

# Etude comparative des techniques de filtrage actif sélectif par référentiel synchrone de Park d-q et approche FMV

N. Hamouda<sup>a,c</sup>, K. E. Hemsas<sup>b</sup>, H. Benalla<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Welding and NDT Research Centre (CSC). BP 64 Cheraga– Algeria

<sup>b</sup>Laboratoire d'Automatique de Sétif (LAS), Université Ferhat Abbas Sétif-1, Route de Béjaia, sétif, Algérie

<sup>c</sup>Laboratoire D'électrotechnique Université Constantine1, Algérie

## Abstract

To minimize the total harmonic distortion (THD) and improve the power factor (PF), this paper presents a comparative study between two techniques of shunt power active filter (SPAF) by a selective action of harmonics. These two techniques are based on the SAPF of certain low frequency harmonics (5th and 7th) whose identification of the harmonics of references of the first is made by the axis synchronous d-q of the Park, and the second is done by the approach of self-tuning filter (STF). Thereafter, The active simultaneously filtering of the 5th and 7th harmonics of the current of load catches. The shapes of the signals and the THD values resulting from the results of digital simulations (Matlab-Simulink) elaborate the effectiveness and the best technique of this type of filtering..

**Keywords:** PF, THD, Harmonics, SAPF, STF, d-q Park Synchronous Axis.

## Nomenclature

$i_{ch}, i_f$ , courant de charge et courant délivré par le filter actif (A).

$L_d, L_f$  inductance de charge et inductance de couplage (H).

$L_s$  inductance de réseau (H).

$C_{dc}$  condensateur du bus continu (F)

$R_d, R_f$  résistance de charge et de filtre de couplage ( $\Omega$ )

$R_s$  résistance de réseau ( $\Omega$ )

$f$  fréquence (Hz)

$\omega_h$  vitesse angulaire de l'harmonique d'ordre  $h$  (rad/s)

$V_{dc}$  tension continu de l'onduleur (Volt)

### Greek symbols

$T_{32}$  Matrice inverse de Concordia

$T_{32}^t$  Matrice de Concordia

$P$  Matrice de rotation de Park

### Subscripts

$h$  ordre de l'harmonique

## 1. Introduction

La distorsion harmonique courant de réseau électrique est générée principalement par les charges non linéaires connectées au réseau (tels que les convertisseurs, les appareils à tubes fluorescents, etc.). Tous ces appareils possèdent la particularité d'absorber des courants non sinusoïdaux et donc d'introduire dans les lignes électriques des pollutions harmoniques en courant.

Cette pollution harmonique a des effets nocifs (tel que la déformation de la tension réseau au point de raccordement), Cette pollution peut également conduire à l'échauffement des câbles et des équipements électriques [1]. Afin de diminuer ou supprimer ces dites perturbations et ainsi améliorer la qualité de l'énergie distribuée, plusieurs solutions existent. Les filtres actifs parallèles se sont révélés être des techniques efficaces pour la compensation des composantes harmoniques [1]. Ces filtres cherchent à identifier les composantes harmoniques afin de les réinjecter efficacement dans le réseau électrique en opposition de phase. Ils sont également capables de corriger le facteur de puissance, [2-3].

La contrainte principale d'une compensation active pure est la puissance que doit délivrer le filtre au réseau. Celle-ci est proportionnelle à celle de la charge. [2-3]. Parfois dans la pratique un filtrage totale des harmoniques n'est pas nécessaire. Dans ce cas, on fait recours au filtrage sélectif. Ceci est faisable aussi avec un filtre actif. Avec un filtre actif parallèle, on peut compenser, en temps réel, partiellement toute perturbation harmoniques [2].

Dans cet article nous présentons une étude comparative entre deux techniques de filtrage actif parallèle sélectif, l'un est basé sur le référentiel synchrone de Park d-q, et l'autre est basée sur l'approche d'un filtre multi-variable FMV. Ce type de filtrage de contrôler chaque harmonique gênant [1]. Les résultats de simulation numérique du filtrage actif sélectif des harmoniques 5 et 7 par les deux techniques montrent bien l'efficacité de ce type de filtrage et la meilleure technique qui convient mieux pour celui-ci.

