

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME

MASTER EN GENIE ELECTRIQUE  
OPTION : **Commande des Systèmes Electriques(CSE)**

**THEME**

---

**Commande et diagnostic d'un filtre actif parallèle**

---

**Proposé par :**

Mr. BENYETTOU Lotfi

**Présenté par :**

AMROUNE Mourad

ANNEE UNIVERSITAIRE: 2015/2016

N<sup>0</sup> d'ordre :159

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي  
خَلَقَ الْمَوَدَّعَةَ  
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي  
خَلَقَ الْمَوَدَّعَةَ  
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي  
خَلَقَ الْمَوَدَّعَةَ

# Remerciements

*Nous rendons nos profondes gratitudee à Dieu le tout puissant qui nous a aidés à réaliser ce travail.*

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à mon encadreur Mr : Benyettou Lotfi pour avoir d'abord proposé ce thème, pour leur suivi continuuel tout au long de la réalisation de ce mémoire et qui n'ont pas cessé de nous donner leurs conseils.*

*Nous remercions tous les membres du jury qui acceptent de juger notre travail et pour l'intérêt qu'ils l'ont porté.*

*Un grand merci à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation sans exception.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mon regretté père*

*A ma mère*

*A ma femme*

*A mon fils Nouh*

*A mes frères et sœurs*

*A ma famille(AMROUNE)*

*Et Toutes mes amis tout avec son nom*

# Sommaire

REMERCIEMENTS.....	I
DEDICACES.....	II
NOTATIONS SYMBOLIQUES.....	III

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## Chapitre I

### Perturbation électrique

I .1 Introduction .....	3
I.2.1 Perturbations électriques et leurs origines.....	3
I.2.1.1 Creux et coupures de tension.....	3
I.2.1.2 Fluctuations de tension.....	4
I.2.1.3 Déséquilibre du système triphasé de tension.....	5
I.2.1.4 Variation de fréquence .....	5
I.2.1.5 Harmoniques et inter harmoniques .....	5
I .2.2 Perturbation harmonique .....	6
I.2.3 Sources des harmoniques .....	6
I.2.4 Effets des harmoniques .....	7
I.2.5 Conséquences néfastes des harmoniques .....	8
I.2.6 Caractérisation des perturbations harmoniques.....	8
I.2.6.1 Taux d'harmonique de rang h .....	8
I.2.6.2 Taux d'harmonique global de distorsion.....	8
I.2.6.3 Facteur de puissance .....	9
I.3 Solutions de dépollution du réseau électrique.....	10
I.3.1 Solutions traditionnelles de la dépollution .....	10
I.3.2 Solutions modernes de la dépollution .....	10
I.3.2.1 Filtres actifs .....	11
I.3.2.2 Filtre actif série .....	12
I.3.2.3 Filtre combiné parallèle-série (UPQC ) .....	12
I.3.2.4 Filtre actif série avec un filtre passif parallèle .....	13
I.3.2.5 Filtre actif parallèle .....	13
I.4 Applications des filtres actifs parallèles.....	16
I.5 Classement des filtres actifs parallèles.....	16
I .6 Conclusion .....	17

## Chapitre II

### Etude de la Structure et des Stratégies de Commande du Filtre Actif Parallèle à Deux Niveaux

II.1 Introduction .....	18
II.2 Structure de SAPF à deux niveaux .....	18
II.2.1 Onduleur de tension à deux niveaux.....	19
II.2.1.1. Structure générale.....	19
II.2.1.2. Tension générées par l'onduleur.....	19
II.2.1.3. Représentation vectorielle des tensions générées.....	21
II.3. Contrôle du SAPF à deux niveaux.....	21
II.3.1. Identification des courants harmoniques .....	22
II.3.1.1. Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées .....	22
II.3.1.2. Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées modifiée.....	26
II.3.1.2.1. Principe du FMV.....	26
II.3.1.2.2. Extraction des courants harmonique.....	27
II.3.2. Régulation de la tension continue.....	29
II.3.2.1. Principe de la régulation.....	29
II.3.2.2. Synthèse du régulateur de tension .....	30
II.3.3. Stratégie de commande de l'onduleur à deux niveaux.....	31
II.3.3.1. Commande par hystérésis.....	31
II.3.3.2. Commande par hystérésis modulée.....	32
II.3.3.3. Commande par MLI à échantillonnage naturel.....	32
II.3.3.4. MLI vectorielle .....	33
II.3.4. Régulation du courant du filtre .....	33
II.3.4.1. Principe de la régulation .....	34
II.3.4.2. Synthèse du régulateur du courant.....	35
II.4. Résultats de simulation de l'ensemble réseau charge non-linéaire avant le filtrage.....	36
II.4. 1.Résultats de simulation après le filtrage.....	37
II.4.1.1 .Commande par hystérésis.....	37
II.4.1. 2.Tensions de source sinusoïdales équilibrées.....	38

II.4.1.3. Commande par MLI .....	40
II.4.1. 4. Tensions de source sinusoïdales équilibrées .....	40
II.5. Conclusion .....	43

### *Chapitre III*

#### **diagnostic du filtre actif parallèle**

III.1 Introduction .....	44
III.2. Méthodes de diagnostic .....	45
III.2.1. Diagnostic Par les méthodes internes .....	45
III .2.1.1. La méthode du modèle .....	45
III .2.1.2. Redondance physique ou matérielle .....	45
III .2.1.3. Redondance analytique .....	45
III .2.2. Diagnostic Par les méthodes externes .....	46
III .2.2.1. Méthodes basées sur l'intelligence artificielle (IA) .....	46
III .2.2.1.1. Reconnaissances des formes (RDF) .....	46
III .2.2.1.2. Diagnostic par réseaux de neurones .....	47
III .2.2.1.3. Diagnostic par systèmes experts .....	48
III .2.2.1.4. Logique floue .....	48
III.3. Partie de simulation .....	49
III.3.1 Interprétation des résultats de simulation en état sain .....	51
III.3.2 Interprétation des résultats en état défaillant .....	59
III.3.3. Algorithme proposé pour le diagnostic .....	60
III.4. Conclusion .....	61
Conclusion générale .....	62
Annexe	
Bibliographie .....	63
Résumé	





## *Liste des symboles et abréviations*

### **Symboles**

$t$  : Le temps.

$f_s$  : Fréquence fondamentale du réseau.

$f_c$  : Fréquence de coupure du filtre d'extraction des harmoniques.

$e_{s\ 123}$  : Les tensions du réseau électrique.

$v_{s\ 123}$  : Les tensions du réseau électrique au point de raccordement du filtre actif.

$V_s\ \alpha\beta$  : Les tensions du réseau électrique au point de raccordement du filtre actif dans le repère stationnaire.

$V_s\ dq$  : Les tensions du réseau électrique au point de raccordement du filtre actif dans le repère synchrone.

$i_{s\ 123}$  : Les courants du réseau électrique.

$I_s\ \alpha\beta$  : Les courants du réseau électrique dans le repère stationnaire.

$I_s\ dq$  : Les courants du réseau électrique dans le repère synchrone.

$i_{f123}$  : Les courants du filtre actif.

$i_{f\alpha\beta}$  : Les courants du filtre actif dans le repère stationnaire.

$i_{fdq}$  : Les courants du filtre actif dans le repère synchrone.

$i_{c123}$  : Les courants de la charge.

$i_{c\alpha\beta}$  : Les courants de la charge dans le repère stationnaire.

$i_{cdq}$  : Les courants de la charge dans le repère synchrone.

$L_s$  : Inductance du réseau.

$R_s$  : Résistance du réseau.

$L_f$  : Inductance du filtre actif.

$R_f$  : Résistance du filtre actif.

$L_c$  : Inductance de la charge.

$R_c$  : Résistance de la charge.

$L_d$  : Inductance de la charge côté continue.

$R_d$  : Résistance de la charge côté continue.

$V_{dc}$  : Tension aux bornes du condensateur.

$V_{dc}^{ref}$  : Tension de référence du condensateur.

$C_{dc}$  : Capacité du condensateur.

$p_{dc}$  : Puissance obtenue à la sortie du régulateur de la tension continue.

$I_d$  : Courant redressé.

$p$  : Puissance active.

$q$  : Puissance réactive.

$D$  : Puissance déformante.

$S$  : Puissance apparente.

$X_h$  : La composante harmonique de rang  $h$ .

$S_{123}$  : Etats des interrupteurs de l'onduleur.

$k_{pdc}, k_{idc}$  : Les constants du régulateur PI de la tension continue.

$\zeta$  : Coefficient d'amortissement.

$\Omega_{cdc}$  : Pulsation de coupure du régulateur de la tension continue.

$P_f$  : Puissance de référence du filtre.

## **Abréviations**

PLL : (Phase locked loop)

THD : (Total harmonic distortion)

IGBT : (Insulated gate bipolar transistor)

GTO : (Gate turn off thyristor)

PWM: (Pulse width modulation)

MLI : Modulation de largeurs d'impulsions

UPQC : (Unified power quality conditioner)

F.P.B : Filtre passe-bas.

FAP : Filtre actif parallèle.

FAS : Filtre actif série.

F.P : Facteur de puissance.

PI: Régulateur proportionnel intégral.

# Introduction générale

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

Ces dispositifs sensibles, mais qui dégradent également la qualité de la tension, existent dans toutes les catégories d'utilisateurs telle que le domaine industriel par l'emploi de convertisseurs de l'électronique de puissance, le domaine tertiaire avec le développement de l'informatique et le domaine domestique par l'utilisation en grand nombre des téléviseurs, magnétoscopes, lampes à économie d'énergie, ...

Les harmoniques engendrés par ces charges circulent dans les réseaux électriques et peuvent perturber le fonctionnement normal de certains équipements électriques voire même engendrer leur destruction. Ces effets néfastes peuvent apparaître instantanément ou se produire en différé tant pour le distributeur que pour les utilisateurs. C'est pour ces raisons que le filtrage des distorsions en courant et en tension est au centre des préoccupations actuelles à la fois des fournisseurs et des utilisateurs d'énergie électrique; ils adoptent donc, les uns comme les autres.

Les filtres actifs parallèles (FAP) sont à ce jour les solutions avancées de dépollution les plus adéquats tant au niveau de la production que de la distribution. Leur réponse est instantanée et ils s'adaptent automatiquement aux évolutions des perturbations introduites par les charges du réseau électrique. Ils s'insèrent dans un réseau de distribution électrique sans imposer d'aménagement particulier.

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à introduire la structure de filtre actif parallèle à base d'onduleur deux niveaux, tout en réduisant le taux de distorsion harmonique et les brusques variations de la tension lors des commutations. Il est à signaler que la qualité et les performances de la compensation des harmoniques sont

étroitement liées à l'algorithme utilisé pour déterminer les grandeurs de référence. On présentera une solution efficace à la pollution des réseaux produite par des charges non linéaires.

Le travail présenté comporte trois 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 étudions théoriquement la topologie du filtre actif parallèle à deux niveaux et sa stratégie de commande. Nous exposons, notamment, la méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées pour identifier les courants de référence. Enfin, les deux méthodes de commande, à hystérésis et par MLI sont évaluées et comparées aux critères d'efficacité du filtrage actif.

**Le troisième chapitre** est consacré à citer les différentes méthodes de diagnostic des défauts des systèmes électriques, à la fin du chapitre on crée un défaut dans un transistor et regarder les résultats de simulation concernées à courants du filtre actif.

# *Chapitre I*

## *Perturbation électrique*

## Chapitre I : Perturbation électrique

### ***I.1.Introduction***

Depuis plusieurs années, les convertisseurs statiques (redresseurs, gradateurs) prolifèrent tant dans les équipements industriels que domestiques. Par exemple, ces dispositifs sont fréquemment employés dans la régulation de vitesse des moteurs à courant continu et alternatif. Ils sont également utilisés dans les variateurs de lumière, les régulations de systèmes de chauffage électrique et les variateurs de vitesse des moteurs universels (lave-linge, aspirateurs, outillages électroportatifs,...) [NAB07].

L'utilisation de ces convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique a considérablement contribué à améliorer les performances et l'efficacité de ces systèmes. En revanche, ils ont participé à détériorer la « qualité » du courant et de la tension des réseaux de distribution. En effet, ces systèmes consomment des courants non sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale : ils se comportent comme des générateurs de courants harmoniques. Par l'intermédiaire de l'impédance de court-circuit du réseau, les courants harmoniques déforment la tension de celui-ci.

Les déformations du courant et de la tension peuvent perturber le fonctionnement normal d'autres équipements électriques. C'est pourquoi, les distributeurs d'énergie ayant la contrainte de fournir une tension sinusoïdale, prennent en charge l'atténuation des perturbations harmoniques au moyen d'installations de forte puissance. Ainsi, le filtrage des composantes harmoniques est au centre des préoccupations des distributeurs d'une part et des utilisateurs d'énergie électrique d'autre part [NAB07].

Dans ce chapitre, nous allons présenter les sources des harmoniques, l'influence du raccordement des convertisseurs statiques sur les réseaux électriques et leurs environnements. Ensuite, nous présentons les solutions classiquement mises en œuvre pour dépolluer les réseaux électriques [NAB07],[GHA11].

**I.2.1 Perturbations électriques et leurs origines:** Les perturbations électriques affectant l'un des quatre paramètres cités ultérieurement 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 et, la présence d'harmoniques et/ou d'inter-harmoniques [ALA02],[DJA05].

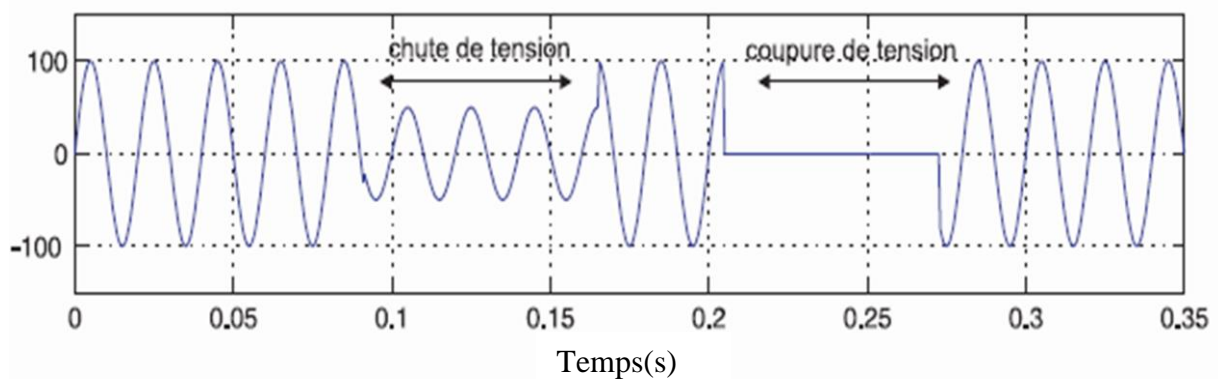
#### **I.2.1.1 Creux et coupures de tension**

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 100% et 90% de la tension nominale pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes.



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 quand a 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 (I.1) montre un exemple de creux et de coupure de tension [DJA05].

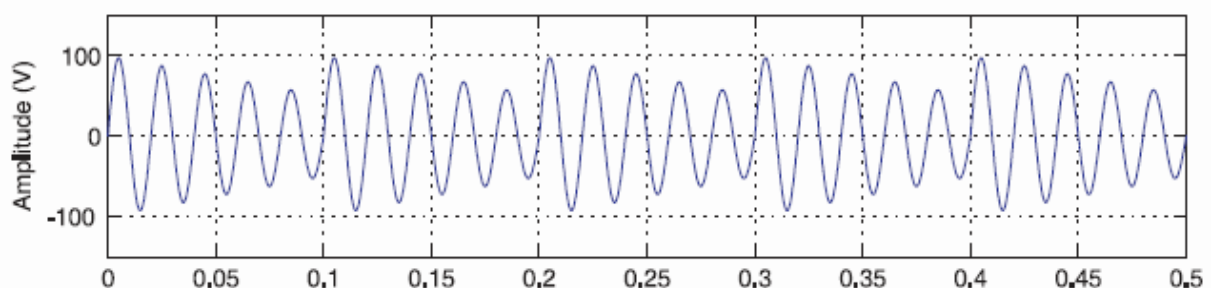


**Figure (I.1) :** Creux et coupures de tension.

### I.2.1.2 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 archet des machines à souder. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant un gêne visuel 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 (I.2).



**Figure (I.2) :** Fluctuations de tension.

### I.2.1.3 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  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé, voir la figure (I.3).

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.

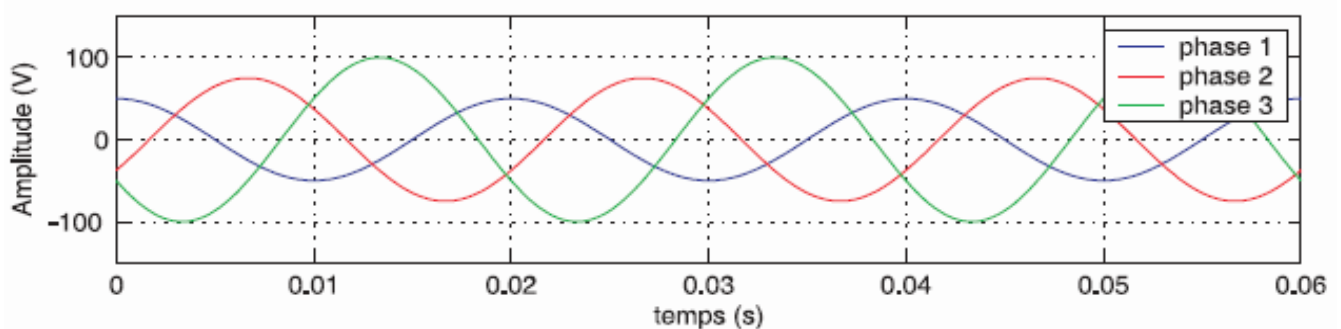


Figure (I.3) : Déséquilibre du système triphasé de tension.

### I.2.1.4 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, voir la figure (I.4). Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans les conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle  $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ .

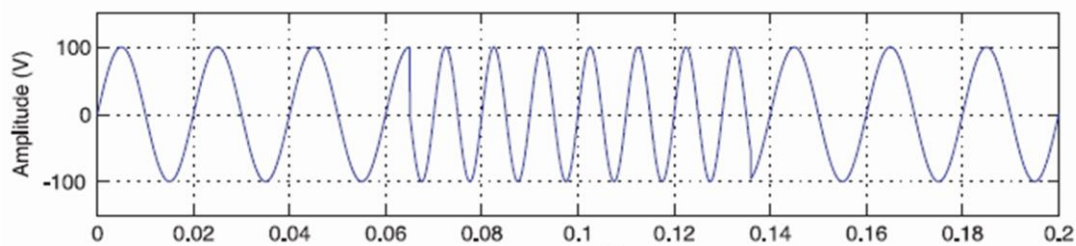


Figure (I.4) : Variation de la fréquence

### I.2.1.5 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 (I.5) montre la superposition de l'harmonique de rang 3 sur un courant fondamental de fréquence 50 Hz. La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipements de l'électronique de puissance à base de thyristors.

Les inter-harmoniques sont superposées à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples

entiers de la fréquence du réseau. L'apparition des inter-harmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle-commande [DJA05].

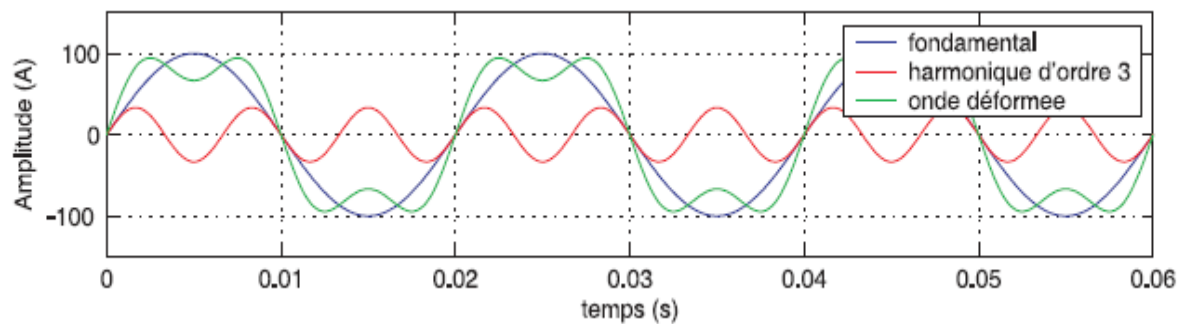


Figure (I.5) : Harmoniques

### I.2.2 Perturbations harmoniques

Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale à 50Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental. Le domaine de fréquence qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre l'harmonique 2 et celui du rang 40 [TAR05].

Mais on peut également observer des sous harmoniques ou des inters-harmoniques à des fréquences non multiples entières de la fréquence fondamentale.

### I.2.3 Sources des harmoniques

La cause principale des harmoniques est l'injection des courants non-sinusoïdaux par des charges non-linéaires, ainsi que les charges déséquilibrées branchées au réseau. Les onduleurs, les ponts redresseurs, les fours à arc et à induction, les variateurs de vitesse des machines électriques, les appareils domestiques tel que les téléviseurs et les lampes fluorescentes, et les alimentations à découpage représentent la majorité des sources d'émission des harmoniques [STE07]. Le tableau (I.1) montre quelques sources des harmoniques [NAB07].

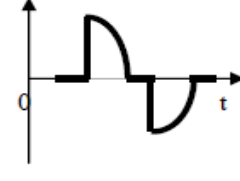
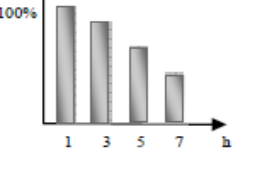
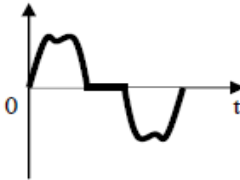
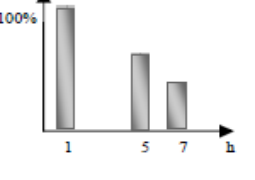
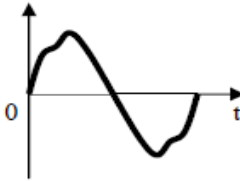
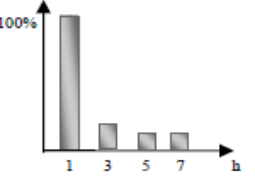
Type de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Spectre harmonique Correspondant
Gradateur monophasé	-Régulation de puissance de four à résistance. -Modulation de puissance des lampes halogènes.		
Redresseur triphasé à thyristor.	-Variateur de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs asynchrones.		
Moteur asynchrone	-Machines – Outils - Appareils électroménagers -Ascenseurs.		

Tableau (I.1) : Quelques sources des perturbations harmoniques.

### I.2.4 Effets des harmoniques

Les effets des harmoniques les plus connus et les plus spectaculaires sont la destruction des condensateurs ou des disjoncteurs sous l'effet des forts courants harmoniques amplifiés par des résonances. Un autre phénomène, de plus en plus rencontré, est l'échauffement des transformateurs et des conducteurs de neutre sous l'effet des courants harmoniques de rang 3 [MAD08].

- **Effets instantanés**

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

- **Effets à long terme**

- Une surcharge en courant provoque des échauffements supplémentaires donc un vieillissement prématuré des équipements;
- Echauffement des transformateurs et des alternateurs (par augmentation des pertes Joule, des pertes fer...);
- Fatigue mécanique (couples pulsatiles dans les machines asynchrones,...);

- Echauffement des récepteurs : des conducteurs de phases et du neutre par augmentation des pertes Joule et diélectriques;
- Destruction de matériels (condensateurs, disjoncteurs,...);
- Rayonnement électromagnétique perturbant les écrans (micro-ordinateurs, appareils de laboratoire...) [MAD08].

### I.2.5 Conséquences néfastes des harmoniques

Les courants et les tensions harmoniques ont des effets néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie de certains équipements électriques liés à la circulation des courants harmonique [ABD04] :

- **Lignes** : pertes ohmiques supplémentaires;
- **Transformateurs** : pertes supplémentaires dans les enroulements par effet joule et dans le noyau par courant de Foucault ;
- **Moteur à courant alternatif** : pertes supplémentaires dans le fer et les enroulements principalement liées aux harmoniques de tension;
- **Condensateur de puissance** : pertes diélectrique supplémentaires conduisant aux vieillissements rapide du condensateur;
- **Equipement de l'électronique de puissance** : dysfonctionnement lié à la déformation de la tension;
- **Ordinateurs** : trouble fonctionnels liés à la distorsion de la tension;
- **Lignes téléphoniques** : génération des bruits importants liés au couplage électromagnétique entre les lignes de puissance et les circuits de communication [MED08],[ABD04].

