

# Modélisation et régulation d'un filtre actif parallèle pour une compensation de l'harmonique

## Résumé

Cet article de la régulation et de la compensation harmonique de courant par un filtre actif parallèle. Dans un premier temps nous présentons un dispositif du filtre actif parallèle, dans un second temps nous présentons la conception d'une commande de ce filtre actif basée sur la théorie référentielle synchrone dq et la commande linéaire. Afin de valider cette étude, nous avons développé un modèle Simulink, ce modèle a la particularité d'intégrer des filtres passifs parallèles. Les simulations ont été effectuées dans l'environnement Matlab/Simulink. Les résultats obtenus présentent une amélioration significative du taux de distorsion harmonique.

**Mots-clés :** filtre actif, compensation harmonique, référentielle synchrone

## Abstract

This article deals with the harmonic compensation through a parallel active filter. After coming out with a device of the filter, we design a control strategy based on the synchronous reference dq and linear control. In order to validate our design and control strategy, we have developed a Simulink model; this model has passive parallel filters. The simulations through Matlab / Simulink environment were carried out. The results show a good improvement on the harmonic distortions percentage.

**Keywords:** active filter, linear control, synchronous reference, harmonic compensation

## Introduction

L'utilisation croissante dans l'industrie de systèmes commandés à base d'électronique de puissance entraîne de plus en plus de problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques. Ainsi, on assiste à une augmentation régulière, de la part des utilisateurs, des taux d'harmonique et de déséquilibre des courants, et à une importante consommation de la puissance réactive. La circulation de ces mêmes courants perturbés va également provoquer des harmoniques et des déséquilibres de tension, lesquels vont se superposer à la tension nominale du réseau électrique. Pour remédier à ce problème plusieurs solutions ont été développées. Le filtre actif parallèle s'est montré être la solution la plus efficace pour la compensation des harmoniques de tension. Cependant ses performances dépendent de la technique utilisée pour identifier les tensions harmoniques de références et la stratégie de commande mise en œuvre. Il existe plusieurs techniques d'identification des harmoniques de références et stratégies de commande [1]. Cet article est subdivisé en quatre parties à savoir : la première partie nous donne la généralité, deuxième partie du matériel et méthode, la troisième les résultats de simulation et des discussions et en fin la conclusion.

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Choix du filtre actif parallèle

- 38 ✓ Le filtre actif parallèle (FAP) joue un rôle efficace dans l'identification et
- 39 l'élimination des harmoniques. En effet il offre de nombreux avantages :
- 40 Il s'adapte automatiquement avec la variation des charges connectées au réseau
- 41 électrique.
- 42 ✓ Le risque de résonance entre le filtre et l'impédance du réseau est inexistant.
- 43 ✓ Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques vis-à-vis de la limite de sa bande
- 44 passante.
- 45 ✓ Il ne passe pas en surcharge lorsque le courant harmonique à compenser dépasse le
- 46 Dimensionnement du filtre. Il limite son émission de compensation au maximum de
- 47 sescapacités, mais il n'y a aucun risque de destruction.

## 48 **2.2. Filtre actif parallèle**

49 Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, est le plus souvent commandé commun  
 50 générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux  
 51 absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec Ceux-ci, à fin de rendre  
 52 le courant du réseau électrique à la forme sinusoïdale .Il empêche les courants perturbateurs  
 53 (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à  
 54 travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.  
 55 Représente la structure générale du filtre actif parallèle, laquelle se présente sous forme de  
 56 deux blocs : la partie puissance et la partie contrôle commande.

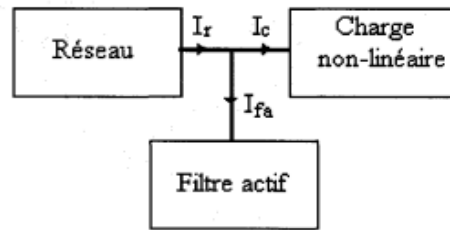
## 57 **2.3. La partie puissance est constituée :**

- 58 ✓ d'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandé à
- 59 L'amorçage et au blocage (GTO, IGBT,...etc.) avec des diodes en antiparallèles
- 60 ✓ d'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif
- 61 ✓ d'un filtre de sortie

## 62 **2.4. Principe de filtrage actif parallèle**

63 Le principe du filtre actif parallèle consiste à générer des harmoniques en opposition de phase  
 64 à ceux existant sur le réseau. Ceci peut être schématisé sur la figure 1. Alors que le courant  
 65 absorbé par la charge polluante est non sinusoïdal, le courant crée par le filtre actif est tel que  
 66 le courant absorbé au réseau est sinusoïdal.

67 Ce filtre est le plus souvent commandé comme un générateur de courant, il génère des  
 68 courants harmoniques, en opposition de phase avec le réseau, afin que la somme avec ceux-ci  
 69 soit nulle. On obtient alors des courants alternatifs au niveau du réseau. Il permet donc de  
 70 supprimer au point de raccordement tous les harmoniques de courants de charge non linéaire.  
 71 En pratique, on ne peut pas obtenir un courant de ligne purement sinusoïdal comme dans le  
 72 cas idéal mais le but est d'avoir un courant qui sera le plus proche possible de la sinusoïde, la  
 73 simulation par Matlab permet de nous approcher de la réalité de la compensation.  
 74 En générale, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. Son  
 75 impédance totale vis à vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité  
 76 avec les performances appréciables [2].