## 2. Structure general d'un FAP

La structure générale d'un FAP triphasé de type tension est présentée par la Fig. 1 où l'on distingue que le FAP est composé de deux parties la partie puissance et la partie contrôle-commande [1]. La partie puissance est généralement constituée d'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance dont les états des interrupteurs de l'onduleur sont contrôlés par le régulateur à hystérésis dont la bande d'hystérésis  $\Delta_h$  vaut 0.4A [3], d'un circuit de stockage d'énergie et d'un filtre passif de sortie [1-2]. La partie commande est composée d'une première étape qui fait l'identification des harmoniques de références, et d'une seconde qui réalise la régulation du bus tension continue. Une troisième génère la commande de l'onduleur.

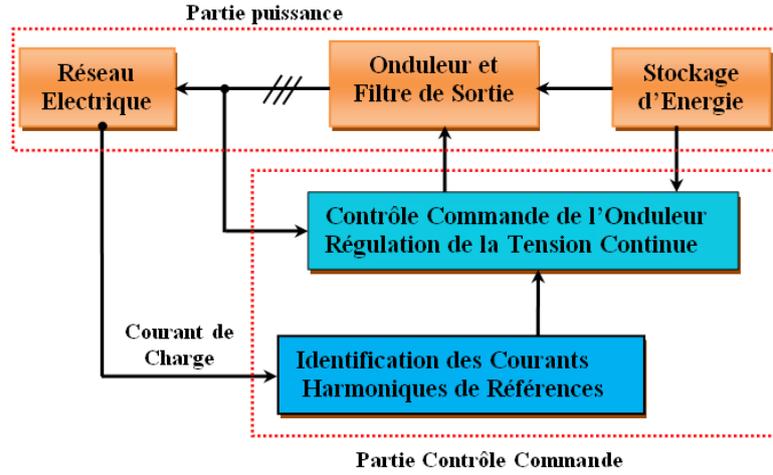


Figure 1. Structure générale du filtre actif parallèle.

### 3. Identification sélective des harmoniques de références par le référentiel synchrone de Park d-q

#### 3.1. Principe

Le principe d'identification sélectif à base de référentiel synchrone de Park d-q est basé sur la transposition des systèmes triphasés des courants de charge à un axe diphasé tournant d-q tourne par une vitesse angulaire de la fréquence harmonique désirée à filtré [4]. Ainsi, dans l'axe d-q, l'harmonique choisi à identifier devient un signal continu, et les autres harmoniques changent leur fréquences, ils prennent la valeur  $h = \pm 6\omega$ . Cette opération permet de séparer cette composante des autres courants par un filtrage simple à réaliser (filtre passe bas de premier ordre) [5].

#### 3.2. Identification de l'harmonique 5

Le système triphasé des courants de la charge peut se décomposer en deux sous systèmes directe et inverse [2]. Les harmoniques inverses du courant de charge sont données par la relation  $h=6n-1$  ( $h=5, 11, 17...etc.$ ). Ils se propagent dans le sens inverse par rapport le fondamentale du courant de charge par une vitesse angulaire  $\omega_h = -h.\omega$ . Cela est régit par l'Equation (1).

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = T_{32}^T \begin{bmatrix} i_{ch1} \\ i_{ch2} \\ i_{ch3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} &= \sqrt{\frac{3}{2}} I_{ch1} \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \alpha_1) \\ \sin(\omega t - \alpha_1) \end{bmatrix} + \sqrt{\frac{3}{2}} I_{ch5} \begin{bmatrix} \cos(-5\omega t - \alpha_5) \\ \sin(-5\omega t - \alpha_5) \end{bmatrix} \\ &+ \sqrt{\frac{3}{2}} I_{ch7} \begin{bmatrix} \cos(7\omega t - \alpha_7) \\ \sin(7\omega t - \alpha_7) \end{bmatrix} \\ &+ \sum_{\substack{h=1 \pm 6n \\ n \in \mathbb{N}}}^n \sqrt{\frac{3}{2}} I_{chh} \begin{bmatrix} \cos(h\omega t - \alpha_h) \\ \sin(h\omega t - \alpha_h) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

