

Compensation Harmoniques à Base d'une Régulation Adaptative d'un Filtre Actif Parallèle

A. Boukadoum¹, T. Bahi¹, S. Oudina²

Département d'Electrotechnique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Laboratoire d'Automatique et Signaux- Annaba (LASA)

¹ Université Badji Mokhtar – Annaba, B.P. 23000 Algérie

² Université 20 Août 1955 – Skikda, .B.P. 21000 Algérie

E-mail: azizboukadoum@yahoo.fr

Résumé: L'utilisation des convertisseurs statiques dans les installations de conversion de l'énergie électrique a contribué considérablement à l'amélioration des performances et à la fiabilité des fonctionnements de ces installations. En revanche, à cause de leur nature non linéaire ; ils sont la cause principale de la détérioration de la qualité de l'énergie électrique. Puisque, la réglementation internationale en matière énergétique exige aux consommateurs le respect des normes aux harmoniques, le filtrage des composantes harmoniques est devenu alors une préoccupation major pour les distributeurs et les utilisateurs de cette énergie.

Ceci étant, l'objectif de cette contribution, consiste essentiellement, à utiliser un filtre actif parallèle pour compenser les harmoniques, tout en assurant un réglage adaptatif de sa tension d'alimentation afin d'améliorer ses performances de filtrage. Les résultats obtenus par simulations montrent l'efficacité et l'amélioration des performances du réglage adopté pour la tension d'alimentation. Les formes des courants de la source, ont été bien améliorées.

Introduction

La dépollution du réseau électrique et le maintien d'une tension désirée au point de raccordement, quelque soit le courant absorbé par la charge non linéaire, sont assurés grâce à une structure de filtre actif parallèle (FAP). Ce dernier est alimenté par une tension continue délivrée par un condensateur jouant le rôle d'une source de tension continue [1]. Puisque, la compensation des harmoniques influe incontestablement sur la tension à l'entrée du filtre, une telle structure sans le réglage de la tension d'entrée est restée peu performante car cette tension doit être maintenue constante afin de ne pas dégrader la qualité du filtrage et dépasser la limite en tension des semi-conducteurs. La cause principale de la variation de cette tension est la variation de la charge polluante, qui crée un échange de puissance active avec le réseau d'où la nécessité du réglage de cette tension.

A cet effet, nous avons utilisé un régulateur Proportionnel Integral (PI) adaptatif qui grâce à l'adaptation de ses paramètres, agit efficacement contre les fluctuations et les ondulations de la tension d'alimentation, tout en améliorant considérablement la forme du courant de la source.

Structure d'un Filtre Actif

La figure 1, montre le schéma de connexion d'un FAP au réseau électrique. Elle montre la partie puissance (onduleur à IGBT plus le filtre de sortie) et le bloc de commande.

Le principe de la compensation harmoniques consiste à ce que le filtre actif génère des courants ayant les mêmes amplitudes que celles des courants du réseau, qui seront injectés aux points de raccordement avec le réseau. Dans ce travail les courants harmoniques sont identifiés par la méthode des puissances instantanée réelle et imaginaire [2][3].

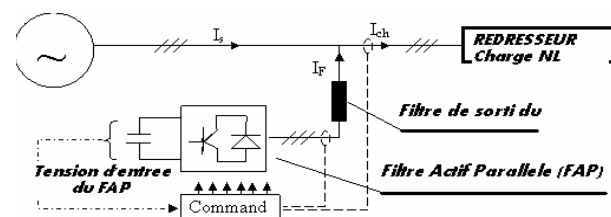


Figure 1: Schéma de principe

Modélisation du Filtre Actif Parallèle

Avant d'entamer les parties relatives à la régulation et la commande du filtre, on établit un bilan de puissances [4], à partir duquel on déduit la modélisation de l'échange de puissance active entre le réseau, la charge non-linéaire et le filtre actif.

En supposant que la puissance de court-circuit du réseau électrique soit infinie, les expressions des courants et tensions instantanées des trois phases du réseau sont données par les expressions suivantes:

$$\begin{cases} v_{s1}(t) = \sqrt{2}v_{eff} \sin(\omega t) \\ v_{s2}(t) = \sqrt{2}v_{eff} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_{s3}(t) = \sqrt{2}v_{eff} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} i_{s1}(t) = \sqrt{2}i_{eff} \sin(\omega t - \varphi_h) \\ i_{s2}(t) = \sqrt{2}i_{eff} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi_h) \\ i_{s3}(t) = \sqrt{2}i_{eff} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \varphi_h) \end{cases} \quad (2)$$

