

# Commande d'un filtre actif par modulation à rapport cyclique (MRC) pour la dépollution harmonique d'un réseau électrique triphasé

**Théodore Patrice Nna Nna\*, Salomé Ndjakomo Essiane\*\*, Stève Pérabi Ngoffé\*\*\*, Grégoire Ondoua Abessolo\*\*\*\*, Aristide Tolock Nelem\*\*\*\*\***

University of Douala, PO Box 7236 Douala. Email: [UFD-SCA@gmail.com](mailto:UFD-SCA@gmail.com). Technology and Applied Sciences Laboratory  
Correspondance, courriel : etknna@yahoo.fr

## Résumé :

Cet article présente la commande du filtre actif par modulation à rapport cyclique (MRC) pour la dépollution harmonique. Dans un premier temps nous présentons le schéma de principe du filtre actif, dans un second temps nous présentons la conception de la commande de ce filtre actif basée sur la méthode des puissances instantanées réelles et imaginaires qui utilise la transformation algébrique de « Clark », le contrôleur par modulation MRC est utilisé pour obtenir les ordres de commande requis à injecter à l'onduleur. Nous avons ensuite développé un modèle simulink du filtre actif afin de valider cette étude. Les simulations ont été effectuées dans l'environnement Matlab/Simulink. Les résultats obtenus présentent une amélioration significative sur les techniques de dépollution de courants harmoniques au vue du THD de 1,02 % qui était de 26.25%, l'élimination du bruit dans le signal et la simplicité de la commande avec une mise en œuvre plus facile que la MLI font de la commande par MRC un outil très promoteur.

**Mots clés :** MLI, MRC, filtre actif, onduleur.

## I. Introduction

La qualité de l'onde dans les réseaux électriques suscite de nombreux travaux de recherche. Ces réseaux regroupent les lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées dans des postes électriques et les gestionnaires doivent assurer la gestion dynamique de l'ensemble production - transport – consommation.

L'incorporation des dispositifs à électroniques de puissance à caractères non-linéaires dans ces réseaux électriques est en partie responsable des perturbations observées dans les nœuds de connexion des réseaux ne permettant pas une meilleure gestion de celui-ci. Une analyse fréquentielle de l'onde prélevée dans le réseau révèle la présence des composantes harmoniques et ces dernières sont la cause des dysfonctionnements observés lorsque le THD ne respecte plus les normes.

Plusieurs approches permettent de lutter contre ces perturbations, la première appelée conditionnement des charges assure un équipement moins sensible aux perturbations de l'énergie. Une deuxième solution proposée par [1] consiste à confiner les harmoniques pour des charges spécifiques, par l'usage des couplages particuliers des transformateurs et la troisième consiste à utiliser les techniques de filtrage :

Les filtres passifs empêchent les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques et permettent de compenser la puissance réactive. Cependant, ils manquent d'adaptabilité lors des variations d'impédance du réseau et de la charge. L'utilisation des filtres actifs permet d'éviter les inconvénients des filtres passifs. Trois topologies sont rencontrées à ce titre, le FAS, FAP et FAH.

Ce pendant le FAP est la solution la plus utilisée pour la dépollution des courants harmoniques. Plusieurs travaux de recherches se sont conduits autour, de part la commande du filtre depuis son modèle moyen [2] ou la commande directe et hybride, la commande linéaire et non linéaire [3].

Les stratégies de contrôle du FAP sont nombreuses [4] mais les différences résident autour des performances de réduction du THD, la qualité de l'onde obtenue, la simplicité du schéma et le coût. Celui-ci sera utilisé dans le cadre de nos travaux.

Dans la commande des filtres actifs, les modulateurs de largeur d'impulsions (MLI) sont les plus utilisés et présentent des performances avérées par leur immunité au bruit. Ils sont cependant très complexe de part leur mise en œuvre et le filtrage lors de la récupération du signal transmis n'est pas aisée.

Un nouveau modulateur de rapport cyclique (MRC) a été développé par [5] et s'appuie sur le fonctionnement non linéaire d'un amplificateur opérationnel se comportant comme un oscillateur contrôlé en tension en hautes fréquences. Sa simplicité de mise en œuvre, ses fondements mathématiques simples et la pauvreté spectrale sont de réels atouts. Des applications dans le domaine de commande des dispositifs en électronique de puissance sont toujours en cours de développement [6-7] et les résultats traduisent ces potentialités.

