.3.

Niveaux de l'onduleur	Deux niveaux			Trois niveaux		
Méthode de commande de filtre	PQ	DQ	PQR	PQ	DQ	PQR
THDi %	01,20	01,18	01,18	00,99	01,06	00,90
Fréquence de commutation KHz	20,86	23,15	20,80	20,97	23,32	20,67

Tableau 4.3: Comparaison entre FAP deux et trois niveaux sans régulation du bus continu

À partir des résultats représentés dans 4.3, on remarque que les trois méthodes d'identification pour les deux filtres actifs deux niveaux et trois niveaux présentent un bon THDi. Cependant dans le cas du filtre actif trois niveaux on remarque une diminution du THDi par rapport au filtre actif deux niveaux. Donc on peut conclure que l'augmentation des niveaux de l'onduleur a une influence sur la qualité de filtrage, vu que l'onde de tension livrée par un onduleur de tension trois niveaux contient plus de niveaux que celle produite par un onduleur de tension deux niveaux. En outre, elle est plus proche d'une forme sinusoïdale qu'une onde deux niveaux.

On remarque aussi que la théorie (pq) et la théorie (pqr) présentent une fréquence de commutation inférieure à celle de la théorie (dq).

IV.4.3 Commande du FAP Deux et Trois Niveaux avec Régulation du Bus Continu

Une autre comparaison entre le FAP deux et trois niveaux sera présentée dans cette section les résultats de simulation obtenus pour la commande filtre actif deux et trois niveaux avec les trois méthodes de contrôle présentées auparavant avec régulation du bus continu sont représentée dans le tableau 4.3.

Niveaux de l'onduleur	Deux niveaux			Trois niveaux		
Méthode de commande de filtre	PQ	DQ	PQR	PQ	DQ	PQR
THDi %	01,22	03,31	01,24	01,58	04,09	00,085
Fréquence de commutation KHz	23,55	25,81	21,04	21,99	19,31	5,00

Tableau 4.4: Comparaison entre FAP deux et trois niveaux avec régulation du bus continu

D'après le tableau 4.4. On constate bien que la méthode (pqr) avec régulation de la tension du bus continu de l'onduleur trois niveaux; présente les meilleurs performances par rapport aux autres, avec un THDi de 00,85% ; et une fréquence de commutation de 5kHz.

IV. 5 CONCLUSION

Dans la première partie de ce chapitre on a élaboré un modèle de fonctionnement de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC. Pour cela, nous avons défini les différentes configurations possibles d'un bras de l'onduleur. L'alimentation par un onduleur à trois niveaux présente deux avantages à savoir la montée en puissance, et l'amélioration de la qualité de la tension.

La deuxième étape a été consacrée à la simulation du filtre actif parallèle en utilisant l'onduleur trois niveaux commandé par la stratégie Hystérésis en courant. Les résultats de simulation obtenus montrent l'effet de niveau de l'onduleur sur la qualité de filtrage pour la commande sans et avec régulation, l'étude comparative entre le filtre actif parallèle deux et trois niveaux avec les méthodes d'identification proposées, montre que le filtre actif parallèle trois niveaux présente une supériorité par rapport au filtre actif deux niveaux notamment par la théorie des puissances instantanées dans le référentiel.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

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 la pollution du réseau électrique. Ces pollutions sont principalement causées par des charges non linéaires, ces charges non linéaires à base de convertisseurs de puissances offrent de l'énergie sous plusieurs formes et sont de plus en plus utilisées dans l'industrie.

Une des solutions les plus efficaces pour corriger ces inconvénients est l'utilisation des filtres actifs parallèles ayant pour but, de dépolluer le réseau et de compenser l'énergie réactive. Ce qui nous permettons d'avoir un réseau plus stable avec un facteur de puissance unitaire.

Ce travail présenté dans ce mémoire consiste à l'étude et simulation des trois techniques d'identifications des courants de référence du filtre actif parallèle deux niveaux et trois niveaux, pour but de la dépollution des réseaux électriques afin d'améliorer la qualité d'énergie.

Ce mémoire a pour objectif d'étudier les stratégies de commande du filtre actif parallèle, pour le filtrage des harmoniques dans le réseau électrique. Après une présentation des problèmes de dégradation de la qualité de l'énergie électrique, on a étalé un état de l'art actuel des filtres actifs.

