

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



**L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued**

**Faculté de la Technologie**

**Mémoire de Fin d'Études**

**En vue de l'obtention du diplôme de**

**MASTER ACADEMIQUE**

**Département de Génie Electrique**

**En commande électrique**

# **Thème**

**Amélioration de la qualité d'énergie dans les réseaux  
électrique**

Présenté par :

**NADJA Ridha**

**ARIF Abdelhalim**

Encadré par :

**Dr. ZELLOUMA Laid**

**Soutenu en Juin 2023**

## Résumé

Le grand développement réalisé dans le domaine électrique est l'utilisation des convertisseurs statiques qui forment des charges non linéaires et polluantes, cela a entraîné une mauvaise qualité de l'énergie électrique soit du courant ou de la tension. Il faut effectuer une procédure technique pour réduire les effets indésirables de ces harmoniques devenus nécessaires afin d'assurer la qualité requise de la puissance électrique.

A cet effet, ce mémoire présente d'abord les principales perturbations effectuées sur le réseau électrique, les méthodes d'identification des courants harmoniques, régulation de bus continue et commande de l'onduleur. Puis, nous avons étudié la méthode de puissances instantanées pour la commande d'un filtre actif parallèle, et nous avons simulé le FAP à partir de l'environnement Matlab /Simulink.

Les résultats obtenus prouvent que le filtre actif nous permet d'avoir des résultats très satisfaisants avec des THD de courants de source conforme aux normes (inférieurs à 5%).

### **Mots clés:**

Courant harmonique, Taux de distorsion d'harmonique, Filtre actif parallèle (FAP), La commande directe de puissance (DPC), DSPICE 1104.

---

## **Abstract**

The tremendous development in the field of electricity has brought about many problems on different electrical networks, especially low voltage networks. One of the most important forms of this development is the use of static transformers that in turn form non linear or polluting loads that in turn affect the quality of current or electrical tension. Therefore, we must have a technical procedure to reduce the undesirable effects of these harmonics become necessary in order to ensure the required quality of electrical power .

To this end, display this message the main disturbances affecting the electrical network, the methods of identifying harmonic currents and continuous bus regulation. Then, we have studied the technique of direct power control (DPC) of a parallel active filter; we will validate the simulation results obtained from the Matlab / Simulink environment and then validated by a experimental test bench .

The shunt active filter based on the proposed control strategy has shown good performance in reducing the total harmonic distortion of the source current to less than 5% satisfying the international recommendation.

Key words:

Harmonic current , shunt active power filter , total harmonic distortion , direct power control (DPC) , DSPACE1104 .

---

## الملخص

احدث التطور الهائل في مجال الكهرباء عديد المشاكل على الشبكات الكهربائية المختلفة خصوصا شبكات الجهد المنخفض, فمن أهم أشكال هذا التطور هو استخدام المحولات الساكنة التي بدورها تشكل حمولات غير خطية أو ملوثة التي بدورها تؤثر على جودة التيار أو التوتر الكهربائي لذلك, يجب علينا إجراء تقني لتقليل التأثيرات الغير مرغوب فيها لهذه التوافقيات التي أصبحت ضرورية من اجل ضمان النوعية المطلوبة للطاقة الكهربائية .

تحقيقاً لهذه الغاية ؛ تعرض هذه الرسالة الاضطرابات الرئيسية التي تؤثر على الشبكة الكهربائية وطرق تحديد التيارات التوافقية وتنظيم الناقل المستمر . بعد ذلك , درسنا تقنية التحكم المباشر في الطاقة (DPC) لمرشح فعال متوازي , وسوف نتحقق من صحة نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها من بيئة Matlab / Simulink وعن طريق التجربة العلمية تم تنفيذ التجربة في الوقت الحقيقي بفضل بطاقة التحكم لنظم.. DSPACE1104

النتائج المتحصلة عليها تثبت ان المرشح الفعال يتيح لنا الحصول على نتائج جيدة جدا THD اقل من 5% وذلك ما يتوافق القوانين والنظم الدولية

الكلمات المفتاحية

التيارات التوافقية, المرشح الفعال المتوازن, معامل تشويه التيار, التحكم المباشر في الطاقة DPC

DSPACE1104.

# *Dédicace*

*Je tiens à remercier en premier lieu dieu le tout  
puissant qui M'a donné le courage et la patience  
et qui a éclairé mon chemin Pour achever ce travail.*

*C'est tout plein de joie que je dédie ce travail à ceux  
qui m'ont été une source d'inspiration et de volonté ;*

*A ma mère et mon père pour leurs encouragements  
et conseils durant la période de mes études ;*

*Je le dédie à mes très chers frères et soeurs ;  
A toute ma grande famille ;*

*Une dédicace à tous mes amis,  
ET pour tous ceux qui me connaissent ;*

*A la fin je dédie très chaleureusement ce mémoire,  
à mon binôme.*

*ARIF Abdelhalim*

---

# *Dédicace*

*Merci Allah de m'avoir donné la capacité  
d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire,  
la patience d'aller jusqu'au bout de la réussite.*

*Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donnée  
la vie et la tendresse qui s'est sacrifiée pour  
mon bonheur et ma réussite,*

*à ma mère, à mon père, à mes frères, à ma grande mère  
et à toutes mes tantes.*

*A mes amis qui ont été mon ombre durant  
toutes les années de mes études,  
Je leurs dédie ce travail. A mon binôme.*

*NADJA Ridha*

---

## Remercement

*Nous remercions ALLAH qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage pour réaliser ce mémoire.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et notre profonde gratitude à encadreur Monsieur **Dr. ZELLOUMA Laïd** de nous avoir encadré dans notre mémoire de fin d'étude.*

*Nous sommes très reconnaissant les professeurs d'université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued , Surtout les professeurs du faculté de Technologie pour leur bénéfice à nous.*

*Nous tenons aussi à remercier également le président de Jury et les membres du jury de nous avoir honorés en acceptant de juger et d'évaluer notre travail.*

*Nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*A. Abdelhalim, N. Ridha*

## LISTE DES SYMBOLES

$U_f$	La tension de fourniture(V).
$U_n$	La tension nominale de réseau électrique (V).
$h$ ou $k$	La range des harmoniques.
$f_h$	La fréquence de la composante harmonique de rang $h$ ( $H_z$ ).
$f_1$	La fréquence de la composante fondamentale( $H_z$ ).
$f, f_s$	La fréquence fondamentale du réseau( $H_z$ ).
$S(t)$	Un signal périodique peut représenter un courant(A)ou une tension (V).
$T$	Un période (S).
$\omega, \omega_s$	La pulsation de réseau ( $rad/s$ ).
$a_0$	Composante continue de la signal $S(t)$ périodique.
$a_n, b_n$ ou $a_h, b_h$	Sont les coefficients de la série de Fourier.
$C_h$	L'amplitude l'harmonique de rang $h$ .
$\theta_h$	Phase de l'harmonique de rang $h(^{\circ})$ .
$C_{eff}$	La valeur efficace de l'amplitude l'harmonique de rang $h$ .
$S_{eff}$	La Valeur efficace d'une grandeur d'harmonique.
$S_{eff_h}$	Les valeurs efficaces des différentes harmoniques du signales.
$S$	La puissance apparente (VA).
$P$	La puissance active (W).
$Q$	La puissance réactive(Var).
$D$	La puissance déformante.
$V$	La tension (V).
$I_{eff_h}$	La valeur efficace du courant de l'harmonique(A).
$\varphi_1$	Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente(degré).
$\gamma$	Le déphasage entre $S_1$ et $S$ .
$S_1$	la puissance apparente dans le cas d'un système équilibré linéaire.
$\varphi$	Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente $S$ .
$N$	Un nombre de convertisseur triphasé.
$P$	Indice de pulsation.
$M$	Sera à indice de pulsation.
$f_r$	Fréquence de résonance ( $H_z$ ).
$L$	L' inductance(H).
$C$	le condensateur(F).
$R$	Le résistance( $\Omega$ ).
$i_{inj}, i_f$	Courant injecte dans la réseau par filtre actif parallèle(A).
$v_{inj}$	Tensions injecte dans la réseau par filtre actif série (V).



## Liste des Symboles

---

$I_d$	Le courant de charge coté continu(A).
$U_d$	La tension de charge coté continu(V).
$P_{cc}$	Point de couplage commun.
$i_{c_a}$	Courant de la charge active (A).
$i_{c_r}$	Courant de la charge réactive(A).
$i_h$	Courant de la charge harmonique(A).
$i_f \{1,2,3\}$	Le courant fournit par le filtre actif (A).
$i_s \{1,2,3\}$	Le courant fournit par la source(A).
$L_c \{1,2,3\}$	Inductance du réseau couté charge (H).
$R_c \{1,2,3\}$	Résistance du réseau couté charge( $\Omega$ ).
$R_s \{1,2,3\}$	Résistance du réseau couté source( $\Omega$ ).
$L_s \{1,2,3\}$	Inductance du réseau couté source(H)
$e_s \{1,2,3\}$	Tensions simples du réseau au début de la ligne (V).
$R_f \{1,2,3\}$	Les résistances de couplage( $\Omega$ ).
$L_f \{1,2,3\}$	Les inductances de couplage(H).
$v_s \{1,2,3\}$	Tension de source(V).
$v_{dc}$	Tension aux bornes du condensateur(V).
$i_{dc}$	Courant aux bornes du condensateur(A).
$C_{dc}$	Capacité du condensateur (F).
$S\{1,2,3,4,5,6\}$	Etats des interrupteurs de l'onduleur.
$C_f$	Capacité de filtre de sortie(F).
<b>N</b>	La neutre.
$C\{1,2,3\}$	Etats logiques de la commende de l'onduleur.
$\alpha, \beta$	Paramètres du repère de <i>Clark</i> .
$f_c'$	La fréquence de commutation des interrupteurs du filtre actif.( $H_z$ ).
$\Delta v_{dc}$	Différence entre les tensions du condensateur $v_{dc1}, v_{dc2}$ .
$v_{dc_{max}}$	Tension maximale aux bornes du condensateur(V).
$v_{dc_{min}}$	Tension minimale aux bornes du condensateur(V).
$\omega_h$	La pulsation la plus faible des harmoniques à compenser (rad/s).
$v_{f_{max}}$	La valeur maximale de la tension à l'entrée de l'onduleur(V).
$v_{s_{max}}$	La valeur maximale de la tension simple au point de raccordement du filtre(V).
$\Delta T$	La période de variation du courant du filtre
$f_{ond}$	La fréquence de variation du courant du filtre.
$\alpha$	La pente de la porteuse triangulaire.

Liste des Symboles

---

$\varepsilon$	L'amplitude de l'onde triangulaire.
$f_c$	Fréquence de coupure ( $H_z$ ).
$v_s(\alpha, \beta, 0)$	Tensions estimées du réseau électrique au point de raccordement du filtre actif dans le repère stationnaire(V).
$i\{\alpha, \beta, 0\}$	Courants du réseau électrique dans le repère stationnaire (A).
$i_{ch}\{1, 2, 3\}$	Courants de charges(A).
$i_n$	Courant du neutre (A).
$i_0$	Courant homopolaire(A).
$p(t)$	Puissance réelle(W).
$p_0(t)$	Puissance homopolaire(W).
$q(t)$	Puissance imaginaire.
$\overline{p}, \overline{q}$	Puissance continue liée à la composante fondamentale du courant et de la tension.
$\tilde{p}, \tilde{q}$	Puissances alternatif correspondantes à la somme les composantes perturbatrices du courant et de la tension
$\Delta$	Déterminé $v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2$ .
$I_{réf}$	Courant de référence (A).
$I_{h_{réf}}\{1, 2, 3\}$	Courants de référence du réseau électrique(A).
$I_{h_{réf}}\{\alpha, \beta, 0\}$	Courants de référence du réseau électrique dans le repère stationnaire (A).
K	Constante du FMV.
	Mis à courant .
	Mis à tension .
$X_{\alpha\beta}$	L'entrée mesurée.
$\overline{i}_d, \overline{i}_q$	Courant continu (A).
$\tilde{i}_d, \tilde{i}_q$	Courant alternatif(A).
$v_s\{d, q, 0\}$	Tensions estimées du réseau électrique au point de raccordement du filtre actif dans le repère <i>Park</i> (V).
$\theta_d$	La phase instantanée réelle de la tension direct.
$\hat{\theta}_d$	L'angle de rotation estimé.
$v_{d-réf}$	Tension simple directe de référence (V).
$\varphi_d$	L'angle de la composante directe de la tension du réseau.
$\omega_d$	Pulsation de réseau direct(rad/s).
$\hat{\omega}_d$	Pulsation de réseau direct estimé(rad/s).
$v_m$	Amplitude maximale de tension simple(V).
$I_{f-réf}\{1, 2, 3\}$	Courants de filtre de référence(A).
$k_c, \zeta_c, \tau_c$	Paramètres du régulateur P+FPB utilisé pour la régulation de tension aux bornes du condensateur.
$P_c$	Puissance active consommée par la charge.

---

## Liste des Symboles

---

$k, \zeta_i, \tau_i, \omega_i$	Paramètres du régulateur P+FPB utilisé pour la régulation de courant injecté.
$v_p$	L'amplitude de la porteuse triangulaire (V).
$R_{ch}, L_{ch}$	Charge non-linéaire.
$L_{tot}$	Inductance totale de ligne(H).
$i_{ch_{moy}}$	Le courant moyen de la charge non linéaire(A).
$i_{ch_{fond}}$	Le courant fondamental de la charge (A).
$Z_n$	L'impédance nominale du réseau( $\Omega$ ).
$Z_{cc}$	L'impédance de court-circuit du réseau( $\Omega$ ).
$Z_f$	L'impédance de filtre actif ( $\Omega$ ).
$I_{ms}$	La valeur efficace de courant(A).
$V_{CES}$	Tension maximale au bornes du composant( V).
$V_{GES}$	Tension de grille(V)
$I_c$	Courant au bornes du composant(A).
$I_{CM}$	Courant maximale au bornes du composant(A).
$V_{IN_{max}}$	Tension d'entrée maximale sans filtre/avec filtre(V).
$C_{qvi}$	Condensateur de filtrage.
$V_c$	Tension de commande.
$P_I$	Consommation de courant de l'alimentation.
$T_{max}$	Température maximale de fonctionnement.
$R_g$	Une résistance de grille( $\Omega$ ).
$I_h$	Amplitude du courant harmonique (A).
$I_L$	Courant maximal demandé par la charge ( $A_{ms}$ ).
$I_{SC}$	Courant de court-circuit (A).
$u_{ab}, u_{bc}$ et $u_{ca}$	Les tensions composées(V).
$u_{ao}, u_{bo}$ et $u_{co}$	Les tensions d'entrée à l'onduleur(V).
$u_{an}, u_{bn}$ et $u_{cn}$	Les tensions simples de la charge(V).
$u_{no}$	La tension fictive entre le neutre de la charge(V).
U	La tension continu(V).

---

## LISTE DES ABREVIATIONS

<i>THD</i>	En anglais: Taux de Distorsion Harmonique.
$F_p$	Facteur de puissance.
<i>IGBTs</i>	En anglais: Insolâtes Gâte Bipolaire Transistor.
<i>MOSFETs</i>	En anglais: Metal Oxyde Semi-Conductor Field Effect Transistor.
<i>GTO</i>	En anglais: Gate Turn-Off Thyristor .
<i>MLI</i>	Modulation de Largeur d'Impulsion (En anglais: <i>PWM</i> , Pulse Width Modulation).
<i>VSC</i>	Onduleur de tension ou (En anglais: <i>Voltage Source Converter</i> ).
<i>FAP</i>	Filtre Actif Parallèle.
<i>FAS</i>	Filtre Actif Série.
<i>UPQC</i>	En anglais: Unified Power Quality Conditioner.
<i>IEEE</i>	En anglais: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
<i>CEI</i>	En anglais: Commission Electrotechnique Internationale.
<i>IGBT</i>	En anglais: Isolated Gate Bipolar Transformer.
<i>PLL</i>	En anglais: Phase -Locked Loop (Boucle de verrouillage de phase).
<i>FFT</i>	La Transformée de Fourier Rapide.
<i>DFT</i>	La Transformée de Fourier Discrète .
<i>RDFT</i>	La transformée de Fourier discrète récursive.
<i>PIRI</i>	Puissance Instantanée Réelle et Imaginaire.
<i>TCD</i>	Transformation de Concordia Directe .
<i>SRF</i>	Théorie du Référentiel lié au Synchronisme.
<i>PID</i>	Régulateur :Proportionnelle Intégral, Dérivation .
<i>F.e.m.</i>	Force électromotrice.
<i>FPH</i>	Filtre Passe Haut
<i>FPB</i>	Filtre Passe Bas
<i>FMV</i>	Filtre Multi-VARIABLE
<i>BT</i>	Basse Tension
<i>MT</i>	Moyenne Tension
<i>DSPACA1104</i> ( <i>DS1104,DSP</i> )	En anglais: Digital signal processing and control engineering
<i>RTI</i>	Real Time Interface.
<i>E/S</i>	Entrée/Sortie.
<i>PC</i>	Personal Computer.

---

<i>PCI</i>	Peripheral Component Interconnect.
<i>BNC</i>	Bayonet Neill Connector.
<i>RTW</i>	Real Time Workshop.
<i>CMOS</i>	Carte d'isolation.
<i>TTL</i>	Transistor-Transistor Logic.
<i>CAN</i>	Convertisseur Analogique Numérique
<i>CNA</i>	Convertisseur Numérique Analogique
<i>A/D</i>	Analogique/Digital.
<i>PD3</i>	Un redresseur triphasé en pont Gréât.
<i>CP 1104</i>	Control panel.
<i>TDD</i>	Total Demand Distortion.

---

# LISTE DES FIGURES

---



---

## Chapitre I : Généralités sur les perturbations des réseaux électriques

---

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Figure I.1	Creux de tension et Coupure de tension	7
Figure I.2	Fluctuation de tension	8
Figure I.3	Exemple de régime triphasé déséquilibré	8
Figure I.4	Variation de la fréquence	9
Figure I.5	Décomposition d'un signal périodique	14
Figure I.6	Diagramme de Fresnel des puissances	18
Figure I.7	Le spectre harmonique du courant de charge polluante	18
Figure I.8	Diagramme de Fresnel des puissances	19
Figure I.9	Éléments constitutifs d'un filtre actif	24
Figure I.10	Filtre actif parallèle	25
Figure I.11	Structure d'un Filtre actif série	27
Figure I.12	Combinaison parallèle série actifs (UPQC)	28
Figure I.13	Les redresseurs MLI de tension	30
Figure I.14	Les redresseurs MLI de courant	30

---

## Chapitre II: Structure du filtre actif parallèle de puissance et principe de fonctionnement

---

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Figure II.1	Schéma de principe du filtre actif parallèle	32
Figure II.2	Schéma de principe de l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif et formes d'ondes des courants respectifs.	33
Figure II.3	Structure d'un filtre actif parallèle	34
Figure II.4	Structure filtre active parallèle à tension	35
Figure II.5	Structure filtre active parallèle à tension	36
Figure II.6	Interrupteurs équivalents du filtre actif à source de tension	36
Figure II.7	Structure de filtre actif à courant	37
Figure II.8	Onduleur de tension et filtre de sortie	40
Figure II.9	Schéma de principe de la PLL	42
Figure II.10	Principe de la commande par hystérésis	43
Figure II.11	Principe de commande des courants par MLI	44
Figure II.12	Répartition des commutations sur un bras d'un onduleur	44
Figure II.13	Boucle de régulation de la tension continue	45
Figure II.14	Schéma de la régulation des courants du filtre actif	47
Figure II.15	Schéma de la régulation simplifié	47

---

---

**Chapitre III:** Techniques d'extraction des courants harmoniques

---

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Figure III.1	Méthode d'identification des puissances active et réactive instantanées	49
Figure III.2	Schéma de principe de séparation des composantes continues et pulsatoires (harmoniques)	52
Figure III.3	Principe d'identification des harmoniques par la méthode SRF	53
Figure III.4	Diagramme de génération des courants harmoniques de référence par le filtre Notch	54
Figure III.5	Diagramme de Bode d'un Notch filtre	54
Figure III.6	Courant harmonique de référence $i_{ref}$ filtré par Notch filtre	56
Figure III.7	Variation du THD du courant fondamental de référence en fonction de $\omega_c$ et $\xi$ .	56
Figure III.8	Variation du temps de réponse du courant fondamental de référence en fonction de $\omega_c$ et $\xi$ .	57
Figure III.9	Schéma bloc du FMV	58

**Chapitre IV:** Partie Experimentale

Figure IV.1	Schéma de simulation d'un filtre actif parallèle de puissance	60
Figure IV.2	Résultats de simulations de: $i_c$ : Courant de charge, $i_f$ : Courant de filtre actif, $i_s$ : Courant de source, $u_c$ : Tension aux bornes du condensateur et $u_s$ : Tension de source.	62
Figure IV.3	Courant source $i_s$ avant/après filtre et son analyse spectrale.	63
Figure IV.4	Courant de source $i_s$ , courant de filtre $i_f$ et tension de bus continu $u_c$ avant/après du FAP.	63
Figure IV.5	Courant de source $i_s$ , courant de filtre $i_f$ , puissances instantanées réactive $q$ et tension de source $u_s$ avant/après FAP.	64
Figure IV.6	Puissances instantanées active $p$ , Puissances instantanées active réactive $q$ avant/après FAP.	64
Figure IV.7	Courant de source $i_s$ , Courant de filtre actif $i_f$ , Tension aux bornes du condensateur $u_c$ et $u_s$ .	65
Figure IV.8	Tension aux bornes du condensateur $u_c$ et Courant de source $i_s$ , Courant de filtre actif $i_f$ .	66