La puissance instantanée fournie par la source à la charge est :

$$p_s(t) = v_{s1}(t) \cdot i_{s1}(t) + v_{s2}(t) \cdot i_{s2}(t) + v_{s3}(t) \cdot i_{s3}(t) \quad (3)$$

La composante continue de $p_{sc}(t)$ est donnée :

$$p_{sc}(t) = 3v_s \cdot i_s \quad (4)$$

La puissance absorbée par la charge non-linéaire est:

$$p_{ch}(t) = v_{s1}(t) \cdot i_{ch1}(t) + v_{s2}(t) \cdot i_{ch2}(t) + v_{s3}(t) \cdot i_{ch3}(t) \quad (5)$$

Elle contient deux composantes: une composante continue (P_{chc}), relative à la puissance active consommée par la charge.

$$P_{chc} = 3v_s i_{c1} \cos\varphi_1 \quad (6)$$

Et, une autre ($p_{chalt}(t)$), qui est la somme des puissances fluctuantes, créées par les composantes harmoniques des courants de charge.

$$\tilde{p}_{chalt}(t) = \sum_{h=1}^{\infty} 3v_s i_{kh} \cos(6h\omega t - \varphi_{6h}) \quad (7)$$

Alors,

$$p_{ch}(t) = p_{chc} + \tilde{p}_{chalt}(t) \quad (8)$$

La puissance instantanée $p_f(t)$ injectée par le filtre

$$\text{est donnée par : } p_f(t) = p_f(t) - \tilde{p}_f(t) \quad (9)$$

Où :

$$p_f(t) = p_{chc}(t) - p_{sc}(t) \quad (10)$$

Et :

$$\tilde{p}_f(t) = \tilde{p}_{chalt}(t) \quad (11)$$

L'équation (11) montre l'échange de la puissance active entre la charge polluante avec le réseau et le filtre actif, durant le régime transitoire [5]. Ce transfert de puissance se traduit par une variation de la tension continue aux bornes du condensateur. Donc, pour réduire l'influence de la technique de compensation sur la tension d'entrée du filtre, on doit penser à assurer un réglage de celle-ci afin que l'équilibre de la puissance soit rapidement rétabli.

La puissance harmonique $\tilde{p}_f(t)$ à la sortie du compensateur, sera ajoutée à la puissance harmonique de la charge $\tilde{p}_{chalt}(t)$.

Cette puissance harmonique est échangée en régime transitoire et en régime permanent, elle dépend du rang et de l'amplitude des courants harmoniques. Dans le condensateur cette puissance est présente sous forme d'ondulations de tension.

La tension de la capacité du condensateur peut être décomposée en deux parties : continue et discrète.

$$v_c(t) = v_c + \bar{v}_c(t) \quad (12)$$

La puissance harmonique $\tilde{p}_f(t)$ générée, est égale à la puissance du filtre actif coté continu :

$$\tilde{p}_f(t) = \tilde{p}_{ch}(t) = v_c(t) i_{ond}(t) \quad (13)$$

On admet que la valeur de la capacité est suffisamment importante, pour négliger les ondulations de la tension, devant la tension continue. On a alors,

$$i_{ond}(t) = \frac{\tilde{p}_{chalt}(t)}{v_c} \quad (14)$$

Finalement, L'expression des ondulations de la tension en fonction du courant $i_{ond}(t)$ est :

$$\bar{v}_c(t) = \frac{1}{C_f} \int_0^t i_{ond}(t) dt \quad (15)$$

Donc,

$$\bar{v}_c(t) = \left[\frac{1}{C_f V_c} \right] \sum \left(\frac{P_{6h}}{6h\omega} \right) \sin(6h\omega t - \varphi_{6h}) \quad (16)$$

Rappelant que les amplitudes des courants harmoniques influents sur les ondulations de la tension, et que le choix de la capacité en dépendant [5].

Régulation et Stabilité de la Tension

Pour assurer la régulation et la stabilité de la tension continue du filtre actif parallèle, nous avons choisi un régulateur Proportionnel Intégral adaptatif. En régime permanent, les courants de références ne contiennent pas de composantes fondamentales ce qui ne cause pas d'erreur statique de la tension aux bornes du condensateur et la puissance nécessaire pour compenser les pertes est faible. Le signal correspondant à cette puissance peut être généré par le régulateur à partir de l'écart entre la grandeur de référence (v_c^*) et celle mesurée (v_c), selon le principe le schéma fonctionnel de la régulation de la tension continue. En négligeant les pertes de commutation dans l'onduleur et l'énergie stockée dans les inductances de stockage, le schéma fonctionnel de la régulation de la tension continue à l'entrée du FAP est représenté par la figure 2.

