

Application d'un Filtre Actif Quatre Bras à Trois Niveaux à La Compensation des Harmoniques d'un Réseau à Quatre Fils

M. ELBAR^{1,2}, B. NAAS^{1,2} and M.O. MAHMOUDI¹.

E-mail elbar_yas@yahoo.fr, badreddine.naas@gmail.com

¹ Laboratoire de commande des processus, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie

² Département Sciences et Techniques, Université Ziane ACHOUR, Djelfa, Algérie

Résumé— Les enjeux énergétiques liés à la qualité de la distribution de l'énergie électrique nécessitent le développement des dispositifs de filtrage actif des réseaux électriques. Le filtre actif triphasé à trois fils a montré son efficacité en termes de compensation des harmoniques générés par les charges non linéaires et/ou déséquilibrées dans un réseau à trois fils. Le travail présenté dans cet article concerne plus particulièrement la commande d'un filtre actif trois niveaux à quatre bras afin de compenser les harmoniques de courants et la puissance réactive susceptible d'apparaître dans les réseaux électriques à quatre fils.

Index Terms— filtrage actif, charges non linéaires, énergie réactive, compensateur actif

I. INTRODUCTION

Ces dernières années, la qualité du courant électrique devient une préoccupation importante pour les distributeurs d'énergie et pour leurs clients. Schématiquement, les travaux visant à améliorer la qualité de l'énergie peuvent se scinder en deux groupes selon qu'ils proposent une action préventive ou correctrice [3].

- La première approche, de nature préventive, s'applique aux nouvelles installations et consiste à intégrer la minimisation des perturbations dès le stade de conception en utilisant des convertisseurs dits « propres » ou peu polluants.
- La deuxième approche, de nature curative, consiste à utiliser des filtres actifs de puissance dont le rôle est d'identifier et d'éliminer en temps réel les perturbations existantes.

Le filtre actif parallèle à structure tension triphasée a été retenue pour ses excellentes performances en termes de compensation des harmoniques et correction du facteur de puissance. Cependant, la plupart des installations (les systèmes à 4 fils) alimentent des charges non linéaires monophasées ou des charges triphasées déséquilibrées et sont donc munies d'un

fil de neutre (système à 4 fils). Les courants de lignes sont généralement déséquilibrés et le fil de neutre est parcouru par un courant égal à la somme des courants de phases et sa valeur maximale peut excéder celle du courant de ligne. Le filtre actif parallèle à trois fils paraît incapable d'éliminer ces courants lorsqu'il est connecté à un réseau à quatre fils (avec la présence de fil du neutre) [4].

Dans ce contexte, le travail présenté dans cet article concerne plus particulièrement l'utilisation du filtre actif trois niveaux à quatre bras afin de réduire les harmoniques et d'avoir un facteur de puissance unitaire pour le cas des réseaux à quatre fils. La structure multiniveaux est adaptée aux applications des moyennes et hautes tensions, du fait que les tensions et courants de sortie présentent un bas taux d'harmoniques à fréquence de hachage réduite.

L'identification des harmoniques est une étape très importante dans le processus de compensation active. En effet, le système de commande, même très efficace, ne pourra pas à lui seul effectuer des corrections suffisantes si les harmoniques parasites sont mal identifiées. Pour cette raison, de nombreuses méthodes d'identification ont été développées dans la littérature.

Dans ce travail. Nous allons présenter une stratégie d'identification des courants harmoniques pour compenser les harmoniques de courants générés par les charges non-linéaires reliées à un réseau électrique à quatre fils. Cela nous permettra d'envisager le cas des charges monophasées et éventuellement déséquilibrées. Cette méthode se base sur l'utilisation de la méthode des puissances instantanées [5].

Il faut noter aussi que cette méthode n'est valable que si la tension du réseau est saine (sinusoïdale et équilibrée). Ce n'est généralement pas le cas en pratique. Pour rendre cette méthode universelle et pour n'importe quelle forme de tension, nous utilisons le système de détection de la tension directe du réseau (PLL) [5].

