



## REDUCTION DES HARMONIQUES UTILISANT UN FILTRE ACTIF PARALLELE A TROIS NIVEAUX

H. DJEGHLOUD, H. BENALLA,

Laboratoire d'électrotechnique de Constantine, Université Mentouri de Constantine, 25000 Algérie

### Résumé :

La prolifération de l'emploi des charges non linéaires dans l'usage domestique, tertiaire, et industriel a stimulé le déploiement et la propagation des harmoniques perturbateurs dans les systèmes électriques de puissance, induisant des distorsions dans les formes d'ondes, causant de sévères problèmes notamment la détérioration du facteur de puissance et d'importantes fluctuations dans l'énergie réactive. De nombreuses solutions sont proposées comme palliatifs aux problèmes d'harmoniques, mais celle qui attire le plus d'attention actuellement, et satisfait mieux aux conditions technico-économiques est l'utilisation des filtres actifs de puissance. Cet article présente l'étude théorique et la simulation d'un filtre actif triphasé parallèle à structure à onduleur de tension à trois niveaux, commandé dans un premier temps par la stratégie M.L.I., puis par la stratégie hystérésis. Enfin, dans l'objectif d'améliorer les résultats obtenus, on applique la régulation floue d'un côté sur le courant délivré par le filtre actif, et sur les tensions continues aux bornes des condensateurs de stockage d'énergie de l'autre.

### Mots-clés:

Harmoniques, onduleur de tension à trois niveaux, filtrage actif de puissance, commande M.L.I., commande hystérésis, logique floue

### Abstract:

The increasing employ of nonlinear loads in domestic, tertiary, and industrial uses has stimulated the deployment and the propagation of disturber harmonics in electrical power systems, which induce distorsions in wave forms and causes severe problems such as power factor deterioration and important fluctuations in reactive power.

Several solutions for reducing the harmonics are proposed. But the one which attracts the most attention and satisfies to technical and economical conditions is the use of active power filters. This modest work is devoted to theoretical study and simulation of a triphase three levels shunt active power filter. First, we

considered an active power filter controlled with the PWM strategy, next with hysteresis strategy. Finally, for improving the results obtained with the last classical strategies, we applied the "fuzzy logic" for controlling both the active power filter's current, and the capacitors dc voltages.

### 1. Introduction:

L'expansion de l'emploi des charges électroniques non linéaires durant les 30 dernières années a significativement motivé la propagation et le déploiement des harmoniques dans les systèmes électriques de puissance. Comme ces charges sont indispensables pour différents besoins domestiques et industriels (alimentations à découpage des micro-ordinateurs, alimentations sans interruption, les différents montages en pont utilisés surtout dans les systèmes HVDC, les démarreurs électroniques, les équipements à dispositifs à commutations cycliques, les équipements médicaux, les différentes protections intervenant contre les anomalies du réseau,...etc.), de nombreuses recherches ont été lancées, ayant pour objectif de fournir un remède définitif aux problèmes engendrés par les harmoniques (augmentation du THD des grandeurs électriques, dégradation du facteur de puissance, échauffements importants dans les transformateurs induisant des pertes considérables, des interférences avec les circuits de télécommunication...etc.). La grande masse de ces recherches a adopté le filtrage (passif et actif) comme solution, d'autres se sont axées vers la reconfiguration des charges polluantes elles-même (convertisseurs AC-DC à MLI). Tout d'abord, les filtres passifs LC ont été choisis comme meilleurs absorbeurs des harmoniques. En effet, ces derniers offrent une manière simple et effective pour réduire les harmoniques dans différents cas, spécialement, si ces derniers sont localisés à l'intérieur d'une gamme étroite de fréquences, alors l'impédance de la source d'harmoniques est élevée et le réseau ne présente pas de résonance près des fréquences harmoniques. Dans les systèmes DC, ces filtres sont seulement liés aux harmoniques

tandis que dans les systèmes AC, ils sont souvent associés à la compensation de l'énergie réactive. Les filtres passifs peuvent être utilisés d'une manière économique par simple adaptation de la capacité C et de l'inductance L, c'est le cas des filtres AC appliqués aux systèmes HVDC. Néanmoins, l'efficacité de ces filtres se retrouve dégradée par la présence de certains facteurs[1],[2]:

- Insuffisante habilité à couvrir une large bande de fréquence qui nécessite l'installation de plusieurs filtres.
- Naissance de résonances série et parallèle avec le réseau qui conduit à l'amplification de tout harmonique à fréquence voisine de celle de la résonance.
- La forte dépendance de l'impédance et de la fréquence du réseau.