### I.2.6 Caractérisation des perturbations harmoniques

Le récepteur d'énergie se comporte comme une charge polluante, s'il absorbe des courants non-sinusoïdaux ou déséquilibrés ou consomme de l'énergie réactive . La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique défini pour la tension ou le courant par rapport à une onde sinusoïdale. Le facteur de puissance est utilisé généralement pour définir la consommation de l'énergie réactive [FAT01], [KAM10].

#### I.2.6.1 Taux d'harmonique de rang $h$

Taux d'harmonique de rang  $h$  est défini par :  $S_h = x_h / x_1$  (I.1)

ou,  $x_h$  : la composante harmonique de rang  $h$  et  $x_1$  : la composante fondamentale.

#### I.2.6.2 Taux d'harmonique global de distorsion

Le taux de distorsion global (Total Harmonic Distorsion : THD) est un paramètre qui définit globalement la déformation de la grandeur alternative :

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

Généralement, les harmoniques pris en compte dans un réseau électrique sont inférieurs à 2500Hz. Les harmoniques de fréquence plus élevée sont fortement atténuées par l'effet de peau et par la présence des inductances de ligne. De plus, les appareils générateurs d'harmoniques ont, en grande majorité, un spectre d'émission inférieur à 2500 Hz. C'est la raison pour laquelle le domaine d'étude des harmoniques s'étend généralement de 100 à 2500 Hz, c'est-à-dire des rangs 2 à 50.

### I.2.6.3 Facteur de puissance

Pour un signal sinusoïdal, le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active  $P$  et la puissance apparente  $S$ . Les équipements électriques sont dimensionnés généralement pour la tension et le courant nominaux. Un faible facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements [KAM10].

$$F.P = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (I.3)$$

Où  $Q$  représente la puissance réactive.

Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance Déformante  $D$  donnée par la relation (I.4) apparaît comme le montre le diagramme de Fresnel de la figure (I.6).

$$D = 3v \sqrt{\sum_{h=2}^{50} i_h^2} \quad (I.4)$$

Où,  $v$  représente la valeur efficace de la tension du réseau électrique.

Le facteur de puissance devient :

$$F.P = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \varphi_1 \cos \gamma \quad (I.5)$$

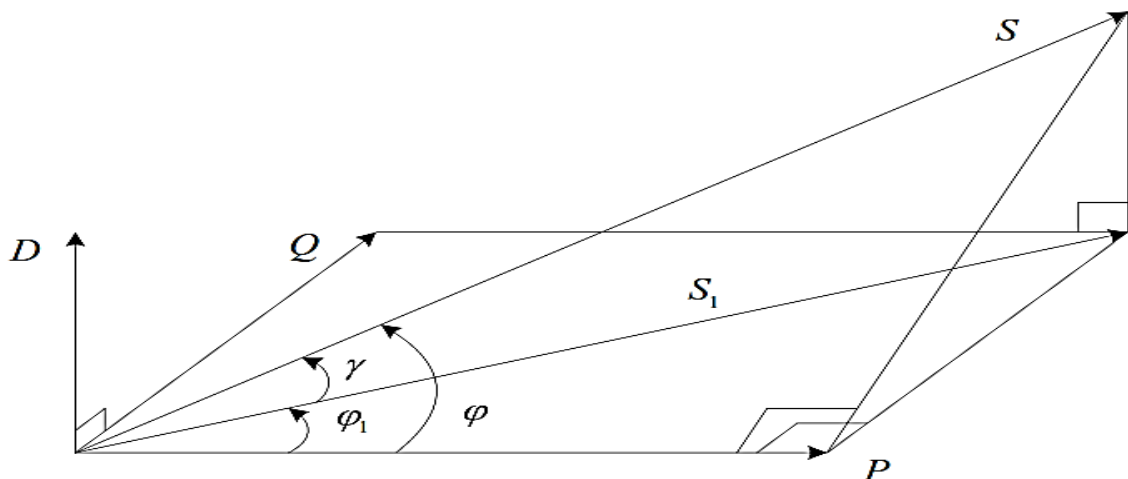


Figure (I.6) : Diagramme de Fresnel des puissances

$\Phi$  : Déphasage entre la puissance active et la puissance apparente  $S$ .

$\Phi_1$  : Déphasage entre la puissance active et la puissance apparente  $S$ .

$\gamma$  : Déphasage entre la puissance apparente dans le cas d'un système linéaire et celle-là dans le cas d'un système non-linéaire.

### I.3 Solutions de dépollution du réseau électrique

Afin de compenser les perturbations, deux groupes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne sont présentés [KAM10].

#### I.3.1 Solutions traditionnelles de la dépollution

Afin de dépolluer les réseaux électriques, plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature, dont le but est de limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques [ALA02]. On peut citer :

- L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation des convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique.
- L'utilisation de dispositif du filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par les charges non-linéaires.
- Le pont dodécaphasé : La structure dodécaphasée présente des caractéristiques très intéressantes par rapport à celle hexaphasée. Cependant, le nombre de semi-conducteurs utilisés et le transformateur à deux enroulements au secondaire rendent cette solution onéreuse.
- Les filtres passifs : La deuxième solution de dépollution consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs du filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti ou passe-haut.

Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients dont on peut citer :

- Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge ;
- Equipements volumineux ;
- Problème de résonance avec l'impédance du réseau.

#### I.3.2 Solutions modernes de la dépollution

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques. La deuxième raison fait suite à l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT.

Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à

compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques. Il existe trois topologies possibles de filtres actifs :

**a. Le filtre actif parallèle (FAP) :** conçu pour compenser les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive;

**b. Le filtre actif série (FAS) :** conçu pour compenser les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension;

**c. La combinaison parallèle-série actifs (UPQC) :** solution universelle pour compenser les perturbations en courant et en tension;

**d. Combinaison hybride active et passive :** afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association des filtres actifs de faibles puissances à des filtres passifs peut être une solution [MOH08],[ALA02],[KAM10].

### I.3.2.1 Filtres actifs

Les inconvénients inhérents aux filtres passifs (non adaptatif aux variations de la charge et du réseau, phénomène de résonance) et l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT, ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtres appelée filtres actifs de puissance (FAP).

Le but de ces filtres est de générer soit des courants [THI10], soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension du réseau soient rendus sinusoïdaux et parfois avec un facteur de puissance unitaire. Le filtre actif est connecté en série, en parallèle, en combinant ces deux dernières structures ensemble ou associé avec des filtres passifs en fonction des grandeurs électriques harmoniques (courants ou tensions) à compenser [THI10].

Les avantages de ces filtres actifs par rapport aux filtres passifs sont les suivants :

- Le volume physique du filtre est plus réduit ;
- La capacité de filtrage est supérieure ;
- La flexibilité et adaptabilité sont très supérieures.

Pourtant, ils présentent quelques inconvénients :

- Leur coût élevé a limité leur implantation dans l'industrie ;
- Les pertes sont plus élevées ;

Deux types de convertisseurs connus dans la littérature constituent l'APF : convertisseur à source de courant (CSI) ou à source de tension (VSI) [ABD10].

Bien que la première structure est suffisamment fiable, elle présente des pertes élevées et nécessite d'une importante et coûteuse inductance. De plus, elle ne peut être utilisée dans des applications multi-niveaux pour améliorer les performances avec un coût acceptable. Cependant, la deuxième structure en tension du FAP, où le bus continu est équipé d'un condensateur représentant l'élément de stockage, est sûrement la plus répandue car moins onéreuse, plus légère et extensible à



des applications multi-niveaux. Ainsi, pour la suite nous ne présentons que les différentes structures du FAP avec source de tension en entrée.

### I.3.2.2 Filtre actif série

Le but du filtre actif série est de créer une impédance en série avec le réseau qui sera nulle pour le fondamental et de valeur élevée pour les harmoniques. Il est destiné à protéger les installations sensibles aux perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques en tension, les surtensions, déséquilibres et creux détensions. En revanche, le filtrage série ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge. En plus, ce filtre nécessite une protection complexe contre les court-circuit des réseaux. En effet, lors d'un court-circuit côté réseau, ce dernier peut être amené à supporter tout le courant de court-circuit[ABD10].

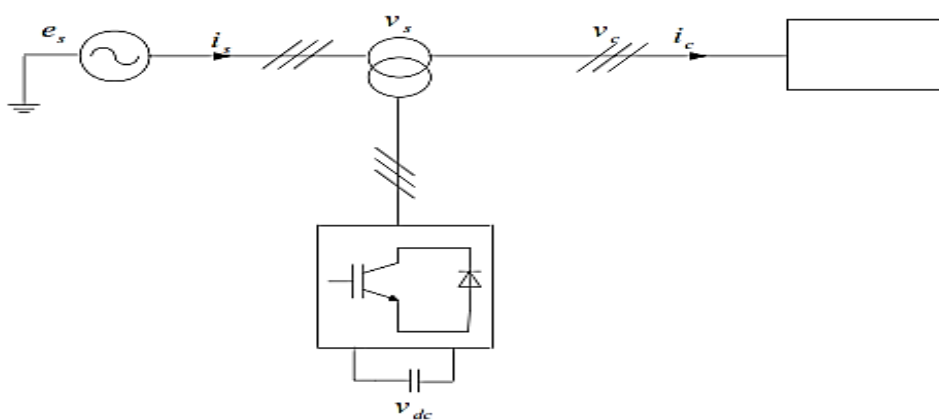


Figure (I.7): Filtre actif série

### I.3.2.3 Filtre combiné parallèle-série (UPQC)

L'UPQC est principalement la combinaison de deux filtres actifs série et parallèle qui partagent la même capacité sur le bus continu. Ce type de dispositif est capable à la fois de régler la tension du réseau et d'éliminer les harmoniques. Il est considéré comme le plus puissant dispositif et il est capable d'effectuer efficacement toutes les tâches de conditionnement de puissance. Cependant, son prix important et la complexité des commandes des nombreux interrupteurs limitent son utilisation à des applications critiques comme l'équipement médical [ABD10].

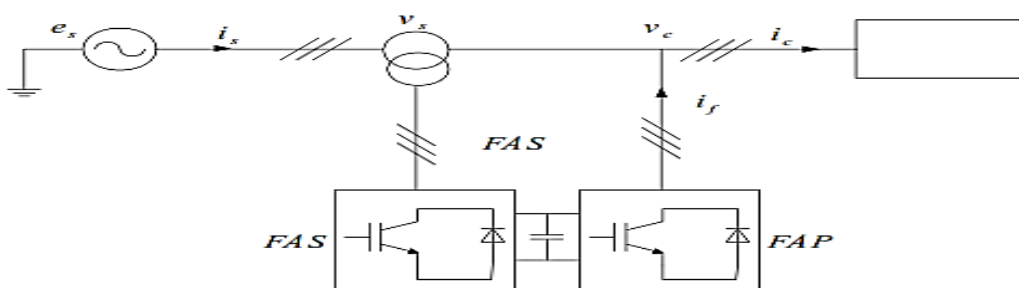


Figure (I.8): Filtre combiné parallèle - série (UPQC).

### I.3.2.4 Filtre actif série avec un filtre passif parallèle

Une version moins chère de la structure précédente est illustrée par la figure (I.9) où un filtre actif série et un filtre parallèle passif (FPP) sont exploités. Principalement, le filtre série régule la tension au point PCC tandis que le filtre parallèle est réglé sur quelques harmoniques de courant (rangs inférieurs) qui doivent être supprimés. Cette topologie a la possibilité de réduire les harmoniques de tension et de courant à un prix raisonnable [ABD10].

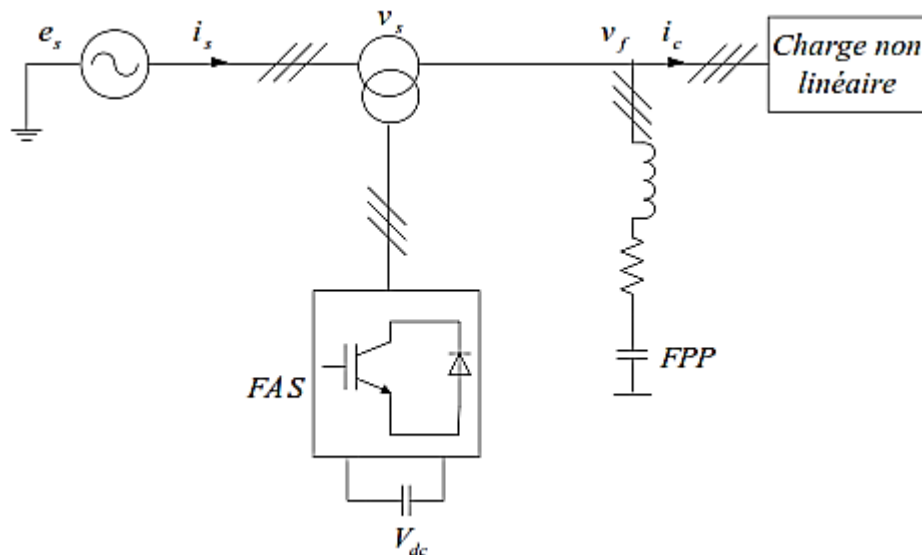


Figure (I.9): Filtre actif série avec un filtre passif parallèle

### I.3.2.5 Filtre actif parallèle

Le filtre est constitué d'un onduleur de tension et d'un filtre inductif en sortie. Ainsi, l'inductance en sortie de l'onduleur donne la nature de source de courant au filtre actif. Dans le cas où le réseau alimente plusieurs charges polluantes, il est préférable d'utiliser un seul filtre actif pour toutes les charges, car dans ce cas, le coût du filtrage est moindre. Cependant, lorsque la puissance des charges polluantes est élevée, la solution d'un filtre actif par charge s'avère nécessaire. Cette dernière méthode est bien sûr plus coûteuse mais elle possède l'avantage d'éviter que la stabilité des harmoniques vienne perturber le réseau dans le cas où un filtre actif est défectueux. Pour la suite de l'étude, la solution de dépollution choisie sera le filtre actif parallèle en raison de son efficacité et de sa forte utilisation [ABD10].

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la figure (I.10), est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante. Mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal, figure (I.11). Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif. La figure (I.12) représente la structure générale du filtre actif parallèle,

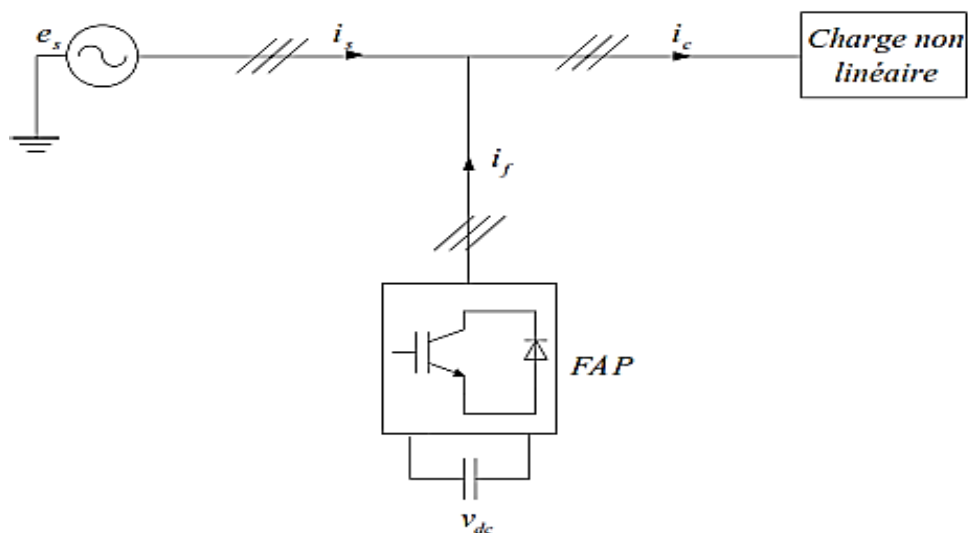
laquelle se présente sous forme de deux parties : la partie puissance et la partie contrôle-commande [KAM10].

La partie puissance est constituée :

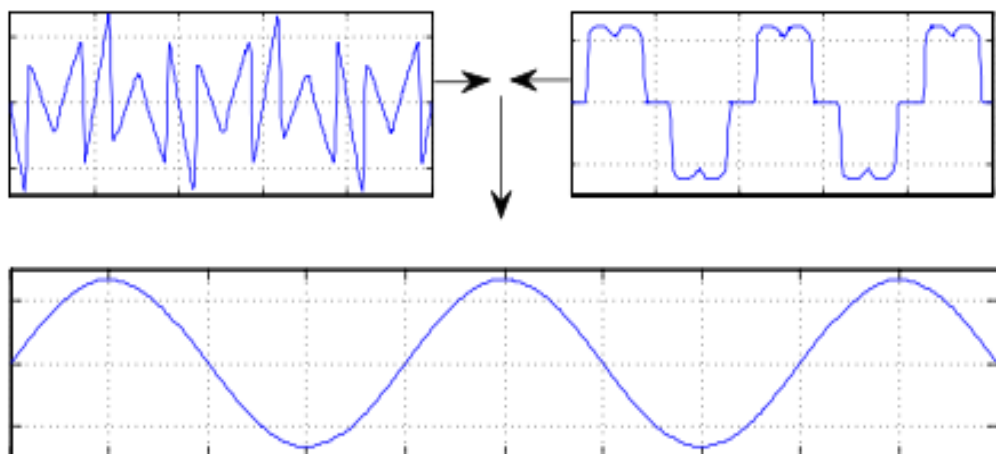
- 1- d'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, ...etc.) avec des diodes en antiparallèles ;
- 2- d'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif ;
- 3- d'un filtre de couplage.

La partie contrôle-commande quant à elle est constituée :

- 1- de la méthode d'identification des courants perturbés ;
- 2- de la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie ;
- 3- de la régulation des courants injectés sur le réseau à partir de l'onduleur de tension ;
- 4- De la commande de l'onduleur de tension [KAM10].



**Figure (I.10) :** Filtre actif parallèle.



**Figure (I.11) :** Courant pollué, courant harmonique et courant filtré.

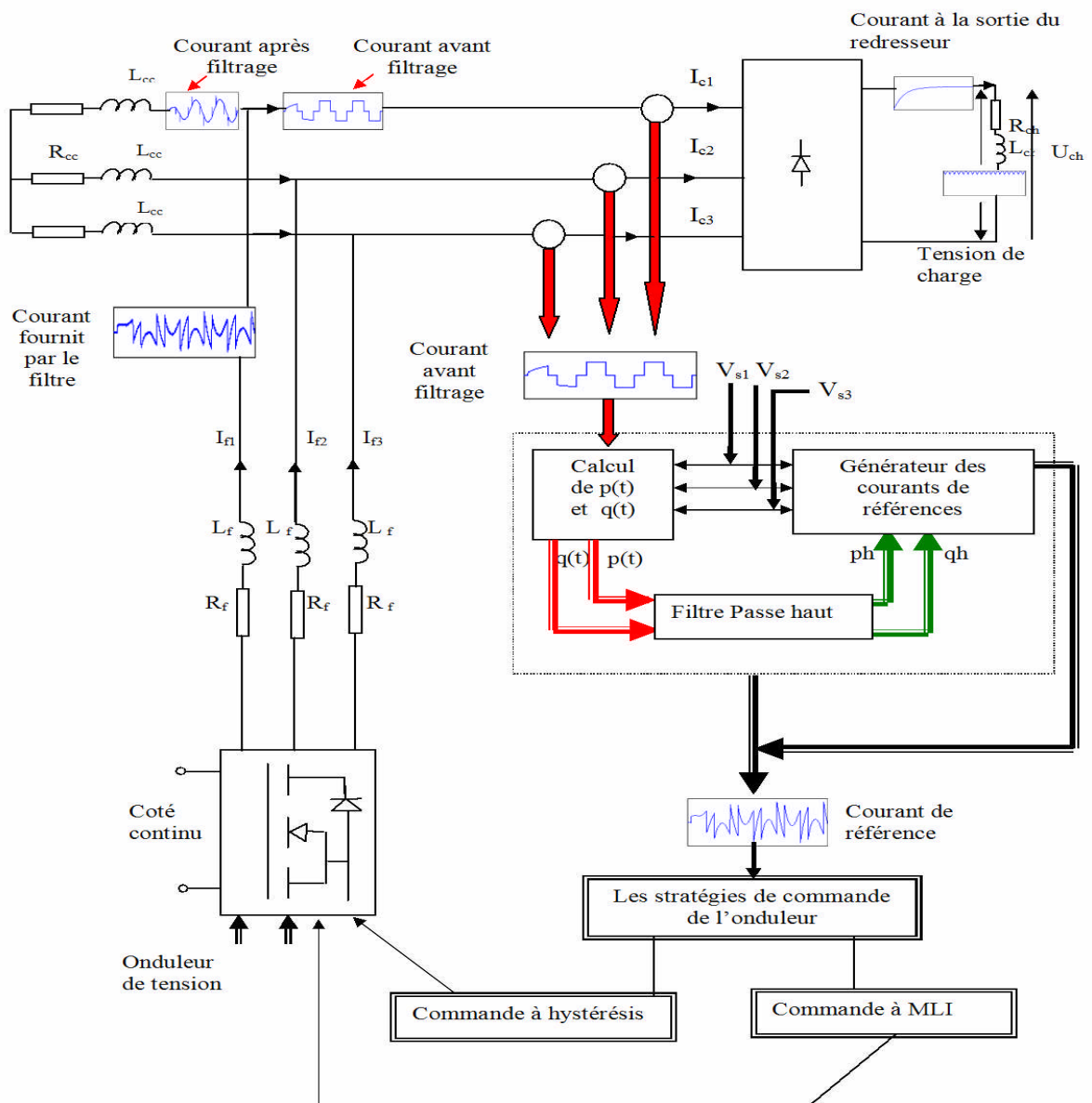


Figure (I.12) : la structure générale du filtre actif.

## I.4 Applications des filtres actifs parallèles

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

Les filtres actifs sont également utilisés dans des applications industrielles, afin de dépolluer une zone avec plusieurs charges non linéaires (redresseurs, certains éclairages, etc.).

En fin, le filtrage actif est également employé dans les applications tertiaires car les filtres actifs peuvent être intéressants dans les bâtiments commerciaux, hôpitaux, etc. dans lesquels il y a de nombreuses charges polluantes comme des ordinateurs, éclairage économique. Ces filtres actifs compensent les courants harmoniques, les courants réactifs et les déséquilibres des charges.

Les applications réseau, industrielles, tertiaires, domestiques et en télécommunications apparaissent comme des environnements particulièrement pollués par les harmoniques. Les filtres permettent une compensation globale des harmoniques, souvent jusqu'à l'harmonique 50.

Ces filtres actifs, en plus de réduire les courants harmoniques, améliorent le facteur de puissance et équilibrent les charges triphasées. L'utilisation de ces filtres produit une réduction des coûts d'exploitation et une prolongation de la durée de vie de l'installation [FAT09].

## I.5 Classement des filtres actifs parallèles

Il existe une grande variété de types de filtres actifs parallèles. Ils sont classés de différentes manières selon le nombre de phases, la technologie de l'onduleur et la topologie :

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

Même si les filtres actifs monophasés ont été largement étudiés dans la littérature, dans les applications industrielles, ce sont les filtres actifs triphasés qui sont les plus répandus (pour des applications de type variateurs ou redresseurs à dépolluer) du fait que les filtres monophasés sont normalement limités aux applications en basse puissance (les redresseurs des sources d'alimentation en continu), sauf dans le cas de la traction électrique. La deuxième classification se fait autour de la topologie utilisée, avec ou sans neutre raccordé. Les filtres actifs avec neutre raccordé ont été développés afin de pouvoir injecter et compenser les composantes homopolaires. Dans la littérature la plupart des filtres sont connectés sans neutre raccordé.

Toutefois, on trouve plusieurs filtres avec neutre raccordé : certains avec un onduleur à trois bras

et d'autres avec un onduleur à quatre bras ; en ce qui concerne la technologie de l'onduleur, les filtres actifs sont soit basés sur l'onduleur de tension avec un condensateur du côté continu et un filtre de raccordement inductif du côté réseau, soit sur un commutateur de courant avec une inductance du côté continu et un filtre de raccordement capacitif du côté réseau.