La tension au borne du condensateur peut s'écrire sous la forme:

$$p_{ch}(t) = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} c_f \cdot v_c^2 \right) \quad (17)$$

Cette fonction est non linéaire.

Pour des faibles variations de la tension v_c autour de sa référence v_c^* , elle peut être linéarisée à travers les relations suivantes :

$$p_{ch}(t) = \frac{1}{2} c_f \cdot \frac{d}{dt} (v_c) \quad (18)$$

Après la transformation de Laplace :

$$v_c(s) = \frac{p_{ch}(s)}{v_c^* \cdot c_f \cdot s} \quad (19)$$

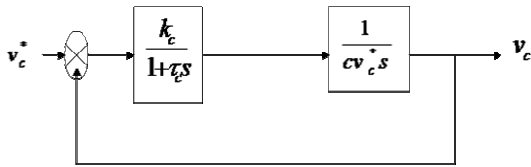


Figure 2: Bloc fonctionnel de régulation

Soit , la fonction de transfert du régulateur de la forme suivante :

$$h_c(s) = \frac{k_c}{1 + \tau_c s} \quad (20)$$

Où , k_c et τ_c sont respectivement son gain de tension et sa constante de temps.

Sous forme standard, la fonction de transfert en boucle fermée est

$$F_c(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2 \xi_c s + \omega_c^2} \quad (21)$$

Avec :

$$\omega_c = \sqrt{\frac{k_c}{c v_c^* \tau_c}} \quad (22)$$

et

$$\xi_c = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{c v_c^*}{k_c \tau_c}} \quad (23)$$

La qualité de la régulation dépendra du choix de la fréquence de coupure ω_c qui doit être assez élevée pour assurer une bonne dynamique lors des régimes transitoires de la charge [6].

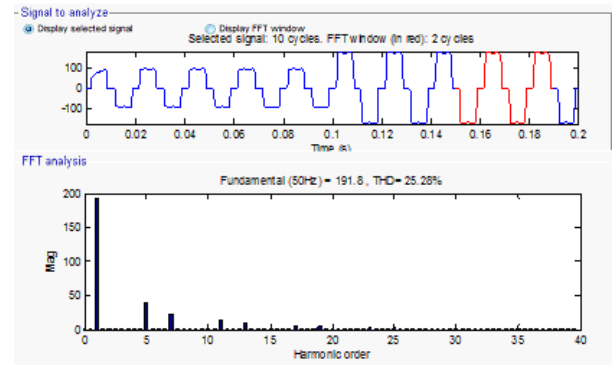
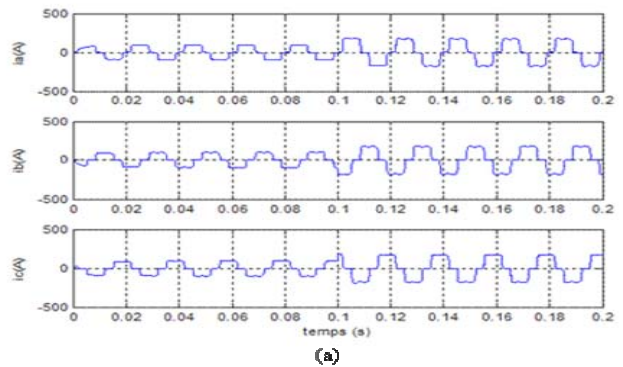
Les performances dynamiques du réglage de la tension continue sont liées aux choix du régulateur.

Simulation et Discussion des Résultats

Les simulations sont réalisées en utilisant le logiciel MATLAB / Simulink. Le réseau d'alimentation est

modélisé par trois tensions sinusoïdales raccordées à un redresseur à diodes qui débite dans une charge RL (charge polluante). Les paramètres du filtre actif sont choisis en respectant les critères de choix suivants [7] : Choix de la tension d'alimentation du filtre actif $v_c(t)$, la tension d'alimentation du filtre actif, plus on la prend grande, plus les harmoniques sont atténuées, jusqu'à la valeur $v_c=840V$, à partir de laquelle les harmoniques ne sont plus atténuées. Cette tension, doit être supérieure ou égale à la tension redressée maximum $v_{cmon} = \sqrt{6} v_s$ [5][8]. Elle doit aussi, être inférieure à une limite maximale v_{cmax} , qui définit la limitation physique des semi-conducteurs de puissance.

