

Dépollution harmonique des réseaux électriques : Etude comparative des commandes, par Modulation de Largeur d'Impulsion et par Hystérésis, des filtres actifs shunts triphasés

[Clean-up of electrical grid harmonic : A comparative study of the control of three-phase shunts active filters, by Pulse Width Modulation and by Hysteresis]

Mamane Adamou¹, Nabil Alkassoum¹, André Foulani¹, and Amadou Seidou Maiga²

¹Laboratoire d'Automatique, d'Electronique, d'Electrotechnique et d'Informatique Industrielle et d'Energie Renouvelable (LA2EI-ER), Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger

²Laboratoire d'Electronique, Informatique Télécommunications et d'Energies Renouvelables (LEITER), Université Gaston Berger, Saint-Louis, Senegal

Copyright © 2020 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Increasing of consumer electronic devices (TVs, computers) and industrial electronic devices (variable speed drives, high efficiency lighting), use on electrical networks, generate pollution through harmonic currents and voltage. The active three-phase shunt filter is a modern solution of decontamination of three-phase power systems. A good clean-up requires a good design of the active filter and a good control. Indeed, the capacity and adaptability of the active filter lies in the quality of the inverter switch of. In this paper, a comparative study of the command by pulse width modulation (PWM) and hysteresis, of a cross over three-phase shunt with voltage structure is performed. The study shows that the command by hysteresis gives best results with regard to the reduction of harmonic pollution and the quality of the network.

KEYWORDS: Three-phase network; Harmonic pollution, PWM control, Hysteresis control.

RÉSUMÉ: L'utilisation croissante sur les réseaux électriques, d'appareils électroniques grand public (téléviseurs, ordinateurs) et les appareils électroniques industriels (variateurs de vitesse, éclairage à haute efficacité), engendrent une pollution de ces réseaux à travers des courants et tension harmoniques. Le filtre actif shunt triphasé est une solution moderne de dépollution des réseaux électriques triphasés. Une bonne dépollution nécessite un bon dimensionnement du filtre actif et une bonne commande. En effet, la capacité et l'adaptabilité du filtre réside dans la qualité de la commande des interrupteurs de l'onduleur le constituant. Dans cet article, une étude comparative des commandes par modulation de largeur d'impulsion (MLI) et par hystérésis, d'un filtre actif shunt triphasé à structure de tension est réalisée. L'étude montre que la commande par hystérésis donne de meilleurs résultats en ce qui concerne la réduction de la pollution harmonique, donc la qualité du réseau.

MOTS-CLEFS: Réseau triphasé ; pollution harmonique ; adaptabilité de filtre ; Hystérésis.

1 INTRODUCTION

L'avènement des composants semi-conducteur a facilité l'alimentation des appareils domestiques et industriels en énergie électrique à l'aide des convertisseurs. Il est à noter cependant que l'utilisation croissante, sur les réseaux électriques, des

composants d'électronique de puissance n'est pas sans conséquence sur la qualité de l'énergie. En effet, le raccordement de charges non linéaires aux réseaux électriques provoque la pollution de ces derniers à travers les courants ou les tensions harmoniques. Les charges non linéaires consomment du courant non sinusoïdal et se comportent alors comme des générateurs d'harmoniques de la fréquence fondamentale (Figure 1).

Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 et 2000 Hz, soit de l'harmonique de rang 2 jusqu'à l'harmonique de rang 40, les amplitudes de ces harmoniques décroissant généralement avec la fréquence [1].

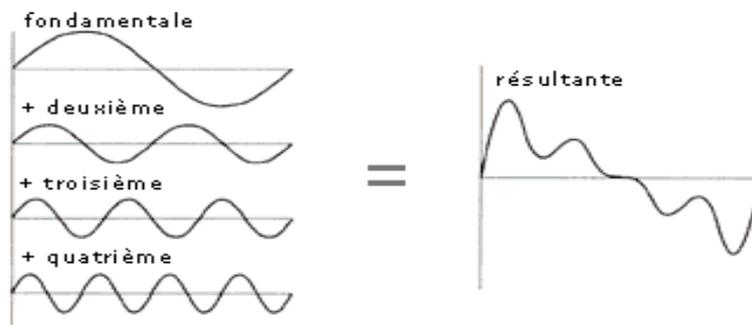


Fig. 1. Décomposition en harmoniques et forme de l'onde

Les harmoniques ont beaucoup d'effets sur les installations électriques [2,3] dont entre autres, l'échauffement et les défauts de fonctionnements de certains des équipements, l'interférence avec les réseaux de télécommunication, le risque d'excitation de résonance etc.

La dépollution des réseaux électrique par l'élimination des harmoniques a longtemps été une préoccupation de la recherche en électrotechnique et en électronique. Plusieurs solutions ont été proposées dont l'utilisation des filtres :

Passifs (figure 2 a) qui ont l'avantage d'une constitution simples et à moindre coût ; par contre ils ne sont pas toujours capables de répondre correctement à la dynamique des systèmes de distribution électrique et leur conception est fortement dépendante du système d'alimentation sur lequel il est connecté.

Actifs (figure 2 b), dont le principe consiste en l'injection dans le réseau pollué des courants ou des tensions harmoniques de même amplitude que les harmoniques pollueurs mais en opposition de phase avec celles-ci. Il existe plusieurs variantes de filtres actifs, le filtre actif série ou parallèle, monophasé ou triphasé, des combinaisons actif-actif appelées compensateurs universels et des combinaisons actif-passif appelées filtres hybrides.