Suite à ces effets néfastes, les recherches se sont orientées vers d'autres solutions présentant de moindres inconvénients. Alors, grâce au développement qu'a connu la technologie des semi-conducteurs de puissance entièrement commandables (GTO, IGBT, et MOSFET), ont parus les convertisseurs AC-DC (redresseur MLI) d'une part, permettant un meilleur contrôle du facteur de puissance et l'atténuation de certains harmoniques basses fréquences[3], et les filtres actifs série et parallèle d'autre part. Ces derniers se caractérisent par des qualités supérieures à celles des convertisseurs AC-DC. En effet, en plus de leur flexibilité à s'adapter aux différentes commandes (MLI et hystérésis,...), l'atténuation des harmoniques est très élevée dans l'ensemble de la bande de fréquences. Aussi, ils permettent une bonne réponse dynamique compatible avec les besoins du système de puissance, et au lieu d'introduire des résonances dans le réseau, les filtres actifs peuvent être utilisés pour annuler les résonances existantes. En outre, ils peuvent facilement s'adapter aux variations de la fréquence du réseau ou autres paramètres, en plus, si on les associe aux filtres passifs, ils peuvent compenser la variation de la fréquence. Les changements significatifs dans les caractéristiques peuvent être obtenus à n'importe quel instant en agissant sur la commandes (mesures software), sans qu'on ait besoin à modifier les équipements (hardware).

Pour toutes les qualités mentionnées précédemment, les filtres actifs ont été élus et retenus comme l'idéale solution pour atténuer

les harmoniques, éliminer les résonances, compenser l'énergie réactive et améliorer le facteur de puissance.

La structure multiniveaux des filtres actifs parallèles constitués essentiellement d'onduleurs de tension permet la montée sécurisée en tension et en puissance tout en respectant les conditions de fonctionnement des interrupteurs et tout en présentant de meilleurs spectres harmoniques par rapport aux onduleurs à structures classiques. Toutefois, l'application des commandes MLI et hystérésis aux filtres actifs parallèles à trois niveaux nécessite l'emploi de régulateurs (1<sup>er</sup> ordre, PI, PID,...), mais on ne récupère pas la totalité de l'allure souhaitée prévue après filtrage actif (présence de pics dus aux retards par commutation). Ceci a conduit à l'utilisation des techniques intelligentes (floue et neurones), célèbres par leur qualité d'offrir une meilleure régulation, afin d'adoucir les pointes aiguës, récupérant ainsi l'allure souhaitée. C'est pour cela que ce travail a été consacré à l'étude d'un filtre actif parallèle à trois niveaux commandé en MLI puis en hystérésis, et enfin régulé par logique floue.

## 2. Structure du filtre actif :

### 2.1. Principe :

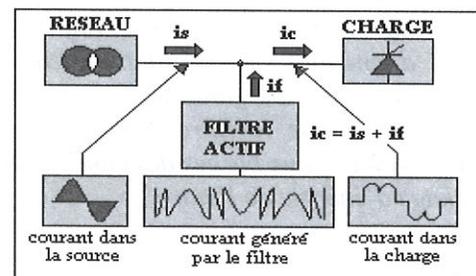


Figure 2.1. Principe du filtrage actif parallèle

De par son raccord sur le réseau, le filtre actif est destiné à compenser les harmoniques produits par le récepteur polluant en générant des courants qui ne contiennent que des composantes harmoniques ayant la même amplitude que ceux qu'il doit compenser mais en opposition de phase avec ces derniers [4],[5].

### 2.2 Structure :

Le filtre actif, dans notre cas, est un onduleur de tension (simple ou multiniveaux) fonctionnant dans un mode à puissance active nulle. Il a pour vocation, dans une configuration parallèle, de dériver, d'une manière active, tout ou partie des harmoniques de courant et/ou de la puissance réactive absorbée par les charges polluantes [6]. Dans cette étude, on a opté pour une structure du

filtre actif représentée par un onduleur de tension à trois niveaux. La figure 2.2 montre la structure du filtre actif constitué d'un onduleur de tension à trois niveaux.

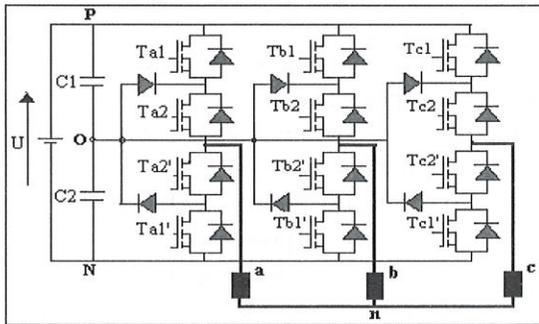


Figure 2.2. Structure de l'onduleur de tension à trois niveaux

Chaque bras de l'onduleur est constitué de la mise en série de quatre interrupteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture (MOSFET, IGBT ou GTO) en anti-parallèle avec une diode, et deux diodes médianes clampées au point milieu de la source continue servant pour l'obtention du niveau zéro [7], [8].