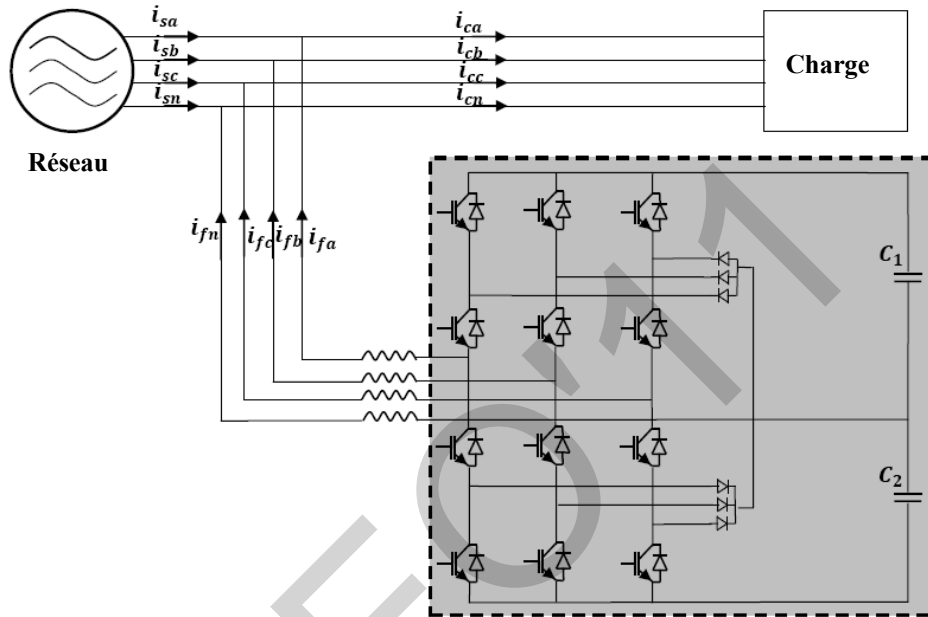
II. TOPOLOGIES DU FILTRE ACTIF PARALLELE A QUATRE FILS

La Fig.1 présente deux topologies capables de compenser le courant de neutre. Pour la topologie (a), le neutre de la charge et du réseau se rejoignent au niveau de point milieu capacitif du bus continu. Il s'agit d'un onduleur à 3 bras avec un point milieu capacitif côté DC. Pour empêcher le courant du neutre de remonter au réseau, le potentiel au point milieu du bus continu doit être rigoureusement contrôlé et éviter tout déséquilibre entre les deux tensions v_{c1} et v_{c2} [3].

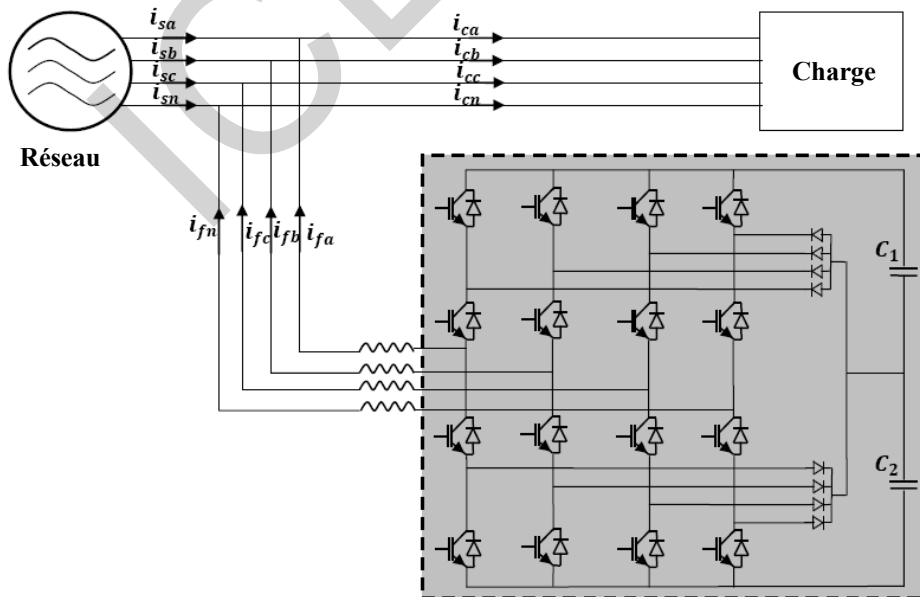
Pour la topologie (b), le courant homopolaire est compensé par l'utilisation d'un quatrième bras. Ce dernier peut être

contrôlé d'une façon indépendante par rapport aux autres bras (fréquence de commutation et calibre en courant).