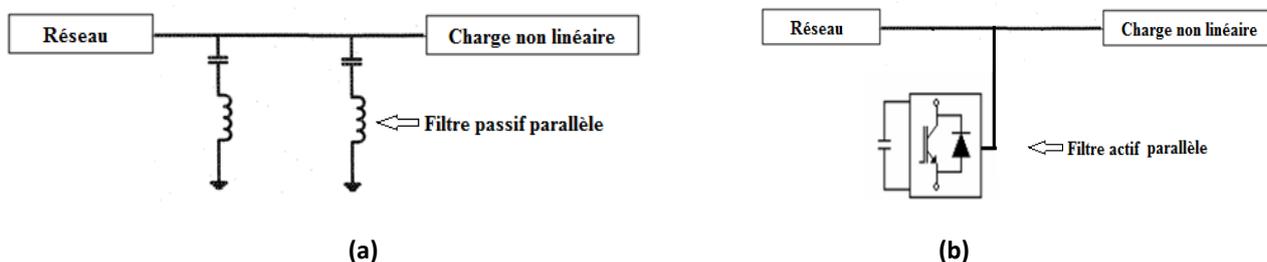


Fig. 2. Filtre parallèle en montage dépollueur d'harmonique (a) passif ; (b) actif

Le filtrage actif peut être monophasé ou triphasé selon que le réseau à dépolluer soit monophasé (réseaux domestiques) ou triphasé (réseaux industriels), à structure de tension ou de courant et selon que l'élément de stockage du filtre actif, capacitif ou inductif. Il peut aussi être en série ou parallèle (shunt) selon les harmoniques à éliminer (de tensions ou de courants respectivement).

L'objectif de cet article est de faire une étude comparative suivit de simulation, des commandes par MLI et par Hystérésis de l'onduleur d'un filtre actif shunt triphasé pour une application de dépollution harmonique.

La figure 3 décrit la structure générale du filtre actif shunt triphasé de type tension.

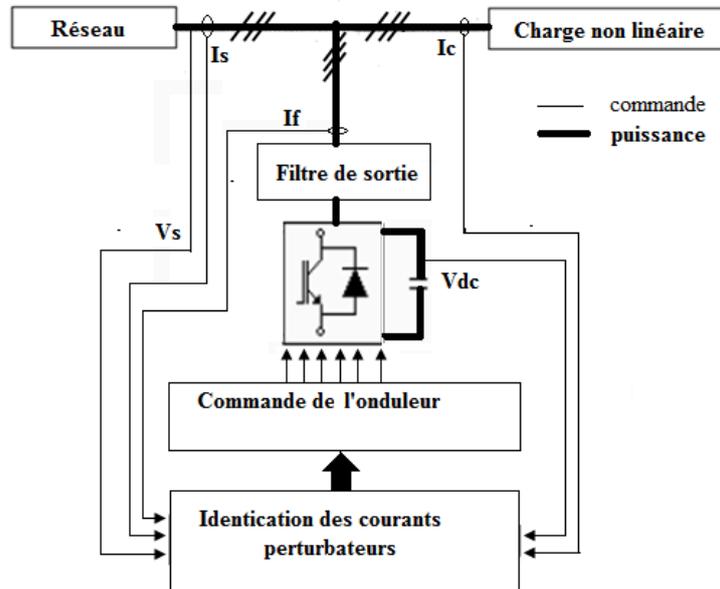


Fig. 3. Structure générale du filtre actif shunt triphasé de type tension

Il est constitué d'une partie puissance et une partie contrôle-commande. La partie puissance comprend généralement un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance commandables à l'amorçage et au blocage avec des diodes en antiparallèle, d'un circuit de stockage d'énergie (capacitif dans notre étude) et d'un filtre de sortie. Dans la partie contrôle-commande, il est d'abord effectué la recherche des courant de références qui seront ensuite utilisé pour la commande des d'interrupteurs de puissance du filtre actif [4].

2 MÉTHODE D'IDENTIFICATION DES COURANTS PERTURBATEURS

La méthode utilisée est la méthode tri-monophasée [5]. La figure 4 donne pour une des phases l'algorithme exécuté par la méthode tri-monophasée pour d'identification des courants perturbateurs. La structure de la source de tension est donnée figure 5. Les trois tensions fondamentales aux points de raccordement du filtre actif parallèle sont égales mais déphasées de $2\pi/3$.

