



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure
et de la Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté des Sciences et de la Technologie

Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Commande électrique

Thème

**Commande d'un onduleur à quatre fils pour la
compensation des courants harmoniques dans les réseaux
électriques**

Encadreur :
Dr. MAHNI Tidjani

Présenté par :
- BEN KHALIFA Mohammed
Arafat
- GORI Saber

Devant le jury composé de :

Président	Université d'El-Oued
Examineur	Université d'El-Oued
Examineur	Université d'El-Oued

Remercie ments

Nous rendons grâce à Dieu Tout-Puissant pour nous avoir accordé la foi, la patience, la volonté et le courage nécessaires à l'accomplissement de ce modeste travail dans les meilleures conditions.

Nous adressons nos sincères remerciements à Monsieur MAHNI Tidjani pour son encadrement, ses précieux conseils, sa disponibilité et son accompagnement tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous exprimons également notre profonde gratitude aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer et de juger ce travail.

Nos remerciements vont aussi à tous nos amis pour

leur soutien moral, leurs encouragements et leur présence durant toute la période de préparation de ce mémoire.

Enfin, nous tenons à adresser notre plus profonde reconnaissance à nos très chers parents, dont l'amour, le soutien indéfectible, les sacrifices et les encouragements constants ont largement contribué à notre réussite et à l'aboutissement de ce travail.

Ben Khalifa Mohammed Arafat

Et Gori Saber

Dédicace

Je suis dédié ce modeste travail à

:

**Ma très chère mère.*

**Mon très cher père.*

**Mes sœurs et mes frères*

**toutes mes familles*

**Mon binôme*

**Tous mes amis.*

**Tout la promotion 2025/2026*

الملخص:

يقدم هذا العمل استراتيجية تحكم في عاكس جهد كهربائي رباعي الأسلاك مستخدم للتصفية النشطة المتوازنة للتيارات التوافقية. وتتم مقارنة التعويض هذه على مرحلتين؛ حيث تحدد المرحلة الأولى التيارات التوافقية بالاعتماد على طريقة الإطار المرجعي المتزامن، في حين تقوم المرحلة الثانية بحقن هذه التيارات التوافقية في الشبكة الكهربائية باستعمال طريقة التحكم بالتباطؤ. تتكيف البنية المقترحة تلقائيًا مع تقلبات الاضطرابات التوافقية وتسمح بتعويض التيارات التوافقية. كما تُظهر نتائج المحاكاة التي تم إجراؤها فعالية وقوة هذا المرشح في حالتي الأحمال المتوازنة وغير المتوازنة

الكلمات المفتاحية :

المرشح النشط المتوازي

العاكس رباعي الأسلاك

التوافقيات الكهربائية

المرجع المتزامن (SRF)

التحكم بالهسترة

تعويض التوافقيات

جودة الطاقة الكهربائية

Résumé :

Ce travail présente une stratégie de commande d'un onduleur de tension à quatre fils utilisés pour le filtrage actif parallèle des courants harmoniques. Cette approche de compensation se fait en deux étapes. La première étape identifie les courants harmoniques à l'aide de la méthode du révérenciel synchrone. La deuxième étape injecte les courants harmoniques dans le réseau électrique à l'aide de la commande par hystérésis. La structure présentée permet la compensation des courants harmoniques et le rééquilibrage des courant de source. Les simulations effectuées démontrent l'efficacité et la robustesse de ce filtre dans le cas des charges équilibrées et déséquilibrées.

Mots-clés (Français):

Filtre actif parallèle

Onduleur à quatre fils

Harmoniques de courant

Référentiel synchrone (SRF)

Commande par hystérésis

Compensation harmonique

Qualité de l'énergie électrique

SOMMAIRE

Chapitre 1 : Qualité de l'énergie électrique et harmoniques

<i>Introduction Générale.....</i>	<i>1</i>
<i>1.1 Introduction :</i>	<i>5</i>
<i>1.2 Les perturbations électriques :</i>	<i>5</i>
<i>1.2.1 Creux et coupures de tension :</i>	<i>5</i>
<i>1.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension</i>	<i>6</i>
<i>1.2.4 Variation de fréquence</i>	<i>6</i>
<i>1.2.5 Harmoniques et inter-harmoniques</i>	<i>6</i>
<i>1.3 Sources d'harmonique :</i>	<i>8</i>
<i>1.4 Conséquences des harmoniques :</i>	<i>9</i>

1.5 Analyse des harmoniques :	10
1.5.1 Développement en série de Fourier du courant de la charge non linéaire	10
1.5.2 Taux de distorsion harmonique (Total harmonique Distorsion THD).	11
1.5.3 Facteur de puissance	13
1.6 Solutions de dépollution du courant dans les réseaux électriques :	13
1.6.1 Solutions traditionnelles :	13
1.6.2 Solutions modernes :	15
1.7 Comparaison entre les filtres passifs et les filtres actifs :	19
1.8 Conclusion :	20

Chapitre 2: Etude de la partie puissance du filtre actif parallèle

2.1 Introduction :	24
2.2 Onduleur d'un filtre actif parallèle	24
2.2.1 Onduleur triphasé à trois bras avec condensateur à point milieu :	25
2.2.2 Onduleur triphasé à quatre bras	26
2.3 Filtre de couplage :	28
2.4 Système de stockage d'énergie	30
2.5 Conclusion :	32

Chapitre 3 : Etude de la partie commande du filtre actif parallèle

3.1 Introduction :	34
3.2 Détermination des courants de référence :	34
3.2.1 Présentation de la méthode de puissances instantanées pour un filtre à quatre fils :	34
3.2.2 Méthode de référentiel synchrone :	36
3.3 Contrôle de l'onduleur	37
3.3.1 Contrôle par hystérésis :	37
3.3.2 Control par MLI :	38
3.4 Conclusion :	39

Chapitre 4: Simulations et Interprétations des Résultats

4.1 Introduction:	41
4.2. Schémas de simulation :	41
4.3. Paramètres de la simulation	43
4.4 Résultats des simulations sous Matlab-Simulink :	43
4.4.1. Cas de charge équilibrée :	40
4.4.2 Cas des charges déséquilibrées	43

<i>4.5 Conclusion :</i>	<i>50</i>
<i>Conclusion Générale</i>	<i>51</i>
<i>Bibliographiques</i>	<i>52</i>

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	<i>Les perturbations électriques</i>	7
Figure 1.2	<i>Principe du filtrage actif parallèle</i>	14
Figure 1.3	<i>Déférentes configurations d'un filtre actif monophasé</i>	15
Figure 1.4	<i>Filtre actif parallèle à trois bras avec condensateurs à point milieu.</i>	15
Figure 1.5	<i>Filtre actif parallèle à quatre bras pour un réseau triphasé à quatre fils</i>	16
Figure 1.6	<i>Filtre actif série</i>	17
Figure 2.1	<i>Onduleur Monophasé De Tension</i>	21
Figure 2.2	<i>Onduleur Monophasé De Courant</i>	22
Figure 2.3	<i>Filtre actif parallèle à trois bras avec condensateurs à point milieu</i>	22
Figure 2.4	<i>Filtre actif parallèle à quatre bras pour un réseau triphasé à quatre bras</i>	24
Figure 3.1	<i>Identification par la méthode des puissances instantanées</i>	33
Figure 3.2	<i>Identification par la méthode de référentiel synchrone</i>	34
Figure 3.3	<i>commande du courant par hystérésis.</i>	35
Figure 3.4	<i>commande du courant par MLI</i>	36
Figure 4.1	<i>Schéma de FAP à quatre fils avec un onduleur à quatre bras sous Matlab-Simulink.</i>	38
Figure 4.2	<i>Charges triphasées non linéaire sous Matlab- Simulink</i>	39
Figure 4.3	<i>Identification par la méthode de référentiel synchrone sous Matlab-Simulink</i>	39
Figure 4.4	<i>commande par hystérésis sous Matlab- Simulink</i>	40
Figure 4.5	<i>Courant de charge.</i>	41
Figure 4.6	<i>Courant de neutre cote charge.</i>	42
Figure 4.7	<i>Spectre d'harmonique du courant de la charge</i>	42
Figure 4.8	<i>Courant de source.</i>	42
Figure 4.9	<i>Courant de neutre cote source</i>	42
Figure 4.10	<i>Spectre d'harmonique du courant de source après filtrage</i>	43
Figure 4.11	<i>Courant injecté par filtre</i>	43
Figure 4.12	<i>Courant de la charge (phase1 , 2 ,3).</i>	44
Figure 4.13	<i>Courant du neutre cote charge.</i>	44
Figure 4.14	<i>Spectre d'harmonique (phase 1 avant filtrage).</i>	44

Figure 4.15	<i>Spectre d'harmonique (phase 2 avant filtrage).</i>	45
Figure 4.16	<i>Spectre d'harmonique (phase 3 avant filtrage).</i>	45
Figure 4.17	<i>Courant de source (phase 1 ,2, 3).</i>	45
Figure 4.18	<i>Courant de neutre (avant filtrage).</i>	46
Figure 4.19	<i>Spectre d'harmonique (phase 1 après filtrage).</i>	46
Figure 4.20	<i>Spectre d'harmonique (phase 2 après filtrage).</i>	46
Figure 4.21	<i>Spectre d'harmonique (phase 3 après filtrage).</i>	46
Figure 4.22	<i>Courant injecté par filtre (phase 1)</i>	47
Figure 4.23	<i>Courant injecté par filtre (phase 2)</i>	47
Figure 4.24	<i>Courant injecté par filtre (phase 3).</i>	47

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1-1</i>	<i>Caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques</i>	11
<i>Tableau 1-2</i>	<i>Caractéristiques des filtres actifs et passifs</i>	18
<i>Tableau 2-1</i>	<i>Tensions générées par l'onduleur de tension à quatre bras</i>	23
<i>Tableau 2-2</i>	<i>Tensions générées par l'onduleur de tension à quatre</i>	24
<i>Tableau 2-3</i>	<i>Différence entre 3 bras et 4 bras</i>	25
<i>Tableau 2-4</i>	<i>Influence des paramètres sur le comportement du FAP</i>	28
<i>Tableau 3-1</i>	<i>Les modes de compensation de la commande des puissances instantanées</i>	32
<i>Tableau 4-1</i>	<i>Paramètres du système étudié</i>	40

f	Fréquence
f_h	Fréquence de la composante harmonique de rang h
f_1	Fréquence de la composante fondamentale
THD	Taux de Distorsion Harmonique
D	Puissance Déformante
P	Puissance active
Q	Puissance réactive
S	Puissance apparente
FP	Facteur de puissance
I_f	Valeur efficace du courant injecté par le FAP
I_{1h}	Valeur efficace du Courant harmonique du rang h
V_1	Valeur efficace de la tension de l'harmonique de rang h
V_h	Valeur efficace de la tension du fondamental
p	indice de pulsation
L	Inductance
C	Capacité
R	Résistance
IGBT	Insolated Gate Bipolaire Transistor
MLI	Modulation de largeurs d'impulsions
FAP	Filtre actif parallèle
FAS	Filtre actif série
R_s	Résistance du réseau côté source.
L_s	Inductance côté source (H).
R_c	Résistance côté charge (2).
L_c	Inductance côté source (H).
L_f	Inductance de filtre
C_{dc}	Condensateur du bus continue

I_s	Courant du source
I_f	Courant du filtre
I_h	Courant harmonique de la charge
I_n	Courant du neutre

LISTE DES SYMBOLES

Introduction Générale

Au cours des dernières années, les systèmes électriques ont connu une transformation radicale suite au développement rapide des technologies des semi-conducteurs et à la prolifération massive de l'électronique de puissance. Malgré l'efficacité offerte par ces dispositifs, ils constituent les principales sources de charges non linéaires, entraînant des problèmes majeurs de qualité de l'énergie électrique, en particulier la pollution harmonique.

Ces harmoniques provoquent une distorsion des ondes de courant et de tension, ce qui conduit à une augmentation des pertes énergétiques, à l'échauffement des transformateurs et des machines électriques, et peut aller jusqu'à perturber les systèmes de commande et de protection. Cette problématique s'accroît dans les réseaux triphasés à quatre fils, où les charges déséquilibrées et non linéaires provoquent l'apparition de courants harmoniques élevés dans le conducteur neutre, menaçant ainsi la sécurité et l'efficacité du réseau[1].

Pour relever ces défis, les filtres passifs étaient traditionnellement utilisés. Cependant, leurs limitations de performance et les problèmes de résonance ont poussé les chercheurs vers le développement de solutions plus dynamiques et efficaces : les filtres actifs.

Le filtre actif parallèle à quatre fils (Shunt Active Power Filter - 4 wires) figure parmi les solutions technologiques les plus innovantes. Son rôle ne se limite pas à la compensation des harmoniques dans les trois phases, mais s'étend à l'élimination du courant du neutre, à la correction du facteur de puissance et à l'équilibrage des charges. Son principe repose sur l'injection de courants de compensation opposés à ceux générés par les charges non linéaires, afin de rendre le courant source purement sinusoïdal et en phase avec la tension [1] [2].

Cette étude porte sur la conception et la modélisation de ce type de filtres, en mettant l'accent sur les algorithmes d'identification des courants de référence et les stratégies de commande, afin de garantir la stabilité et la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques modernes. [2]

Le présent mémoire est organisé selon le plan suivant:

Chapitre I : Les perturbations dans les réseaux électriques

Ce chapitre est consacré à l'exposition des perturbations affectant les réseaux d'alimentation électrique, tant au niveau du courant que de la tension. Il aborde également les origines de ces perturbations et leurs conséquences sur les installations électriques. Par la suite, certaines normes relatives aux harmoniques sont présentées, suivies d'une exposition des techniques et méthodes de dépollution des réseaux électriques.

Chapitre II : Etude de la partie puissance du filtre actif parallèle

Ce deuxième chapitre est dédié à l'étude de la partie puissance du filtre actif parallèle (FAP) triphasé, où nous présenterons les différents éléments constitutifs de ce dispositif.

Chapitre III : Commande du filtre actif parallèle

Ce chapitre se concentre sur l'étude de la partie commande du filtre actif parallèle. Nous y exposerons différentes méthodes et stratégies de contrôle utilisées pour assurer son bon fonctionnement.

Chapitre IV : Simulation et interprétation des résultats

Ce dernier chapitre est consacré à la réalisation de diverses simulations du filtre actif parallèle (FAP) à quatre fils. Les courbes obtenues seront présentées, analysées et interprétées.

Chapitre 1

Qualité de l'énergie
électrique et
harmoniques

1.1 Introduction :

La qualité de l'énergie électrique (Power Qualité) représente aujourd'hui l'un des défis majeurs auxquels sont confrontés les réseaux électriques et les systèmes industriels modernes.

Ce chapitre s'intéresse au sujet de la qualité de l'énergie. Premièrement, les perturbations électriques sont abordées en mettant particulièrement l'accent sur les harmoniques, leurs sources, et leurs conséquences. Puis, les différentes solutions de dépollution harmonique sont exposées.

1.2 Les perturbations électriques :

Les perturbations électriques peuvent se manifester par : Un creux ou une coupure de tension, une fluctuation de tension, un déséquilibre du système triphasé de tension, une variation de la fréquence, la présence d'harmoniques et/ou d'inter harmoniques.

1.2.1 Creux et coupures de tension :

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10 % et 90 % de la tension nominale pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes [3].

Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation ou dans les réseaux tant publics que ceux des utilisateurs. Ils apparaissent également lors de manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.).

Une coupure de tension quant à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90 % de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. La figure 1.1 (a) montre un exemple de creux et de coupure de tension.

1.2.2 Fluctuations de tension :

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de 10 % et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes.

Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courants d'appel importants. L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder.

Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant une gêne visuelle perceptible pour une variation de 1 % de la tension. Ce phénomène

de papillotement est appelé flicker. Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure 1.1 (b).

1.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé comme le montre la figure 1.1(c).

Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau.

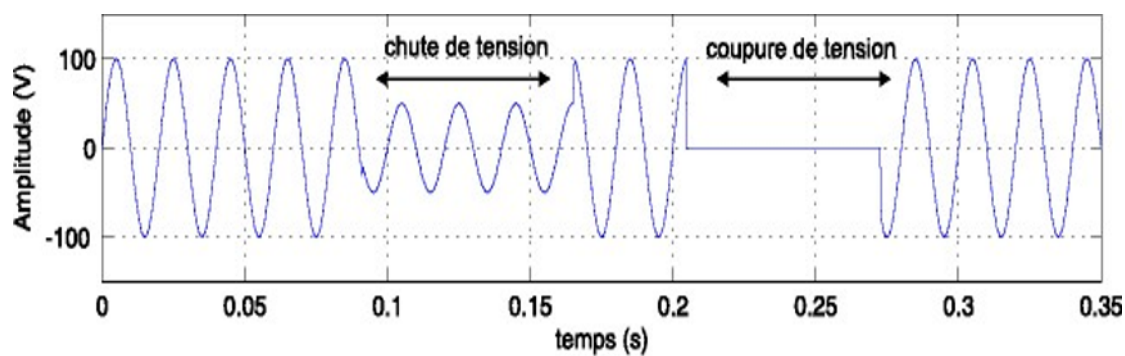
1.2.4 Variation de fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome, comme le montre la figure 1.1 (d). Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$.