Pour les deux topologies, La composante haute fréquence due aux commutations est atténuée par le filtre HF à la sortie de l'onduleur. Ce filtre peut aussi empêcher la composante HF due aux commutations de quatrième bras de remonter et de se propager dans le réseau. Le tableau 1 résume les inconvénients et les avantages des topologies à 3 bras avec point milieu capacitif et à 4 bras.



a. Onduleur 3 bras avec un point milieu capacitif



a. Onduleur a 4 bras

Fig.1 Topologies du FAP à quatre fils basés sur l'onduleur a trios niveaux

TABLE. 1
Avantages et inconvénients des topologies à 3 ou 4 bras

Topologie	Avantages	Inconvénients
3 bras avec point milieu capacitif	Nombre réduit de semi-conducteur (6 IGBT). Moins de pertes par conduction et par commutation. Stockage important d'énergie dans les condensateurs.	Surdimensionnement des trois bras. Contrôle judicieux du potentiel de point milieu. Gros condensateur pour bus continu (2C).
4 bras	Meilleure contrôlabilité de courant. Faible condensateur côté bus continu. Plus de degré de liberté. Tension basse aux bornes des interrupteurs de puissance ($v_c/2$).	16 composants semi-conducteurs. Plus de pertes par conduction et par commutation.

III. METHODE DES PUISSANCES REELLE, IMAGINAIRE ET HOMOPOLAIRE INSTANTANÉES

Cette méthode introduite par [6], exploite la transformation de Concordia des tensions simples et des courants de ligne, afin de calculer les puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées. Elle permet aussi de transformer la composante fondamentale en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. Cette transformation est nécessaire si nous voulons éliminer facilement la composante continue.

Soient respectivement les tensions simples et les courants de ligne d'un système triphasé avec homopolaire, (v_a, v_b, v_c) et (i_a, i_b, i_c) . La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé des axes abc aux axes $\alpha\beta o$, comme le montre les deux relations suivantes :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_o \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} ; \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_o \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \\ C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

En négligeant les harmoniques de tension, la puissance réelle p , la puissance imaginaire q et la puissance homopolaire p_o sont exprimées par la matrice suivante:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ p_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta & 0 \\ -v_\beta & v_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & v_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_o \end{bmatrix} \quad (2)$$

Les composantes des puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées peuvent être exprimées comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative.

De l'équation (2), nous pouvons déduire les composantes de courant correspondantes :

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \\ i_{fo}^{ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_o(v_\alpha^2 + v_\beta^2)} \begin{bmatrix} v_o v_\alpha & -v_o v_\beta & 0 \\ v_o v_\beta & v_o v_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & v_\alpha^2 + v_\beta^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ p_o \end{bmatrix} \quad (3)$$

Ainsi, il est possible de simplifier la commande des puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées comme suit [5]:

Grâce à un PLL qui génère des tensions équilibrées dans les axes $\alpha\beta$, sans homopolaire et synchrones avec la tension fondamentale du réseau électrique:

$$\begin{cases} v_\alpha = \sqrt{3}V_s \sin(\omega t) \\ v_\beta = -\sqrt{3}V_s \cos(\omega t) \end{cases} \quad (4)$$

En utilisant les équations (1) et (4), nous obtenons l'expression suivante pour les puissances réelle et imaginaire :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

Si nous voulons compenser simultanément les harmoniques de courant et l'énergie réactive les courants deviennent :

$$\begin{bmatrix} i_{fa}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \\ i_{fo}^{ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta & 0 \\ v_\beta & v_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & v_\alpha^2 + v_\beta^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ p_o \end{bmatrix} \quad (6)$$

Ainsi, après le choix des paramètres de commande, il est aisé de remonter aux courants de référence par la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} i_{aref} \\ i_{bref} \\ i_{cref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fo}^{ref} \\ i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Le courant i_{nref} égal a :

$$i_{nref} = i_{aref} + i_{bref} + i_{cref} \quad (8)$$

IV. APPLICATION DU CONTROLE MLI A LA COMMANDE DU FILTRE ACTIF

Dans la commande de l'onduleur par la technique MLI, un régulateur PI, à partir de la différence entre les deux courants (injecter et identifier) détermine la tension de référence (onde modulante) nécessaire pour générer le courant du filtre demandé, et ensuite déduire les ordres de commutation des interrupteurs.