## LISTE DES TABLEAUX

---

### Chapitre I : Généralités sur les perturbations des réseaux électriques

---

<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Tableau I.1	Catégories et caractéristiques typiques des phénomènes électromagnétiques de système d'alimentation	13
Tableau I.2	Caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques	16
Tableau I.3	Limites des distorsions des tensions au P <sub>cc</sub> (IEEE 519-1996)	21
Tableau I.4	Limites des émissions harmoniques du courant I en I <sub>L</sub> % de (IEEE 519/1159)	21

---

### Chapitre IV: Partie Experimentale

---

<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Tableau IV.1	Valeurs des éléments caractérisant la structure étudiée	61
Tableau IV.2	les résultats des simulations	67



*SOMMAIRE*

---

Introduction générale.....	4
I.1 Introduction.....	6
I.2 Perturbation électrique.....	6
I.2.1 Creux et coupure de tension.....	7
I.2.2 Fluctuations des tensions.....	7
I.2.3 Déséquilibre de système triphasé de tension.....	8
I.2.4 Variation de fréquence.....	9
I.2.5 Harmonique et inter-harmonique.....	9
I.2.5.1 Sources d'harmonique.....	9
I.2.5.1 Conséquences néfastes des harmoniques.....	10
I.2.5.1.1 L'échauffement.....	10
I.2.5.1.2 L'interférence avec les réseaux de télécommunication.....	10
I.2.5.1.3 Les défauts de fonctionnements de certains équipements électriques.....	10
I.2.5.1.4 Le risque de résonance.....	11
I.3.1 Effets instantanés.....	11
I.3.2 Effets à terme.....	12
I.4 Les techniques de dépollution des réseaux électriques.....	13
I.5. Grandeurs caractéristique.....	13
I.5.1 Grandeur harmonique.....	13
I.5.2 Rang de l'harmonique.....	14
I.5.3 Série de Fourier.....	14
I.5.4 Valeur efficace d'une grandeur alternative.....	15
I.5.5 Taux de distorsion.....	15
I.5.6 Facteur de puissance.....	17
I.5.7 Spectre d'harmonique (de fréquence).....	18
I.5.8 Charges linéaires et non- linéaires.....	19
I.6 Influence des harmoniques sur le facteur de puissance FP.....	19
I.7 Normes et réglementation de perturbation.....	20
I.8 Les solutions traditionnelles.....	22
I.8.1 Compensation des courants harmoniques.....	22
I.8.1.1 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique.....	23
I.8.1.2 Transformateur à couplage spécial.....	23
I.8.1.3 Inductances (selfs) série.....	23

---

I.8.1.4 Filtre passif .....	23
I.9 Solutions modernes de dépollution : .....	24
I.9.1 Filtrages actifs .....	25
I.9.1.1 Le Filtre Actif Parallèle (F.A.P) .....	25
I.9.1.2 Le Filtre Actif Série (F.A.S) .....	27
I.9.1.3 La combinaison parallèle-série actif .....	28
I.9.2 Filtrage hybride .....	28
I.9.2.1 Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif .....	28
I.9.2.2 Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif .....	29
I.9.2.3 Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif .....	29
I.9.3 Les redresseurs MLI .....	29
I.9.3.1 Redresseurs de tension .....	29
I.9.3.2 Les redresseurs de courant : .....	30
I.10 Conclusion : .....	31
II.1 Introduction .....	32
II.2 Principe de filtrage actif parallèle de puissance .....	32
II.3 Structure du filtre actif parallèle .....	34
II.3.1 Etude de la partie puissance .....	35
II.3.1.1 Onduleur d'un filtre actif parallèle .....	35
II.3.1.1.1 Structure générale .....	35
II.3.1.1.2 Structure de tension .....	35
II.3.1.1.3 Structure de courant .....	36
II.3.1.1.4 Comparaison des deux structures .....	37
II.3.1.2 Circuit de stockage d'énergie .....	37
II.3.1.2.1 Estimation de la valeur de la capacité du condensateur de stockage .....	39
II.3.1.3 Filtre de sortie .....	39
II.3.2 Etude de la partie contrôle-commande .....	40
II.3.2.1 Les méthodes d'identification des courants perturbés .....	40
II.3.2.2 Système PLL .....	41
II.3.2.3 Commande de l'onduleur .....	43
II.3.2.3.1 Commande par hystérésis .....	43
II.3.2.3.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) .....	43
II.3.2.4 Régulation de la tension continue .....	44

II.3.2.5 Régulation du courant du filtre actif .....	45
II.4 Conclusion .....	48
III.1 Introduction .....	49
III.2 Méthode des puissances active et réactive instantanées .....	49
III.3 Méthode du référentiel synchrone (SRF) .....	51
III.4 Méthode du filtre Notch .....	53
III.5 Méthode basée sur le filtre multi variable (FMV).....	57
III.6 Comparaison entre les méthodes d'identification des courants harmoniques .....	59
III.8 Conclusion .....	59
IV.1 Introduction .....	60
IV.2 Simulation de l'ensemble du réseau, filtre actif parallèle et la charge polluante .....	60
IV.2.1 Résultats de simulation et Interprétation .....	62
IV.2.1.1 Comportement du FAP en régime permanent.....	62
IV. 2.1.2 Comportement du FAP en régime dynamique (Changement de la charge) .....	65
IV.2.2 Interprétations des résultats .....	66
IV.3 Conclusion.....	67
Conclusion générale .....	68
BIBLIOGRAPHIQUES .....	70



*Introduction Générale*

### **Introduction générale**

Le réseau électrique est un assemblage de matériels ayant pour rôle d'acheminer l'électricité de puis la source (centrales) jusqu'aux utilisateurs dans les meilleures conditions économiques et techniques. L'énergie électrique, par sa facilité d'utilisation, de régulation et d'automatisation, est devenue indispensable à la vie quotidienne.

L'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance dans les systèmes électrique sa entraîné de plus en plus de problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques. La distorsion harmonique est générée par les charges non linéaires connectées au réseau et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau. Pour les autres équipements électriques connectés en ces points, cette pollution harmonique a des effets nocifs. Parmi ces effets, on peut notamment citer la déformation de la tension réseau au point de raccordement alors que le distributeur d'énergie est tenu de fournir une tension propre. Cette pollution peut également conduire à l'échauffement des câbles et des équipements électriques ou bien encore à l'arrêt soudain de machines tournantes, voire même la destruction totale de tous ces équipements.

Les réseaux électriques jusqu'à ces dernières années sont contrôlés mécaniquement. Malgré l'utilisation de la microélectronique, des ordinateurs et des moyens rapides de télécommunication dans le contrôle des réseaux, la dernière action dans ces systèmes de commande est prise avec des dispositifs mécaniques ayant un temps de réponse plus au moins long et avec lesquels l'action d'amorçage et de réamorçage ne peut être répétitivement exécuté à une fréquence élevée par rapport aux dispositifs à base d'interrupteurs statiques (semi-conducteurs) [4], [5], [9].

L'objectif de notre travail est d'étudier le concept du filtre actif en parallèle de puissance pour objectif de dépolluer les réseaux électriques par compensation des harmoniques produits dans le réseau (diminution du taux de distorsion d'harmonique totale), et parfois l'énergie réactive consommée par les charges non-linéaires afin d'obtenir un courant du réseau s'approchant le plus possible du signal sinusoïdal et l'amélioration du facteur de puissance .

Ce mémoire a été structuré comme suit:

- Dans le premier chapitre, nous présentons les Généralités sur les perturbations des réseaux électriques. Ensuite, les origines/les conséquences de cette pollution harmonique avec la citation des normes et régulations imposées aux utilisateurs, ainsi que les solutions classiques et modernes pour la réduction des harmoniques.
- Le deuxième chapitre, sera structuré du filtre actif parallèle de puissance et principe de fonctionnement. nous présentons la description générale des différentes parties de filtre actif de puissance, Nous commencerons par un exposés la structure générale du filtre actif parallèle.
- Dans le troisième chapitre, Nous présentons les filtres actifs de puissance ont pour objectif d'agir d'une manière directe et dynamique afin de compenser les harmoniques et atténuer leurs effets sur les réseaux d'alimentation. Pour rendre cet objectif réalisable.
- Dans le quatrième chapitre nous avons fait la modélisation du réseau électrique, la charge polluante (redresseur en pont tout diodes), et du filtre actif parallèle. Enfin, nous présentons les résultats de simulation obtenus dans l'environnement Matlab/Simulink avec des interprétations.

En fin de ce mémoire nous présentons une conclusion générale de cette étude.

# *Chapitre I*

*Généralités sur les  
perturbations des réseaux  
électriques*

## **I.1 Introduction**

L'utilisation croissante des dispositifs à base d'électronique de puissance dans les appareils industriels, tertiaires ou domestiques entraîne de plus en plus de problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques. Bien que ces appareils apportent une souplesse d'utilisation et une augmentation de la fiabilité avec un rendement élevé, ils se comportent comme des charges non linéaires qui absorbent des courants avec des formes d'ondes différentes des tensions d'alimentation ce qui dégrade la qualité de l'énergie électrique [1].

Ces courants périodiques mais non sinusoïdaux circulent au travers des impédances des réseaux et donnent naissance à des tensions non sinusoïdales qui se rajoutent à la tension initiale. Toutes les charges linéaires connectées, au point de couplage commun (PCC) en parallèle avec les charges polluantes subissent en conséquence les perturbations. On est face à une dégradation de la qualité de puissance ce qui a des conséquences préjudiciables sur le bon fonctionnement des appareils électriques et qui induit un coût supplémentaire pour les installations [2].

## **I.2 Perturbation électrique**

La qualité d'énergie est un concept très large qui peut se définir par rapport à la continuité de la fourniture de l'énergie électrique et de la forme d'onde de la tension disponible. L'évaluation de cette qualité consiste habituellement à caractériser les différentes perturbations électriques [5].

Les réseaux électriques sont très pollués et soumis à de multiples agressions à cause des perturbations électriques, qu'on peut définir en cinq catégories :

- Creux et coupure de tension
- Fluctuations de la tension
- Déséquilibre de système triphasé de tension
- Variation de fréquence
- Harmonique et inter-harmonique

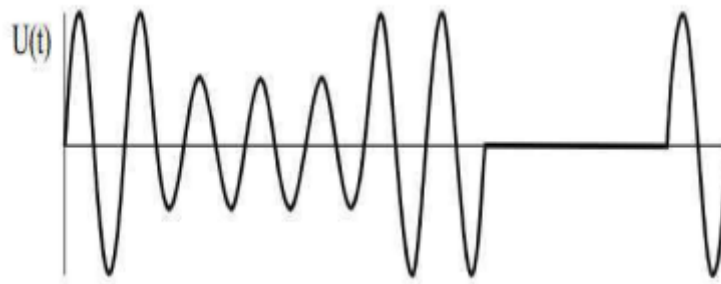
### I.2.1 Creux et coupure de tension

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

Il y a deux types de phénomène à l'origine des creux de tension:

- ✓ Les creux provenant du fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou de la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage (moteurs, transformateurs...etc.).
- ✓ Les creux liés aux phénomènes aléatoires, comme la foudre ou tous les courts circuits accidentels sur les réseaux de distribution ou les réseaux internes des clients (défaut d'isolation, protection de branches sur les lignes aériennes...etc.) [5].

Une coupure de tension quant à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90% de la tension nominale  $U_n$  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 [6].



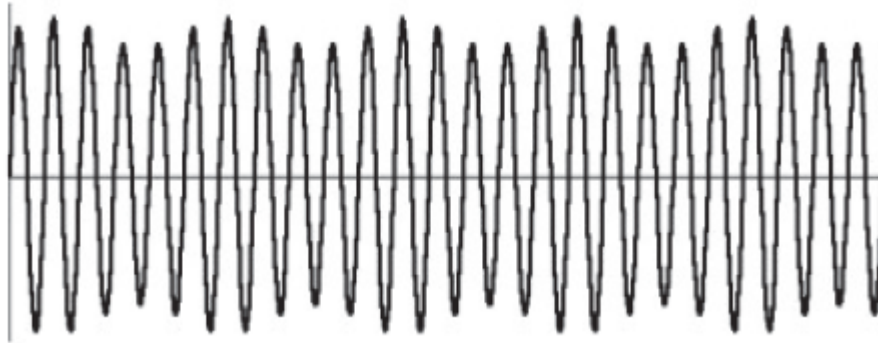
**Figure I.1 :** Creux de tension et Coupure de tension.

### I.2.2 Fluctuations des tensions

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  $\pm 10\%$  et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes [9].

Ce type de fluctuation est à distinguer des variations lentes de tension dues à la variation progressive de la consommation dans les réseaux. Les principales sources de

fluctuations rapides sont les charges industrielles dont le fonctionnement aléatoire ou intempestif occasionne de brusques variations de puissances telles que les machines à souder et les fours à arc. Ces derniers produisent des variations erratiques permanentes de tension. Ces fluctuations sont responsables du phénomène de "*Flicker*" [29].



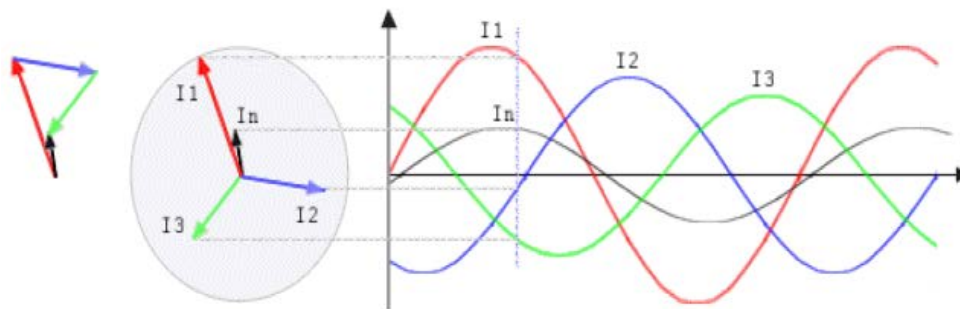
**Figure I.2 :** Fluctuation de tension.

### I.2.3 Déséquilibre de système triphasé de tension

Le déséquilibre de la tension est la différence entre les tensions du système triphasé en amplitude et/ou en déphasage. Il résulte presque toujours de la présence de fortes charges monophasées raccordées isolément sur le réseau triphasé [8].

Un récepteur triphasé électrique qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation des courants non équilibrés dans les impédances du réseau.

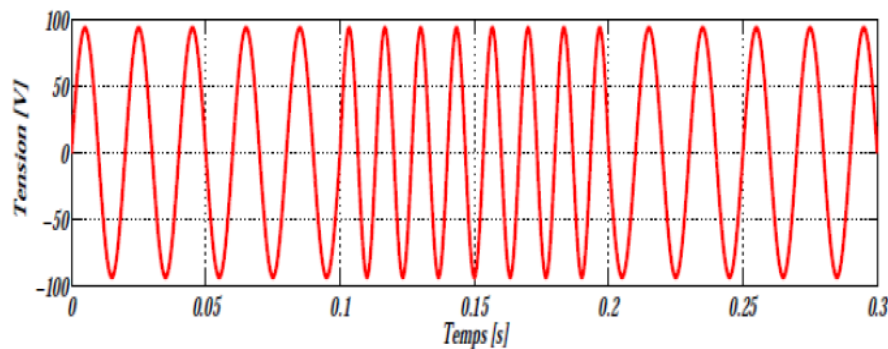
Ceci est fréquent pour les récepteurs monophasés à basse tension. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par les systèmes de traction ferroviaire [10].



**Figure I.3 :** Exemple de régime triphasé déséquilibré.

### I.2.4 Variation de fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome (Voir 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 des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle  $50 \text{ Hz} \pm 1\%$  [4].



**Figure I.4 :** Variation de la fréquence.

### I.2.5 Harmonique et inter-harmonique

Un harmonique est défini comme étant une composante sinusoïdale d'un signal périodique, ayant une fréquence multiple de l'onde fondamentale. Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 Hz et 2000 Hz (entre les harmoniques de rangs  $h=2$  et  $h=40$ ) [5], [7].

Le inter-harmonique est défini comme ayant dans le signal de tension des composants fréquentielles qui ne sont pas des multiples entiers du fondamental. L'apparition de l'inter harmonique est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de commande électrique [6], [8].

#### I.2.5.1 Sources d'harmonique

Les harmoniques sont générées par des charges non-linéaires absorbant un courant non sinusoïdal. Actuellement, les équipements à base d'électronique de puissance constituent la principale source de ces harmoniques. Ces appareils, dont les caractéristiques électriques varient avec la valeur de la tension, sont assimilables à des générateurs de courants

harmoniques: appareils d'éclairage fluorescent, variateurs de vitesse, redresseurs, téléviseurs, ordinateurs, etc... [9].

### **I.2.5.1 Conséquences néfastes des harmoniques**

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. Les effets les plus importants sont l'échauffement, l'interférence avec les réseaux de télécommunication, les défauts de fonctionnement de certains équipements électriques et le risque d'excitation de résonance.

#### **I.2.5.1.1 L'échauffement**

Les pertes totales par effet Joule sont la somme de celles du fondamental et des harmoniques :

$$I^2 \cdot R = \sum_{h=1}^{40} I_h^2 \cdot R$$

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

Les harmoniques augmentent aussi les pertes fer (pertes par courants de Foucault).

Ils prennent de l'importance dans les matériels utilisant les circuits magnétiques (moteurs, transformateurs...). Le vieillissement des isolants est souvent dû à une contrainte en tension consécutive à la présence de la tension harmonique, et donc à une augmentation locale du courant de fuite, ou encore à l'échauffement exagéré dans les conducteurs.

#### **I.2.5.1.2 L'interférence avec les réseaux de télécommunication**

Le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de télécommunication peut induire dans ces derniers des bruits importants. Dans le cas de résonances, une partie des réseaux de télécommunication peut être rendue inutilisable [10].

#### **I.2.5.1.3 Les défauts de fonctionnements de certains équipements électriques**

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

#### **I.2.5.1.4 Le risque de résonance**

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

### **I.3 Origines et sources d'harmonique**

Les harmoniques sont générées par des charges non-linéaires absorbant un courant non sinusoïdal. Actuellement, les équipements à base de thyristors constituent la principale source de ces harmoniques. Ces appareils, dont les caractéristiques électriques varient avec la valeur de la tension, sont assimilables à des générateurs de courants harmoniques: appareils d'éclairage fluorescent, variateurs de vitesse, redresseurs, téléviseurs, ordinateurs, etc.... [9].

#### **I.3.1 Effets instantanés**

C'est le cas des événements à durée courte qui peuvent instantanément affecter les installations électriques concernant les appareils produisant une image électronique (écran d'ordinateur, téléviseur), les appareils produisant un son censé être de bonne qualité (chaîne HI-FI, téléphone) ou la précision des appareils de mesure [8].

- Les défauts de fonctionnements de certains équipements électriques: En présence des harmoniques, la tension ou le courant peut changer plusieurs fois de signe dans une demi-période; par conséquent, tout appareil dont le fonctionnement est basé sur le passage par zéro des grandeurs électriques (appareils utilisant la tension comme référence) peut être perturbé.
- Troubles fonctionnels des micro-ordinateurs: Les effets sur ces équipements peuvent se manifester par la dégradation de la qualité de l'image et par des couples pulsatoires des moteurs d'entraînement de disque.
- Erreurs dans les appareils de mesure: Certains appareils de mesure et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesure et des erreurs de lecture supplémentaires en présence d'harmoniques.

- Vibrations et bruits: Les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques (inductances, transformateurs et machines tournantes) [9].

### I.3.2 Effets à terme

Dans les machines tournantes, les transformateurs et les condensateurs, ils se manifestent par des échauffements supplémentaires; ce qui entraîne la destruction du matériel ou plus fréquemment une diminution de leur durée de vie par surcharge thermique [33].

La liste suivante donne une idée de l'impact des harmoniques sur certains équipements à usage fréquent qui font partie intégrante du réseau électrique, tels que les:

- Alternateurs: pertes supplémentaires dans les enroulements statoriques et dans les amortisseurs liés à la circulation des courants harmoniques;
- Lignes: pertes ohmiques supplémentaires;
- Transformateurs: pertes supplémentaires dans les enroulements par *effet Joule* et dans le noyau par courant de Foucault;
- Réseaux de télécommunication: génération de bruits importants liés au couplage électromagnétique entre les lignes de puissance et les circuits de communication. Dans des cas particuliers, surtout lors de résonances, une partie des réseaux de télécommunication peut être rendue inutilisable;
- Moteur à courant alternatif: pertes supplémentaires dans le fer et dans les enroulements plus l'échauffement du moteur;
- Condensateur de puissance : pertes diélectrique supplémentaires conduisant aux vieillissements rapides du condensateur ;
- Lignes téléphoniques: génération de bruits importants liés au couplage électromagnétique;
- Entre les lignes de puissance et les circuits de communication

## I.4 Les techniques de dépollution des réseaux électriques

La qualité de l'énergie est un terme qui décrit l'ensemble des paramètres du courant électrique quand la charge fonctionne correctement. Une mauvaise qualité d'énergie peut causer une surcharge du réseau électrique, phénomènes de résonance dangereux ou même un dysfonctionnement de la charge, généralement, elle peut mener à de grandes pertes.