Dans la première partie du deuxième chapitre, on a présenté une description générale du système étudié constitue, d'une source d'alimentation triphasée équilibrée, la charge non linéaire et d'un filtre actif parallèle. La deuxième partie a été consacrée à l'étude détaillée de la partie puissance, la partie la commande du filtre actif et au système de stockage d'énergie de nature capacitif pour assure la tension continue à l'entrée de l'onduleur du filtre actif.

Dans le troisième chapitre, nous avons abordé en premier lieu les différentes techniques d'identifications des courants harmoniques dans le domaine fréquentiel appliqué au filtre actif shunt triphasé à structure en tension. Par la suite nous avons étudié successivement les trois techniques d'identification dans le domaine temporel largement utilisées dans le domaine de filtrage des harmoniques, on parle de la méthode des puissances instantanées, la théorie de référentiel synchrone et la théorie des puissances instantanées dans le référentiel. Des tests de simulation du filtre actif basé l'onduleur de tension deux niveaux, pour les trois méthodes de

contrôle, sans avec régulation du bus continu ont été présentés. Les résultats obtenus montrent les performances et l'efficacité du filtre actif parallèle sur la qualité de filtrage.

La quatrième a été consacré à l'étude du filtre actif parallèle à base d'onduleur trois niveaux, Des tests de simulation de ce filtre actif pour les trois méthodes de contrôle présentées auparavant, sans avec régulation du bus continu ont été présentés. Les résultats obtenus montrent que le filtre actif parallèle trois niveaux présente une supériorité par rapport au filtre actif deux niveaux notamment en pour la théorie des puissances instantanées dans le référentiel.

Enfin, le présent travail nous a permis d'approfondir nos connaissances et de mesurer combien la problématique est riche en interrogations et en perspectives, qui feront l'objet de nos futures travaux. Pour cela notre travail ne serait complet sans la réalisation pratique du filtre actif parallèle, d'autre part, suite à notre petite expérience dans ce domaine nous proposons les idées suivantes:

- ☞ Application d'autres stratégies de commande qui permettent d'avoir une bonne compensation (la stratégie MLI vectorielle optimisée), pour but d'améliorer nos résultats.
- ☞ Utilisation des systèmes FACT en filtrage des harmoniques de tension et de courant en même temps.
- ☞ Application des techniques intelligentes comme les réseaux de neurones et la logique floue pour le filtrage des harmoniques.

Bibliographie

- [1]. G. Benysek « *Improvement in the Quality of Delivery Electrical Energy Using Power Electronics Systems* », Springer-Verlag London Limited 2007.
- [2]. J. Driesen « *Development of a measurement system for power quantities in electrical energy distribution systems* », Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC/2002. Proceedings of the 19th IEEE, pp.1625-1630, Vol.2, 2002.
- [3]. I. El Baaklini « *Outil de simulation de propagation des creux de tension dans les réseaux industriels* », Thèse doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble 2001.
- [4]. M. Wang « *Classification of power quality events using optimal time frequency representations, part I: theory* », Power Delivery, IEEE Transactions, pp.1488-1495, Vol.19, N.3, July 2004.
- [5]. N.H. Mendalek « *Qualité de l'onde électrique et moyens de mitigation* », Thèse doctorat, Ecole de technologie supérieure, Université du Québec 2003.
- [6]. I. Etxeberria-Otadui « *Sur les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique-application à la qualité de l'énergie* », Thèse Doctorat. Institut national polytechnique de Grenoble 2003.
- [7]. B. CHARIER « *La qualité de l'énergie électrique: critères et définitions* », Revue technologie 2009.
- [8]. N. Gheorghe « *Perturbations dans les réseaux électriques* », Revue Polyewpert Technique N°53 2008.
- [9]. V. Ignatova « *Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique Application aux creux de tension et à la pollution harmonique* », Thèse Doctorat. Université de Grenoble 2006.
- [10]. P. Ferracci « *Cahier technique n°199 la qualité de l'énergie électrique* », Revue Schneider Electric 2011.
- [11]. B. Gattal « *Méthodes d'analyse des perturbations électriques dans la qualité de l'énergie électrique en utilisant des nouvelles techniques pour l'application aux creux de tension* », Mémoire de Magister. Université de Batna 2012.
- [12]. A. Arora « *Solutions innovatrices pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique* », Revue Qualité De L'énergie Electrique ABB 3/1998.
- [13]. C. Fetha « *Analyse et amélioration de l'indice de la non-symétrie de tension dans la qualité de l'énergie électrique* », Thèse Doctorat. Université de Batna 2006.
- [14]. A.L.D. Bermeo « *Commandes avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la montée en tension* », Thèse Doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble 2006.
- [15]. A. Sannino « *Power -electronic solutions to power quality problem* », Electric Power Systems Research 66, Elsevier Science B.V 2003.
- [16]. K.J.P. MACKEN « *Mitigation of voltage dips through distributed generation systems* », IEEE Transactions on Industry Applications, pp.1686-1693, Vol.40, No.6, November/December 2004.