**Figure 1 : Filtre actif parallèle**

Donc le filtre actif parallèle doit fournir la puissance déformante et où la puissance réactive. Ainsi, le réseau fournit uniquement la puissance fondamentale active et où réactive. Pour cela le circuit de contrôle en agissant sur les signaux de gâchette des semi-conducteurs (transistors, GTO, IGBT,...) doit imposer la valeur instantanée du courant débité par l'onduleur ( $I_{inj1}$ ,  $I_{inj2}$ ,  $I_{inj3}$ ) de telle sorte que le courant fourni par le réseau ( $I_{s1}$ ,  $I_{s2}$ ,  $I_{s3}$ ) soit sinusoïdale et en phase avec la tension du réseau.[3]

Dans le cas général, le courant absorbé par la charge comporte une composante active ( $I_{ca}$ ), une composante réactive ( $I_{cr}$ ) et une composante harmonique ( $\sum I_{chn}$ ).

Avec

$$I_r = I_{cr} + I_{ca} + \sum I_{chn} \quad (1)$$

on obtient :  $I_{cr} + \sum I_{chn}$ , le courant réactif et déformant sera compensé par le filtre actif. Donc :

$$I_{rinj} = I_{cr} + \sum I_{chn} \quad (2)$$

Le filtre actif se compose de deux parties distinctes de la partie puissance et la partie commande. La partie puissance est constituée d'un élément de stockage d'énergie, d'un pont onduleur triphasé et d'un filtre de sortie généralement du premier ordre. Pour la partie commande, on a le bloc d'identification des courants de références, le contrôle du courant réseau ainsi que la commande [4].

## 2.5. Structure générale du filtre actif parallèle

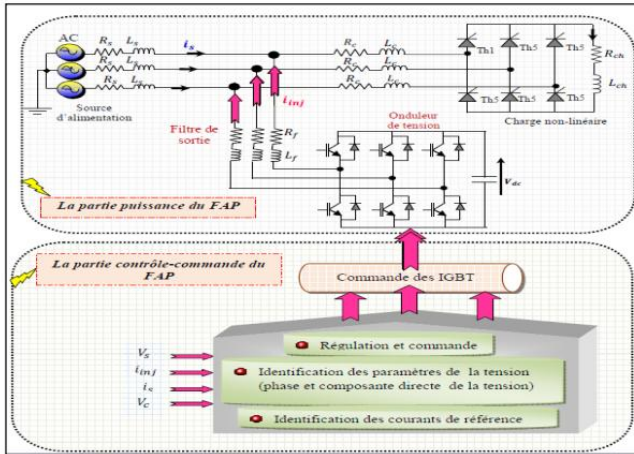
### 2.5.1 Topologie générale

La figure .3 donne la structure générale du FAP, laquelle se présente sous la forme dedeux parties: La partie puissance est constituée:

- d'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, command ables à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, ...etc.) avec des diodes en antiparallèle,
- d'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif,
- d'un filtre de sortie.

La partie contrôle-commande quant à elle est constituée :

- de la méthode d'identification des courants perturbés du système à base de PLL qui sera intégré dans la méthode d'identification des courants,
- 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 [5]



**Figure 2 : structure générale de FAP**

## 2.5.2 Etude de la partie puissance

### 2.5.2.3 Onduleur de tension

L'onduleur de tension est composé de trois bras chacun a deux interrupteurs bidirectionnels en courant commandés à l'amorçage et au blocage, ils sont réalisés avec un transistor (MOSFET, IGBT, GTO) associé à une diode antiparallèle pour réversibilité en courant.

L'onduleur triphasé est constitué d'interrupteurs bidirectionnels en courant. Ils sont réalisés par des semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture type IGBT dans la majorité des cas) montés en antiparallèle avec une diode. Pour cette structure, on doit respecter les contraintes suivantes :

- ✓ A un instant donné, un seul interrupteur d'un même bras doit conduire afin d'éviter tout court-circuit de la source de tension,
- ✓ Le courant de ligne doit toujours trouver un chemin possible d'où la mise en antiparallèle de diodes au niveau des interrupteurs.

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur Cdc de tension Vdc. Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (Lf, Rf) employé pour relier l'onduleur de tension au réseau électrique [6].

Cette structure du FAP ne permet pas la fermeture simultanée des semi-conducteurs d'un même bras sous peine de court-circuiter le condensateur de stockage. Par contre, ils peuvent être tous les deux ouverts (pendant un temps mort). La continuité des courants est alors assurée par la mise en conduction d'une des diodes d'un même bras. En pratique, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. En réalité, le mode, où les semi-conducteurs d'un même bras sont tous les deux fermés, n'existe que durant les commutations. Afin d'éviter un court-circuit à cause du délai de blocage des interrupteurs, il faut insérer sur un même bras, un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre. Avec l'hypothèse des commutations instantanées, ce mode de fonctionnement ne sera pas pris en compte et par conséquent, aucun risque de court-circuiter le condensateur n'est à craindre [7].