**2.3 Fonctionnement**

L'onduleur de tension à trois niveaux a pour tâche de fournir à sa sortie trois niveaux de tension :  $U/2$ ,  $0$ , et  $-U/2$ . Pour cela, il doit assurer la complémentarité entre les interrupteurs  $Ti1$  et  $Ti2'$  d'une part, et  $Ti2$  et  $Ti1'$  de l'autre, ceci est expliqué dans le tableau  $T_1$ .

Etat	$C_i$	$Ti1$	$Ti2$	$Ti2'$	$Ti1'$
P	1	ON	ON	OFF	OFF
O	0	OFF	ON	ON	OFF
N	-1	OFF	OFF	ON	ON

Tableau  $T_1$ . obtention des trois niveaux de tension  $C_i$ ,  $i = a,b,c$ , étant la variable d'état des interrupteurs de l'onduleur de tension à trois niveaux.

En fonction de la tension d'alimentation  $U$  de l'onduleur et de la variable  $C_i$ , la tension de sortie d'un bras de l'onduleur a pour expression:

$$U_i = C_i \cdot U / 2 \dots \dots \dots (1)$$

Les tensions  $V_{in}$  s'expriment par la formule qui suit :

$$\begin{bmatrix} V_{an}(t) \\ V_{bn}(t) \\ V_{cn}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_a(t) \\ C_b(t) \\ C_c(t) \end{bmatrix} \cdot \frac{U}{2} \dots \dots \dots (2)$$

Les tensions de sortie des bras a,b,c de l'onduleur sont données par l'expression (3)

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_a \\ \Gamma_b \\ \Gamma_c \end{bmatrix} \cdot \frac{U}{2} \dots \dots \dots (3)$$

Avec:

$$\begin{aligned} \Gamma_a &= \frac{2}{3} \cdot C_a - \frac{1}{3} \cdot C_b - \frac{1}{3} \cdot C_c \\ \Gamma_b &= -\frac{1}{3} \cdot C_a + \frac{2}{3} \cdot C_b - \frac{1}{3} \cdot C_c \dots (4) \\ \Gamma_c &= -\frac{1}{3} \cdot C_a - \frac{1}{3} \cdot C_b + \frac{2}{3} \cdot C_c \end{aligned}$$

Dans le plan orthogonal de Concordia ( $\alpha, \beta$ ), ces tensions sont exprimées par :

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Gamma_a \\ \Gamma_b \\ \Gamma_c \end{bmatrix} \cdot \frac{U}{2} \dots (5)$$

La représentation vectorielle de l'onduleur de tension à trois niveaux est illustrée dans la figure 2.3.

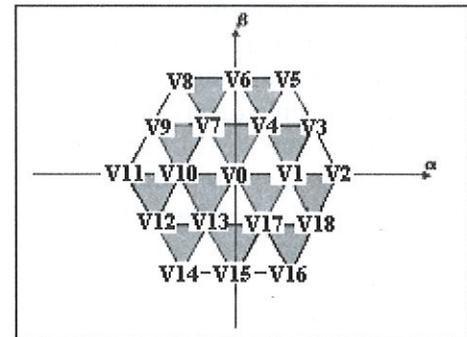


Figure 2.3. Représentation vectorielle d'un onduleur de tension à trois niveaux

**3. Circuit de commande du filtre actif :**

Quelle que soit la nature de la commande employée, le schéma synoptique de commande reste identique. La figure 3.1 montre le circuit de commande d'un bras,  $i_f$  est le courant généré par le filtre actif,  $i_{ref}$  représente la consigne de  $i_f$ ,  $c'$  est le courant harmonique de référence calculé à travers le bloc fonctionnel de la figure 3.2.

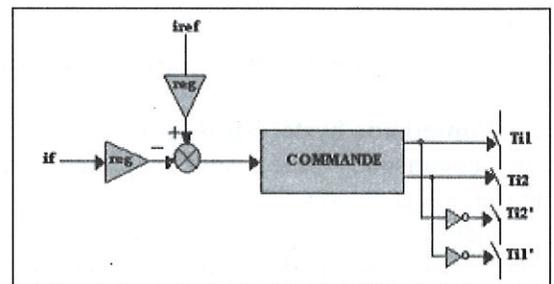


Figure 3.1 Circuit de commande du filtre actif

La transformation [3/2] est celle de Concordia donnée par l'équation (6), tandis que [2/3] est celle de Concordia inverse.

Pour un vecteur  $[X]_{a,b,c}$  triphasé équilibré, la transformation de Concordia est donnée par:

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \dots(6)$$

**Commandes appliquées au filtre actif :**

Afin de commander le filtre actif, plusieurs stratégies sont proposées [6],[9],[10],[11]. Dans cette étude, nous avons appliqué au filtre actif parallèle trois niveaux les commandes MLI et hystérésis.