- [17]. A.V. Jouanne « *Assessment of voltage unbalance* », IEEE Transactions on power delivery, pp.782-790, Vol.16, No.4, October 2001.
- [18]. 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.
- [19]. S.R Dzonde Naoussi « *Implantation de réseaux neuromimétiques sur cible FPGA application à l'intégration d'un système de filtrage actif* », Thèse Doctorat. Université de Strasbourg 2011.
- [20]. T. GOURAUD « *Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique* », Thèse Doctorat. Université de Nantes 1997.
- [21]. M.M. Abdusalam « *Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales* », Thèse Doctorat. Université Nancy-I 2008.
- [22]. D. 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 de Haute-Alsace 2005.
- [23]. F. Defaÿ « *Commande prédictive directe d'un convertisseur multicellulaire triphasé pour une application de filtrage actif* », Thèse Doctorat. Université De Toulouse 2008.
- [24]. M.D. Epanya « *Application du filtrage actif pour une mise en œuvre de méthode de prédiction et de contrôle d'harmoniques dans un réseau de distribution électrique* », Mémoire comme exigence partielle de la maîtrise en génie électrique. Université du Québec 2010.
- [25]. S. Bernard et G. Trochain « *Compensation des courants harmoniques générés par les ordinateurs grâce à un compensateur actif d'harmoniques révolutionnaire* », Publication: MGE UPS SYSTEMS-01/2000.
- [26]. H. Kouara « *Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension* », Mémoire de Magister. Université de Batna 2006.
- [27]. M.A.E. Alali « *Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension* », Thèse Doctorat. Université Strasbourg I 2002.
- [28]. C. Tan Perng « *A single-phase hybrid active power filters with photovoltaic application* », Thèse de Master en Genie Electrique, Université de Technologie Malaysia 2006.
- [29]. M.M. Swamy « *Passive techniques for reducing input current harmonics* », WP.AFD.01 Copyright by Yaskawa Electric America, Inc. 2005.
- [30]. A. Hamadi « *Contribution à l'étude des filtres hybrides de puissance utilisés pour améliorer la qualité de l'énergie dans le réseau électrique de distribution* », Thèse Doctorat. Université du Québec 2010.
- [31]. F. Hamoudi « *Contribution aux stratégies de commande avancées d'un filtre actif shunt à quatre fils* », Thèse Doctorat. Université de Batna 2012.