## 2.6..Tension fournie par l'onduleur

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur dépendent de l'état des signaux de commande ( $S1, S2, S3$ ), comme défini ci-dessous : [8]

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

$$S_2 = \begin{cases} 0 & T_1 \text{ fermé et } T_4 \text{ ouvert} \\ 1 & T_2 \text{ ouvert et } T_5 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_3 = \begin{cases} 0 & T_2 \text{ fermé et } T_5 \text{ ouvert} \\ 1 & T_3 \text{ ouvert et } T_6 \text{ fermé} \end{cases}$$

146 Les tensions entre phases, imposées par l'onduleur, sont alors définies par :

$$147 \begin{bmatrix} V_{f1} - V_{f2} \\ V_{f2} - V_{f3} \\ V_{f3} - V_{f1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 \\ S_2 & S_3 \\ S_3 & S_1 \end{bmatrix} V_{dc} (3)$$

148 Les tensions de sortie de l'onduleur notées  $V_{f1}, V_{f2}, V_{f3}$ , sont référencées par rapport au neutre  
149 du réseau et vérifient les équations suivantes :

$$150 \begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{f1} \\ i_{f2} \\ i_{f3} \end{bmatrix} (4)$$

$$151 \begin{cases} V_{s1} + V_{s2} + V_{s3} = 0 \\ i_{f1} + i_{f2} + i_{f3} = 0 \end{cases} (5)$$

152 On peut déduire de (4) et (5) la relation suivante :

$$153 V_{f1} + V_{f2} + V_{f3} = 0 (6)$$

154 Les équations (6) et (3) peuvent être résolues et nous obtenons :

$$155 \begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_1 & -S_2 & S_3 \\ -S_1 & 2S_2 & -S_3 \\ -S_1 & -S_2 & 2S_3 \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{3} (7)$$

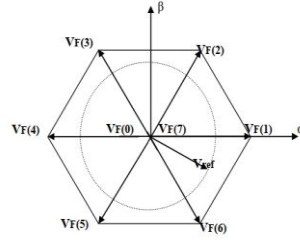
156 Ainsi, on pourra exprimer huit cas possibles de tension de sortie du filtre actif  $V_f$  (référéées au  
157 neutre  $n$  de la source).  $V_f$  représente les vecteurs de tensions que doit produire l'onduleur afin  
158 de générer les tensions de référence, cela n'est possible que si le vecteur formé par ces  
159 dernières reste à l'intérieur de l'hexagone présenté par la figure (.6). Le filtre actif parallèle  
160 est relié au réseau électrique par un filtre inductif ( $L_f$ ) pour fournir la contrôlabilité du courant  
161 de filtre de puissance et agit également en tant qu'un filtre passif du premier ordre pour  
162 supprimer les ondulations à hautes fréquences produites par les commutations de l'onduleur.

163 En négligeant les effets du condensateur  $C$  du filtre de sortie sur le courant de  
164 référence  $I_{inj}$  (pour les harmoniques basses fréquences qui sont loin de la fréquence de  
165 commutation des interrupteurs), on peut écrire la relation suivante caractérisant le courant du  
166 filtre actif  $I_{inj}$  :

$$167 L_f \frac{d}{dt} I_{inj} = V_f \div V_s (8)$$

168 Ainsi, on pourra exprimer huit cas possibles de tension de sortie du filtre actif  $V_f$  (par rapport  
169 au neutre  $n$  de la source). [9]

170



**Figure 3 :** Figure 6: Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur.

Où  $V_f^*$  représente la tension de référence que doit produire l'onduleur pour pouvoir créer les courants perturbateurs identifiés. Ceci signifie que l'onduleur n'est capable de fournir des tensions égales aux tensions de référence que si le vecteur formé par ces derniers reste à l'intérieur de l'hexagone montré dans la Figure.3[10].

## 2.7. Modèle mathématique du filtre actif parallèle dans le repère triphasé

L'équation de tension par phase du filtre actif parallèle triphasé illustré par la figure (9) est donnée par : [38]

$$V_{sk} = V_{fk} - V_{Lfk} - V_{Rfk} = V_{fk} - L \frac{di_f}{dt} - R_f i_{fk} \quad \text{avec } K = a, b, c \quad (9)$$

Alors, les équations des trois phases sont données par :

$$L \frac{di_f}{dt} \begin{bmatrix} L_{fa} \\ L_{fb} \\ L_{fc} \end{bmatrix} = -R_f \begin{bmatrix} L_{fa} \\ L_{fb} \\ L_{fc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Et pour coté continue :

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_{fa} + S_b i_{fb} + S_c i_{fc} \quad (11)$$

Le système d'équation définissant le filtre actif dans le repère triphasé est donnée par :

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{fa}}{dt} = -R_f i_{fa} + V_{fa} - V_{sa} \\ L_f \frac{di_{fb}}{dt} = -R_f i_{fb} + V_{fb} - V_{sb} \\ L_f \frac{di_{fc}}{dt} = -R_f i_{fc} + V_{fc} - V_{sc} \\ C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_{fa} + S_b i_{fb} + S_c i_{fc} \end{cases} \quad (12)$$

### 2.7.1. Filtre de couplage

Le filtre de couplage est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau. Il est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants : [11]

Assurer la dynamique du courant du filtre défini par :

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{d i_h}{dt} \quad \text{Où } i_f : \text{courant du filtre}$$