La commande d'un bras de l'onduleur est résumée comme suit [6]:

- Détermination du signal intermédiaire V_{i1} et V_{i2} .

If $error \geq V_{car1} \Rightarrow V_{i1} = 1$
 else $V_{i1} = 0$

If $error \geq V_{car2} \Rightarrow V_{i2} = 0$
 else $V_{i2} = -1$

- Détermination des ordres de commutation des interrupteurs T_{ij} ($j = 1, 2, 3, 4$).

If $V_{i1} + V_{i2} = 1 \Rightarrow T_{i1} = 1, T_{i2} = 1, T_{i3} = 0, T_{i4} = 0$

If $V_{i1} + V_{i2} = 0 \Rightarrow T_{i1} = 0, T_{i2} = 1, T_{i3} = 1, T_{i4} = 0$

If $V_{i1} + V_{i2} = -1 \Rightarrow T_{i1} = 0, T_{i2} = 0, T_{i3} = 1, T_{i4} = 1$

La Fig.3 explique le diagramme général de la commande du filtre actif.

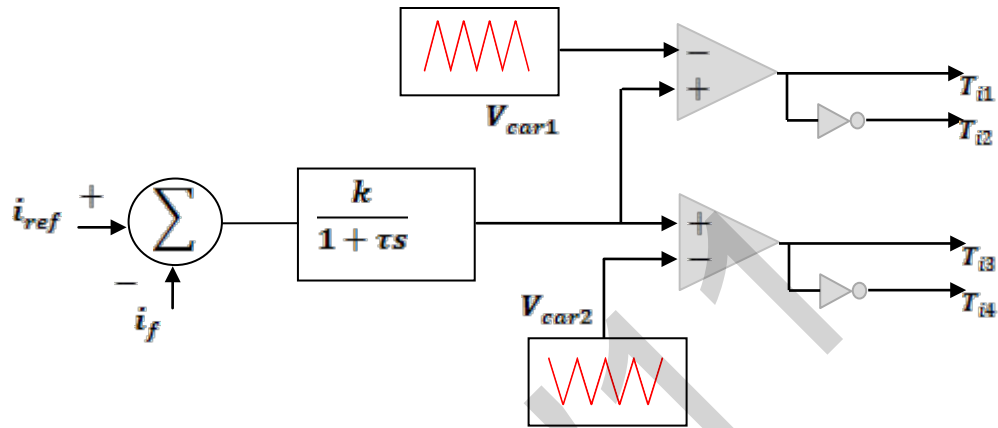


Fig.3 Schéma de commande MLI des courants.

III. SIMULATION NUMERIQUE

Pour les simulations, notre choix s'est porté sur le code numérique MATLAB/SIMULINK (*Mathworks*). Ce logiciel n'est plus à présenter, puisqu'il est très renommé pour la simulation et la modélisation par blocs fonctionnels. Par contre, ce logiciel est moins utilisé pour la simulation des réseaux électriques. Ceci est rendu possible grâce à la Toolbox PowerBlockset permettant de gérer la simulation des réseaux électriques.

Dans un premier temps, nous avons défini les paramètres d'un réseau électrique triphasé à quatre fils et de ses trois charges non-linéaires, des ponts redresseurs monophasés alimentant chacun une charge RC.

Pour terminer, nous allons présenter les résultats des simulations du système complet " filtre actif de puissance - réseau électrique - charges non-linéaires "

A. Les paramètres du système à traiter

Nous nous sommes intéressés dans ce paragraphe à l'étude du système présenté sur la fig. 4.