Actuellement, même si l'on trouve des articles basés sur le commutateur de courant, l'onduleur de tension est généralement préféré à cause de son meilleur rendement, de son moindre coût et de son volume plus réduit (si l'on compare le condensateur et l'inductance du côté continu). Par ailleurs, les modules à IGBT disponibles actuellement sur le marché sont bien adaptés aux onduleurs de tension car en général une diode en antiparallèle est rajoutée pour chaque IGBT.

Le commutateur de courant a quant à lui besoin de mettre en série avec chaque IGBT une diode anti-retour. De plus, un aspect vient renforcer provisoirement le choix : le commutateur de courant ne peut pas être utilisé avec des topologies multi-niveaux classiques. En conséquence presque tous les filtres actifs qui sont sur le marché sont composés d'onduleurs de tension [FAT09].

## **I.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté différents types de perturbations affectant l'onde de courant du réseau électrique. Comme nous avons pu le constater, les harmoniques ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements. Alors que pour éliminer ces effets, plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance, de plus elles ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes. Contrairement, les filtres actifs ont un objet de s'adapter et dépolluer le réseau de tous types de perturbations.



# *Chapitre II*

*Etude de la Structure et des  
Stratégies de Commande de  
Filtre Actif Parallèle à Deux  
Niveaux*



## Chapitre II : Etude de la Structure et des Stratégies de Commande de Filtre Actif Parallèle à Deux Niveaux

### II.1. Introduction:

Dans le chapitre précédent, nous avons rappelé les différentes origines des perturbations affectant sur les réseaux électriques basse tension et les solutions de dépollution existantes, notamment le filtre actif parallèle. Ce compensateur actif de puissance est composé de deux parties, à savoir une partie puissance et une partie commande. La partie puissance se compose d'un onduleur, d'un filtre de couplage et d'un élément passif lui servant de source d'énergie. La partie commande, sert au contrôle de la commutation des éléments semi-conducteurs formant l'onduleur de la partie puissance. Au moyen de stratégies de contrôle appropriées, il est possible de générer des signaux harmoniques à la sortie de l'onduleur servant à compenser ceux présents sur le réseau électrique. Cependant, l'efficacité du compensateur actif se résume dans son algorithme implanté qui est capable de réaliser les deux fonctions suivantes :

- générer les courants de référence à l'aide d'algorithmes d'identification
- contrôler l'onduleur afin de reproduire exactement ces courants harmoniques.

Ce chapitre comporte trois parties, la première partie décrit la structure générale du filtre actif parallèle à deux niveaux. La deuxième partie, consiste à étudier les deux méthodes de calcul des courants de référence. Nous traitons dans la dernière partie le contrôle des courants du filtre actif par un procédé classique utilisant la technique de commande par MLI avec un régulateur proportionnel. Des validations par simulation seront effectuées et représentées.

### II.2. Structure de SAPF à deux niveaux

La partie puissance d'un SAPF à deux niveaux, comme on peut le voir sur la Figure (II .1) est constituée par :

- un onduleur de tension;
- un circuit capacitif de stockage de l'énergie;
- un filtre de sortie.

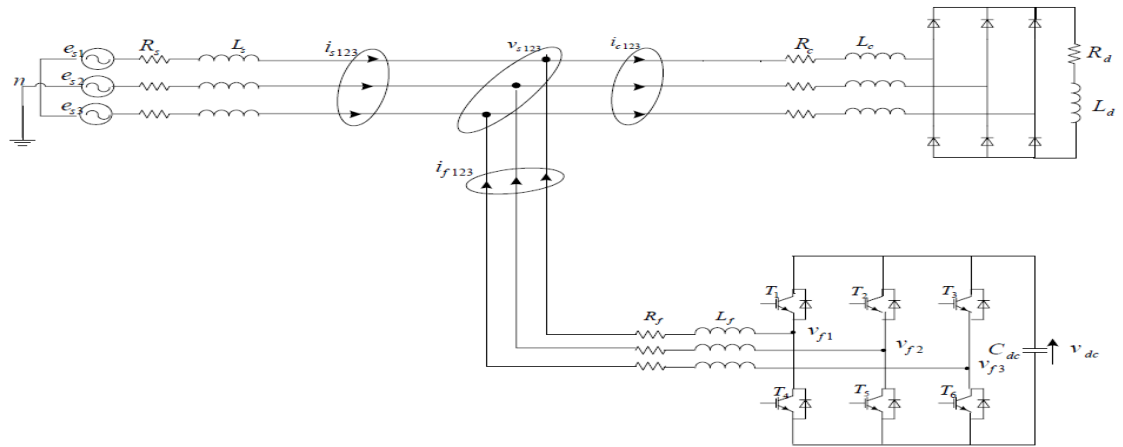


Figure (II.1) Circuit de puissance du filtre actif parallèle à deux niveaux proposé.

## II.2.1. Onduleur de tension à deux niveaux

### II.2.1.1. Structure générale

L'un du côté continu et l'autre du côté alternatif. L'étage passif du côté alternatif, a comme fonction principale le filtrage, il est constitué d'inductance de sortie. Celui du côté continu assure le stockage. L'onduleur triphasé de tension à deux niveaux à base d'IGBT est constitué de six interrupteurs bidirectionnels en courant (commandés à l'amorçage et au blocage) conduisant le courant dans les deux directions grâce aux diodes en antiparallèles. Il est associé généralement à deux étages passifs de l'énergie par l'intermédiaire d'un condensateur  $C_{dc}$  de tension  $V_{dc}$ .

### II.2.1.2. Tension générées par l'onduleur

L'onduleur de tension deux niveaux délivre, en sortie, deux niveaux de tensions  $V_{dc}$  et 0, en fonction des états des interrupteurs. En théorie, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. Avec cette hypothèse, l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la Figure (II.1) dépendent de l'état de trois signaux de commande [ROD02].

Pour chaque interrupteur  $T_{ki}$  ( $K=a, b, c$   $i=1, 2$ ), on définit une fonction de commutation  $S_{ki}$  :

$$S_{ki} = \begin{cases} 1 & \text{Si } T_{ki} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{Si } T_{ki} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

La complémentarité entre les deux interrupteurs de chaque bras impose l'équation suivante:

$$S_{k2}=1- S_{k1} \quad (\text{II.2})$$

Les tensions triphasées de sortie par rapport à la référence de la source continue « o » peuvent être exprimées par :

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{b0} \\ V_{c0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{a1} \\ S_{b1} \\ S_{c1} \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{II.3})$$

Les tensions composées entre les phases sont données par:

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{a0} - V_{b0} \\ V_{b0} - V_{c0} \\ V_{c0} - V_{a0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{a1} - S_{b1} \\ S_{b1} - S_{c1} \\ S_{c1} - S_{a1} \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{II.4})$$

Ainsi, on peut facilement exprimer les tensions  $V_k$  ( $k = a, b, c$ ) en fonction des fonctions de commutation  $S_{k1}$  comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} V_{ab} - V_{ca} \\ V_{bc} - V_{ab} \\ V_{ca} - V_{bc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2S_{a1} - S_{b1} - S_{c1} \\ -S_{a1} + 2S_{b1} - S_{c1} \\ -S_{a1} - S_{b1} + 2S_{c1} \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{II.5})$$

Puisque les variables  $S_{a1}$ ,  $S_{b1}$  et  $S_{c1}$  prennent chacune deux valeurs, il en résulte huit combinaisons de commande, qui sont présentées dans le Tableau (II.1)

vecteur	$S_{a1}$	$S_{b1}$	$S_{c1}$	$V_a$	$V_b$	$V_c$
$V_0$	0	0	0	0	0	0
$V_1$	1	0	0	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
$V_2$	1	1	0	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
$V_3$	0	1	0	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
$V_4$	0	1	1	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
$V_5$	0	0	1	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
$V_6$	1	0	1	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
$V_7$	1	1	1	0	0	0

**Tableau (II.1)- Tensions en sortie de l'onduleur.**

### II.2.1.3. Représentation vectorielle des tensions générées

Le fonctionnement de l'onduleur de tension, en particulier en ce qui concerne les tensions de phases, il est commode de représenter les tensions fournies par l'onduleur dans un repère orthogonal  $(\alpha, \beta)$  [LIQ04]

Dans le plan  $(\alpha, \beta)$ , on aura:

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad . \text{(II.6)}$$

La Figure (II.2) présente les tensions générées par l'onduleur sous forme d'un vecteur, il y a huit positions possibles, six se trouvent aux sommets d'un hexagone ( $V_1$  à  $V_6$ ) de module  $\sqrt{\frac{3}{2}}V_{dc}$  et deux positions à l'origine, de module nul ( $V_0$  et  $V_7$ ).

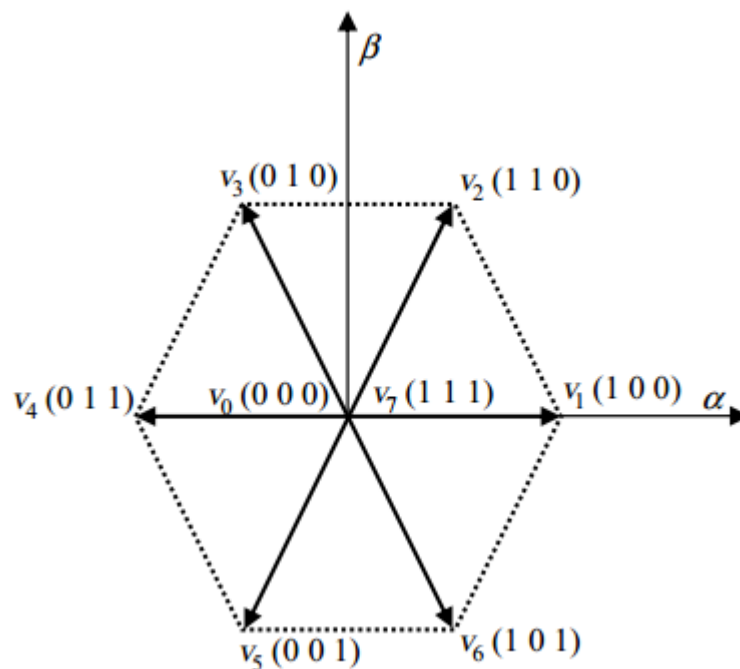


Figure. (II.2). Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur

## II.3. Contrôle du SAPF à deux niveaux

La partie contrôle d'un SAPF réalise quatre fonctions principales :

- l'identification des courants de référence ;
- la régulation de la tension continue ;
- la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension ;
- la commande de l'onduleur de tension.

### II.3.1. Identification des courants harmoniques

Les méthodes d'identification des grandeurs harmoniques sont classées dans deux domaines, fréquentiel et temporel [LAL09].

La première est basée sur la transformée de Fourier de la tension ou du courant non sinusoïdal pour en extraire les harmoniques de compensation. Cet algorithme présente la difficulté de nécessiter beaucoup de calcul surtout lorsque on augmente le nombre d'harmoniques à éliminer ; il en résulte un temps de réponse élevé [FRA08].

La deuxième approche est basée sur la comparaison instantanée des grandeurs de compensation harmonique de référence, sous forme de tension ou de courant, aux grandeurs harmoniques réels. Beaucoup de méthodes entrent dans cette famille, notamment la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.

On distingue des méthodes d'extraction globale (tous les harmoniques à compenser sont présents dans la référence) et sélective (les harmoniques à compenser sont choisis et limités) [BUH91]. Le choix de la méthode dépendra des objectifs fixés : compensation de tous les courants harmoniques, compensation sélective de certaines harmoniques, compensation des harmoniques dans des cas de configurations défavorables susceptibles de survenir dans les réseaux triphasés industriels, car la tension du réseau est souvent perturbée ou déformée. Pour générer les courants de référence servant à la commande du filtre actif, nous avons opté pour deux méthodes : méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées et méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées modifiée.

#### II.3.1.1. Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées

Parmi toutes les méthodes présentées dans la littérature, nous avons choisi de mettre en œuvre la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées, car elle est d'une grande souplesse en permettant de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation [FRA08].

La méthode des puissances instantanées introduite par H. Akagi et al. [DJE07], [LAS07] exploite la transformation de Concordia des tensions aux points de raccordement du filtre actif parallèle et des courants absorbés par la charge polluante, afin de calculer les puissances réelle et imaginaire instantanées.

Notons respectivement par  $(V_\alpha, V_\beta)$  et  $(I_\alpha, I_\beta)$  les composantes orthogonales de Concordia associées aux tensions  $V_{sk}$  ( $K=a, b, c$ ) et aux courants  $I_{ck}$ . La transformation de Concordia

permet d'écrire, les deux relations suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ca} \\ I_{cb} \\ I_{cc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Les puissances réelle et imaginaire instantanées, notées respectivement P et Q , sont définies par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

En remplaçant les tensions et les courants diphasés par leurs homologues triphasés, nous obtenons :

$$P = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta = V_{sa} I_{ca} + V_{sb} I_{cb} + V_{sc} I_{cc} \quad (\text{II.10})$$

De même, pour la puissance imaginaire on a :

$$Q = V_\alpha I_\beta - V_\beta I_\alpha = \frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{sc} - V_{sb}) I_{ca} + (V_{sa} - V_{sc}) I_{cb} + (V_{sb} - V_{sa}) I_{cc}] \quad (\text{II.11})$$

Les composantes des puissances réelle et imaginaire instantanées s'expriment comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative, ce qui nous permet d'écrire [AKA83],

$$\begin{cases} P = \bar{P} + \tilde{P} \\ Q = \bar{Q} + \tilde{Q} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

Où :

$\bar{P}, \bar{Q}$  Sont les composantes continues de P et Q.

$\tilde{P}, \tilde{Q}$  Sont les composantes alternatives de P et Q.

L'inverse de l'équation (II.9) des puissances active et réactive permet d'établir la relation (II.13) des courants  $I_\alpha$  et  $I_\beta$ :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{sa}^2 + V_{sb}^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & +V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

En considérant les équations (II.12) et (I.13), nous pouvons séparer le courant dans le repère  $(\alpha, \beta)$  en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et somme des harmoniques. Ceci conduit à :

$$\begin{bmatrix} I_{c\alpha} \\ I_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\hat{V}_\alpha^2 + \hat{V}_\beta^2} \begin{bmatrix} \hat{V}_\alpha & 0 \\ \hat{V}_\beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{dc} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Maintenant, si on souhaite également compenser la puissance réactive, ainsi que les Courants harmoniques générés par les charges non linéaires, le signal de référence du filtre actif parallèle doit inclure  $P$ ,  $\bar{Q}$  et  $\tilde{Q}$ . Dans ce cas, les courants de référence sont calculés par:

$$\begin{bmatrix} I_{ref\alpha} \\ I_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ \bar{Q} + Q \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Les courants triphasés sont obtenus à partir des courants diphasés  $I_{ref\alpha}$  et  $I_{ref\beta}$  par la transformation inverse de Concordia. Ces courants représentent les perturbations et deviennent les courants de référence qui sont à injecter en opposition de phase sur le réseau électrique pour éliminer les harmoniques.

$$\begin{bmatrix} I_{refa} \\ I_{refb} \\ I_{refc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ref\alpha} \\ I_{ref\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Il est évident, d'après la relation (II.14), que pour identifier une des trois composantes, par exemple les courants harmoniques, les parties alternatives des puissances réelle et imaginaire doivent être séparées des parties continues. Cette séparation peut être réalisée en utilisant deux filtres, le premier pour isoler la partie  $\bar{P}$  de la puissance active instantanée, le second pour isoler la partie  $\bar{q}$  de la puissance réactive instantanée, comme le présente la Figure (II.3.)

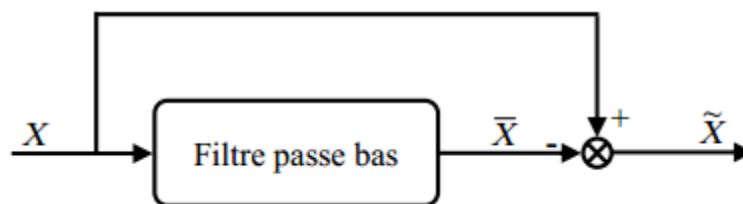


Figure. (II.3). Schéma représentant le principe de séparation des puissances.

La relation suivante donne l'expression générale d'un filtre passe-bas du deuxième ordre

$$F(S) = \frac{\omega_c^2}{S^2 + 2\xi\omega_c S + \omega_c^2} \quad (\text{II.17})$$

Avec:

$\omega_c = 2\pi f_c$ ,  $f_c$  est la fréquence de coupure du filtre.

S: l'opérateur de Laplace.

$\xi$ : dépassement.

Le schéma de la Figure(II.4) illustre les différentes étapes permettant l'obtention des courants de référence par la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.

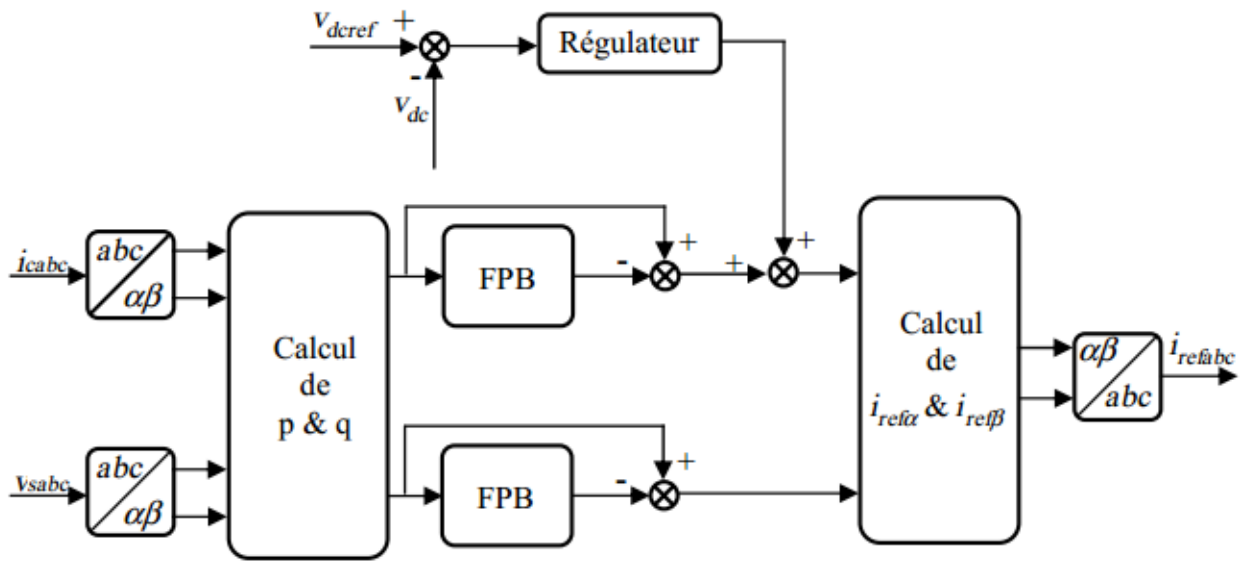


Figure. (II.4). Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées

Suivant la fonction que nous donnons au filtre actif de puissance, nous pouvons compenser soit les harmoniques de courant et l'énergie réactive ou uniquement l'un des deux. Le Tableau (II.2) résume les modes de compensations possibles [AKA83].

Paramètres de contrôle	
Compensation des harmoniques de courant	$P_f = P$ et $Q_f = \tilde{Q}$
Compensation de l'énergie Réactive	$P_f = 0$ et $Q_f = \bar{Q}$
Compensation des harmoniques de courant et de l'énergie réactive	$P_f = P$ et $Q_f = Q$

Tableau (II.2) Les modes de compensation



### II.3.1.2. Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées modifiée

#### II.3.1.2.1. Principe du FMV

Son principe de base s'appuie sur les travaux de Song Hong-Scok. Il est basé directement sur l'extraction de la composante fondamentale des signaux d'entrée (tension ou courant), suivant les axes  $(\alpha, \beta)$  [BEN04], [KAR09],. La fonction de transfert de ce filtre est alors

la suivante :

$$H(s) = \frac{\hat{x}_{\alpha\beta}(s)}{x_{\alpha\beta}(s)} = k \frac{(s+k) + j\omega_c}{(s+k)^2 + \omega_c^2} \quad (\text{II.18})$$

Où  $\omega_c$  est défini par :

$$\omega_c = \varepsilon.n.\omega_f \quad (\text{II.19})$$

Avec :

$\omega_c$  : la pulsation de coupure du filtre ;

$\omega_f$  : la pulsation de la composante fondamentale du signal d'entrée ;

$n$  : le rang de la composante du signal à filtrer ;

$\varepsilon$  : une constante égale à  $\pm 1$  (composante directe ( $\varepsilon=1$ ) ou inverse ( $\varepsilon=-1$ )) ;

$K$  : une constante positive ;

$X_{\alpha\beta}$  : les signaux d'entrée du FMV (tension ou courant) ;

$\hat{X}_{\alpha\beta}$  : les signaux de sortie du FMV

A partir de l'équation (II.18) et après un court développement, nous pouvons établir les deux expressions suivantes :

$$\hat{X}_{\beta}(s) = \hat{X}_{\alpha}(s) = \frac{k}{s} \left[ X_{\alpha}(s) - \hat{X}_{\alpha}(s) \right] - \frac{\omega_c}{s} \hat{X}_{\beta}(s) \quad (\text{II.20})$$

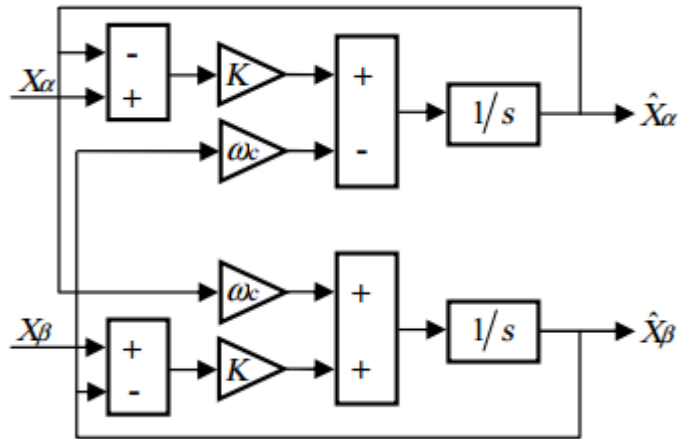
$$\hat{X}_{\beta}(s) = \frac{K\omega_c}{(s+k)^2 + \omega_c^2} X_{\alpha}(s) + \frac{k(s+k)}{(s+k)^2 + \omega_c^2} X_{\beta}(s) \quad (\text{II.21})$$

Les équations (II.20) et (II.21) peuvent également être exprimées sous la forme :

$$\hat{X}_{\alpha}(s) = \frac{k}{s} \left[ X_{\alpha}(s) - \hat{X}_{\alpha}(s) \right] - \frac{\omega_c}{s} \hat{X}_{\beta}(s) \quad (\text{II.22})$$

$$\hat{X}_{\beta}(s) = \frac{k}{s} \left[ X_{\beta}(s) - \hat{X}_{\beta}(s) \right] + \frac{\omega_c}{s} \hat{X}_{\alpha}(s) \quad (\text{II.23})$$

La Figure (II.5) présente le schéma bloc du filtre multi-variable



Figure( II.5).Schéma bloc du FMV.

### II.3.1.2.2. Extraction des courants harmoniques

Contrairement aux filtres passe bas, les filtres multi-variables offrent la possibilité d'extraire d'une manière précise les courants harmoniques dans le repère  $(\alpha, \beta)$ . La Figure II.6 présente le schéma modifié de l'identification des courants de référence par la méthode des puissances instantanées en employant des FMVs.