**Tableau I.1:** Catégories et caractéristiques typiques des phénomènes électromagnétiques de système d'alimentation.

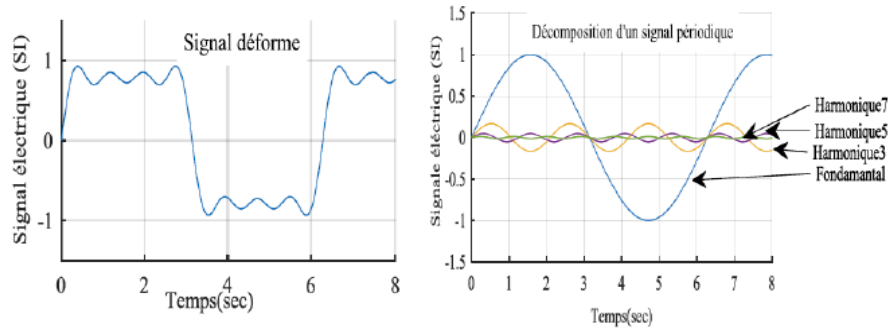
Catégories		Durée	Amplitude de le tension
<i>Variations de courte duree</i>			
Instantané	Creux	0.5 – 30 cycles	0.1–0.9 pu
	Surtension	0.5 – 30 cycles	1.1–1.8 pu
Momentané	Coupure	0.5 cycles – 3s	< 0.1 p.u
	Creux	30 cycles – 3s	0.1 – 0.9 p.u
	Surtension	30 cycles – 3s	1.1 – 1.8 p.u
Temporaire	Coupure	3s – 1 min	< 0.1 p.u
	Creux	3s – 1 min	0.1 – 0.9 p.u
	Surtension	3s – 1 min	1.1 – 1.8 p.u
<i>Variations de longue duree</i>			
	Coupure longue	> 1 min	< 0.0 p.u
	Surtension	> 1 min	0.8 – 0.9 p.u
	sous-tension	> 1 min	1.1 – 1.2 p.u

Economiques en particulier dans les pays qui ont un développement dynamique de nouvelles technologies. En revanche, le financement sur la prévention de ces problèmes est un fragment de ces pertes. Pour cela, la recherche sur les méthodes d'analyse et l'amélioration de l'énergie électrique est largement précédée dans le monde entier [11].

## I.5. Grandeurs caractéristique

### I.5.1 Grandeur harmonique

C'est l'une des composantes sinusoïdales de la variation de la grandeur physique possédant une fréquence multiple de celle de la composante fondamentale. L'amplitude de l'harmonique est généralement de quelques pour cent de celle du fondamental [12].



**Figure I.5 :** Décomposition d'un signal périodique.

### I.5.2 Rang de l'harmonique

Le rang harmonique est le rapport de sa fréquence 'fn' à celle du fondamental, généralement la fréquence industrielle 50Hz ou 60Hz. Par principe, le fondamental  $f_1$  au rang 1 [13].

$$n = \frac{Fn}{F1} \quad \text{I.2}$$

### I.5.3 Série de Fourier

Le signal  $S(t)$  de la figure (I.3) peut représenter un courant ou une tension. Il est périodique de période  $T$ , donc de fréquence  $f = \frac{1}{T}$  et de pulsation:

$$\omega = 2\pi f \quad \text{I.3}$$

Ce signal s'écrit selon la décomposition suivant [18]:

$$S(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} a_h \cdot \cos(h\omega t) + \sum_{h=1}^{\infty} b_h \cdot \sin(h\omega t) \quad \text{I.4}$$

Avec :

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T S(t) dt \quad \text{I.5}$$

Pour  $h \geq 1$  :

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \cdot \cos(h\omega t) dt \quad \text{I.6}$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \cdot \sin(h\omega t) dt \quad \text{I.7}$$

On peut écrire :

$$S(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \cdot \sin(h\omega t + \theta_h) \quad \text{I. 8}$$

Avec :

$$\theta_h = \text{arctag} \left( \frac{a_h}{b_h} \right) \quad \text{I.9}$$

On définit les fréquences d'harmoniques  $f_h$  comme les fréquences multiples de la fréquence fondamentale « $f$ ». Leur rang  $h$  est tel que :

$$f_h = f * h \quad \text{I. 10}$$

$$C_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad \text{I. 11}$$

La grandeur «  $C$  » : est l'amplitude l'harmonique de rang  $h$ . Il faut noter qu'on utilise très souvent le terme amplitude pour désigner la valeur efficace harmonique donnée par:

$$C_{heff} = \frac{C_h}{\sqrt{2}} \quad \text{I. 12}$$

$a_0$ : Composante continue de la tension  $S(t)$  périodique [15].

#### I.5.4 Valeur efficace d'une grandeur alternative

Il y a identité entre l'expression usuelle de cette valeur efficace calculée à partir de l'évolution temporelle de la grandeur alternative ( $y(t)$ ) et l'expression calculée à partir de son contenu harmonique :

$$Y_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T Y^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} Y_n^2} \quad \text{I. 13}$$

Notons qu'en présence d'harmoniques, les appareils de mesure doivent avoir une bande passante élevée ( $> 1$  kHz) [12].

#### I.5.5 Taux de distorsion

Notre étude se limite au cas où la source est sinusoïdale et/ou le courant absorbé par la charge est entaché de composants harmoniques. Dans ces conditions, le taux global de

distorsion harmonique (THD) est bien adapté pour quantifier le degré de pollution harmonique sur les réseaux électriques [16].

Deux taux de distorsion harmonique sont distingués :

- ✓ Le taux de distorsion harmonique en courant, noté THD<sub>I</sub>
- ✓ Le taux de distorsion harmonique en tension, noté THD<sub>U</sub>

Le premier s'exprime sous la forme :

$$THDI = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^n I^2 n}{I_1}} \quad \text{I. 14}$$


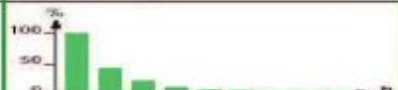






Avec :  $I_1$  la valeur efficace du courant fondamental et  $I_n$  la valeur efficace de rang harmoniques du courant  $n$ .

Le THD-I ne dépend que des valeurs efficaces du courant de charge. En revanche, le THD-U est fonction des courants harmoniques, caractérisant la charge, et de l'impédance de court-circuit, imposée par le réseau :

$$THDU = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^n U^2 n}{U_1}} \quad \text{I. 15}$$

Avec :  $U_1$  la valeur efficace de tension fondamental et  $U_n$  la valeur efficace de rang harmoniques de la tension  $n$  [17].

**Tableau I. 2** : Caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques.

Charges non linéaires	Forme d'onde de courant	Spectre	THD
Variateur de vitesse			44 %
Redresseur / chargeur			28 %
Charge informatique			115 %
Eclairage fluorescent			63 %

### I.5.6 Facteur de puissance

Dans le cas d'un réseau équilibré, on peut définir les grandeurs de puissance suivantes : la puissance instantanée ( $p$ ), la puissance active ( $P$ ) et la puissance apparente ( $S$ )

$$p(t) = 3v(t).i(t) \quad \text{I.16}$$

$$S = 3I_{eff}.V_{eff} \quad \text{I.17}$$

$$p = 3 \sum_{n=1}^{\infty} I_n.V_n \cos(n\varphi_n) \text{ ou } \varphi_n = -\infty \quad \text{I.18}$$

Le facteur de puissance  $F$ , défini par le rapport entre la puissance active et la puissance apparente s'exprime par :

$$F = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} I_n.V_n \cos(n\varphi_n)}{I_{eff}.V_{eff}} \quad \text{I.19}$$

Afin d'estimer la participation des harmoniques dans la puissance apparente, une puissance supplémentaire appelée puissance déformante ( $D$ ) est introduite, elle est estimée par certains auteurs comme suite :

$$D = V_1 \cdot \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad \text{I.20}$$

Cette estimation est faite dans le cas où la tension du réseau est purement sinusoïdale

La puissance apparente peut donc se mettre sous la forme :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad \text{I.21}$$

Le facteur de puissance s'écrit alors :

$$F = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad \text{I.22}$$

Cette dernière expression fait clairement apparaître l'impact de la puissance déformante sur la dégradation du facteur de puissance.

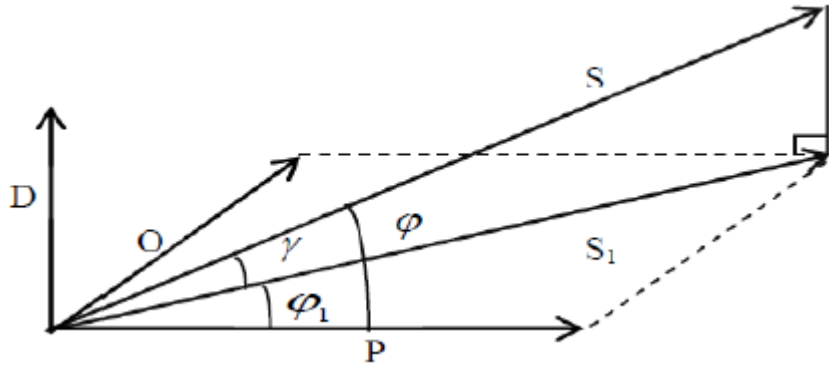


Figure I.6 : Diagramme de Fresnel des puissances.

- Le déphasage entre la puissance apparente dans le cas d'un système équilibré linéaire et la puissance apparente dans le cas déséquilibré non linéaire S.
- Le déphasage entre la puissance active P et la puissance apparente S [9] [25].

### I.5.7 Spectre d'harmonique (de fréquence)

Un signal déformé comporte généralement plusieurs harmoniques. On représente souvent ce signal sous la forme d'un spectre, c'est -à-dire à l'aide d'un schéma où l'on porte en abscisse la fréquence et en ordonnée le module (en valeur efficace ou en pourcent). Comme il est représenté sur la figure I.7 [15].

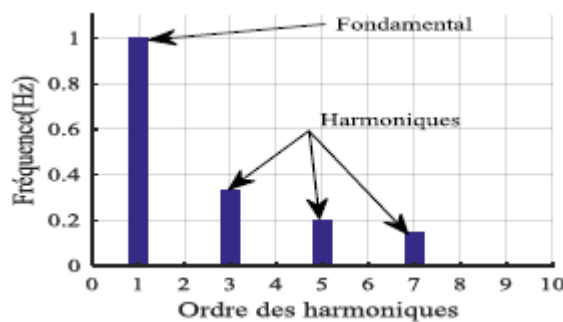


Figure I.7: Le spectre harmonique du courant de charge polluante.

### I.5.8 Charges linéaires et non- linéaires

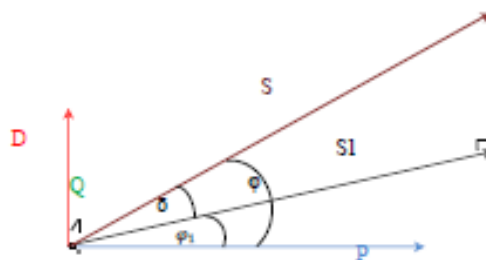
Une charge est dite linéaire lorsque son impédance est constant, le courant qu'elle absorbe est alors sinusoïdal lorsque la tension est sinusoïdal.

Une charge non-linéaire lorsque son impédance varie au cours d'une même période, le courant qu'elle absorbe n'est pas sinusoïdal lorsque la tension est sinusoïdal [19].

### I.6 Influence des harmoniques sur le facteur de puissance FP

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

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties active P, réactive Q et déformante D, cette dernière est la puissance provoquée par les courants harmoniques, tel que  $I=I_f+I_h$ .



**Figure I.08:** Diagramme de Fresnel des puissances.

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties comme le montre l'équation suivante:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (1.23)$$

Où Q : la puissance réactive associée au courant fondamental.

D : la puissance déformante due aux harmoniques du courant.

Où  $P=3.U.I_1(\cos\phi_1)=3.U.I_1.Fdis \cdot \cos(\phi_1)$  (1.24)

Où F : représente le facteur de distorsion. Il vaut 1 lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal et il décroît lorsque la déformation de l'onde s'accroît.

$\phi_1$  : représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension [20].

$$Q = 3. U. \sin(\varphi_1) I. 25$$

$$Et, D = 3. U. \sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2} \quad \text{I. 26}$$

Finalement le facteur de puissance  $F_p$  est donné par l'expression :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad \text{I. 27}$$

### I.7 Normes et réglementation de perturbation

Pour éviter tous les désagréments générés par la présence de courants et de tensions harmoniques sur le réseau et pour préserver la pollution du réseau, les utilisateurs sont de plus en plus tenus de respecter un certain nombre de normes [21]. L'objectif des normes et des réglementations est de limiter les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques. Les deux principaux organismes de normalisation internationaux dans le domaine électrotechnique sont la *CEI* et l'*IEEE*. Ces deux organismes réalisent la principale activité de normalisation dans le domaine des perturbations électriques au niveau mondial mais n'ont pas une uniformité de critères en ce qui concerne la définition des interactions entre le réseau et les charges connectées.

- ❖ La Commission Electrotechnique Internationale (*CEI*) définit le niveau des courants et des tensions harmoniques à ne pas dépasser par une série de normes de compatibilité électromagnétique (*CEI 61000*). Nous pouvons citer à titre d'exemple:
  - ✓ *CEI 61000-2-2* qui définit les niveaux de compatibilité de tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension.
  - ✓ *CEI 61000-3-2* qui définit les limites d'émissions de courant harmonique par les appareils consommant moins de 16A par phase.
  - ✓ *CEI 61000-2-4* qui définit les niveaux de compatibilité dans les réseaux d'installations industrielles [6],[22].

- ❖ Le norme principale de l'IEEE est:IEEE 519-1996 qui définit les limites des perturbations des tensions et courant au Pcc. Le tableau (I.3) indique ces limites des distorsions des tensions.

**Tableau I.3:** Limites des distorsions des tensions au P cc (IEEE 519-1996).

Niveau des tensions au $P_{cc}$	Taux individuel d'harmoniques (%)	Taux de distorsion global THD (%)
$V_n \leq 69Kv$	3	5
$69Kv \leq V_n \leq 161Kv$	1.5	2.5
$V_n \geq 69Kv$	1	1.5

Dans cette norme, les limites pour les courants ne se calculent pas en fonction du courant fondamental mais en fonction du courant maximal appelé par la charge  $I_h$  (courant effectif). La distorsion globale est quantifiée alors par le *TDD* (Total Demanda Distorsion) au lieu de TDH. Les limites des émissions sont aussi liées au courant de court-circuit de l'installation issu de la puissance de court-circuit pour chaque niveau de tension.

**Tableau I.4:** Limites des émissions harmoniques du courant I en I L % de (IEEE 519/1159)

$I_{sc}/I_L$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
< 20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20-50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50-100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100-1000	12	5.5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2.5	1.4	20

Avec:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100 \quad \text{I. 28}$$

$I_h$  : Amplitude du courant harmonique;

$I_L$  : Courant maximal demandé par la charge

$A(\text{rms})$ ,  $I_{SC}$  : Courant de court-circuit [22].

### I.8 Les solutions traditionnelles

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens. Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation. Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques [18] :

- Inductance anti-harmonique de protection des condensateurs.
- Inductance de lissage des courants.
- Confinement des harmoniques.
- L'utilisation de transformateurs à couplage approprié permettant de limiter la circulation des courants harmoniques.
- Augmentation de l'indice de modulation.
- Les filtres passifs qui sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques.

Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive.

Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients [14], [18]:

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

#### I.8.1 Compensation des courants harmoniques

La compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le filtre actif parallèle. Ce type de filtrage a déjà été

appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cyclo-convertisseur de forte puissance [44].

### **I.8.1.1 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique**

On procède généralement au surdimensionnement des équipements afin d'assurer leur tenue aux surcharges harmoniques. Cette solution n'agit pas sur les harmoniques qui ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur. Par cette approche, les problèmes liés à la pollution harmoniques sont résolus pendant une durée limitée. Le déclassement des équipements de distribution électrique soumis aux harmoniques est utilisé dans le cas des installations existantes. Cette méthode cause un surcoût de production et ne tire pas profit du potentiel réel de l'installation [6].

### **I.8.1.2 Transformateur à couplage spécial**

Le choix de couplages appropriés des transformateurs permet de limiter la circulation des courants harmoniques. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle-zigzag, empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre. Ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques. Cette solution limite, au contraire, la puissance disponible de la source, et augmente l'impédance de ligne. Il en résulte une augmentation de la distorsion en tension due aux autres rangs harmoniques [29], [4].

### **I.8.1.3 Inductances (selfs) série**

Cette solution, utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse), et les redresseurs triphasés, consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non-linéaire. Peu onéreuse, la self a cependant efficacité limitée. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux [13].

### **I.8.1.4 Filtre passif**

Le principe des filtres passifs est basé notamment sur des configurations d'éléments résistives (R), capacitifs (C) et inductifs (L) et reliés dans différentes combinaisons pour avoir la suppression désirée des harmoniques. Ils sont utilisés pour manœuvrer les courants harmoniques outre de la ligne ou pour bloquer leur écoulement entre les différentes parties du système en accordant ces éléments pour créer une résonance à une fréquence choisie. Ils

fournissent également une puissance réactive au système électrique et par conséquent améliorent la qualité de puissance [27].

Cependant, ils ont l'inconvénient de l'interaction défavorable avec le système d'alimentation et les performances du filtre passif dépendent principalement sur l'impédance du système.

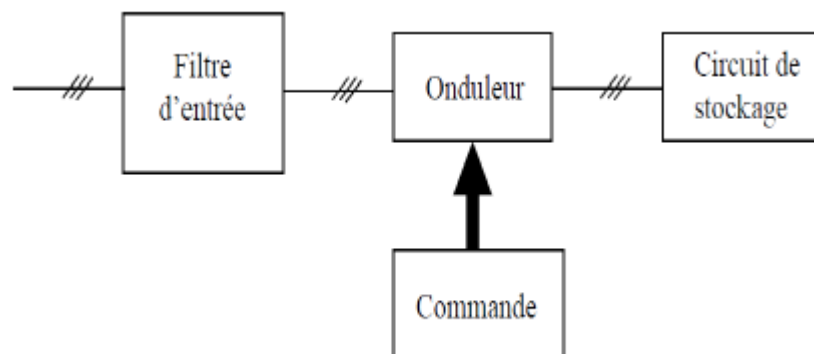
D'autre part, ils peuvent être employés pour éliminer une fréquence harmonique déterminée, donc le nombre de filtres passifs s'accroît avec l'augmentation du nombre des harmoniques à éliminer.

### I.9 Solutions modernes de dépollution :

L'avènement de l'électronique de puissance et l'apparition de nouveaux semi-conducteurs de puissance tel que MOSCT, MOSFET, IGBT, a fait que de nouvelles méthodes de dépollution des harmoniques viennent remplacer les méthodes traditionnelles. En effet, pour pallier au problème de la pollution des réseaux électriques et de la fourniture d'une bonne qualité d'énergie aux consommateurs devenant de plus en plus préoccupant ces dernières années, les filtres actifs semblent une alternative intéressante que ce soit pour les fournisseurs ou les consommateurs car ils peuvent s'adapter simultanément aux évolutions du réseau électrique et de la charge non linéaire.

La vocation d'un filtre actif est de compenser en temps réel tout ou une partie des courants harmoniques et/ou la puissance réactive d'un ensemble de charges polluantes [23], et/ou des tensions harmoniques du réseau électrique.

Un filtre actif se compose d'un élément de stockage, d'un convertisseur de puissance (onduleur de tension ou onduleur de courant), d'un filtre d'entrée et d'un bloc de commande comme le montre la figure I.9.



**Figure I.9:** Eléments constitutifs d'un filtre actif

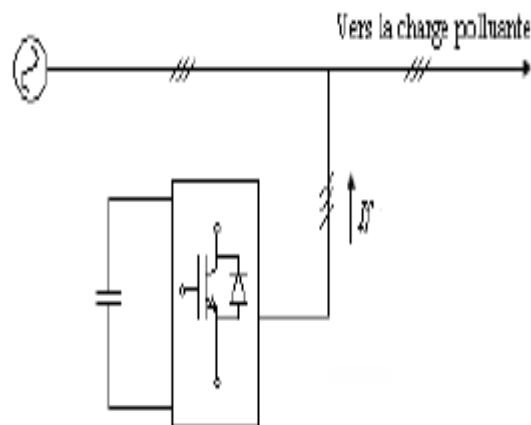
Le filtre actif peut être à structure tension ou à structure courant selon qu'il soit construit d'un onduleur de tension ou d'un commutateur de courant.

### I.9.1 Filtrages actifs

Les inconvénients inévitables aux filtres passifs 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 (A.P.F). Le but de ces filtres est de générer soit des courants, 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 [24].

#### I.9.1.1 Le Filtre Actif Parallèle (F.A.P)

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. Ainsi l'objectif du (F.A.P) 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.