**3.1. Commande MLI [6],[12]:**

Le principe de cette technique consiste à générer un signal à fréquence de découpage fixe, dont la largeur de l'impulsion est une fonction linéaire d'une grandeur de consigne. Ceci est réalisable de manière analogique ou numérique, la consigne est soit un signal continu, ou bien un mot binaire généré par un organe de commande numérique. Les modulateurs analogiques se basent sur la comparaison d'une ou plusieurs porteuses triangulaires (dents de scie) avec une consigne analogique (MLI intersective). La fréquence de cette porteuse indique la fréquence de découpage et la variation de la consigne provoque une variation de la largeur de l'impulsion au plus tard après une période de découpage. Les modulateurs numériques sont réalisés à partir de compteurs programmables pilotés par une fréquence d'horloge très supérieure à la fréquence de découpage[6].

Dans notre cas, comme le montre la figure 3.3, la MLI est une intersection entre l'erreur

déterminée par la différence entre le courant généré par le filtre actif et celui des harmoniques de référence, et deux porteuses triangulaires bipolaires identiques en dents de scie décalées l'une de l'autre d'une demi période de hachage. La commande d'un bras de l'onduleur constituant le filtre est résumée dans les deux étapes suivantes [12]:

**Etape1:** détermination, des signaux intermédiaires  $v_{i0}$  et  $v_{i1}$ .

Si (erreur)  $\geq$  (porteuse1)  $\Rightarrow$  ( $v_{i1}=1$ )

Si (erreur)  $<$  (porteuse1)  $\Rightarrow$  ( $v_{i1}=0$ )

Si (erreur)  $\geq$  (porteuse2)  $\Rightarrow$  ( $v_{i0}=0$ )

Si (erreur)  $<$  (porteuse2)  $\Rightarrow$  ( $v_{i0}=-1$ )

**Etape2:** détermination des signaux de commande des interrupteurs  $T_{ij}$  et  $T_{ij}'$  ( $j = 1,2$ ).

Si ( $v_{i0}+v_{i1}=1$ )  $\Rightarrow$  ( $T_{i1}=1$  et  $T_{i2}=1$ )

Si ( $v_{i0}+v_{i1}=0$ )  $\Rightarrow$  ( $T_{i1}=0$  et  $T_{i2}=1$ )

Si ( $v_{i0}+v_{i1}=-1$ )  $\Rightarrow$  ( $T_{i1}=0$  et  $T_{i2}=0$ )

$T_{i2}' = \text{not}(T_{i1})$ ,  $T_{i1}' = \text{not}(T_{i2})$

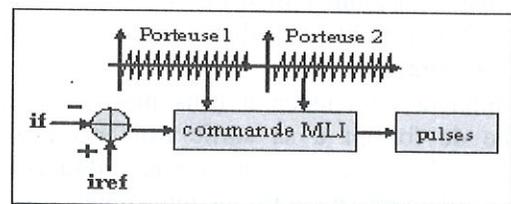


Figure 3.3. Principe de la commande MLI intersective

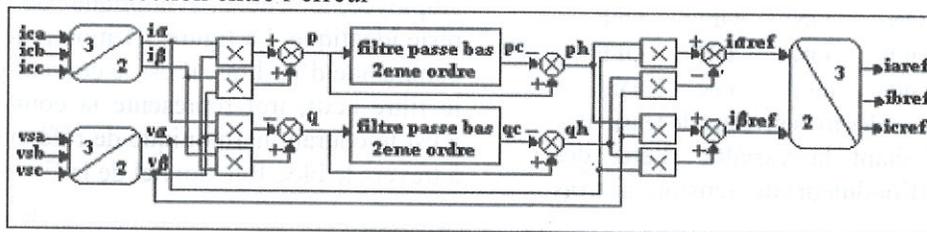


Figure 3.2. Bloc fonctionnel de calcul des courants harmoniques de référence

**3.2. Commande hystérésis [6],[8]:**

Cette commande, basée sur le principe du contrôle direct en courant, consiste à imposer les commutations à l'onduleur dans l'objectif de maintenir le courant dans une fourchette bien définie. La structure de la commande se caractérise par l'absence de modulateur. On utilise le fait que les tensions instantanées générées par l'onduleur produisent une ondulation de courant triangulaire à l'échelle de la période de découpage. Cette ondulation est utilisée pour l'auto commutation de l'onduleur à l'aide d'une chaîne à hystérésis qui remplacera le modulateur. La commande en fourchette est donc supposée être capable d'imposer la pente