La première partie représente les courants fondamentaux et la seconde représente la somme des distorsions harmoniques. Ces courants peuvent s'écrire dans l'espace  $(\alpha - \beta)$  à l'aide de la transformée de Concordia exprimée par la matrice  $T_{32}$ . En appliquant une transformation de Park avec un angle de  $(\theta_s = -5.\omega.t)$ , les courants s'écrivent dans l'espace d-q comme indiqués ci-dessous.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = P(-5\omega t) \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$P(-5\omega t) = \begin{bmatrix} \cos(-5\omega t) & -\sin(-5\omega t) \\ \sin(-5\omega t) & \cos(-5\omega t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_{d5} \\ i_{q5} \end{bmatrix} &= \sqrt{\frac{3}{2}} I_{ch1} \begin{bmatrix} \cos(6\omega t - \alpha_1) \\ \sin(6\omega t - \alpha_1) \end{bmatrix} + \sqrt{\frac{3}{2}} I_{ch5} \begin{bmatrix} \cos(-\alpha_5) \\ \sin(-\alpha_5) \end{bmatrix} \\ &+ \sqrt{\frac{3}{2}} I_{ch5} \begin{bmatrix} \cos(-\alpha_7) \\ \sin(-\alpha_7) \end{bmatrix} + \dots \\ &+ \sum_{\substack{h=1 \pm 6n \\ n \in \mathbb{N}}}^n \sqrt{\frac{3}{2}} I_{chn} \begin{bmatrix} \cos((h\omega + 5\omega)t - \alpha_h) \\ \sin((h\omega + 5\omega)t - \alpha_h) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

Chacune de ces courants peuvent être séparé en deux parties, une composante alternative ainsi qu'une composante continue soit respectivement Equations (6) et (7):

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_{d5} \\ \bar{i}_{q5} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_{ch5} \begin{bmatrix} \cos(-\alpha_5) \\ \sin(-\alpha_5) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{d5} \\ \tilde{i}_{q5} \end{bmatrix} &= \sqrt{\frac{3}{2}} I_{ch1} \begin{bmatrix} \cos(6\omega t - \alpha_1) \\ \sin(6\omega t - \alpha_1) \end{bmatrix} + \sqrt{\frac{3}{2}} I_{ch7} \begin{bmatrix} \cos(-\alpha_5) \\ \sin(-\alpha_5) \end{bmatrix} + \dots \\ &+ \sum_{\substack{h=1 \pm 6n \\ n \in \mathbb{N}}}^n \sqrt{\frac{3}{2}} I_{chn} \begin{bmatrix} \cos((h\omega + 5\omega)t - \alpha_h) \\ \sin((h\omega + 5\omega)t - \alpha_h) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

Donc on peut simplifier l'Equation (7) comme suite:

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_{d5} \\ \bar{i}_{q5} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_{ch5} \begin{bmatrix} \cos(-\alpha_5) \\ -\sin(\alpha_5) \end{bmatrix} \quad (8)$$

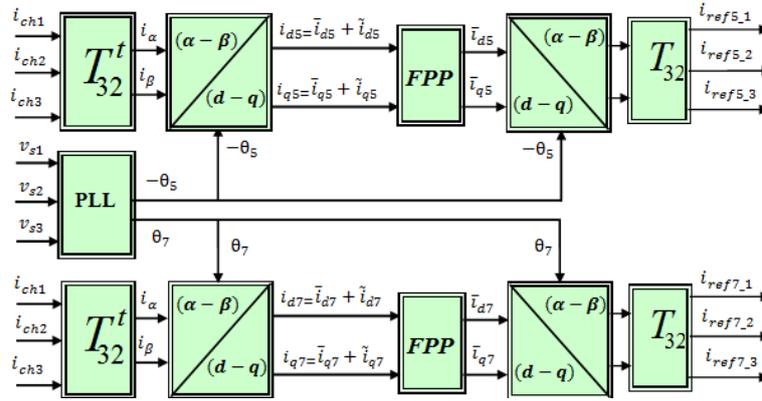
Le calcul des courants de références se fait en convertissant les courants données par l'Equation (8) dans l'espace des courant triphasé en appliquant successivement les transformations inverses de Park et de Concordia avec les matrices  $T_{32}$  et  $P = -(5.\omega.t)$ .