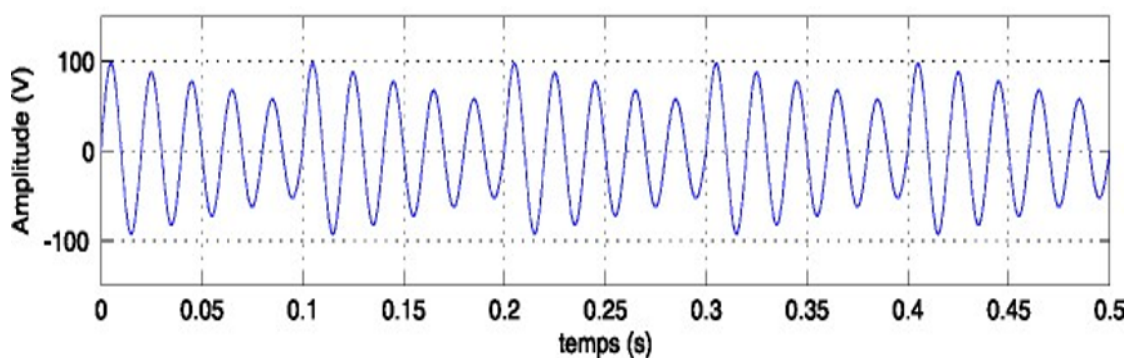
1.2.5 Harmoniques et inter-harmoniques

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entières de celle du fondamental. La figure 1.1(e) montre la superposition de l'harmonique d'ordre 3 sur un courant fondamental de fréquence 50 Hz. La principale source de la présence des harmoniques dans le réseau électrique est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipement de l'électronique de puissance à base de thyristors et de transistors.

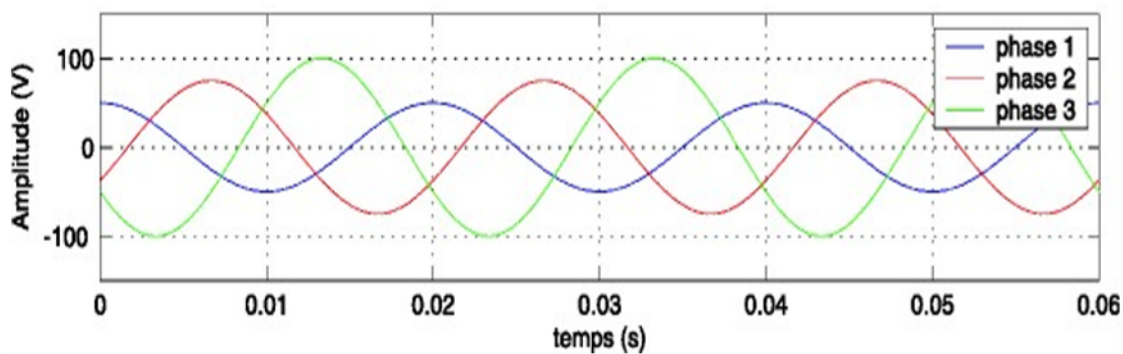
Les inter harmoniques sont superposés à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau. L'apparition des inter harmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires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



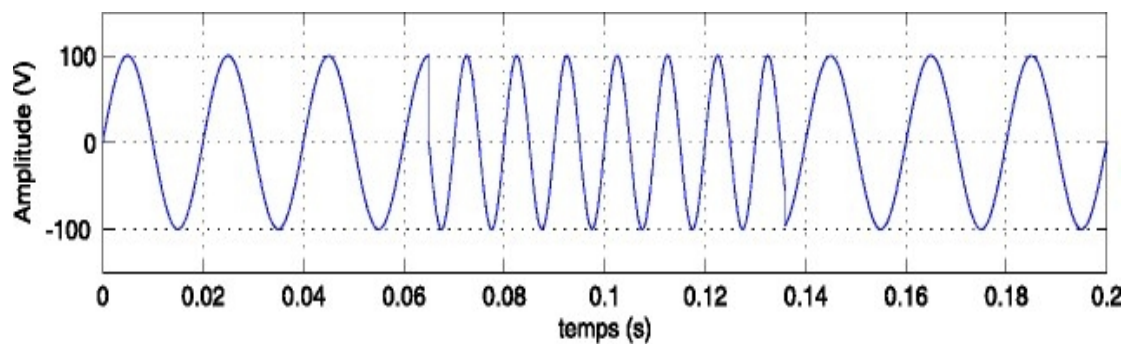
(a) Creux et coupures de tension



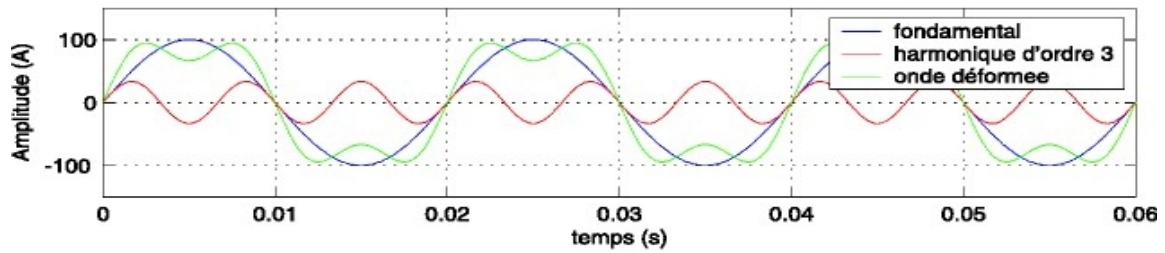
(b) Fluctuations de tension



(c) Déséquilibre du système triphasé



(d) Variation de fréquence.



(e) Harmoniques.

Figure 1.1: Les perturbations électriques

1.3 Sources d'harmoniques :

a. Les convertisseurs statiques :

Les convertisseurs statiques sont les sources d'harmoniques les plus gênantes du fait du nombre et de la puissance des dispositifs installés. On peut citer de manière non exhaustive :

- Les redresseurs monophasés et triphasés.
- Les gradateurs utilisés dans les entraînements.
- Les systèmes d'éclairage et de chauffage et les systèmes de conduite des réseaux.
- Les variateurs de vitesse électroniques constitués principalement d'un convertisseur statique et d'une partie électronique, destinés à commander la vitesse d'un moteur électrique.

b. L'éclairage :

L'éclairage, par lampes à décharge et tubes fluorescents, est générateur de courants harmoniques. Le taux individuel d'harmonique 3 peut même dépasser 100 % pour certaines lampes fluo-compactes modernes, d'où une attention particulière à porter à la détermination de la section et de la protection du conducteur neutre qui, véhiculant la somme des courants d'harmoniques 3 des trois phases, risque un échauffement important.

c. Les fours à arc :

Dans le cas du four à arc à courant alternatif l'arc est non linéaire, dissymétrique et instable. Il va induire des spectres possédant des raies impaires, paires et un spectre continu (bruit de fond à toutes les fréquences). Le niveau spectral est en fonction du type de four, de sa puissance, de la période de fonctionnement considérée : fusion, affinage... Aussi seules des mesures peuvent déterminer le spectre de façon précise.

Dans le cas du four à arc à courant continu l'arc est alors alimenté par l'intermédiaire d'un redresseur. L'arc est plus stable qu'en courant alternatif. Le courant absorbé se décompose en un spectre semblable à celui d'un redresseur, et un spectre continu de niveau inférieur à celui d'un four à courant alternatif.

d. Les inductances saturées :

De telles inductances ont leur impédance fonction de l'amplitude du courant qui les traverse, et de fait elles provoquent des déformations notables de ce courant. C'est le cas, dans une certaine mesure, des transformateurs à vide soumis à une surtension permanente.

e. Les machines tournantes :

Les machines tournantes donnent des harmoniques de denture de rangs élevés et d'amplitudes souvent négligeables [4][5].

1.4 Conséquences des harmoniques :**a. L'échauffement :**

Les pertes totales par effet Joule sont la somme de celles du fondamental et des Harmonique .

$$\sum_{i=1}^{\infty} I_i^2 \cdot R = I^2 \quad (1.1)$$

Avec I le courant total, I_i le courant harmonique de rang i qui représente le fondamental pour $i = 1$, et R la résistance traversée par le courant I.

Les harmoniques augmentent aussi les pertes fer (pertes par courants de Foucault). Ils prennent de l'importance dans les matériels utilisant les circuits magnétiques (moteurs, transformateurs ...).

b. L'interférence avec les réseaux de télécommunication :

Le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de télécommunication peut induire dans ces derniers des bruits importants. Dans le cas de résonances, une partie des réseaux de télécommunication peut être rendue inutilisable.

c. Les défauts de fonctionnement de certains équipements électriques :

En présence des harmoniques, la tension (ou le courant) peut changer plusieurs fois de signe dans une demi-période : par conséquent, tout appareil dont le fonctionnement est basé Sur le passage par zéro des grandeurs électriques (appareils utilisant la tension comme Référence) peut être perturbé.

d. Le risque d'excitation de résonance :

Les fréquences de résonance des circuits formés par des inductances des transformateurs et des câbles sont normalement élevées. Ce n'est pas le cas lorsque des batteries de capacité sont raccordées au réseau pour relever le facteur de puissance ; les fréquences de résonance peuvent devenir assez faibles et coïncider ainsi avec celles des harmoniques engendrées par les convertisseurs statiques : dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification d'harmoniques.

1.5 Analyse des harmoniques :

La théorie classique de l'énergie électrique ne tient compte que des systèmes électriques basés sur des signaux sinusoïdaux. Cependant les signaux électriques présents sur les réseaux (surtout les courants) sont souvent perturbés et ils ne sont pas parfaitement sinusoïdaux.

Dans le domaine de la qualité de l'énergie, il est indispensable de bien connaître tous les échanges d'énergie entre le réseau et les différentes charges de façon à pouvoir compenser les éventuelles perturbations.

Le concept d'harmonique a été introduit au début du XIXème siècle par Joseph Fourier [6], en démontrant que tout signal périodique non sinusoïdal peut être représenté par une somme ou série des sinusoïdes de fréquences discrètes. La composante zéro de la série dite de Fourier est la composante continue, tandis que la première composante est appelée composante fondamentale. Dans le cas des systèmes raccordés au réseau, celle-ci est une composante à la fréquence nominale du réseau (50Hz). Le reste des composantes de la série sont appelés harmoniques et sont multiples de la fréquence fondamentale.

1.5.1 Développement en série de Fourier du courant de la charge non linéaire

Le courant absorbé par une charge non linéaire, peut être décomposé en série de Fourier, son expression mathématique est de la forme :

$$i_{ch}(\omega t) = I_0 + I_{1m}\sin(\omega t + \varphi_1) + I_{2m}\sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + I_{nm}\sin(n\omega t + \varphi_n) \quad 1.1$$

ou d'une autre manière

$$i_{ch}(\omega t) = f(\omega t) = a_0 + a_1\sin(\omega t) + b_1\cos(\omega t) + a_2\sin(2\omega t) + b_2\cos(2\omega t) + \dots + a_n\sin(n\omega t) + b_n\cos(n\omega t) \quad 1.2$$

$$f(\omega t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \{a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t)\} \quad 1.3$$

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d(\omega t) \quad 1.4$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad 1.5$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad 1.6$$

Les équations 1.1 et 1.2 sont équivalentes en posant

$$a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t) = I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad 1.7$$

Cette égalité donne l'amplitude de l'harmonique de rang

$$I_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad 1.8$$

Et son déphasage

$$\varphi_n = \arctan\left(\frac{b_n}{a_n}\right) \quad 1.9$$

$$a_n = I_n \cos(\varphi_n) \quad 1.10$$

$$b_n = I_n \sin(\varphi_n) \quad 1.11$$

Le courant de la charge non linéaire peut être exprimé selon l'équation 1.3 de la forme suivante :

$$i_{ch}(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} \{a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t)\} \quad 1.12$$

Substituant les équations 1.10 et 1.11 dans l'équation 1.12, on obtient

$$i_{ch}(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} \{I_n \sin(\varphi_n) \sin(n\omega t) + I_n \cos(\varphi_n) \cos(n\omega t)\} \quad 1.13$$

D'après les expressions ci-dessus, le courant de la charge non linéaire est donné par:

$$i_{ch}(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad 1.14$$

Ce courant peut être subdivisé en une composante fondamentale et des composantes harmoniques :

$$i_{ch}(\omega t) = I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad 1.15$$

1.5.2 Taux de distorsion harmonique (Total harmonique Distorsion THD).

La pollution harmonique peut être évaluée par le taux de distorsion harmonique, le taux de distorsion harmonique THD_i du courant de source peut être calculé de la manière suivante :

$$THD_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{sn1}^2}}{I_{s1}} \cdot 100 \quad 1.16$$

D'après l'équation 1.16, le THD mesure le rapport entre les harmoniques et le fondamental.

Le courant efficace de la source peut être calculé d'après la formule suivante :

$$I_s = \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} i_s^2(t) dt} \quad 1.20$$

$$I_s = \sqrt{I_{s1}^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_{sn}^2} \quad 1.21$$

La composante harmonique du courant de source instantané peut être obtenue d'après la formule suivante :

$$i_h(\omega t) = i_s(\omega t) - i_{s1}(\omega t) = \sum_{n=2}^{\infty} i_{sn}(\omega t) \quad 1.22$$

Et le courant efficace harmonique de la source est :

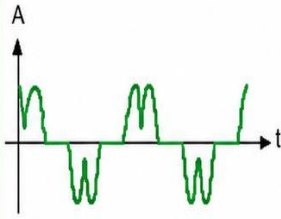
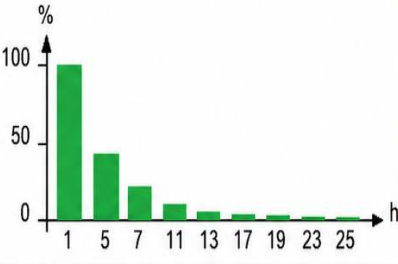
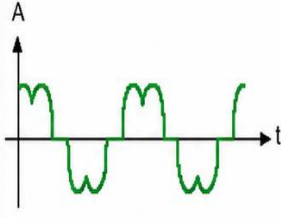
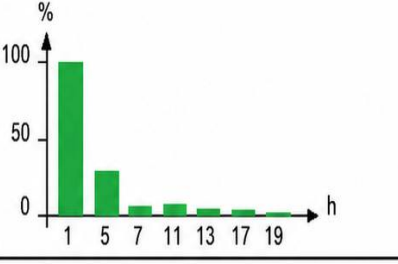
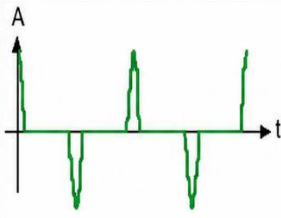
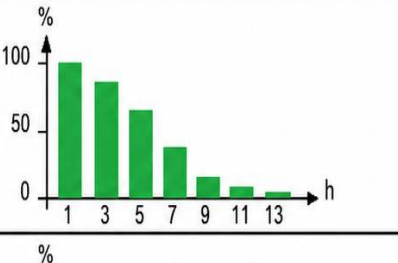
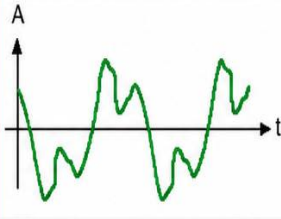
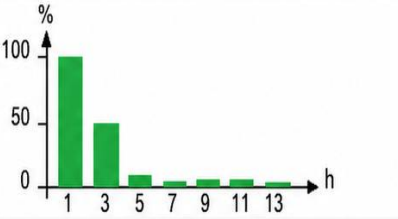
$$I_h = \sqrt{I_s^2 - I_1^2} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{sn}^2} \quad 1.23$$

Par conséquent le THD_i est égale :

$$\text{THD}_i = \frac{\sqrt{I_s^2 - I_1^2}}{I_1} \cdot 100 \quad \text{THD}_i = \sqrt{\frac{I_s^2}{I_1^2} - 1} \cdot 100 \quad 1.24$$

Le THD_i de quelques charges non linéaires est donné par le tableau 1.1 [5]

Tableau 1.1: Caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques.

