

Modélisation et commande d'un filtre actif série en vue d'une compensation harmonique

Alexandre BOUM*, **Gédéon SINGAMONGUE** et **Pierre KOSGA**

Université de Douala, ENSET, BP 1872, Douala, Cameroun

* Correspondance, courriel : boumat2002@yahoo.fr

Résumé

Cet article traite de la compensation harmonique de tension par un filtre actif série. Dans un premier temps nous présentons un modèle mathématique du filtre actif série, 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, commande linéaire, modélisation, compensation harmonique.*

Abstract

Modelling and control of a series active filter for harmonic compensation

This article deals with the harmonic compensation through a series active filter. After coming out with a mathematical model 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, modelling, harmonic compensation.*

Introduction

Le problème des pollutions harmoniques devient de plus en plus préoccupant depuis ces dernières décennies. Ceci à cause de l'utilisation accrue des charges dites non linéaires notamment les convertisseurs statiques, les ordinateurs, les fours à arc électriques etc. [1] pour pallier à ce problème plusieurs solutions ont été développées. Le filtre actif série 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]. Dans cet article, la théorie référentielle synchrone et la commande linéaire ont été développées à cause de leur simplicité et de leur efficacité. Cet article est divisé en quatre parties, la première partie traite de l'introduction, la deuxième du matériel et de la méthode, la troisième des résultats de simulation et des discussions, la quatrième de la conclusion.

2. Matériel et méthodes

Les simulations ont été menées dans l'environnement de Matlab / Simulink, un modèle mathématique est développé ainsi qu'une loi de commande linéaire. Le modèle Simulink permet de faire les simulations et de valider les résultats

2-1. Modèle mathématique

2-1-1. Modélisation dans le repère triphasé « abc »

Le modèle mathématique du filtre actif série est basé sur les équations électriques qui gouvernent son fonctionnement. Il dépend des variables d'état telles que le courant dans l'inductance L du filtre, la tension aux bornes de la Capacité C et la tension DC aux bornes condensateur de filtrage C_{dc} [1 - 3]. D'autre part, nous définissons la fonction de commutation (ou de modulation) d_k du bras $k = \{1 ; 2 ; 3\}$ du convertisseur comme étant l'état binaire de ses deux interrupteurs T_k . la fonction d_k est définie comme suit :

$$d_1 = \begin{cases} 1 & S_1 \text{ fermé } S_2 \text{ ouvert} \\ 0 & S_1 \text{ ouvert } S_2 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$d_2 = \begin{cases} 1 & S_3 \text{ fermé } S_4 \text{ ouvert} \\ 0 & S_3 \text{ ouvert } S_4 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$d_3 = \begin{cases} 1 & S_5 \text{ fermé } S_6 \text{ ouvert} \\ 0 & S_5 \text{ ouvert } S_6 \text{ fermé} \end{cases}$$

En choisissant un rapport de transformation 1 : 1, les **Équations** électriques peuvent être écrites comme suit :

$$\begin{cases} L \frac{d i_{f,A}}{dt} = v_{f,A} + v_{AN} \cdot \\ L \frac{d i_{f,B}}{dt} = v_{f,B} - v_{BN} \cdot \\ L \frac{d i_{f,C}}{dt} = v_{f,C} - v_{CN} \cdot \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} C \frac{d v_{f,A}}{dt} = i_{s,A} - i_{f,A} = i_{CA} \cdot \\ C \frac{d v_{f,B}}{dt} = i_{s,B} - i_{f,B} = i_{CB} \cdot \\ C \frac{d v_{f,C}}{dt} = i_{s,c} - i_{f,C} = i_{CC} \cdot \end{cases} \quad (2)$$

$$i = C_{dc} \frac{dE}{dt} = d_1 i_{f,A} + d_2 i_{f,B} + d_3 i_{f,C} \cdot \quad (3)$$

avec, $i_{f,A,B,C}$ sont les courant traversant les inductances du Filtre actif Série et $i_{s,A,B,C}$ représente les courants principaux coté primaire du Filtre actif Série.

D'autre part :

$$\begin{cases} v_{An} = d_1 E \\ v_{Bn} = d_2 E \\ v_{Cn} = d_3 E \\ v_{nN} = -\frac{1}{3}(v_{An} + v_{Bn} + v_{Cn}) \end{cases} \quad (4)$$

Ce qui conduit aux **Équations** suivantes :

$$\begin{cases} v_{AN} = v_{An} + v_{nN} = \frac{2}{3}v_{An} - \frac{1}{3}v_{Bn} - \frac{1}{3}v_{Cn} \\ v_{BN} = v_{Bn} + v_{nN} = -\frac{1}{3}v_{An} + \frac{2}{3}v_{Bn} - \frac{1}{3}v_{Cn} \\ v_{CN} = v_{Cn} + v_{nN} = -\frac{1}{3}v_{An} - \frac{1}{3}v_{Bn} + \frac{2}{3}v_{Cn} \end{cases} \quad (5)$$

où, « N » représente le point nœud principal et « n » commun comme représenté sur la **Figure 10**.