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

Les premiers principes de fonctionnement des filtres actifs parallèles ont été présentés dans la littérature dès le début des années 1970. En 1976, une première famille de FAP a été conçue à partir d'onduleurs à transistors de puissance commandés en MLI. Ces premiers dispositifs de puissance étaient alors proposés pour la seule compensation des courants harmoniques. Cependant, à cette époque, il était encore difficile de concevoir ce type de système pour des applications industrielles. En effet, dans ces années-là, il était presque impossible de trouver, sur le marché, des interrupteurs de puissance capables de fonctionner aux fréquences de commutation et aux niveaux de puissance exigés par la réalité industrielle.

Cette barrière technologique sera franchie, dès 1977, lors de la conception d'un premier prototype de FAP à base de thyristors à commutations naturelles pour la compensation de courant harmonique.

Cependant, l'application des onduleurs à base de thyristor a tout de suite posé le problème de la génération non désirée de composantes injectées sur le réseau à la fréquence de commutation. La même raison a également empêché l'utilisation de compensateurs statiques parallèles à thyristors, lesquels avaient été conçus pour la compensation conjointe de la puissance réactive et des courants déséquilibrés.

Au cours des années 1980, des progrès importants dans le domaine des semi-conducteurs ont permis de développer de nouveaux composants de puissance associant hautes fréquences de commutation et fortes puissances. Profitant de ces avancées, et de l'avènement des interrupteurs de puissance du type GTO et IGBT, de nombreux onduleurs de puissance, commandés en MLI, ont pu être conçus en vue de répondre aux contraintes industrielles de conception des FAP. Ainsi, ces derniers ont commencé à être commercialisés et installés à travers le monde, et plus spécialement dans les pays les plus industrialisés comme le Japon. Ces premiers prototypes ne compensaient alors que les perturbations harmoniques de courant. Suite à ces premiers développements, d'autres types de FAP ont pu être réalisés pour compenser à la fois la puissance réactive, et/ou les harmoniques et les déséquilibres de courant.

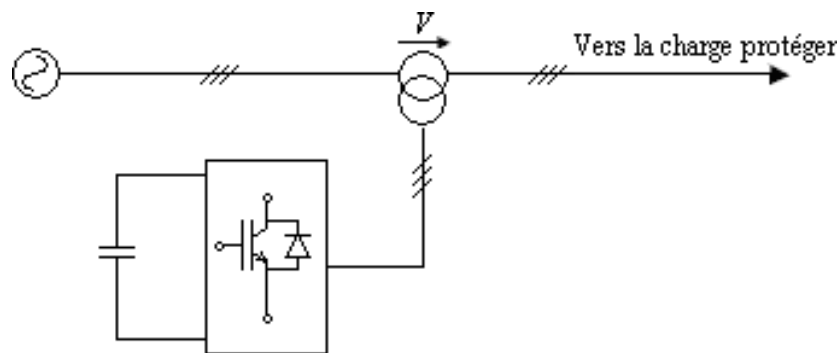
Actuellement, les filtres actifs parallèles sont essentiellement installés par les consommateurs industriels. L'évolution future de ces dispositifs de puissance pourrait autoriser le fournisseur d'énergie à prendre un rôle plus important, en lui permettant de les installer lui-même. Cette approche permettrait d'amortir la propagation des harmoniques

causées par la résonance, laquelle peut être observée entre les inductances du réseau et les batteries de condensateur installées pour améliorer le facteur de puissance.

De même, des filtres actifs parallèles installés par le fournisseur auraient aussi pour objectif de réduire la distorsion harmonique de tension en amont, côté réseau électrique [25].

### I.9.1.2 Le Filtre Actif Série (F.A.S)

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme le montre la figure I.11, comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale.



**Figure I.11:** Structure d'un Filtre actif série.

Le F.A.S est une solution adaptée à la compensation des tensions perturbatrices, harmoniques, déséquilibrées et des creux de tension. Ces perturbations trouvent généralement leurs origines dans le réseau lui-même mais peuvent parfois être provoquées par les charges elles-mêmes.

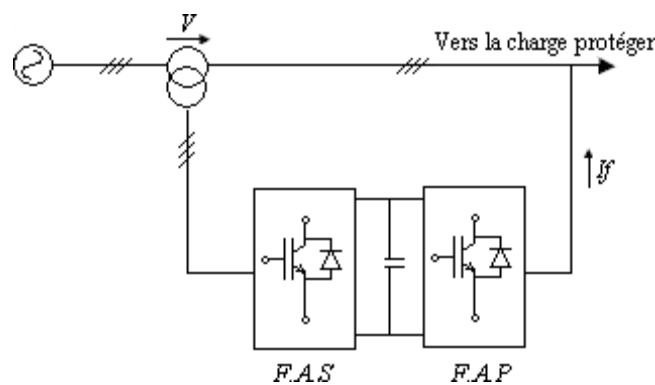
En 1976, une famille de FAS avec des onduleurs à transistors contrôlés en MLI a été présentée. Un compensateur statique pour le rééquilibrage de la tension du réseau électrique a été proposé en 1985. La génération, par l'onduleur à thyristors, des composantes non désirées, ayant une faible fréquence de commutation, a découragé l'avancement pratique de cette solution.

En 1990, un compensateur de tension à base d'onduleur de tension triphasé a été proposé pour compenser le déséquilibre de tension de réseau électrique. Depuis, beaucoup de travaux ont été consacrés à l'amélioration de la qualité de compensation du déséquilibre de la

tension du réseau. D'autres articles ont introduit le problème des creux de tension et la solution de compensation par le compensateur actif série [25].

### I.9.1.3 La combinaison parallèle-série actif

La combinaison parallèle-série actifs aussi appelée "Unified Power QualityConditioner (UPQC)", résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, comme le montre la Figure I.12 Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdale du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés.



**Figure I.12:** Combinaison parallèle série actifs (UPQC).

## I.9.2 Filtrage hybride

Le filtrage mixte ou hybride résulte de l'association d'un filtre passif et d'un filtre actif. L'intérêt des filtres mixtes est que le filtre passif prend en charge la compensation d'une grande partie des harmoniques; le filtre actif maintient les performances de filtrage en fonction de l'évolution de la charge et du réseau. Ainsi la puissance de convertisseur qui constitue le filtre actif est fortement diminuée grâce aux éléments passifs. Ces structures permettent donc, d'optimiser le rapport performance/coût et d'avoir une meilleure tenue en tension [1].

### I.9.2.1 Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif

Il empêche les courants harmoniques de circuler vers le réseau et les oblige à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences.

### **I.9.2.2 Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif**

Il a le rôle de compenser des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les courants harmoniques hautes y compris ceux créés par le filtre actif parallèle. Ce type déjà été appliqué à la compensation des courants harmonique émis par un cyclo-convertisseur de forte puissance.

### **I.9.2.3 Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif**

Il a le même principe que la combinaison d'avant avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du FAS car le courant qui le travers est plus faible. De plus, le FAS est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge.

## **I.9.3 Les redresseurs MLI**

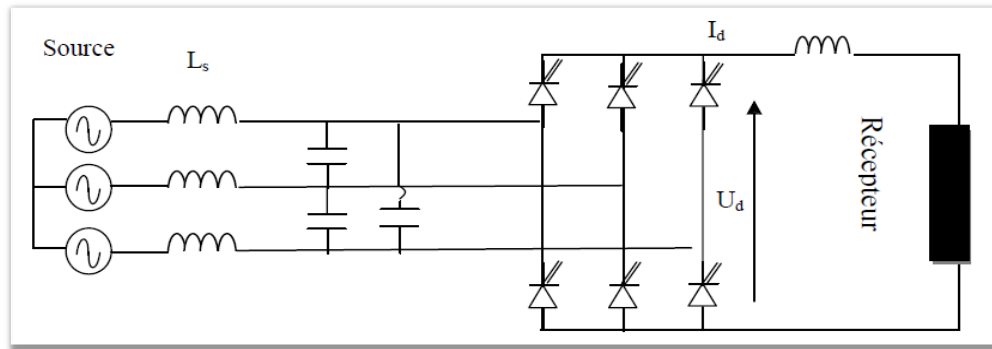
Les convertisseurs AC/DC à absorption sinusoïdale sont réalisés grâce à la stratégie de modulation de largeur d'impulsion MLI, C'est une bonne solution, cependant elle doit être généralisée, ce qui n'est pas le cas malheureusement de nos jours. Dans le cas monophasé, la structure la plus répandue est une mise en parallèle d'un pont redresseur monophasé à diode et d'un hacheur, tandis que dans le cas triphasé, c'est la structure en pont triphasé à base de GTO ou IGBT qui est la plus répandue. Cette solution permet de réduire les harmoniques produits par les convertisseurs AC/DC et elle ne peut agir sur les harmoniques créés par d'autres sortes de charges polluantes [26].

Selon le type d'onduleur utilisé, nous distinguons deux structures de redresseurs à MLI.

- Redresseur à MLI de tension.
- Redresseur à MLI de courant.

### **I.9.3.1 Redresseurs de tension**

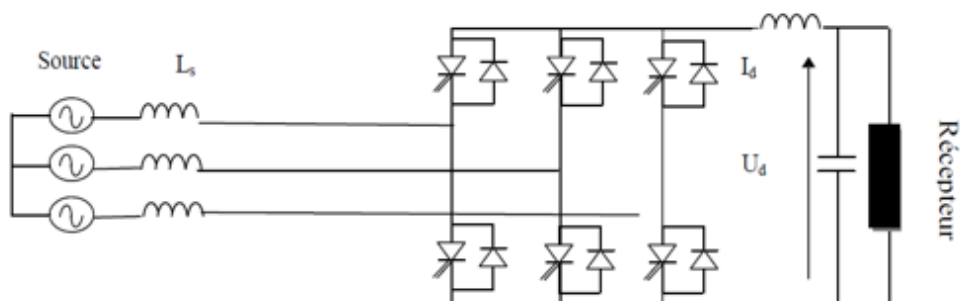
Son schéma de principe est présenté sur la figure I.13. Les composants de puissance disponibles (IGBT, GTO) étant unidirectionnels en courant, le courant  $I_d$  le sera également. La réversibilité en puissance s'effectue par l'inversion de la tension redressée  $U_d$ . Le contrôle de la puissance réactive est obtenu par action sur la phase du courant réseau par rapport à la tension [12].



**Figure I .13 :** Les redresseurs MLI de tension.

### I.9.3.2 Les redresseurs de courant :

La figure I.14 illustre la topologie du redresseur MLI de courant. Il assure la conversion d'énergie entre une source de tension alternative et un récepteur de courant continu. Les interrupteurs sont unidirectionnels en courant mais bidirectionnels en tension. L'utilisation des techniques MLI conduit à un courant côté alternatif ayant une pollution harmonique contrôlée. Cette structure est souvent dotée d'un filtre de second ordre LC du côté alternatif [27].



**Figure I .14:** Les redresseurs MLI de courant.

**I.10 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes perturbations électriques affectant l'onde de la tension du réseau électrique (comme les harmoniques, creux de tension, déséquilibres ...etc), les caractéristiques et les normes imposées. Ces perturbations ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Puis nous avons montré les différentes solutions de dépollution existantes. Il y a des avantages et des inconvénients pour chaque type de solution. Dans le chapitre suivant nous avons s'intéressé aux solutions modernes tel que le filtre actif parallèle qui sera l'objet de ce mémoire.

## *Chapitre II*

*Structure du filtre actif parallèle  
de puissance et principe de  
fonctionnement*

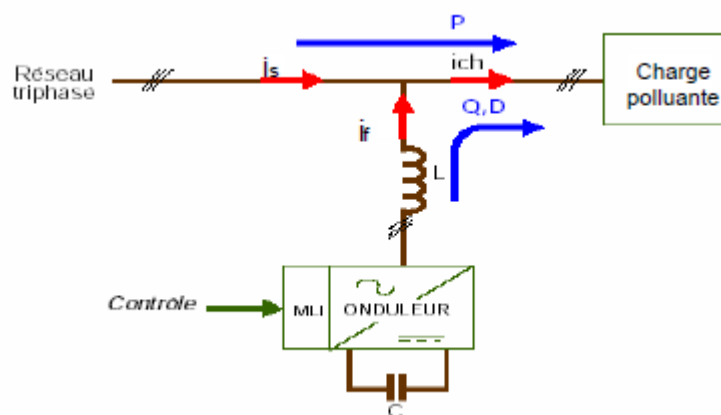
## II.1 Introduction

Depuis quelques décennies, le filtrage actif fait l'objet de nombreux travaux de recherche afin de compenser les courants harmoniques générés par les charges polluantes connectées aux réseaux électriques.

Dans ce chapitre nous présentons la description générale des différentes parties de filtre actif de puissance. Nous commencerons par un exposé la structure générale du filtre actif parallèle, laquelle a été divisée en deux: la partie puissance et la partie contrôle-commande. Ensuite, dans la partie puissance, nous allons introduire les trois principaux blocs de cette structure, à savoir l'onduleur de tension, l'élément de stockage d'énergie et le filtre de sortie. Finalement, dans la partie de contrôle-commande, nous exposerons les cinq principaux blocs, qui sont l'identification des courants perturbés, la régulation de la tension continue et du courant du filtre, la commande de l'onduleur et le système à base de *PLL*. Le système à base de *PLL* sera intégré dans la méthode d'identification des courants perturbés afin de généraliser l'application de cette dernière dans les cas les plus défavorables de la tension du réseau.

## II.2 Principe de filtrage actif parallèle de puissance

Le schéma de principe du filtre actif parallèle est représenté sur la figure II.1, il doit fournir la puissance déformante et la puissance réactive. Ainsi, le réseau fournit uniquement la puissance active [6].



**Figure II.1:** Schéma de principe du filtre actif parallèle.

Pour cela, le circuit de contrôle, en agissant sur la commande MLI, doit imposer la valeur instantanée du courant débité par l'onduleur de telle sorte que le courant fourni par le réseau soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante [6].

Dans le cas général, le courant absorbé par la charge comporte une composante active ( $i_{cha}$ )

Une composante réactive ( $i_{chr}$ ) et une composante harmonique ( $\sum_{n=1}^{\infty} i_{chn}$ )

$$i_{ch} = i_{cha} + i_{chr} + \sum_{n=1}^{\infty} i_{chn} \quad \text{II. 1}$$

Le compensateur actif ne peut absorber ou fournir de la puissance active puisqu'il ne comporte pas de source active.

D'après la première loi de Kirchhoff, le courant fourni par la source est égale à :

$$i_s = i_{ch} - i_f \quad \text{II. 2}$$

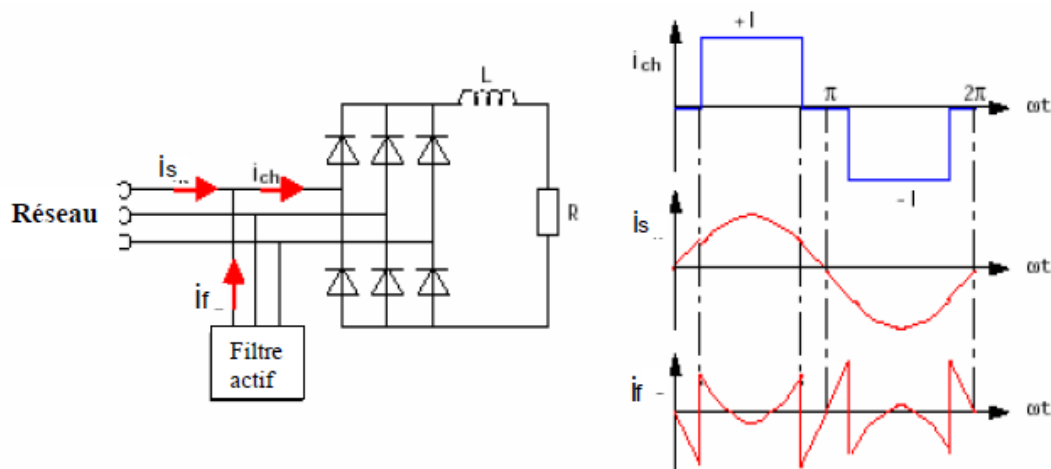
La source fournit la puissance active absorbée par la charge :

$$i_s = i_{cha} \quad \text{II. 3}$$

Le filtre actif parallèle fournit la puissance réactive et déformante :

$$i_f = i_{chr} + \sum_{n=1}^{\infty} i_{chn} \quad \text{II. 4}$$

Pour illustrer le principe du filtrage actif, considérons l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif (figure II.2). La charge polluante est constituée d'un pont triphasé à diodes débitant sur un circuit RL [6].

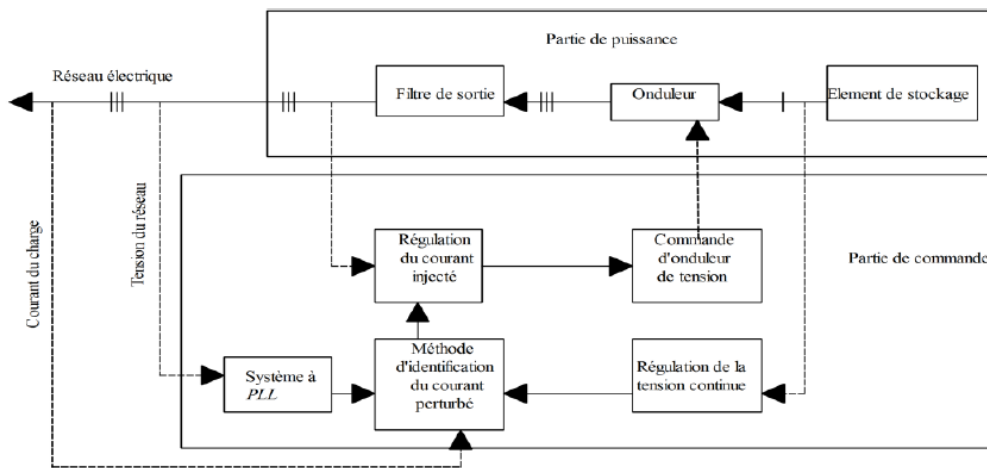


**Figure II.2:** Schéma de principe de l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif et formes d'ondes des courants respectifs.

Alors que le courant absorbé par la charge polluante est non sinusoïdal, le filtre actif injecte un courant de telle manière que le courant absorbé par le réseau doit être sinusoïdal [6].

### II.3 Structure du filtre actif parallèle

Les filtres actifs sont constitués de deux parties distinctes: une partie puissance, une partie commande (figure II.3). La première se compose d'un onduleur, d'un filtre de couplage au réseau et d'une source d'énergie. Ces deux derniers déterminent la nature du filtre actif. Il peut être à structure tension ou courant suivant qu'il est réalisé à l'aide d'un onduleur de tension ou de courant [6].



**Figure II.3:** Structure d'un filtre actif parallèle.

#### La partie puissance est constituée

- d'un onduleur à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'ouverture et à la fermeture (GTO, IGBT, MOSFET, etc....) avec des diodes en antiparallèle.
- d'un circuit de stockage d'énergie.
- d'un filtre de sortie.

#### La partie commande est constituée

- de la méthode d'identification des courants perturbés.
- de la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.

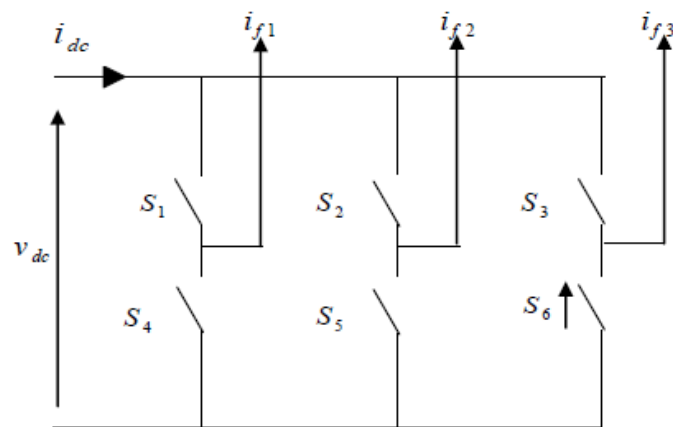
- de la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.
- de la commande de l'onduleur de tension.

### II.3.1 Etude de la partie puissance

#### II.3.1.1 Onduleur d'un filtre actif parallèle

##### II.3.1.1.1 Structure générale

L'onduleur est la partie essentielle du filtre actif [32]. La figure (II.4) présente une structure générale d'onduleur triphasé, il se compose de trois bras à base d'interrupteurs de puissance commandables avec des diodes en antiparallèle [10], [11].



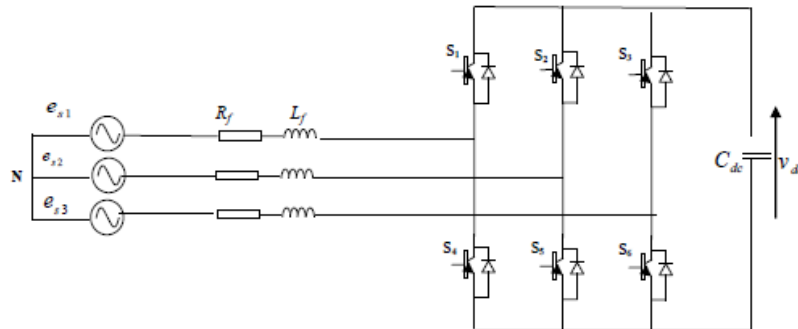
**Figure.II.4:** Structure filtre active parallèle à tension.