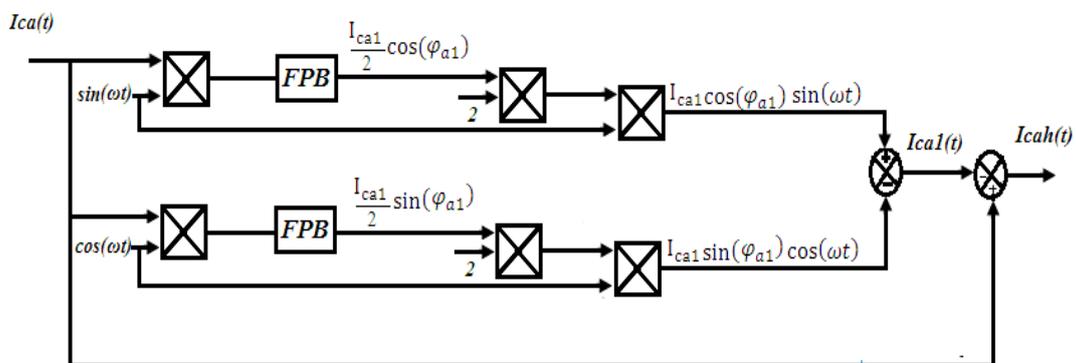


Fig. 4. Algorithme de la méthode de commande méthode tri-monophasé

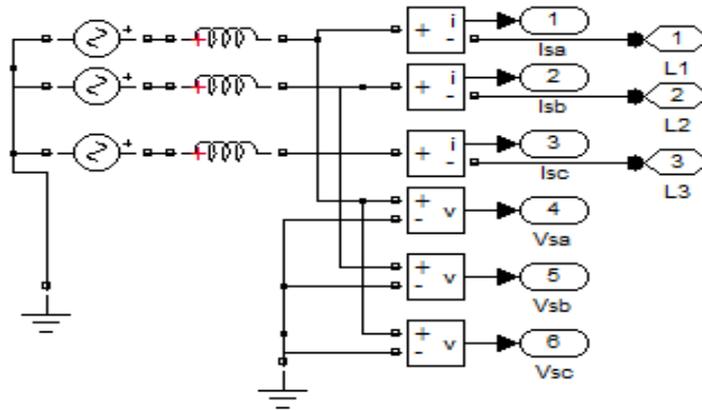


Fig. 5. Structure de la source de tension

Le principe de la méthode tri-monophasé est basé sur l'estimation de l'amplitude des composantes fondamentales active et réactive du courant (I_c) absorbé par la charge. Cette méthode applicable aux systèmes monophasés et triphasés permet de traiter les trois phases de manière indépendante.

Pour un courant I_c absorbé par la charge non linéaire, les composantes pour chaque phase sont données par les relations:

$$I_{ca}(t) = \sum_{k=1}^{+\infty} I_{cah} \sin(h\omega t - \varphi_{ak}) = I_{ca1} \sin(\omega t - \varphi_{a1}) + \sum_{k=2}^{+\infty} I_{cah} \sin(h\omega t - \varphi_{ak}) \quad (1)$$

$$I_{cb}(t) = \sum_{k=1}^{+\infty} I_{cah} \sin(h\omega t - \varphi_{bk}) = I_{cb1} \sin(\omega t - \varphi_{b1}) + \sum_{k=2}^{+\infty} I_{cah} \sin(h\omega t - \varphi_k) \quad (2)$$

$$I_{cc}(t) = \sum_{k=1}^{+\infty} I_{cah} \sin(h\omega t - \varphi_{ck}) = I_{cc1} \sin(\omega t - \varphi_{c1}) + \sum_{k=2}^{+\infty} I_{cah} \sin(h\omega t - \varphi_k) \quad (3)$$

Où $I_{ca1}, I_{cb1}, I_{cc1}$ représentent les amplitudes des courants de la fondamentale pour chaque phase et $\varphi_{a1}, \varphi_{b1}, \varphi_{c1}$ les déphases entre les courants de la fondamentale.

Une boucle à verrouillage de phase ou PLL (signification exacte) est utilisée pour calculer les pulsations fondamentales afin de ne pas avoir des courants perturbateurs erronés [6].

$$I_{ca}(t) \cdot \sin(\omega t) = I_{ca1} \sin(\omega t - \varphi_{a1}) \cdot \sin(\omega t) + \sin(\omega t) \cdot \sum_{k=2}^{+\infty} I_{cah} \sin(h\omega t - \varphi_{ak}) \quad (4)$$

$$I_{ca}(t) \cdot \cos(\omega t) = I_{ca1} \sin(\omega t - \varphi_{a1}) \cdot \cos(\omega t) + \cos(\omega t) \cdot \sum_{k=2}^{+\infty} I_{cah} \sin(h\omega t - \varphi_{ak}) \quad (5)$$

On obtient alors :

$$I_{ca1} \sin(\omega t - \varphi_{a1}) \cdot \sin(\omega t) = \frac{I_{ca1}}{2} [\cos(\varphi_{a1}) - \cos(2\omega t - \varphi_{a1})] + \sin(\omega t) \cdot \sum_{k=2}^{+\infty} I_{cah} \sin(h\omega t - \varphi_{ak}) \quad (6)$$

$$I_{ca1} \sin(\omega t - \varphi_{a1}) \cdot \cos(\omega t) = \frac{I_{ca1}}{2} [-\sin(\varphi_{a1}) + \sin(2\omega t - \varphi_{a1})] + \cos(\omega t) \cdot \sum_{k=2}^{+\infty} I_{cah} \sin(h\omega t - \varphi_{ak}) \quad (7)$$

D'après les relations (6) et (7) nous constatons que seules les composantes continues sont proportionnelles respectivement à l'amplitude du courant fondamental actif et à l'amplitude du courant fondamental réactif. Les premières composantes alternatives ont une fréquence égale à deux fois la fréquence réseau. Ces dernières seront donc filtrées à l'aide d'un filtre passe-bas dont la fréquence de coupure est relativement basse afin d'empêcher que l'ondulation basse fréquence ne se retrouve en sortie. Cependant, il est indisponible de respecter un bon compromis entre le filtrage efficace des fréquences parasites et une dynamique rapide de l'algorithme d'extraction. Après le filtrage on obtient les relations (8) et (9)

$$[I_{ca1} \sin(\omega t - \varphi_{a1}) \cdot \sin(\omega t)]_{\text{filtré}} = \frac{I_{ca1}}{2} \cos(\varphi_{a1}) \quad (8)$$

$$[I_{ca1} \cos(\omega t - \varphi_{a1}) \cdot \cos(\omega t)]_{\text{filtré}} = \frac{I_{ca1}}{2} \sin(\varphi_{a1}) \quad (9)$$

On peut alors reconstituer le courant fondamental $I_{ca1}(t)$ en multipliant les expressions (8) et (9) par 2 puis respectivement par $\sin(\omega t)$ et $\cos(\omega t)$:

$$I_{ca1}(t) = I_{ca1} \cos(\varphi_{a1}) \sin(\omega t) - I_{ca1} \sin(\varphi_{a1}) \cos(\omega t) \quad (10)$$

Et en fin les courants harmoniques $I_{cah}(t)$ sur la phase a sont obtenues en soustrayant le fondamental $I_{ca1}(t)$ du courant total $I_{ca}(t)$.