L'objectif de cet article est de commander un filtre actif parallèle par Modulateur à rapport cyclique tout en améliorant la qualité d'énergie électrique. Pour valider nos résultats, nous comparons deux stratégies de commande du filtre actif : MLI et MRC.

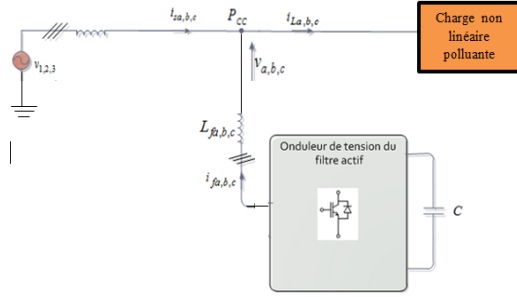
## II. Filtre actif

L'onduleur est la partie essentielle du filtre actif. Dépendamment du type de filtre de couplage le reliant au réseau ainsi que de l'élément passif qui lui sert de source d'énergie, il s'agira à cet effet d'un onduleur de tension ou de courant. L'onduleur peut être commandé en tension ou en courant et peut donc se comporter comme une source de tension ou de courant vis-à-vis du circuit extérieur. En pratique, suivant le type de correction à apporter au réseau, une structure est préférée à l'autre si elle rend plus aisée et moins onéreuse la réalisation de l'ensemble convertisseur commande.

Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature, les plus étudiées étant:

- Filtre actif parallèle à structure de tension
- Filtre actif parallèle à structure de courant

### II.1 Filtre actif parallèle et principe de fonctionnement



**Figure. 1.** Schéma de principe du Filtre Actif parallèle

Dans la configuration de la figure.1, la charge absorbe les courants  $i_{li}(t)$  perturbés en harmoniques que le filtre doit compenser en injectant les courants  $i_{fi}(t)$ , pour que la source ne fournisse que les courants actifs  $i_{si}(t)$ . On écrit pour la charge :

$$i_{li}(t) = i_{li,a}(t) + i_{li,rh}(t) \quad (1)$$

Avec,  $i = a, b, c$ ,  $i_{li,a}(t)$  est la part active du courant de la charge,  $i_{li,rh}(t)$  est la part réactive et harmonique du courant de la charge.

Et pour la source, en considérant que les courants désirés sont actifs, soit  $i_{si,a}(t)$ , et correspondent majoritairement à la part active nécessaire pour la charge  $i_{li,a}(t)$  à côté d'un faible courant  $i_{pertes,i}(t)$  qui sera absorbé par le filtre pour compenser ces pertes. On aura :

$$i_{si}(t) = i_{si,a}(t) + i_{pertes,i}(t) \quad (2)$$

La loi des nœuds au Pcc de la figure 1 implique :

$$i_{si}(t) + i_{fi}(t) = i_{li}(t) \quad (3)$$

En remplaçant (1) et (2) dans (3), on obtient :

$$i_{si,a}(t) + i_{pertes,i}(t) + i_{fi}(t) = i_{li,a}(t) + i_{li,rh}(t) \quad (4)$$

Or, le courant actif fourni par la source  $i_{si,a}(t)$  correspond à la part active  $i_{li,a}(t)$  demandée par la charge,

$$i_{fi}(t) = i_{li,rh}(t) - i_{pertes,i}(t) \quad (5)$$

L'équation (5) résume le principe de compensation attendue par le filtre actif.

### III. Approche méthodologique de la commande du filtre actif par modulation à rapport cyclique

Nous proposons une architecture dont la stratégie de commande de l'onduleur de tension MRC repose, sur l'identification et la détermination des courants de référence qui se fait par la méthode des puissances instantanées réelles et imaginaires qui utilise la transformation algébrique de « Clark ». Ces courants de référence sont ensuite injectés dans le modulateur à rapport cyclique qui génère les ordres de commande de l'onduleur puis démodulés par un filtre LC et injectés au réseau en opposition de phase. Le régulateur PI est appliqué pour réguler la tension du bus continu DC.

#### III.1 Identification et Calcul des courants harmoniques

Le courant absorbé par la charge polluante est composé d'un fondamental et d'harmoniques. Le filtre actif sert à générer des courants harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase avec ceux existant dans la charge. Pour cela, il faut identifier les courants harmoniques de la charge. Plusieurs méthodes d'identification existent [3], [4] :

- La première est basée sur l'analyse spectrale du courant polluant.
- La seconde, utilise un filtre passe-bande pour filtrer le fondamental.
- La troisième, utilise les notions des puissances réelle et imaginaire instantanées.