$i_h$  : courantharmonique de la charge

Empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique. Pour satisfaire ces deux conditions, on utilise un filtre de premier ordre, composé d'une inductance  $L_f$  avec une résistance interne  $R_f$ , une petite valeur de cette inductance assure la dynamique du courant. Contrairement, une valeur relativement grande de celle-là empêche les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau. En négligeant la résistance de ce filtre de couplage on obtient :

$$\left(\frac{di_f}{dt}\right)_{max} = \frac{V_{fmax} - V_{smax}}{L_f} \quad (13)$$

Avec  $V_{fmax}$  : La valeur maximal de la tension d'entrée de l'onduleur

$V_{smax}$  : la valeur maximale de la tension simple au point de raccordement du filtre

Prenons la valeur maximale de la tension  $V_f = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc}$  avec la valeur maximale de la tension du réseau, pour des petites variations du courant du filtre, on obtient :

$$\left(\frac{\Delta i_f}{\Delta T}\right)_{max} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} - V_{smax}}{L_f} \quad (14)$$

Avec  $\Delta T = \frac{1}{f_{ond}}$  la période de la variation de courant du filtre.

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

$$difdtmax = V_{fmax} - V_{smax} L_f \quad (16)$$

$$L_f = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} - V_{smax}}{0.25 i_{smax} f_{ond}} \quad (17)$$

## 2.8. Système de stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par un condensateur  $C_{dc}$  qui joue le rôle d'une source de tension continue  $V_{dc}$ . Le choix des paramètres du système de stockage ( $V_{dc}$  et  $C_{dc}$ ) se répercute sur la dynamique et la qualité de compensation du FAP. En effet, une tension  $V_{dc}$  élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue  $V_{dc}$ , causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de  $C_{dc}$ , peuvent dégrader la qualité de compensation du FAP. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. 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 :

le calcul de l'énergie fournie par le FAP pendant une demi-période de la pulsation de puissance liée aux deux premiers harmoniques (5 et 7 pour un pont redresseur de Graetz). En choisissant un taux d'ondulation acceptable ( ), généralement de l'ordre de 5% de  $V_{dc}$ , nous pouvons calculer la capacité  $C_{dc}$  à partir de la relation suivante : [12].

$$C_{dc} = \frac{V_s \sqrt{I_5^2 + I_7^2 + 2 I_5 I_7 \cos(5\alpha - 7\alpha)}}{2 \omega \epsilon V_{dc}^2} \quad (18)$$

Avec  $V_s$  la tension simple du réseau,  $I_h$  le courant harmonique du rang  $h$  et  $\alpha$  l'angle d'allumage des thyristors du pont Graetz. Puisque l'augmentation de la valeur de la tension continue améliore la commande habilitée du filtre actif et sachant que le choix de cette tension se répercute en grande partie sur le choix des interrupteurs, la tension continue  $V_{dc}$  doit être choisie comme la plus grande tension respectant les contraintes des interrupteurs.

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

$$C_{dc} = \frac{i_h}{\varepsilon V_{dc} \omega_h} \quad (19)$$

Avec  $\omega_h$  la pulsation la plus faible des harmoniques à compenser [13]

Contrôle des courants du filtre actif (partie commande)

Les performances du filtre actif et notamment la diminution du THD du courant de source sont certes liées aux performances de la génération des références de courants harmoniques, mais dépendent également de la stratégie de commande de l'onduleur de tension (poursuite des références de courant).

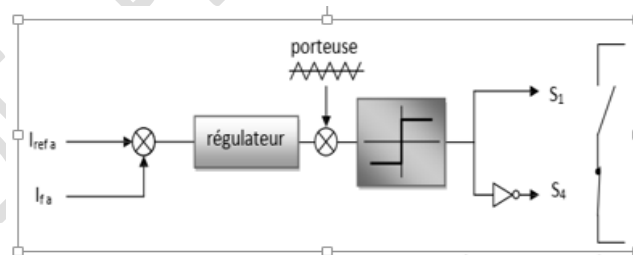
Pour maintenir le courant à la sortie du filtre actif autour de sa référence, trois techniques de commande peuvent être utilisées :

- ✓ La commande par hystérésis.
- ✓ La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).
- ✓ La commande par MLI vectorielle

L'objectif de la commande, que ce soit à MLI ou par hystérésis, est de générer les ordres d'ouverture et fermeture des interrupteurs de manière à ce que le courant du filtre actif soit le plus proche de sa référence [14].

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

La technique de commande par MLI : la commande par modulation de largeur d'impulsion 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 interjective. 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. [15]. Le schéma de principe est donné par la figure suivante :



**Figure 4 :** Principe de commande par MLI

## 2.10. Commande du filtre actif parallèle

Il existe deux stratégies de commande, à savoir

- ✓ Stratégies de commande directe
- ✓ Stratégies de commande indirecte

**La commande dite directe**, est basé sur la comparaison du courant de référence  $i_{ref}(t)$  obtenu par une méthode appropriée à partir de la mesure du courant de la charge polluante (t) au courant injecté par le filtre actif de puissance (t).