L'onduleur peut être commandé en tension ou en courant et peut donc se comporter comme une source de tension ou de courant vis-à-vis du circuit extérieur. Ce comportement en source de tension ou de courant peut être obtenu indifféremment avec une structure d'onduleur de tension ou de courant. La source continue peut être une source de courant ou de tension, cette source peut être un élément réactif, condensateur ou inductance, dans lequel on maintient constante la valeur moyenne de l'énergie stockée [28].

##### II.3.1.1.2 Structure de tension

Le filtre actif à structure tension connecté en parallèle au réseau est représenté sur la figure II.5. On insère entre l'onduleur et le réseau un filtre d'entrée du premier ordre qui est en réalité une simple inductance  $L_f$ . La capacité " $C_{dc}$ " joue le rôle d'une source de tension continue. La tension à ses bornes  $V_{dc}$  doit être positive et maintenue quasiment constante. Ses

fluctuations doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs constituant les interrupteurs, d'autre part pour ne pas dégrader les performances du filtre actif [7], [31].



**Figure II.5:** Structure filtre actif parallèle à tension.

L'onduleur de tension utilise des interrupteurs réversibles en courant formés de semiconducteurs commandés à la fermeture et à l'ouverture associés à des diodes montées en parallèle inverse comme le montre la figure (II.7). On utilise de préférence:

- Le transistor à effet de champ ou *MOSFET* pour les faibles puissances;
- Le transistor bipolaire ou *IGBT* pour les courants moyens;
- Le thyristor *GTO* pour les forts courants [28].

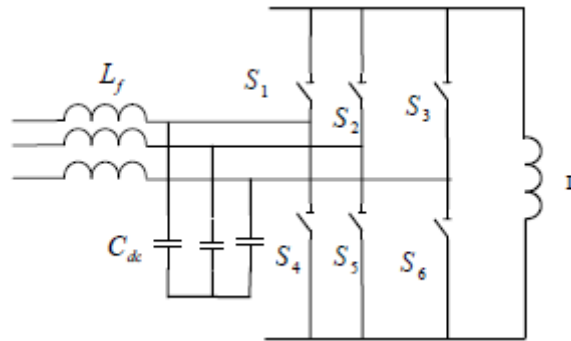


**Figure II.6:** Interrupteurs équivalents du filtre actif à source de tension.

### II.3.1.1.3 Structure de courant

Le schéma de principe du filtre actif à structure courant connecté au réseau est représenté sur la figure II.7. On insère entre l'onduleur et le réseau un filtre d'entrée (d'un filtre passebas) du second ordre constitué d'une inductance  $L_f$  et d'une capacité  $C_f$ . L'inductance  $L$  sert à stocker l'énergie et joue le rôle d'une source de courant continu. Le courant  $i$  traversant cette inductance est maintenu quasiment constant pour ne pas dégrader les performances du filtre actif [4], [31].

Les interrupteurs sont unidirectionnels. Ils sont formés par des transistors commandés à l'ouverture et à la fermeture. Ceux-ci ne pouvant supporter de tension inverse, ils nécessitent une diode en série [7].



**Figure II.7:** Structure de filtre actif à courant.

#### II.3.1.1.4 Comparaison des deux structures

##### a) Dimensionnement des circuits de stockage:

Pour les faibles puissances, le stockage de l'énergie dans un condensateur (structure tension) est plus efficace et moins coûteux. En revanche, pour les fortes puissances une inductance (structure courant) est plus adaptée.

##### b) Protection contre les surtensions et surintensités:

Les interrupteurs constituant un onduleur de tension doivent être protégés contre les surintensités tandis qu'un onduleur de courant nécessite une protection contre les sur tensions. Cette dernière est plus complexe à réaliser technologiquement.

Ainsi, pour des installations de faible ou de moyenne puissance, la structure tension semble mieux adaptée et plus simple à réaliser [6]. Par conséquent, nous avons retenu cette structure par la suite.

#### II.3.1.2 Circuit de stockage d'énergie

La source continue de l'onduleur de tension est un condensateur ( $c_{dc}$ ) qui joue le rôle d'une source de tension continue  $V_{dc}$  [33].

Le choix de la tension et de la capacité de condensateur affecte la dynamique et la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension  $V_{dc}$  élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension  $V_{dc}$  causées par les courants

engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de  $c_{dc}$  peuvent dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. Ils doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs et d'autre part pour ne pas dégrader la performance du filtre actif [4],[34].

Pour cette raison, nous pouvons estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres du système de stockage. Pour démontrer ceci, deux méthodes peuvent être utilisées [10]:

- ❖ La première méthode est basée sur le calcul de l'énergie fournie par le filtre actif et celle de la charge polluante comme suit: La valeur efficace du courant de la charge coté alternatif dans les trois phases est:

$$I_s = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_d^2 d(\omega t)} = I_d \quad \text{II.5}$$

Où  $I_d$  représente le courant de charge coté continu.

Le fondamental du courant de la charge est donné par :

$$I_{x1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_s = 0.9 I_d \quad \text{II.6}$$

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

$$\sum_{h=2}^{\infty} I_{sh} = \sqrt{I_s^2 - I_{s1}^2} = 0.43 \cdot I_s \quad \text{II.7}$$

Le filtre actif doit fournir la puissance correspondante aux harmoniques produite par la charge .En choisissant la période de l'ondulation de la tension aux bornes du condensateur

$$C_{dc} \geq \frac{0.43 \cdot I_s}{6f_s (v_{dcmax}^2 v_{dcmin}^2)} \quad \text{II.8}$$

Où  $f_s$  la fréquence fondamentale du réseau électrique. On choisit un taux d'ondulation acceptable, généralement de l'ordre de 2%  $v_{dc}$  [5].

- ❖ La deuxième méthode, plus simple, se base sur la mesure du courant harmonique du rang le plus faible. La capacité  $c_{dc}$  se calcule de la façon suivante:

$$C_{dc} = \frac{I_h}{v_{dc} \Delta v_{dc} \omega_h} \text{ II. 9}$$

Où :  $w_h$  la pulsation la plus faible des harmoniques à compenser [10]

### II.3.1.2 .1 Estimation de la valeur de la capacité du condensateur de stockage

La détermination de la valeur de la capacité du condensateur de stockage d'énergie peut être estimée en se basant sur le principe de l'échange instantané de l'énergie nécessaire pour subvenir à une augmentation ou une diminution d'un échelon de puissance imposé par la charge (régime transitoire), en appliquant le concept de l'équilibre d'énergie.

A partir de la puissance réelle maximale de la charge la valeur  $P_{max}$  de la capacité est donnée par :

$$C_{dc} = \frac{2 \cdot p_{max} \times 20 \cdot 10^{-3}}{V_{dc}^2 (1 - k^2)} \text{ ou } k = \frac{V_{dcmin}}{V_{dc}} \text{ II. 10}$$

La tension doit être choisie judicieusement pour assurer la contrôlabilité du courant en tous points de fonctionnement [35].

### II.3.1.3 Filtre de sortie

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau. Ce filtre limite certes la dynamique du courant mais réduit en même temps la propagation sur le réseau électrique des composantes dues aux commutations [35]. Dans ce travail, nous avons utilisé un filtre qui se compose d'une inductance  $L_f$  de résistance interne  $R_f$ , comme le montre la figure II.8

Le filtre de sortie est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants:

- assurer la dynamique du courant :

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{di_h}{dt} \text{ II. 11}$$

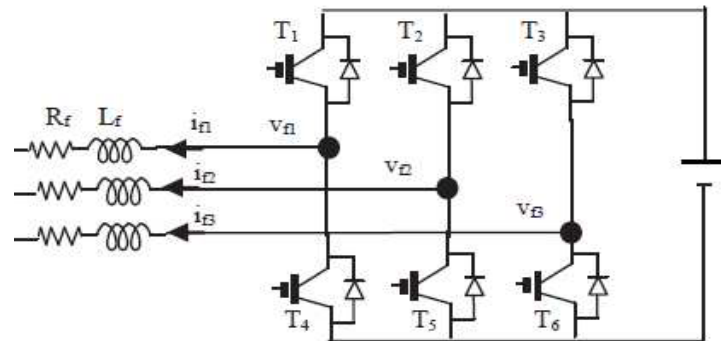
Avec :

$I_h$  : Le courant harmonique de la charge

$I_f$  : Le courant du filtre actif,

- Empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique.

Nous avons employé au cours de notre étude un filtre de sortie du premier ordre [36], [37], [2].



**Fig.II.8:** Onduleur de tension et filtre de sortie.

### II.3.2 Etude de la partie contrôle-commande

Cette section est consacrée à la partie commande du filtre actif, dont laquelle on présente les méthodes de l'identification du courant perturbateur, la commande de l'onduleur, le système à **PLL**, et la régulation de la tension du bus continue.

#### II.3.2.1 Les méthodes d'identification des courants perturbés

Les performances du filtre actif dépendent des semi-conducteurs de puissance utilisés pour réaliser l'onduleur et le choix de la méthode utilisée pour compenser la composante harmonique du courant de charge. Afin de commander le filtre actif parallèle, nous devons d'abord identifier les courants harmoniques de la charge polluante, qui servent en effet comme références du filtre actif parallèle. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées:

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

La première méthode est la plus appropriée au filtre actif parallèle installé par le consommateur pour compenser les courants perturbateurs causés par ses charges polluantes.

Les différentes méthodes d'identification de courant perturbateur peuvent être regroupées en deux familles[4],[6],[7],[28],[33].

- ❖ Les stratégies de commande dans le domaine fréquentiel sont basées sur le principe de l'analyse de Fourier et nécessitent la périodicité de l'onde polluante. Parmi ces stratégies, La transformée de Fourier rapide (FFT), la transformée de Fourier discrète (DFT), la transformée de Fourier discrète récursive (RDFT) et le filtre de Kalman sont les méthodes usuellement utilisées dans le domaine fréquentiel
- ❖ Les stratégies de commande temporelle sont basées sur le principe de maintenir la tension ou le courant instantané proche d'un signal sinusoïdal, ce avec une tolérance raisonnable. Parmi ces stratégies, on peut citer:

La méthode des puissances instantanées ( $pq$ ): Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation, la théorie de référentiel lié au synchronisme ( $dq$ ), la théorie des puissances instantanées dans le référentiel ( $pqr$ ) et enfin la méthode du filtre coupe-bande.

Une autre méthode, appelée la méthode de détection synchrone et reposant sur la transformée de *Park*, a été proposée. Cette méthode se base essentiellement sur le calcul de la pulsation fondamentale obtenue par une *PLL*. Cela exige une précision parfaite du calcul de cette pulsation afin de ne pas avoir des courants identifiés erronés.

La méthode de puissance instantanée est la méthode la plus connue et appropriée au filtre actif parallèle installé par le consommateur pour compenser les courants perturbateurs causés par ses charges polluantes. C'est pourquoi cette méthode de détection sera employée dans ce travail [4],[7],[10],[28],[29].

### II.3.2.2 Système PLL

La figure II.9 présente le système PLL utilisé pour déterminer la fréquence fondamentale, il est basé sur la puissance réelle instantanée [3].

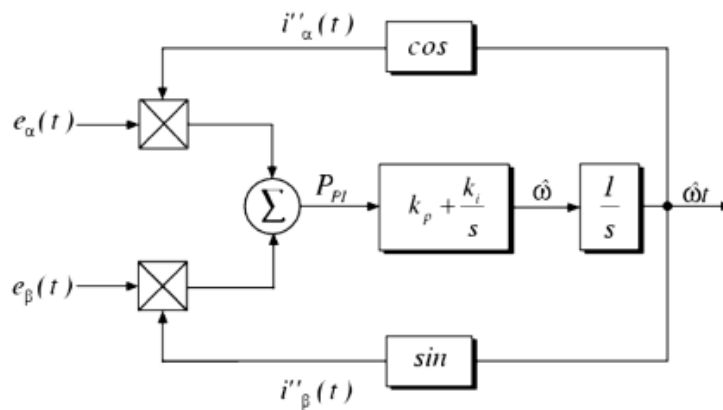
$$P_{PI} = e_{\alpha}(t)i_{\alpha}''(t) + e_{\beta}(t)i_{\beta}''(t) \quad \text{II. 22}$$

Les grandeurs  $(t)$  et  $(t)$  correspondent aux tensions mesurées au point de couplage, par contre les signaux auxiliaires  $i_{\alpha}''(t)$  et  $i_{\beta}''(t)$  sont juste le cosinus et le sinus de la l'intégrale de la pulsation identifiée  $\hat{\omega}$ . Le point de stabilité de la PLL est atteint lorsque la puissance à l'entrée du régulateur PI ait une valeur moyenne nulle et une valeur alternative qui tend vers zéro, or :

$$\bar{P}_{PI} = 3E_1 + I_1^\circ + \cos\phi$$

II. 23

Ceci dit que le point d'opération est établi lorsque  $\hat{\omega}$  correspond à la pulsation fondamentale du système, et les tensions  $i_{\alpha''}(t)$  et  $i_{\beta''}(t)$  deviennent orthogonales aux courants auxiliaires  $i_{\alpha'}(t)$  et  $i_{\beta'}(t)$  respectivement.



**Figure II.9:** Schéma de principe de la PLL.

Cette PLL présente de bonnes caractéristiques dynamiques et statiques même en présence de tensions fortement perturbées [3]. Les paramètres du régulateur PI sont choisis compte tenu de la fonction de transfert en boucle fermée donnée par :

$$FT_{PLL} = \frac{k_p s + k_i}{s^2 + k_p s + k_i} \quad \text{II. 24}$$

Ou sous forme canonique:

$$FT_{PLL} = \frac{2\varepsilon\omega + \omega_c^2}{s^2 + 2\varepsilon\omega_c s + \omega_c^2} \quad \text{II. 25}$$

Pour garantir une meilleure réponse, le coefficient d'amortissement  $\xi$  est choisi égal à 0.7 et la pulsation de coupure  $\omega_c$  doit être choisie la plus faible possible pour annuler les fluctuations dans la pulsation  $\hat{\omega}$ . Cette méthode d'identification a été testée dans des conditions très défavorables, la Figure II.7 montre les résultats d'identification qui sont très satisfaisants après un temps de réponse de 50ms lié au temps de réponse du filtre passe bas utiliser.

### II.3.2.3 Commande de l'onduleur

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des courants de référence, à travers les ordres de commande appliqués aux interrupteurs de puissance. Les deux principales familles de commande des convertisseurs statiques sont : la commande par hystérésis et la commande par modulation de largeur d'impulsion MLI [10], [7].

#### II.3.2.3.1 Commande par hystérésis

La commande conventionnelle par hystérésis est très couramment utilisée de par sa simplicité d'utilisation et sa robustesse. En fait, cette stratégie assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres. Son principe consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur. Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs [37].

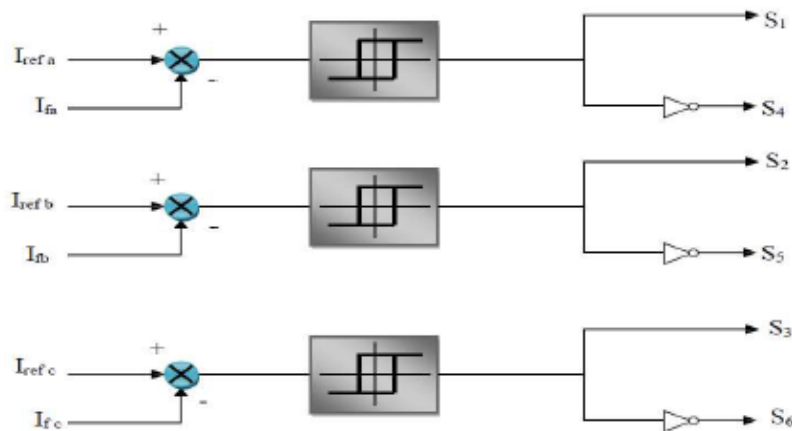
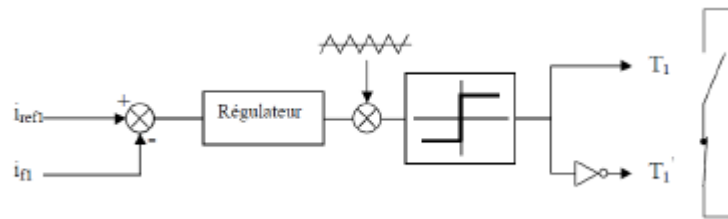


Figure II.10 :Principe de la commande par hystérésis.

#### II.3.2.3.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

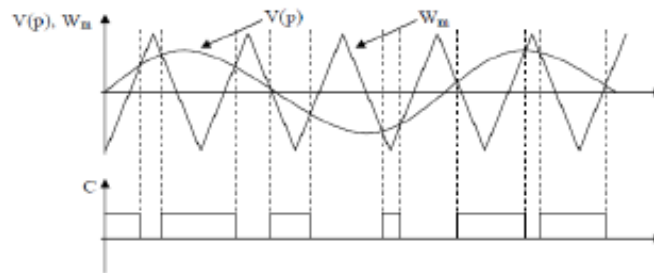
Afin de contourner les problèmes précédent, nous introduirons une deuxième famille de commande de l'onduleur: la commande par modulation de largeur impulsion (MLI). La technique de commande par MLI résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à

échantillonnage naturel, dite MLI intersective. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe est donné par la Figure II.11. [10].



**Figure II.11:** Principe de commande des courants par MLI.

Les signaux logiques C qui en résultent donnent l'ordre de commutation des interrupteurs du filtre Figure II.12



**Figure II. 12:** Répartition des commutations sur un bras d'un onduleur.

#### II.3.2.4 Régulation de la tension continue

La tension moyenne  $V_{dc}$  aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur fixe. Les pertes dans le filtre actif (interrupteurs et filtre de sortie) sont la principale cause susceptible de modifier cette tension. La régulation de la tension continue aux bornes du condensateur de stockage d'énergie doit se faire par l'adjonction des courants fondamentaux actifs dans les courants de référence. La sortie du régulateur  $P_c$  s'ajoute, à un signe près, à la puissance active perturbatrice  $\tilde{p}$  et donne lieu à un courant fondamental actif corrigeant ainsi  $V_{dc}$ . La puissance représente la puissance active nécessaire pour maintenir la tension  $V_{dc}$  égale à la valeur de la tension de référence souhaitée  $V_{dc-ref}$ . Le régulateur employé ici est

un régulateur proportionnel simple ( $K_c$ ), En négligeant les pertes de commutations dans l'onduleur ainsi que l'énergie stockée dans l'inductance du filtre de sortie, la relation entre la puissance absorbée par le filtre actif et la tension aux bornes du condensateur peut s'écrire sous la forme suivante :

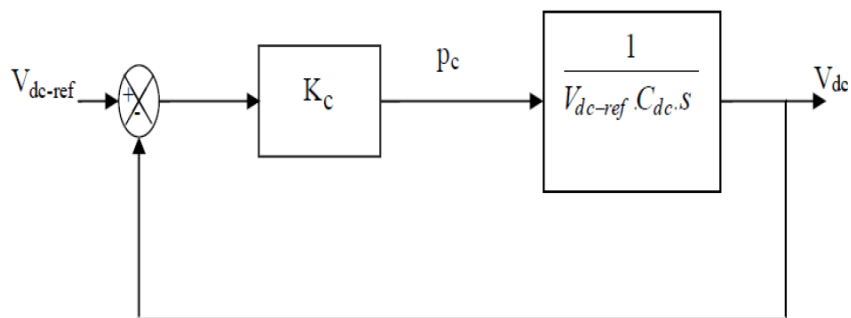
$$P_c = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} C_{dc} \cdot V_{dc}^2 \right) \quad \text{II. 26}$$

Notons que la relation (II .26) est non linéaire. Pour des faibles variations de la tension autour de sa référence  $V_{dc-ref}$  elle peut être linéarisée à travers les relations suivantes :

$$p_c = C_{dc} V_{dc-ref} \frac{d}{dt} (V_{dc}) \quad \text{II. 27}$$

$$V_{dc} \Rightarrow \frac{P_c(s)}{V_{dc-ref} C_{dc} \cdot s} \quad \text{II. 28}$$

A partir de la relation (II.28), et en prenant en compte le régulateur proportionnel ( $K_c$ ) la boucle de régulation de la tension continue peut être représentée par le schéma de la figure II.13 Le choix du paramètre  $K_c$  , aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal [24].



**Figure II. 13:** Boucle de régulation de la tension continue.

### II.3.2.5 Régulation du courant du filtre actif

En négligeant la résistance de l'inductance, l'équation reliant la tension qui doit fournir l'onduleur, afin de créer des courants harmoniques en opposition de phase à ceux existant sur le réseau et la tension au point de raccordement est définie par:

$$v_f = v_s + L_f \frac{di_f}{dt} \text{ II.29}$$

La transformation de Laplace de l'équation (II.29) est donnée par:

$$V_f(s) = V_s(s) + L_f I_f(s) \text{ II. 30}$$

La relation (II.29) donne la grandeur asservie  $I_f$  en fonction de la grandeur de commande.