Une fois que les courants perturbateurs identifiés, la deuxième phase de la commande du filtre actif shunt consiste en la détermination des impulsions de ce dernier.

3 COMMANDE PAR HYSTÉRÉSIS DE L'ONDULEUR DU FILTRE ACTIF SHUNT TRIPHASÉ

La capacité et l'adaptabilité d'un filtre actif réside d'une bonne commande des interrupteurs de l'onduleur le constituant. La commande par hystérésis est une stratégie de commande convenable pour toutes les applications de contrôle du courant des redresseurs ou les besoins en performance sont de plus en plus recherchés en particulier pour le cas des onduleurs [3]. Son principe consiste principalement à maintenir chacun des courants générés dans une bande enveloppant les courants de référence et que chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation comme illustré à la figure 6.

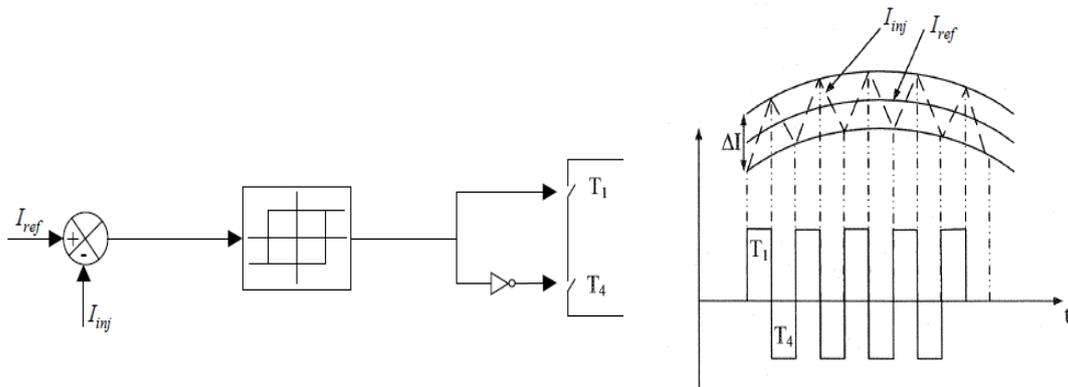


Fig. 6. Principe de commande par hystérésis

La structure de la commande des interrupteurs (T1, 2, 3, 4, 5, 6) du filtre actif shunt par hystérésis est donné par le schéma de la figure 7

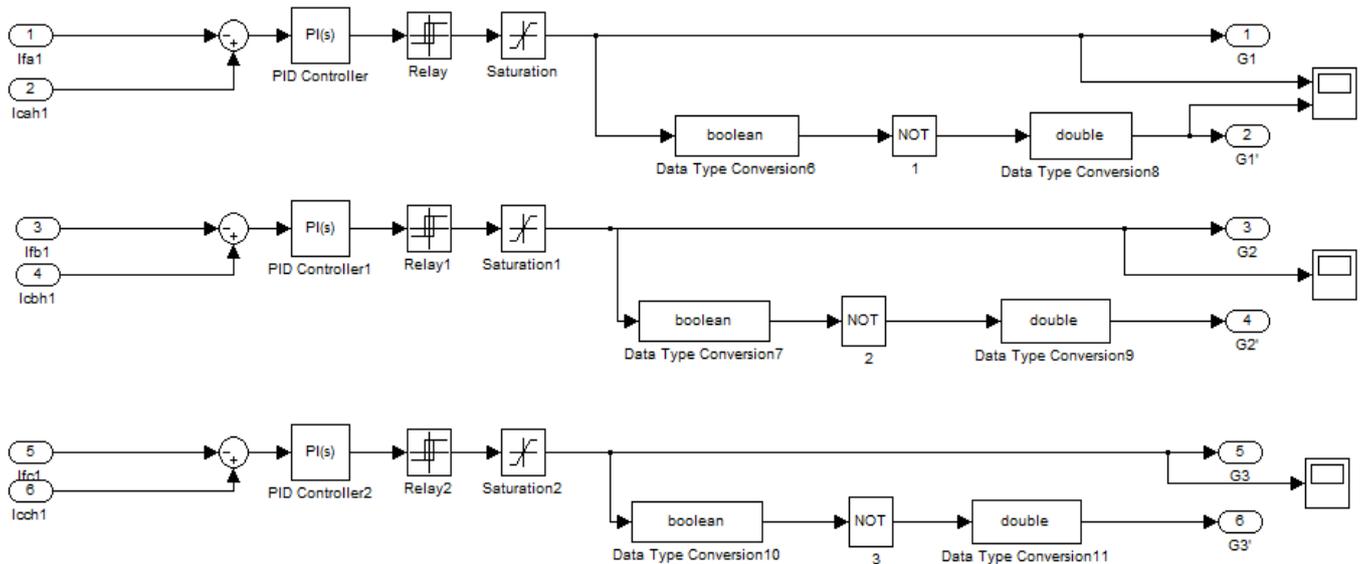


Fig. 7. Commande par hystérésis

4 COMMANDE PAR MLI DE L'ONDULEUR DU FILTRE ACTIF SHUNT TRIPHASÉ

Il existe plusieurs techniques de commande par MLI : la MLI à échantillonnage régulier symétrique où la référence est échantillonnée à chaque période de la porteuse, la MLI à échantillonnage régulier asymétrique où la référence est échantillonnée à la demi-période de la porteuse et la MLI à échantillonnage naturel [1], [4], [7].