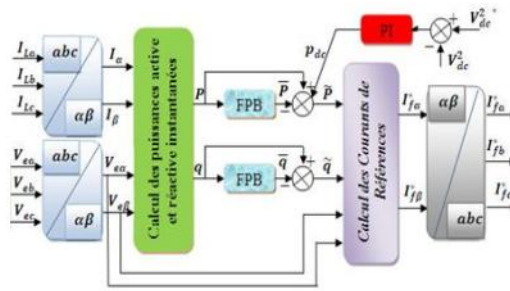


**La commande dite indirecte**, à la différence de la précédente, compare les courants de référence  $i_{ref}(t)$  produits par une méthode appropriée, avec le courant de source (t).

La stratégie de commande se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été 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 tension de la source.

La méthode la plus utilisée est celle appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées, Cette méthode est valide aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire.



**Figure 5 :** Principe de la méthode des puissances instantanées pq.

En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties active, réactive et déformante.

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (20)$$

Dans cette stratégie de contrôle, les mesures des tensions et des courants exprimés sous forme triphasée ( $a-b-c$ ) sont converties en système biphasé ( $\alpha-\beta$ ) équivalent à l'aide de la transformée de Concordia qui laisse la puissance invariante :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (22)$$

La puissance réelle instantanée  $p$  et la puissance réactive instantanée  $q$  peuvent être exprimées de façon équivalente en système biphasé par :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (23)$$

Ce nous donne :

$$\text{Puissance réelle instantanée } p = V_\alpha * i_\alpha + V_\beta * i_\beta \quad (24)$$

$$\text{Puissance imaginaire instantanée } q = V_\alpha * i_\beta - V_\beta * i_\alpha \quad (25)$$

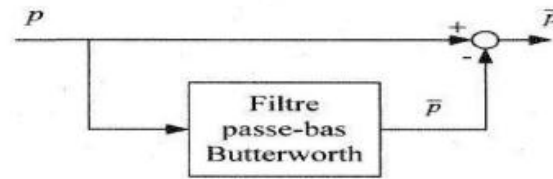
La puissance réelle instantanée ainsi que la puissance imaginaire instantanée peuvent être exprimées de la façon suivante :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (26)$$

Où  $p$  et  $q$  sont, de façon respective, les composantes des puissances moyennes actives et réactives correspondant au courant de charge fondamentale (50 Hz), alors que  $\tilde{p}$  et  $\tilde{q}$  correspondent aux composantes alternatives liées au courant harmonique. La compensation d'harmoniques par le filtre actif se fait par la génération de ces dernières :

$$\begin{cases} p^* = \tilde{p} \\ q^* = \tilde{q} \end{cases} \quad (27)$$

En conséquence, l'élimination de la composante fondamentale dans les équations (26) et (27) s'effectue à l'aide de deux filtres passe-bas de Butterworth d'ordre deux [16].



**Figure 6** : Filtrage de la composante de la puissance continue

Les courants de compensation de référence se calculent par la formule suivante :

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} \quad (28)$$

ou :

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & -V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^* \\ q^* \end{bmatrix} \quad (29)$$

La méthode des puissances instantanées possède les quelques caractéristiques suivantes :

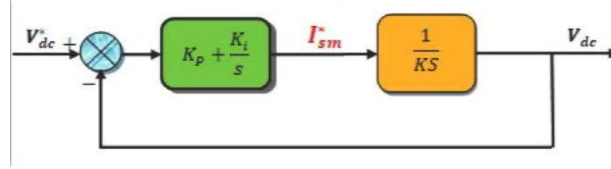
- ✓ Elle est une théorie inhérente aux systèmes triphasés.
- ✓ Elle peut être appliquée à tout type de systèmes triphasés (équilibré ou déséquilibré, avec ou sans harmonique).
- ✓ Elle est basée sur des valeurs instantanées, ce qui lui donne de bons temps de réponse dynamique.
- ✓ Le nombre d'harmoniques compensé dépend de la bande passante des semi-conducteurs composant l'onduleur du filtre actif.
- ✓ Méthode de calcul simple (elle n'est composée que d'expression algébrique et peut être implémentée à l'aide d'un processeur standard).

La régulation et l'adaptation du filtre actif :

Pour que le filtre actif s'adapte aux variations de la charge on doit agir sur deux paramètres essentiels qui sont la tension continue à l'entrée de l'onduleur et le courant du filtre actif parallèle.

## 2.11. Régulation de la tension continue

La tension moyenne  $V_{dc}$  aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur fixe. Les principales causes susceptibles de la modifier sont les pertes dans le filtre actif (Semi-conducteur et filtre de sortie). La régulation de la tension moyenne aux bornes du condensateur de stockage d'énergie doit se faire par l'adjonction des courants fondamentaux actifs dans les courants de référence.



**Figure 7 :** Schéma fonctionnel pour une régulation de la tension continue

De ce fait, la tension mesurée du bus continu  $V_{dc}$  est comparée à une tension de référence  $V_{dc}^*$  en appliquant l'erreur au contrôleur PI afin d'obtenir l'amplitude des trois courants de référence de la source  $I_{sm}^*$ .

Ensuite cette amplitude sera multipliée par trois signaux sinusoïdaux unitaires pour l'obtention des trois courants de référence instantanés de source  $I_{dc-a}^*$ ,  $I_{dc-b}^*$ ,  $I_{dc-c}^*$ .