$V_f$  On obtient:

$$I_f = \frac{V_f(s) - V_s(s)}{sL_f} \text{ II. 31}$$

La tension  $V_f$  donné par la relation (II.30) est composée de deux termes à fréquences différentes. Le premier terme est la tension du réseau qui est facilement mesurable. Le deuxième terme est égal à la tension aux bornes de l'inductance  $L_f$  lorsqu'elle est traversée par un courant égal à celui de la référence. Cette tension doit être générée par un régulateur. Le courant de référence est composé des courants harmoniques avec des fréquences multiples de celle du réseau. Pour éviter les harmoniques dus aux découpages sur le fonctionnement du régulateur. on peut ajouter un filtre passe-bas du premier ordre avant celui-ci. Le schéma de régulation du courant est décrit par la figure II.14.

Dans ce schéma,  $G(s)$  représente l'onduleur commandé *MLI* qui peut être modélisé par la relation suivante:

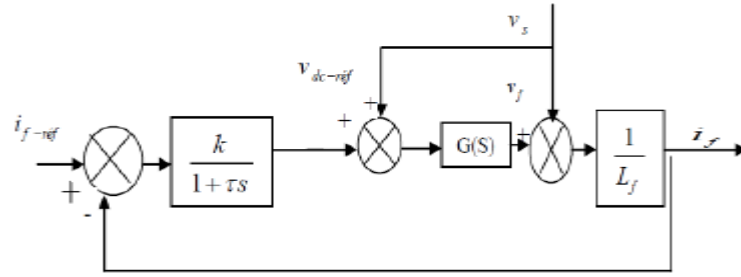
$$G(s) = \frac{v_{dc}}{2v_p} \text{ II. 32}$$

Avec :

$V_{dc}$ : La tension côté continu de l'onduleur.

$V_p$  : L'amplitude de la porteuse triangulaire.

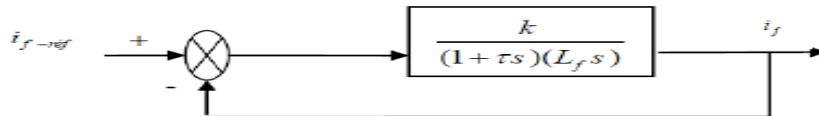
$\tau$  : Représentant le retard causé par le calcul des courants perturbateurs.



**Figure II .14:** Schéma de la régulation des courants du filtre actif.

Pour que soit égale à, nous choisissons  $G(s)$  égal à 1.

Le schéma de la régulation de ce courant peut alors se simplifier, comme montre la figure II.15 [6], [22].



**Figure II. 15 :** Schéma de la régulation simplifié.

La fonction de transfert en boucle fermée est:

$$F_i(s) = \frac{\omega_i^2}{s^2 + 2\delta_i\omega_i s + \omega_i^2} \text{ II. 33}$$

$$\omega_i = \sqrt{\frac{k}{\tau L_f}} \text{ II. 34}$$

$$\varepsilon_i = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_f}{k\tau}} \text{ II. 35}$$

On remarque que pour obtenir un amortissement suffisant dans la régulation du courant, le produit  $k, \tau$  doit être limité [22].

## II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure générale du FAP ,le principe de fonctionnement du filtre actif parallèle de puissance, , les différentes méthodes d'identifications des courants de références où on a concentré sur la théorie de la puissance instantanée réelle et imaginaire avec (*FPB* et *FMV*) et étudié le principe de base et stratégies de commande de l'onduleur de tension. Finalement, nous avons présenté le circuit de régulation du courant ainsi qu'une boucle de régulation de la tension continue  $V_{dc}$  du filtre actif afin d'assurer un fonctionnement plus stable.

Le chapitre suivant, sera consacré à la modélisation de l'ensemble réseau, charge polluante et filtre actif et simulés sous l'environnement *Matlab/Simulink*.

## *Chapitre III*

*Techniques d'extraction des  
courants harmoniques*

### III.1 Introduction

Les filtres actifs de puissance ont pour objectif d'agir d'une manière directe et dynamique afin de compenser les harmoniques et atténuer leurs effets sur les réseaux d'alimentation. Pour rendre cet objectif réalisable, la méthode d'identification des grandeurs de références harmoniques devrait répondre en temps réel et avec précision afin de considérer une bonne qualité du filtrage. Les algorithmes d'identification des références harmoniques de courants ou de tensions sont regroupés dans la littérature en deux domaines, le domaine fréquentiel ou le domaine temporel.

### III.2 Méthode des puissances active et réactive instantanées

La méthode des puissances instantanées a été introduite par H. Akagi. Son principe est basé sur le passage de systèmes triphasés (abc), à un système diphasé ( $\alpha$ - $\beta$ ) en utilisant la transformation de Concordia, afin de calculer les puissances réelle et imaginaire instantanées. Ensuite, pour déterminer les courants harmoniques de la charge, la composante fondamentale est transformée en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. Dans la méthode classique des puissances instantanées on utilise généralement, soit un filtre passe-haut, soit un filtre passe-bas afin de ne garder que la composante harmonique du signal. Le schéma bloc relatif à cette méthode est représenté par la Figure (III .1).

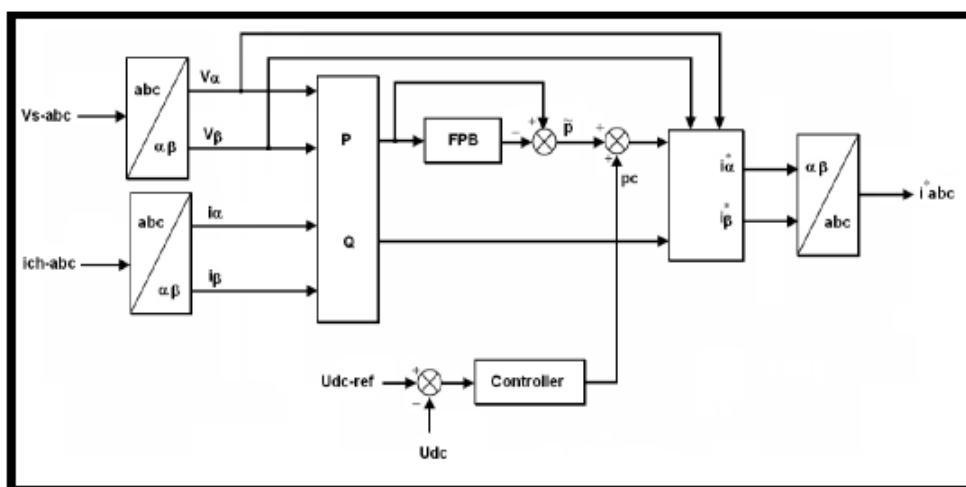


Figure III .1 : Méthode d'identification des puissances active et réactive instantanées.

Notons, respectivement, les tensions simples d'alimentations et les courants de charge d'un système triphasé équilibré par  $(V_{sa}, V_{sb}, V_{sc})$  et  $(i_{cha}, i_{chb}, i_{chc})$ . La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé équilibré à un système diphasé dont les axes sont en quadrature. Cette transformation appliquée aux tensions du réseau et aux courants de ligne mène aux expressions suivantes [38].

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{III. 1}$$

$$\begin{bmatrix} i_{ch\alpha} \\ i_{ch\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{cha} \\ i_{chb} \\ i_{chc} \end{bmatrix} \quad \text{III. 2}$$

La puissance active instantanée  $p$  et la puissance réactive instantanée  $q$  sont définies par :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha} & V_{\beta} \\ -V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ch\alpha} \\ i_{ch\beta} \end{bmatrix} \quad \text{III. 3}$$

Les puissances active et réactive instantanées peuvent s'écrire comme la somme d'une composante continue et d'une composante harmonique.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} & + & \tilde{p} \\ \bar{q} & + & \tilde{q} \end{bmatrix} \quad \text{III. 4}$$

Avec  $\bar{p}$  et  $\bar{q}$  les composantes continues de  $p$  et  $q$ , et  $\tilde{p}$  et  $\tilde{q}$  les composantes harmoniques de  $p$  et  $q$ .

A partir de l'équation (III. 3), nous pouvons déduire les expressions des composantes du courant de charge selon les axes  $\alpha\beta$

$$\begin{bmatrix} i_{ch\alpha} \\ i_{ch\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha} & V_{\beta} \\ -V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{\alpha} & -V_{\beta} \\ V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad \text{III. 5}$$

Le remplacement de (II. 4) dans (II. 5) donne les expressions des courants  $i_{\alpha}$  et  $i_{\beta}$  selon les axes  $\alpha\beta$  par :

$$\begin{bmatrix} i_{ch\alpha} \\ i_{ch\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{\alpha} & -V_{\beta} \\ V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{\alpha} & -V_{\beta} \\ V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad \text{III. 6}$$

Puisque nous intéressons à la compensation simultanée des harmoniques de courant et de l'énergie réactive, dans ce cas nous éliminons alors la composante continue de  $p$  à l'aide d'un simple FPB et on ajoute la puissance active  $p_c$  nécessaire à la régulation de la tension continue à la composante harmonique de la puissance active instantanée. Les courants perturbateurs de référence, notés  $i_{\alpha}$  et  $i_{\beta}$ , s'expriment selon les axes  $\alpha\beta$  par :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha\text{-ref}} \\ i_{\beta\text{-ref}} \end{bmatrix} = \frac{1}{V\alpha^2 + V\beta^2} \begin{bmatrix} V\alpha & -V\beta \\ V\beta & V\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} + p_c \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad \text{III. 7}$$

Les courants perturbateurs de référence selon les axes (abc) peuvent être déterminés en utilisant la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha\text{-ref}} \\ i_{\beta\text{-ref}} \\ i_{c\text{-ref}} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{2}{3}} \\ -\frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{2}{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha\text{-ref}} \\ i_{\beta\text{-ref}} \end{bmatrix} \quad \text{III. 8}$$

### III.3 Méthode du référentiel synchrone (SRF)

La méthode de référentiel synchrone (synchronousreference frame) introduite par Bhattacharya, exploite également la transformation de Concordia mais appliquée uniquement aux courants de ligne ( $I_{l1}, I_{l2}, I_{l3}$ ). Ensuite, une seconde transformation est opérée pour passer des courants de ligne en d - q, ceci permet de transformer la composante fondamentale du courant en une composante continue et les composantes harmoniques du courant en des composantes alternatives. Permet d'éliminer à l'aide d'un simple filtre passe bas, la composante continue du courant[33] :

Soit la transformation des courants de lignes triphasées équilibrés  $I_{la}, I_{lb}, I_{lc}$  en système biphasé :

$$\begin{bmatrix} I_{ld} \\ I_{lq} \\ I_{lo} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{la} \\ I_{lb} \\ I_{lc} \end{bmatrix} \quad \text{III. 9}$$

En exploitant les signaux  $\cos(\theta)$  et  $\sin(\theta)$  tirés de la tension " fondamentale " du réseau, nous obtenons l'expression des courants dans le système d-q tournant à la pulsation de la composante fondamentale de la tension du réseau :

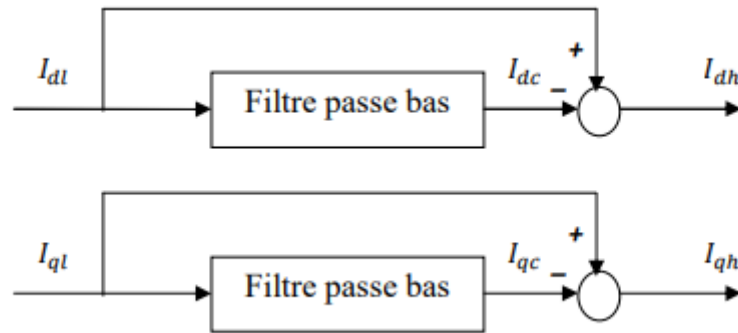
$$\begin{bmatrix} I_{ld} \\ I_{lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{dc} \\ I_{qc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dh} \\ I_{qh} \end{bmatrix} \quad \text{III. 10}$$

Soit,

$$\begin{bmatrix} I_{ld} \\ I_{lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dc} \\ I_{qc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dh} \\ I_{qh} \end{bmatrix} \quad \text{III. 11}$$

Où,  $I_{dc}$  et  $I_{qc}$  sont des composantes continues,  $I_{dh}$  et  $I_{qh}$  sont des composantes pulsatoires, (harmonique).

La séparation de  $I_{dc}$  et  $I_{qc}$  des composantes  $I_{dh}$  et  $I_{qh}$  se fait par moyen d'un filtre passe-bas.



**Figure III.2 :** Schéma de principe de séparation des composantes continues et pulsatoires (harmoniques).

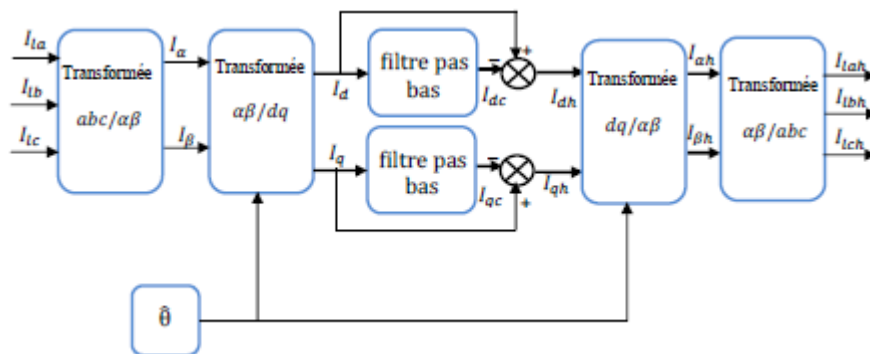
Les composantes harmoniques dans le repère  $\alpha$ - $\beta$  se calculent par l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} I_{ah} \\ I_{l\beta h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_{dh} \\ I_{qh} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dh} \\ I_{qh} \end{bmatrix} \quad \text{III. 12}$$

La transformation inverse de Concordia permet de remonter aux courants harmoniques (équilibrés ou déséquilibrés) :

$$\begin{bmatrix} i_{lah} \\ i_{lbh} \\ i_{lch} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{2}{3}} \\ -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{2}{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} \quad \text{III. 13}$$

L'algorithme de d'identification des courants harmoniques par la méthode de référentiel synchrone est schématisé par la Fig. III.3.



**Figure III.3 :** Principe d'identification des harmoniques par la méthode SRF.

### III.4 Méthode du filtre Notch

Cette méthode est la plus simple des algorithmes de calcul des courants harmoniques de référence, dans ce type de commande le courant de charge est filtré par un filtre coupe-bande qui parfois est appelé filtre Notch. Ce type de filtres élimine la composante fondamentale tout en laissant passer les composantes harmoniques. Ils ont par conséquent, la même fréquence de coupure.

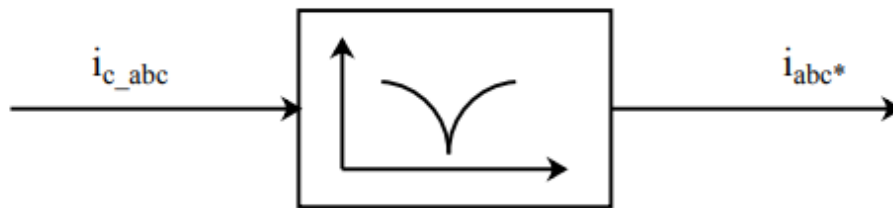
Ce filtre a trois caractéristiques :

- Les tensions du réseau électrique ne sont pas nécessaires dans la détection des composantes harmoniques, donc il peut être également employé pour détecter les composantes harmoniques de la tension et du courant.
- Les séquences fondamentales positive et négative ne peuvent pas être séparées par ce genre de filtre.
- La précision de filtrage dépend des paramètres du filtre choisis comme il est sensible aux variations de la fréquence. En outre, IL provoque une erreur de phase.

La fonction de transfert associée à ces filtres est de la forme suivante :

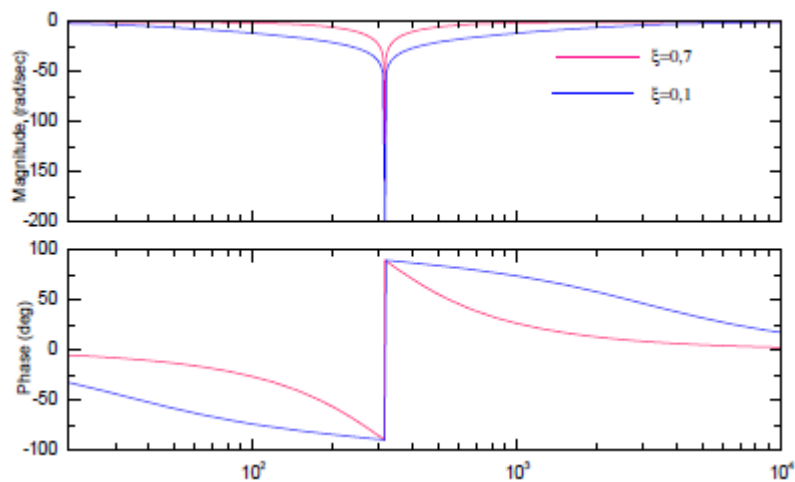
$$H(p) = \frac{p^2 + \omega_c^2}{p^2 + p \frac{\omega_c}{\xi} + \omega_c^2} \quad \text{III. 14}$$

La figure (III.4) illustre le schéma bloc de la méthode et la figure (3.21) donne son diagramme de Bode pour deux valeurs du paramètre  $\zeta$ . La qualité de filtrage de ce filtre dépend également de ses paramètres choisis.



**Fig. III.4 :** Diagramme de génération des courants harmoniques de référence par le filtre Notch.

La réponse temporelle filtrée des courants de charge dans l'équation (3.2) à la sortie du



**Figure III.5 :** Diagramme de Bode d'un Notch filtre.

Filtre prend l'expression suivante :

Partie I: regime transitoire de la composante continue des harmoniques  
la valeur prevue du regime permanent .

$$i_{a_{ref}} = \overbrace{0 \times \sin(\omega t + \phi_1)} \quad -$$

$$\begin{aligned}
& \overbrace{\frac{I_1}{\omega_0 \sqrt{\frac{1}{\xi^2} - 4}} \left[ \frac{\omega_0^2 + s_1^2}{\sqrt{s_1^2 + \omega^2}} \sin \left( \varphi_1 + \operatorname{atan} \left( \frac{\omega}{s_1} \right) \right) e^{s_1 t} + \frac{\omega_0^2 + s_2^2}{\sqrt{s_2^2 + \omega^2}} \sin \left( \varphi_1 + \operatorname{atan} \left( \frac{\omega}{s_2} \right) \right) e^{s_2 t} \right]}^{\text{Partie I: regime transitoire de la composante continue des harmoniques.}} \\
& \overbrace{\overbrace{A_h \times \sin \left( (h\omega)t + \varphi_h + \operatorname{atan} \left( \frac{1}{\frac{(h\omega)}{s_1^2 + s_2^2} - \frac{\omega_0}{(h\omega)^2 - \omega_0^2}} \right) \right)}^{\text{Partie II: le regime transitoire de la composante harmonique}}}_{\text{la composante harmonique au regime permanent .}} \\
& \overbrace{\sum_{\substack{h=-\infty \\ \text{et } h \neq 1}}^{+\infty} \frac{I_h}{\omega_0 \sqrt{\frac{1}{\xi^2} - 4}} \left[ \frac{\omega_0^2 + s_1^2}{\sqrt{s_1^2 + (h\omega)^2}} \sin \left( \varphi_h + \operatorname{atan} \left( \frac{(h\omega)}{s_1} \right) \right) e^{s_1 t} + \frac{\omega_0^2 + s_2^2}{\sqrt{s_2^2 + (h\omega)^2}} \sin \left( \varphi_h + \operatorname{atan} \left( \frac{(h\omega)}{s_2} \right) \right) e^{s_2 t} \right]}^{\text{Partie II: le regime transitoire de la composante harmonique.}}
\end{aligned}$$

III. 15

Avec :

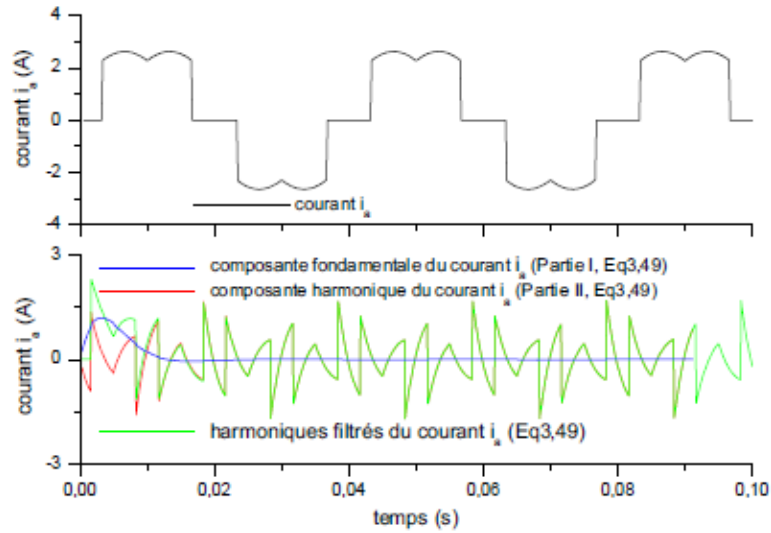
$$A_h = \sum_{h=-\infty \text{ et } h \neq 1}^{+\infty} \frac{\sqrt{(I_h (h\omega)^2 ((h\omega)^2 - \omega_0^2) - \omega_0 (s_1^2 + s_2^2))^2 + ((h\omega) (s_1 + s_2) (\omega_0^2 - (h\omega)^2))^2}}{(s_1^2 + (h\omega)^2)(s_2^2 + (h\omega)^2)}$$