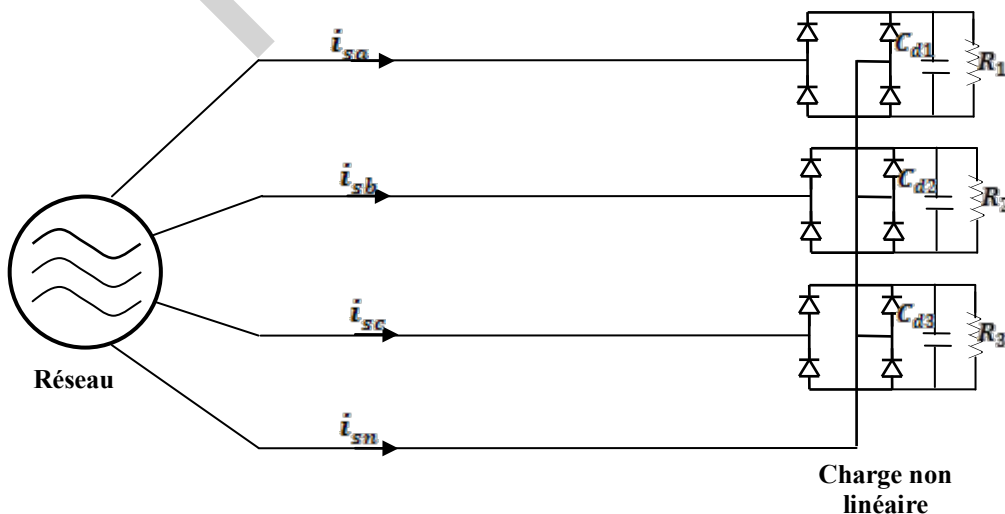


Fig.4 Schéma d'un réseau triphasé à quatre fils alimentant trois charges non linéaires.

Le Tableau 2 présente les éléments de ce schéma pour le cas des charges déséquilibrées

TABLE 2
PARAMETRES DU SYSTEME A TRAITER

Réseau: V_s, r_s, L_s	220V, 0.1 Ω , 0.6mH
Charge: R_1, R_2, R_3 $C_{d1} = C_{d2} = C_{d3}$	20 Ω , 40 Ω , 40 Ω 5 μ F
Filtre actif v_{dc}, L_f	500V, 0.1mH

Les deux figures suivantes illustrent les courants de ligne des trois phases et uniquement le spectre harmonique de la phase a, ainsi que le courant du neutre et son spectre harmonique.

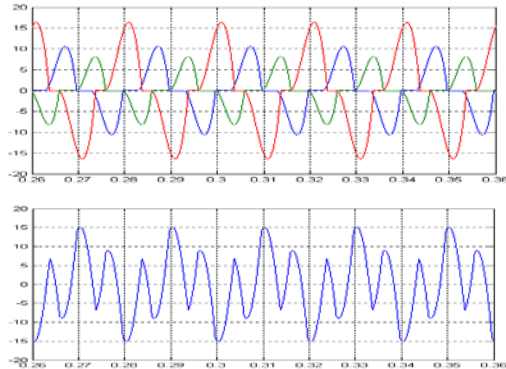


Fig.5 Courants générés par la charge non-linéaire de type RC.

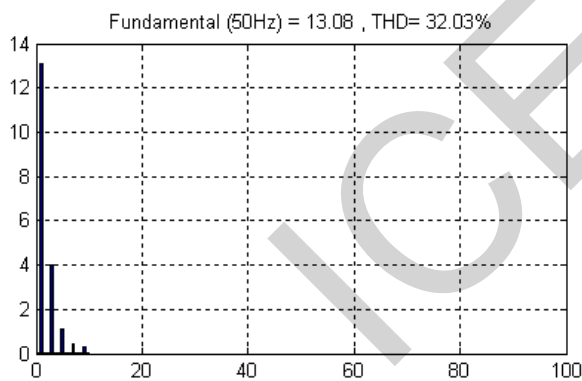


Fig.6 Le spectre harmonique de la phase a.

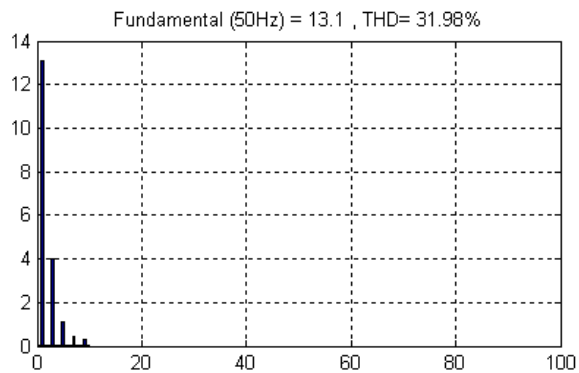


Fig.7 le spectre harmonique de la phase N

B. Simulation de l'ensemble réseau - charge non-linéaire – filtre actif de puissance

Nous effectuons des simulations dans un environnement comprenant le réseau électrique et la charge polluante. Le filtre actif est connecté au réseau à partir de 0.1s, tous modélisés sous *Matlab/Simulink* avec le *Power System Blockset*.