- [32]. M. Magraoul « *Validation de techniques de commande d'un filtre actif parallèle* », Mémoire comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise en génie électrique. Université du Québec 2007.
- [33]. S.A. Tadjer « *Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque 'GPV'* », Mémoire de Magister. Université de Boumerdes 2008.
- [34]. S. Rechka « *Etude de méthodes de filtrage des harmoniques dans les réseaux électriques de distribution* », Mémoire comme exigence partielle pour l'obtention d'un diplôme de maître en sciences appliquées en génie électrique. Université du Québec à Trois-Rivières 2002.
- [35]. M.S. Djebbar « *Etude comparative des redresseurs cascades et multi-niveaux à commande MLI* », Mémoire de Magister. Université de Constantine 2005.
- [36]. S.P. Litrán « *Control strategy for hybrid power filter to compensate unbalanced and non-linear, three phase loads* », EPE 2009.
- [37]. G. Casaravilla « *Selective active filter with optimum remote harmonic distortion control* », IEEE Transactions on power delivery, pp.1990-1997, Vol.19, No.4, October 2004.
- [38]. Y. Touzani « *Commande aléatoire du convertisseur Buck-Boost triphasé à prélèvement sinusoïdal du courant* », Thèse Doctorat. Université Blaise Pascal 2006.
- [39]. N. Senthilnathan « *A novel control strategy for line harmonic reduction using three phase shunt active filter with balanced and unbalanced supply* », European Journal of Scientific Research, pp.456-466, Vol.67, No.3, 2012
- [40]. H. Akagi « *New trends in active filters for improving power quality* », IEEE Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth, pp.417-425, Vol.1, Jan 1996.
- [41]. P. Fang Zheng « *Application issues of active power filters* », IEEE Industry Applications Magazine, pp.21-30, Vol.4, No.5, September/October 1998.
- [42]. H. Fujita « *The unified power quality conditioner: the integration of series and shunt active filters* », IEEE Transactions on Power Electronics, pp.315-322, Vol.13, No.2, March 1998.
- [43]. S. Bhattacharya « *Design and implementation of a hybrid series active filter system* », Power Electronics Specialists Conference. PESC '95 Record, 26th Annual IEEE, pp.189-195, Vol.1, Jun 1995.
- [44]. A. Kouzou « *Compensation active des perturbations dans un réseau basse tension* », Mémoire de Magister. Université de Boumerdes 2004.
- [45]. A. Boukadoum « *Contribution à l'analyse et la réduction de la pollution harmonique dans le réseau électrique* », Mémoire de Magister. Université d'Annaba 2007.
- [46]. Round & Duke « *Active filter optimization for efficient variable frequency remote generation* », Industry Applications Society Annual Meeting. Conference Record of the IEEE, pp. 894-898, Vol.2, October 1993.
- [47]. A. Chaoui « *Filtrage actif triphasés pour charges non linéaires* », Thèse Doctorat. Université de Sétif 2010.

- [48]. H. Akagi & H. Fujita « *A new power line conditioner for harmonic compensation in power systems* », Power Delivery, IEEE Transactions on, pp.1570-1575, Vol.10, No.3, July 1995.
- [49]. H. Akagi « *Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems* », Power Delivery, IEEE Transactions on, pp.354-363, Vol.12, No.1, July 1997.
- [50]. H. Akagi, H. Fujita and K. Wada « *A shunt active filter based on voltage detection for harmonic termination of a radial power distribution line* », Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting. The IEEE, pp.1393-1399, Vol.2, October 1998.
- [51]. A. L. Julian, R. Cuzner and G. Oriti, T. A. Lipo « *Active filtering for common mode conducted EMI reduction in voltage source inverters* », Applied Power Electronics Conference and Exposition. APEC '98. Conference Proceedings. Thirteenth Annual, pp.934-939, Vol.2, February 1998.
- [52]. S. Round, H. Laird, R. Duke and C. Tuck « *An improved three-level shunt active filter* », Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth. Proceedings. International Conference on, pp.87-92, Vol.1, December 1998.
- [53]. H. Djeghloud « *Filtrage actif de puissance* » Thèse doctorat. Université de Constantine 2007.
- [54]. J. Svensson and R. Ottersten « *Shunt active filtering of vector current-controlled VSC at a moderate switching frequency* », Industry Applications, IEEE Transactions on, pp.1083-1090, Vol.35, No.5, September/October 1999.
- [55]. A. Unsal, A.R. Joiranne & V.L. Stonick « *A DSP active filter for power conditioning* », Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings. IEEE International Conference on, pp.2263-2266, Vol.4, March 1999.
- [56]. A.M. Al-Zamil & D.A. Torrey « *Harmonic compensation for three-phase adjustable speed drives using active power line conditioner* », Power Engineering Society Summer Meeting. IEEE, pp.867-872, Vol.2, Jul 2000.
- [57]. A. Nava-Segura & G. Mino-Aguilar « *Four branches inverter based active filter for unbalanced 3 phase 4 wires electrical distribution systems* », Industry Applications Conference. Conference Record of the IEEE, pp.2503-2508, Vol.4, October 2000.
- [58]. F.A. Talukdar, S. Choudhuri & S.K. Biswas « *An instantaneous three phase four wire shunt active filter strategy* », Power Electronics and Drive Systems. Proceedings. 4th IEEE International Conference on, pp.835-840, Vol.2, October 2001.
- [59]. G. Casaravilla, A. Salvia, C. Briozzo and E. Watanabe « *Selective active filter with remote harmonic distortion control* », Harmonics and Quality of Power. 10th International Conference on, pp.478-483, Vol.2, October 2002.
- [60]. P. Jintakosonwit, H. Fujita, H. Akagi « *Control and performance of a fully digital controlled shunt active filter for installation on a power distribution system* », Power Electronics, IEEE Transactions on, pp.132-140, Vol.17, No.1, January 2002.