En remplaçant les **Équations (4) et (5)** dans (1), le système peut alors être représenté comme suit :

$$\begin{cases} L \frac{d}{dt} \bar{i}_f = \bar{v}_f - \Gamma \bar{d} E \\ C \frac{d}{dt} \bar{v}_f = \bar{i}_s - \bar{i}_f \\ C_{dc} \frac{d}{dt} E = \bar{d}^T \bar{i}_f \end{cases} \quad (6)$$

où,

$$i_f = \begin{bmatrix} i_{f,A} \\ i_{f,B} \\ i_{f,C} \end{bmatrix}, \quad v_f = \begin{bmatrix} v_{f,A} \\ v_{f,B} \\ v_{f,C} \end{bmatrix}, \quad d = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix}, \quad i_s = \begin{bmatrix} i_{s,A} \\ i_{s,B} \\ i_{s,C} \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix}$$

2-2. Modélisation dans le repère « dq0 »

Pour réduire l'ordre du système et le nombre des **Équations** électriques, on utilise la transformation matricielle de Park [1 - 3] :

$$K = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\omega_0 t) & -\cos(\omega_0 t) & 0 \\ \cos(\omega_0 t) & \sin(\omega_0 t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{2}{\sqrt{3}} & \frac{2}{\sqrt{3}} & 0 \\ \frac{3}{2} & \frac{3}{2} & \frac{3}{2} \end{bmatrix}$$

où, ω_0 est la fréquence angulaire principale. Cette transformation permet d'exprimer les **Équations** décrivant notre système dans le référentiel (d,q,o).

$$\begin{bmatrix} i_{f,d} \\ i_{f,q} \\ i_{f,0} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{3}{2} & \frac{3}{2} & \frac{3}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f,A} \\ i_{f,B} \\ i_{f,C} \end{bmatrix}$$

Les variables du système deviennent :

$$\begin{cases} i'_f = ki_s = [i_{s,d} & i_{s,q} & i_{s,0}]^T \\ i'_f = ki_f = [i_{f,d} & i_{f,q} & i_{f,0}]^T \\ v'_f = kv_f = [v_{f,d} & v_{f,q} & v_{f,0}]^T \\ d' = kd = [dq & dq & d0]^T \end{cases} \quad (7)$$

Le système devient :

$$\begin{cases} L \frac{di_{f,d}}{dt} = v_{f,d} + L\omega_0 i_{f,q} - d_d E \\ L \frac{di_{f,q}}{dt} = v_{f,q} - L\omega_0 i_{f,d} - d_q E \\ L \frac{di_{f,0}}{dt} = v_{f,0} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} C \frac{dv_{f,d}}{dt} = C\omega_0 v_{f,q} - if_{,d} + i_{s,d} \\ C \frac{dv_{f,q}}{dt} = -C\omega_0 v_{f,d} + if_{,q} + i_{s,q} \\ C \frac{dv_{f,0}}{dt} = i_{s,0} - if_{,0} \end{cases} \quad (9)$$

$$Cd_c \frac{dE}{dt} = \frac{3}{2} (d_d if_{,d} + d_d if_{,q}) + \frac{1}{3} d_0 if_{,0} \quad (10)$$

Pour déduire le modèle d'état du système on considère que les variables de la séquence zéro sont nulles. La variable d'état x incluant les variables d'état réduit du filtre série est définie comme suit :

$$x = \begin{bmatrix} if_{,d} \\ if_{,q} \\ Vf_{,d} \\ Vf_{,q} \\ E \end{bmatrix}$$

Ainsi le système peut être représenté en utilisant la forme vectorielle : $\dot{x} = Ax + Pi_s$. Ainsi le système peut être représenté sous forme matriciel :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} if, d \\ if, q \\ Vf, d \\ Vf, q \\ E \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & \frac{1}{L} & 0 & -\frac{d_d}{L} \\ -\omega_0 & 0 & 0 & \frac{1}{L} & -\frac{d_q}{L} \\ -\frac{1}{C} & 0 & 0 & \omega_0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C} & -\omega_0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2Cd_c} d_d & \frac{3}{2Cd_c} d_q & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} if, d \\ if, q \\ Vf, d \\ Vf, q \\ E \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_P \begin{bmatrix} if, d \\ if, q \end{bmatrix} \quad (11)$$