Cette dernière est la plus utilisée dans la plupart des filtres actifs, car elle réalise le meilleur accord entre les performances statiques et dynamiques.

Cette méthode utilise la transformation algébrique de « Clark » pour transformer les systèmes triphasés de courants et tensions présentées dans le repère  $a, b, c$  vers un nouveau repère  $\alpha, \beta$  de la manière suivante :

Composantes de tension :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

Composantes de courant :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

Dans un repère  $a, b, c$ , la puissance instantanée active est donnée par :

$$P_3(t) = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c \quad (8)$$

De même, dans le repère  $\alpha, \beta$  :

$$P_{\alpha\beta}(t) = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta \quad (9)$$

Où

La puissance instantanée réelle :

$$P = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta = P_\alpha + P_\beta \quad (10)$$

Un des avantages issu de cette transformation est la séparation des séquences homopolaires de courant ou de tension.

[18] propose la définition suivante de la puissance imaginaire instantanée :

$$q = V_\alpha I_\beta - I_\alpha V_\beta \quad (11)$$

Cette puissance peut s'écrire dans le repère  $a, b, c$  de la manière suivante :

$$q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(V_a - V_b) \cdot I_c + (V_b - V_c) \cdot I_a + (V_c - V_a) \cdot I_b] \quad (12)$$

Cette expression est bien connue pour la mesure de la puissance réactive conventionnelle dans le système triphasé.

A partir des relations (10) et (11), nous pouvons établir la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (13)$$

Les puissances réelle et imaginaire instantanées, respectivement  $p$  et  $q$ , sont données par les termes généralisés :

$$P = \bar{P} + \tilde{P} \quad (14)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (15)$$

$\bar{P}$  est la partie continue liée à la composante fondamentale active du courant et  $\bar{q}$  la partie continue liée à la composante fondamentale réactive du courant.

Ce qui nous intéresse c'est d'extraire les composants.  $\tilde{P}$ ,  $\tilde{q}$ , parties fluctuantes liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension. Pour y arriver,

nous appliquons le filtre de Butterworth de second ordre.

Pour calculer les courants de compensation de la référence dans les coordonnées  $\alpha$ ,  $\beta$ , l'expression (13) est inversée et devient [35] :

$$\begin{bmatrix} I^*_\alpha \\ I^*_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V^2_\alpha + V^2_\beta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (16)$$

Grâce à la Transformation de Concordia Inverse (TCI), les parties alternatives des puissances  $\tilde{P}$  et  $\tilde{Q}$ , permettent de réduire les courants perturbateurs triphasés. Ces courants représentent les perturbations et deviennent les courants de référence qui sont à injecter en opposition de phase sur le réseau électrique pour éliminer les harmoniques. La relation (7) donne donc :

$$\begin{bmatrix} I^*_a \\ I^*_b \\ I^*_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I^*_\alpha \\ I^*_\beta \end{bmatrix} \quad (17)$$

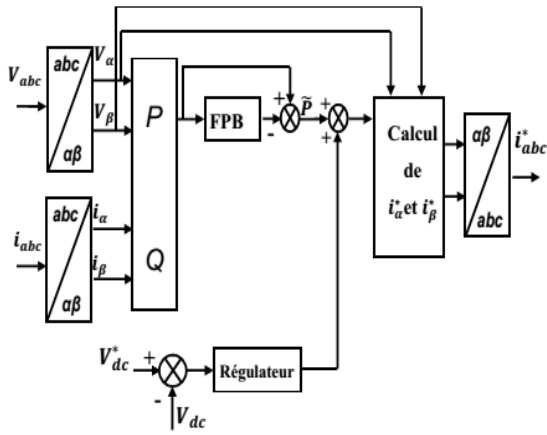


Figure.2. Algorithme d'extraction des courants de références

### III.2 Régulation de la tension continue

Nous avons choisi le régulateur PI ci-dessous pour réguler la tension du condensateur  $V_{dc}$  à sa valeur de consigne  $V^*_{dc}$  [1]:

(16)

Avec :  $K_r$  : Gain du régulateur ;  $\tau_c$  : Constante de temps.

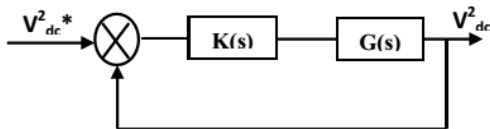


Figure.3 : Schéma fonctionnel de la régulation de  $V_{dc}$  avec le régulateur proportionnel.