- [61]. M. Saitou, N. Matsui & T. Shimizu « *A control strategies of single-phase active filter using a novel d-q transformation* », Industry Applications Conference. 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the IEEE, pp.1222-1227, Vol.2, October 2003.
- [62]. C. Po-Tai & L. Zhung-Lin « *Distributed active filter systems (DAFS): A new approach to power system harmonics* », Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the IEEE, Vol.1, October 2004.
- [63]. T. Benslimane, K. Aliouane « *A new optimized SVPWM technique control for autonomous parallel active filters* », Harmonics and Quality of Power. 11th International Conference on, pp.112-116, September 2004.
- [64]. L. H. Tey, P.L.So& Y. C. Chu « *Improvement of power quality using adaptive shunt active filter* », IEEE Transactions On Power Delivery, pp.1558-1568, Vol.20, No.2, April 2005.
- [65]. M. Kale, E. Ozdemir « *An adaptive hysteresis band current controller for shunt active power filters* », Electric Power Systems Research, pp.113-119, Vol.73, 2005.
- [66]. S. Kumar and B. Umamaheswari « *Real time implementation of active power filters for harmonic suppression and reactive power compensation using dSPACE DS1104* », Journal Of Electrical Engineering & Technology, pp.373-378, Vol.3, No.3, 2008.
- [67]. M. Ucar, E. Ozdemir « *Control of a 3-phase 4-leg active power filter under non ideal mains voltage condition* », Electric Power Systems Research, pp.58-73, Vol.78, 2008.
- [68]. P. Zanchetta, M. Sumner, M. Marinelli and F. Cupertino « *Experimental modeling and control design of shunt active power filters* », Control Engineering Practice, pp. 1126-1135, Vol.17, 2009.
- [69]. R.A. Hooshmand, M.T. Esfahani « *A new combined method in active filter design for power quality improvement in power systems* », ISA Transactions, pp.150-158, Vol.50, 2011.
- [70]. N. Zaveri, A. Chudasama « *Control strategies for harmonic mitigation and power factor correction using shunt active filter under various source voltage conditions* », Electrical Power And Energy Systems, pp.661-671, Vol.42, 2012.
- [71]. R. Zahira, A. PeerFathima, « *A technical survey on control strategies of active filter for harmonic suppression* », Procedia Engineering, pp.686-693, Vol.30, 2012.
- [72]. S. Mikkili, A.K. Panda « *Real-time implementation of PI and fuzzy logic controllers based shunt active filter control strategies for power quality improvement* », Electrical Power And Energy Systems, pp.1114-1126, Vol.43, 2012.
- [73]. A. Ketabi, M. Farshadnia, M.Malekpour and R. Feuillet « *A new control strategy for active power line conditioner (APLC) using adaptive notch filter* », Electrical Power and Energy Systems, pp.31-40, Vol.47, 2013.
- [74]. C. Xie Donghua, X. Shaojun « *Review of the control strategies applied to active power filters* », Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies. Proceedings of the IEEE International Conference on, pp.666-670, Vol.2, April 2004.