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{ref5.1} \\ \dot{i}_{ref5.2} \\ \dot{i}_{ref5.3} \end{bmatrix} = T_{32} P(-5\omega t) \begin{bmatrix} \bar{i}_{d5} \\ \bar{i}_{q5} \end{bmatrix} \quad (9)$$

L'identification de l'harmonique d'ordre 7 se fait par la même manière et le résultat final donné par l'Equation (10).

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{ref7.1} \\ \dot{i}_{ref7.2} \\ \dot{i}_{ref7.3} \end{bmatrix} = T_{32} P(7\omega t) \begin{bmatrix} \bar{i}_{d7} \\ \bar{i}_{q7} \end{bmatrix} \quad (10)$$

La Fig. 2 représente le principe d'identification des harmoniques 5,7 par de référentiel synchrone de Park d-q.



**Figure 2.** Algorithme identification des harmoniques de références 5 et 7 à base référentiel synchrone de Park d-q

#### 4. Identification sélective des harmoniques de références par filtre multi-variable FMV

##### 4.1. Principe

Le FMV est un filtre d'extraction, hautement sélectif, [6], et basé sur l'extraction de la composante fondamentale des signaux, directement selon les axes de Concordia [7].

##### 4.2. Modèle mathématique du filtre multi-variable FMV

Le modèle mathématique est développé dans la première fois par Song Hong-Scok, la relation entre les grandeurs d'entrées et de sortie ayant un effet intégrale [6] comme le montre l'Equation (11).

$$\hat{i}_{\alpha\beta}(s) = e^{j\omega_c t} \int e^{-j\omega_c t} i_{\alpha\beta}(t) dt \quad (11)$$

Où  $\omega_c$  la pulsation de coupure

Après la transformation de Laplace de l'Equation (12), on a trouvé l'Equation (13).

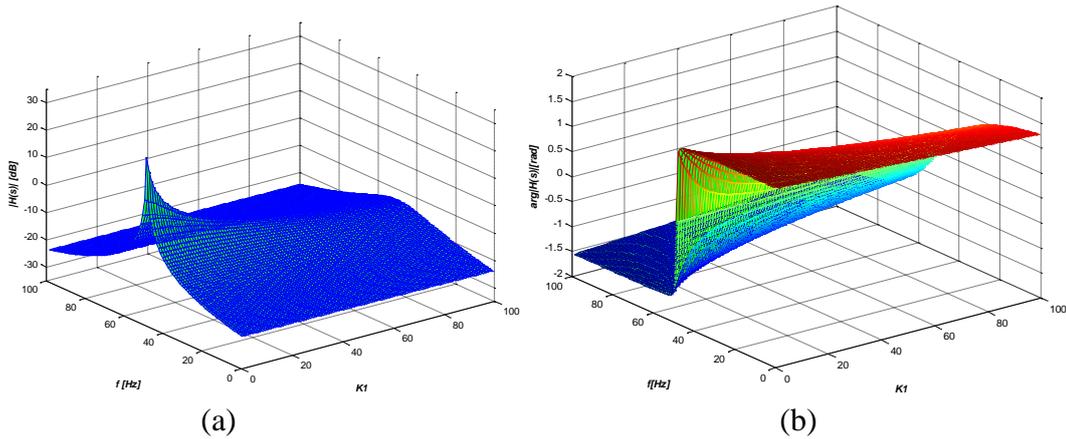
$$H(s) = \frac{\hat{i}_{\alpha\beta}(s)}{i_{\alpha\beta}(s)} = \frac{s + j\omega_c}{s^2 + \omega_c^2} \quad (12)$$

La fonction de transfert (13), elle prouve que le signal de sortie  $\hat{i}_{\alpha\beta}$  est en phase avec le signal d'entrée  $i_{\alpha\beta}$