La partie validation par simulation a consistée à faire trois types de relevées des courants de la source tout en analysant pour chaque courant son spectre harmonique. Pour le premier cas, nous avons considéré la source et la charge non linéaire seulement (sans filtre). Les résultats des courants des trois phases ainsi que l'analyse spectrale du courant de la phase_a sont représentés par la figure 3. On remarque, que les courants sont de formes non sinusoïdales donc source d'harmoniques (figure.3.a.). L'analyse fréquentielle du courant, montre l'appariation des harmoniques d'ordre $6k \pm 1$ (voir figure 3.b.). L'intérêt de la compensation consiste donc à utiliser un filtre actif de type parallèle pour la compensation de ces harmoniques. Les figures précédentes montrent aussi, l'évolution des courants lorsqu'on fait varier la charge à l'instant 0.1 seconde.



-b-

Figure 3: Courants de source et spectre de la phase_a

Pour le deuxième essai, nous avons inséré le filtre mais sans la régulation de la tension d'alimentation. Les résultats sont montrés par la figure 4, on remarque que les harmoniques sont bien éliminés et que le THD=4.15%. Toutefois, on note encore quelque distorsion des courants. Et, que lorsque la charge varie, la tension d'alimentation varie aussi (figure.4.c), ce qui exige son contrôle pour rendre la stucture FAP plus performante.

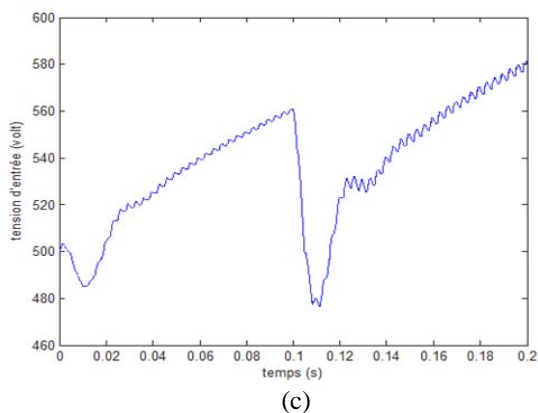
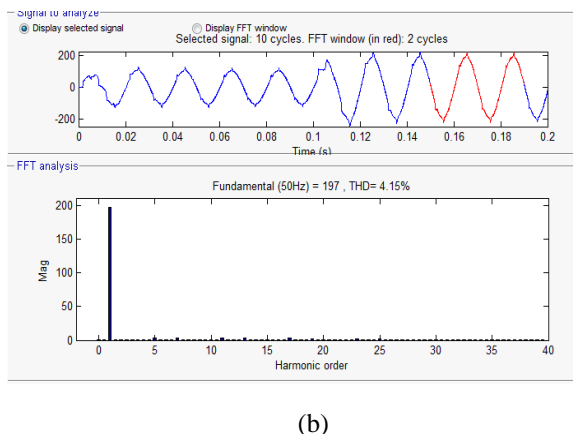
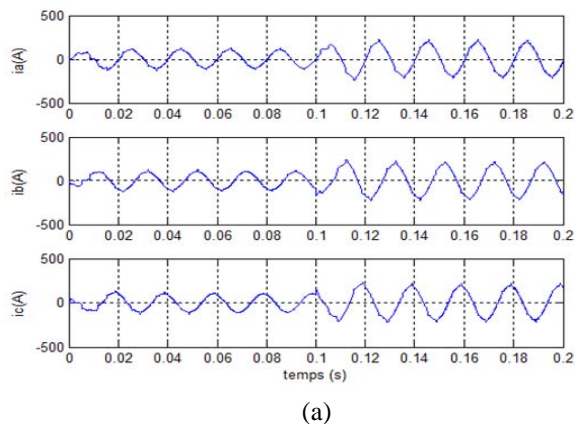


Figure 4: Courants et spectre (sans régulation)

Dans cet objectif, nous avons assuré la régulation de cette tension grâce à une régulation PI adaptatif. Les résultats que nous avons relevés dans les mêmes conditions des essais précédents sont représentés par les figures. 5 a, b, c . On voit clairement sur les figure 5a que les formes des courants se sont améliorées (voir la figure 5b :THD=0.74%) et que la tension d'alimentation est forcée à gardée sa valeur (voir figure.5.c).