III. 16

$$s_1 = -\frac{\omega_0}{\xi} - \frac{\omega_0}{2} \sqrt{\frac{1}{\xi^2} - 4} \quad \text{III. 17}$$

$$s_2 = -\frac{\omega_0}{\xi} + \frac{\omega_0}{2} \sqrt{\frac{1}{\xi^2} - 4} \quad \text{III. 18}$$

La Figure III.6 présente les différentes composantes des courants de référence  $i_{ref}$  selon l'équation (III.1). Le taux de distorsion d'harmonique (THD %) pour le filtre Notch est :



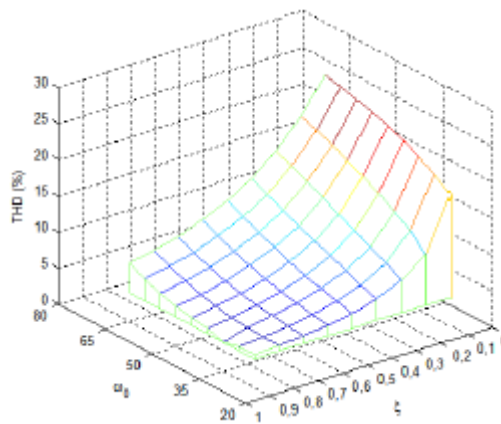
**Figure III.6 :** Courant harmonique de référence  $i_{a\text{ref}}$  filtré par Notch filtre.

défini selon l'équation (III.2), par :

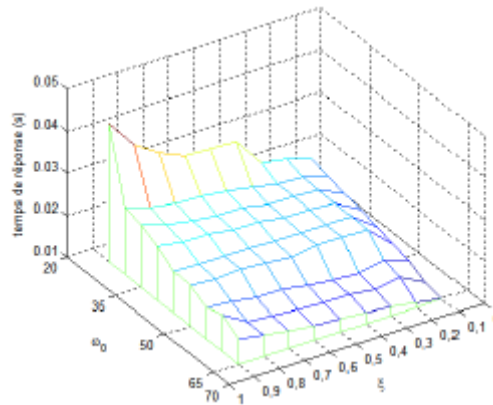
$$THD\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=-\infty}^{+\infty} et h \neq 1 A_h^2}}{I_1} \quad \text{III. 19}$$

A partir de la première partie de l'équation (III.15), le temps de réponse  $t_r$  pour atteindre le régime permanent avec une erreur de  $\pm 5\%$  peut être obtenu itérativement par la résolution de l'équation non linéaire suivante :

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\omega_0^2 + s_1^2}{\sqrt{s_1^2 + \omega^2}} \sin \left( \varphi_1 + \text{atan} \left( \frac{\omega}{s_1} \right) \right) e^{s_1 t_r} + \frac{\omega_0^2 + s_2^2}{\sqrt{s_2^2 + \omega^2}} \sin \left( \varphi_1 + \text{atan} \left( \frac{\omega}{s_2} \right) \right) e^{s_2 t_r} \right) \\ & = \pm 0.05 I_h \quad \text{III. 20} \end{aligned}$$



**Figure III.7 :** Variation du THD du courant fondamental de référence en fonction de  $\omega_c$  et  $\xi$ .



**Figure III.8 :** Variation du temps de réponse du courant fondamental de référence en fonction de  $\omega_c$  et  $\xi$ .

Les Figure III.7 et Figure III.8 montrent la représentation analytique de l'équation (3.44) en fonction de  $\omega_c$  et  $\omega_0$ . Si on prend par exemple une valeur du THD égale à (4.60 %), correspondant pond à un temps de réponse de (0.043 s), et pour la valeur du THD de (8.63%), correspond à un temps de réponse de (0.022 s). On note que le Notch filtre un comportement similaire aux méthodes précédentes [11].

### III.5 Méthode basée sur le filtre multi variable (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 ( $\alpha$ ,  $\beta$ ).

La fonction de transfert de ce filtre est alors la suivante :

$$H(s) = \frac{\hat{X}_{\alpha\beta}(s)}{x_{\alpha\beta}(s)} = K \frac{(S + K) + j\omega_c}{(S + K)^2 + \omega_c^2} \quad \text{III. 21}$$

Où  $c \omega$  est défini par :

$$\omega_c = \varepsilon \cdot n \cdot \omega_f \quad \text{III. 22}$$

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).

$\widehat{X}_{\alpha\beta}$ : Les signaux de sortie du FMV

A partir de l'équation (III.3) et après un court développement, nous pouvons établir les deux expressions suivantes :

$$\widehat{X}_{\alpha}(S) = \frac{K(S + K)}{K(S + K)^2 + \omega_c^2} X_{\alpha}(S) - \frac{K\omega_c}{(S + K)^2 + \omega_c^2} X_{\beta}(S) \quad \text{III. 23}$$

$$\widehat{X}_{\beta}(S) = - \frac{K\omega_c}{(S + K)^2 + \omega_c^2} X_{\alpha}(S) + \frac{K(S + K)}{K(S + K)^2 + \omega_c^2} X_{\beta}(S) \quad \text{III. 24}$$

Les équations (III.4) et (III.22) peuvent également être exprimées sous la forme :

$$\widehat{X}_{\alpha}(S) = \frac{K}{S} [X_{\alpha}(S) - \widehat{X}_{\alpha}(S)] - \frac{\omega_c}{S} \widehat{X}_{\beta}(S) \quad \text{III. 25}$$

$$\widehat{X}_{\beta}(S) = \frac{K}{S} [X_{\beta}(S) - \widehat{X}_{\beta}(S)] + \frac{\omega_c}{S} \widehat{X}_{\alpha}(S) \quad \text{III. 26}$$

La Figure III.9 présente le schéma bloc du filtre multi-variable [39].

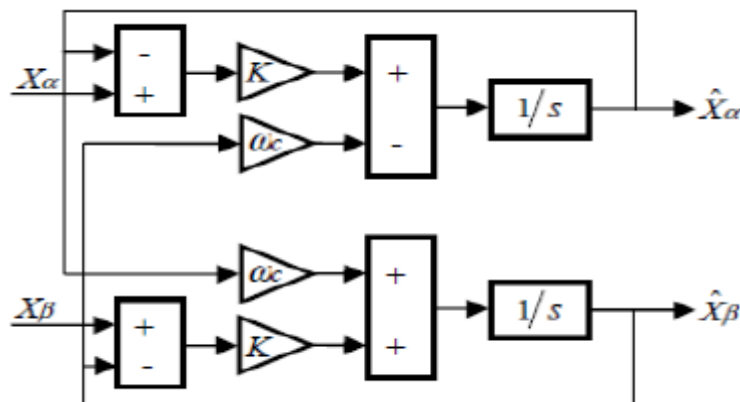


Figure III.9 : Schéma bloc du FMV.

### III.6 Comparaison entre les méthodes d'identification des courants harmoniques

La méthode (p-q) a l'avantage d'être assez simple pour la mettre en application sous forme analogique puisqu'elle a besoin seulement des opérations de multiplication et de filtrage simple. L'inconvénient le plus évident de la méthode (p-q) est qu'elle s'exécute mal dans des conditions non équilibrées de tension d'alimentation, parce que l'algorithme suppose que les tensions d'alimentation sont sinusoïdales et équilibrées. Un avantage de la méthode SRF est qu'elle s'exécute bien avec n'importe quelle forme d'onde du courant. Un inconvénient est que l'algorithme est assez complexe et exige un circuit PLL pour fonctionner correctement. Dans la méthode (p-q), l'exécution est bonne pour les conditions de la tension d'alimentation en cas de déséquilibre. Un inconvénient de cette méthode est qu'elle suppose que les courants dans chaque phase sont égaux, ou la charge est équilibrée.

### III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes méthodes d'identification des courants harmoniques de référence largement utilisées. Nous nous sommes basés sur l'étude analytique de ces méthodes qui nous permet de voir les performances de chaque méthode dans différentes conditions. La méthode des puissances instantanées a été présentée pour identifier les courants harmoniques de référence, elle présente des bons résultats aux conditions équilibrés contrairement aux conditions déséquilibrés, car elle n'était pas adaptée au cas d'une tension d'alimentation déséquilibrée. La méthode du référentiel synchrone reste tributaire en plus, des performances du PLL au contraire du cas du FMV. Enfin le Notch filtre est le moins performant.

## *Chapitre IV*



*Partie Expérimentale*

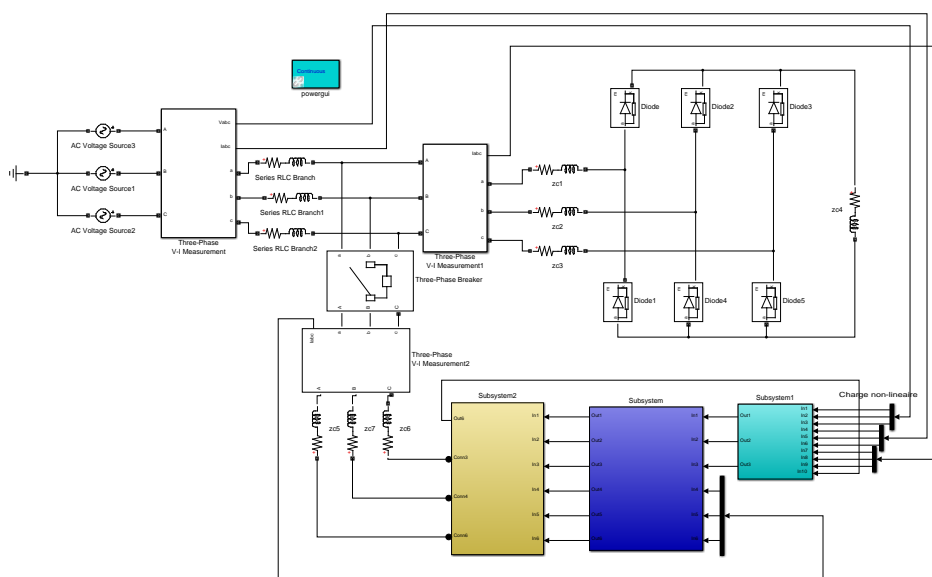
## IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous avons fait la modélisation du réseau électrique, la charge polluante (redresseur en pont tout diodes), et du filtre actif parallèle. Enfin, nous présentons les résultats de simulation obtenus dans l'environnement Matlab/Simulink avec des interprétations.

## IV.2 Simulation de l'ensemble du réseau, filtre actif parallèle et la charge polluante

Nous présenterons dans cette partie tous les résultats de simulations après avoir étudié les différents algorithmes d'identification des courants harmoniques, les stratégies de commande et la régulation du filtre actif parallèle dans les chapitres précédents.

Le logiciel Matlab/Simulink a été utilisé pour créer des programmes de simulation qui montrent l'évolution des courants et de la tension dans les différentes branches du circuit.



**Figure IV.1 :** Schéma de simulation d'un filtre actif parallèle de puissance.

Le schéma de simulation de la figure (IV.1) comprend un réseau électrique qui alimente une charge non linéaire, un filtre actif parallèle, la méthode PIRI pour détecter les courants harmoniques de référence et un régulateur proportionnel pour réguler la tension continue aux bornes du conducteur. Nous ajoutons également un filtre passe-bas du premier ordre à la sortie du régulateur proportionnel.

**Remarque:**

Bien que la topologie et la commande soient choisies, nous utilisons toujours un filtre d'extraction passe-bas du deuxième ordre avec une fréquence de coupure de 55Hz. Le tableau (IV.1) regroupe les valeurs des éléments caractérisant cette construction.

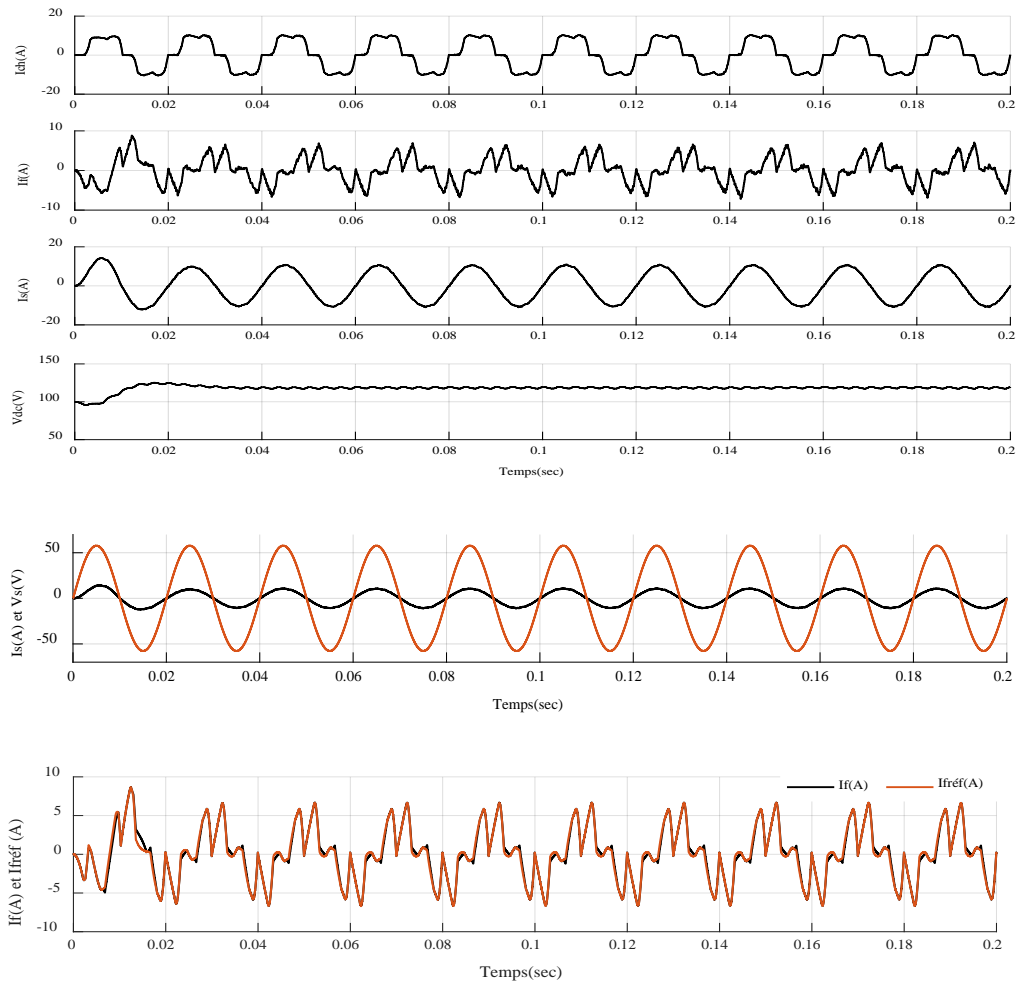
**Tableau IV.1 :** Valeurs des éléments caractérisant la structure étudiée.

<i>Réseau électrique</i>
$v_{s_{\max}} = \frac{100}{\sqrt{3}} \text{V}, f_s = 50 \text{Hz}, R_s = 0.42\Omega, L_s = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{H}$
<i>Charge polluante</i>
<i>Résistance et inductance de l'entrée du redresseur:</i> $R_c = 0.2\Omega, L_c = 1 \cdot 10^{-3} \text{H}$ .
<i>Pont de Gréât alimentant une charge R-L série:</i> $R_{ch} = 8.5\Omega, L_{ch} = 3 \cdot 10^{-3} \text{H}$ .
<i>Filtre parallèle</i>
$\hat{v}_{dc_{ms}} = 100 \text{V}, v_{dc_{réf}} = 120 \text{V}, C_{dc} = 1.1 \cdot 10^{-3} \text{F}, R_f = 0.4\Omega, L_f = 5 \cdot 10^{-3} \text{H}, f_c = 55 \text{Hz}$
<i>Commande hystérésis</i>
$\Delta I = 70.02 \text{A}$
<i>Régulateur de bus continue</i>
$k_c = 28, \tau_c = 0.0024, \text{fréquence d'ondulation} = 416.66 \text{Hz}, \zeta_c = 0.707$

## IV.2.1 Résultats de simulation et Interprétation

### IV.2.1.1 Comportement du FAP en régime permanent

- ✓ Compensation des courants des harmoniques



**Figure IV.2:** Résultats de simulations de:  $I_{ch}$  : Courant de charge,  $I_f$  Courant de filtre actif,  $I_s$ : Courant de source,  $v_{dc}$  : Tension aux bornes du condensateur et  $v_s$  : Tension de source.

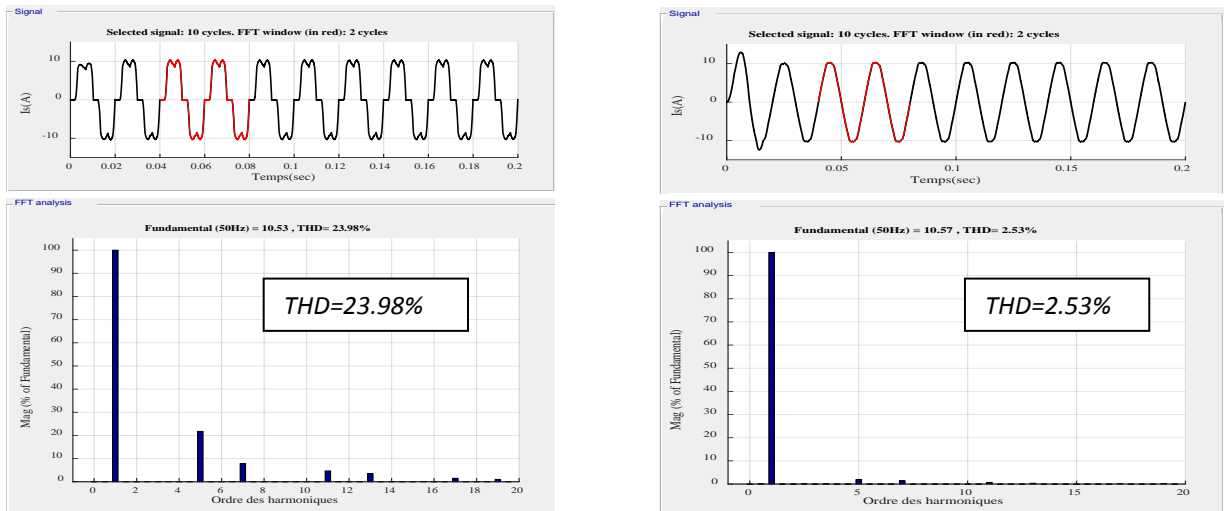
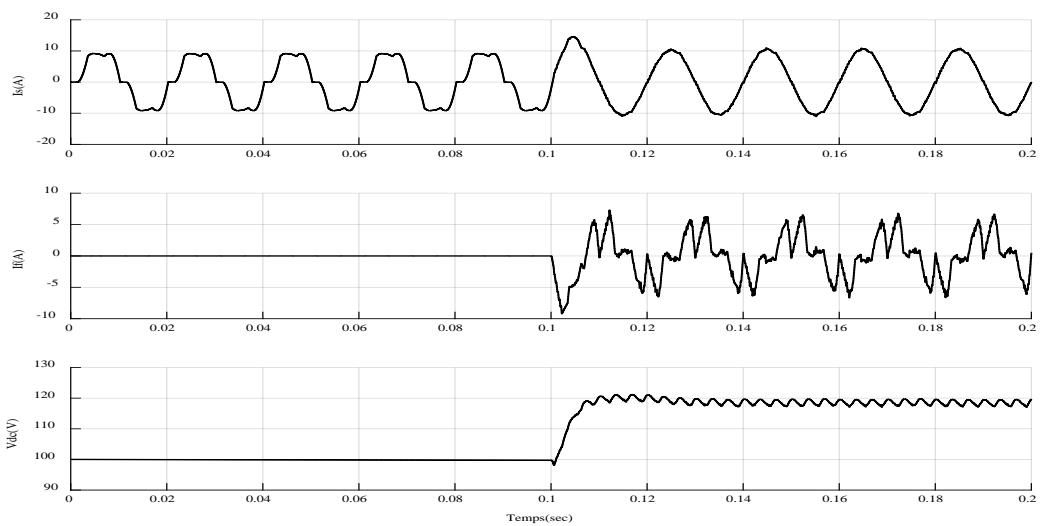
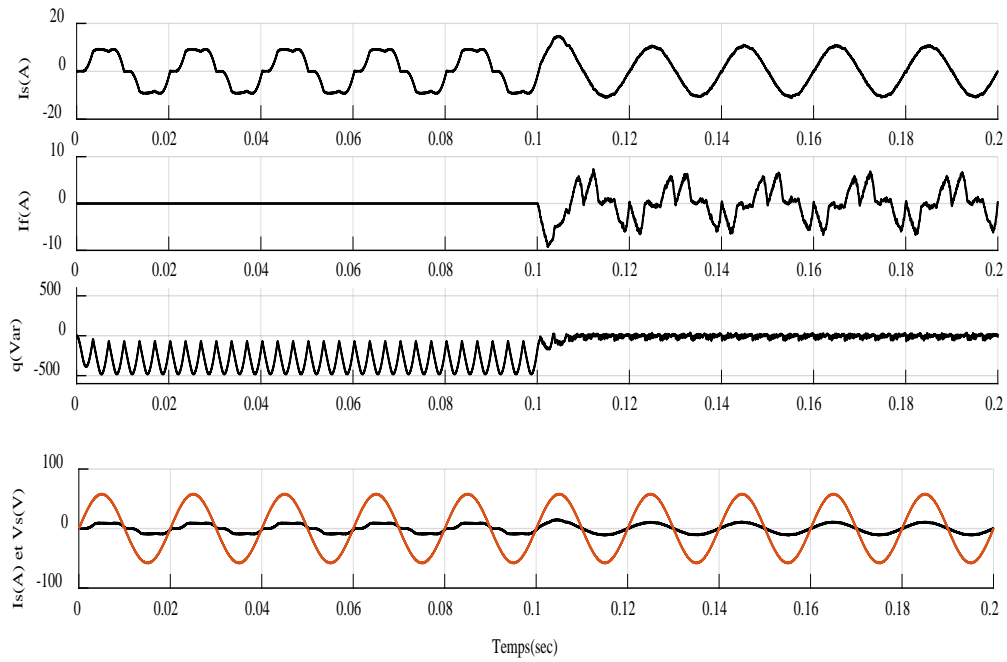


Figure IV.3: Courant source  $I_s$  avant/après filtre et son analyse spectrale.