(positive ou négative) des courants par l'intermédiaire des tensions de l'onduleur. En effet, la détection de l'erreur de courant la plus élevée permet d'imposer, à travers l'état de l'hystérésis correspondante, la combinaison de commande triphasée qui

donne l'évolution souhaitée du courant de phase associé. Un des désavantages de cette méthode est que, dans certaines configurations, les courants sortent de leurs enveloppes, et que cette dernière a tendance à induire un fonctionnement à fréquence libre qui peut causer des problèmes de filtrage ou de nuisance sonore[6]. Dans notre étude, comme le montre la figure 2.4, la commande hystérésis consiste à utiliser deux

comparateurs hystérésis : un pour commander  $Ti1, Ti2'$ , et l'autre pour commander  $Ti2, Ti1'$ .

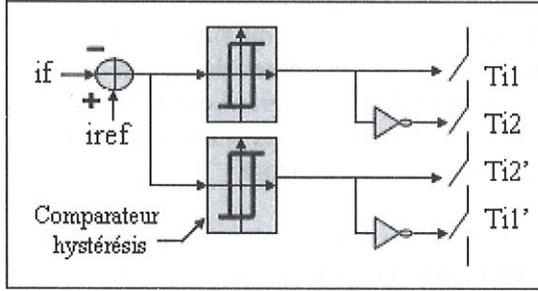


Figure 3.4. Principe de la commande hystérésis

**4. Régulation des tensions continues :**

Il est impératif de garder à valeurs constantes les tensions continues  $v_{c1}(t)$  et  $v_{c2}(t)$  aux bornes des condensateurs  $C_1$  et  $C_2$ , afin d'assurer à l'onduleur une alimentation permanente en tension continue. Pour cela, nous avons adopté le schéma de régulation illustré dans la figure 4.

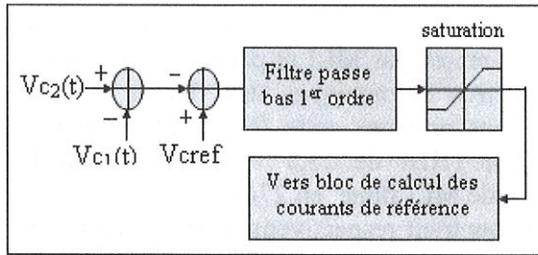


Figure 4. Circuit de régulation des tensions continues

**5. Application de la régulation floue au filtre actif A trois niveaux :**

**5.1. Intérêt :**

La logique floue sert à représenter des connaissances incertaines et imprécises, tandis que la commande floue permet de prendre une décision même si l'on ne peut estimer les entrées/sorties qu'à partir de prédicats incertains. Souvent, l'approche floue est introduite dans des boucles de régulation ou d'asservissement des processus industriels présentant des informations imprécises, incertaines et qualitatives, dans des boucles de régulation parfois incomplètes [13].

**5.2 Schéma de principe d'un régulateur flou**

Souvent, le régulateur flou possède deux entrées (l'erreur et sa dérivée) et une sortie représentant la commande floue elle-même.

La figure 5.1 montre le schéma de principe d'un régulateur flou.

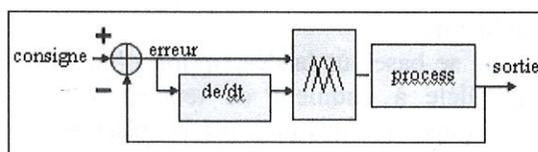


Figure 5.1. Schéma de principe d'un régulateur flou

**5.3 Structure**

La structure conventionnelle d'une commande floue est représentée par la figure 5.2. Elle se compose de quatre blocs distincts:

- **bloc1: base de règles et définitions**  
Dans ce bloc, d'existence virtuelle, on trouve l'univers de discours des entrées et de la sortie du régulateur flou, ainsi que la base des règles.
- **Bloc2: interface de fuzzification**  
Dans lequel sont définies les fonctions d'appartenance (singletons, triangulaires, trapézoïdales ou gaussiennes) des

entrées/sortie à chaque partition floue de l'univers de discours.

- **Bloc3: mécanisme d'inférence**  
Dans lequel on conçoit les règles floues du type: Si erreur est... Et de/dt est..., Alors la commande est....
- **Bloc4: interface de défuzzification**  
Dans lequel on attribut à la grandeur de sortie floue une valeur réelle (plusieurs méthodes existent, les plus utilisées sont celles du maximum et du barycentre).