D'ailleurs, si nous traçons le diagramme de Bode de cette fonction de transfert nous trouverons des similitudes avec un filtre de passe bande. Supposer maintenant que nous ajoutons deux nouvelles constantes  $K_1$  et  $K_2$  dans l'Equation (13). Alors nous avons obtenu l'Equation (14) comme suit :

$$H(s) = \frac{\hat{i}_{\alpha\beta}(s)}{i_{\alpha\beta}(s)} = K_2 \frac{(s + K_1) + j\omega_c}{(s + K_1)^2 + \omega_c^2} \quad (13)$$

Si on pose  $K_2 = 20$  et on varie  $K_1$ , on peut tracer le diagramme de Bode en 3D, on trouve la Fig.3 ci-dessous



**Figure 3.** (a) Courbe du Gain de  $H(s)$  en Fonction de  $f$  et  $K_1$  (b) Courbe de la Phase de  $H(s)$  en Fonction de  $f$  et  $K_1$

La Fig. 3 montre que :

- à 50Hz, l'angle de phase du diagramme de Bode est nul. Ce qui signifie que deux signaux d'entrée et de sortie sont en phase l'un par rapport l'autre.
- Pour  $|H(s)| = 0\text{ dB} \Rightarrow K_1 = K_2 = K = 20$

l'Equation (14) deviendra comme suite :

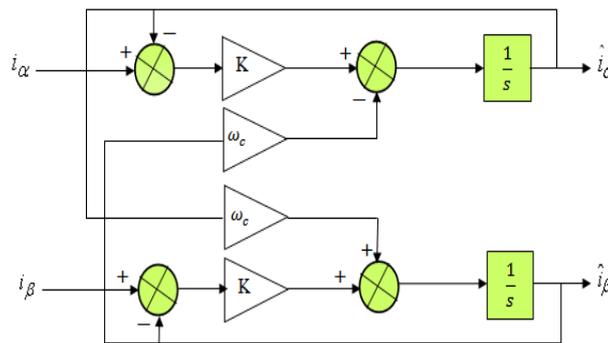
$$H(s) = \frac{\hat{i}_{\alpha\beta}(s)}{i_{\alpha\beta}(s)} = K \frac{(s + K) + j\omega_c}{(s + K)^2 + \omega_c^2} \quad (14)$$

Les expressions liant les composantes en sortie du FMV aux composantes d'entrée sont les suivantes :

$$\hat{i}_\alpha = \left( \frac{K}{s} [i_\alpha(s) - \hat{i}_\alpha(s)] - \frac{\omega_c}{s} \hat{i}_\beta(s) \right) \quad (15)$$

$$\hat{i}_\beta = \left( \frac{K}{s} [i_\beta(s) - \hat{i}_\beta(s)] - \frac{\omega_c}{s} \hat{i}_\alpha(s) \right) \quad (16)$$

La Fig. 4 montre le schéma de circuit du filtre FMV (STF).



**Figure 4.** Schéma de circuit du FMV

Donc l'identification sélective des courants harmonique de références dans un système triphasé des courants se fait directement sur l'axe de Concordia, il suffit de connaître leur fréquence et leur sens de propagation direct ou inverse [2]. Dans notre application, nous avons identifié deux harmoniques, 5 et 7 simultanément. La Fig. 5 montre bien diagramme d'identification des courants harmoniques 5 et 7 à base d'un filtre multi-variable FMV [8].

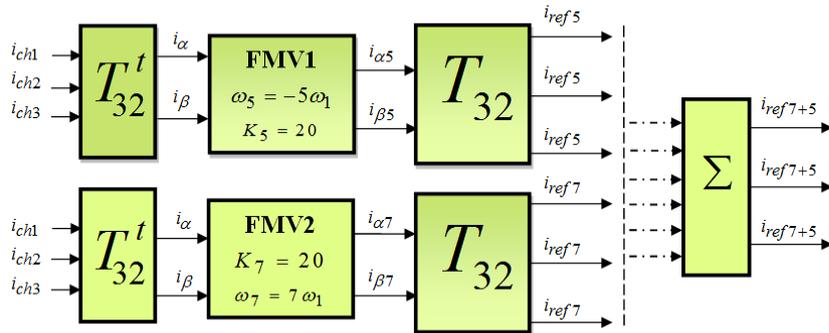


Figure 5. Algorithme d’identification des harmoniques de référence 5 et 7 à base du filtre FMV