Charges non linéaires	Forme d'onde de courant	Spectre	THD
Variateur de vitesse			44 %
Redresseur / chargeur			28 %
Charge informatique Ordinateur			115 %
Eclairage fluorescent			53 %

Dans le cas général, pour mesurer la pollution harmonique dans un réseau électrique, on calcule le taux de distorsion harmonique en tension THD_v car il permet également d'intégrer l'influence de l'impédance de court-circuit. Plus l'impédance de court-circuit est faible, moins le courant aura d'influence sur la tension.

$$THD_v(\%) = \sqrt{\frac{V_s^2}{V_1^2} - 1} \cdot 100 \quad 1.25$$

1.5.3 Facteur de puissance

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S . Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominaux. Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements.

Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (D) entre en considération. Elle est donnée par la relation :

$$D = V \cdot \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{sn}^2} \quad 1.26$$

Le facteur de puissance est donc égal :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad 1.27$$

Avec

$$P = V I_{s1} \cos(\varphi_1) \quad 1.28$$

$$Q = V I_{s1} \sin(\varphi_1) \quad 1.29$$

On peut aussi calculer le facteur de puissance de la manière suivante :

$$FP = \frac{V \cdot I_{s1} \cdot \cos(\varphi_1)}{V \cdot I_s} = \frac{I_{s1}}{I_s} \cos(\varphi_1) \quad 1.30$$

On constate que la puissance déformante et la puissance réactive contribuent à la dégradation du facteur de puissance.

1.6 Solutions de dépollution du courant dans les réseaux électriques :

Afin de compenser les perturbations du courant, deux groupes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne existent.

1.6.1 Solutions traditionnelles :

Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques.

a. Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique.

L'objectif n'est pas d'éliminer les courants harmoniques circulant dans l'installation électrique, mais plutôt de « faire avec », en évitant leurs conséquences. Au moment de la conception d'une installation nouvelle, l'idée consiste à surdimensionnement tous les éléments de l'installation susceptibles de véhiculer des courants harmoniques, à savoir les transformateurs, les câbles, les disjoncteurs, les groupes électrogènes et les tableaux de distribution. La solution la plus largement utilisée est le surdimensionnement du conducteur neutre. La conséquence est un accroissement important du coût de l'installation. Dans des installations existantes, la solution la plus répandue consiste à déclasser les équipements de distribution électrique soumis aux courants harmoniques. La conséquence est l'impossibilité de tirer profit du potentiel réel de l'installation [5].

b. Transformateurs à couplage spécial :

Il s'agit de limiter la circulation des courants harmoniques à une partie aussi petite que possible de l'installation à l'aide de transformateurs à couplage approprié. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle zigzag, empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre, ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques [8].

c. Inductances (selfs) série :

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 self a cependant une efficacité limitée. Il faut en installer une par charge non linéaire. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux [5].

d. Filtre passif accordé :

Le principe est de « piéger » les courants harmoniques dans des circuits LC, accordés sur les rangs d'harmoniques à filtrer. Un filtre comprend donc une série de « gradins » qui correspondent tous à un rang d'harmonique. Les rangs 5 et 7 sont les plus couramment filtrés.

On peut installer un filtre pour une charge ou pour un ensemble de charges. Sa conception nécessite une étude approfondie du réseau électrique et un travail de conception de bureau d'étude. Le dimensionnement dépend du spectre harmonique de la charge et de l'impédance de la source d'énergie. Il convient également de coordonner ses caractéristiques avec les besoins en puissance réactive des charges ; enfin, il est souvent difficile de concevoir les filtres de manière à éviter un facteur de puissance avance (capacitif) pour certaines conditions de charge [5] [12].

e. Filtre passif série :

Le principe est le même que le précédent, mais au lieu de piéger les harmoniques, on les empêche de remonter à la source. Un exemple de filtre passif série est le circuit bouchon [5] [10].

f. Compensation de la puissance réactive :

La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance, la plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau. L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante et qu'elle ne s'adapte pas à l'évolution du besoin

1.6.2 Solutions modernes :

Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs et les redresseurs MLI sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques. En effet, ces solutions peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur.

a. Filtre actif parallèle :

Le filtre actif parallèle (Voir figure 1.3) est composé d'un onduleur connecté au réseau par l'intermédiaire d'un filtre passif LR . Il se connecte en parallèle avec le réseau triphasé et injecte en temps réel les composantes harmoniques des courants absorbés par les charges non linéaires connectées au réseau. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal. Ces filtres actifs shunt présentent des avantages et des inconvénients par rapport aux filtres passifs [3][9].

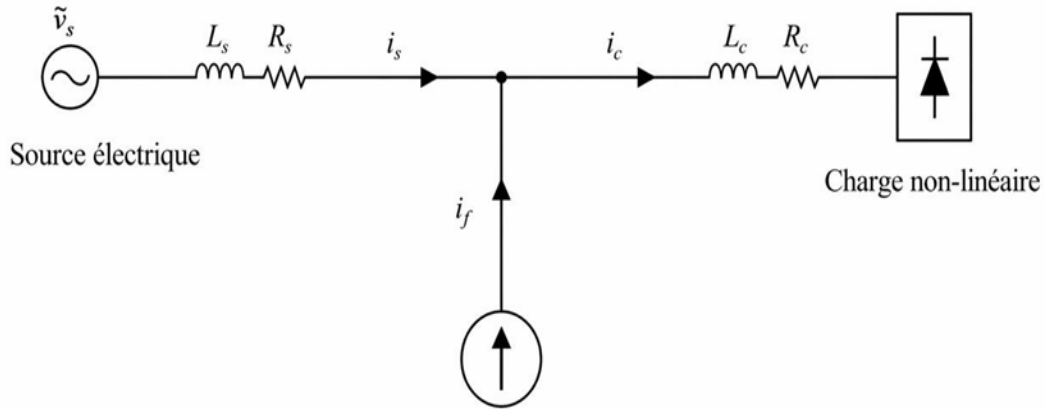


Figure 1.3

On peut distinguer trois configurations du filtre actif parallèle à structure tension.

- **Filtre monophasé :**

Deux différentes configurations du filtre actif parallèle monophasé sont présentées par la figure 1.4.

Dans la première configuration (figure 1.4.a), le filtre est principalement composé d'un onduleur monophasé, d'une capacité qui sert comme source de tension continue, et d'une inductance liant l'onduleur avec le réseau (source du courant). Dans la deuxième configuration (figure 1.4.b), on ajoute un transformateur et une capacité C' . Le primaire du transformateur est alimenté par l'onduleur, le secondaire est connecté en série avec C' , ainsi cette capacité avec le secondaire forme un filtre passif du courant de la charge [5].

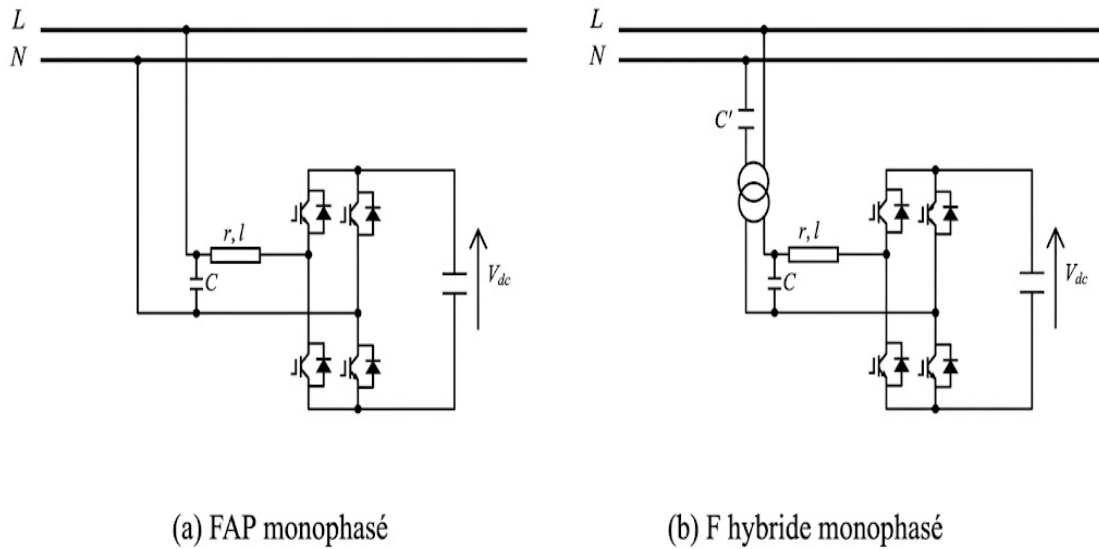


Figure 1.4- Différentes configurations d'un filtre actif monophasé.

- **Filtre actif parallèle à trois fils :**

Il est composé d'un onduleur à trois bras qui se connecte en parallèle avec le réseau triphasé par l'intermédiaire d'une inductance de couplage. Il injecte en temps réel les composantes harmoniques des courants absorbés par les charges non linéaires connectées au réseau. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal [5][13].

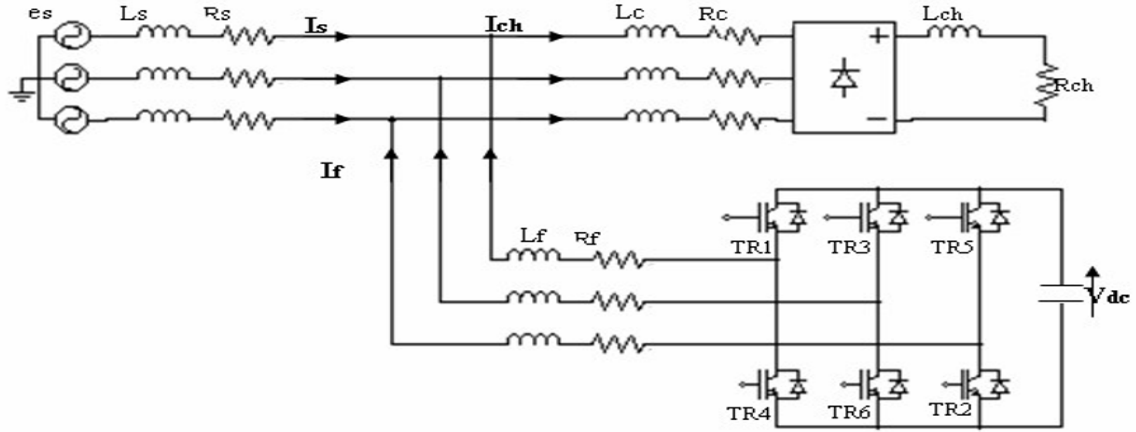


Figure 1.5 - Filtre actif parallèle à trois fils avec condensateurs à point milieu.

- **Filtre actif parallèle à quatre fils :**

Un grand nombre de charges monophasées peuvent être alimentées à partir d'un système triphasé avec le neutre. Elles peuvent causer un courant harmonique excessif dans le neutre, une surcharge due à la consommation de puissance réactive et un déséquilibre. Pour réduire ces problèmes, des compensateurs à quatre fils ont été développés dans les références[5][12]. Les topologies de ce type de filtre seront détaillées dans le chapitre suivant.

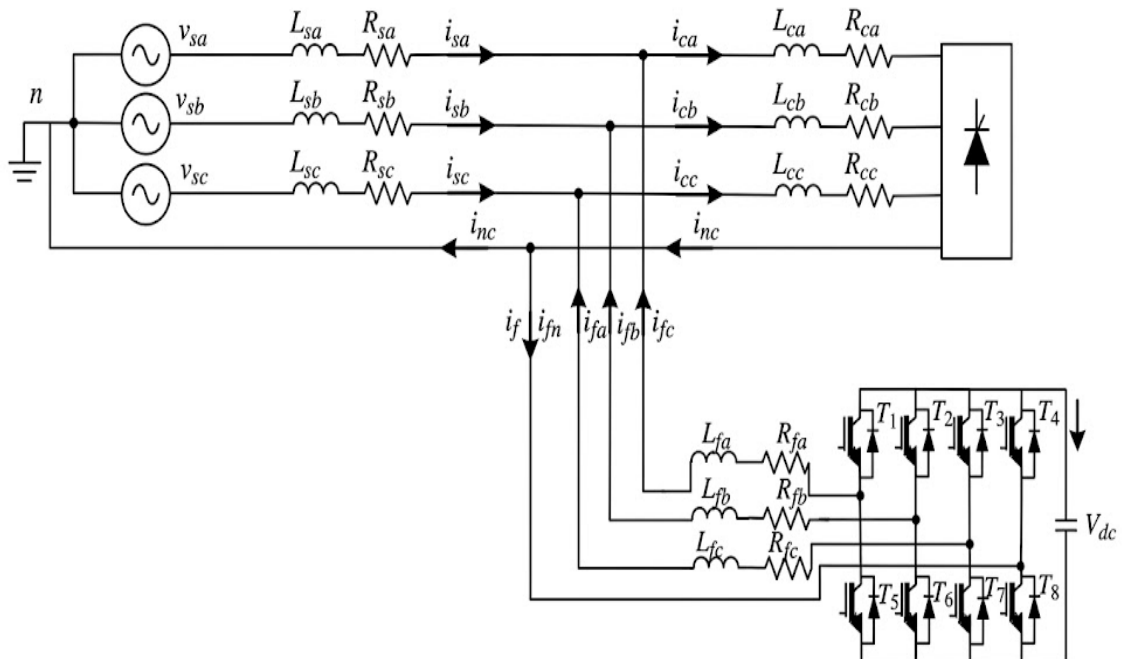


Figure 1.6 – Filtre actif parallèle à quatre bras pour un réseau triphasé à quatre fils

b Filtre actif série :

Le filtre actif série (FAS) constitue une solution performante pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique. Connecté en série entre la source d'alimentation et la charge, il agit comme une source de tension contrôlée capable d'injecter une tension de compensation afin de neutraliser les perturbations présentes sur le réseau électrique. Son principe de fonctionnement repose sur la génération d'une tension compensatrice opposée aux composantes indésirables du réseau, telles que les harmoniques, les déséquilibres de tension et les creux de tension. Cette action permet de maintenir aux bornes de la charge une tension pratiquement sinusoïdale, garantissant ainsi un fonctionnement plus stable et plus fiable des équipements alimentés. Le filtre actif série est particulièrement adapté à la protection des charges sensibles contre les perturbations de tension provenant du réseau ou engendrées par certaines charges. Grâce à sa capacité de compensation dynamique, il contribue à réduire les effets néfastes des défauts de qualité de l'énergie et à améliorer les performances globales du système électrique.

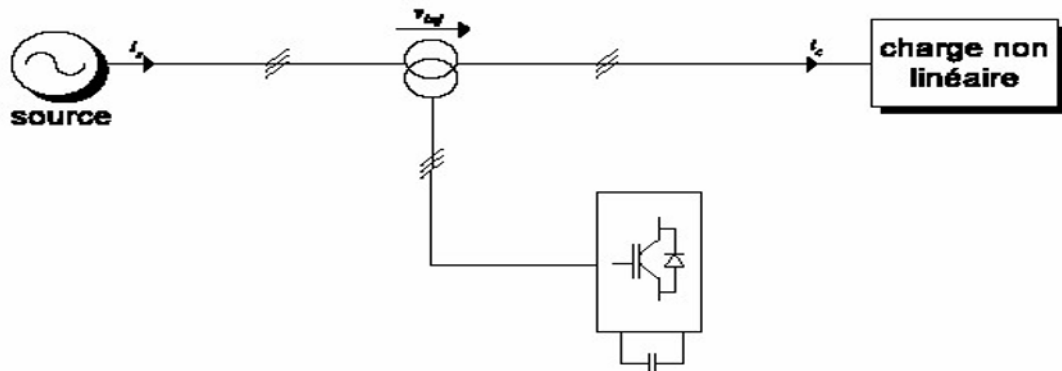


Figure 1.7 – Filtre actif série .

c Filtrage hybride :

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution.

Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations.

Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature [3], les plus étudiées étant:

- Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.
- Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.

- Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

1.7 Comparaison entre les filtres passifs et les filtres actifs :

Le tableau suivant donne une comparaison entre les filtres actifs et les filtres passifs selon plusieurs critères.

Tableau 1.2 - Caractéristiques des filtres actifs et passifs.

Critère de comparaison	Filtre passif	Filtre actif d'harmoniques
Action sur les courants harmoniques	- Nécessite un filtre pour chaque fréquence - pas d'adaptabilité - risque de résonance	- Agit simultanément sur plusieurs fréquences - Adaptabilité - amélioration de la forme de la tension pas toujours évidente
Influence de la variation de fréquence	- Efficacité réduite	- Aucune conséquence
Influence de la modification de l'impédance	- Risqué de résonance	- Aucune conséquence
Influence de l'augmentation de courant	- Risque de surcharge et de détérioration	- Aucun risque de surcharge, mais efficacité diminué
Augmentation de la charge	- Nécessite des modifications sur le filtre, dans certains cas	- Aucun problème si : $I_f < I_h$
Action sur les harmoniques	- Suivant leurs ordres	- possible, grâce au paramétrage
Modification de la fréquence fondamentale	- Modification impossible	- Possible, grâce à la reconfiguration
Encombrement	- Important	- Faible

Poids	- Important	- Faible
Performance	- Pauvre	- Bonne
Fiabilité	- Pauvre	- Pauvre
Cout	- Réduit	- Elevé
Pertes	- Réduites	- Elevées

1.8 Conclusion :

En conclusion de ce chapitre, nous avons pu établir le cadre théorique relatif à la qualité de l'énergie électrique. Il en ressort que les harmoniques ne sont pas de simples distorsions d'onde, mais un phénomène complexe affectant directement l'efficacité des équipements et leur durée de vie.