- [75]. B. Singh, K. Al-Haddad, and A. Chandra « *A review of active filters for power quality improvement* », IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp.960-971, Vol.46, No.5, October 1999.
- [76]. S. Beaulieu « *Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique* », Mémoire présentée comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie. Université du Québec à Chicoutimi 2007.
- [77]. S. Karimi « *Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage "FPGA in the loop": application au filtre actif parallèle* », Thèse Doctorat. Université Nancy-I 2009.
- [78]. O. Bouakaz « *Contribution à l'analyse des onduleurs multi niveaux fonctionnement symétrique et asymétrique* », Mémoire de Magister. Université d'Alger 2005.
- [79]. E. Fennouh « *Apport des onduleurs multi niveaux dans la commande de la machine asynchrone (moteur à induction)* », Mémoire de Magister. Université de Batna 2012.
- [80]. L.A. Morán, L. Fernández, J.W. Dixon and R. Wallace « *A simple and low-cost control strategy for active power filters connected in cascade* », Industrial Electronics Control and Instrumentation. Proceedings of the IEEE IECON 21st International Conference on, pp.463-468, Vol.1, November 1995.
- [81]. L. Asiminoaei, F. Blaabjerg and S. Hansen « *Evaluation of harmonic detection methods for active power filter applications* », Applied Power Electronics Conference and Exposition. APEC 2005. Twentieth Annual IEEE, pp.635-641, Vol.1, March 2005.
- [82]. Z. Salam, C. Tan Perng and A. Jusoh « *Harmonics mitigation using active power filter: a technological review* », Elekrika, Vol.8, No.2, 2006.
- [83]. M. El-Habrouk and M.K. Darwish « *Design and implementation of a modified Fourier analysis harmonic current computation technique for power active filters using DSP* », Electric Power Applications, IEE Proceedings, pp.21-28, Vol.148, No.1, January 2001.
- [84]. L. Asiminoaei, F. Blaabjerg & S. Hansen « *Harmonic detection methods for active power filter applications* », Industry Applications Magazine, IEEE, pp.22-33, Vol.13, N.1, July- August 2007.
- [85]. P. Rathika, D. Devaraj « *Artificial intelligent controller based three-phase shunt active filter for harmonic reduction and reactive power compensation* », Proceedings of The International Multi Conference of Engineers And Computer Scientists 2010, Vol.2, IMECS 2010, March 17-19, 2010, Hong Kong.
- [86]. J. Afonso, M. Aredes, E. Watanabe and J. Martins « *Shunt active filter for power quality improvement* », International conference UIE 2000 "Electricity For A Sustainable Urban Development" Lisboa, Portugal, 1-4 Novembro 2000.

- [87]. J.L. Afonso, M.J. Sepúlveda Freitas, and J.S. Martins « *p-q Theory power components calculations* », Industrial Electronics, 2003. ISIE '03. 2003 IEEE International Symposium on, pp. 385-390, Vol.1, June 2003.
- [88]. K-L. Areerak and K-N. Areerak « *The comparison study of harmonic detection methods for shunt active power filters* », World Academy of Science, Engineering And Technology, Vol.46, 2010.
- [89]. A.S Mane « *Performance analysis of multilevel inverter* », Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE), pp.47-51, 2012.
- [90]. I. Colak , E. Kabalci & R. Bayindir « *Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes* », Energy Convers Manage 2010.
- [91]. H. Denoun « *Contribution à l'étude et réalisation des convertisseurs AC/DC à M.L.I à facteur de puissance unitaire* », Thèse Doctorat. Université de Tizi Ouazou 2012.
- [92]. R. Azaizia « *Etude et commande d'une machine asynchrone a double alimentation alimentée par un convertisseur multi-niveaux* », Mémoire de Magister. Université de Boumerdes 2008.
- [93]. A. Meroufel « *Contrôle de la machine asynchrone* », Intelligent control & electrical power systems laboratory (ICEPS), Université de Sidi Bel-Abbès 2008/2009.
- [94]. T. Zhuohui; L. Yongdong and L.Min, « *A Direct Torque Control of Induction Motor Based on Three-Level NP Cinverter* », Power Electronics Specialists Conference, pp.1435-1439, Vol.3, 2001.
- [95]. Xavier del Toro Garcia, Antoni Arias, Marcel G. Jayne, Phil A. Witting, Vicenç M. Sala and Jose Luis Romeral « *New DTC Control Scheme for Induction Motors fed with a Three-level Inverter*», Automatika, pp. 73-81, 2005.
- [96]. X. Hu and L. Zhang « *A predictive direct torque control scheme for a three-level VSI fed induction motor drive* », Electrical Machines and Drives, 1999. Ninth International Conference on, pp.334-338, Conf. Publ. No. 468, 1999.
- [97]. L. Kyo-Beum; S. Joong-Ho; C. Ick and Y. Ji-Yoon « *Torque Ripple Reduction in DTC of Induction Motor Driven by Three-Level Inverter with Low Switching Frequency* », IEEE on Power Electronics, pp.255-264, Vol.17, No.2, March 2002.
- [98]. A.M. Arker Hissel « *Contrôle Direct du Couple Electromagnétique de Machines Asynchrones de Grande Puissance* », Thèse Doctorat ENSEEIHT Toulouse 1999.
- [99]. L. A. Morán, J. Dixon, & R. R. Wallace « *A three-phase active power filter operating with fixed switching frequency for reactive power and current harmonic compensation* », IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp.402-408, Vol.42, No.4, August 1995.