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est la MLI à échantillonnage naturel. 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 appelé porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation. La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. La figure 8 indique le principe général de la génération des impulsions de commande par MLI.

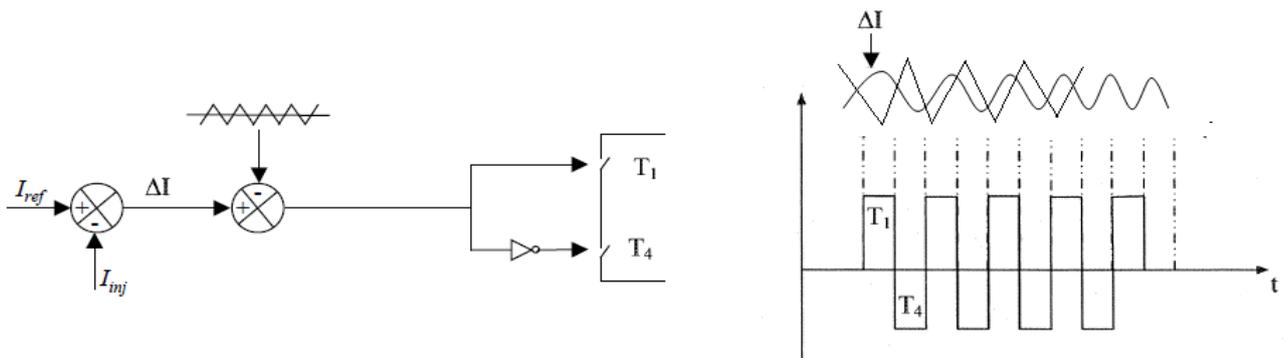


Fig. 8. Principe de commande par MLI

La structure de la commande des interrupteurs (T1, 2, 3, 4, 5, 6) du filtre actif shunt par MLI est donnée à la Figure 9.

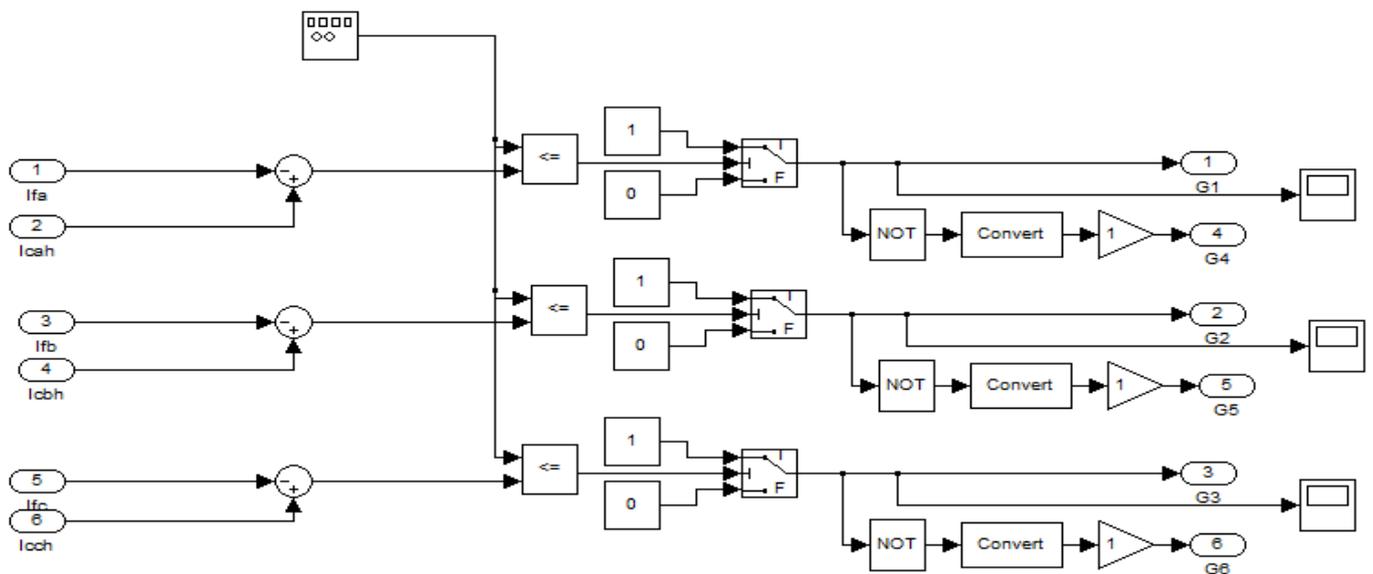


Fig. 9. Commande par MLI

5 RÉSULTATS DE SIMULATIONS

La structure générale du système étudié est donnée à la figure 10. Il est constitué :

- d'une source d'alimentation triphasée polluée,
- d'une charge non linéaire.
- d'un filtre actif shunt triphasé connecté en parallèle sur le réseau,
- d'un bloc de commande du filtre
- d'un block pour la détermination des courants perturbateurs
- d'un block pour la commande des interrupteurs de l'onduleur.