Le modèle en régime permanent est obtenu comme suit :

- En posant les **Équations** aux différences égales à zéro :

$$\text{On a : } \begin{cases} Vf, d = D_d E - L \omega_0 If, q. \\ Vf, q = D_q E - L \omega_0 Id. \\ If, d = C \omega_0 V, q + Is, d \\ If, q = -C \omega_0 Vf, d + Is, q \end{cases} \quad (12)$$

Modèle en régime dynamique :

$$\begin{cases} L \frac{d}{dt} if, d = Vf, d + L \omega_0 if, q - D_d E - d_d E \\ L \frac{d}{dt} if, q = Vf, q - L \omega_0 if, d - D_q E - d_q E \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} C \frac{d}{dt} v_f, d = C \omega_0 v_f, q - i_f, d + i_s, q. \\ C \frac{d}{dt} v_f, q = -C \omega_0 v_f, d - i_f, q + i_s, q. \end{cases} \quad (14)$$

$$Cd_c \frac{dE}{dt} = \frac{3}{2} (d_d I_f, d + D_d i_f, q) + d_q I_f, q + D_q i_f, q \quad (15)$$

$$\text{Les } \mathbf{\dot{X}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bd} + \mathbf{Pi}_s \quad (16)$$

$A =$ Matrice d'état ; $B =$ Matrice de commande ; $C =$ Matrice de perturbation.

$$\text{avec, } A = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & \frac{1}{L} & 0 & -\frac{D_d}{L} \\ -\omega_0 & 0 & 0 & \frac{1}{L} & -\frac{D_q}{L} \\ -\frac{1}{C} & 0 & 0 & \omega_0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C} & -\omega_0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2Cd_c} D_d & \frac{3}{2Cd_c} D_q & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -\frac{E}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{E}{L} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{3}{2Cd_c} I_f, d & \frac{3}{2Cd_c} I_f, q \end{bmatrix}$$

2-3. Modèle fréquentielle du système

En appliquant la transformation de Laplace à l'Équation (16) du système, on obtient [1 - 3] :

$$X(s) = (sI - A)^{-1}.B.d(s) + (sI - A)^{-1}.P.i_s(s) \quad (17)$$

I désigne la matrice identité et s l'opérateur de Laplace.

L'Équation (17) s'écrit :

$$\begin{bmatrix} i_{f,d}(s) \\ i_{f,q}(s) \\ v_{f,d}(s) \\ v_{f,q}(s) \\ E(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \\ G_{31} & G_{32} \\ G_{41} & G_{42} \\ G_{51} & G_{52} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d_d(s) \\ d_q(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \\ P_{31} & P_{32} \\ P_{41} & P_{42} \\ P_{51} & P_{52} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{s,d}(s) \\ i_{s,q}(s) \end{bmatrix} \quad (18)$$

avec,

$$X(s) = \begin{bmatrix} i_{f,d}(s) \\ i_{f,q}(s) \\ v_{f,d}(s) \\ v_{f,q}(s) \\ E(s) \end{bmatrix} \text{ Le vecteur de sortie du système c'est-à-dire la grandeur qu'on veut commander ;}$$

$$G(s) = (sI - A)^{-1}.B \text{ La matrice de transfert du système ;}$$

$$d(s) = \begin{bmatrix} d_d(s) \\ d_q(s) \end{bmatrix} \text{ Le vecteur de contrôle du système ;}$$

$$P(s) = (sI - A)^{-1}.P \text{ La matrice de perturbation ;}$$

$$i_s(s) = \begin{bmatrix} i_{s,d}(s) \\ i_{s,q}(s) \end{bmatrix} \text{ Le vecteur de perturbation.}$$

Ce modèle nous permet d'analyser théoriquement le comportement du système et d'utiliser la théorie de conception des commandes linéaires pour développer les correcteurs adaptés au système.

3. Mise en œuvre de la commande du filtre actif série

La commande du filtre actif série consiste à [17 - 22] :

- Identifier les tensions perturbatrices de références ;
- Commander les interrupteurs de l'onduleur ;
- Réguler les tensions injectées dans le réseau électrique par le filtre actif série ;
- Réguler la tension continue du bus.

3-1. Identification des tensions harmoniques de références

Cette étape consiste à déterminer les tensions perturbatrices qui seront injectées ensuite par l'onduleur, en opposition de phase. Il existe plusieurs méthodes dans la revue de littérature mais ici nous avons utilisé la théorie référentielle synchrone (dq). Elle offre l'avantage de déterminer la perturbation avec précision, rapidité et facilité d'implantation. Il nous a semblé qu'elle est la mieux appropriée. Son principe consiste à :

- Étape 1 : Transformer les tensions de charge triphasés (V_{ch1} , V_{ch2} , V_{ch3}) à (V_α , V_β , V_0) en utilisant l'Équation ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} V_{c\alpha} \\ V_{c\beta} \\ V_0 \end{bmatrix} = T_{32} \begin{bmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{bmatrix} \text{ avec, } T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (19)$$

- Étape 2 : Transformer les tensions V_α et V_β à V_d et V_q par :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (20)$$

où, ω est la pulsation.