À travers l'analyse mathématique basée sur les séries de Fourier et l'examen des indicateurs de pollution tels que le taux de distorsion harmonique (THD), il devient évident que les solutions conventionnelles basées sur les filtres passifs ne répondent plus aux exigences des réseaux modernes, notamment en raison de leurs limites liées aux phénomènes de résonance et à leur manque de flexibilité. Ce constat ouvre ainsi la voie, dans le chapitre suivant, à l'étude des techniques de filtrage actif en tant qu'alternative dynamique et performante, capable de s'adapter aux variations des charges tout en garantissant une qualité d'énergie optimale.

Chapitre 2

Etude de la

partie

puissance du

filtre actif

parallèle

2.1 Introduction :

Les filtres actifs parallèles s'imposent comme une solution performante pour pallier les problèmes de qualité de l'énergie électrique dans les réseaux modernes. Ce chapitre est consacré à l'étude approfondie de la structure et de la composition de ce type de filtres, avec un accent particulier sur la "structure du partie puissance". Nous examinerons en détail les onduleurs triphasés à 3 bras et à 4 bras, en analysant leurs différences fondamentales, leurs avantages et leurs domaines d'application. L'étude portera également sur le "filtre de couplage", élément essentiel pour l'interface entre le filtre actif et le réseau, ainsi que sur l'importance du "système de stockage d'énergie" pour assurer le bon fonctionnement et la stabilité du filtre actif.

2.2 Onduleur d'un filtre actif parallèle

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue - alternative. Deux structures de l'onduleur sont envisagées. Il existe la structure tension et la structure courant.

Dans la structure tension l'onduleur connecte en parallèle au réseau est illustre (Cas monophasé) par la figure 2.1 [14]. La capacité C_{dc} joue le rôle d'une source de tension continue. L'onduleur de tension est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre du premier ordre constitué d'une inductance L_f .

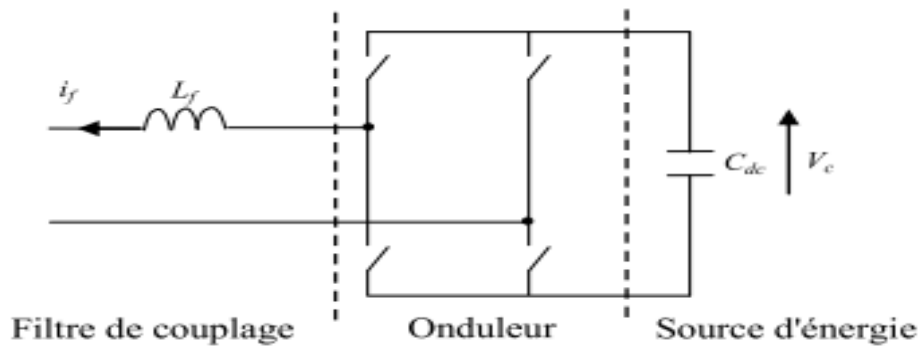


Figure 2.1- Onduleur monophasé de tension.

Dans la structure courant l'inductance joue le rôle d'une source de courant continu. Le courant i_f traversant cette inductance est maintenu quasiment constant pour ne pas dégrader les performances du filtre actif. L'onduleur de courant est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre passe-bas du second ordre constitué d'une inductance L_f et d'une capacité C_f . Ainsi le courant i_f du filtre actif est égal au courant délivré par l'onduleur filtre par le filtre L_c dont la fréquence propre ($\frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}}$). La bande passante du filtre actif est donc essentiellement imposée par le choix de L_f et de C_f . Ceux-ci peuvent être dimensionnés de manière à atténuer la fréquence de commutation des interrupteurs de l'onduleur. Les interrupteurs sont

unidirectionnels. Ils sont formés par des transistors commandés à l'ouverture et à la fermeture. Ceux-ci ne pouvant supporter de tension inverse, ils nécessitent une diode en série [16]. Cette structure est présentée par la figure 2.2 [15].

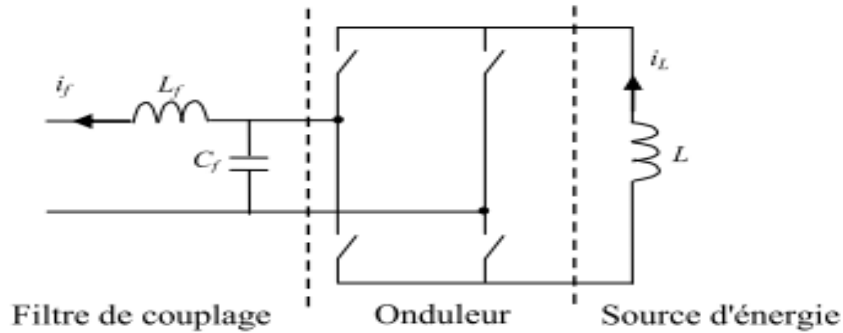


Figure 2.2 - Onduleur monophasé de courant.

2.2.1 Onduleur triphasé à trois bras avec condensateur à point milieu :

Cette topologie de filtre actif est constituée de six interrupteurs réversibles en courant commandés à la fermeture et à l'ouverture (transistors bipolaires, IGBT, thyristors ou GTO) en antiparallèle avec une diode. Ils forment les trois bras d'un onduleur triphasé. Un quatrième bras est constitué de deux condensateurs dont le point milieu est relié au neutre du réseau électrique, comme l'illustre la figure 2.3 [3][17].

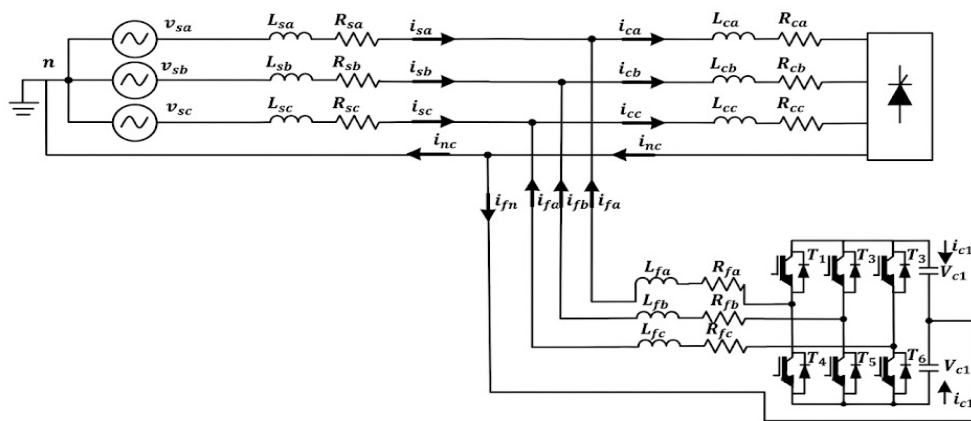


Figure 2.3 - Filtre actif parallèle à trois bras avec condensateurs à point milieu.

L'état de commutation pour ce type d'onduleur sont présentés dans le tableau (2.1).

Tableau (2.1): Tensions générées par l'onduleur de tension à trois bras avec condensateur à point milieu.

k	T ₃	T ₂	T ₁	V _{f3}	V _{f2}	V _{f1}
0	0	0	0	-V _{dc} /2	-V _{dc} /2	-V _{dc} /2
1	0	0	1	-V _{dc} /2	-V _{dc} /2	V _{dc} /2
2	0	1	0	-V _{dc} /2	V _{dc} /2	-V _{dc} /2
3	0	1	1	-V _{dc} /2	V _{dc} /2	V _{dc} /2
4	1	0	0	V _{dc} /2	-V _{dc} /2	-V _{dc} /2
5	1	0	1	V _{dc} /2	-V _{dc} /2	V _{dc} /2
6	1	1	0	V _{dc} /2	V _{dc} /2	-V _{dc} /2
7	1	1	1	V _{dc} /2	V _{dc} /2	V _{dc} /2

Cette topologie contient huit combinaisons de commande possibles. Ces états de commutations sont obtenus en utilisant les expressions suivantes [18][3] :

$$V_{f1} = T_1 V_{dc}/2 - (1-T_1) V_{dc}/2 \quad 2.1$$

$$V_{f2} = T_2 V_{dc}/2 - (1-T_2) V_{dc}/2 \quad 2.2$$

$$V_{f3} = T_3 V_{dc}/2 - (1-T_3) V_{dc}/2 \quad 2.3$$

Avec :

$$T_i = 1 \text{ si } T_i \text{ est fermé.} \quad 2.4$$

$$T_i = 0 \text{ si } T_i \text{ est ouvert.} \quad 2.5$$

2.2.2 Onduleur triphasé à quatre bras

Dans cette topologie, nous utilisons un onduleur comprenant quatre bras constitués de huit interrupteurs réversibles en courant comme l'illustre la figure (2.4). Cette configuration a été proposée afin d'éviter le recours à un élément de stockage à point milieu comme celle de la configuration précédente [19] .

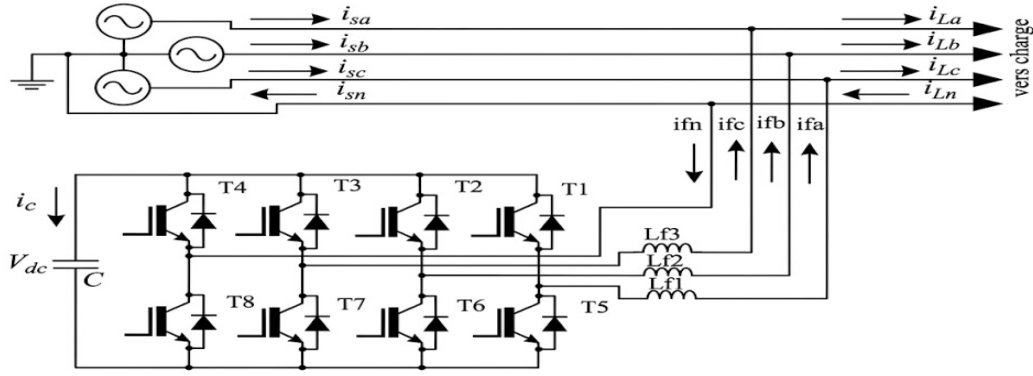


Figure 2.4 - Filtre actif parallèle à quatre bras pour un réseau triphasé à quatre bras.

Les états de commutation pour ce type d'onduleur sont présentés dans le tableau (2.2). Ils sont obtenus grâce aux expressions suivantes [20] :

$$V_{f1} = (T_1 - T_4)V_{dc} \quad 2.6$$

$$V_{f2} = (T_2 - T_4)V_{dc} \quad 2.7$$

$$V_{f3} = (T_3 - T_4)V_{dc} \quad 2.8$$

Et

$$i_{dc} = T_1 i_{fa} + T_2 i_{fb} + T_3 i_{fc} - T_{ifn} \quad 2.9$$

Tableau (2.2): Tensions générées par l'onduleur de tension à quatre bras.

k	T ₄	T ₃	T ₂	T ₁	V _{f3}	V _{f2}	V _{f1}
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	V _{dc}
2	0	0	1	0	0	V _{dc}	0
3	0	0	1	1	0	V _{dc}	V _{dc}
4	0	1	0	0	V _{dc}	0	0
5	0	1	0	1	V _{dc}	0	V _{dc}
6	0	1	1	0	V _{dc}	V _{dc}	0
7	0	1	1	1	V _{dc}	V _{dc}	V _{dc}
8	1	0	0	0	-V _{dc}	-V _{dc}	-V _{dc}
9	1	0	0	1	-V _{dc}	-V _{dc}	0
10	1	0	1	0	-V _{dc}	0	-V _{dc}
11	1	0	1	1	-V _{dc}	0	0
12	1	1	0	0	0	-V _{dc}	-V _{dc}
13	1	1	0	1	0	-V _{dc}	0
14	1	1	1	0	0	0	-V _{dc}
15	1	1	1	1	0	0	0

Tableau (2.3): différence entre 3 bras et 4 bras

<i>Critère de comparaison</i>	<i>FAP à 3 bras avec point milieu</i>	<i>FAP à 4 bras</i>
Structure (Configuration)	3 bras (6 interrupteurs) avec deux condensateurs en série formant un point milieu.	4 bras (8 interrupteurs), dont un bras supplémentaire dédié au conducteur neutre.
Type de charges	Adapté principalement aux charges triphasées relativement équilibrées.	Adapté aux charges monophasées, triphasées déséquilibrées et non linéaires.
Courant de neutre (I_n)	Compensation du courant de neutre via le point milieu des condensateurs, avec des performances limitées.	Compensation directe et efficace du courant de neutre grâce au quatrième bras.
Limites & Problèmes	Déséquilibre des tensions des condensateurs du bus continu et difficulté de contrôle en présence de fortes charges déséquilibrées.	Complexité de commande plus élevée et augmentation du nombre de composants de puissance.
Application en FAP	Utilisé dans les systèmes où le courant de neutre est faible et les charges sont quasi équilibrées.	Recommandé pour les réseaux triphasés à quatre fils comportant des charges non linéaires et déséquilibrées.

2.3 Filtre de couplage :

Le filtre entre l'onduleur et le réseau est appelé filtre de couplage, c'est un filtre passif de premier ordre qui est en réalité une simple inductance avec une résistance interne mais avec des spécificités au niveau de son circuit magnétique (introduction de noyaux en ferrites). Il a deux objectifs, le premier est de générer des courants harmoniques à partir de la différence des tensions entre la sortie du pont onduleur et le réseau [5]. A ce titre, l'inductance L_f intervient dans le command labilité du courant du filtre. Le deuxième est de réduire au point de

raccordement au réseau (PCC), l'amplitude des créneaux de tension générés. Ce filtre passif est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants :

- Assurer la dynamique du courant du filtre défini par :

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{di_h}{dt} \quad 2.10$$

Où i_f : Courant du filtre i_h : Courant harmonique de la charge

- Empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique [22][5].

Une petite valeur de l'inductance du filtre passif assure la dynamique du courant. Contrairement, une valeur relativement grande de celle-là empêche les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau. Une étude comparative entre 5 approches qui permettent de trouver la valeur de L_f est faite dans [5]. Dans ce qui suit on présente deux approches qui permettent de déterminer L_f . En négligeant la résistance de ce filtre de couplage on obtient :

$$\left(\frac{di_f}{dt}\right)_{\max} = \frac{V_{f\max} - V_{s\max}}{L_f} \quad 2.11$$

$V_{f\max}$: La valeur maximale de la tension à l'entrée de l'onduleur

$V_{s\max}$: La valeur maximale de la tension simple au point de raccordement du filtre.

Pour des petites variations du courant du filtre, on obtient :

$$\frac{\Delta i_f}{\Delta T} = \frac{V_{f\max} - V_{s\max}}{L_f} \quad 2.12$$

$\Delta T = 1/f_{ond}$: La période de variation du courant du filtre.

En supposant la variation maximale du courant du filtre égale à 25 % de la valeur maximale du courant du réseau, la valeur de l'inductance de couplage est donnée par [21][5] :

$$L_f = \frac{V_{f\max} - V_{s\max}}{0.25 I_{s\max} f_{ond}} \quad 2.13$$

Le dimensionnement de L_f peut être 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 :

$$\alpha = 4\varepsilon f_c \quad 2.14$$

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 :

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{0.5V_{dc} + V_{sm}}{L_f} \quad 2.15$$

D'où une valeur de L_f estimée à [5] [23][25] :

$$L_f = \frac{0.5V_{dc} + V_{sm}}{4\epsilon f_c} \quad 2.16$$

2.4 Système de stockage d'énergie

Le condensateur C_{dc} joue le rôle d'une source de tension continue. La tension à ses bornes V_{dc} est maintenue à une valeur quasi-constante grâce à la régulation. Le choix de la tension V_{dc} et de la capacité de condensateur C_{dc} affecte la dynamique et la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension V_{dc} élevée améliore la dynamique du filtre actif.

De plus, les ondulations de la tension continue V_{dc} causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de C_{dc} , peuvent dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle [26]. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. Ils doivent être faible d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs et d'autre part pour ne pas dégrader la performance du filtre actif [25]. Pour cette raison, on peut estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres du système de stockage. Différentes approches de détermination de la capacité du bus continue sont proposées dans [27][28][29][30].