En se basant sur le schéma fonctionnel de la régulation donne par la figure ci-dessous, la fonction de transfert du système en boucle fermée est de la forme :

$$FTBF(s) = \frac{K_p s + K_I}{K s^2 + K_p s + K_I} = \frac{\frac{K_p}{K} \left( s + \frac{K_I}{K_p} \right) + \frac{K_I}{K}}{s^2 + \frac{K_p}{K s} + \frac{K_I}{K}} \quad (30)$$

Cette fonction de transfert présente un système de deuxième ordre. Donc, en égalisant le dénominateur de cette dernière avec le polynôme caractéristique, on obtient :

$$s^2 + 2\varepsilon\omega_n s + \omega_n^2 = s^2 + \frac{K_p}{K s} + \frac{K_I}{K} \quad (31)$$

Un calcul simple, nous permet d'obtenir les valeurs de régulateur PI comme suit :

$$\begin{cases} K_I = K\omega_n^2 \\ K_p = 2\varepsilon\omega_n K \end{cases} \quad (31)$$

Un bon choix de  $\varepsilon$  et  $\omega_n$  nous permet d'obtenir des bons résultats. [17]

Régulation du courant du filtre actif parallèle

En négligeant les effets du condensateur  $C_f$  et des résistances du filtre de sortie sur le courant de référence  $I_{inj}$  (pour les harmoniques basses fréquences qui sont loin de la fréquence de commutation), nous pouvons écrire la relation suivante caractérisant le courant du filtre actif  $I_{inj}$ .

$$L_f = \frac{d}{dt} I_{inj} = V_f - V_s \quad (32)$$

Notons par  $I_f$  le courant de référence et le courant mesuré à partir de la relation suivante :

$$\Delta I_f = I_{ref} - I_{inj}$$

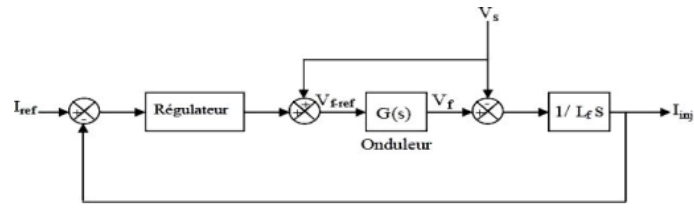
(33) A partir des équations (13) et (14), nous obtenons l'expression ci-dessous :

$$L_f \frac{d}{dt} \Delta L_f = \left( V_s + \frac{d}{dt} I_{ref} \right) - V_f \quad (34)$$

Le premier terme de la partie droite de la relation (15) peut être défini comme tension de référence ( $V_{f-ref}$ ), ce qui nous donne l'expression suivante :

$$V_{f-ref} = V_s - L_f \frac{d}{dt} I_{ref} \quad (35)$$

L'écart entre  $V_{f-ref}$  et  $V_f$  produit alors une erreur sur le courant. Selon la relation (.34), la tension de référence est composée de deux termes à fréquences différentes. Le premier représente la tension du réseau  $V_s$  directement mesurable. Le second est égal à la chute de tension aux bornes de l'inductance  $L_f$ , lorsque celle-ci est traversée par un courant égal à celui de référence. Ce terme doit être élaboré par un régulateur de courant, comme le montre la figure (.8).



380

381 **Figure 8** : Schéma de la régulation des courants du filtre actif parallèle

382 Dans ce schéma,  $G(s)$  représente l'onduleur qui peut être modélisé par la relation suivante  
383 [18] :

$$G(s) = K \frac{1}{1 + \tau s} \quad (36)$$

$$K = \frac{V_{dc}}{2V_p} \quad (37)$$

386 Avec  $V_{dc}$  : la tension du côté continu de l'onduleur,

387  $V_p$  : L'amplitude de la porteuse triangulaire et  $(\tau)$  représentant le retard causé par le calcul des  
388 courants perturbateurs.

389 Le régulateur doit satisfaire les objectifs généraux de la régulation ainsi les contraintes liées  
390 au rejet des perturbations.

### 391 3. Résultat et discussions

#### 392 3.1. Méthode de régulation par PI

393 Un régulateur doit satisfaire aux objectifs généraux de la régulation ainsi qu'aux  
394 contraintes liées au rejet des perturbations. Dans le cas d'un régulateur aussi simple que le  
395 régulateur *PI*, et à cause du manque de degré de liberté que nous impose ce dernier, seule la  
396 poursuite des références pour un point de fonctionnement fixe pourra être envisagée. A cela  
397 s'ajoute le problème du compromis à trouver dans le cas d'une structure de *filtre actif*  
398 *parallèle* avec un filtre de sortie du premier ordre (choix de l'inductance) [19]. En effet, un  
399 régulateur *PI* ne peut pas assurer, avec les seuls paramètres de correction *KP* et *KI*, les  
400 objectifs de régulation en boucle fermée pour un système d'origine d'ordre supérieur à un.

401 Avec les données suivantes : alimentation

$V_s$	$f$	$R_s$	$L_s$	$R_c$	$L_c$
-------	-----	-------	-------	-------	-------

380V	50hz	0.2mH	0.01Ω	0.02Ω	1.5mH
------	------	-------	-------	-------	-------

403

404

405

406 Charge non linéaire Filtre active parallèle

$R_d$	$L_d$	$R_{ad}$
2Ω	2mH	4Ω

$L_f$	$R_f$	$V_{dc}$	$C_{dc}$
0.15mH	5mΩ	800V	4.4mF

409 **Etape 1** : réseau électrique alimente une charge non linéaire avant application de toute  
 410 opération de filtrage.