### 5. Résultats de simulation numérique

Le système simulé est montré dans la Fig. 6 (la charge non linéaire est PD3 à diode débité sur une charge inductive. Les paramètres du système sont donnés comme suites:

$f = 50\text{Hz}$  ,  $L_s = 0.0115\text{mH}$  ,  $R_s = 1\text{m}\Omega$  ,  $L_c = 0.1\text{mH}$  ,  $R_c = 1\text{m}\Omega$  ,  $L_d = 0.2\text{H}$  ,  $R_d = 10\Omega$  ,  $V_{s\text{-eff}} = 220\text{V}$  ,  $L_f = 1\text{mH}$  ,  $R_f = 1\text{m}\Omega$  ,  $\Delta h = 0.4\text{A}$  ,  $C_{dc} = 8\text{mF}$  ,  $V_{dc} = 350\text{V}$  .

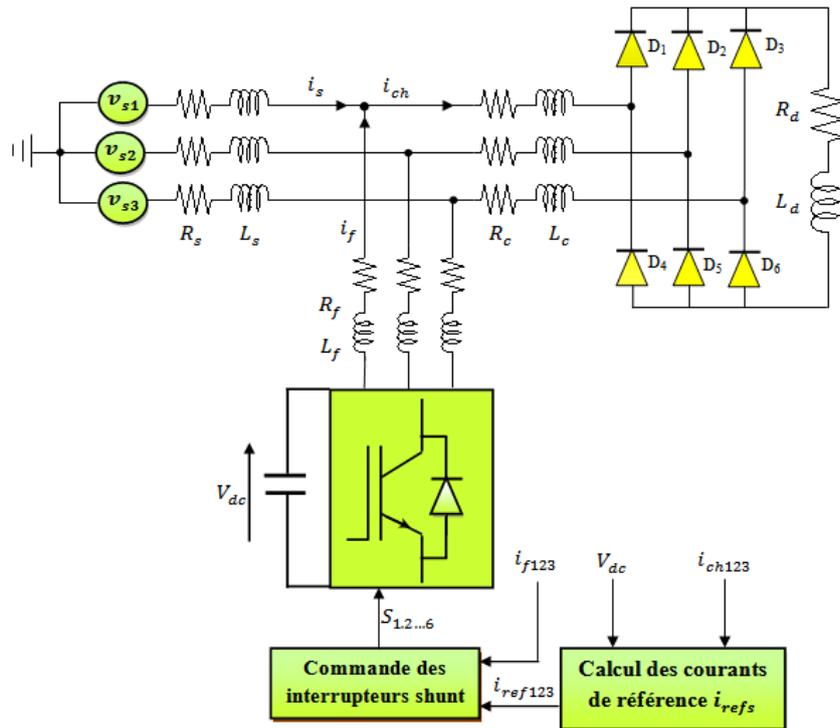


Figure 6. Système simulé

### 5.1. Filtrage actif parallèle sélectif à base d'un filtre multi-variable FMV

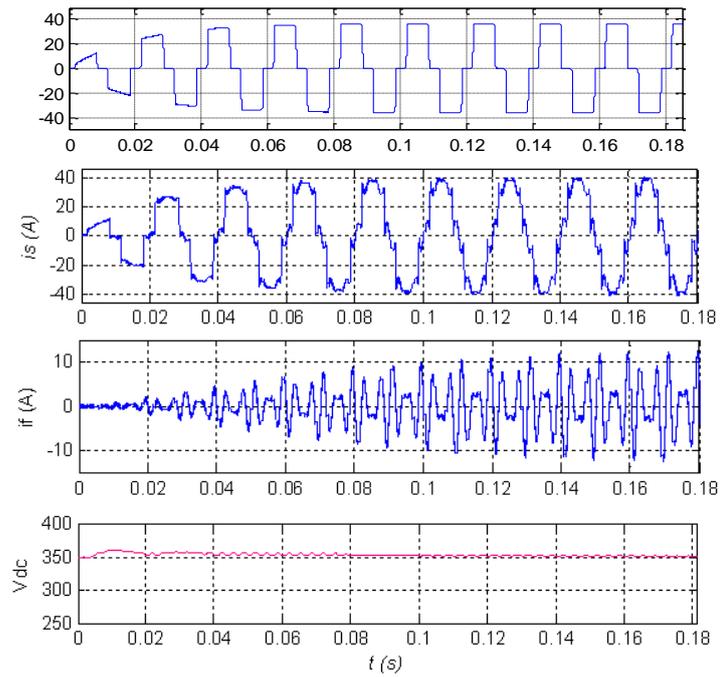


Figure 7. Compensation sélective des harmoniques 5et 7 par le filtre FMV

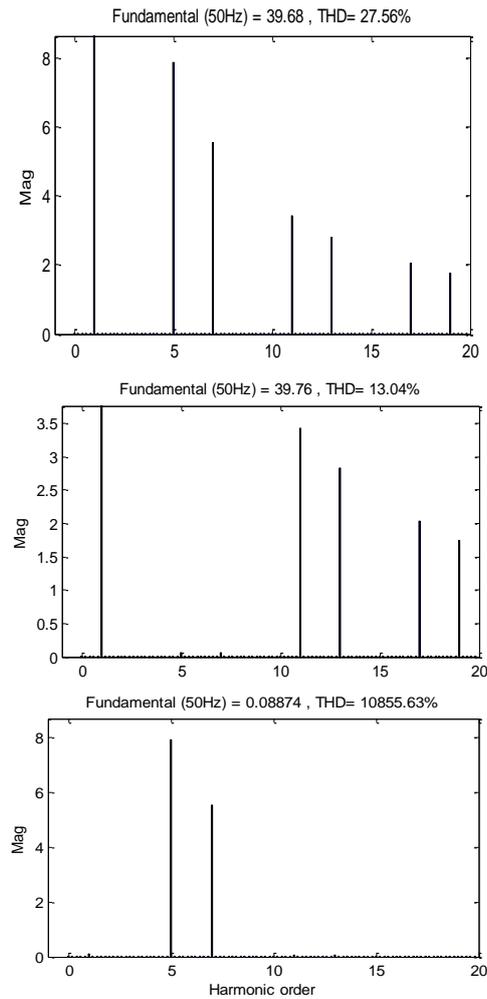
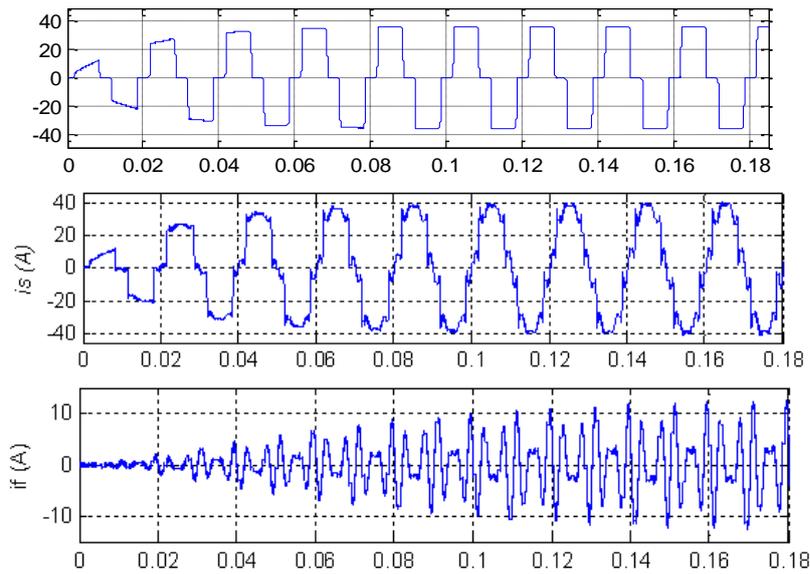
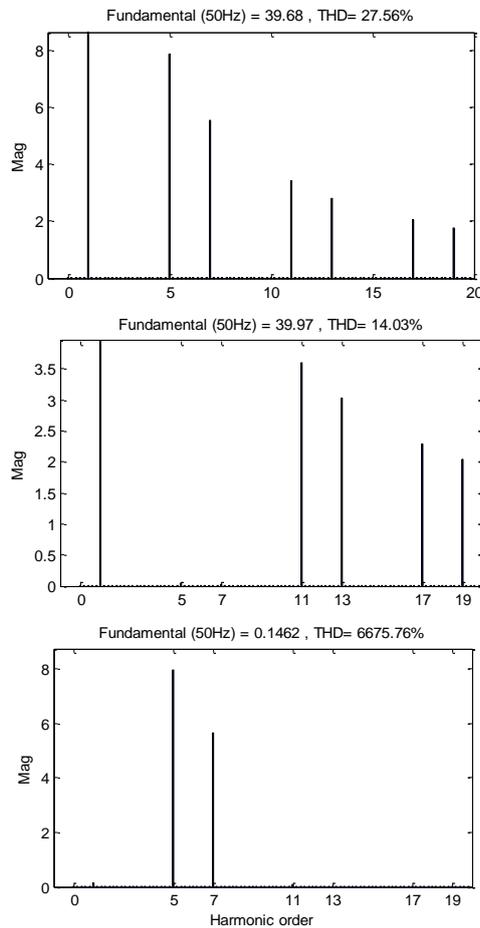