Une de ces méthodes est basée sur le calcul de l'énergie fournie par le filtre actif et celle de la charge polluante. Elle est présentée dans ce qui suit [32].

La valeur efficace du courant de la charge coté alternatif dans les trois phases est :

$$\sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_d^2 d\omega t} = I_d \quad 2.17$$

où I_d représente le courant de charge cote continu. Le fondamental du courant de la charge est donné par :

$$I_{s1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_s = 0.9 I_d \quad 2.18$$

Les courants harmoniques produits par la charge représentent la différence entre le fondamentale et la valeur efficace du courant cote alternatif de la charge. Ces courants sont donné par :

$$\sum_{i=2}^{\infty} I_{si}^2 = I_s^2 - I_{s1}^2 = 0.43 I_s^2 \quad 2.19$$

Le filtre actif doit fournir la puissance correspondante aux harmoniques produite par la charge. En choisissant la période de l'ondulation de la tension aux bornes du condensateur six fois inférieure à celle de la tension du réseau électrique, on peut trouver :

$$C_{dc} \geq \frac{0.43 I_s^2}{6 f_s (V_{dcmax}^2 - V_{dcmin}^2)} \quad 2.20$$

f_s : la fréquence fondamentale du réseau électrique. On choisit un taux d'ondulation ΔV_{dc} acceptable, généralement de l'ordre de $2\%V_{dc}$.

Une autre méthode, plus simple, se base sur la mesure du courant harmonique I_h du rang le plus faible. La capacité C_{dc} se calcule de la façon suivante [26][33].

$$C_{dc} = \frac{I_h}{V_{dc}\Delta V_{dc}\omega_h} \quad 2.21$$

ω_h : la pulsation la plus faible des harmoniques à compenser.

Le tableau 2.3 suivant résume l'influence des paramètres L_f, C_{dc} et V_{dc} sur le comportement du FAP [29] :

Table 2.4 – Influence des paramètres sur le comportement du FAP

Paramètres	Objectifs	Problèmes
C_{dc}	Petit condensateur pour réduire le cout et les pertes (minimiser l'Energie pour charger le condensateur)	Une grande variation de V_{dc} pendant le régime transitoire
L_f	Une petite valeur pour obtenir une réponse rapide ($\frac{dif}{dt}$ grande)	Augmentation de la fréquence de commutation qui est limitée par certaine composante électronique. En plus on retrouve les harmoniques à haute fréquence du cote de la source
V_{dc}	Assez grande pour assurer la dynamique de compensation	Pertes élevées (pour une grande valeur de V_{dc} il faut apporter plus de puissance pour charger le condensateur)

2.5 Conclusion :

Ce chapitre a présenté une étude détaillée des filtres actifs parallèles, en se concentrant sur la structure de puissance et ses composants clés. La comparaison entre les onduleurs triphasés à 3 bras et à 4 bras a mis en évidence que le choix du convertisseur dépend des exigences spécifiques de l'application et du niveau de compensation souhaité. De plus, l'analyse du filtre de couplage et du système de stockage d'énergie a souligné leur rôle crucial dans la conception et le fonctionnement optimal des filtres actifs parallèles, contribuant ainsi à l'amélioration de la qualité de l'énergie et à la stabilité du réseau électrique. Cette étude constitue une base solide pour la suite de nos travaux sur la commande et la performance des filtres actifs parallèles.

Chapitre 3

*Etude de la partie
commande du filtre actif
parallèle*

3.1 Introduction :

La performance d'un filtre actif de puissance dépend intrinsèquement de la précision et de la rapidité de sa structure de commande. Ce chapitre est dédié à l'étude des stratégies de contrôle permettant d'assurer une compensation optimale des perturbations harmoniques. Dans un premier temps, nous aborderons l'étape cruciale de la détermination des courants de référence adaptée aux systèmes à quatre fils. Par la suite, nous analyserons les mécanismes de génération des signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur.

3.2 Détermination des courants de référence :

La charge polluante absorbe un courant constitué d'une composante fondamentale et de composantes harmoniques. Le but du filtrage actif est la génération de courants harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase avec ceux absorbés par la charge. Ainsi, le courant absorbé au réseau sera sinusoïdal. Il est nécessaire d'identifier avec précision les courants harmoniques de la charge polluante.

Le choix de la méthode utilisée pour isoler la composante harmonique du courant de charge est un facteur déterminant quant aux performances obtenues par le filtre actif (précision, dynamique, ...) [3].

3.2.1 Présentation de la méthode de puissances instantanées pour un filtre à quatre fils :

Cette méthode introduite par [26], exploite la transformation de Concordia des tensions simples et des courants de ligne, afin de calculer les puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées. Elle permet de transformer la composante fondamentale en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. Cette transformation est nécessaire si on veut éliminer facilement la composante continue. Le principe de cette méthode est énoncé ci-dessous.

Soient respectivement les tensions simples et les courants de ligne d'un système triphasé avec neutre, $v_{sa}(t)$, $v_{sb}(t)$, $v_{sc}(t)$ et $i_{sa}(t)$, $i_{sb}(t)$, $i_{sc}(t)$. La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé des axes abc aux axes $\alpha\beta 0$, comme le montre les deux relations suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad 3.1$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad 3.2$$

La transformation de Concordia est définie par :

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad 3.3$$

Après isolation des composantes fondamentales en tension notées $\bar{v}_\alpha \bar{v}_\beta$ par un PLL, les puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées sont données par la matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ p_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{v}_\alpha & \bar{v}_\beta & 0 \\ -\bar{v}_\beta & \bar{v}_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & \bar{v}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad 3.4$$

Les puissances instantanées peuvent s'écrire de la façon suivante :

$$P = \bar{p} + \tilde{p} \quad 3.5$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad 3.6$$

$$p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0 \quad 3.7$$

$\bar{p}, \bar{q}$ et $\bar{p}_0$: Composantes continues des puissances instantanées.

$\tilde{p}, \tilde{q}$ et $\tilde{p}_0$: Composantes alternatives des puissances instantanées.

A l'aide d'un filtre passe bas avec une boucle de retour ou d'un filtre passe haut, on peut éliminer de p et de q une (des) partie (s) selon les objectifs de la compensation montrés au tableau 3.1 suivant.

Tableau (3.1): Les modes de compensation de la commande des puissances instantanées.

Paramètre à compenser	Paramètre de contrôle
Courant harmonique	$p = \tilde{p}$ et $q = \tilde{q}$
Énergie réactive	$p = 0$ et $p = \bar{q}$
Courant harmonique + énergie réactive	$p = \tilde{p}$ et $q = q$

Pour la compensation du courant dans le neutre, le courant homopolaire i_0 est utilisé directement comme référence sans passer par le calcul de la puissance homopolaire et donc l'isolation de la composante fondamentale de la tension homopolaire pour le calcul de la puissance homopolaire n'est pas nécessaire dans cette variante de la méthode des PIRI.

Après extraction de $\tilde{p}$ par un FPB avec une boucle de retour, Les composantes du courant $i_{f\alpha\beta}^*$ sont alors définies par :

$$i_{f\alpha}^* = \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\alpha^2 + \bar{v}_\beta^2} \tilde{p} - \frac{\bar{v}_\beta}{\bar{v}_\alpha^2 + \bar{v}_\beta^2} q \quad 3.8$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} i_{fa}^* \\ i_{fb}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{\bar{v}_\alpha^2 + \bar{v}_\beta^2} \begin{bmatrix} \bar{v}_\alpha & -\bar{v}_\beta \\ \bar{v}_\beta & \bar{v}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q \end{bmatrix} \quad 3.9$$

Soit :

$$i_{f\alpha}^* = \frac{\bar{v}_\alpha}{\bar{v}_\alpha^2 + \bar{v}_\beta^2} \tilde{p} - \frac{\bar{v}_\beta}{\bar{v}_\alpha^2 + \bar{v}_\beta^2} q \quad 3.10$$

$$i_{f\beta}^* = \frac{\bar{v}_\alpha}{\bar{v}_\alpha^2 + \bar{v}_\beta^2} \tilde{p} + \frac{\bar{v}_\beta}{\bar{v}_\alpha^2 + \bar{v}_\beta^2} q \quad 3.11$$

$i_{f\alpha}^*$ et $i_{f\beta}^*$ sont les courants de référence dans le repère de Concordia. On remarque dans les expressions de ces derniers l'absence du courant homopolaire. On prend pour l'homopolaire :

$$i_{f0}^* = i_0$$

Maintenant, il est aisé de remonter aux courants de référence par la transformation inverse de Concordia [33] [3]. La figure 3.1 illustre l'algorithme d'identification.

$$\begin{bmatrix} i_{fa}^* \\ i_{fb}^* \\ i_{fc}^* \end{bmatrix} = C^{-1} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^* \\ i_{f\beta}^* \\ i_{f0}^* \end{bmatrix} \quad 3.12$$

$$C^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad 3.13$$

■

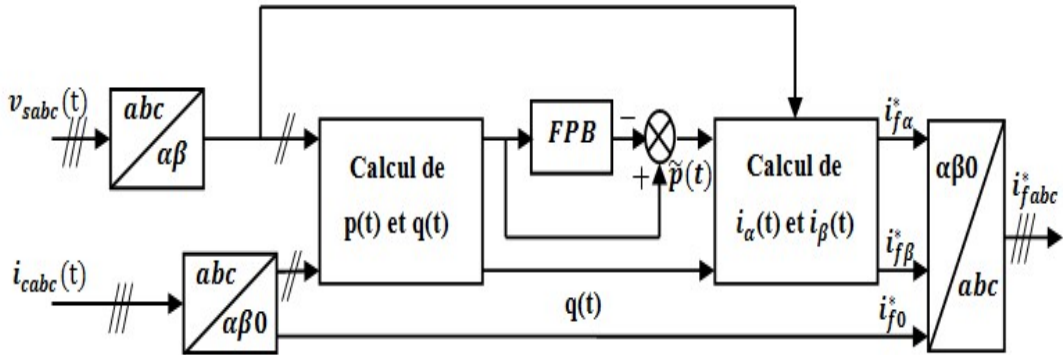


Figure 3.1 - Identification par la méthode des puissances instantanées.

3.2.2 Méthode de référentiel synchrone :

La méthode de référentiel synchrone, est appelée aussi méthode des courants instantanés d et q. Elle permet d'obtenir des meilleures performances même si la tension du réseau est perturbée ou déséquilibrée. La figure 3.2 représente le schéma de principe de cette méthode.

Dans cette méthode les courants de la charge sont transformés dans le repère $\alpha\beta 0$ de Concordia avec la transformation C de l'équation 3.2, puis dans le repère dq de Park $P(\theta)$ de l'équation 3.14 pour obtenir $i_d(t)$ et $i_q(t)$.

$$P(\theta) = \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & \cos(\theta) \\ \cos(\theta) & \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad 3.14$$

$\theta = \omega t$ représente la position angulaire du repère tournant qui est une fonction linéaire de la pulsation angulaire. Ce repère de référence tourne à une vitesse constante en synchronisme avec les tensions triphasées [36]. Le courant dans ce repère peut être exprimé de la façon suivante :

$$i_d(t) = i_{dh}(t) + i_{df}(t)$$

$$i_q(t) = i_{qh}(t) + i_{qf}(t)$$

$i_{df}(t)$ et $i_{qf}(t)$ représentent successivement le courant fondamental actif et le courant fondamental réactif dans le repère dq, $i_{dh}(t)$ et $i_{qh}(t)$ représentent successivement les courants harmoniques sur l'axe d et l'axe q dans le même repère. Le courant de référence $i_{dh}(t)$ sera extrait dans ce repère l'aide d'un FPB avec une boucle de retour.

Avec la transformation inverse de Park $P^{-1}(\omega t)$ appliquée sur i_{dh} et i_q on obtient les courants $i_{f\alpha}$ et $i_{f\beta}$. Ensuite la transformation inverse de Concordia C^{-1} est appliquée sur $i_{f\alpha}, i_{f\beta}$ et $i_{f0} = i_0$ pour retrouver les courants de référence i_{fa}, i_{fb} et i_{fc} dans le repère triphasé.

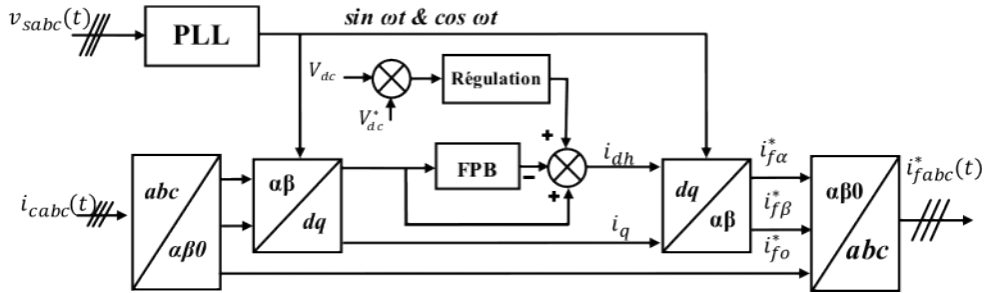


Figure 3.2 – Identification par la méthode de référentiel synchrone.

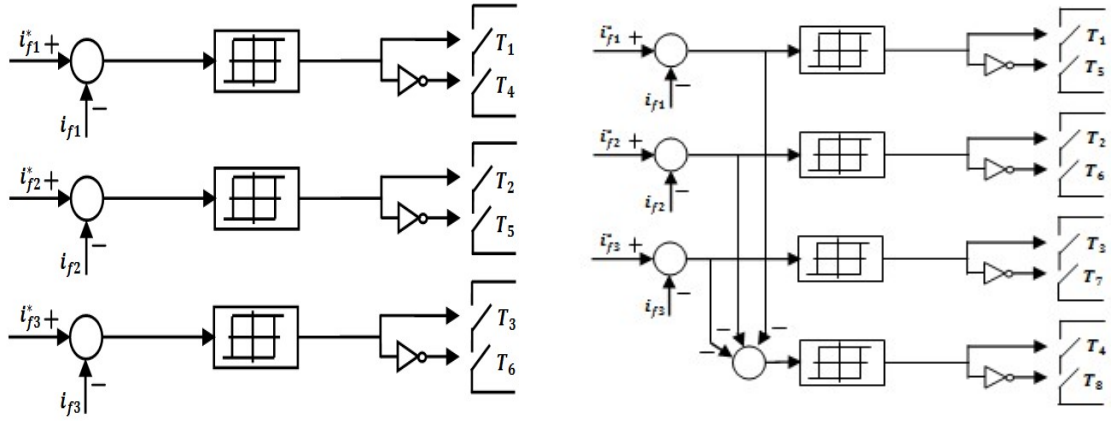
3.3 Contrôle de l'onduleur

3.3.1 Contrôle par hystérésis :

La commande conventionnelle par hystérésis, qui sera utilisée dans ce travail, est très couramment utilisée de par sa simplicité d'utilisation et sa robustesse. En fait, cette stratégie assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres.

La figure (3.3) expose son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence i_f^* et le courant produit par l'onduleur i_f .

Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs. Cette commande présente cependant un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation des semi-conducteurs, d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générés [3] [37].



(a) Cas d'un onduleur à trois bras avec condensateur à point milieu

(b) Cas d'un onduleur quater bras

Figure 3.3: Commande par hystérésis.

3.3.2 Control par MLI :

La technique de commande par Modulation de Largeur d'impulsion (MLI) 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 [38].

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette tension est ensuite comparée avec un signal en dent de scie (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs [38] [39].

La méthode MLI vectorielle est largement utilisée dans la commande des onduleurs, elle peut augmenter la valeur maximale de la tension de sortie de l'onduleur avec un taux de distorsion harmonique réduit par rapport à ceux obtenus par la méthode MLI sinusoïdale. Il y a plusieurs algorithmes utilisant la MLI vectorielle pour commander l'onduleur. Le but de toutes les stratégies de modulation est de réduire les pertes de commutation et les harmoniques, et d'assurer une commande précise [40].

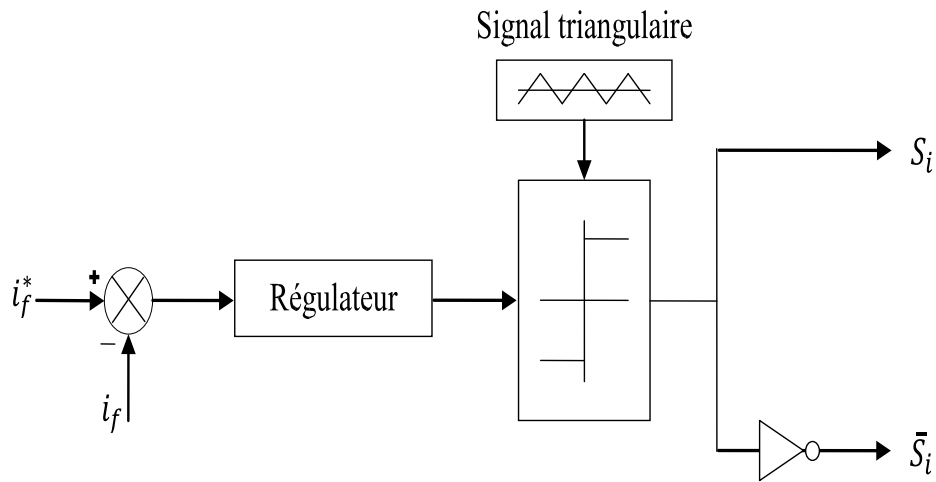


Figure 3.4 – Commande du courant par MLI.