On peut décomposer les tensions V_d et V_q en deux termes, les composantes fondamentales et harmoniques. Les harmoniques se comportent comme une composante alternative et les termes fondamentaux se comportent comme une composante continue, donc on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{v}_d + \tilde{v}_d \\ \bar{v}_q + \tilde{v}_q \end{bmatrix} \quad (21)$$

avec,

- \bar{V}_d et \bar{V}_q : Composante continue (fondamentale) de courant de charge dans le repère dq ;
- \tilde{V}_d et \tilde{V}_q : Composante alternative (harmonique) de courant de charge dans le repère dq.

- Étape 3 : De l'étape 2, il est montré que les tensions de charge se composent de deux termes. Pour cette étape, le filtre passe-haut (FPH) est utilisé pour séparer les composantes harmoniques \tilde{V}_d et \tilde{V}_q de la fondamentale comme le montre la **Figure 2**.

- Étape 4 : Le passage des composantes harmoniques de repère dq vers le repère (α , β).

- Étape 5 : Calcule des tensions de référence triphasés à partir de l'Équation V_{ref_a} ; V_{ref_b} ; V_{ref_c} :

$$\begin{bmatrix} V_{ref-a} \\ V_{ref-b} \\ V_{ref-c} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_\alpha \\ \tilde{V}_\beta \end{bmatrix} \quad (22)$$

Afin d'échanger avec une puissance contrôlée, l'onduleur doit toujours être synchronisé avec le réseau. Le but du bloc de synchronisation est d'obtenir la phase de la tension instantanée du réseau. Plusieurs techniques sont utilisées, le choix le plus commun consiste à utiliser une boucle à verrouillage de phase (PLL : Phase locked loop) [4].

3-2. Commande des interrupteurs de l'onduleur [11 - 16].

L'objectif de cette commande est de déterminer les instants de d'ouverture et fermeture des interrupteurs qui permettent d'obtenir une tension de sortie, côté alternatif qui suit le plus fidèlement possible les tensions harmoniques de références. Ceci en minimisant les harmoniques de commutation. A cet effet, nous allons utiliser la commande MLI intersective. Son principe consiste à comparer la modulante (le signal à synthétiser) à une porteuse généralement triangulaire. Le signal de sortie vaut 1 si la modulante est plus grande que la porteuse, 0 sinon ; le signal de sortie change donc d'état à chaque intersection de la modulante et de la porteuse. Dans notre cas, nous aurons trois signaux modulants qui sont les tensions harmoniques de références. La porteuse doit être de fréquence élevée selon le théorème de Shannon ($f_e \geq f_{max}$).

3-3. La régulation des tensions injectées par le filtre actif série et de la tension continue de l'onduleur.

Les tensions V_{f23} injectées par le filtre actif série dans le réseau doivent suivre en opposition de phase les tensions harmoniques de référence. L'objectif ici c'est donc de pouvoir contrôler ces tensions générées par le filtre actif. A cet effet nous allons nous intéresser au modèle fréquentiel ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} i_{f,d}(s) \\ i_{f,q}(s) \\ v_{f,d}(s) \\ v_{f,q}(s) \\ E(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \\ G_{31} & G_{32} \\ G_{41} & G_{42} \\ G_{51} & G_{52} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d_d(s) \\ d_q(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \\ P_{31} & P_{32} \\ P_{41} & P_{42} \\ P_{51} & P_{52} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{s,d}(s) \\ i_{s,q}(s) \end{bmatrix} \quad (22)$$

Il faudra donc développer des correcteurs qui vont corriger les signaux $v_{f,d}$ et $v_{f,q}$. Pour cela, nous allons nous intéresser uniquement à G_{31} et G_{42} correspondant respectivement aux sorties $v_{f,d}$ et $v_{f,q}$ et Ceci dans le but de simplifier l'étude du système. Les modèles de commandes sont indiqués sur la **Figure 3**. Pour faire le choix du correcteur, il faudra préciser les exigences de notre système. Ce dernier exige une grande précision ; une bonne stabilité et une rapidité moyenne car les tensions générés par le filtre actif série ($v_{f,d}$, $v_{f,q}$) doivent suivre strictement les harmoniques de références ($v_{ref,d}$, $v_{ref,q}$). De ce qui précède, nous avons choisi d'utiliser un régulateur PI. Sa fonction de transfert est : $C(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i \cdot s})$ avec : K_p le gain du correcteur et T_i la constante d'intégration. Pour le calcul des paramètres K_p et T_i , on fixe la marge gain souhaité ($45^\circ \leq \Delta\theta \leq 60^\circ$) et la précision doit être nulle. La condition de stabilité est :

$$\begin{cases} |F_{BO}(j\omega_c)| = 1 \\ \arg(F_{BO}(j\omega_c)) = -\pi \end{cases} \quad (23)$$