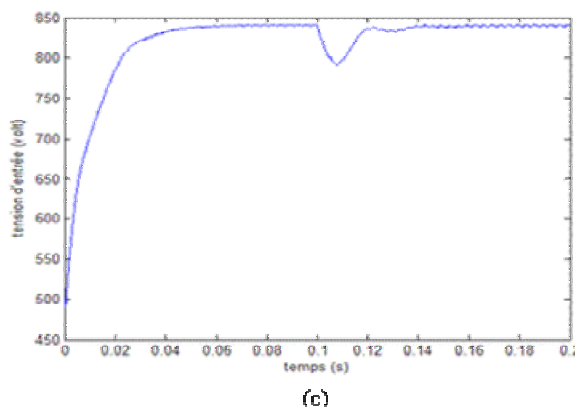
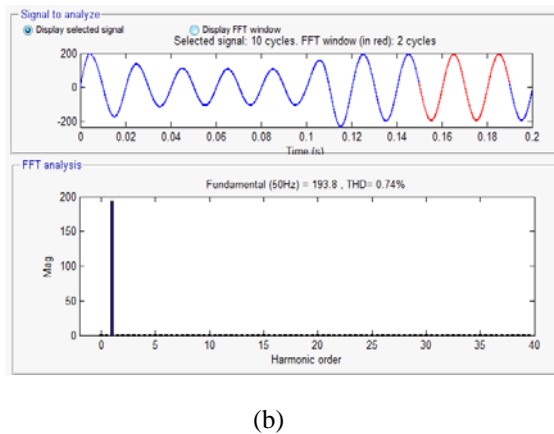
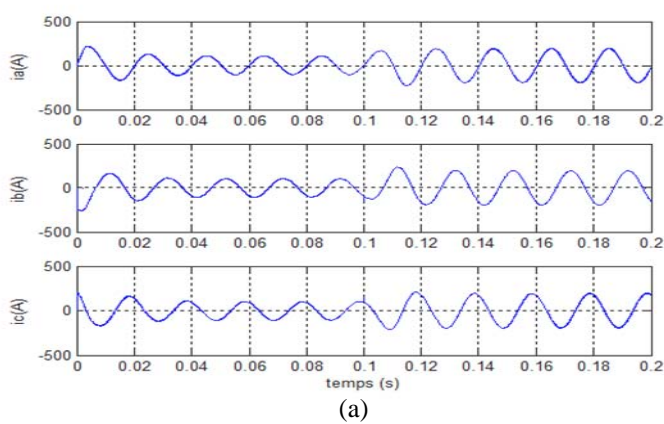


Figure 5: Courants et spectre (avec régulation)

Conclusion

Les performances de compensation dépendent de l'efficacité du filtre actif qui réside essentiellement de la technique de commande proposée et la régulation adaptative de la tension continue qui alimente celui-ci. Afin d'améliorer les résultats de simulation un régulateur PI adaptatif a été utilisé. Grâce à la propriété d'adaptation de la valeur du gain du régulateur, on a pu assurer des courants sinusoïdaux et une tension stable quelque soit la variation de la charge. Il permet aussi de limiter les fluctuations de tension, avec une bonne atténuation des ondulations de tension.

Références

- [1] A. Boukadoum " Contribution à l'analyse et la réduction de la pollution harmonique dans le réseau électrique". Mémoire de magister, département d'électrotechnique, Université de Annaba, 2007.
- [2] A. Boukadoum, T. Bahi, " Modélisation et simulation de la compensation harmonique ", 1^{ère} Journées Internationales de physique des Matériaux et ses Applications, JIPMA'07, Département de physique, Université de Annaba, 25-26-27 Novembre 2007.
- [3] M. A. E. Alali, « Contribution à l'Etude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension » , Thèse de doctorat, université de Louis Pasteur ,Strasbourg , septembre 2002
- [4] X. Wang, J. Liu, C. Yuan, and Zhaoan Wang « A Novel Voltage- Mode Control of Parallel Active Power Filter » ,School of Electrical Engineering Xi'an Jiaotong University, China IEEE 2006.
- [5] T. Benmiloud. A. Omari « Régulation de la tension d'alimentation du filtre actif parallèle par PI adaptatif »,Faculté de Génie Electrique, Dépt d'Electrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran. CIP' 03-04 Nov 2007.
- [6] M. E. Ortúzar, R. E. Carmi, J. W. Dixon, & L. Morán, "Voltage-Source Active Power Filter Based on Multilevel Converter and Ultracapacitor DC Link", IEEE Trans. Ind. Electron. April 2006.
- [7] F. Richardeau, N.Aouada, T. Meynard, "Convertisseur de rééquilibrage de la tension d'un réseau " , J Phys. III France 7, 1997, pp 1677-1699.
- [8] H. Djeghloud, « Filtrage actif de puissance type parallèle à trois niveaux », Université Mentouri de Constantine », 2002.