Figure 8. Spectres des courants  $i_{ch}$ ,  $i_s$  et  $i_f$

### 5.2. Filtrage actif parallèle sélectif à base du référentiel synchron de Park d-q



**Figure 9.** Compensation sélective des harmoniques 5 et 7 par le référentiel de Park d-q



**Figure 10.** Spectres des courants  $i_{ch}$ ,  $i_s$  et  $i_f$

Les résultats de simulation illustrent, que la forme d’onde du courant de source  $i_s$  après le filtrage simultané des harmoniques 5 et 7 est amélioré par les deux méthodes d’identification FMV et d-q. La capacité du filtre actif parallèle à filtrer les harmoniques du courant de la charge d’une façon sélective par l’approche FMV est mieux que la technique basée sur le

référentiel synchrone de Park d-q cela est démontrée par la lecture des spectres harmoniques. Dont, le taux de distorsion harmonique du courant de source après le filtrage des harmoniques 5 et 7 est 13.04% par l'approche FMV et 14,03% par le référentiel synchrone de Park.

## 6. Références

- [1] Akagi. H., 1994. Trends in Active Power Line, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 9, no. 3, pp. 263-268.
- [2] Bruyant, N., 1999. "Etude et commande généralisées de filtres actifs parallèles, compensation global ou sélective des harmoniques, régime équilibré ou déséquilibré". Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, France.
- [3] Abdusalam, M., Poure, P., and Saadate, S., 2008. Hardware implementation of a three-phase active filter system with harmonic isolation based on Self-Tuning Filter. PESC, 39th IEEE Power Electronics Specialists Conference, Island of Rhodes, Greece.
- [4] Mattavelli, P., 2001. Closed-loop selective harmonic compensation for active filters, IEEE Trans. on Ind. App, Vol. 37, No. 1, pp. 81-89.
- [5] Lascu, C., Asiminoaei, L., Blaabjerg, F., Boldea, I., 2006. High performance current controller for selective harmonic compensation in active power filters, Proc. of OPTIM'06, Vol. 1, pp. 205-212T.
- [6] M. Abdusalam, P. Poure and S. Saadate 2008. "Study and experimental validation of harmonic isolation based on Self-Tuning-Filter for three-phase active filter". ISIE, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Cambridge, UK.
- [7] Hong-Scok, S., 2001. "Control scheme for PWM converter and phase angle estimation algorithm under voltage unbalanced and/or sag condition", Ph.D. in electronic and electrical engineering, Postecch University, Republic of Korea (South).
- [8] Hamouda, N., 2010. "Etude comparative des technique de filtrage actif parallèle des harmonique de courant". Mémoire de Magister de l'Université de Sétif.

## 7. Acknowledgements

Ce travail a été soutenu par le Fonds de Recherche 2013 du Centre National de Recherche Scientifique et Technique en Soudage et Control en collaboration avec Laboratoire d'Automatique de Sétif 1 (LAS), et Laboratoire D'électrotechnique Université Constantine1, Les auteurs souhaitent d'exprimer leur sincère gratitude.