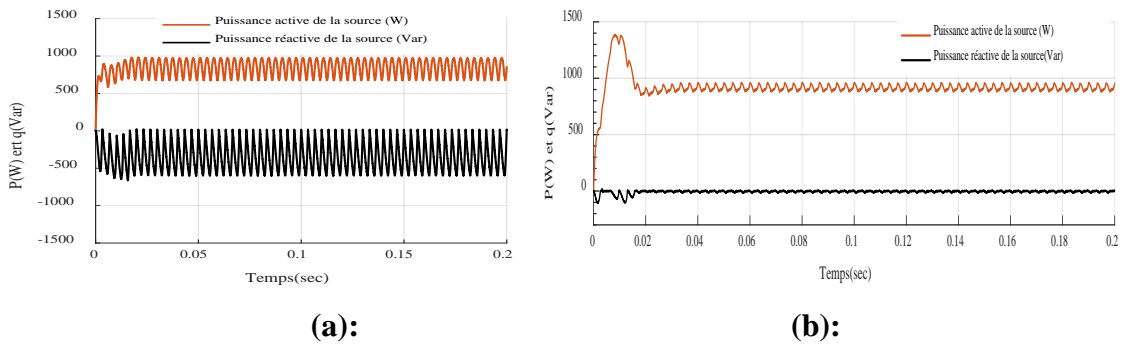


FigureIV.4: Courant de source  $I_s$ , courant de filtre  $I_f$  et tension de bus continu  $v_{dc}$  avant/après du FAP

✓ Compensation des courants des harmoniques et de la puissance réactive



**Figure IV.5:** Courant de source  $I_s$ , courant de filtre  $I_f$ , puissances instantanées réactive  $q$  et tension de source  $V_s$  avant/après  $FAP$ .



**Figure IV.6:** Puissances instantanées active  $p$ , Puissances instantanées active réactive  $q$  avant/après  $FAP$ .

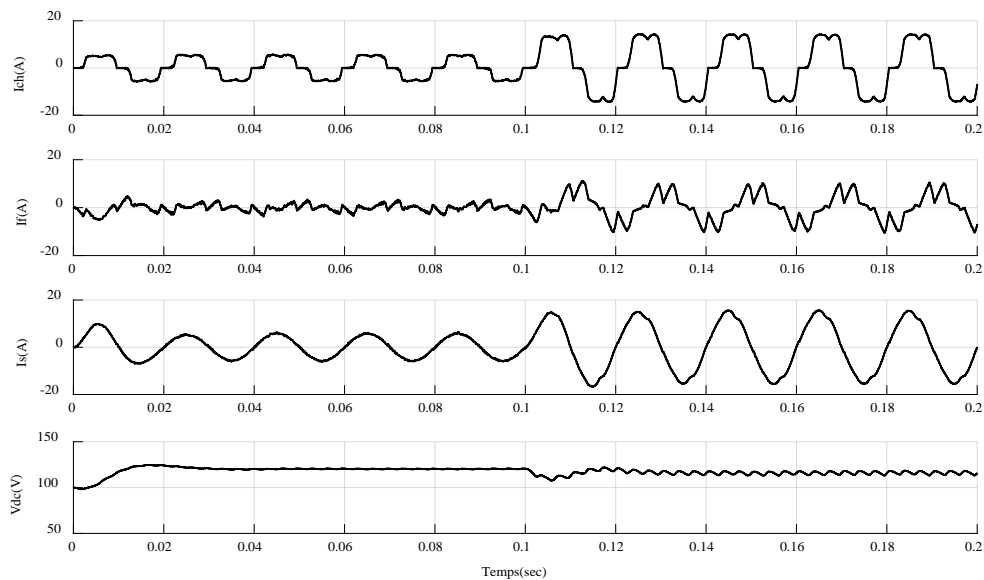
### IV. 2.1.2 Comportement du FAP en régime dynamique (Changement de la charge)

Nous avons effectué une variation de la charge non linéaire et une variation de la tension du bus continu pour étudier l'adaptation et le comportement du FAP en régime dynamique. La transition de la charge (1) à la charge (2) se produit à l'instant  $t=0.1$  seconde. Comme le démontrent les illustrations suivantes :

$$\hookrightarrow v_{dc-réf1} = 140V \text{ à } v_{dc-réf2} = 120V$$

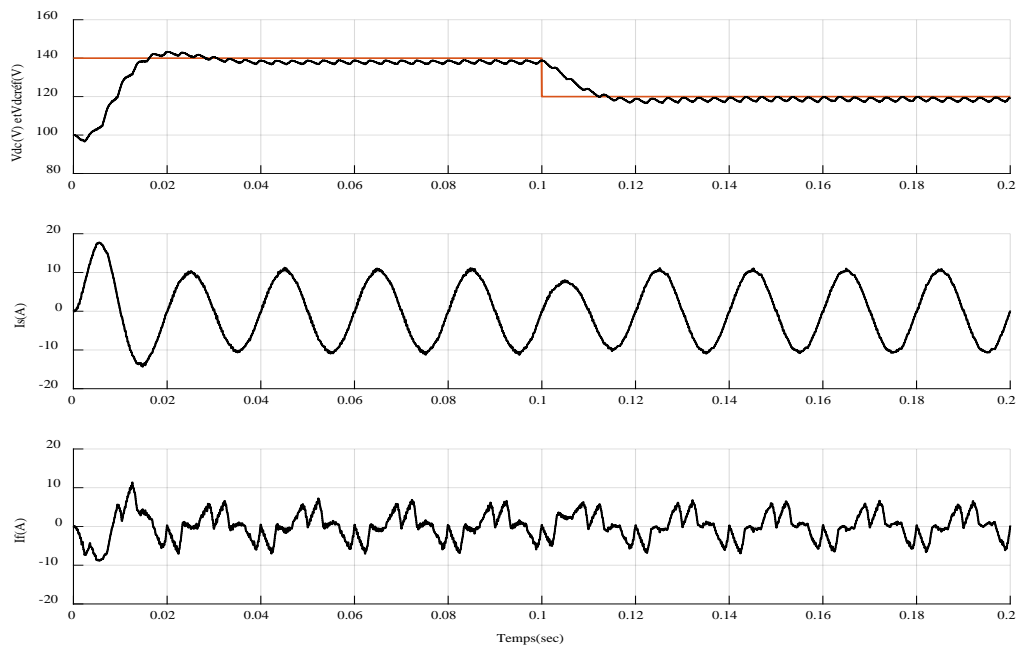
A. Changement de la charge (  $R_1L_1 \Rightarrow R_2L_2$  )

Changement de la charge (  $R_1L_1 \Rightarrow R_2L_2$  )



**Figure IV.7:** Courant de source  $I_s$ , Courant de filtre actif  $I_f$ , Tension aux bornes du condensateur  $v_{dc}$  et  $v_{dc-réf}$

### A. Changement de la tension aux bornes du condensateur de référence $v_{dc-ref}$ :



**Figure IV.8:** Tension aux bornes du condensateur  $v_{dc}$  et  $v_{dc-ref}$  Courant de source  $I_s$  ,  
Courant de filtre actif  $I_f$  .

## IV.2.2 Interprétations des résultats

Selon les résultats de la simulation, les figures ci-dessus montrent la compensation des courants harmoniques et la puissance réactive appliquée à un filtre actif de puissance à deux niveaux à trois bras avec une commande d'hystérésis et un régulateur proportionnel. On observe que :

### A) En régime permanent

- Comme le montre la figure (IV.2), le courant est quasi-sinusoidal, mais il y a un pic dans le premier temps. Cependant, après la compensation, le courant de source était presque sinusoidal et en phase avec la tension de source, ce qui indique une correction du facteur de puissance, ce qui indique que le filtrage avec FAP est de haute qualité.
- Il est également observé que le courant du filtre actif suit efficacement la référence. Cependant, les éléments causés par la fréquence de commutation le dissimulent.
- La tension du bus constant de l'onduleur est bien régulée à sa valeur de référence et il y a plusieurs ondulations légères autour de sa référence. Par conséquent, le régulateur

de tension régule efficacement la tension du bus continu, c'est-à-dire il garantit que la tension aux bornes du condensateur est presque constante.

La forme d'onde du courant source avant/après filtre et son analyse spectrale sont représentées à la figure (IV.3.a)et (IV.3.b). Il est noté que le courant source avant filtre est très riche en harmoniques de rang  $(2k+1, k = 2, \dots, 9)$  et que le taux de distorsion harmonique est calculé sur deux périodes (colorées en rouge) entre les instants 0,04 et 0,08 (s) et un taux de distorsion harmonique de 23,98 % avant le filtre et =2.53% (après le filtrage).

**Tableau IV.2:** les résultats des simulations.

Commande	charge	$THD_i$ % avant filtre	$THD_i$ % après filtre
<i>Commande hystérésis</i>	<i>Charge R-L</i>	23.98%	2.53%

Les figures (IV.5) et (IV.6) présentent les puissances instantanées actives  $p(W)$  et réactives  $q (Var)$  à l'instant 0.1 (sec) après le filtrage se stabilisant à 120 V. Nous remarquons que à l'instant 0.1(sec) dès que le FAP compense l'énergie réactive de source qui a été consommée par la charge non linéaire, la puissance active redevient stable.

### **B) En régime dynamique**

Les figures (IV.7) et (IV.8) présentent des résultats très satisfaisants en termes de dépassement et de temps de réponse. De plus, elles indiquent que le courant de source reste quasi-sinusoïdal malgré la variation de la charge en régime dynamique.

## **IV.3 Conclusion**

Après la modélisation et de la simulation de l'ensemble réseau, du filtre actif et de la charge polluante. Nous remarquons qu'avec la commande hystérésis le THD du courant réduit de source de 23,98 % à 2,53 % pour une charge R-L avec ce filtre actif. En raison de sa bonne compensation de la puissance réactive et de sa capacité de s'adapter aux variations de charge.



*Conclusion Générale*

### **Conclusion générale**

La pollution harmonique est l'un des problèmes majeurs qui dégrade la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux électriques. La circulation des courants harmoniques dans les lignes et entre les charges est difficile à prédire et à contrôler.

Dans un premier temps, après l'analyse des perturbations harmoniques et leurs effets sur le réseau électrique, les normes en vigueur, et les solutions ont été proposées permettant pour remédier à chaque type de perturbation, on distingue deux types : les solutions traditionnelles notamment le filtrage passif et les solutions modernes particulièrement le filtrage actif est une nouvelle solution pour le filtrage des harmoniques.

Dans ce contexte, notre travail présent dans ce mémoire a été consacré à l'étude d'un filtre actif parallèle de puissance afin d'améliorer la qualité de l'énergie dans le réseau électrique et particulièrement compenser les harmoniques et la puissance réactive.

Pour atteindre notre objectif dans ce travail nous choisissons la méthode des puissances instantanées réelles et imaginaire que nous donne des bons résultats et cette méthode s'est avérée très efficace dans le cas de la connexion des charges non-linéaires, pour la commande de l'onduleur triphasé nous utilisons la commande par MLI. Concernant la régulation du bus continu nous avons utilisé un simple régulateur proportionnel, avec un filtre à passe bas de premier ordre.

Les résultats obtenus par simulations (dans l'environnement Simulink/Matlab) prouvent que le filtre actif choisie peut réduire les harmoniques de courant donne des valeurs inférieures à 5 % qui répond aux normes internationales ; ainsi qu'une bonne compensation de l'énergie réactive, ainsi que ce filtre adapte aux variations de la charge.

En conclusion, on peut affirmer que l'objectif de ce mémoire est atteint. Les résultats obtenus très satisfaisantes et montrent l'efficacité et les bonnes performances du filtre actif parallèle de puissance à deux niveaux.

Finalement, dans ce travail plusieurs perspectives peuvent être évoquées. Nous pouvons citer:

- L'application d'autres techniques de commande du filtre actif comme on cite d'abord la commande MLI ou la commande par mode glissant, la commande non-linéaire de puissance (commande par backstepping, commande adaptative).

- Application d'autre technique de régulation de bus continu par exemple des méthodes d'intelligence artificielle comme la logique floue (FuzzyLogic), PSO...etc.



*Bibliographiques*

## BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BOUKADOUM AZIZ, "CONTRIBUTION À L'ANALYSE ET LA REDUCTION DE LA POLLUTION HARMONIQUE DANS LE RESEAU ELECTRIQUE ", Mémoire de Magister De L'université ANNABA UNIVERSITE BADJI MOKHTAR, 2007.
- [2] H. Salem, « Commande d'un Filtre actif parallèle à quatre bras par des techniques avancées. » Mémoire de magister, Université Mohamed Khider – Biskra, 2015.
- [3] Luis Guilherme Barbosa Rolim , "Analysing And Software Implimentation Of A Robust Synchronizing PLL Circuit Based On The Pq Theory ". IEEE Transaction On Industrial Electronics, Vol 53, N°6, Pp 1919-1926, December 2006.
- [4] T. MAHNI , "Etude et conception d'un filtre actif parallèle triphasé à quatre fils en vue de sa commande par des méthodes d'intelligence artificielle", Thèse de doctorat en sciences, Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.
- [5] S. Hafsia , "Commande d'un filtre actif parallèle à quatre bras par des techniques avancées", Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider -Biskra, 2015.
- [6] A. OMEIRI , " Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant", Thèse de doctorat d'état, Université Badji Mokhtar-Annaba2007
- [7]L. ZELLOUMA , "Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé", Mémoire de magister, Université BadjiMokhtarAnnaba, 2006.
- [8] H. KOUARA , "Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension", Ingénieur d'état, Université de Batna, 2006.
- [9] D.OULD ABESLAM , "techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basses tension", Thèse de doctorat, université de Haute Alsace, décembre 2005.
- [10] M.A.E. ALALI , "Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension ",Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur-Strasbourg I, 2002.
- [11]ABDEFETTAH BOUSSAID. "Filtrage actif des harmoniques dans les réseauxélectriques. Contribution à l'amélioration del'énergie électrique"Thèse de doctorat, UniversitéDes Frères Mentouri– Constantine, Janvier 2017.
- [12] L. ZELLOUMA , "Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé", Mémoire de magister, Université Badji MokhtarAnnaba, 2006.
- [13] Y. ABDELKADER, " Amélioration de la qualité d'énergie électrique en utilisant un onduleur de tension a cinq niveaux" , Mémoire Magister, Université HassibaBenbouali de Chlef 2008.
- [14] KAMEL DJAZIA , " Etude des filtres actifs pour réseaux déséquilibrés et distordus" Thèse Doctorat, Universiteferhatabbas – setif 1, 2015.
- [15] H. DOUAR , "Evaluation du cout des pertes générées par les perturbations harmoniques dans les réseaux électriques", Mémoire de Magister, Université M'hamedBougara-Boumerdes ,2006.
- [16] LABBI Imad, ZOBEIDI Smail, DJABALLAH Mounir, « filtrage actif parallele des reseaux électriques» ,Mémoire D'ingénieur d'état en génie électrotechnique, Universite de m'sila

- [17] SAHLI ABDESLEM , « Filtrage actif et contrôle de puissances :application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau», Thèse Magister, Universitéferhatabbas – setif ,2012.
- [18] HAMOUDA Noureddine , "Amélioration de la Qualité du Réseau Electrique à l'Aide de Compensateurs Actifs" ,Thèse Doctorat , université freresmentouriconstantine 1 ,2018.
- [19] B. BOUGHAZI, "Etude et réalisation d'un filtre actif parallèle de puissance", Mémoire de Magistère, Université-Oran, 2013.
- [20] BEN ALI Soufiane, BOUHANAK Saddam, " ETUDE ET SIMULATION D'UN FILTRE ACTIF PARALLEL A QUATRE FILS", Mémoire Master De Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued , 2015.
- [21] M. MAGRAOUI , "Validation de techniques de commande d'un filtre actif parallèle, Mémoire présente à l'école de technologie supérieure, Université du Québec, 2007.
- [22] M. ANTOINE HANNA NOHRA , "Commande de filtres actifs parallèles sur un réseau fortement perturbé", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)-France, 2017.
- [23] K .SAMIA , "Modélisation et simulation d'un filtre actif multiniveaux", Mémoire de Magister, Université mouloud mammeri, tizi-ouzou ,2009.
- [24] B.Tarek , " Filtrage actif pour les réseaux déséquilibrés et distordus " Mémoire de Magister, universiteferhatabbas – setif-1-,2014.
- [25] GHADBANE Ismail. «Etude Et Réalisation D'un Filtre Actif Parallèle EnUtilisant Différentes Stratégies De Contrôle». Thèse dedoctorat. Université Mohamed Khider – Biskra2016.
- [26] I. Vechiu, «Modelisation et Analyse de l'Intégration de des Energies Renouvelables Dans unRéseau Autonome», Thèse de Doctorat, Université de Havre, Année 2005.
- [27] Mohamed MuftahABDUSALAM , « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales» ,Thèse Doctorat , l'Université Henri Poincaré, Nancy-I ,2008
- [28] S. MOUTTOU, "Nouvelles Approches de Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Source De Courant", Mémoire présenté à l'université du Québec à Trois-Rivières comme exigence partielle de la maîtrise en génie électrique, Université du Québec à Trois-Rivières, 2002.
- [29] Z .CHELLI, "Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique", Thèse de doctorat en sciences, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2015.
- [30] S. BHATTACHARYA, D. DIVAN et B. BANERJEE, « Control and reduction of terminal voltage total harmonic distortion (thd) in a hybrid series active and parallel passive filter system », in Power Electronics Specialists Conference, 1993. PESC '93 Record., 24th Annual IEEE, p. 779–786, Jun 1993.
- [31] X. JIANHONG, "Filtrage actif" parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité", Thèse en vue de l'obtention du doctorat de l'I.N.P.L, 1994.
- [32] M. BENGOURINA, "Etude et mise au point d'un filtre actif parallèle d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique", Mémoire de Magister, Université des Sciences et de Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2012.
- [33] D. NEKKAR , "Contribution à l'étude des stratégies de commande des filtres actifs triphasés", Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaadia-Souk-Ahras, 2014.
- [34] A. RABIE , "Contribution à l'étude du filtre actif parallèle de puissance à trois niveaux", Mémoire de Magister, Université d'El-Oued, 2012.

- [35] M. M. Abdusalam, « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales » Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2008.
- [36] S. Karimi, « continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage 'FPGA in the loop' : application au filtre actif parallèle. Thèse de doctorat, Université Henri Poicaé, Nancy-I.
- [37] I.Ghadbane, « Commande d'un filtre actif triphasé parallèle par différents régulateurs. » Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2011.
- [38] S. CHENNAI , "Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs: Apport des techniques de l'intelligence artificielle", Thèse de doctorat en sciences, Université Mohamed Khider-Biskra, 2013.
- [39] M.NADHIR, " Contribution à l'Etude des performance des Onduler Multiniveaux sur les Réseaux Distribution ", Thèse de doctorat , Université BadjiMokhtarAnnaba, 2014.
- [40] ALLAOUI Nada, "Contribution à l'amélioration de la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques en utilisant les Filtres Hybrides", Thèse de doctorat , Université Batna 2, 2017.
- [41] 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, 2005.
- [42] D. MOUSSA Oussama, "ETUDE DES HARMONIQUES ET TECHNIQUES DECOMMANDES DU FILTRE ACTIF ", Mémoire de Magister, Université Batna 2.
- [42] S.H. SHAHALAMI, "Filtrage hybride des perturbations harmoniques produites par des systèmes d'entraînement asynchrone à vitesse variable", Thèse de doctorat en sciences, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2001.
- [43] A. BOUAFIA, "Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs a MLI, Thèse de doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas-Setif, 2010.
- [44] T. BENSLIMANE, "Commande numérique d'un filtre actif parallèle autonome", Mémoire de magister, Ecole Militaire polytechnique, 2004.