Les figures (8-12) illustre les résultats de simulations obtenus lorsque nous utilisons les commandes **p-q-o** appliquées à un filtre actif de puissance à quatre bras afin de compenser un réseau électrique équilibré.

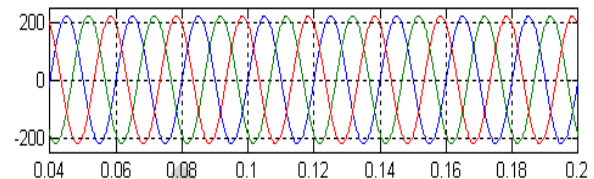


Fig.8 Les Tensions de source

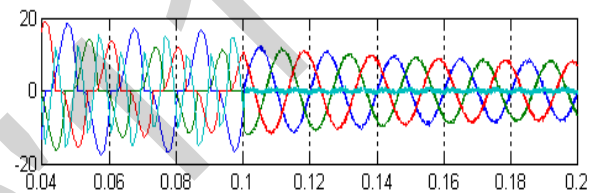


Fig.9 Les courants de source avant et après compensation

Fundamental (50Hz) = 7.99 , THD= 2.84%

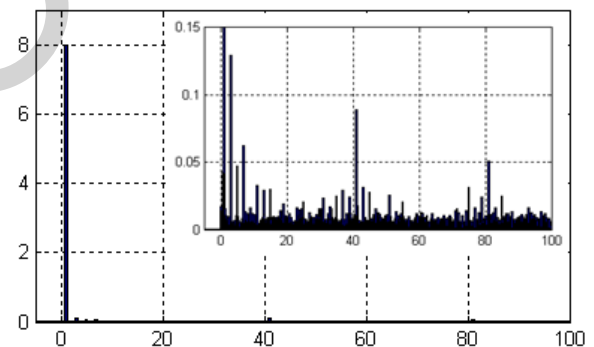


Fig.10 Le spectre harmonique de la phase a.

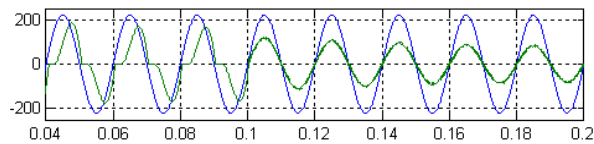


Fig.11 le facteur de puissance (v_s $10 \times i_s$).

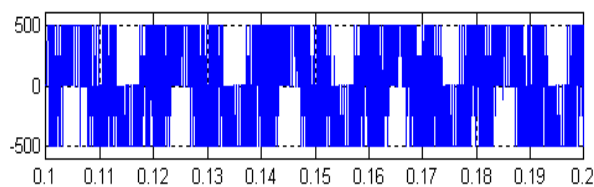


Fig.12 La Tension $v_{f_{dc}}$.

D'après les résultats de simulation obtenus sur les figures (8-12) on remarque que :

- Les courants de source après compensation sont quasi sinusoïdaux et en phases avec les tensions aux points de raccordement. Ainsi le facteur de puissance est unitaire.
- Le taux de distorsion harmonique (THD) du courant de source (calculé sur les 30 premiers rangs harmoniques) qui était 32.03% avant le filtrage est 2.84%