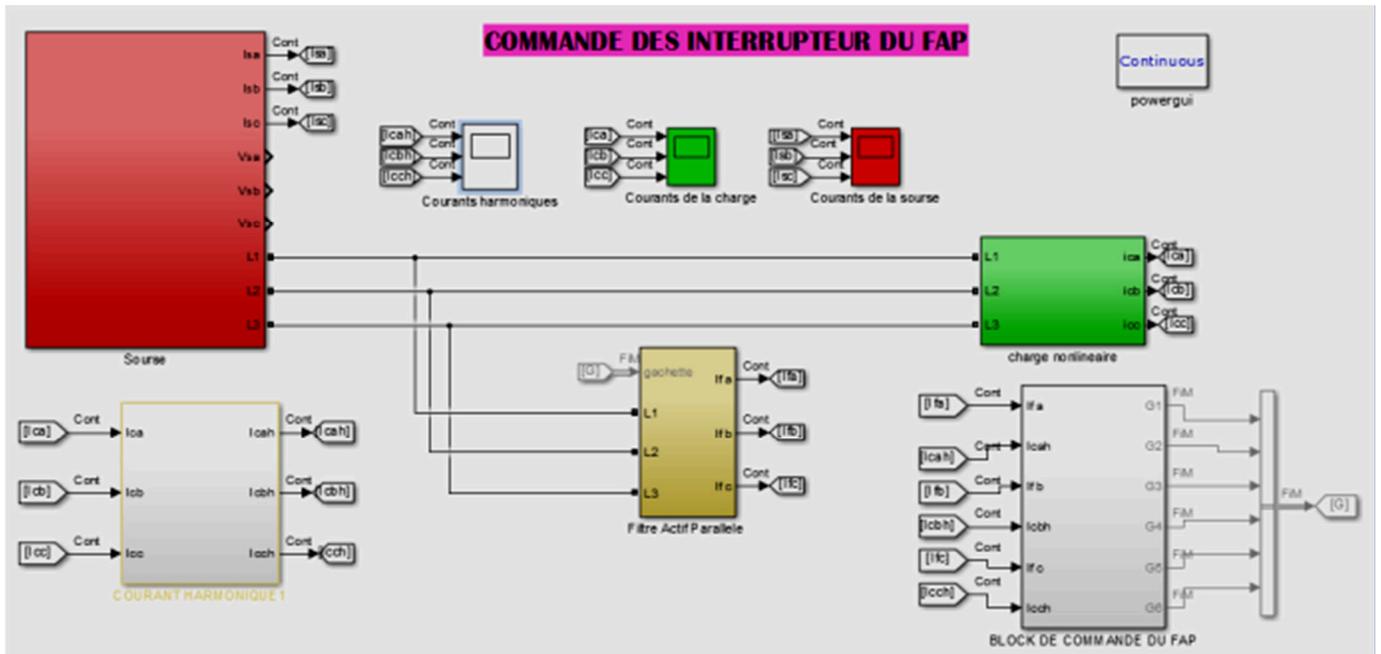


Fig. 10. La structure générale du système étudié

Les paramètres de simulation sont regroupés dans le tableau 1

Tableau 1. Paramètres de simulation

Source	$L_s = 76.10^{-5}H, R_s = 5\Omega, V_s = 220V ; F = 50Hz ;$
Charge	$R_c = 250\Omega, L_s = 1,15 mH, C_c = 1000\mu F$
Filtre actif	$L_f = 10 mH, C_{dc} = 2200\mu F, R_f = 50\Omega$
Filtre passif	$R_p = 10\Omega, L_p = 1,76 mH, C_p = 8,8 \mu F$

Les figures 11, 12 et 13 donnent respectivement pour une des phases, les formes d'ondes des courants et l'ordre des harmoniques de courant de la source avant et après application du FAS. (a) pour la commande par MLI ; (b) pour la commande par hystérésis.

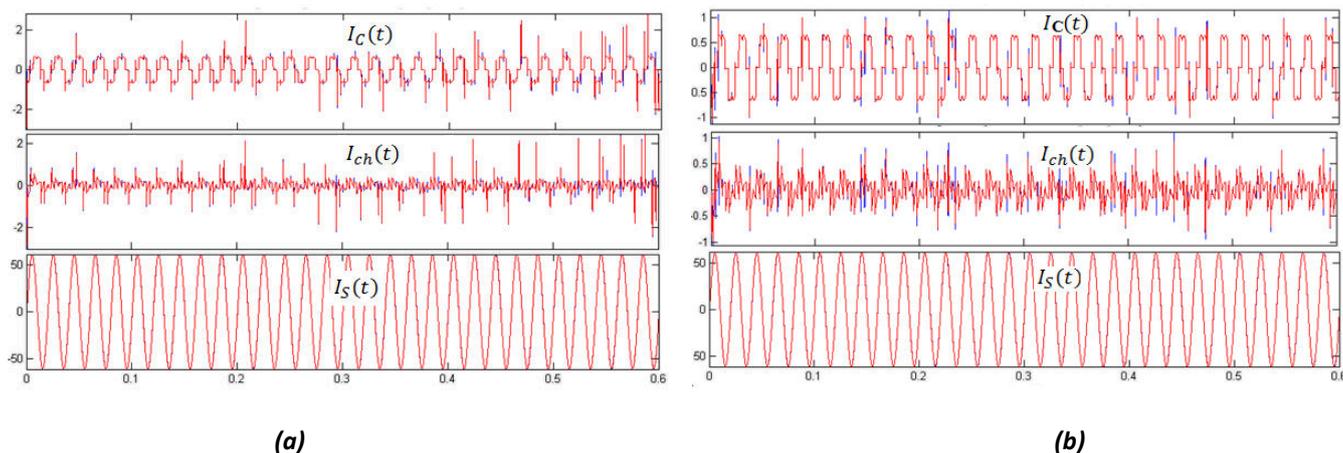


Fig. 11. Forme d'onde des courants de la charge (I_C) harmonique (I_{Ch}) et source (I_S) : (a) commande par MLI ; (b) commande par hystérésis