3.4 Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de définir l'architecture de commande nécessaire au bon fonctionnement du filtre actif. L'application de la méthode de référentiel synchrone et la méthode puissances instantanées, même dans des conditions de déséquilibre de charge. De plus, l'étude des techniques de commutation a mis en évidence les avantages respectifs des commandes par hystérésis et par MLI. Alors que la première offre une dynamique de réponse rapide, la seconde permet une meilleure gestion des pertes par commutation. Ces fondements théoriques constituent l'étape préalable indispensable à la phase de validation par simulation, qui fera l'objet du chapitre suivant, afin d'évaluer les performances globales du système en termes de réduction du taux de distorsion harmonique (THD).

Chapitre 4

Simulations et Interprétations des Résultats

4.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous proposons d'étudier la simulation de l'ensemble du système comprenant le réseau électrique, les charges polluantes, les redresseurs triphasés ainsi que le filtre actif parallèle à quatre bras sous l'environnement Matlab/Simulink. Les résultats obtenus à partir des simulations seront ensuite présentés et interprétés afin d'évaluer les performances du système étudié.

4.2 Schémas de simulation :

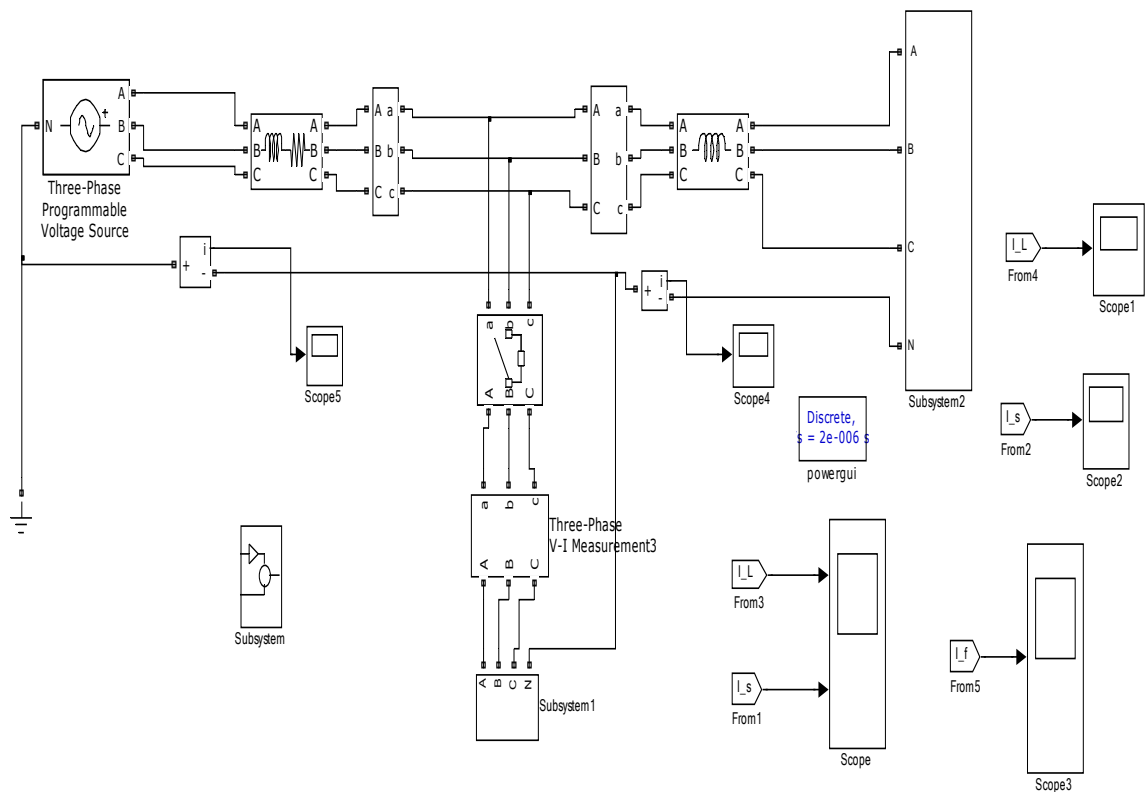


Figure 4.1 – Schéma de FAP à quatre fils avec un onduleur à quatre bras sous Matlab-Simulink.

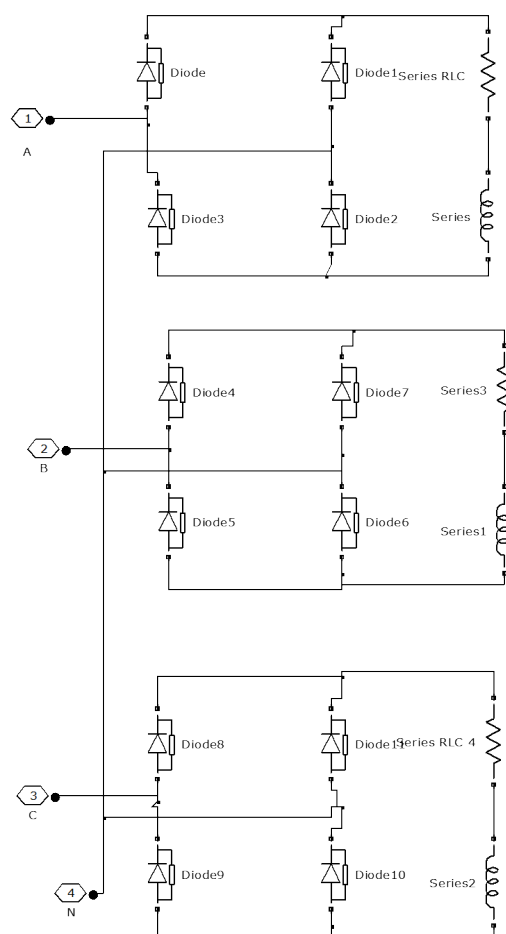


Figure 4.2 – charges triphasées non linéaire sous Matlab- Simulink.

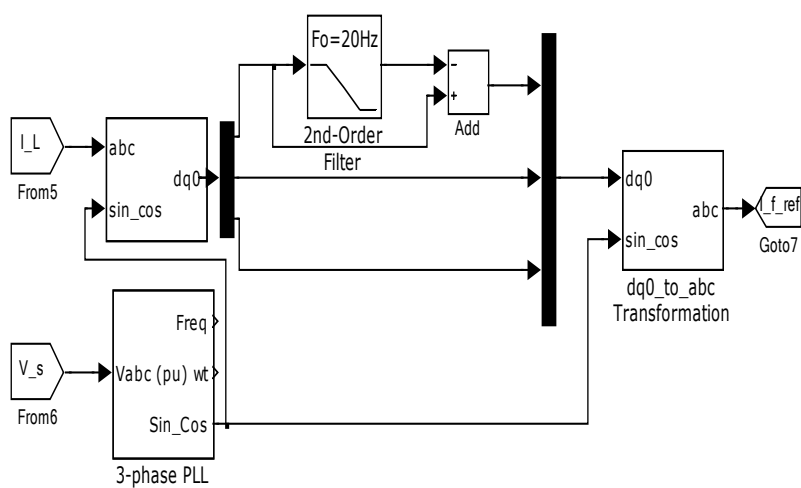


Figure 4.3 – Identification par la méthode de référentiel synchrone sous Matlab- Simulink.

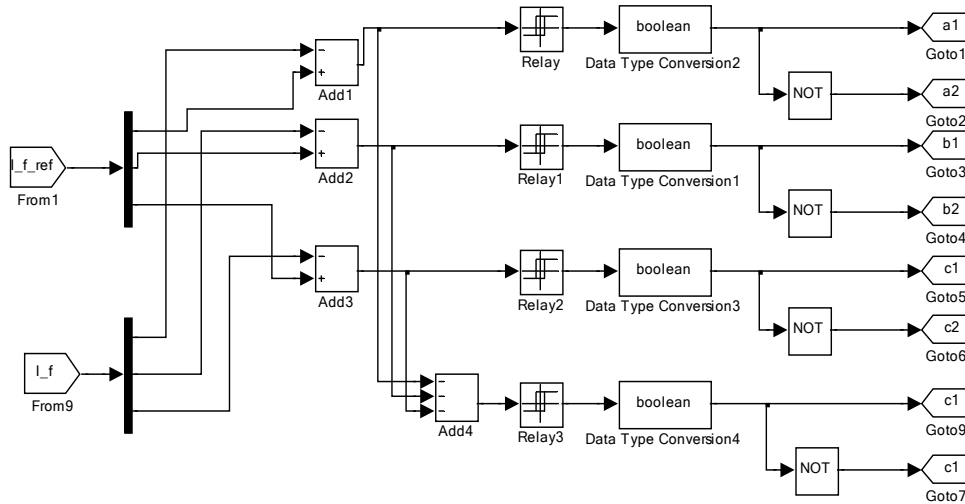


Figure 4.4 – commande par hystérésis sous Matlab- Simulink.

4.3. Paramètres de la simulation

Pour simuler le modèle de l'association filtre actif-réseau-charge polluante de la figure (4.1) sous Matlab-Simulink, on a utilisé les paramètres suivants :

Tab (4.1) : Paramètres du système étudié.

E [V]	f [Hz]	L_s [mH]	R_s [Ω]	L_c [mh]	L_f [mh]	V_{dc} (V)
$400/\sqrt{3}$	50	0.1	0.1	1	3	400

Pour les charges de la (Figure 4.2), nous étudions les deux cas suivants :

- Cas où les trois charges sont identiques : $R_{d1} = R_{d2} = R_{d3} = 20\Omega$; $L_{d1} = L_{d2} = L_{d3} = 50\text{mH}$.
- Cas où les trois charges sont différentes : $R_{d1} = 10\Omega$, $R_{d2} = 20\Omega$, $R_{d3} = 30\Omega$; $L_{d1} = L_{d2} = L_{d3} = 50\text{mH}$

4.4 Résultats des simulations sous Matlab-Simulink :

Afin d'évaluer les performances du filtre actif parallèle (FAP) à quatre fils commandé par la méthode du référentiel synchrone (SRF) associée à une commande par hystérésis, plusieurs simulations ont été réalisées sous Matlab/Simulink dans le cas des charges équilibrées puis déséquilibrées. L'objectif principal est d'analyser l'efficacité du système dans la réduction des harmoniques, l'amélioration de la qualité du courant ainsi que la compensation du courant de neutre.

4.4.1. Cas de charge équilibrée :

Dans ce premier scénario, le système est soumis à des charges non linéaires équilibrées. Les résultats obtenus du côté charge sont présentés par les figures 4.5, 4.6 et 4.7.

Avant l'activation du filtre actif, le courant absorbé par la charge présente une forme fortement déformée en raison des harmoniques générées par les trois redresseurs monophasé non linéaires. La figure 4.6 met également en évidence la présence d'un courant de neutre résultant principalement des composantes harmoniques homopolaires. L'analyse fréquentielle illustrée par la figure 4.7 montre que le taux de distorsion harmonique total (THD) atteint 25.99 %, ce qui traduit une dégradation importante de la qualité du courant.

À l'instant ($t = 0.1s$), le filtre actif est mis en fonctionnement et commence à injecter les courants compensateurs nécessaires, comme le montre la figure 4.11. Après compensation, la figure 4.8 montre que le courant de source retrouve une forme quasi sinusoïdale. De plus, la figure 4.10 met en évidence une réduction significative du taux de distorsion harmonique total, lequel passe de 25.99 % à seulement 2.58 %.

Par ailleurs, la figure 4.9 montre que le courant de neutre côté source devient pratiquement nul après l'activation du filtre, ce qui confirme l'efficacité de l'onduleur à quatre bras dans la compensation des composantes homopolaires et l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique.

a- Les courbes coté charge :

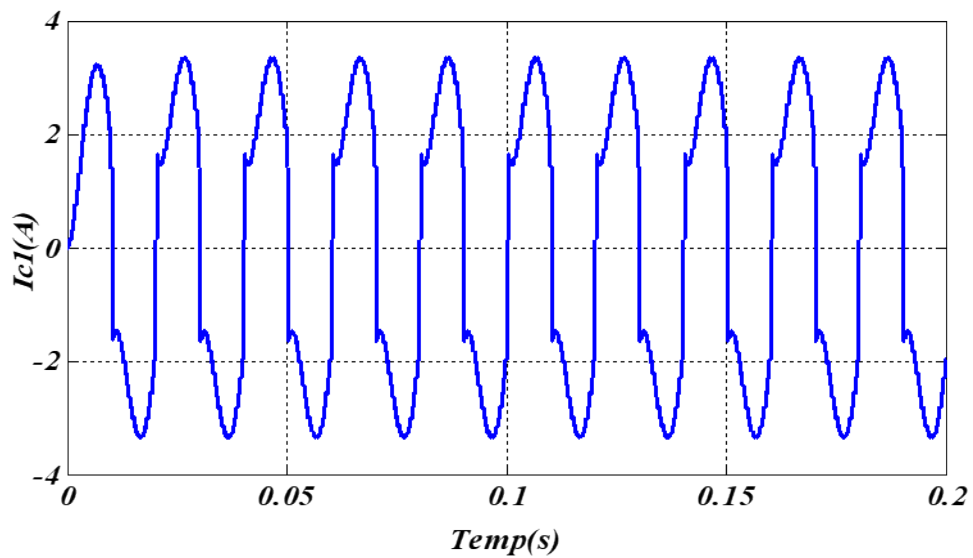


Figure 4.5: Courant de charge.

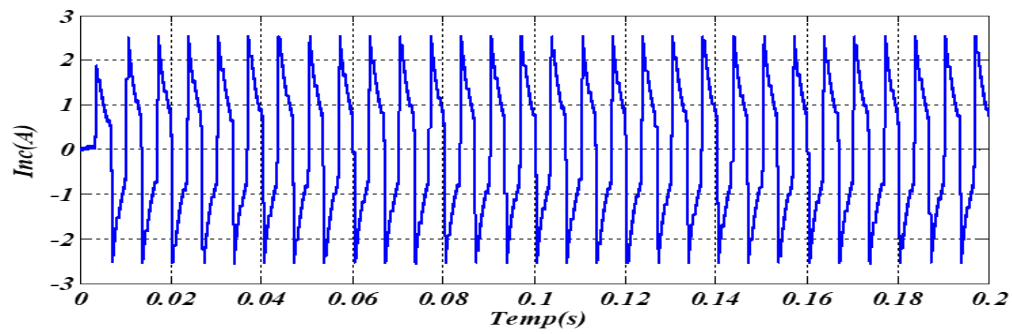


Figure 4.6: Courant de neutre cote charge.

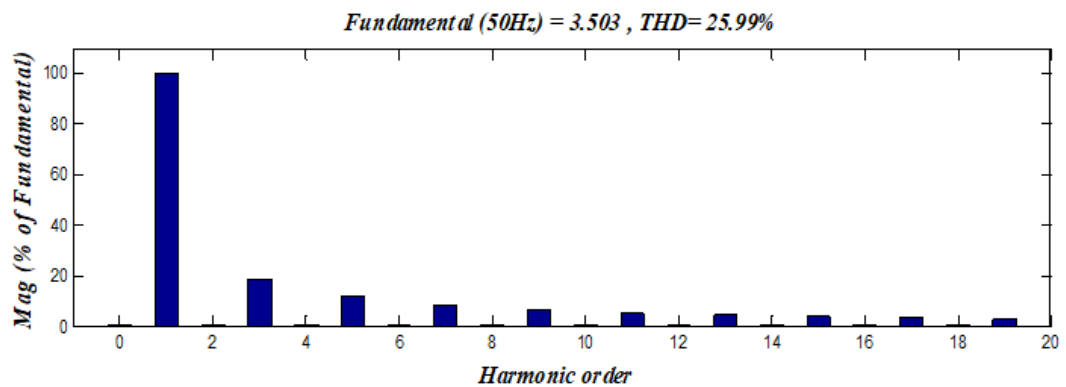


Figure 4.7: Spectre d'harmonique du courant de la charge.

b- Les courbes coûté source :

A l'instant ($t=0.1$ s) on injecte le courant de FAP.