Le terme  $G(s)$  a pour expression :  $G(s) = \frac{2}{C(s)}$  (17)

Après calcul, la fonction de transfert en boucle fermée est de la forme :  $F(s) = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\epsilon_c \omega s + \omega^2}$  (18)

$$\text{Avec : } \omega = \sqrt{\frac{2K_c}{C\tau_c}} \quad \text{et} \quad \epsilon_c = \frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{C}{K_c\tau_c}}$$

Pour réaliser un bon compromis entre les performances dynamiques et statiques, nous choisissons une valeur de  $\xi_c$  comprise entre 0,4 et 0,8, soit 0,7.

### III.3 Contrôle de courant par MRC optimal

La MRC (Modulation à Rapport Cyclique) est une technique de modulation qui consiste à faire varier le rapport cyclique en fonction du signal à moduler. Le rapport cyclique étant une fonction non linéaire pour le control du signal, il suffit de développer une excellente approximation linéaire de ce dernier lors de l'analyse numérique en fixant correctement les paramètres du montage. En basse fréquence le MRC contrôle le signal à moduler. Il est construit autour d'un amplificateur opérationnel fonctionnant en commutation c'est-à-dire qu'il délivre en sortie un signal tout ou rien. Dans le cadre de ce papier, nous utilisons le MRC à montage non inverseur.

Le signal d'entrée  $I_{ref} = U_m$  est transformé en une onde de commutation périodique

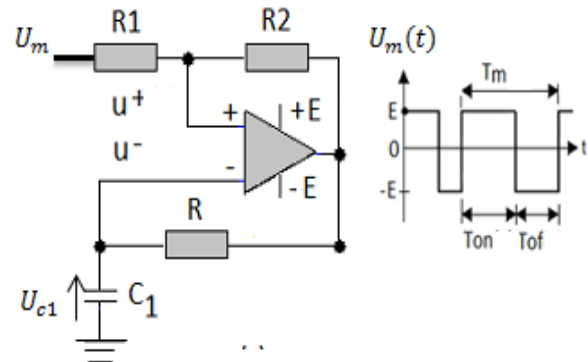


Figure. 4 Contrôle de courant par MRC

On pose  $U_m = I_{ref}$

$$u^+ = \frac{\frac{U_m + U_s(t)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (19) \Rightarrow u^+ = \frac{U_m R_2}{R_1 + R_2} + \frac{U_s(t) R_1}{R_1 + R_2} \quad (20)$$

$$\text{Avec : } \alpha = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (16); \quad 1 - \alpha = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \alpha_1 \quad (21)$$

L'AOP fonctionnant en commutation on a :

$$U_s(t) = \begin{cases} E & \text{si } u^+ > u^- \\ -E & \text{si } u^+ < u^- \end{cases}$$

$$\Rightarrow u^+ = \begin{cases} \alpha E + \alpha_1 U_m & \text{si } U_s(t) = E \\ -\alpha E + \alpha_1 U_m & \text{si } U_s(t) = -E \end{cases} \quad (22)$$

La variation de tension du condensateur est définie par:

$$RC \frac{dU_c(t)}{dt} + U_c(t) = U_s(t) \quad (23)$$

$$D'où \quad U_c(t) = (u_i - u_f)e^{-t/\tau} + u_f \quad (24)$$

avec  $\tau = RC$

Le temps de charge et de décharge du condensateur sont compris respectivement dans:  $0 < t < T_1$  et  $T_1 < t < T_2$

$$T_1 = -\tau \ln \frac{\alpha_1 U_m + (\alpha - 1)E}{\alpha_1 U_m - (1 - \alpha)E} \quad (25)$$

$$Et \quad T_2 = -\tau \ln \frac{\alpha_1 U_m - (\alpha - 1)E}{\alpha_1 U_m + (1 + \alpha)E} \quad (26)$$

$$T = \tau \ln \frac{\alpha_1 U_m - (1 + \alpha)E}{\alpha_1 U_m + (\alpha - 1)E} + \tau \ln \frac{\alpha_1 U_m + (1 + \alpha)E}{\alpha_1 U_m - (\alpha - 1)E}$$

$$\Rightarrow \quad T = \tau \ln \left( \frac{(\alpha_1 U_m)^2 - ((1 + \alpha)E)^2}{(\alpha_1 U_m)^2 - ((\alpha - 1)E)^2} \right) \quad (27)$$