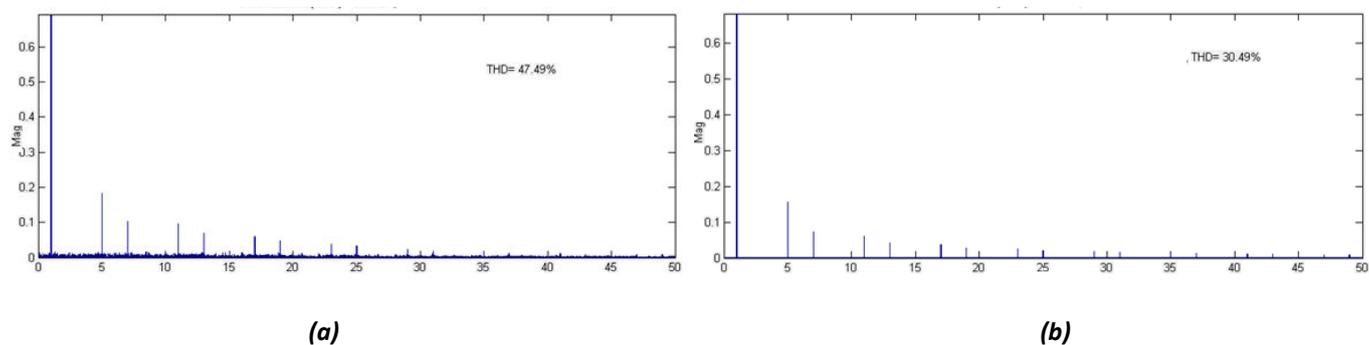


Fig. 12. Ordre des harmoniques de courant de la source et le TDH avant action du FAS : (a) commande par MLI ; (b) commande par hystérésis

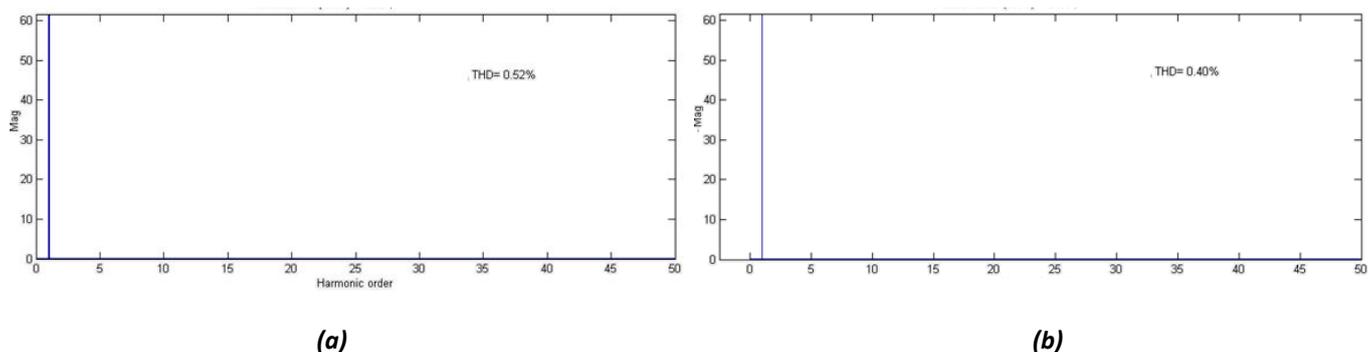


Fig. 13. Ordre des harmoniques de courant de la source et le TDH après action du FAS : (a) commande par MLI ; (b) commande par hystérésis

Les ondes du courant de la source $I_S(t)$ et de la charge $I_C(t)$ après application du filtre actif dans le cas de la commande par hystérésis ont des formes plus régulières que celles de la commande par MLI. Leurs taux de distorsion harmonique (TDH) est plus faible (0,40 %) contre (0,52 %) pour la commande par MLI comme montré figure 12.

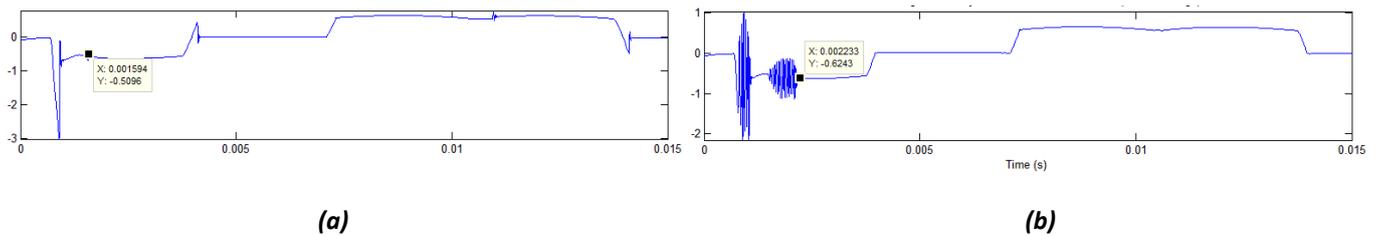


Fig. 14. Temps de réponse en régime dynamique (a) de la commande par MLI (b) commande par hystérésis

Le tableau 2 donne une synthèse comparative des deux types de commande.