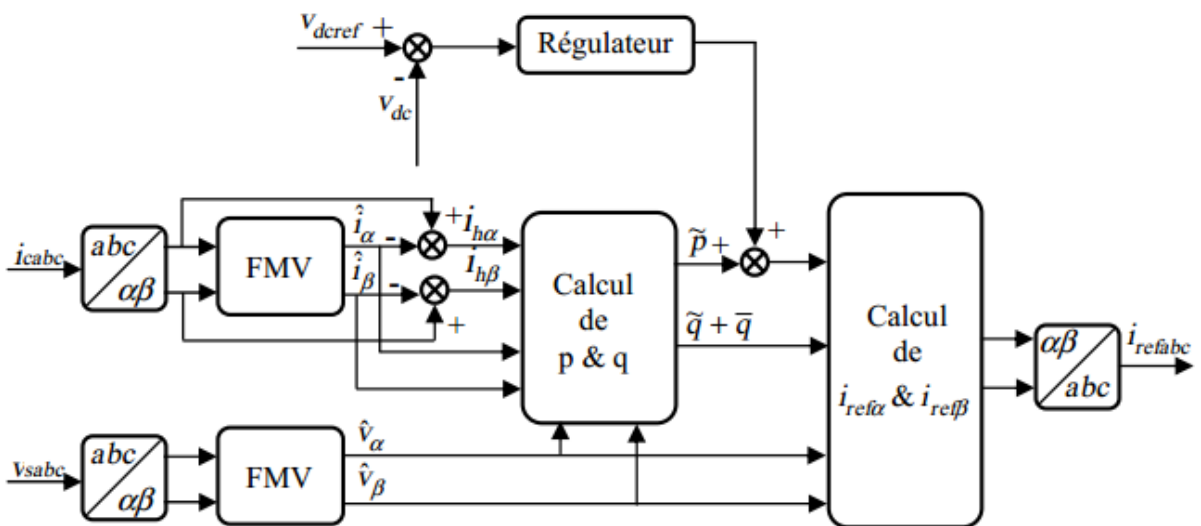


Figure.( II.6). Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées modifiée.

Quant aux courants diphasés d'axes  $(\alpha, \beta)$ , ils peuvent être définis comme la somme d'une composante fondamentale et d'une composante harmonique :

$$I_{ref\alpha} = \frac{\hat{V}_\alpha}{\sqrt{\hat{V}_\alpha^2 + \hat{V}_\beta^2}} (P + P_{dc}) + \frac{\hat{V}_\beta}{\sqrt{\hat{V}_\alpha^2 + \hat{V}_\beta^2}} (Q + \bar{Q}) \quad (II.24)$$

Après isolation des composantes fondamentales en tension notées  $\hat{V}_{\alpha\beta}$ , et des courants Harmoniques  $I_{h\alpha\beta}$ , nous pouvons alors calculer les composantes alternatives des puissances réelle  $P$  et imaginaire  $q$  instantanées par :

$$\begin{bmatrix} P \\ -Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{V}_\alpha & \hat{V}_\beta \\ -\hat{V}_\beta & \hat{V}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{h\alpha} \\ I_{h\beta} \end{bmatrix} \quad (II.25)$$

Avec  $I_{h\alpha}$  et  $I_{h\beta}$  définis par:

$$I_{h\alpha} = (I_{ad} - \hat{I}_{ad}) + (I_{\alpha inv} - \hat{I}_{\alpha inv}) \quad (II.26)$$

$$I_{h\beta} = (I_{\beta d} - \hat{I}_{\beta d}) + (I_{\beta inv} - \hat{I}_{\beta inv}) \quad (II.27)$$

La composante fondamentale de la puissance réactive instantanée est définie par :

$$\bar{Q} = \hat{V}_\alpha \hat{I}_\alpha - \hat{V}_\beta \hat{I}_\beta \quad (II.28)$$

Après avoir ajouté à la composante alternative de la puissance active instantanée, la puissance active  $p_{dc}$  nécessaire à la régulation de la tension continue  $V_{dc}$ , les courants de référence selon les axes  $(\alpha, \beta)$  sont calculés par :

$$I_{ref\alpha} = \frac{\hat{V}_\alpha}{\sqrt{\hat{V}_\alpha^2 + \hat{V}_\beta^2}} (P + P_{dc}) + \frac{\hat{V}_\beta}{\sqrt{\hat{V}_\alpha^2 + \hat{V}_\beta^2}} (Q + \bar{Q}) \quad (II.29)$$

$$I_{ref\beta} = \frac{\hat{V}_\beta}{\sqrt{\hat{V}_\alpha^2 + \hat{V}_\beta^2}} (P + P_{dc}) + \frac{\hat{V}_\alpha}{\sqrt{\hat{V}_\alpha^2 + \hat{V}_\beta^2}} (Q + \bar{Q}) \quad (II.30)$$

En substituant les équations (II.25) et (II.28) dans les équations (II.29) et (II.30), nous obtenons :

$$I_{ref\alpha} = I_{h\alpha} + I_{q\alpha} + I_{c\alpha} \quad (II.31)$$

$$I_{ref\beta} = I_{h\beta} + I_{q\beta} + I_{c\beta} \quad (II.32)$$

Où  $I_{q\alpha}, I_{q\beta}, I_{c\alpha}, et I_{c\beta}$  sont définis par :

$$\begin{bmatrix} i_{q\alpha} \\ i_{q\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\hat{V}_\alpha^2 + \hat{V}_\beta^2} \begin{bmatrix} 0 & \hat{V}_\beta \\ 0 & \hat{V}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -\bar{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\hat{V}_\alpha^2 + \hat{V}_\beta^2} \begin{bmatrix} \hat{V}_\alpha & 0 \\ \hat{V}_\beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{dc} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

Les courants de référence obtenus à partir des équations (II.31) et (II.32) contiennent trois termes :

- Le premier terme correspond aux composantes harmoniques, directes et inverses ;
- Le deuxième terme est le courant réactif destiné à compenser la puissance réactive;
- Le troisième terme est le courant actif destiné à maintenir la tension  $V_{dc}$  égale à sa valeur de référence  $V_{dcref}$  .

Grâce à la transformation de Concordia inverse, les équations (II.31) et (II.32), permettent de déduire les trois courants de référence.

En plus de la méthode générale d'identification, nous représentons sur la Figure (II.4), un bloc de régulation de la tension continue que nous aborderons dans ce qui suit.

## II.3.2. Régulation de la tension continue

Pour les petites et moyennes puissances, l'élément de stockage de l'énergie le plus adapté est une capacité placée du côté continu de l'onduleur qui a deux tâches essentielles [ALA02] :

- en régime permanent, il maintient la tension du bus continu  $V_{dc}$  constante avec des faibles oscillations ;
- il sert comme élément stockage d'énergie pour compenser la différence de la puissance réelle entre la charge et la source lors des périodes transitoires.

### II.3.2.1. Principe de la régulation

Le rôle de la boucle de régulation de la tension du bus continu est de maintenir cette tension à une valeur constante. Les éléments à l'origine de la variation de la tension moyenne  $V_{dc}$  aux bornes du bus continu sont les suivants [GOU97]:

- les pertes dans les interrupteurs;
- les pertes dans les filtres de sortie  $L_f$
- l'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante.

Sur la Figure II.4, nous remarquons que suite à un écart entre  $V_{dcref}$  et  $V_{dc}$  , la puissance  $P_{dc}$  à la sortie du régulateur de tension s'ajoute, à un signe près à la puissance active harmonique et

donne lieu à un courant fondamental actif supplémentaire corrigeant la tension continue  $V_{dc}$  [DEF08], [OUL05].

### II.3.2.2. Synthèse du régulateur de tension

Afin d'obtenir la quantité  $P_{dc}$  représentant la puissance active nécessaire pour maintenir  $V_{dc}$  proche de sa référence  $V_{dcref}$  on peut utiliser un simple régulateur type proportionnel [FRA08]. En régime permanent les courants de référence ne contiennent pas de composantes fondamentales et la puissance nécessaire pour compenser les pertes est faible. Dans ce cas, un simple gain est suffisant et pour filtrer les fluctuations à 300Hz, nous proposons d'ajouter un filtre passe-bas du premier ordre en sortie du régulateur [GOU97], [LAL09],

La fonction de transfert du régulateur est donnée par:

$$G_c(s) = \frac{k_c}{1 + \tau_c s} \quad (\text{II.35})$$

Avec :

- $k_c$  : Gain du régulateur
- $\tau_c$  : Constant de temps.

En négligeant les pertes par commutation dans le filtre actif ainsi que l'énergie stockée dans le filtre de sortie  $L_f$ , la relation entre la puissance absorbée par le filtre actif et la tension continue  $V_{dc}$  s'exprime par:

$$P_{dc} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} C V_{dc}^2 \right) \quad (\text{II.36})$$

Pour des faibles variations de  $V_{dc}$  autour de  $V_{dcref}$  l'équation (II.36) peut s'écrire:

$$P_{dc} = C V_{dcref} \frac{d}{dt} (V_{dc}) \quad (\text{II.37})$$

Des équations (II.35) et (II.37), la boucle de régulation de la tension continue  $V_{dc}$  peut être fonctionnellement représentée par la Figure( II.7).

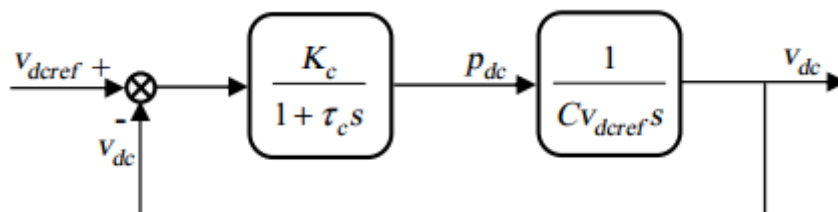


Figure.( II.7). Boucle de régulation de la tension continue.

La fonction de transfert en boucle fermée est alors:

$$F(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\xi_c \omega_c s + \omega_c^2} \quad (\text{II.38})$$

Avec:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{K_c}{cV_{dcref} \tau_c}} \quad (\text{II.39})$$

$$\xi_c = \sqrt{\frac{CV_{dcref}}{K_c \tau_c}} \quad (\text{II.40})$$

En général, la régulation est stable, mais pour obtenir un amortissement suffisant, le produit  $K_c \tau_c$  doit être limité.

### II.3.3. Stratégie de commande de l'onduleur à deux niveaux

Les performances du filtre actif, notamment la diminution du THD du courant de source sont certes liées aux performances de la génération des courants de référence, mais dépendent également de la stratégie de commande de l'onduleur de tension [NEJ07], [GOU97]. Différentes commandes sont recensées dans la littérature [HIL02]. Deux stratégies principales de commande sont couramment mises en œuvre, à savoir :

- la commande par hystérésis;
- la commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI).

L'objectif de la commande, que ce soit à MLI ou par hystérésis, est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de manière à ce que le courant du filtre actif soit le plus proche de sa référence. On trouve diverse variantes de contrôle par MLI: MLI calculée, MLI à échantillonnage naturel et MLI vectorielle.

#### II.3.3.1. Commande par hystérésis

La commande par hystérésis est simple et bien adaptée pour la commande en courant des convertisseurs statiques. 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. Le schéma de principe de cette technique de commande est illustré sur la Figure (II.8). Son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence  $I_{ref}$  et le courant produit par l'onduleur  $I_{inj}$ . Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs du bras correspondant de l'onduleur [GOU97]. Malgré sa grande robustesse, sa rapidité et la simplicité

de son implémentation, cette Commande présente cependant un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation des semi-conducteurs. Plusieurs travaux sont présentés pour surmonter ce problème, à savoir la commande par hystérésis à bande adaptative [BER06], .

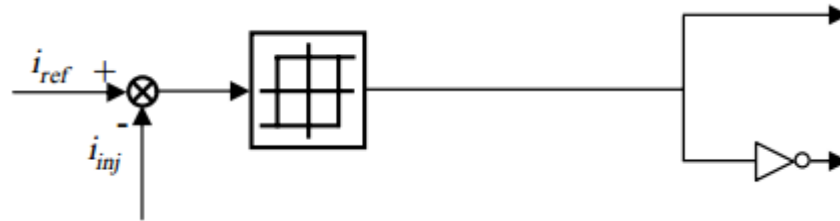


Figure. (II.8). Principe de commande des courants par hystérésis.

### II.3.3.2. Commande par hystérésis modulée

La commande du courant par hystérésis modulée a été proposée par Nejadet al.[JXU94], afin de surmonter l'inconvénient majeur de la commande par hystérésis conventionnelle par la fixation de la fréquence de commutation des interrupteurs de puissance. L'idée de base de cette technique originale consiste à ajouter au courant de référence, un signal triangulaire de fréquence de commutation et d'amplitude  $A_t$ . La fréquence  $F_t$  doit être choisie égale à la fréquence de commutation que l'on souhaite imposer aux composants de puissance.

La Figure (II.9) illustre le principe de contrôle du courant par hystérésis modulée

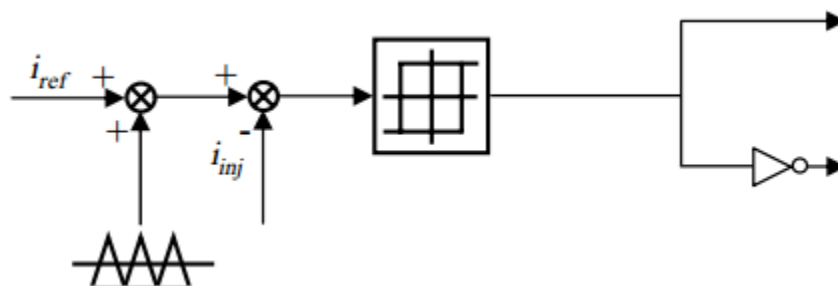


Figure. (II.9). Principe de commande des courants par hystérésis modulée.

### II.3.3.3. Commande par MLI à échantillonnage naturel

Le schéma de commande par MLI à échantillonnage naturel est illustré sur la Figure( II.10). Dans cette méthode, la différence entre le courant de référence  $I_{ref}$  et le courant du filtre  $I_{inj}$  est appliquée à l'entrée d'un régulateur Proportionnel-Intégral PI. Le signal de sortie du régulateur, appelé modulatrice, est ensuite comparé à un signal triangulaire de fréquence fixe et suffisamment élevée (porteuse) afin de déterminer les ordres de commutations des interrupteurs.

En réalité, cette technique est un peu plus complexe que la commande par hystérésis [GOU97], [CHE11]

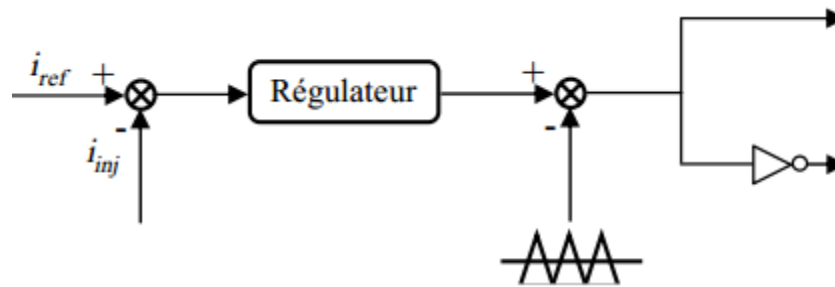


Figure. (II.10). Principe de commande des courants par MLI intersectée.

### II.3.3.4. MLI vectorielle

A la différence de la MLI intersectée, dans la MLI vectorielle les vecteurs à appliquer et les temps d'application de ces vecteurs sont calculés analytiquement à travers des équations mathématiques. Chacun des états possibles du convertisseur est représenté par un vecteur de tension. L'ensemble de ces vecteurs forme le diagramme vectoriel des tensions du convertisseur. En général, la valeur moyenne du vecteur de référence peut être calculée en utilisant plus d'un vecteur par cycle de modulation. Si l'on sélectionne les vecteurs adéquats et si l'on les applique dans l'ordre correct il est possible d'obtenir une fréquence de commutation à la sortie relativement élevée avec une fréquence de commutation réduite au niveau de composante.

La modulation vectorielle diffère, entre autres choses, des techniques intersectées par le fait que les signaux de commandes sont élaborés en tenant compte de l'état des trois bras de l'onduleur en même temps [HIL02].

La référence [LAL09] applique la commande MLI vectorielle à un filtre actif parallèle à base d'un onduleur de tension à trois niveaux.

### II.3.4. Régulation du courant du filtre

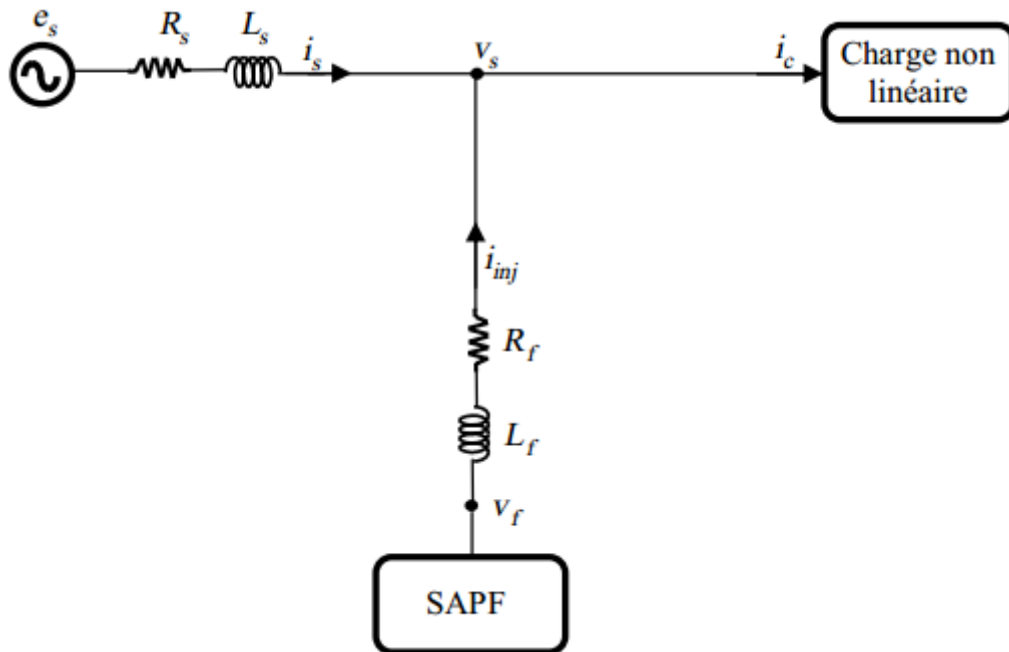
Le but de la boucle de régulation du courant est de contrôler le courant à la sortie de l'onduleur. La mise au point d'un régulateur doit prendre en compte les conditions suivantes, [KOR] :

- la bande passante du régulateur doit être assez large afin de ne pas introduire un retard important;
- le fonctionnement de la régulation ne doit pas être perturbé par les harmoniques dus aux découpages de l'onduleur. Ces harmoniques doivent être atténués à la sortie du régulateur.



### II.3.4.1. Principe de la régulation

La Figure (II.11) montre le modèle électrique équivalent par phase d'un filtre actif parallèle, à base d'un onduleur de tension à deux niveaux, connecté entre un réseau alternatif et une charge non linéaire.



**Figure. (II.11). Circuit monophasé équivalent d'un filtre actif parallèle.**

L'équation qui relie le courant et la tension du filtre actif s'exprime par :

$$V_f = L_f \frac{di_{inj}}{dt} + V_s \quad (\text{II.41})$$

Avec :

$L_s$ ,  $I_s$ ,  $V_s$  : inductance, courant et tension au point de raccordement côté source d'alimentation

$L_f$ ,  $I_{inj}$  et  $V_f$  : inductance de sortie, courant et tension du filtre actif.

Notons par  $\Delta I$  la différence entre le courant de référence et le courant mesuré à partir de la relation suivante :

$$\Delta I = I_{ref} - I_{inj} \quad (\text{II.42})$$

Des équations (II.41) et (II.42), on obtient :

$$L_f \frac{d}{dt} \Delta I_{inj} = \left( V_s + L_f \frac{d}{dt} I_{ref} \right) - V_f \quad (\text{II.43})$$

Le premier terme de la partie droite de la relation (II.43) peut être défini comme tension de Référence ( $V_{fref}$ ), ce qui nous donne l'expression suivante :

$$V_{fref} = V_s + L_f \frac{dI_{ref}}{dt} \quad (\text{II.44})$$

En réalité, le vecteur ( $V_{fref}$ ) est la tension permettant de générer un courant égal à  $I_{ref}$ .

### II.3.4.2. Synthèse du régulateur du courant

Nous utilisons simplement pour chacune des phases un régulateur proportionnel suivi d'un filtre passe bas du premier ordre. Le rôle de ce filtre est d'atténuer les signaux hautes fréquences venant de la MLI. Le schéma de régulation du courant est représenté sur la Figure (II.12).

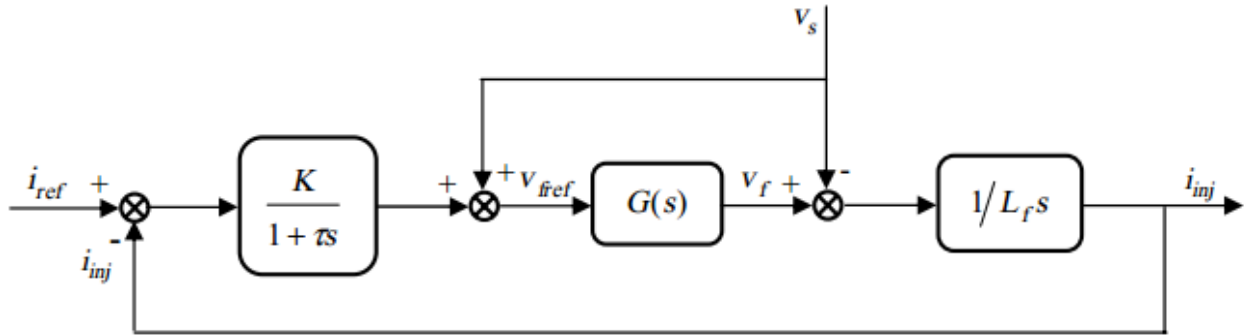


Figure. (II.12). Schéma de la régulation des courants du SAPF

L'onduleur de tension à commande MLI est modélisé par un gain  $G_0$  [KOR] :

$$G_0 = \frac{V_{dc}}{2V_p} \quad (\text{II.45})$$

Avec :

- $V_{dc}$  : tension côté continu de l'onduleur ;
- $V_p$  : amplitude de la porteuse triangulaire.

Pour que  $V_f$  soit égal à  $V_{fref}$ , nous choisissons  $G_0$  égal à 1. Le schéma de la régulation de courant peut alors se simplifier comme indiqué sur la Figure (II.13).

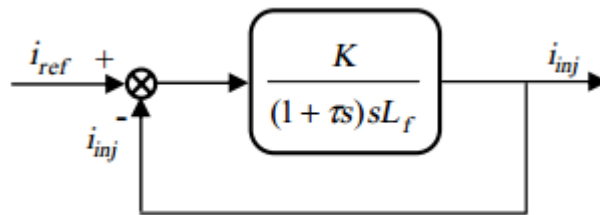


Figure. (II.13). Schéma simplifié de la régulation.