Les simulations suivantes permettent d'étudier la robustesse de la PLL. Seul le cas le plus défavorable, à savoir le déséquilibre de tension sera étudié. Donc :

$$v_{s1} = 220\sqrt{2}, v_{s2} = 180\sqrt{2}, v_{s3} = 140\sqrt{2}$$

Les autres éléments restent inchangés

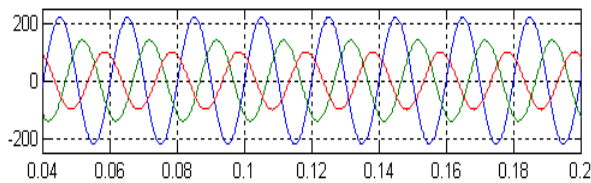


Fig.13 Les Tensions de source

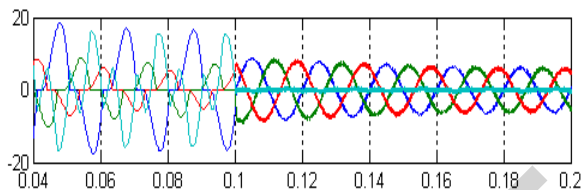


Fig.14 Les courants de source avant et après compensation

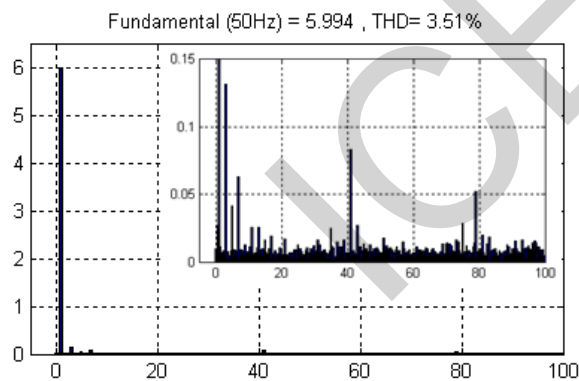


Fig.15 Le spectre harmonique de la phase a.

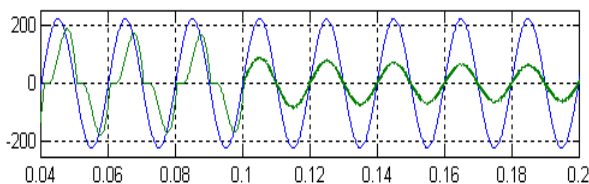


Fig.16 le facteur de puissance ($v_s, 10 * i_s$).

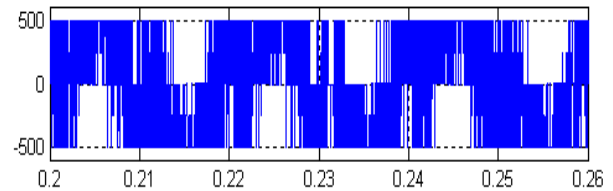


Fig.17 La Tension v_{fan} .

D'après les résultats de simulation obtenus sur les (13-17) on remarque que :

- Les courants de source après compensation sont quasi sinusoïdaux et en phases avec les tensions aux points de raccordement. Ainsi le facteur de puissance est unitaire.
- Le taux de distorsion harmonique (THD) du courant de source (calculé sur les 30 premiers rangs harmoniques) qui était 32.03% avant le filtrage est 3.51%

IV. CONCLUSION

Les résultats de simulation pour la stratégie de commande **pqo** appliquée à la topologie de filtre trois niveau à quatre bras montre que le filtre actif donne des résultats satisfaisants. Du point de vue THD, Cette méthode donne un taux de distorsion harmonique $THD < 5\%$, qui répond aux normes internationales.

REFERENCES

- [1] C. A. Quinn, N. Mohan, "Active filtering of harmonic currents in three-phase, four-wire systems with three-phase, single-phase nonlinear loads," Proc. IEEE APEC'92, 1992, pp829-836
- [2] H. Kim, F. Blaabjerg, B. B-Jensen and J. Choi, "Instantaneous Power Compensation in Three-Phase systems by Using **pqr** theory," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 17, No. 5, July 2002
- [3] M. C. Benhabib and S. Saadate, "New control approach for four-wire active power filter based on the use of synchronous reference frame," Electric Power Systems Research, 2004
- [4] O. Vodyakho and T. Kim, "Shunt active filter based on three-level inverter for three-phase four-wire systems," IET Power Electron., Vol. 2, Iss. 3, pp. 216-226, 2009
- [5] H. S. Kim and H. Akagi, "The instantaneous power theory on the rotating **pqr** reference frame," in Proc. IEEE/PEDS'99 conf., Hong Kong, July 1999, pp. 422-427
- [6] L. Zellouma and S. Saad, "Three-Phase Three-Level Shunt Active Power Filter," 2nd International Conference on Electrical and Electronics Engineering ICEEE'08, 21-23 April 2008