La commande par MLI a un temps de réponse plus court que la commande hystérésis (figure 14). Le seul paramètre de régulation dans la commande hystérésis est la largeur de la bande d'hystérésis qui détermine l'erreur sur les courants et la fréquence de commutation, c'est ce qui fait de la commande hystérésis une commande robuste et facile à mettre en œuvre. Elle possède un bon temps de réponse en régime dynamique, une bonne stabilité et une bonne précision [8]. Mais la fréquence de commutation reste inconnue ou plutôt non contrôlable alors qu'en commande MLI la fréquence de commutation est contrôlable à travers la fréquence de la modulatrice.

Tableau 2. Caractéristiques des commandes MLI et Hystérésis

	COMMANDE MLI	COMMANDE HYSTERESIS
Forme d'onde du courant de sortie $I_s(t)$	Bonne	Bonne
TDH avant filtrage	47.49 %	30,49 %
TDH après filtrage	0.52 %	0.40 %
Durée du Régime dynamique	1.59 mS	2.23 mS
Stabilité	NON	OUI
Contrôlabilité	OUI	NON

6 CONCLUSION

L'étude comparative par simulation des commandes par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) et par Hystérésis, des filtres actifs shunts triphasés montre, d'après les résultats de simulation que la commande par MLI a des propriétés dynamiques qui peuvent être limitatives, et la réponse du système lors d'un changement brutal des signaux de référence est plus lente que celle d'une commande par hystérésis. La commande hystérésis semble meilleur pour la dépollution harmonique des réseaux électriques que la commande par MLI. Cependant la non contrôlabilité de la fréquence de commutation qui est la faiblesse de la commande par hystérésis peut être améliorée en combinant les deux types de commande (hystérésis et MLI).

REMERCIEMENTS

Nos remerciements au CEA-MITIC de l'Université Gaston Berger de Saint-Louis qui a accepté d'appuyer l'aboutissement de ces travaux.

REFERENCES

- [1] A. F. Hanna, Nohra, M. Fadel and H. Y. Kanaan, "A novel instantaneous power based control method for a four-wire SAPF operating with highly perturbed mains voltages," 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Taipei, Taiwan, pp. 1236-1241. 2016
- [2] Shraddha Dhumal, Jalaja Gundi Poonam Khrid, Manashri Yadav, M.D. Tuljapurkar " Detection of Harmonics in distribution System using FFT with case studies " International Journal for Scientific Research and Development, Vol.3 Issue 04, pp 75-82. 2015.
- [3] Farooq Haroon, Chengke Zhou, Mohamed Emad Farrag " Analysing the harmonic distortion in a distribution system caused by the non-linear residential loads " International Journal of Smart Grid and Clean Energy, Vol. 2, Issue, pp. 46-51. 2013

- [4] Liva Falisoa Rafanotsimiva, Gildas Besançon, Didier Georges, Eric Jean Roy Sambatra et Jean Marie Razafimahenina, "Modélisation multimodèle et commande par compensation parallèle distribuée d'un système SMIB", Mada-ENELSA, Vol. 1, pp .9-14. 2013
- [5] Gupta Shuvashis Das, Raihan Faruq, Ashraful Bari Chowdhury "A comparative study on harmonics of different electric Bulbs" American Journal of Engineering Research (AJER), vol. 5 pp. 156-166, 2016
- [6] Abdourahimoun Daouda, Saïdou Madougou, Abdoul Aziz Ibrahim "Global Harmonic Rate Assessment in the Electricity Distribution Network in Niamey City: Case Studies of Domestic, Industrial and Hospital Substations"Energy and Power Engineering, Vol. 9, pp. 786-801.2017
- [7] Javadi Alireza, Hamadi Abdelhamid, Woodward Lyne, Al-Haddad Kamal "Experimental Investigation on a Hybrid Series Active Power Compensator to Improve Power Quality of Typical Households", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 63, pp .1-1,Aout 2016
- [8] Djeghloud Hind, Benalla. H, Bentounsi. A, "Supply current and load voltage distortions suppression using the unified power quality conditioner", 5th International Multi conference on Systems, Signals and Devices, pp.1 – 6, Aout 2008.
- [9] P. C. Tan, A. Jusoh and Z. Salam, "A Single-Phase Hybrid Active Power Filter Connected to a Photovoltaic Array," 2006 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives - PEMD 2006, The Clontarf Castle, Dublin, Ireland, pp. 85-89 .2006
- [10] A. Hamadi, S. Rahmani and K. Al-Haddad, Fellow, <<A New Hybrid Series Active Filter Configuration to Compensate Voltage Sag, Swell, Voltage and Current Harmonics and Reactive Power >>IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009) Seoul Olympic Parktel, Seoul, Korea July 5-8, 2009
- [11] D. Ould Abdeslam, P. Wira, D. Flieller, J. Merckle "Power harmonic identification and compensation with an artificial neural network method", 2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics , Vol. 3 pp. 1732 - 1737, 2006
- [12] L. P. Ling, N. A. Azli, "SVM based hysteresis current controller for a three-phase active power filter," *PECon 2004. Proceedings. National Power and Energy Conference, 2004.*, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 132-136. 2004
- [13] M.A.E. Alali; Y.-A. Chapuis; S. Saadate; F. Braun "Advanced common control method for shunt and series active compensators used in power quality improvement", IEE Proceedings - Electric Power Applications, Volume: 151, Issue: 6, pp. 658 - 665, 2004.