Le rapport cyclique  $R_m(u)$

$$R_m(u_m) = \frac{T_1(U_m)}{T(U_m)} \Rightarrow R_m = \frac{\ln \frac{\alpha_1 U_m - (1 + \alpha)E}{\alpha_1 U_m + (\alpha - 1)E}}{\ln \left[ \frac{(\alpha_1 U_m)^2 - ((1 + \alpha)E)^2}{(\alpha_1 U_m)^2 - ((\alpha - 1)E)^2} \right]} \quad (22)$$

Nous utilisons un modulateur MRC Optimal dont les paramètres optimaux sont:

$$\alpha = 0.003081723734398 \text{ ou } \alpha = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\tau = 0.000486670905896s \text{ ou } \tau = RC$$

La fréquence de base de notre modulateur MRC a été fixée à 166690 Hz. Alors l'AOP doit être capable de commuter de  $+V_{sat}$  à  $-V_{sat}$  et de  $-V_{sat}$  à  $+V_{sat}$ .

Avec  $f_{com} > 166690$  Hz qui est la fréquence de commutation.

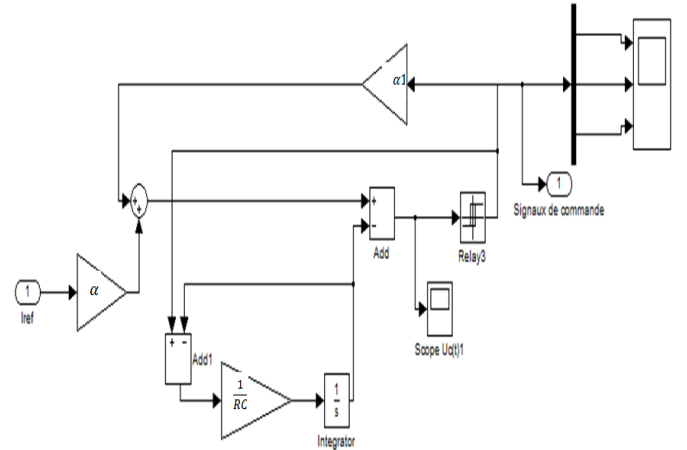


Figure. 5 Schéma de simulation du MRC sous simulink

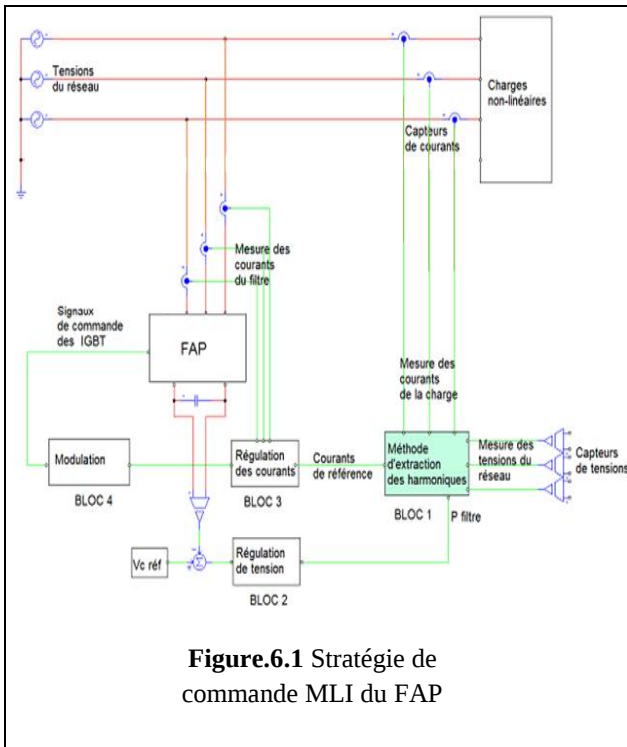


Figure.6.1 Stratégie de commande MLI du FAP

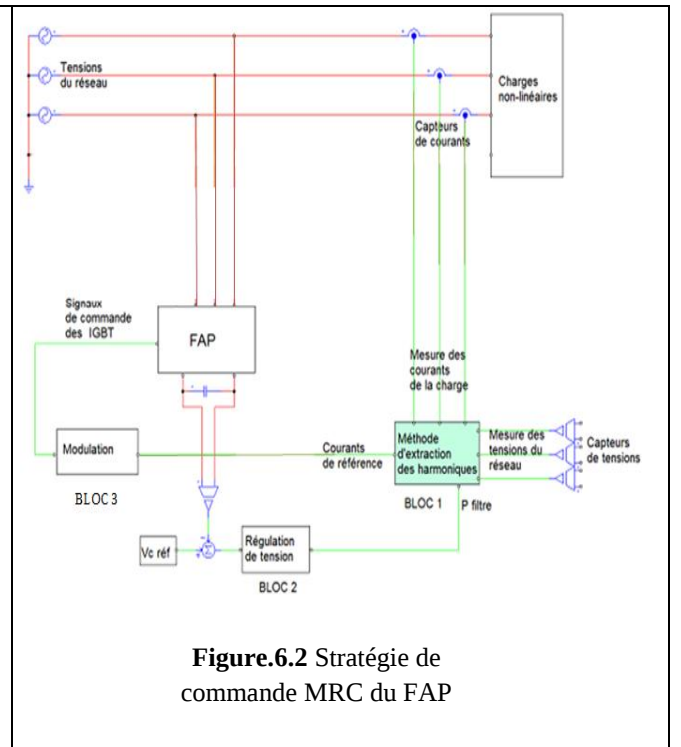


Figure.6.2 Stratégie de commande MRC du FAP

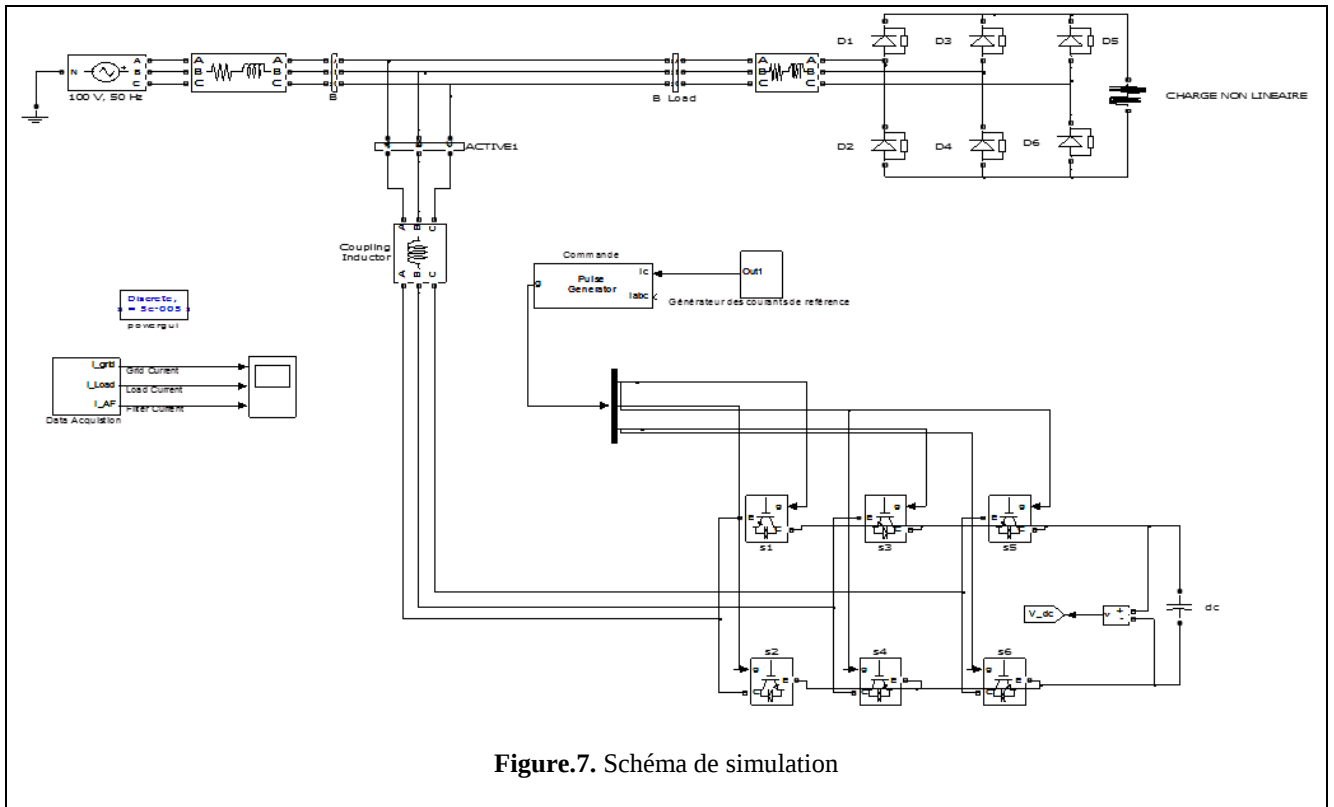


Figure.7. Schéma de simulation

#### IV. Résultats et discussions

Le logiciel MATLAB / SIMULINK est utilisé, le réseau électrique simulé est triphasé équilibré à 3-fils 100V, 50Hz. La charge polluante est représentée par un redresseur classique constitué de deux ponts de thyristors connectés en série dans un réseau électrique.