Résumé: -----

En se propageant à travers les réseaux électriques, les tensions et les courants sont idéalement des ondes sinusoïdales à la fréquence fondamentale du réseau. Cependant, selon les travaux de recherches publiées dans la littérature, nous constatons que la qualité de l'onde électrique est loin d'être parfaite, à cause de l'utilisation des charges non linéaires, ces charges génèrent des harmoniques de courant et consomment de la puissance réactive.

Pour cela l'objet du travail présenté dans ce mémoire est l'étude théorique et la simulation numérique du fonctionnement d'un filtre actif parallèle permettant de compenser les harmoniques, qui découle directement de la prolifération des charges non linéaires.

Après un rappel des origines et des effets de la pollution harmonique sur les réseaux électriques, les dispositifs actifs permettant d'y remédier ainsi que la modélisation et la mise en équation de l'ensemble réseau-charge polluante-filtre actif sont présentés. La commande du filtre actif triphasé à base des onduleurs deux et trois niveaux a été ensuite étudiée pour différentes techniques d'identification des harmoniques à savoir: la méthode des puissances instantanées (pq), la théorie de référentiel synchrone (dq) et la théorie des puissances instantanées dans le référentiel (pqr). Des tests de simulation ont été présentés pour valider la fonctionnalité de cette des stratégies de commande stratégie proposées.

Abstract : -----

Ideally, voltages and currents propagate through the electric power system at the fundamental frequency of the network. However, according to research studies, it is usually found that the electric signals waveforms are far from being sinusoidal because of the presence of nonlinear loads which generate harmonic currents and consume reactive power. Therefore, the present work aims to study the behavior of a parallel active filter for harmonic current compensation. After a review of the causes of harmonic pollution and their impacts on electric networks, the active devices allowing minimization of such effects and a modeling of the overall system (network, pollutant load and active filter) are presented. Then, the control of two and three-level inverter based-shunt active filter is studied for various harmonics identification techniques, namely, instantaneous power p-q theory method, synchronous d-q reference frame theory, and synchronous reference (d-q-r) theory technique. Finally, the obtained simulation results show the efficiency of the proposed control strategies.

ملخص

بانتشارها من خلال الشبكات الكهربائية فان التيارات الكهربائية و التوترات تكون على شكل موجات جيبيه ترددها هو التردد الأساسي للشبكة، لكن من خلال الأبحاث المنشورة والمنجزة، فإننا نتأكد بان جودة الموجة الكهربائية ليست مثالية: و هذا راجع الى استعمال الحمولات الغير خطية التي تقوم بتوليد تيارات توافقية واستهلاك الطاقة الغير فعالة: من اجل هذا فان هدف هذا العمل المنجز في هذه المذكرة هو الدراسة النظرية و المحاكاة الرقمية لعمل المصفاه الفعال المربوط على التوازي الذي يعمل على تعويض التيارات التوافقية المولدة من الحمولات الغير خطية: يعد التذكير حول أسباب و اثار التلوث التوافقي على الشبكات الكهربائية و كيفية مواجهتها بالإضافة إلى عرض التصميم ووضع المعادلات بالنسبة للشبكة و الحمولة و المصفاه الفعال، قمنا بدراسة طريقة التحكم في المصفاه الفعالة الموازية المتكونة على اساس عاكس ذات المستويين ثم ثلاثة مستويات بالنسبة الى مختلف التقنيات التعرف على التيارات التوافقية المتمثلة في: نظرية الطاقة اللحظية (pq), نظرية المرجع المترامن (dq), بالإضافة إلى نظرية الطاقة اللحظية في المعلم (pqr). عدة تجارب تم عرضها من اجل التحقق من نتائج استعمال التقنيات الخاصة بالتحكم التي تم عرضها.