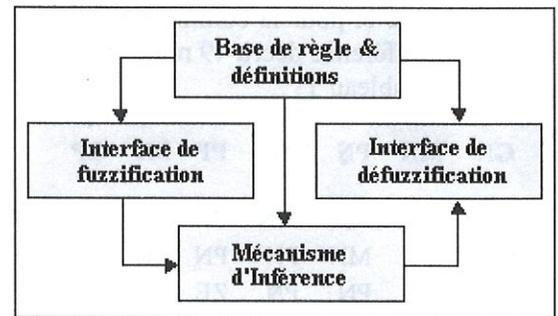


Figure 5.2. Structure d'une commande floue

**5.4. Contrôle flou du courant généré par le filtre actif :**

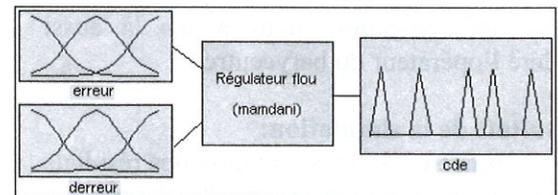


Figure 5.3 Entrées et sortie du contrôleur flou

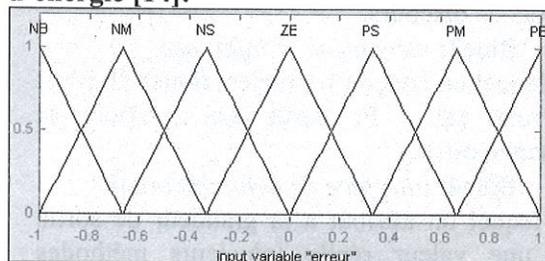
Comme l'illustre la figure 5.3, pour la fuzzification nous avons utilisé des fonctions d'appartenance gaussiennes pour l'erreur et sa dérivée, et triangulaires pour la commande floue. Le mécanisme d'inférence décrit cinq règles floues :

1. Si e est nulle Alors cde est nulle.
2. Si e est positive Alors cde est grand positive.

3. Si e est négative Alors cde est grand négative.
4. Si e est nulle Et de est positive Alors cde est négative.
5. Si e est nulle Et de est négative Alors cde est positive.

Enfin, pour la défuzzification, nous avons utilisé l'opérateur du barycentre.

**5.5. Contrôle flou des tensions continues aux bornes des condensateurs de stockage d'énergie [14]:**



**Figure 5.4.** Entrées/sortie du 2ème régulateur flou  
 Dans ce cas, la fuzzification consiste à utiliser des fonctions d'appartenance triangulaires pour l'erreur, sa dérivée et pour la commande floue. Le mécanisme d'inférence décrit 49 règles floues résumées dans le tableau T<sub>2</sub> :

e	de	GN	MN	PN	ZE	PP	MP	GP
GN	GN	GN	MN	MN	PN	PN	ZE	
MN	GN	MN	MN	PN	PN	ZE	PP	
PN	MN	MN	PN	PN	ZE	PP	PP	
ZE	MN	PN	PN	ZE	PP	PP	MP	
PP	PN	PN	ZE	PP	PP	MP	MP	
MP	PN	ZE	PP	PP	MP	MP	GP	
GP	ZE	PP	PP	MP	MP	GP	GP	

Tableau T<sub>2</sub>

Pour la défuzzification, nous avons là aussi considéré l'opérateur du barycentre.

**6. Résultats de la simulation:**

Avant de procéder à la présentation des résultats de simulation, il est nécessaire de définir le facteur de distorsion harmonique du courant THDI:

$$THDI = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I^2}}$$

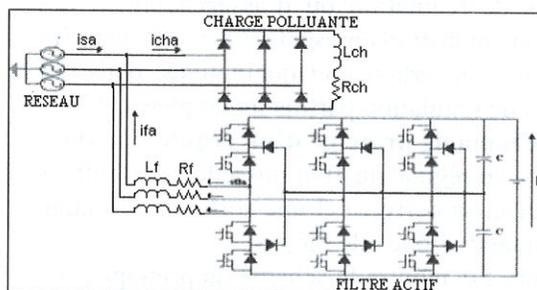
En réalité, l'objectif principal de ce travail est l'étude d'un filtre actif constitué d'un onduleur de tension à trois niveaux, puis de contribuer dans la réduction des harmoniques en utilisant ce type de filtre actif.

Le logiciel de simulation est SIMULINK complément de MATLAB Toolbox. Nous avons simulé le fonctionnement du filtre actif à trois niveaux connecté en parallèle à un réseau triphasé parfait dont le courant est pollué par la présence d'harmoniques dus à un redresseur en pont de Graëtz à six thyristors.

La figure 6.1 montre le circuit équivalent de l'ensemble réseau-filtre actif-charge polluante. Malheureusement, les résultats que nous avons obtenus se limitent aux premiers instants de fonctionnement. En effet, les six premières figures (6.2 à 6.7) représentent respectivement le courant de source pollué, la dépollution faite par filtrage actif à trois niveaux commandé en MLI, puis par hystérésis, et les spectres harmoniques respectifs à 27 ms. Ici, le THD du courant a chuté de 28,5% à 12%.