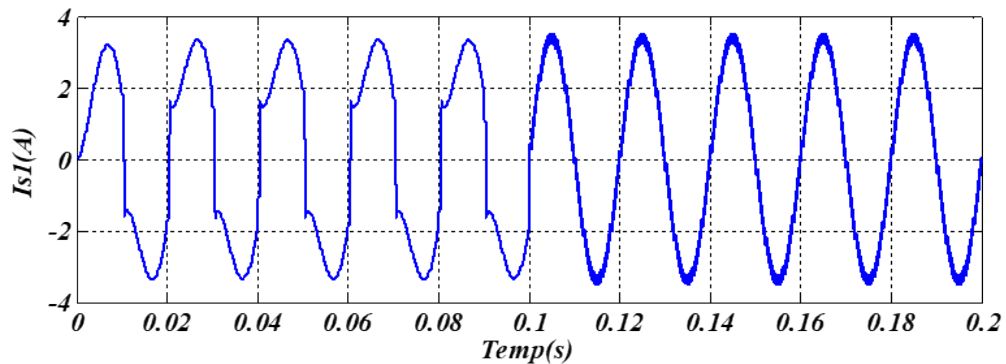


Figure 4.8: Courant de source.

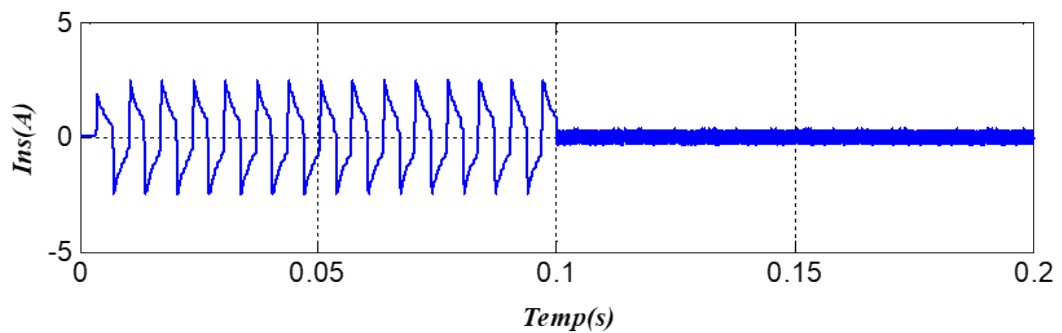


Figure 4.9: Courant de neutre cote source.

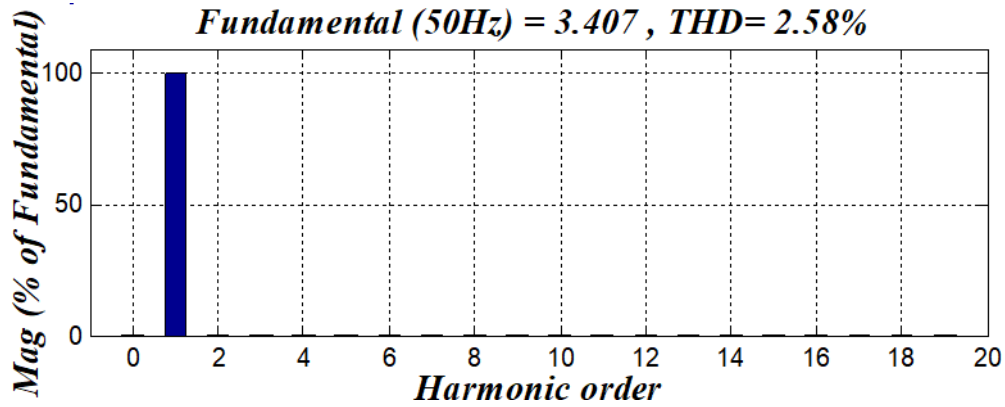


Figure 4.10: Spectre d'harmonique du courant de source après filtrage

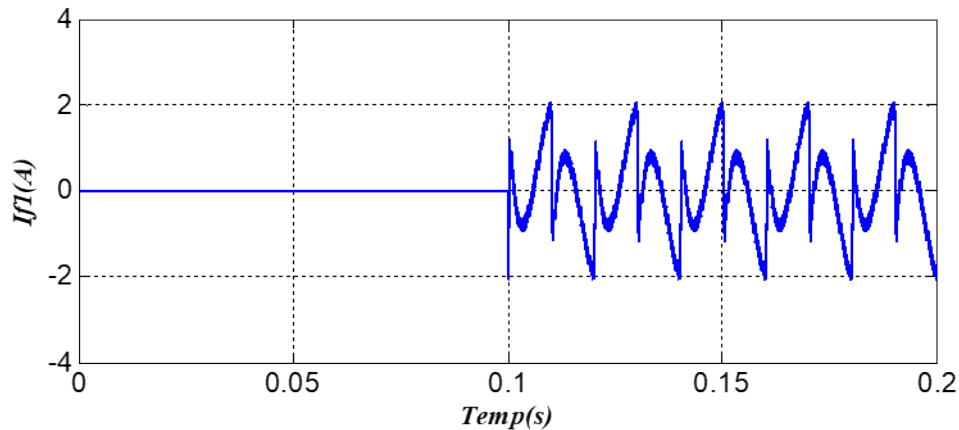


Figure 4.11 : Courant injecté par filtre.

4.4.2 Cas des charges déséquilibrées

Afin d'évaluer la robustesse du système dans des conditions de fonctionnement plus sévères, des charges non linéaires déséquilibrées ont été appliquées aux trois phases. Les résultats obtenus avant compensation sont présentés par les figures 4.12 à 4.16.

La figure 4.12 montre clairement le déséquilibre des courants de charge entre les trois phases. Les spectres harmoniques présentés par les figures 4.13, 4.14 et 4.15 révèlent des niveaux de distorsion harmonique différents selon les phases. Les valeurs du THD atteignent respectivement 33.38 % pour la phase 1, 25.99 % pour la phase 2 et 19.46 % pour la phase 3. Ces résultats mettent en évidence l'influence du déséquilibre des charges sur la qualité des courants absorbés par le réseau.

La figure 4.16 montre également la présence d'un courant de neutre important résultant de l'asymétrie des charges et de la présence des composantes harmoniques homopolaires.

Après l'activation du filtre actif à l'instant ($t = 0.1, s$), les courants de source deviennent pratiquement sinusoïdaux et équilibrés, comme l'illustre la figure 4.17. Les spectres harmoniques des figures 4.18, 4.19 et 4.20 montrent une amélioration remarquable de la qualité

du courant. Les valeurs du THD sont réduites à 2.25 % pour la phase 1, 2.27 % pour la phase 2 et 2.25 % pour la phase 3.

Les figures 4.21, 4.22 et 4.23 présentent les courants injectés par le filtre actif afin de compenser les composantes harmoniques et rétablir l'équilibre du système. Enfin, la figure 4.13 montre que le courant de neutre est pratiquement annulé après compensation, ce qui confirme l'efficacité de l'onduleur à quatre bras dans le traitement des réseaux triphasés à quatre fils soumis à des charges déséquilibrées.

a- Les courbes cote charge :

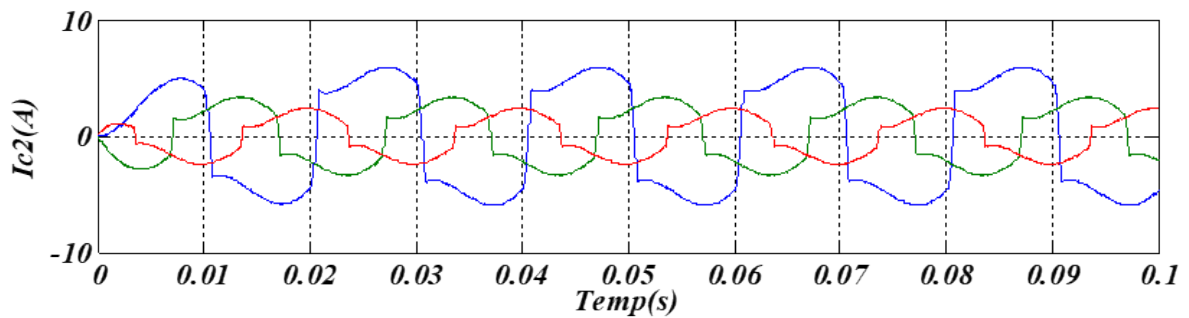


Figure 4.12: Courant de la charge (phase 1, 2, 3).

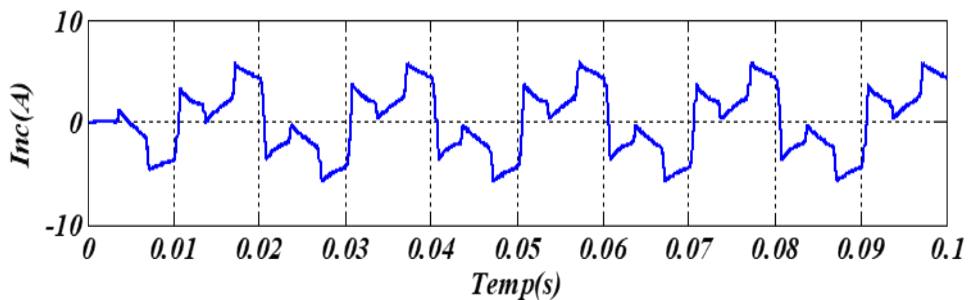


Figure 4.13: Courant du neutre cote charge.

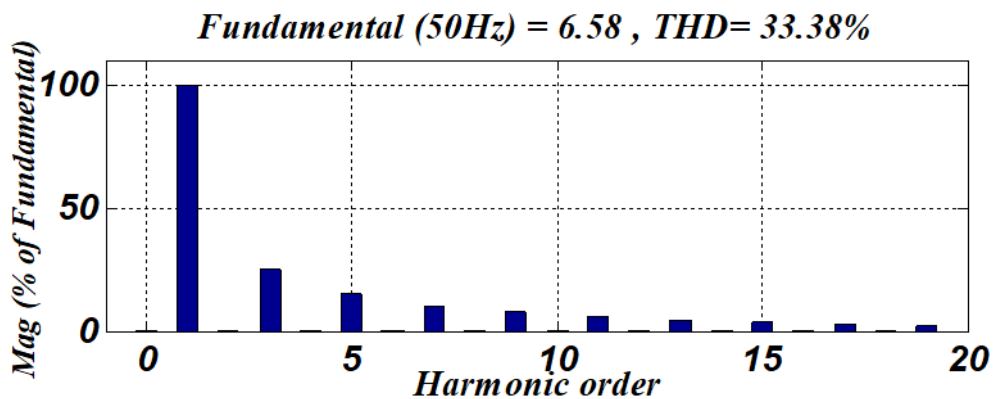


Figure 4.14: Spectre d'harmonique (phase 1 avant filtrage).

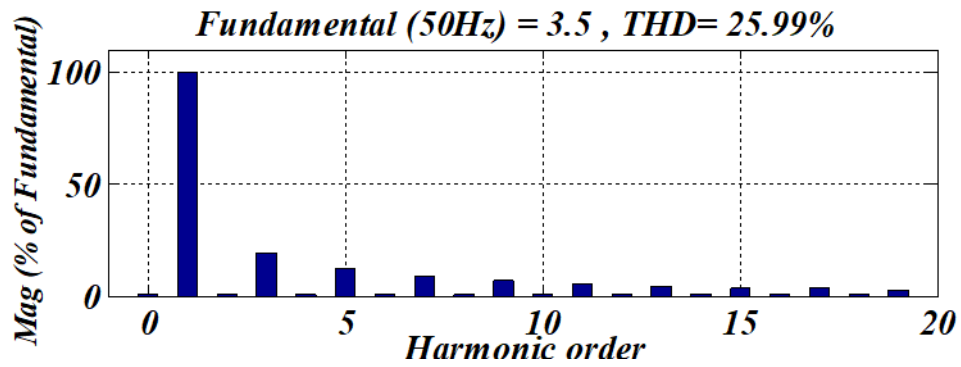


Figure 4.15 Spectre d'harmonique (phase 2 avant filtrage).

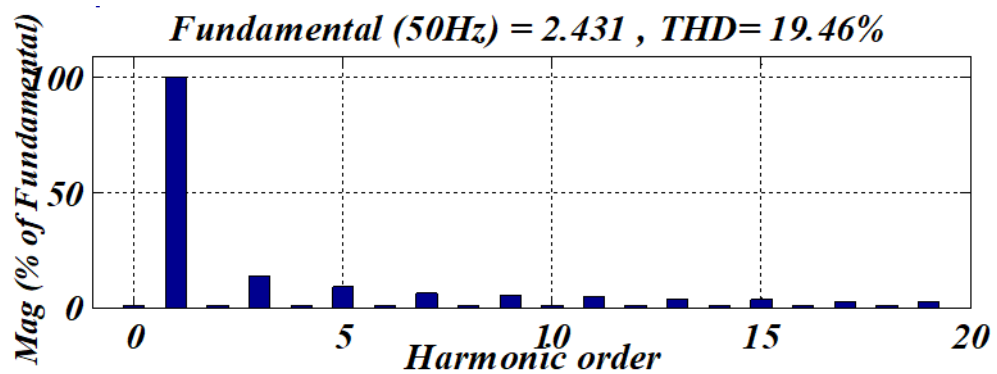


Figure 4.16: Spectre d'harmonique (phase 3 avant filtrage).

Fil neutre

b- Les courbes coûté source :

A l'instant ($t=0.1$ s) on injecte le courant de FAP.

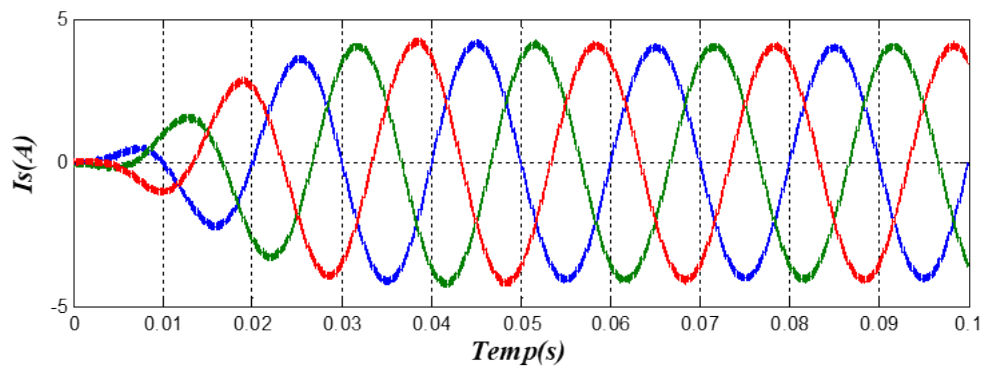


Figure 4.17: Courant de source (phase 1 ,2, 3).

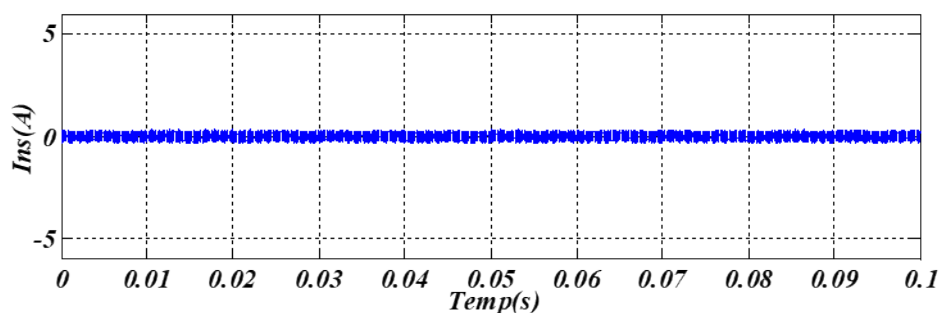


Figure 4.18: Courant de neutre (avant filtrage).

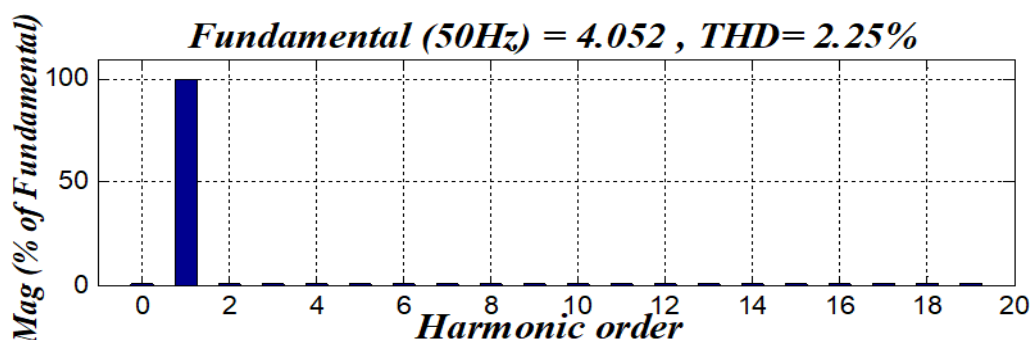


Figure 4.19: Spectre d'harmonique (phase 1 après filtrage).