On obtient : $C_{31}(s) = C_{42}(s) = 0.05 \frac{s+44.72}{s}$

4. Résultats et discussion

L'étude théorique effectuée sera étayée par des simulations à l'aide d'un logiciel MATLAB / SIMULINK. Il faut noter que l'onduleur lui-même produit des harmoniques lors de la commutation de ses interrupteurs. Pour cela lors de la simulation des filtres passifs sont montés en parallèle entre la charge non linéaire et le point de connexion du filtre actif série. Ceci dans le but de réduire les harmoniques supplémentaire générer par l'onduleur. Nous présentons deux types résultats, le premier avant compensation et le deuxième après compensation.

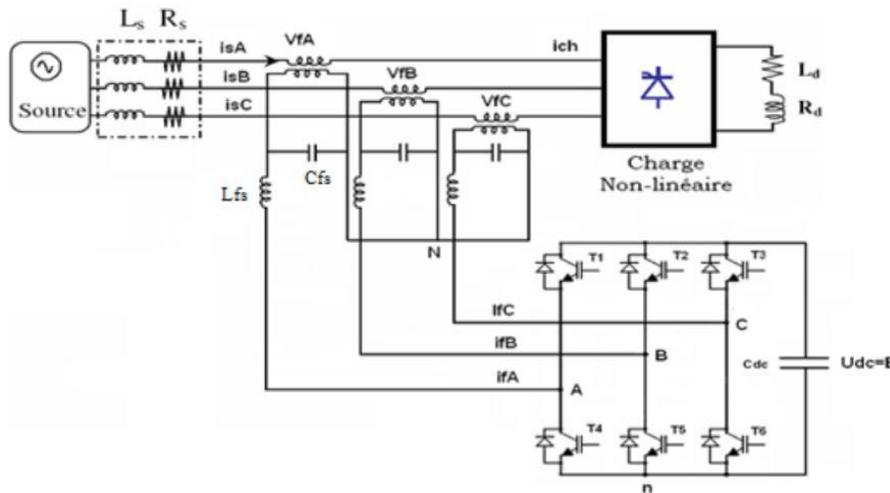


Figure 1 : Schéma de principe

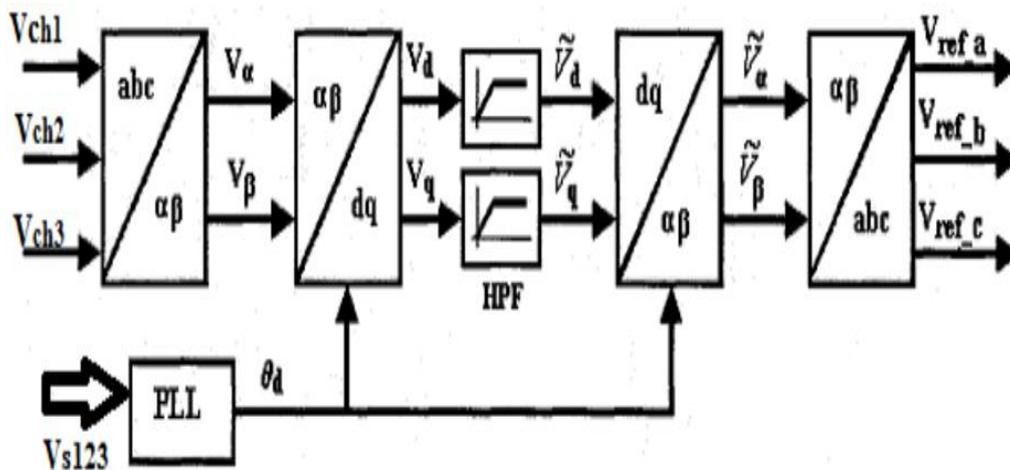


Figure 2 : Schéma de principe

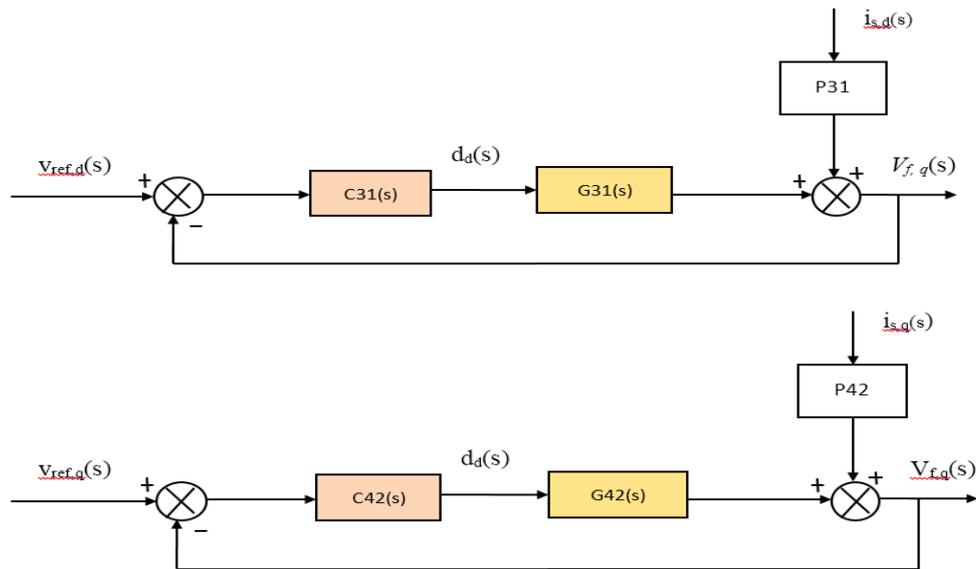


Figure 3 : Modèle de commande des tensions $v_{f,d}$ et $v_{f,q}$

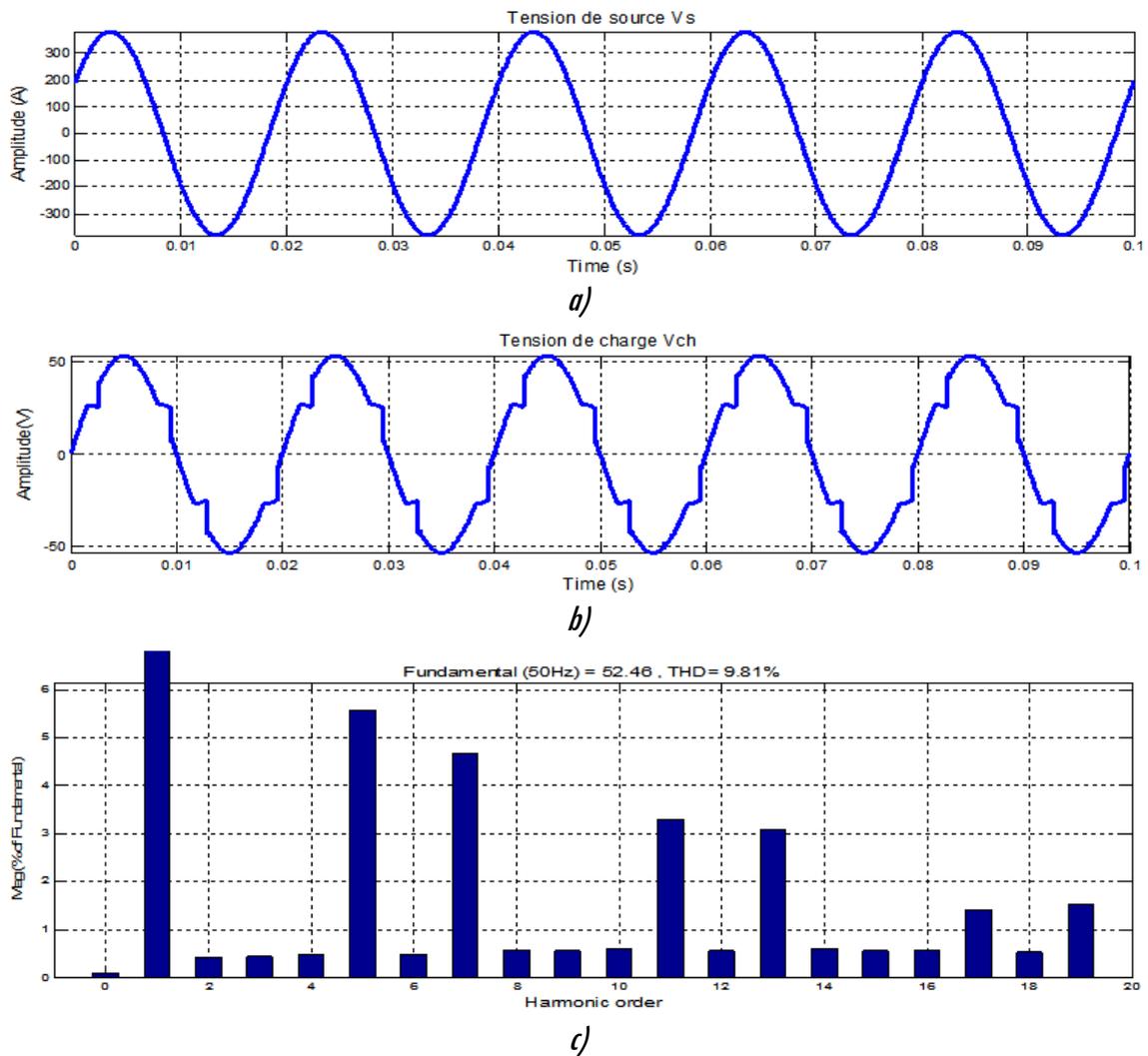


Figure 4 : Les courbes obtenues avant filtrage : Tension source V_s (a), Tension de charge V_{ch} (b), Spectre harmonique de la tension de charge (c)