411 **Etape2** : réseau électrique alimente une charge non linéaire avec filtre actif parallèle à  
 412 commande classique (régulateur pi)[20].

413 Simulation numérique sous Matlab Simulink :

414 Dans cette partie, nous présenterons les résultats de simulation obtenus pour la  
 415 méthode d'identification des courants de référence précédemment étudiées, à savoir la  
 416 théorie p.q.

417

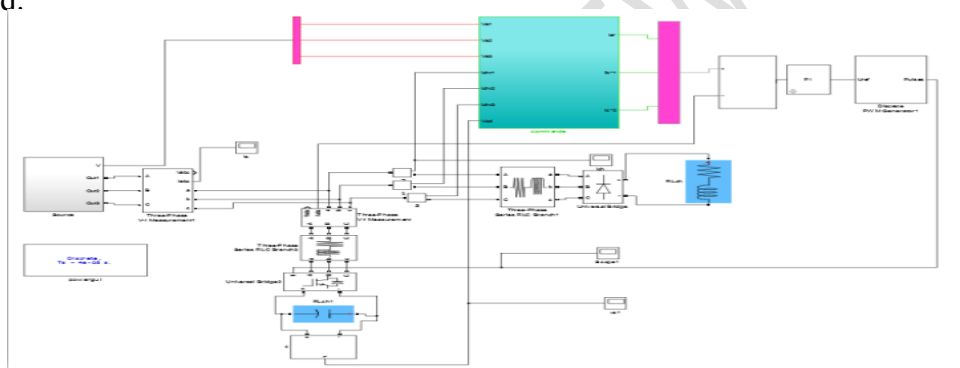
418

419

420

421

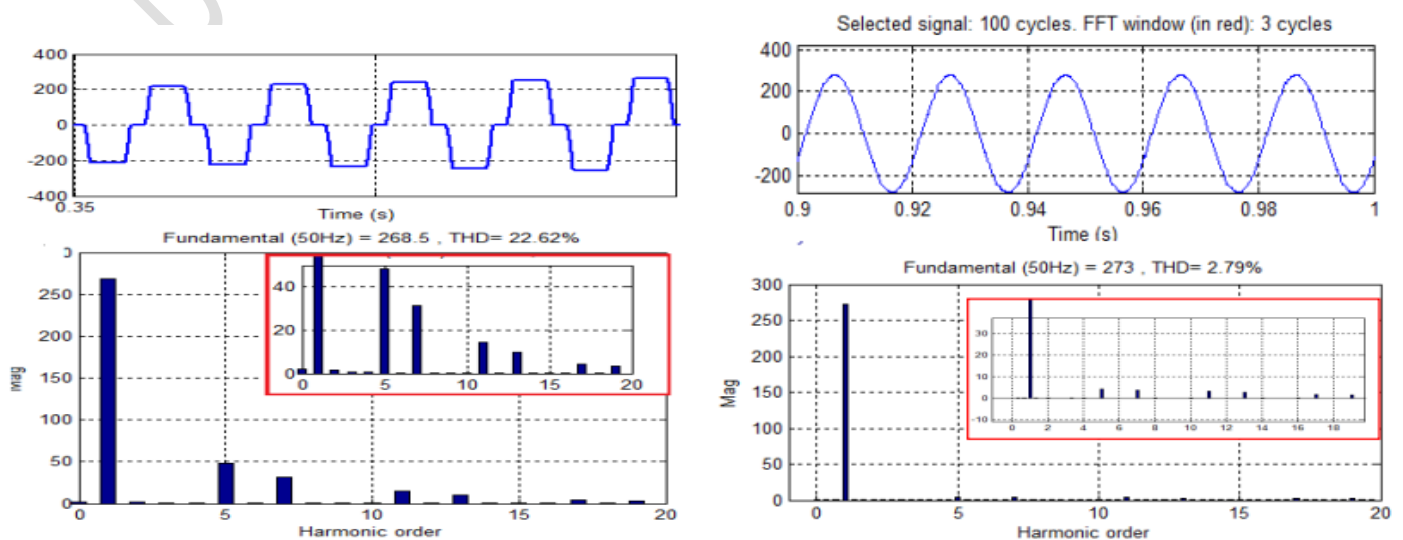
422



423 **Figure 9** : modélisation de filtre actif parallèle par Matlab

424 Après l'injection du courant de référence reproduit par le filtre actif dans le réseau, on peut  
 425 constater qu'une fois le filtre actif parallèle est mis en marche, le courant du réseau est  
 426 désormais sinusoïdal. La figure (10) montre le nouveau courant avec un **THD** % = 2.79  
 427 %.(système simulé est une source triphasé équilibré avec diode (PD3) inductive et charge  
 428 PD3 non linéaire, avec le taux harmonique trouvé conforme, car il répond au limite fixé par la  
 429 norme de 5 et 8%). [21]

430



**Figure 10** : Spectre harmonique de courant de source avant et après filtrage avec PI classique

## Conclusion

Dans cet article nous avons donné une méthode de régulation et un système d'équation mathématique d'un filtre actif parallèle, donné un modèle Simulink de ce filtre auquel nous avons ajouté un dispositif d'injection du courant capable de contrôler les courants injectés par ce dispositif dans le réseau électrique. Les résultats obtenus présentent une petite amélioration par rapport au taux de distorsion harmonique.