La fonction de transfert de la boucle fermée est:

$$\frac{I_{inj}}{I_{ref}} = \frac{\omega_i^2}{S^2 + 2\xi_i \omega_i S + \omega_i^2} \quad (\text{II.46})$$

Avec:

$$\omega_i = \sqrt{\frac{K}{L_f \tau}} \quad \text{Et} \quad \xi_i = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_f}{K \tau}} \quad (\text{II.47})$$

### II.4. Résultats de simulation de l'ensemble réseau charge non-linéaire avant le filtrage

La figure (II.14) illustre le courant de ligne  $I_{av}$  avant le filtrage et son spectre harmonique

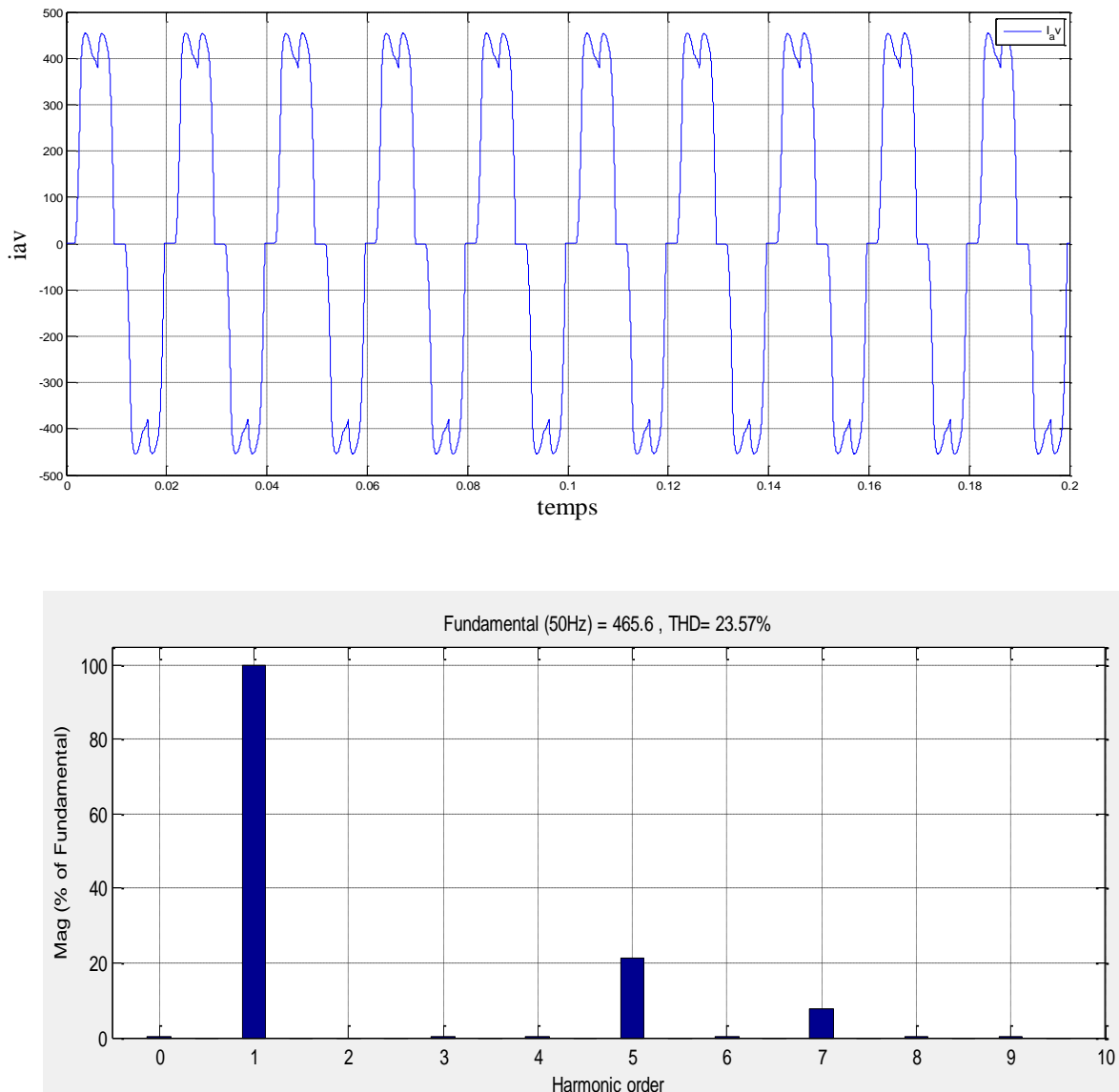


Figure (II.14) :courant de ligne généré par la charge non linéaire et son spectre harmonique

## II.4. 1.Résultats de simulation

### II.4.1.1 .Commande par hystérésis

Pour évaluer et comparer les deux méthodes de commande précédemment étudiées, nous avons procédé à des simulations des courants du réseau dans conditions idéales ou perturbées. La simulation du système global (source, charge, *SAPF*) est effectuée sous l'environnement *Matlab/Simulink* en utilisant également la *toolbox* « *SimPowerSystems* ». Lors des simulations, 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. Le redresseur débite dans une charge  $RL$ . 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. Le filtre actif parallèle, lequel est composé d'un onduleur de tension à deux niveaux.

### II.4.1. 2. Tensions de source sinusoïdales équilibrées

les résultats de simulation obtenus par la méthode  $p-q$ , pour la phase (a), sont données par les Figures suivantes : Le taux de distorsion harmonique avant compensation était égal à 23.57 %, après compensation devient 0.93 %.

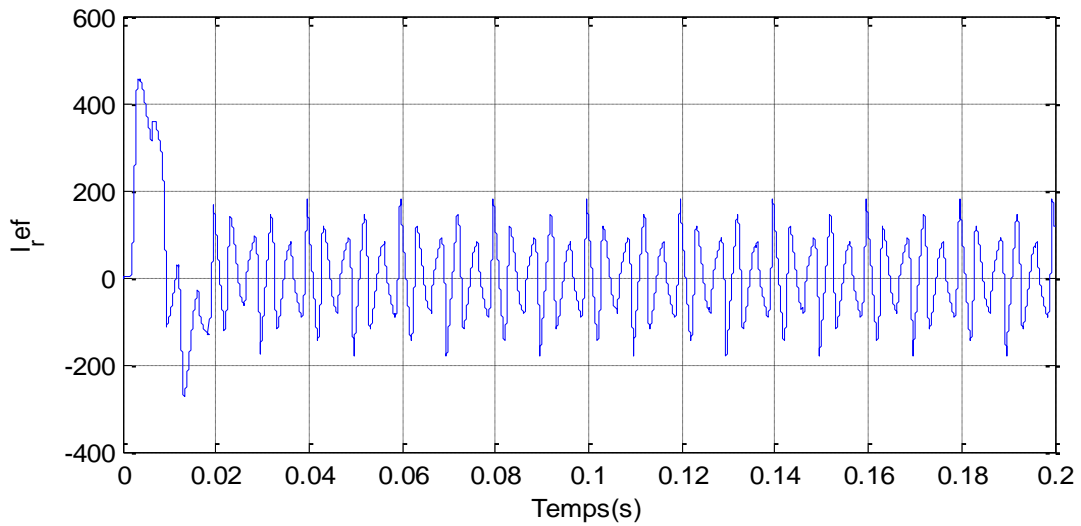


Figure. (II.15). courant du référence

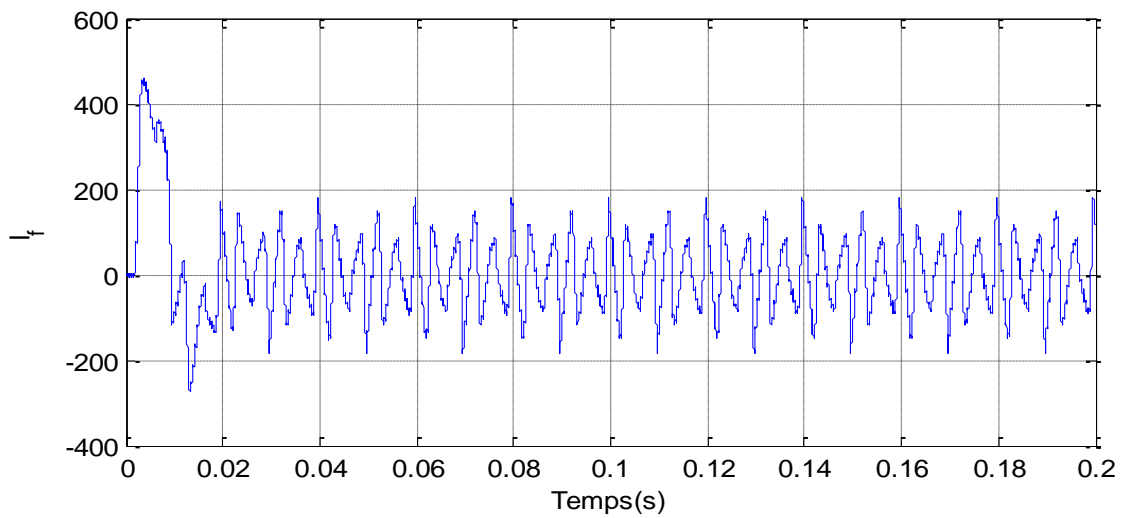


Figure. (II.16). courant injecté par filtre

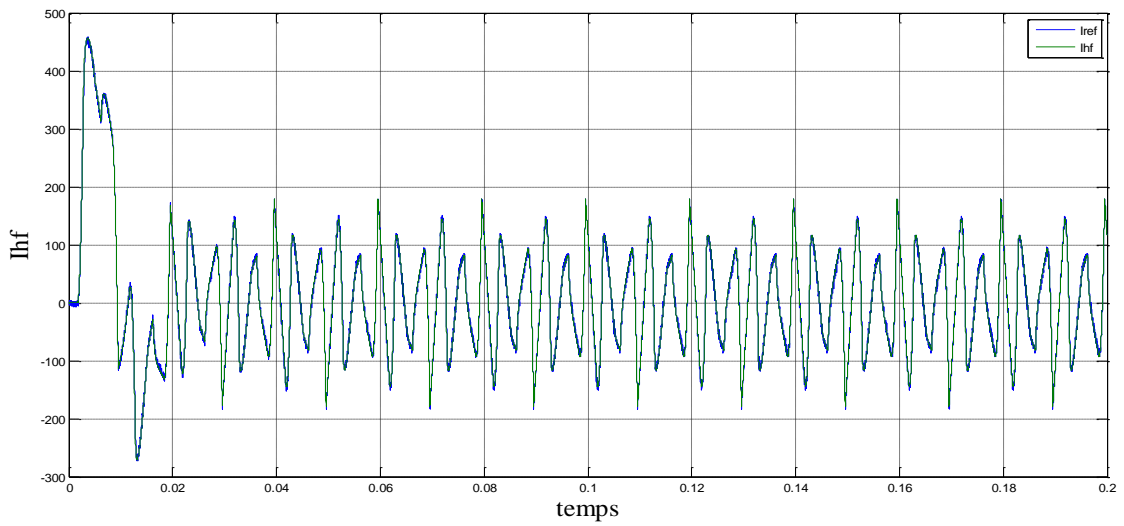


Figure. (II.17). courants harmonique et référence

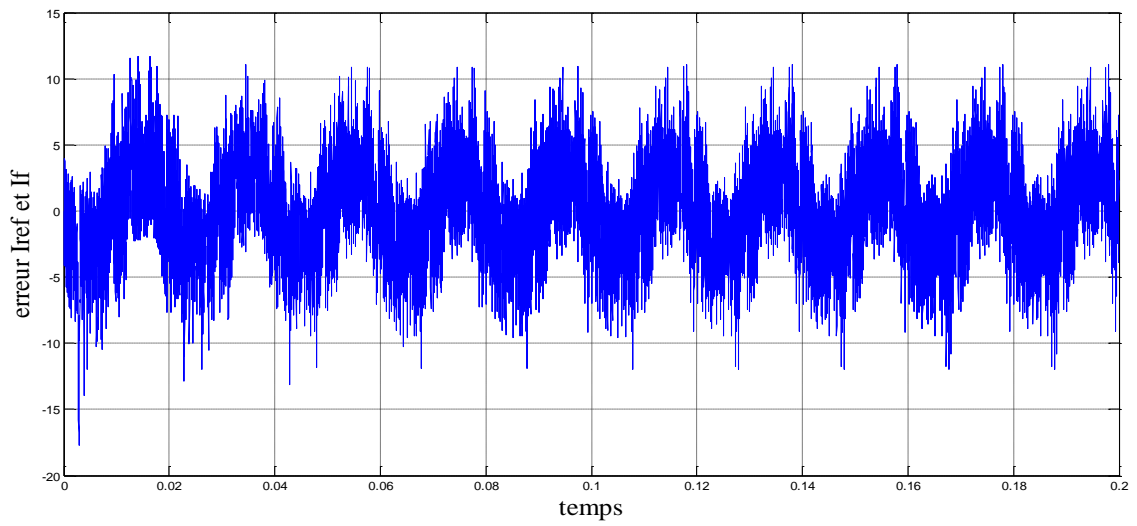


Figure. (II.18). l'erreur entre le courant harmonique de référence et courant du filtre

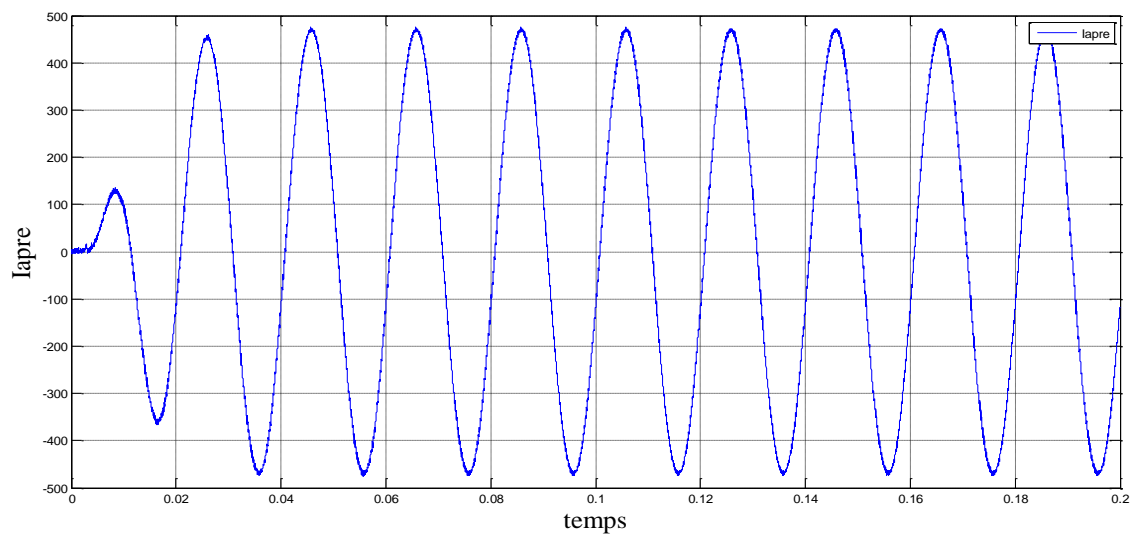


Figure. (II.19). courant de source

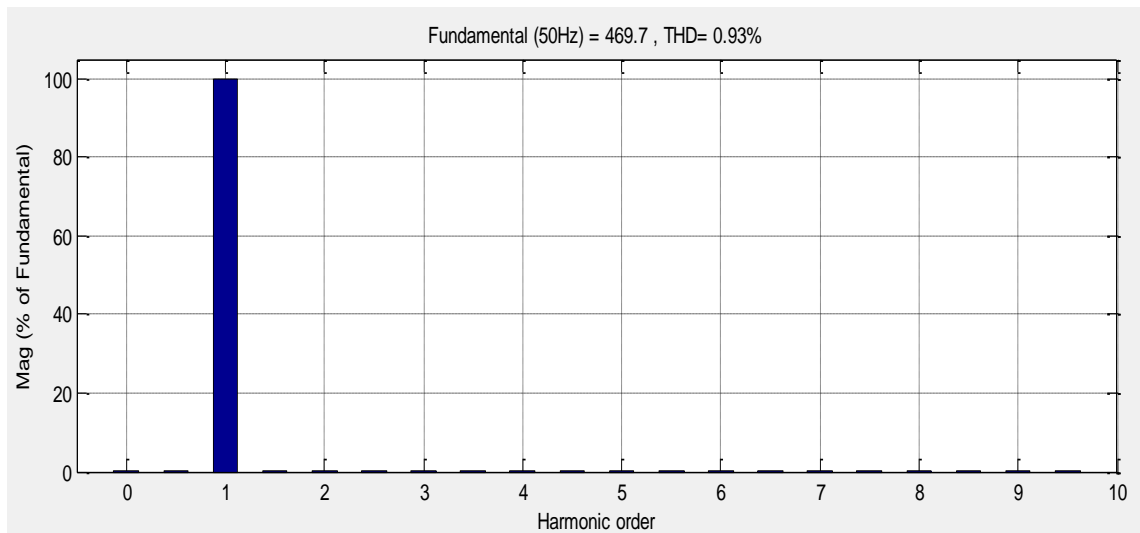


Figure. (II.20). spectre harmonique du courant de source après compensation

### II.4.1.3. Commande par MLI

#### II.4.1. 4. Tensions de source sinusoïdales équilibrées

Les résultats de simulation obtenus par la méthode  $p-q$  pour la phase (a), sont donnés par les Figures suivantes : Le THD était égal à 23.57 %, après compensation il s'est réduit à 3.76 %.

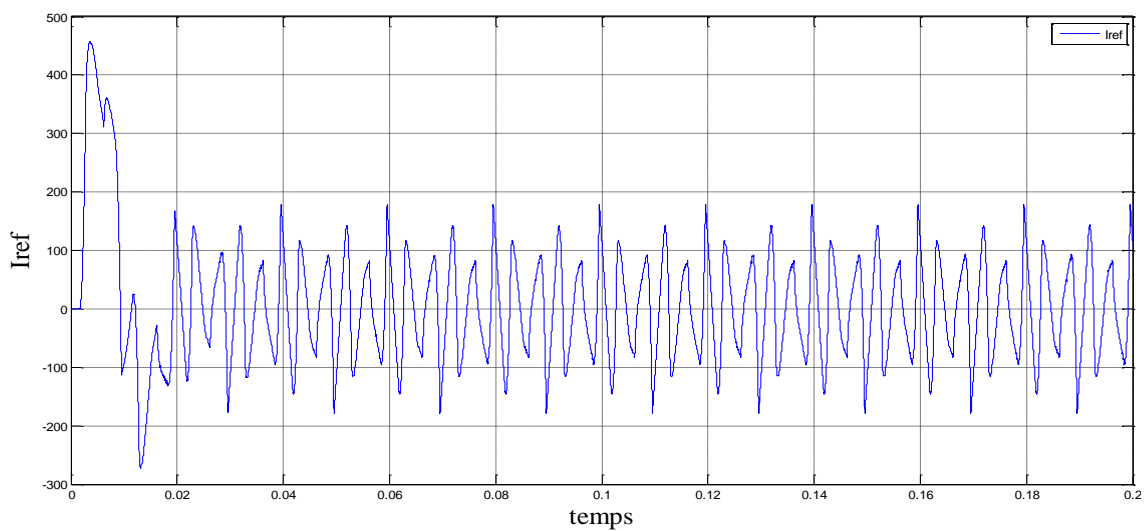


Figure. (II.21). courant du référence

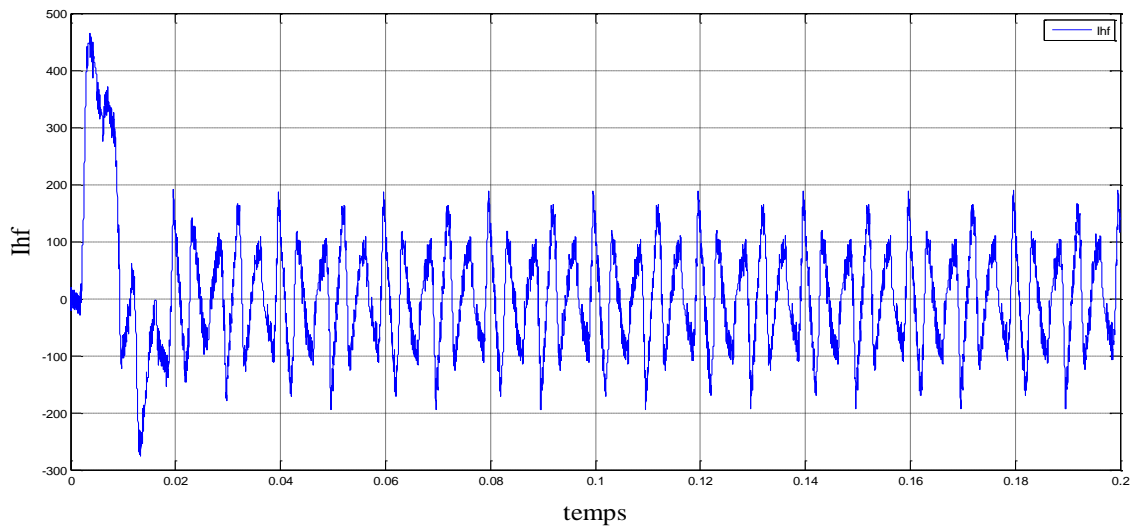


Figure. (II.22). courant injecté par filtre

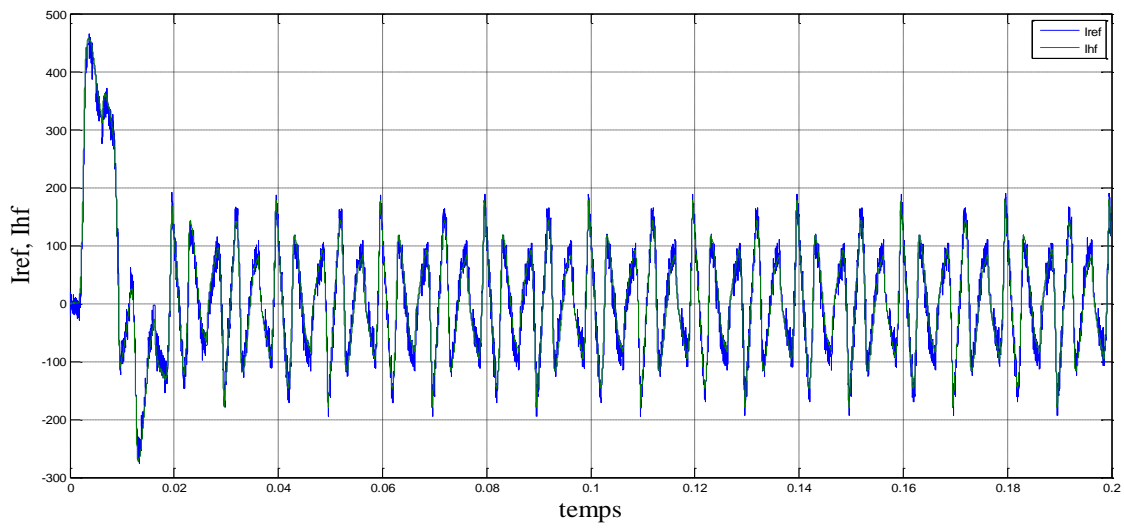


Figure. (II.23). courant harmonique et référence

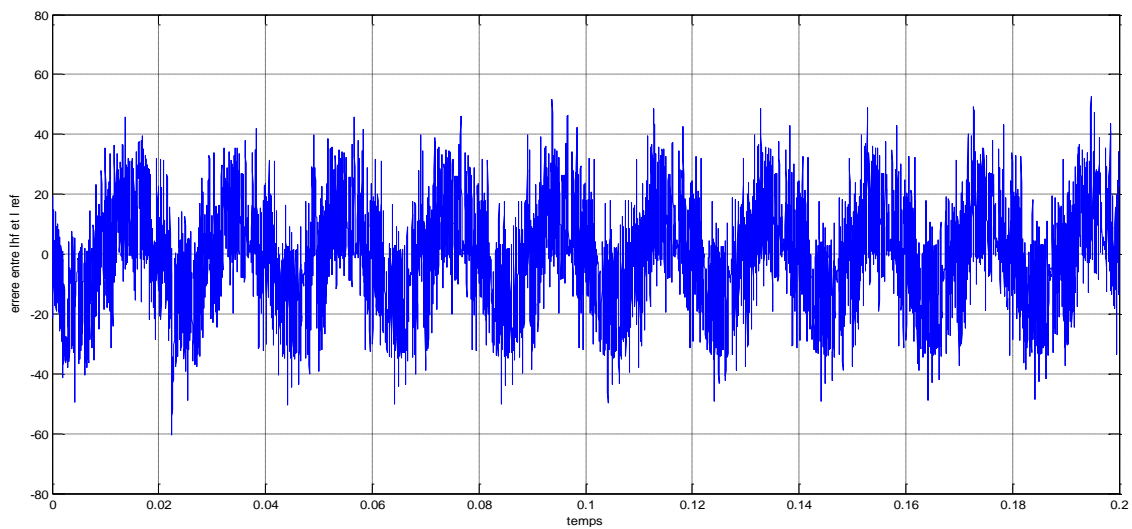


Figure. (II.24). l'erreur entre le courant harmonique de référence et courant filtre



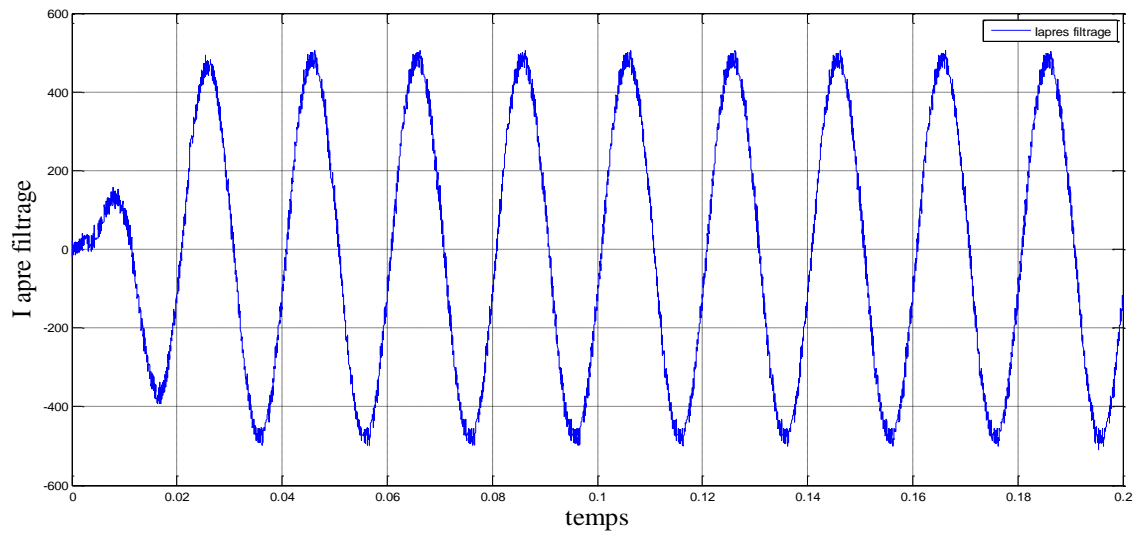


Figure. (II.25). courant de source

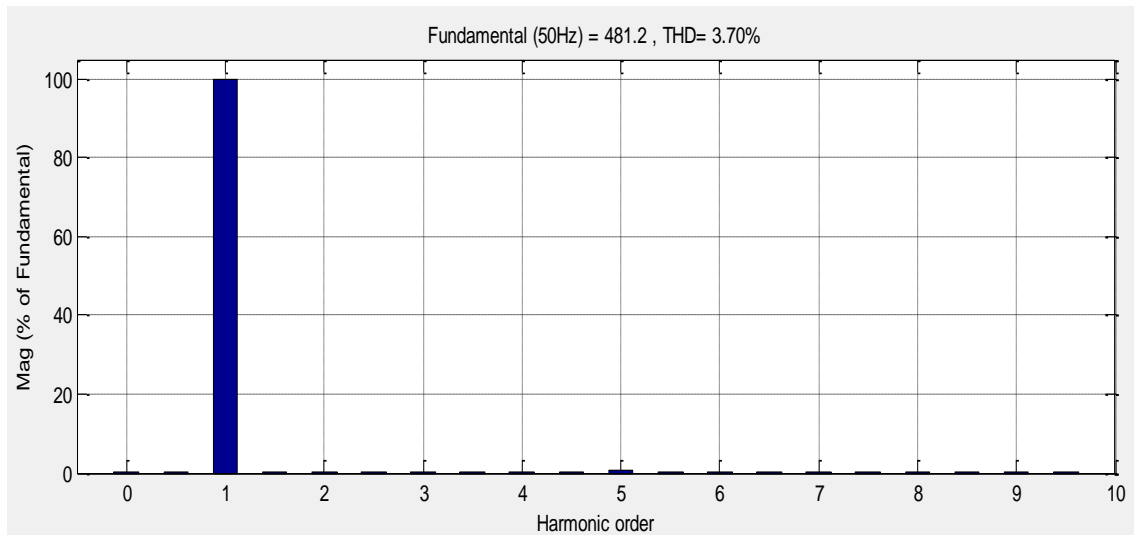


Figure. (II.26). spectre harmonique du courant de source après compensation

## II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié en détail le fonctionnement du filtre actif parallèle à deux niveaux : sa structure et les différents modèles. Puis, nous avons présenté la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées pour l'identification des courants de référence. Le choix de la méthode tient compte des fonctions du filtre. La tension appliquée dans la méthode d'identification est une tension triphasée fournie par le réseau.