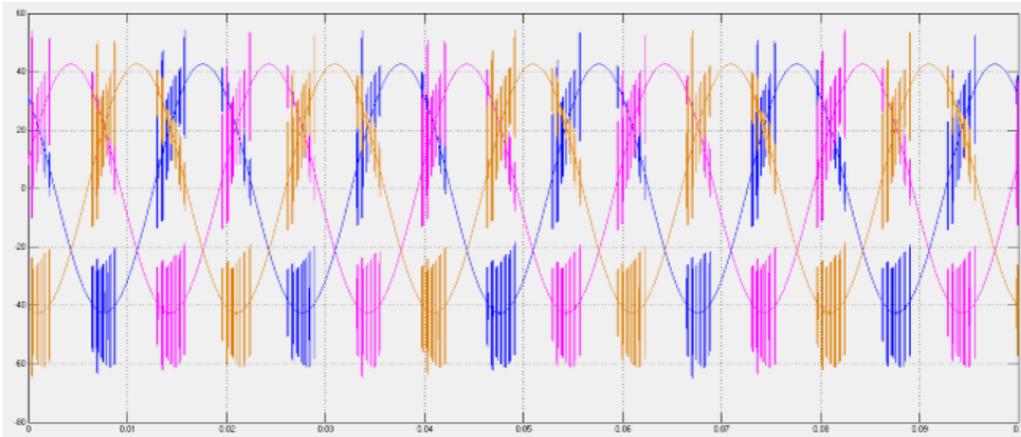


Figure 5 : *Courbes des tensions injectées dans le réseau*



Figure 6 : *Courbes de tension charge compensation après filtrage*

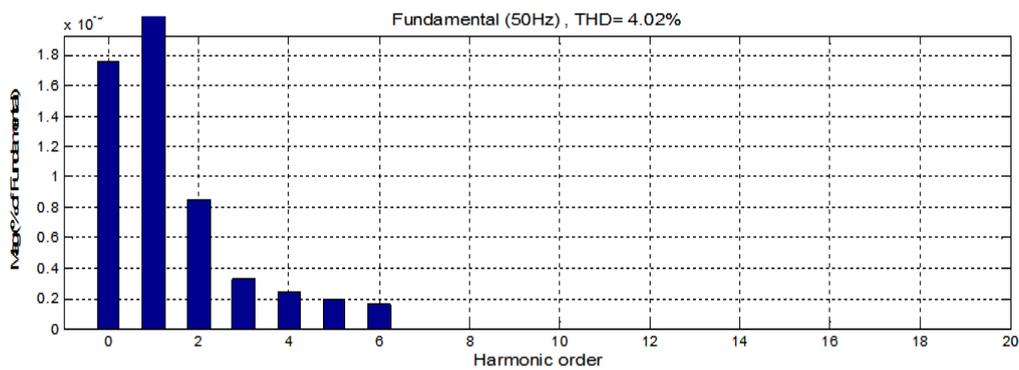


Figure 7 : *Spectre harmonique de la tension de charge après filtrage*

Tableau : *Comparaison de la valeur de THD de la charge avant et après filtrage*

	Forme de la courbe de charge	THD de la tension de charge
Avant filtrage	Déformée	9,81 %
Après filtrage	Sinusoïdale	4,02 %