Les figures 6.8 à 6.11 illustrent le résultat de l'application de la régulation floue sur le courant généré par le filtre actif commandé respectivement par MLI et par hystérésis. Selon les spectres harmoniques des figures 6.10 et 6.11, nous pouvons cette fois-ci constater une chute du THDI de 28,5 % à 9,76% par la commande MLI floue en 27ms. Les figures 6.12 à 6.15 montrent respectivement les résultats des régulations classique et floue des tensions continues  $v_{c1}(t)$  et  $v_{c2}(t)$  aux bornes des condensateurs C<sub>1</sub> et C<sub>2</sub>.

La régulation classique en 40 ms, indique une oscillation de  $v_{c1}(t)$  et  $v_{c2}(t)$  autour d'une valeur fixe. La régulation floue en 20 ms, montre aussi une oscillation autour d'une valeur fixe. Les figures 6.16 et 6.17 représentent les courant harmoniques triphasés de référence, et l'allure du courant produit par le filtre actif dans la phase a.



**Figure 6.1.** Circuit équivalent de l'ensemble

**6. Conclusion**

Cet article se base sur la description d'un filtre actif parallèle à onduleur de tension à trois niveaux. Nous en avons présenté la structure, le principe de fonctionnement, la commande et la régulation. Ensuite, dans l'espoir d'améliorer les résultats obtenus, nous avons appliqué la logique

floue d'une part sur le courant généré par le filtre actif, et sur les tensions continues aux bornes des

condensateurs de l'autre part. La conclusion que nous pouvons tirer est que la commande MLI floue est la mieux adaptée aux structures multiniveaux.

LISTE DES SYMBOLES

symbol	signification
$i_s, i_c, i_f$	Courant de source, de charge, du filtre actif.
$T_{ij}$	Interrupteur. $i=a,b,c$ $j=1,2$
$p, p_h, q, q_h$	Puissances instantanée active, active harmonique, réactive, réactive harmonique.
$i_{ref}$	courant harmonique de référence.
$R, L$	résistance, inductance.
$U_i$	Tension de sortie d'un bras.
$de/dt, cde$	dérivée de l'erreur, commande.
$I_n, I_1$	Valeurs efficaces du courant harmonique de rang $n$ et du courant fondamental.