La tension du réseau doit être saine (sinusoïdale et équilibrée), pour que la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées soit applicable. Dans sa forme classique, cette ne permet pas la détermination d'un courant harmonique d'un rang particulier. Etant donné que la tension du réseau est souvent déséquilibrée et/ou déformée et afin de généraliser l'application de cette méthode pour l'adopter à tout type de tension, nous proposons une méthode d'extraction des courants harmoniques basée sur l'utilisation d'un FMV. Nous avons constatés par les résultats de la simulation par cette nouvelle méthode, Le chapitre suivant sera consacré à l'étude du diagnostic du filtre actif parallèle à deux niveaux.

# *Chapitre III*

Diagnostic du filtre actif  
parallèle

## CHAPITRE III

### DIAGNOSTIC DU FILTRE ACTIF PARALLÈLE

#### III.1.Introduction:

Un processus industriel, est conçu pour réaliser une tâche. Cette tâche peut être totalement ou partiellement remplie, cela dépend du mode de fonctionnement dans lequel le processus se trouve.

Un mode de fonctionnement peut être :

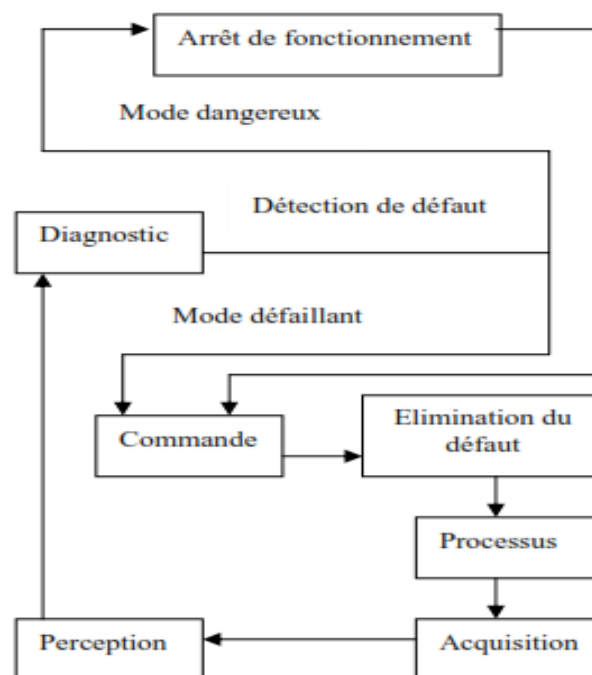
- normal sous lequel la mission est totalement remplie,
- ou anormal correspond à un dysfonctionnement du système entraînant une réalisation partiellement ou complètement non conforme de la tâche pour laquelle le processus est conçu.

Le diagnostic d'un processus est l'identification du mode de fonctionnement à chaque instant, par ses manifestations extérieures. Son principe général consiste à confronter les données relevées au cours de fonctionnement réel du système avec la connaissance que l'on a de son fonctionnement normal ou défaillant [FRA94],[SAY94]. Si le mode de fonctionnement identifié est un mode défaillant, le système de diagnostic peut localiser sa cause.

- **LES DIFFERENTES COMPOSANTES D'UN MODULE DE DIAGNOSTIC**

Le diagnostic continu d'un processus industriel permet d'améliorer la productivité par l'augmentation de la disponibilité.

La figure (III.1) montre les différentes composantes d'un module de diagnostic [MOU02].



**Figure (III.1):** Les composantes d'un système de diagnostic

## III.2. Méthodes de diagnostic

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses et variées, elles correspondent à la diversité des problèmes rencontrés, si la prise de décision conduit à déclarer le processus défaillant, il convient alors de choisir une méthode de diagnostic. Les méthodes de diagnostic sont divisées en deux grandes familles : [BOU 01]

- les méthodes internes.
- les méthodes externes.

### III .2.1. Diagnostic Par les méthodes internes

Le diagnostic de défaillances par des méthodes internes requiert un modèle du système à surveiller, et s'il n'y en a pas, en élaborer un qui convienne (fiable et suffisamment précis) ce modèle peut varier selon les objectifs. Il peut être plus ou moins agrégé, représentatif d'un modèle de bon fonctionnement ou de fonctionnement caractéristique d'une ou plusieurs défaillances. Habituellement un modèle est une description formelle (mathématique) du système à surveiller. Mathématiquement on peut avoir plusieurs modèles du même système qui comme en automatique. [BEN 07 ]

#### III .2.1.1.La méthode du modèle

Cette méthode consiste à comparer les grandeurs déduites d'un modèle représentatif du fonctionnement des différentes entités du processus avec les mesures directement observées sur le processus industriel. La présence d'un écart fournit l'indication qu'en amont du module modélisé une anomalie est en cours d'apparition. [BOU 01]

#### III .2.1.2.Redondance physique ou matérielle

La redondance physique consiste à utiliser plusieurs actionneurs, capteurs, processeurs et logiciels pour mesurer et/ou contrôler une variable particulière, un principe de vote est appliqué sur les valeurs redondantes pour décider si une faute est présente ou non. Cette approche entraîne un coût important en instrumentation mais s'avère extrêmement fiable et simple à implanter. Elle est mise en œuvre essentiellement sur des systèmes à hauts risques tels que les centrales nucléaires ou les avions.

Le diagnostic utilisant la redondance physique se limite la surveillance des éléments redondants (capteur, actionneurs, ...) présents sur une installation. A l'aide de cette unique technique, il ne sera pas possible de détecter des pannes survenant sur des éléments non redondants. [CAR 95 ]

#### III .2.1.3.Redondance analytique

Depuis les travaux fondateurs de Potter et Suman en 1977, le problème de génération de relations de redondance analytique a fait l'objet de très nombreux travaux. Ces notions ont ensuite été généralisées

par Labarrère et Mironovskii, puis par Chow et Willsky, et puis par Lou Willsky et Verghese pour l'emploi de la redondance temporelle, il consiste à exploiter les contraintes liant les différentes variables du système. Ces contraintes peuvent souvent s'exprimer sous la forme de relations analytiques liant les variables connues (relations d'entrée/sortie ou de sortie/sortie). Ces relations sont appelées relations de redondances analytiques. Le principe de la surveillance consiste à vérifier la fermeture algébrique de ces relations en utilisant les mesures prélevées en ligne sur le système. Le concept de redondance analytique repose sur l'utilisation d'un modèle mathématique du système à surveiller. Pour cette raison, les méthodes utilisant la redondance analytique pour la surveillance sont appelées méthodes à base de modèle. Le principe de la surveillance utilisant un modèle peut être séparé en deux étapes : la génération de résidus et la prise de décision. [BEN 07 ] [CAR 95 ]

### **III .2.2.Diagnostic Par les méthodes externes**

Ces méthodes supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine confortée par un solide retour d'expérience. Dans cette catégorie, on retrouve toutes les méthodes basées sur l'intelligence artificielle et/ou les approches probabilistes. [BOU 01]

#### **III .2.2.1. Méthodes basées sur l'intelligence artificielle (IA)**

En déception des diverses techniques citées précédemment, ces dernières années, la surveillance et la détection de défaut des machines électriques se sont éloignées des techniques traditionnelles pour s'orienter vers des techniques dites d'intelligence artificielle (IA). [BEN 07 ]

L'intelligence artificielle (IA) est une branche de l'informatique qui traite la reproduction par la machine de certains aspects de l'intelligence humaine tels qu'apprendre à partir d'une expérience passée à reconnaître des formes complexes et à effectuer des déductions.

Parmi ces méthodes nous pouvons citer :

##### **III .2.2.1.1. Reconnaissances des formes (RDF)**

Utilisées très peu à ce jour. Un vecteur de paramètres, appelé vecteur de forme, est extrait à partir de plusieurs mesures. Les règles de décision adoptées permettent de classer les observations, décrites par le vecteur de forme, par rapport aux différents modes de fonctionnement connus avec et sans défaut.

Pour classer ces observations, il faut obligatoirement être en mesure de fournir les données de chaque mode de fonctionnement. Pour cela, il faut disposer d'une base de données, ce qui permettra ensuite de construire la classe correspondante au défaut créé.

Une autre voie consisterait à calculer les paramètres du vecteur de forme en effectuant des simulations numériques de la machine étudiée. [COC 03]

La reconnaissance des formes "RdF" repose sur le classement des objets ou des formes en les comparants à des formes-types. De manière générale, 2 types de RdF se distinguent :

- La RdF structurelle qui se base sur une représentation des formes à l'aide de grammaires.
- La RdF statistique qui s'appuie sur une représentation numérique des formes. **[DID 04]**

À un mode de fonctionnement, correspondant à une classe, Pour cela, on procède comme suit :

- ❖ Choisir les paramètres représentant les observations, ce qui permet de définir l'espace de représentation.
- ❖ Réaliser une base d'apprentissage.
- ❖ Définir les différents modes de fonctionnement, ou classes.
- ❖ Construire une règle de décision permettant d'associer une nouvelle forme à un mode de fonctionnement. **[BEN 07]**

### III .2.2.1.2. Diagnostic par réseaux de neurones

Un réseau de neurone est un modèle de calcul dont la conception est très schématiquement inspirée du fonctionnement de vrais neurones humains donc Le principe s'inspire des neurones biologiques, pour identifier des défauts dans un système, le diagnostic réalisé par réseaux de neurones doit disposer d'un nombre suffisant d'exemples de bon fonctionnement et de défauts pour pouvoir les apprendre. Pendant la phase d'apprentissage, les exemples sont présentés au réseau en entrée avec les diagnostics correspondants à la sortie. **[DID 04]**

- L'intérêt des réseaux de neurones dans le domaine du diagnostic se résume en deux points :
  - 1) Le premier point est la faculté du réseau de neurones d'être utilisé en tant que règle de décision dans un processus d'automatisation de l'opération du diagnostic.
  - 2) Le second point est la faculté d'apprentissage et de mémorisation d'un grand volume d'information.

#### A. Les avantages des réseaux de neurones sont :

- ✓ Rapidité : Très utile lorsque le diagnostic doit être conduit en ligne.
- ✓ Robustesse : Un réseau de neurones est robuste surtout vis-à-vis du bruit.
- ✓ la principale raison de leur intérêt en diagnostic industriel est leur faculté d'apprentissage et la mémorisation d'un grand volume d'information. **[COC 03]**

#### B. Toutefois, un réseau de neurone présente des inconvénients tels que :

- ✓ L'apprentissage peut être long et difficile.
- ✓ L'apprentissage est gourmand en temps de calcul. Par ailleurs, il doit être réalisé sur toutes les données à la fois, avec le risque que le réseau oublie les résultats précédents.

- ✓ Un réseau de neurones ne fonctionnera pas, forcément, correctement hors de sa plage
- ✓ d'apprentissage L'inconvénient majeur est d'arriver à déterminer une méthodologie pour maîtriser les problèmes inhérents. [DID 04]

D'ailleurs, en ce qui concerne le diagnostic des machines électriques, cette méthode a été largement utilisée. Ritchie a proposé un système de reconnaissance et de classification des défauts de la machine asynchrone, Ce système est basé sur les réseaux de neurones à base de fonctions radiales (RBF). Le système développé par cet auteur permet la détection des défauts électriques et mécaniques de la machine asynchrone. Quatre vecteurs caractéristiques ont été extraits à partir des spectres de puissance des signaux vibratoires de la machine. Ces vecteurs sont fournis à l'entrée du réseau de neurones. Le système proposé permet, également, d'estimer la sévérité des défauts détectés.

"Filippetti" a utilisé les réseaux de neurones, notamment, pour la détection et l'estimation du nombre de barres cassées. [DID 04]

### III .2.2.1.3.Diagnostic par systèmes experts

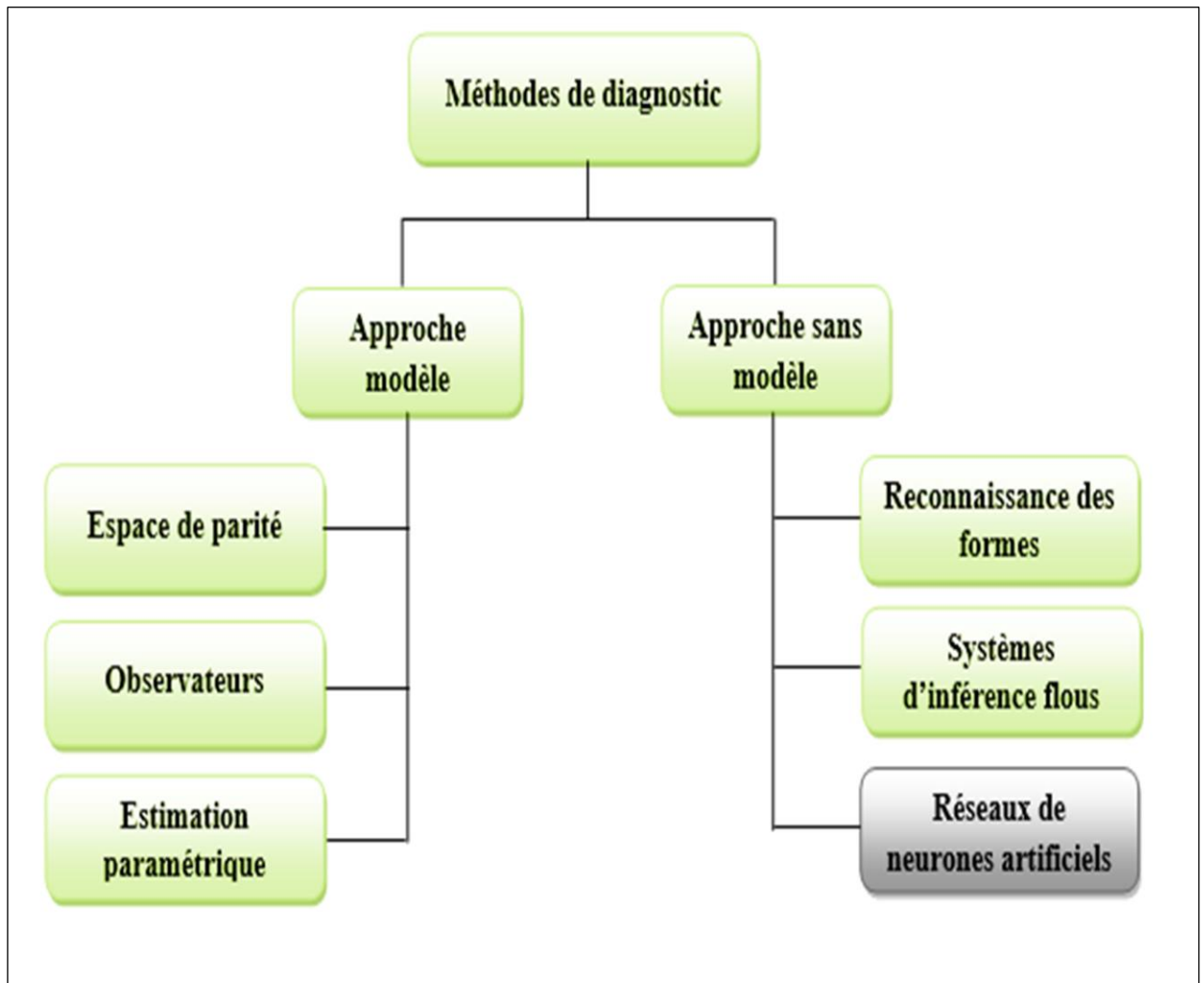
De manière générale, un système expert est un outil capable de reproduire les mécanismes cognitifs d'un expert, dans un domaine particulier. Cet outil est capable de répondre à des questions, en effectuant un raisonnement à partir de faits et de règles connus. Il peut donc servir d'outil d'aide à la décision, l'aide au diagnostic de systèmes industriels utilisant des systèmes experts possède l'intérêt et la propriété essentiels de pouvoir restituer à des non-experts les connaissances acquises par les spécialistes d'un domaine technique précis. « Un système expert est un système informatique destiné à résoudre un problème précis à partir d'une analyse et d'une représentation des connaissances et du raisonnement d'un (ou plusieurs) spécialiste(s) de ce problème». [BEN 07 ]

### III .2.2.1.4. Logique floue

La logique floue proposée par L.Zadeh dans les années 1965, a été introduite en 1969 par Goguen et est présentée comme un cadre pour le raisonnement approximatif, C'est la logique qui régit les mécanismes mentaux humains beaucoup plus souvent que la logique formelle, car si l'on a besoin d'interpréter un événement entaché d'incertitude, on procède assez souvent par donner des explications logiques en exploitant toutes les règles disponibles pour approcher le résultat obtenu. En d'autre terme, c'est la logique qui s'efforce d'apporter des solutions à un problème clef de toutes les réalisations pratiques en exploitant le savoir-faire de l'opérateur expert. Avant d'aborder, le raisonnement en logique floue, il est nécessaire de définir ses bases. [VAS 93]

En fin, les méthodes de diagnostique utilisé pour la surveillance de la machine asynchrone sont résumés dans le diagramme suivant :





**Figure (III.2):** principales méthodes utilisées en diagnostic des systèmes physiques.

### **III.3.Partie de simulation:**

A la suite on travaille sur l'une des méthodes de diagnostic externes, à savoir la méthode par un algorithme comparatif.

Il y a deux états de simulation:

- **Etat sain:** aucun défaut trouvé lors le fonctionnement de l'onduleur de tension.
- **Etat défaillant:** On crée un défaut dans chacun des transistors de l'onduleur pendant le deuxième demi temps de simulation.

Etat sain:

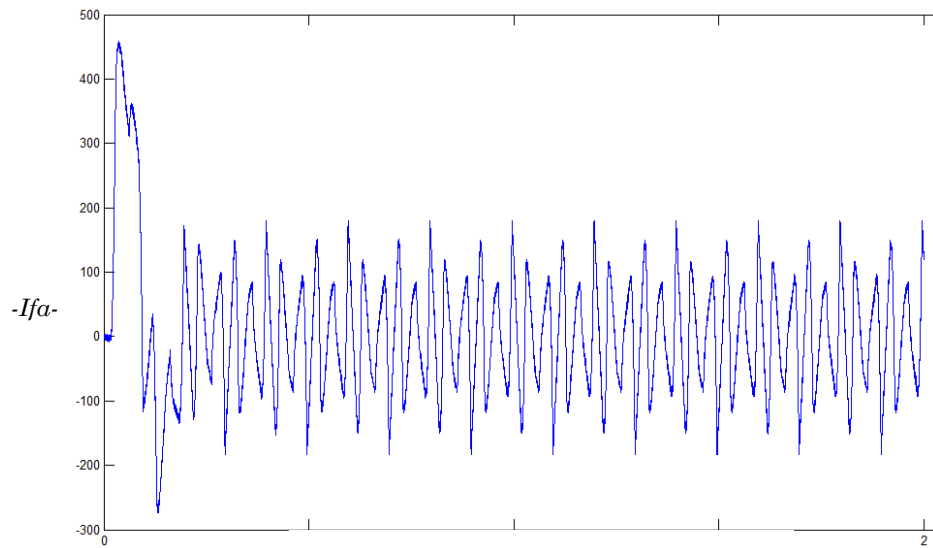


Figure (III.3) courant Ifa de filtre

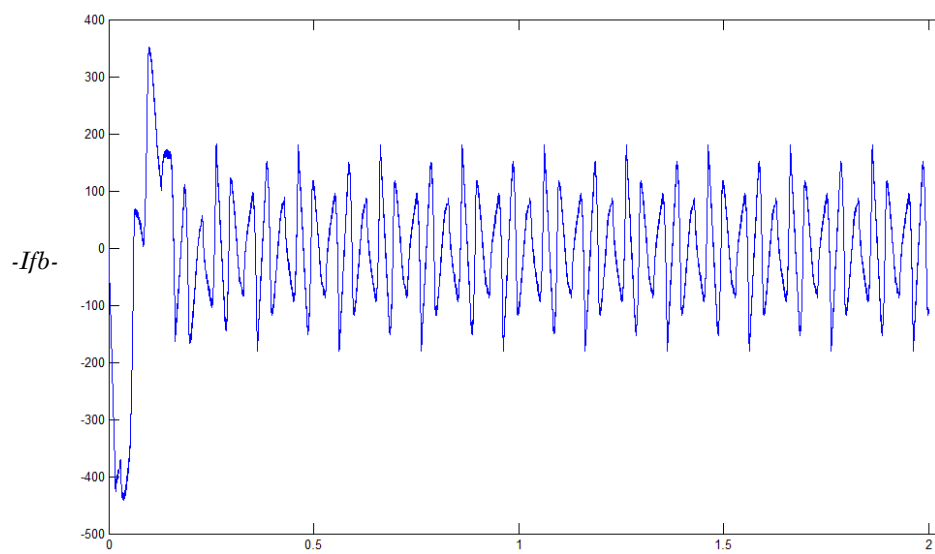


Figure (III.4) courant Ifb de filtre

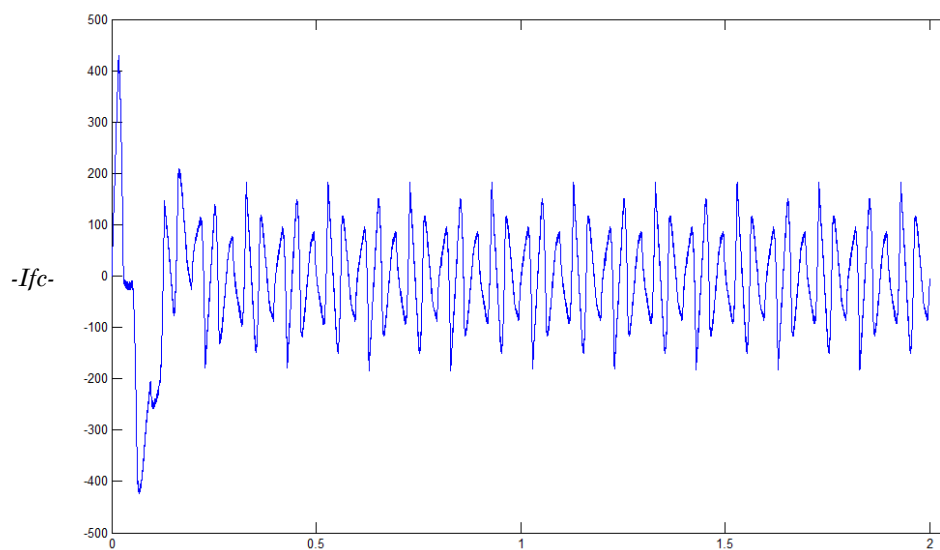


Figure (III.5) courant Ifc de filtre

**III .3.1. Interprétation des résultats de simulation en état sain:**

On remarque que les courants ifa, ifb et ifc sont pseudo symétries par rapport à

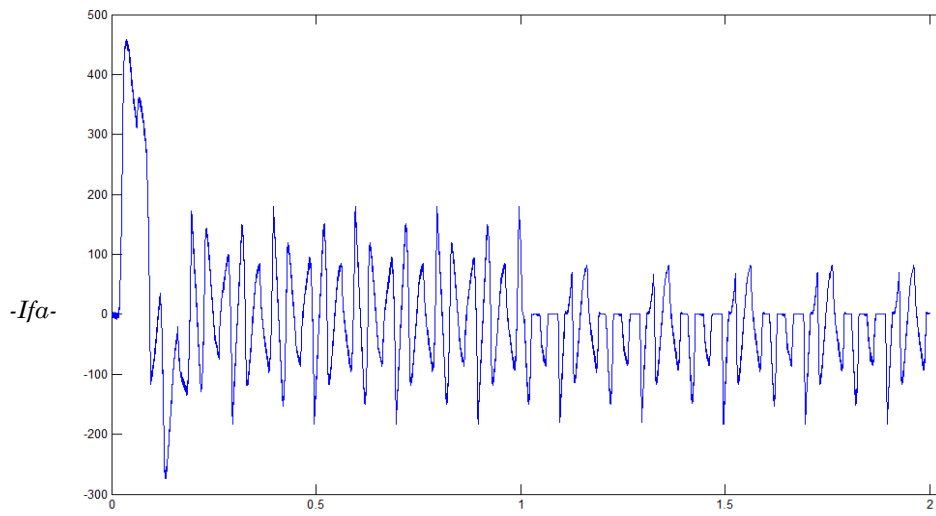
L'axe de l'équation  $I=0$ , et leurs valeurs moyennes sont simulées et données dans le tableau **(III.1)** telle que :