Références

- [1] - NEAGU, C. BOGDAN, GRIGORAŞ, GHEORGHE, et SCARLATACHE, Florina. The influence of harmonics on power losses in urban distribution networks. In : 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, N° 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] - HAMOUDI FARID, Commande robuste d'un filtre actif shunt a quatre fils, thèse de Magistère en génie électrique, Université EL-HADJ KHEIDER BATNA, Algérie, (2008).
- [7] - ETXEBERRIA — DJADUI, Sur les systèmes de l'électronique de puissance dédiés a la distribution électrique : application a la qualité de l'énergie, Thèse de Doctorat de l'institut polytechnique de Grenoble(France), (2003).
- [8] - GHABDANE ISMAEL, Commande d'un filtre actif triphasé parallèle par différents régulateurs, Magistère en électronique, Université Mohammed KHEIDER-Biskra, Algérie, (2011).
- [9] - NEKKA DJAMEL, Contribution à l'étude des stratégies de commande des filtres actifs triphasés, mémoire de magister, Université Mohammed chérif MESSAADIA de SOUK-AKRAS, Algérie, (2014).
- [10] - A. MORSHI, A. TLEMCANI, N. OULD CHERCHALLI et M. S. BOUCHERIT, Commande d'un filtre actif série de puissance à cinq niveaux pour améliorer la tension électrique, EMP Algérie, (16-17 Avril 2013).
- [11] - SWAIN, SUSHREE, RAY, PRAVAT, et MOHANTY, KANUNGO, Improvement of power quality using a robust hybrid series active power filter. IEEE Transactions on Power Electronics, (2016).
- [12] - JUAN W. DIXON, GUSTAVO VENEGAS, and LUIS A. MORAN, A Series Active Power Filter Based on a Sinusoidal Current-Controlled Voltage-Source Inverter, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, Vol. 44, N° 5, (OCTOBER 1997).
- [13] - RAJESH KR AHUJA, SUSHIL VERMA, BHUPENDER DHULL, Simulation of Three-Phase Active Filter for Harmonics Reduction and Reactive Power Compensation, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering (An ISO 3297 : 2007 Certified Organization), Vol. 2, Issue 10, (October 2013).
- [14] - N. VANAJAKSHI, G. NAGESWARA RAO, A three phase Shunt Active power Filter for harmonics reduction, International Research Journal of Engineering and Technology, Volume 02 Issue, (09 Dec-2015).
- [15] - PARIMALA V1, GANESHKUMAR D2, BENAZIR HAJIRA A3, Harmonic Reduction Using Shunt Active Power Filter With Pi Controller, International Journal of Scientific Engineering and Research (IJSER), Volume 2 Issue 4, (April 2014).
- [16] - DUVERGER LAURENT, Etude de stratégies de commande d'un filtre actif de type parallèle en vue d'assurer la compensation des harmoniques et du déséquilibre, Université Catholique de Louvain, 3 place du levant, 1348 Louvain-La-Neuve, Belgique, (juillet 2006).
- [17] - LUIS MORAN, PEDRO WERLINGER, JUAN DIXON, ROGEL WALLACE, A series active power filter which compensates current harmonics and voltage unbalance simultaneously, IEEE, (1995).

- [18] - NASSAR MENDELEK and KAMAL AL-HADDAD, Modeling and Nonlinear Control of Shunt Active Power Filter in the Synchronous Reference Frame, GREPCI, Dept. of Elect. Eng., Ecole de Technologie Supérieure 1100, rue Notre-Dame Ouest, Montreal, Quebec H3C 1 K3, Canada kamal@ele.etsmtl.ca, IEEE, (2000).
- [19] - A. NASIRI and A. EMADI, Modeling, Simulation, and Analysis of Active Filter Systems - Using Generalized State Space Averaging Method, Grainger Power Electronics and Motor Drives Lab Electric Power and Power Electronics Centellinois Institute of Technology Chicago, IL 60616-3793, USA, IEEE, (Mars 2003).
- [20] - F. R. JIMÉNEZ, IEEE MEMBER, J. M. SALAMANCA, P. F. CÁRDENAS, Modeling and Circuitual Analysis of a Single Phase Shunt Active Power Filter, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia - Escuela de Ingeniería Electrónica ; Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Ingeniería Bogotá, IEEE, (Août 2014).
- [21] - WANG XIAO-GANG, XIE YUN-XIANG, SHUAI DING-XIN, Simplified Model Predictive Control for a Shunt Active Power Filter, Electrical Power College, South China University of Technology, Guangzhou, China, Department of Information and Control Engineering, Guangzhou University, Guangzhou, China, IEEE, (2008).
- [22] - SHAMSHUL HAQ, S., LENINE, D., et LALITHA, S. V. N. L. Performance Analysis of Shunt and Hybrid Active Power Filter Using Different Control Strategies for Power Quality Improvement. In : *Emerging Trends in Electrical, Communications and Information Technologies: Proceedings of ICECIT-2015*. Springer Singapore, (2017) 405 - 413 p.