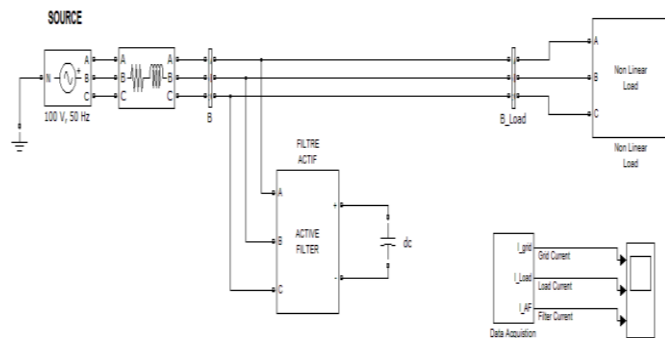


Figure. 8 Schéma de principe

Tableau 1 Paramètres de simulation

| Paramètres              | Valeurs numériques |
|-------------------------|--------------------|
| Tension efficace        | 100V               |
| Fréquence               | 50Hz               |
| Résistance de ligne     | 0.1Ω               |
| Inductance de ligne     | 0.15e-3H           |
| Résistance de charge    | 60 Ω               |
| Inductance de charge    | 20e-3H             |
| Inductance du filtre Lf | 4e-3H              |
| Cf                      | 15μf               |
| Vdc                     | 440V               |

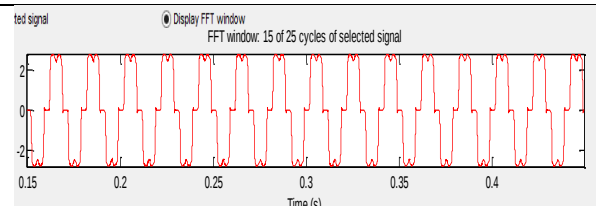
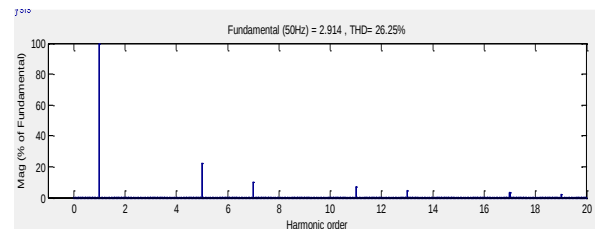
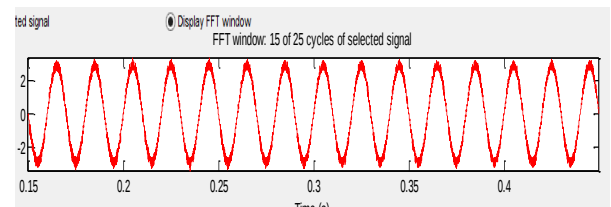
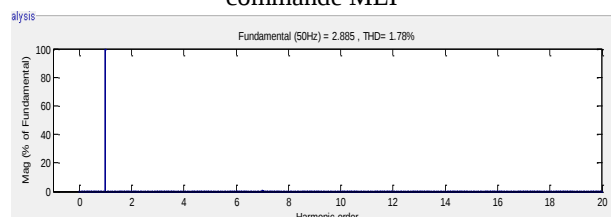
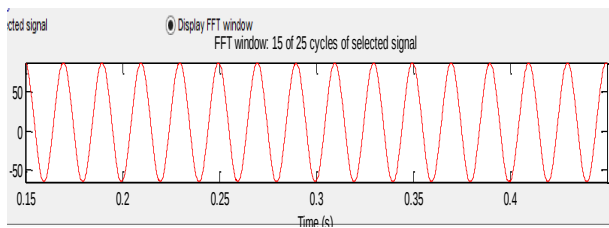