$$\bar{V}(\text{Ifa}) > 0$$

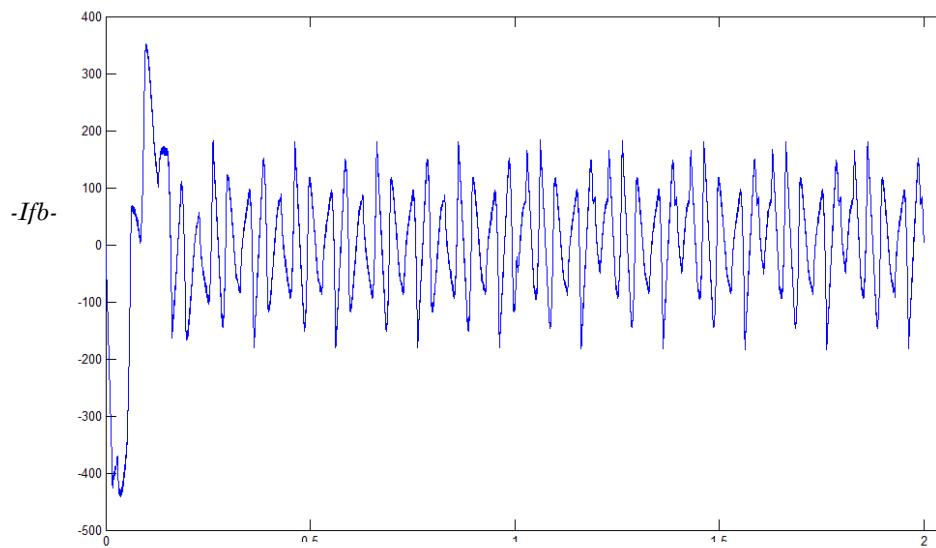
$$\bar{V}(\text{Ifb}) < 0$$

$$\bar{V}(\text{Ifc}) < 0$$

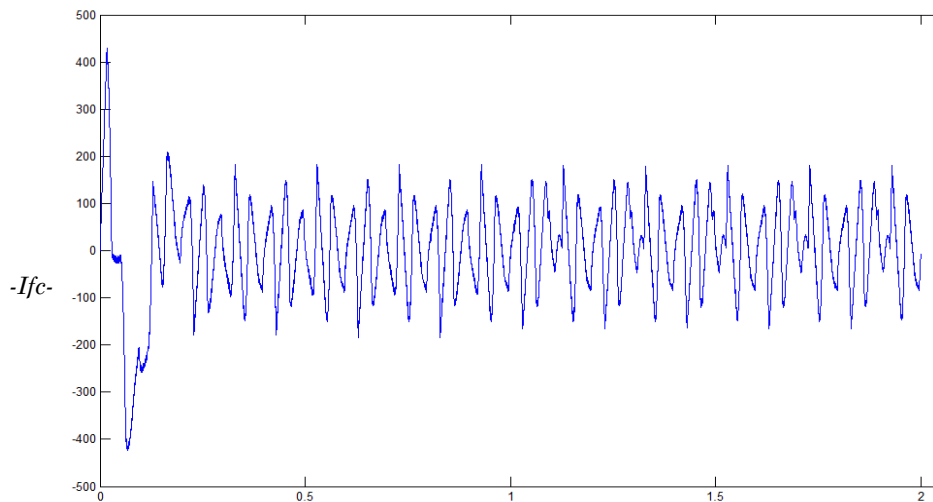
Si Ta1 défailant:



Figure(III.6): courant Ifa de filtre

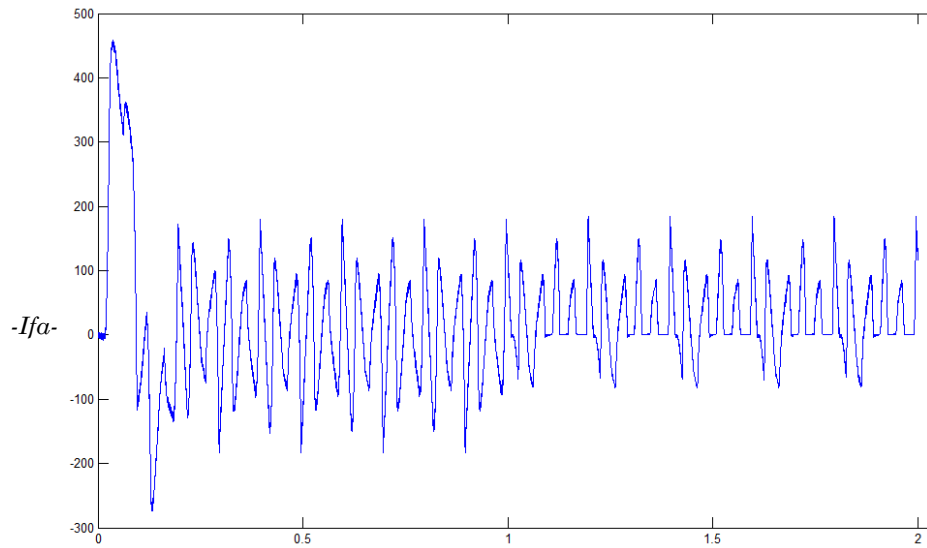


Figure(III.7): courant Ifb de filtre

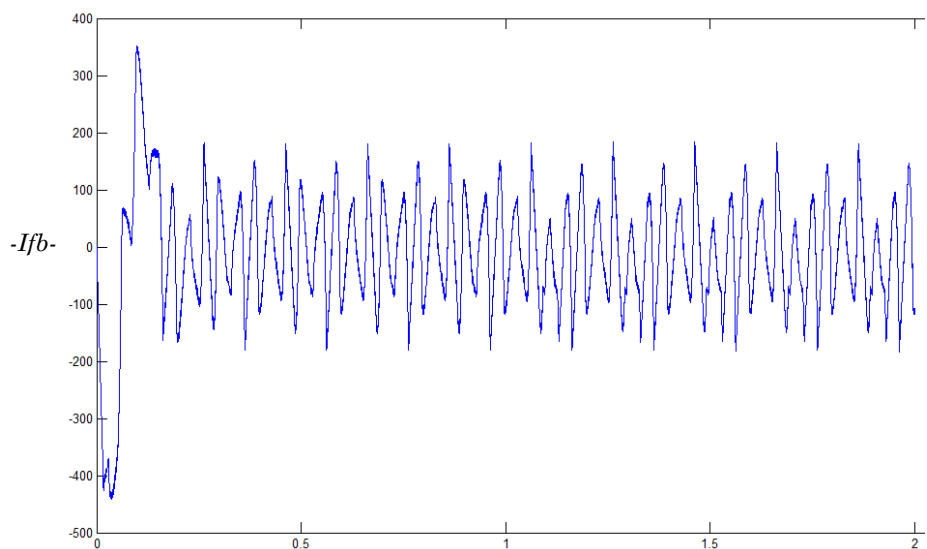


Figure(III.8): courant Ifc de filtre

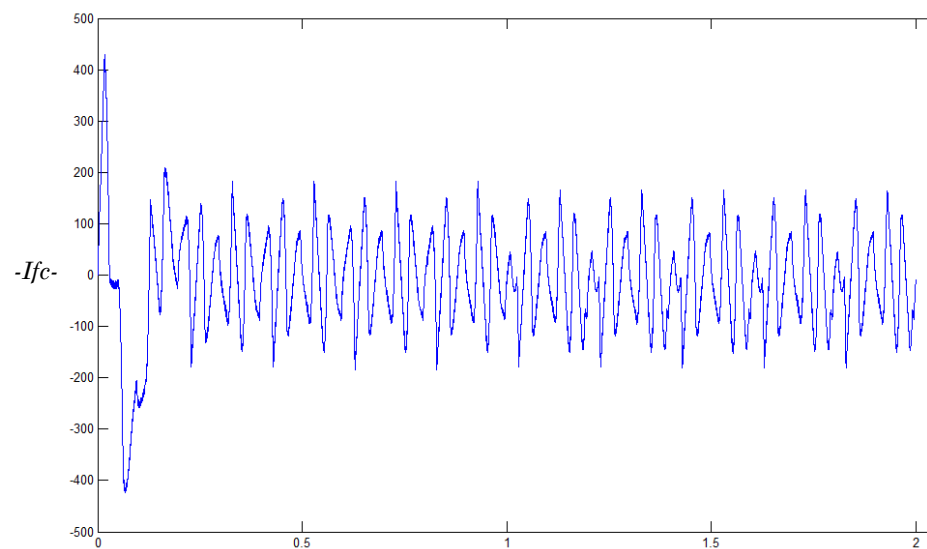
Si Ta2 défaillant:



Figure(III.9): courant I<sub>fa</sub> de filtre

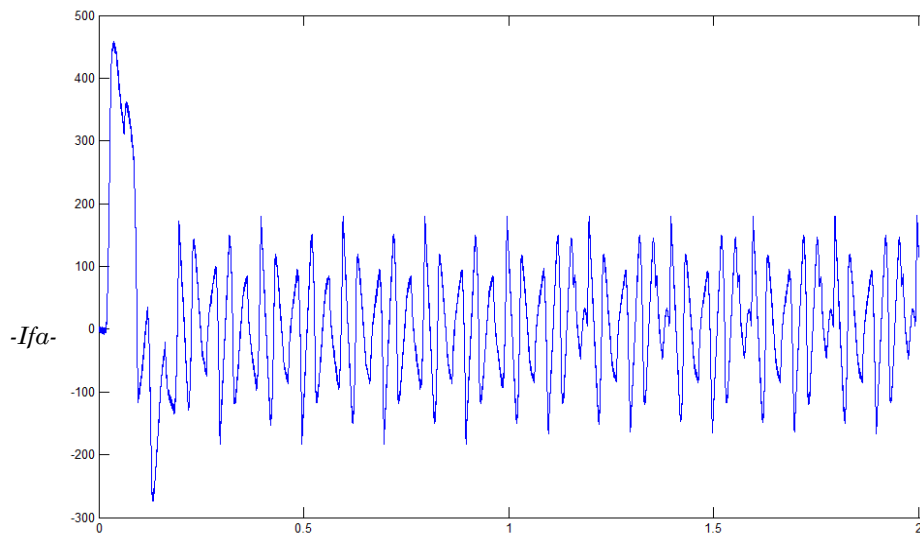


Figure(III.10): courant I<sub>fb</sub> de filtre

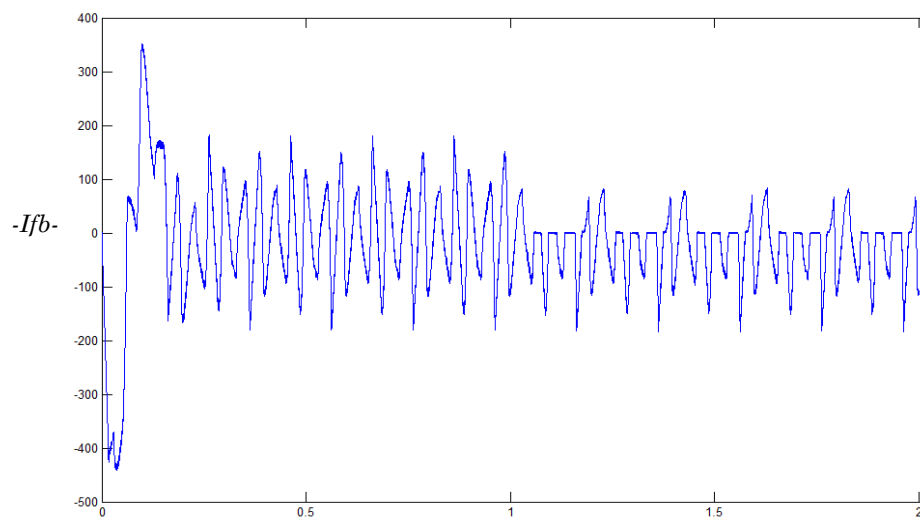


Figure(III.11): courant I<sub>fc</sub> de filtre

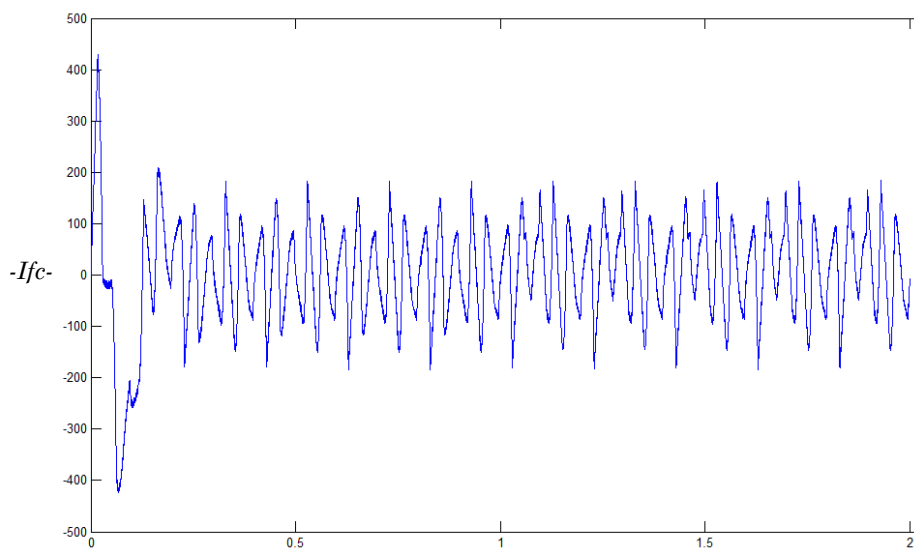
Si Tb1 défaillant:



Figure(III.12): courant  $I_{fa}$  de filtre

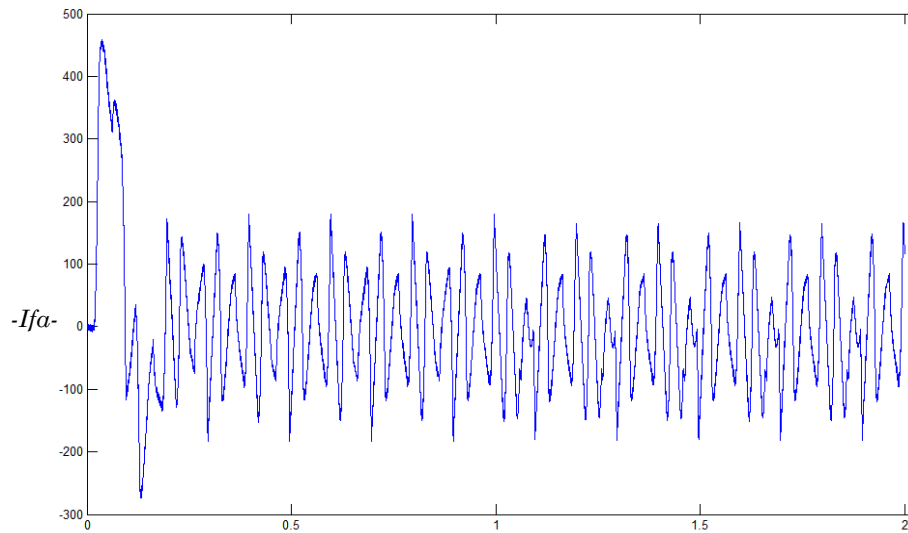


Figure(III.13): courant  $I_{fb}$  de filtre

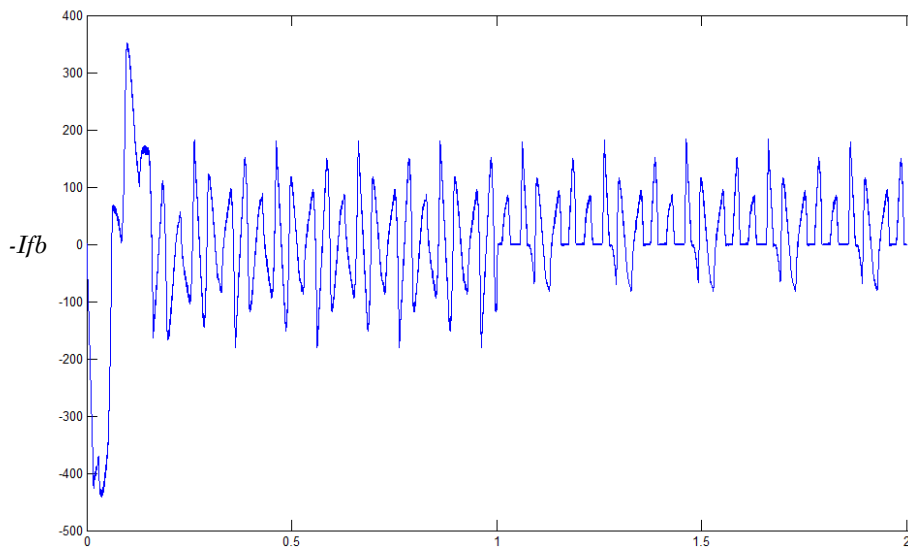


Figure(III.14): courant  $I_{fc}$  de filtre

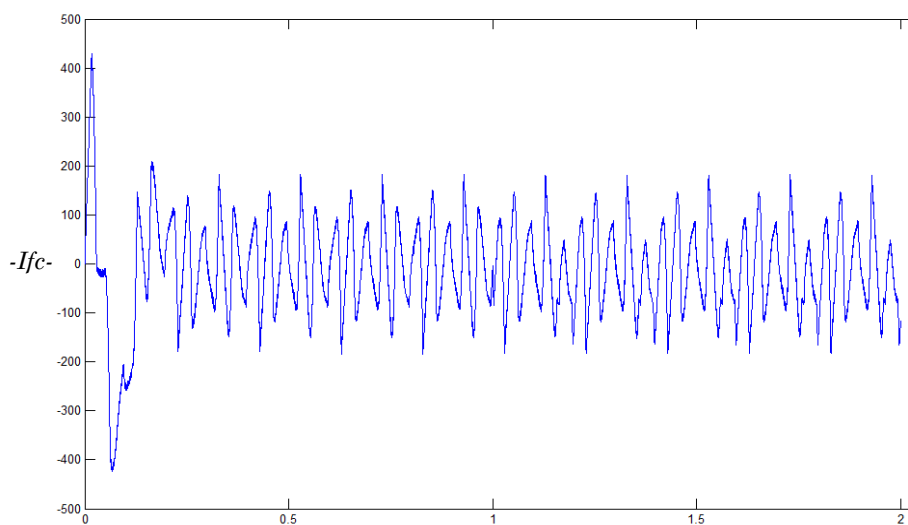
Si Tb2 défaillant:



Figure(III.15): courant Ifa de filtre

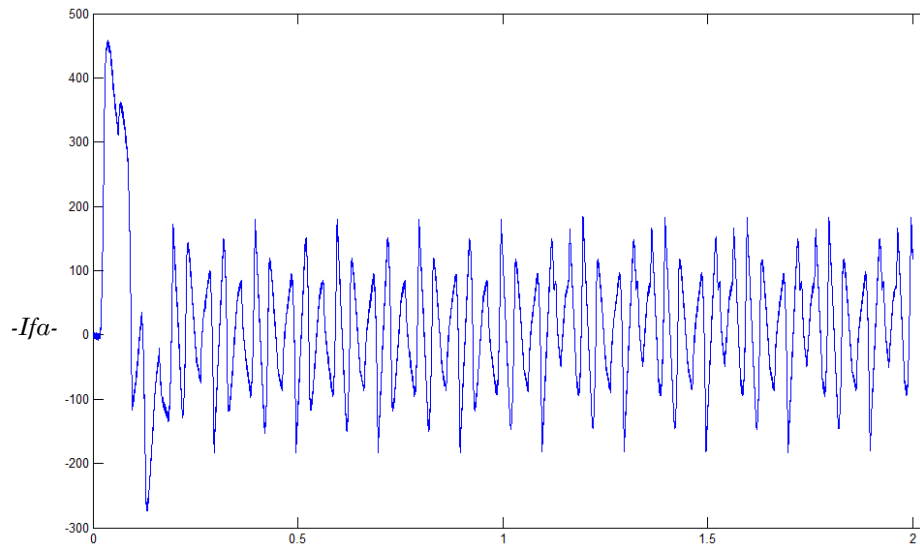


Figure(III.16): courant Ifb de filtre

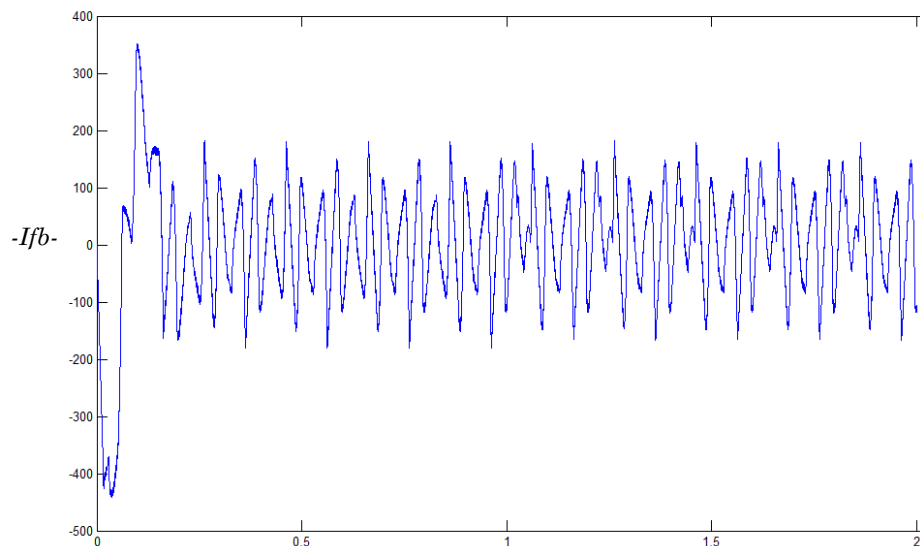


Figure(III.17): courant Ifc de filtre

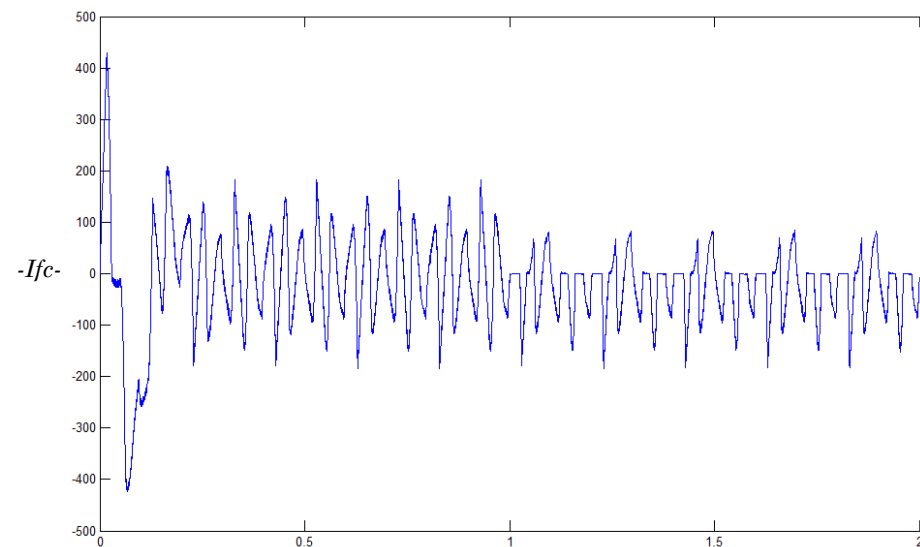
Si Tc1 défailant:



Figure(III.18): courant  $I_{fa}$  de filtre



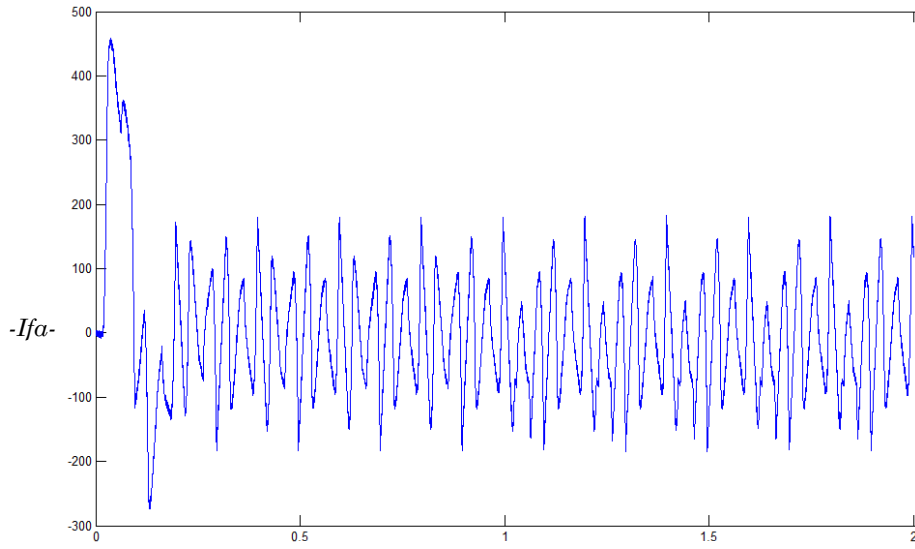
Figure(III.19): courant  $I_{fb}$  de filtre



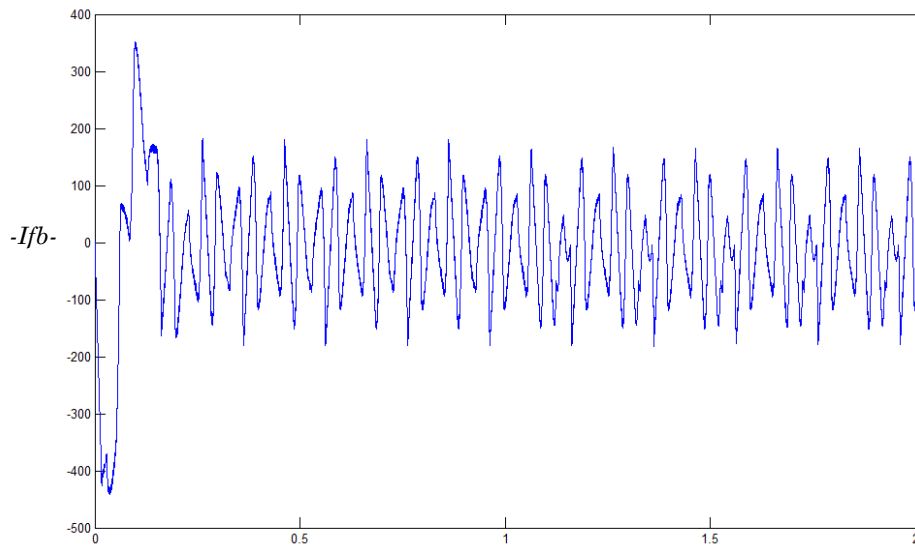
Figure(III.20): courant  $I_{fc}$  de filtre



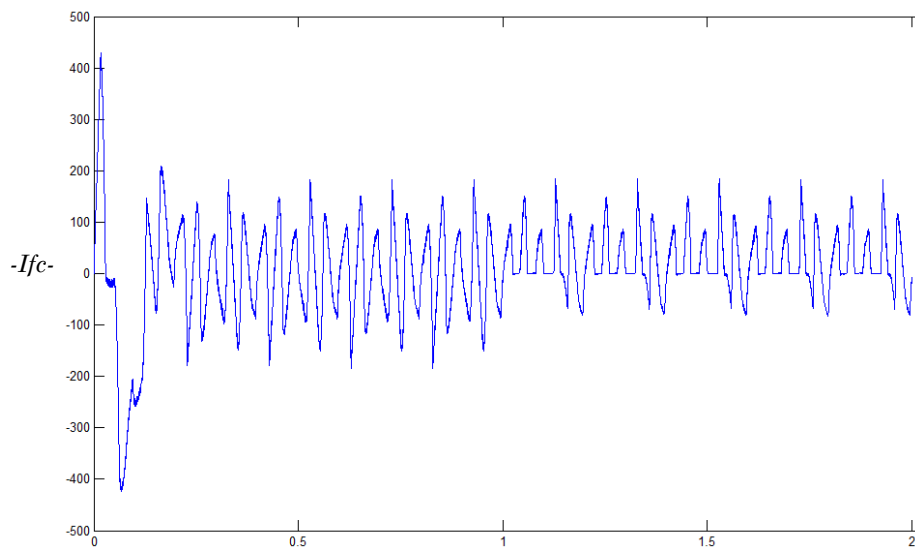
Si Tc2 défaillant:



Figure(III.21): courant Ifa de filtre



Figure(III.22): courant Ifb de filtre



Figure(III.23): courant Ifc de filtre

	<i>Ifa</i>		<i>Ifb</i>		<i>Ifc</i>	
	$\bar{V}$	<i>RMS</i>	$\bar{V}$	<i>RMS</i>	$\bar{V}$	<i>RMS</i>
<b>ETAT SAIN</b>	8.04	118.3	-3.887	109.8	-4.152	8.487
<i>Ta1</i>	-5.06	0.00498	3.014	4.942	2.046	4.937
<i>Ta2</i>	21.24	115.4	-10.93	108.3	-10.31	7.14
<i>Tb1</i>	14.19	114.6	-17.14	108.3	2.949	6.299
<i>Tb2</i>	1.804	115.7	9.293	0.005608	-11.1	115.7
<i>Tc1</i>	15.07	116.6	2.276	111.5	-17.35	5.056
<i>Tc2</i>	0.9582	120.5	-10.06	114.4	9.0199	6.076

**Tableau( III.1) : Les résultats de simulation en état sain et en état défaillant.**

Tel que :

$\bar{V}$ : La valeur moyenne du courant.

*RMS* : La valeur efficace du courant.

*Ifa* : Courant harmonique du filtre du bras a.

*Ifb* : Courant harmonique du filtre du bras b.

*Ifc* : Courant harmonique du filtre du bras c.

*Ta1*:transistor IGBT du bras a en haut.

*Ta2*: transistor IGBT du bras a en bas.

*Tb1*:transistor IGBT du bras b en haut.

*Tb2*:transistor IGBT du bras b en bas.

*Tc1*:transistor IGBT du bras c en haut.

*Tc2*:transistor IGBT du bras c en bas.

### **III 3.2. Interprétation des résultats en état défaillant :**

Du tableau précédent on constate que:

**Si Ta1 défaillant:**

$$\bar{V}(\text{Ifa}) < 0$$

$$\bar{V}(\text{Ifb}) > 0$$

$$\bar{V}(\text{Ifc}) > 0$$

**Si Ta2 défaillant:**

$$\bar{V}(\text{Ifa}) > 0$$

$$\bar{V}(\text{Ifb}) < 0$$

$$\bar{V}(\text{Ifc}) < 0$$

**Si Tb1 défaillant:**

$$\bar{V}(\text{Ifa}) > 0$$

$$\bar{V}(\text{Ifb}) < 0$$

$$\bar{V}(\text{Ifc}) > 0$$

**Si Tb2 défaillant:**

$$\bar{V}(\text{Ifa}) > 0$$

$$\bar{V}(\text{Ifb}) > 0$$

$$\bar{V}(\text{Ifc}) < 0$$

**Si Tc1 défaillant:**

$$\bar{V}(\text{Ifa}) > \bar{V}(\text{Ifa})E.S$$

$$\bar{V}(\text{Ifb}) > \bar{V}(\text{Ifb})E.S$$

$$\bar{V}(\text{Ifc}) < \bar{V}(\text{Ifc})E.S$$

**Si Tc2 défaillant:**

$$\bar{V}(\text{Ifa}) > 0$$

$$\bar{V}(\text{Ifb}) < 0$$

$$\bar{V}(\text{Ifc}) > 0$$

**Remarque:**

La comparaison des valeurs moyennes par apport a 0 dans chacun état défaillant ne donne aucune information sur localisation de défaut.

Par comparaison entre l'état sain et l'état défaillant des valeurs numériques de  $\bar{V}$  et  $RMS$ , on obtient que la valeur moyenne  $\bar{V}$  permet de distinction les six modes de déficiences, comme illustre l'Algorithme suivant:

## Algorithme proposé pour les différents types de défauts d'un onduleur à deux niveaux:

### Si Ta1 défaillant:

$$\bar{V}(Ifa) < \bar{V}(Ifa)E.S$$

$$\bar{V}(Ifb) > \bar{V}(Ifb)E.S$$

$$\bar{V}(Ifc) > \bar{V}(Ifc)E.S$$

### Si Ta2 défaillant:

$$\bar{V}(Ifa) > \bar{V}(Ifa)E.S$$

$$\bar{V}(Ifb) < \bar{V}(Ifb)E.S$$

$$\bar{V}(Ifc) < \bar{V}(Ifc)E.S$$

### Si Tb1 défaillant:

$$\bar{V}(Ifa) > \bar{V}(Ifa)E.S$$

$$\bar{V}(Ifb) < \bar{V}(Ifb)E.S$$

$$\bar{V}(Ifc) > \bar{V}(Ifc)E.S$$

### Si Tb2 défaillant:

$$\bar{V}(Ifa) < \bar{V}(Ifa)E.S$$

$$\bar{V}(Ifb) > \bar{V}(Ifb)E.S$$

$$\bar{V}(Ifc) < \bar{V}(Ifc)E.S$$

### Si Tc1 défaillant:

$$\bar{V}(Ifa) > \bar{V}(Ifa)E.S$$

$$\bar{V}(Ifb) > \bar{V}(Ifb)E.S$$

$$\bar{V}(Ifc) < \bar{V}(Ifc)E.S$$

### Si Tc2 défaillant:

$$\bar{V}(Ifa) < \bar{V}(Ifa)E.S$$

$$\bar{V}(Ifb) < \bar{V}(Ifb)E.S$$

$$\bar{V}(Ifc) > \bar{V}(Ifc)E.S$$

**III.4.Conclusion :** L'étude effectuée dans ce chapitre a été, particulièrement, dédiée à la simulation de fonctionnement en mode dégradé d'un FAP Pour la détection de défauts au niveau d'un onduleur à deux niveaux. Après une analyse détaillée d'évolution des différentes grandeurs électriques du FAP lors des différents défauts, les grandeurs indicatrices de défaut ont été bien choisies. Les valeurs moyennes des courants de phases du FAP peuvent être considérées comme indicateurs fiables de défaut.

# Conclusion générale

De nos jours, la qualité de l'énergie est un domaine de la plus haute importance. À l'heure où l'économie des pays industrialisés repose sur leurs capacités à produire ou à acheter l'énergie, l'utilisation adéquate et sans perte inutile est capitale. Ce projet, bien que ne touchant qu'un de ces domaines de la qualité de l'énergie pourtant si vaste, a permis de faire un bref survol de la problématique liée à la perturbation et la pollution harmonique sur les réseaux électrique ainsi que des différents moyens de mitigation utilisés. Une bonne compréhension de la problématique des harmoniques, de leurs influences sur le réseau électrique, ainsi que des moyens de mitigation existant pour les minimiser est maintenant devenue essentielle pour tout ingénieur travaillant dans le domaine de l'électrotechnique

Dans une première phase, nous avons effectué une étude théorique sur la problématique des perturbations harmoniques générées par des charges non linéaires connectées aux réseaux électriques. Puis, nous avons abordés différentes solutions, dont particulièrement le filtre actif parallèle. Des exigences de plus en plus strictes, des industries quant à la qualité de l'énergie, nous obligent à développer de nouvelles structures de filtres actifs plus performantes, afin d'obtenir de meilleurs résultats.

Dans la deuxième phase, nous avons étudié la commande du filtre actif parallèle deux-niveaux. L'efficacité du filtre actif dépend fortement de la méthode d'identification des courants de référence. La méthode choisie pour identifier les courants harmoniques est celle de l'identification des puissances réelle et imaginaire instantanées. Cette méthode nécessite des tensions de réseau saines pour identifier correctement les harmoniques du courant de charge. Parmi les possibles travaux futurs nous recommandons le développement de nouvelles méthodes de commande; de les comparer entre elles afin de trouver la meilleure.

Pour la détection de défauts au niveau d'un onduleur à deux niveaux, Après une analyse détaillée d'évolution des différentes grandeurs électriques du FAP lors des différents défauts, les grandeurs indicatrices de défaut ont été bien choisies. Pour l'onduleur à deux niveaux, les valeurs moyennes des courants de phases du FAP peuvent être considérées comme indicateurs fiables.

Comme perspectives à ce travail, nous préconisons d'approfondir les points suivants :

- La réalisation expérimentale.
- Considération d'autres types de défauts tels que : le transistor maintenu fermé, capteur de tension défaillant, capteur de courant défaillant, et coupure de phase

## Annexe

**Tableau:** Paramètres de simulation

Paramètre	Valeur numérique	
Réseau électrique	Es	220v
	Fréquence f	50hz
	Résistance Rs	3.63mΩ
	Inductance Ls	14.12uh
Charge perturbatrice	Résistance Rc	12.87mΩ
	Inductance Lc	105.98uh
	Résistance Rd	0.79Ω
	Inductance Ld	4.84uh
Filtre actif parallèle	Résistance Rf	12.87 mΩ
	Inductance Lf	450uh
	Tension Vdc	600v

## *Bibliographie*

[**MOH08**] Mohamed Muftah Abdusalam, "Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales," Thèse de Doctorat, Université H. Poincaré, Nancy-I, Mai 2008.

[**NAB07**] G. Nabil et R. Noui, "Application de filtrage actif parallèle sur une charge dynamique non linéaire," Mémoire d'ingénieur, Université de M'sila, 2007.

[**GHA11**] GHADBANE Ismail , " Commande d'un filtre actif triphasé parallèle par différents régulateurs," Mémoire de Magister, Université Biskra, 2011.

[**ALA02**] M. Alaa Eddin Alali, "Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension," Thèse Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 2002.

[**DJA05**] Djaffar Ould Abdeslam, "Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension," Thèse Doctorat, Université haut alsace, 2005.

[**TAR05**] G.Tarek, "Etude et réalisation d'un compensation actif de puissance commandé parDSP," Mémoire de Magister, Ecole militaire Polytechnique, 2005.

[**STE07**] Steeve Beaulieu, "Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmonique en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique," Mémoire de Fin d'Etudes, Université Québec à Chicoutimi, Mai 2007.

[**MED08**] K. Med Racim et B. Karim, "Paramètres de la qualité de la tension d'un réseau électrique étude et analyse," Mémoire d'ingénieur, Ecole nationale Polytechnique, Alger2008.

[**ABD04**] H. Abdelhamid, "Amélioration des performances du filtre actif : Application du régulateur proportionnel intégral et du régulateur flou," Mémoire de Magister, Ecole de Technologie Supérieure, Université Québec, Novembre 2004.



## ***bibliographie***

[**FAT01**] M. Fatiha, "Etude et commande d'un filtre actif parallèle à structure de tension," Mémoire de Magister, Université d'Oran, Octobre 2001.

[**KAM10**] Kamil Mohammed et Nouri Salih, "Commandes non linéaires d'un filtre actif parallèle," Mémoire d'Ingénieur, Université de M'sila, 2010.

[**THI10**] Thierry Gouraud, "Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique," Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1997.

[**ABD10**] Abdelmadjid Chaoui, "Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires," Thèse de Doctorat, Setif, 2010.

[**FAT09**] Fateh karim and Soumia Kerrouche, "Three-phase active power filter based on fuzzy logic," International Journal of Sciences and Techniques , Vol. 3, No.1, July 2009 , pp. 942-955.

[**BOU 01**] BOUMAGOURA.T «Recherche de signature électromagnétique que des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateur en vue du diagnostic», Ecole Doctorale électronique, électrotechnique, automatique de Lyon 2001

[**BEN 07**] BENNA .A, KHELIF .S et AOUICHAT .M « Détection des défauts de l'association convertisseur-moteur asynchrone a double stator par l'application des réseaux de neurones artificiels» Mémoire d'ingénieur, université de Mohamed Boudiaf M'sila, [2007]

[**CAR 95**] Caron .J.P et Hautier .J.P « Modélisation et commande de la machine asynchrone», Editions Technip, Paris, 1995.

[**COC 03**] Cocquempot.V, Chang .X, Christophe .C « Modélisation de la machine Asynchrone en présence de pannes stator »Université Lille 1, France 2003

[**DID 04**] Didier 2004 décrypte « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances» l'Université Henri Nancy-October 2004

[**VAS 93**] P. Vas, " Parameter Estimation, Condition Monitoring and Diagnosis of Electrical Machines ", Clarendon Press, Oxford, 1993.

[**FRA94**] FRANK P. M., 'Application of Fuzzy Logic to Process Supervision and Fault Diagnosis, IFAC Safeprocess',Helsinki, finland, 1994,vol.2, pp. 531-538.

## **bibliographie**

- [**SAY94**] SAYTER D., MARY N., SIROU F., THIELTGEN A., 'Fault diagnosis in system using fuzzy logic'. IEEE 1994 pp 883-888.
- [**ROD02**] J. Rodriguez, J.S. Lai, and F.Z. Peng, "Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 49, no. 4, pp. 724–738, August 2002.
- [**LIQ04**] W. Liqiao, L. Ping, L. Jianlin, and Z. Zhongchao, "Study on shunt active power filter based on cascade multilevel converters", in Proc. Power Electronics Specialists Conference, vol. 5, pp. 3512–3516, 20-25 June 2004.
- [**LAL09**] D. Lalili, "MLI vectorielle et commande non linéaire du bus continu des onduleurs multiniveaux : application à la conduite de la machine asynchrone", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique ENSP Alger, Avril 2009.
- [**FRA08**] François Defaÿ " commande prédictive directe d'un convertisseur multicellulaire triphasé pour une application de filtrage actif". l'institut national polytechnique de Toulouse ,décembre 2008.
- [**BUH91**] H. Buhler, "Convertisseurs statiques", Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne ,1991.
- [**DJE07**] H. Djeghloud, "Filtrage actif de puissance", Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, Décembre 2007.
- [**LAS07**] C. Lascu, L. Asiminoaei, I. Boldea, and F. Blaabjerg , "High performance current controller for selective harmonic compensation in active power filters", IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, no. 5, pp. 1826– 1835, September 2007.
- [**AKA83**] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits", in Proc. International Power Electronics. Conference, pp. 1375– 1386, Tokyo 1983.
- [**BEN04**] 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-I, Décembre 2004.

## **bibliographie**

[**KAR09**] S , KARIMI " Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototype "FPGA in the loop". application au filtre actif parallèle" Thèse de Docteur l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2009.

[**ALA02**] M.A. Alali, "Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension", Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, Septembre 2002.

[**GOU97**] T. Gouraud, "Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, Janvier 1997.

[**DEF08**] F. Defay, "Commande prédictive directe d'un convertisseur multicellulaire triphasé pour une application de filtrage actif", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Université de Toulouse, Décembre 2008.

[**OUL05**] D. Ould Abdeslam, "Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension", Thèse de Doctorat, Université de Haute-Alsace, Décembre 2005.

[**NEJ07**] M.A. Nejad, S. Pierfederici, J.P. Martin, and F.M. Tabar, "Study of an hybrid current controller suitable for DC-DC or DC-AC applications", IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, no. 6, pp. 2176–2186, November 2007.

[**HIL02**] HILMY AWAD, "Vector control of static series compensator for mitigation of voltage dips" Chalmers University of Technology Gotburg, Sweden 2002.

[**BER06**] A. L. D. H. 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 de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Novembre 2006.

[**JXU94**] J. Xu, "Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Janvier 1994.

## **bibliographie**

[**CHE11**] CHEBABHI Rabie et BOUDRAF Mustapha , "Modélisation et commande des différentes topologies des filtres actifs parallèles"université de m'sila 2011.

[**KOR**] KORICHE Abdelmadjid“ modelisation et commande d'un onduleur de tension multi niveaux de type ponts en cascade”, universite de m'sila.

[**MOU02**] MOUCHAWEH S. M., ‘Conception d’un système de diagnostic adaptatif et prédictif basé sur la méthode Fuzzy Pattern Mathing pour la surveillance en ligne des systèmes évolutifs. Application à la supervision et au diagnostic d’une ligne de peinture au trempé’, Thèse ddoctorat en Genie Informatique, Automatique et traitement du signal, Université de Reims ChampgneArdenne, 2002.

[**FRA94**] FRANK P. M., ‘Application of Fuzzy Logi to Process Supervision and Fault Diagnosis, IFAC Safeprocess’,Helsinki, finland, 1994, vol.2, pp. 531-538.

[**SAY94**] SAYTER D., MARY N., SIROU F., THIELTGEN A., ‘Fault diagnosis in system using fuzzy logic’. IEEE 1994 pp 883-888.

[**MOU02**] MOUCHAWEH S. M., ‘Conception d’un système de diagnostic adaptatif et prédictif basé sur la méthode Fuzzy Pattern Mathing pour la surveillance en ligne des systèmes évolutifs. Application à la supervision et au diagnostic d’une ligne de peinture au trempé’, Thèse de doctorat en Genie Informatique, Automatique et traitement du signal, Université de Reims ChampgneArdenne, 2002.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

SPECIALITE : **COMMANDE DES SYSTEMES ELECTRIQUE**

Proposé par : **Mr. BENYETTO Lotfi**

Présenté par : **AMROUNE Mourad**

**Thème**

**Commande et diagnostic d'un filtre actif parallèle**

**Résumé**

Dans ce travail nous exposons le problème de la dégradation du courant dans les installations électrique, qui découle directement de la prolifération des charges non linéaires, pour le résoudre, nous avons utilisé un onduleur à deux niveaux comme filtre actif parallèle, qui injecte des courants harmoniques au point de connexion avec une méthode de compensation dite la méthode des puissances active et réactive instantanées. La deuxième partie dans ce travail nous intéressons aux problèmes de détection et de localisation de quelques défauts dans un onduleur de tension utilisé comme filtre actif parallèle qui est destiné au filtrage des courants harmoniques avec la compensation de l'énergie réactive. Pour ce faire, une série de test de simulation, pour les différents défauts considérés, devra être effectuée afin d'extraire les différentes informations contenues dans les signaux électriques de l'onduleur.

**Mots clés** : Harmoniques, Commande à hysteresis, Commande à MLI, Diagnostic.

N° d'ordre : **159**