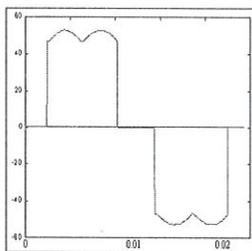


Figure 6.2

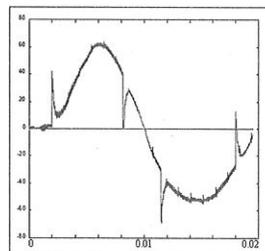


Figure 6.3

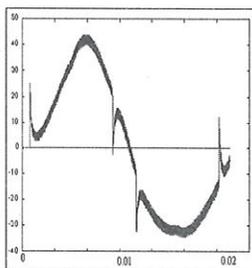


Figure 6.4

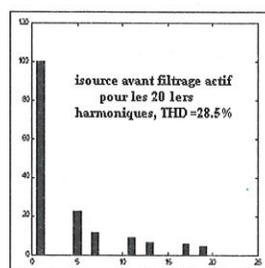


Figure 6.5

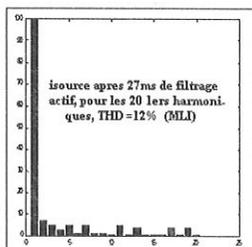


Figure 6.6

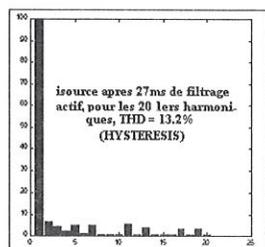


Figure 6.7

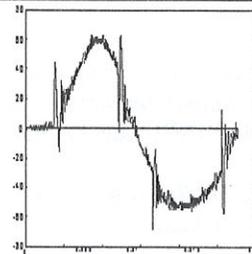


Figure 6.8

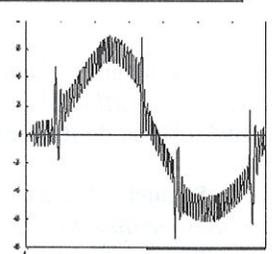


Figure 6.9



Figure 6.10

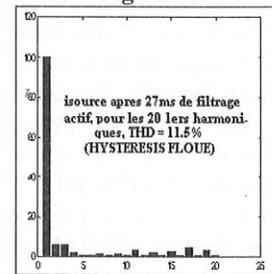


Figure 6.11

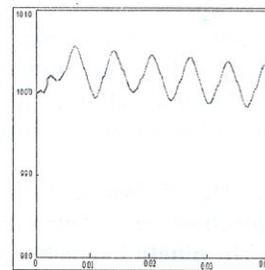


Figure 6.12

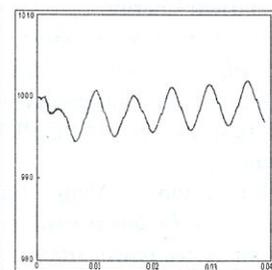


Figure 6.13

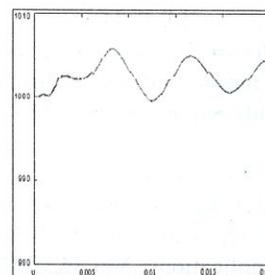


Figure 6.14

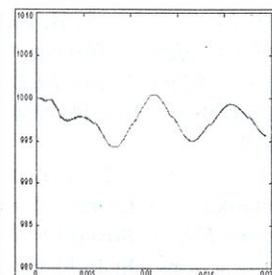


Figure 6.15

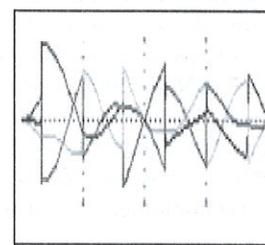


Figure 6.16

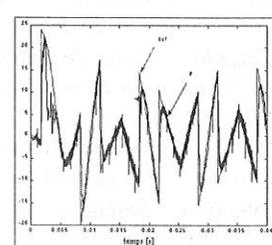


Figure 6.17

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] M. Pereira, K. sadek. "Application of Power Active Filters for Mitigation of Harmonics". In The International Symposium On Electric Power Engineering, Stockholm Power Tech, Sweden June 18-22, 1995.

[2] P,T. Cheng, S. Bhattacharya and D. Divan. "Experimental Verification of Dominant Harmonic Active for High Power applications". In IEEE Transactions On Industry Application, Vol 36, N°2, March/April 2000, pp567-577.

- [3] P. Nonnon. "Contribution à l'étude d'un redresseur à MLI à perturbations minimales au réseau". Thèse de doctorat de l'INPL de Toulouse 1994.
- [4] G. Segulier. "Electronique De Puissance: Les Fonctions De Base Et Leurs Principales Applications". 7<sup>ème</sup> édition, Dunod, Paris, 1999.
- [5] "Les Différentes Solutions De Réduction Des Harmoniques". Article tiré du site Internet: [www.jautomatise.com](http://www.jautomatise.com).
- [6] H. Foch, F. Forest, T. Meynard. "Onduleurs de tension Structures. Principes. Applications, Mise en oeuvre". Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique, D3176, D3177.
- [7] P.F Seixas, M.a Severo Mendes, P Donoso Garcia. "An Algebraic PWM Method For Three Level Voltage Source Inverter". In the **thirty-fifth** Annual Meeting And World Conferences On Industrial Applications Of Electrical Energy.
- [8] J. Fernando A. Silva. "Sliding Mode Control Of Multilevel Power Converters". In The **nineth** International Conference on Power Electronics and Motion Control -EPE-PEMC 2000 Košice, Slovak Republic.
- [9] F. Zhuo, J. Yang, Junfei Hu, Z. Wang. "Main circuit and control strategy for three-phase four-wire shunt active power filter". In The **nineth** International Conference on Power Electronics and Motion Control -EPE-PEMC 2000 Košice, Slovak Republic.
- [10] M. Sedighy, S. B. Dewan, and F.P. Dawson. "A Robust Digital Current Control Method for Active Power Filters". In *IEEE Transactions On Industry Applications*, **Vol.36**, N°4, July/august 2000, pp1158-1164.
- [11] Y. Sato, T. Kawase, M. Akiyama, and T. Kataoka. "A Control Strategy for General-Purpose Active Filters Based On Voltage detection". In *IEEE Transactions On Industry Applications*, **Vol.36**, N°5, September/october 2000, pp1405-1412.
- [12] K. Guedamsi, E.M. Berkouk, K. Aliouane. "Contribution à la réalisation de la stratégie MLI triangulo-sinusoidale à deux porteuses de commande de l'onduleur à trois niveaux". SNGE'2001, Biskra 29-31 Octobre.
- [13] P. Borne, J. Rozinoer, J.Y. Dieullot, et L. Dubois. "Introduction A La Commande Floue". Collection Sciences & Technologies, Edition TECHNIP 1998.
- [14] J. W. Dixon, J. M. Contardo, L. A. Morán. "A Fuzzy-Controlled Active Front-End Rectifier With Current Harmonic Filtering Characteristics and Minimum Sensing Variables". In *IEEE Transactions On Power Electronics*, **Vol 14**, N° 4, July 1999, pp. 724-729.