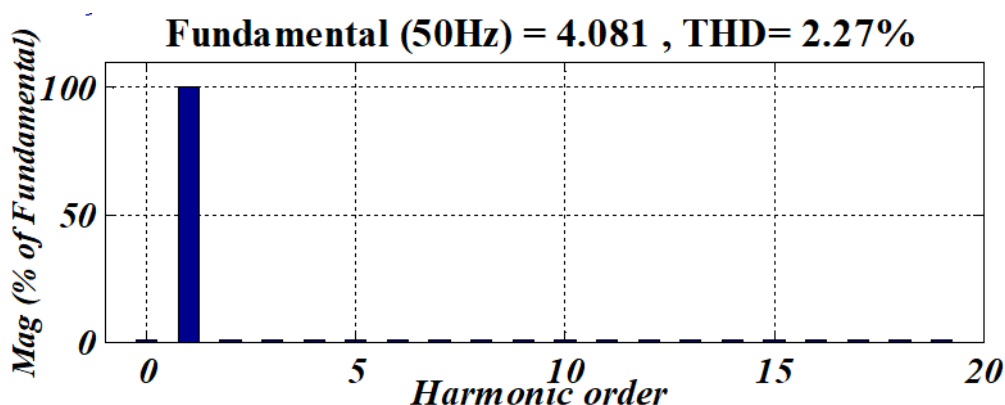


Figure 4.20: Spectre d'harmonique (phase 2 après filtrage).

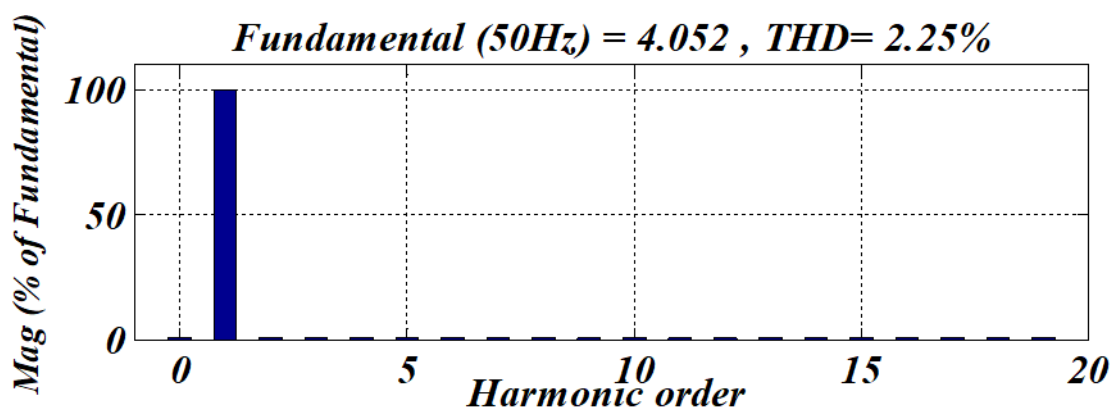


Figure 4.21: Spectre d'harmonique (phase 3 après filtrage).

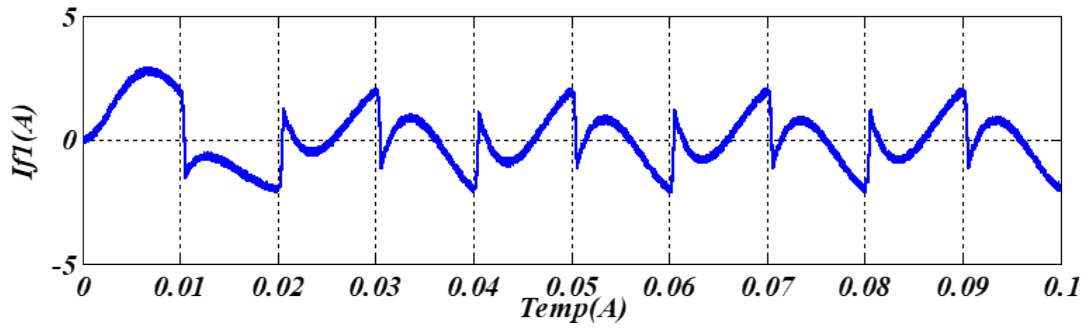


Figure 4.22 : Courant injecté par filtre (phase 1).

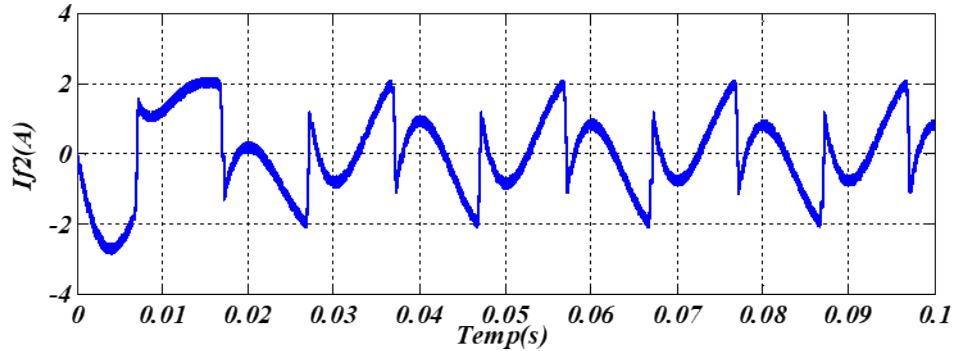


Figure 4.23 : Courant injecté par filtre (phase 2).

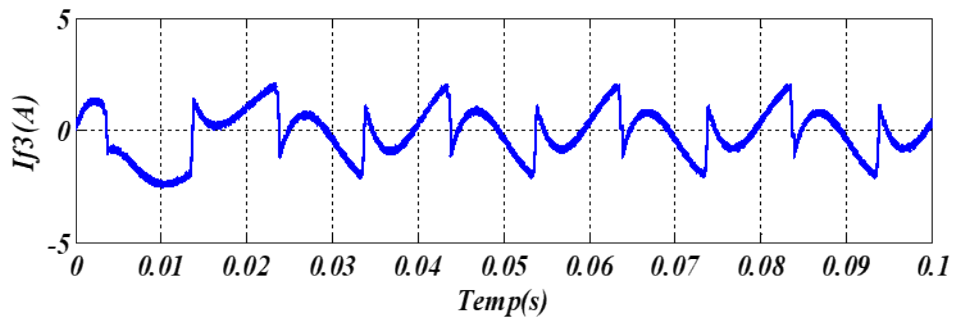


Figure 4.24 : Courant injecté par filtre (phase 3).

4.5 Conclusion :

Les résultats obtenus démontrent clairement l'efficacité du filtre actif parallèle à quatre fils dans l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique. Dans le cas des charges équilibrées, le THD a été réduit de 25.99 % à 2.58 %. Dans le cas des charges déséquilibrées, les taux de distorsion harmonique ont été réduits respectivement de 33.38 %, 25.99 % et 19.46 % à 2.25 %, 2.27 % et 2.25 %. En outre, le courant de neutre a été pratiquement éliminé après compensation. Ces résultats confirment la performance de la stratégie de commande basée sur la méthode du référentiel synchrone (SRF) associée à la commande par hystérésis pour la compensation des harmoniques et l'amélioration de la qualité de l'énergie dans les réseaux triphasés à quatre fils.

Conclusion Générale

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés au problème de la pollution harmonique dans les réseaux électriques triphasés à quatre fils, provoquée principalement par l'utilisation croissante des charges non linéaires. Ces perturbations dégradent la qualité de l'énergie électrique, augmentent les pertes dans les installations et peuvent affecter le bon fonctionnement des équipements sensibles.

Afin de remédier à ces problèmes, nous avons étudié une solution basée sur l'utilisation d'un filtre actif parallèle à quatre fils commandés par un onduleur de tension à quatre bras. L'identification des courants de référence a été réalisée à l'aide de la méthode du référentiel synchrone (SRF), tandis que la génération des signaux de commande de l'onduleur a été assurée par la technique de contrôle par hystérésis.

Dans un premier temps, nous avons présenté les principales perturbations affectant la qualité de l'énergie électrique, notamment les harmoniques, leurs origines, leurs conséquences ainsi que les différentes solutions de dépollution existantes. Une comparaison entre les filtres passifs et les filtres actifs a montré la supériorité de ces derniers en termes de performances et d'adaptabilité.

Par la suite, nous avons étudié la structure de puissance du filtre actif parallèle à quatre fils en détaillant ses différents composants, à savoir l'onduleur de tension à quatre fils, le filtre de couplage et le système de stockage d'énergie. L'étude de la partie commande a ensuite permis de mettre en évidence les avantages de la méthode du référentiel synchrone associée à la commande par hystérésis pour la compensation des courants harmoniques.

Enfin, les simulations réalisées sous Matlab/Simulink ont permis d'évaluer les performances du système proposé dans deux situations différentes : le cas des charges équilibrées et celui des charges déséquilibrées. Les résultats obtenus ont montré une réduction significative du taux de distorsion harmonique des courants de source, une amélioration notable de leur forme d'onde ainsi qu'une compensation efficace du courant de neutre. Ces résultats confirment la robustesse et l'efficacité du filtre actif parallèle à quatre fils dans l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, même en présence de perturbations importantes et de déséquilibres de charge.

En perspective, ce travail peut être enrichi par l'étude et l'implémentation de techniques de commande plus avancées, telles que les commandes intelligentes basées sur la logique floue ou les réseaux de neurones, ainsi que par une validation expérimentale sur une plateforme temps réel afin de confirmer les performances obtenues en simulation.

Bibliographie

- 1 H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, « Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components », IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-20, No. 3, pp. 625–630, 1984
- 2 B. Singh, K. Al-Haddad and A. Chandra, « A Review of Active Filters for Power Quality Improvement », IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 46, No. 5, pp. 960–971, 1999.
- 3 .- G. Desquilbet, C. Foucher, P. Fauquembergues, « Statistique analyses of voltage dips », Notes EDF, 96NR00 102, 1995.
- 4 M.A.E. ALALI.« Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension ».Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur - Strasbourg I, 12 Sep 2002.
- 5 L. MORAN et J. DIXON « Power Electronics Handbook », Academic Press, Chapter 39 pp.136 ,2007.
- 6 - Dhombres, J. et Robert, J. B. « Fourier - Créateur de la physique- mathématique ». Editions Berlin, 1998.
- 7 - E. BETTEGA, J. N. FIORINA, « Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs », CT n° 183, Jan 2000.
- 8 L. ZELLOUMA « Contribution à l'étude du filtrage des harmoniques des réseaux de distribution à l'aide du filtre actif » Thèse de doctorat. Université badji mokhtar annaba, 2010.
- 9 T.Mahni « Stratégies de commande d'un filtre active parallèle à quater fils » mémoire de Magister en électrotechnique , Université de biskra -2017.
- 10 H. FARID, « Commande robuste d'un filtre active shunt à quatre file » Mémoire de magester , Université de batna 2008.
- 11 B. SINGH et K. AL-HADDAD « A Review of Active Filters for Power Quality Improvement ». IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 46, n° 5, p. 960-971, 1999.
- 12 H. AKAGI, « Active Harmonie Filters », IEEE, vol. 93, n°12, p. 2128-2141, 2005.
- 13 L. MRABET « Étude par simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des courants harmoniques génères par un pont redresseur triphasée ». Mémoire de magistère. L 'université Badji Mokhtar Annaba, 2000.
- 14 J.XU Filtrage Actif Parallèle des Harmoniques des Réseaux de Distribution d'Electricité». Thèse de doctorat, INPL, 1994.

- 15 M. C. BENHABIB, E. JACQUOT et S. SAADATE, "An Advanced Control Approach for a Shunt Active Power Filter," International Conference on Renewable Energy and Power Quality, Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique, Nancy, France, 2003.
- 16 G. SEOUGUIER et F. LABRIQUE, « La Conversion Continu Alternatif ». Tec et doc Lavoisier, Les convertisseurs de l'électronique de puissance, V. 4, 1989
- 17 A.HAMIDI « contribution à l'Etude du filtre hybrides de puissance Utilisé pour améliorer la qualité de l'énergie dans les réseau électrique de distribution » Thèse de doctorat ,Ecole de technologie supérieure –Québec, canada ,2010.
- 18 N.GHASSOULI et N.RAOUACHE «Application du filtrage actif parallèle sur une charge dynamique non linéaire», mémoire d'ingénieur d'état en génie électrotechnique Université de m'sila, 2007.
- 19 A. HAMIDI, « Contribution à l'étude du filtre hybrides de puissance utilisé pour améliorer la qualité de l'énergie dans les réseaux électrique de distribution », Thèse de doctorat, École de technologie supérieure, Québec, Canada, 2010.
- 20 T.Mahni, « Stratégies de commande d'un filtre active parallèle à quatre fils », Mémoire de Magister en électrotechnique, Université d'eloued, 2012.
- 21 Y. PAL et A. SWARUP, « A Review of Compensating Type Custom Power Devices for Power Quality Improvement », Conférence on Power System Technology and IEEE Power India Conférence (POWERCON), p. 1-8, 2008.
- 22 B.HOUARI, « Contrôle des Puissances Réactives et des Tension dans un Réseau de Transport au Moyen de Dispositifs FACTS (SVC) », Mémoire de magister, Université de Sidi BelAbbaes, 23 Janvier 2008.
- 23 H. KOUARA, « Application d'un Filtre Actif Série au Contrôle de la Tension d'un Réseau Basse Tension », Mémoire de magistère, Université de Batna, p. 5-8, 2006.
- 24 A.ELMITWALLY et A.S.ABDELKADER «Neural network Controlled three – phase Four Wire shunt active power filter ».Generation ,IEE Proceedings on transmission and Distribution , vol.147.n°2.p.87-92,2000.
- 25 D. NEKKAR, « Contribution à l'étude des stratégies de commande des filtres actifs triphasés », Mémoire de Magister, Université de Souk-Ahras, 2014.
- 26 F. MEKRI, « Étude et commande d'un filtre actif parallèle à structure de tension », Mémoire de Magister, Université d'Oran, 2001.
- 27 H. AKAGI, Y. KANAZAWA and A. NABAE, "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits," Proceedings of the 1983 International Power Electronics Conference, Tokyo, Japan, pp. 1375–1386, 1983.

- 28 A. LEVIN and K. S. NARENDRAN, "Control of Nonlinear Dynamical Systems using Neural Networks: Controllability and Stabilization," IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 4, No. 2, pp. 192–206, 1993.
- 29 M. C. BENHABIB, « Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension, modélisation, simulation et validation expérimentale de la commande », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, France, 2004.
- 30 R. GRINO and R. R. CARDPER, "Digital Répétitive Control of a Three-Phase Four-Wire Shunt Active Filter," IEEE Transactions on industriel Electronics, Vol. 54, No. 3, pp. 1495–1503, 2007.
- 31 A. GHAMRI, T. MAHNI, M. T. BENCHOUIA, K. SRAIRI et A. GOLEA, « Comparative study between different controllers used in three-phase four-wire shunt active filter », Energy Procedia, Vol. 74, pp. 807–816, Août 2015.
- 32 F. HAMOUDI, « Commande robuste d'un filtre actif shunt à quatre fils », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2008.
- 33 M. AL ALALI, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg I, 2002.
- 34 A.HAMIDI,S.RAHMANI and K.AI-HADAD « follow ,A New Hybrida Séries Active filtre configuration to composte voltage sag , swell ,voltage and curant harmoniques and Reactive power»,IEEE International symposium on Industriel Electronics (ISIE 2009)Seoul Olympic Parktel, Seoul , Korea,2009.
- 35 f. FORNANI, R. PROCOPIO and H. J. BOLLEN, « SSC Compensation Capability of Unbalanced Voltage Sags », IEEE Transaction on Power Delivery, Vol 20, N°03, p 2030-2037, July 2005.
- 36 S. BARKAT. « Modélisation et Commande d'un Onduleur `a Sept Niveaux `a Diodes Flottantes ». Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger,2008
- 37 I. EXEBERRIA-OTADUI, « Evaluation of Différent Stratégies for Sériés Voltage Sag Compensation », IEEE, P. 1797-1802, 2002.
- 38 B. SINGH and K. AL-HADDAD, "A Review of Active Filters for Power Quality Improvement," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 46, No. 5, pp. 960–971, 1999.
- 39 G. ESCOBAR and G. A. A. VALDEZ, "A Model-Based Controller for a Three-Phase Four-Wire Shunt Active Filter with Compensation of the Neutral Line Current," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22, No. 6, pp. 2261–2270, 2007.

- 40 J. C. DAS, “Passive Filters—Potentialities and Limitations,” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 40, 2004.