 Figure.9. Onde de courant  $i_{sa}$  avant filtrage


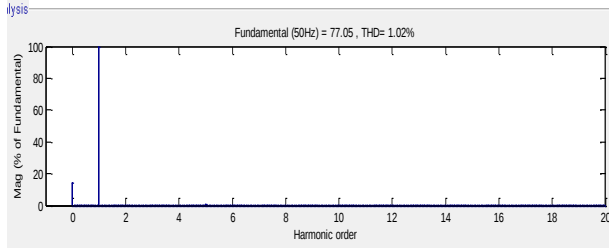
Figure.10. Spectre de courant dans le réseau avant filtrage


 Figure.11. Onde de courant  $i_{sa}$  après filtrage pour la commande MLI


**Figure.12.** Spectre de courant  $i_{sa}$  après filtrage pour la commande MLI



**Figure.13.** Onde de courant  $i_{sa}$  après filtrage pour la commande MRC



**Figure.14.** Spectre de courant  $i_{sa}$  après filtrage pour la commande MRC

L'analyse spectrale du courant du réseau présentée à la (figure.9) montre la présence de plusieurs rangs d'harmoniques perturbant la forme de l'onde de courant, soit un THD de 26.25%.

D'après les résultats de simulations obtenus sur les figures (12) et (14), le taux de distorsion harmonique (THD) du courant au point de raccordement (calculé sur les 20 premiers rangs d'harmonique) vaut :  $THD = 1.78\%$  pour la commande MLI et  $THD = 1.02\%$  pour la commande MRC, ce qui correspond à la norme IEEE STD 519. On observe également sur les figures (11) et (13) que l'onde de courant  $i_{sa}$  pour la commande MLI est plus bruitée que celle de la commande MRC. Par ailleurs la commande MRC est plus souple car elle présente une mise en œuvre plus facile que la MLI d'autant plus qu'elle utilise un seul amplificateur opérationnel (figure.4). Nous mettons à cet effet en perspective les travaux du filtre de sortie de l'onduleur plus adapté pour ce type de commande et les travaux en cours sont suffisamment prometteurs.

## Conclusion

Nous avons présenté dans cet article, le principe de fonctionnement du filtre actif, donné le modèle simulink de ce filtre et nous avons conçu notre stratégie de commande du filtre actif par MRC capable de contrôler les courants injectés par ce filtre. Les résultats obtenus présentent une amélioration significative sur les techniques de dépollution de courants harmoniques au vue du THD de 1,02 % qui était de 26.25%, l'élimination du bruit dans le signal et la simplicité de la commande avec une mise en œuvre plus facile que la MLI font de la commande par MRC un outil très promoteur. Les travaux en perspective visent l'amélioration du filtre de sortie de l'onduleur en vue d'améliorer la démodulation du signal de commande et la qualité spectrale.

## Références

- [1] Schneider electric. Guide de l'installation électrique-2009
- [2] H. Y. Kanaan and K. Al-Haddad, "Comparative evaluation of average-model-based control schemes applied to a three-phase series active power filter for voltage harmonic cancellation", in Proc. 13th IEEE International Symposium on Industrial Electronic (ISIE'04), Ajaccio, France, May 4-7, 2004, vol. 2, pp. 783-789.
- [3] H. Y. Kanaan, A. Hayek and K. Al-Haddad, "Nonlinear Control Design for a PWM Three-Phase Four-Wire Shunt Active Power Filter Based on the State-Space Averaged Model", in Proc. ICHQP'06, Cascais, Portugal, October 01-05, 2006.
- [4] B. Geethalakshmi and M. Kavitha, "Comparison of reference current Extraction Methods for shunt Active Power Filters" International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol.3, No.3, June 2011.
- [5] Mbihi, J., Ndjali Beng, F., Mbouenda, M., "Modeling and simulation of a class of duty-cycle modulators for industrial instrumentation", Iranian Journal of Electrical and Computer engineering, 4 (2)2 (2005) pp. 121-128.
- [6] Y. P. Danwé Sounsoumou, H. Djalo, J. Mbihi, et J. Y. Effa, « Modelisation Virtuelle d'un nouveau schema de réglage de Boost à commande rapprochée par modulation en rapport cyclique », Journal Afrique Science, 13(11), 2017, pp. 176-185.
- [7] A. Obono Biyobo, L. Nneme Nneme, J. Mbihi « A Novel Sine Duty-Cycle Modulation Control Scheme for Photovoltaic Single-Phase Power Inverters » Wseas Transactions on Circuits and Systems, Vol. 17, 2018.