## Références

- [1]- NEAGU, C. BOGDAN, GRIGORAȘ, GHEORGHE, et SCARLATACHE, Florina. The influence of harmonics on power losses in urban distribution networks. In : Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE), 2016 Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE), 2016 International Symposium on. IEEE, (2016) 1 - 4 p.
- [2]- KHADKIKAR, VINOD, XU, DIANGUO, et CECATI, CARLO, Emerging Power Quality Problems and State-of-the-Art Solutions. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 64, No 1, (2017) 761 - 763 p.
- [3]- HADI Y. Kanaan, KAMAL Al-Haddad, Comparative evaluation of average-model based controlled schemes applied to three phase series active power filter for voltage harmonic cancellation, IEEE, (2004)
- [4]- CHENNAI SALIN, Etude et modélisation et commande des filtres actifs : apport des techniques de l'intelligence artificielle, Thèse de Doctorat en génie électrique, université Mohammed KHEIDER Biskra, Algérie, (2013).
- [5]- SCHWANZ, DAPHNE, BAGHERI, AZAM, BOLLEN, MATH, et al., Active Harmonic Filters: control techniques review. In : Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2016 17th International Conference on. IEEE, (2016) 36 - 41 p
- [6]- IEEE STD 1159-1995, « IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality », 1995.
- [7] - J.-N. Fiorina, « Harmoniques en amont des redresseurs des ASI », Cahier Technique n° 160.
- [8] - L. Benchaita, « Etude, par simulation numérique et expérimentation, d'un filtre actif parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle-commande » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy 30 Octobre 1998.
- [9] - H. Sasaki, T. Machida, « A new method to eliminate ac harmonic currents by magnetic compensation-consideration on basic design », IEEE Trans. Power Appl. Syst., vol. 90, No. 5, pp. 2009-2019, 1971.
- [10] - L. Gyugyi and E.C. Strycula, « Active AC power filters », IEEE/IAS Annual Meeting, pp. 529-535. 1976.

- 478 [11] - L. Merabet, S. Saad et A. Omeiri, «Compensation des courant harmoniques par filtre  
479 actif parallèle », Revue synthèse N°14 Juin 2005.
- 480 [12]-H.Bouchikha,M.Ghers “three phase shunt hybrid filters for the current harmonics  
481 suppression and the reactive power compensation”. Euro journalspublishing,inc ,vol.24  
482 N° .4’(2008),pp.,580-590.
- 483 [13] – Tokuo Ohnishi, Kenichiro Ueki et Masahide Hojo, «Source current detection control of  
484 active filter for preventing current oscillation», 35th Annual IEEE Power electronics  
485 Specialists Conference, Aachen, Germany, pp 965-965, 2004
- 486 [14] – J. C. Wu, H. L. Jou, «Simplified control for the single phase active power filter», IEE  
487 Proc. Electr. Power Appl., Vol. 143, No. 3, pp 219-224, May 1996
- 488 [15]- A. Omeiri, A. Haddouche, L. Zellouma and S. Saad, «A three phase shunt active  
489 powerfilter for currents harmonics suppression and reactive power compensation», AJIT 5  
490 (12):  
491 pp 1454-1457, 2006
- 492 [16] Control and Testing of a Dynamic Voltage Restorer (DVR) at Medium Voltage  
493 Level; J.G Nielsen, M. Newman, H. Nielsen, F. Blaabjerg; IEEE Trans. PowerElectronics,  
494 Vol. 19, No. 3, May 2004, Page(s):806- 813.
- 495 [17] A Dynamic Voltage Restorer (DVR) with Selective Harmonic Compensation at  
496 Medium Voltage Level; M. J. Newman, D.G. Holmes, J.G. Nielsen, F. Blaabjerg; IEEE  
497 Trans. Ind. Appl., Vol. 41, No. 6, Nov./Dec. 2005, Page(s):1744- 1753.
- 498 [18] A calculation for the compensation voltages in dynamic voltage restorers by use of  
499 PQR power theory; Kim Hyosung, Lee Sang-Joon, SulSeung-Ki; IEEE Applied Power  
500 Electronics Conference and Exposition, APEC '04, Nineteenth Annual, Vol. 1, 2004,  
501 Page(s):573- 579.
- 502 [19] An Adaptive Arc Furnace Model; ZhengTongxin, E.B. Makram; IEEE Trans  
503 Power Delivery, Vol. 15, No. 3, July 2000, Page(s):931- 939.
- 504 [20] An Improved Time Domain Arc Furnace Model for Harmonic Analysis; M.A.P.  
505 Alonso, M.P. Donsion; IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 19, No. 1, Jan. 2004,  
506 Page(s):367- 373.
- 507 [21] Arc-Furnace Model for the Study ofFlicker Compensation in Electrical Networks;  
508 G.C. Montanari, M. Loggini, A. Cavallini, L. Pitti, D. Zaninelli; IEEE Trans. Power  
509 Delivery, Vol. 9, No. 4, October 1994, Page(s):2026- 2036.

510