

## Commande hybride par RST-flou d'un hacheur élévateur avec correction du facteur de puissance

Jean Nirinarison RAZAFINJAKA<sup>1\*</sup>, Tsiory Patrick ANDRIANANTENAINA<sup>1</sup>  
et Charles Bernard ANDRIANIRINA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Laboratoire d'Automatique, Ecole Supérieure Polytechnique, Université d'Antsiranana, Madagascar*

<sup>2</sup> *Laboratoire d'Electronique Industrielle, Ecole Supérieure Polytechnique, Université d'Antsiranana*

---

\* Correspondance, courriel : [razafinjaka@yahoo.fr](mailto:razafinjaka@yahoo.fr)

### Résumé

Le papier propose l'étude d'un convertisseur AC-DC avec correction du facteur de puissance. Le taux de distorsion harmonique du courant (TDH) ainsi que les performances de réglage sont pris comme critères d'évaluation. Le système est ainsi conçu pour respecter la norme standard IEC. La commande par hystérésis est appliquée à la boucle de courant et le régulateur polynomial RST, dont l'appellation est due aux trois polynômes  $R(z)$ ,  $T(z)$  et  $S(z)$ , est combiné avec la logique floue pour la boucle de tension. La nouvelle combinaison proposée de ces deux types de contrôleur a donné de très bons résultats tant en termes de réglage que l'obtention d'un TDH minime.

**Mots-clés :** *hacheur élévateur, correction de facteur de puissance, taux de distorsion harmonique (TDH), régulateur RST, logique floue, commande hybride.*

### Abstract

#### Hybrid controller fuzzy-RST for an AC-DC converter with power factor correction

This paper deals with a study of an AC-DC converter with power factor correction. A new controller obtained by hybridization of a fuzzy logic controller and a polynomial RST one is here proposed. The Total Harmonics Distortion (THD) and regulation performances are taken as criteria to appreciate this new controller. This new controller is applied on the voltage loop and the command by hysteresis for the current one. Simulations show that this hybrid controller is realizable and leads to good performances as test tracking, disturbance rejection and small THD.

**Keywords :** *boost AC-DC converter, power factor correction, total harmonic distortion, RST controller, fuzzy logic, hybrid controller.*

### 1. Introduction

Actuellement, on assiste à la prolifération d'usage des matériels informatiques et des appareils électroménagers nécessitant des alimentations redressées utilisant des filtres à condensateur. Bien que de moindre coût, ces types d'alimentation engendrent des harmoniques au niveau du réseau diminuant ainsi la qualité d'énergie. On peut citer pour conséquences [1, 2] :

- pertes en ligne ;
- un surdimensionnement des transformateurs de distribution ;
- un vieillissement accéléré des condensateurs de compensation de réactif éventuellement présents sur le réseau BT par la faible impédance qu'ils opposent aux harmoniques de courant. Leur courant efficace nominal risque d'être dépassé.

Il est alors indispensable de diminuer voir annuler les effets de ces harmoniques injectés au réseau. Pour pallier ces différents problèmes, plusieurs solutions sont proposées [2 - 6] et résumées comme suit :

- Obtenir un courant sinusoïdal et en phase avec la tension ;
- Assurer un TDH (%) aussi petit que possible afin de respecter la norme standard (exemple la norme IEC-61000-3-2 pour les systèmes de classe D) ;
- Assurer une tension de sortie (côté continu) constante.

Dans cet article, une nouvelle commande appelée commande hybride avec RST-flou (l'appellation du régulateur RST est due aux trois polynômes  $R(z)$ ,  $S(z)$  et  $T(z)$  qui le constituent) est utilisée pour le contrôle de la boucle de tension et la commande par hystérèse (fourchette de courant) pour le courant. D'abord, la boucle de courant est étudiée pour pouvoir être ensuite considérée comme parfaite. La comparaison des résultats obtenus avec un régulateur standard PI est adoptée afin de dégager l'efficacité de la méthode proposée.

## 2. Méthodologie

### 2-1. Facteur de puissance et taux de distorsion harmonique

Dans le présent article, le taux de distorsion harmonique (TDH) est pris comme critère d'évaluation pour quantifier le taux de réinjection harmonique dans le réseau. Le facteur de puissance (FP) est défini comme suit :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{V \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}{V \cdot I} = \frac{I_1 \cdot \cos \varphi_1}{I} \quad (1)$$

avec,  $S$ ,  $P$ , désignant respectivement les puissances apparente et active ;  $I$ ,  $I_1$  et  $\varphi_1$ , les valeurs efficaces du courant et du fondamental, le déphasage entre la tension et le courant d'entrée.

La valeur efficace du courant est :

$$I = \sqrt{\left( \sum_{k=1} I_k^2 \right)} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{k=2} I_k^2} \quad (2)$$

$I_k$ , harmonique du courant de rang  $k$ .

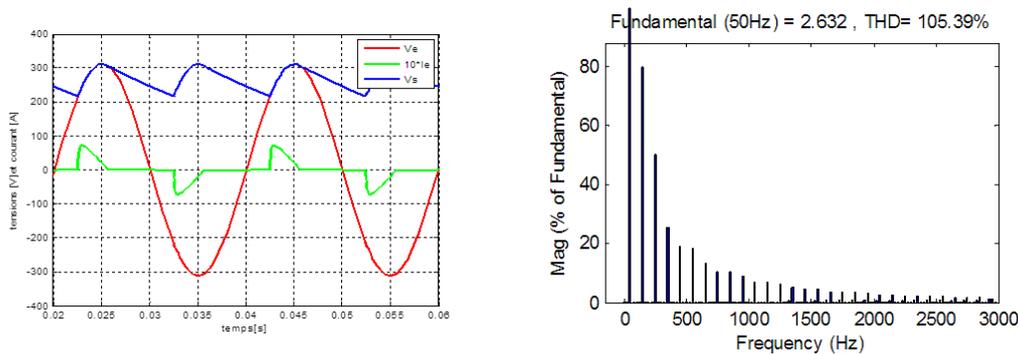
L'expression du TDH est définie comme suit

$$TDH = \sqrt{\left( \frac{I_2}{I_1} \right)^2 + \left( \frac{I_3}{I_1} \right)^2 + \dots} = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{k=2} I_k^2} \quad (3)$$

Les relations (1), (2) et (3) donnent alors :

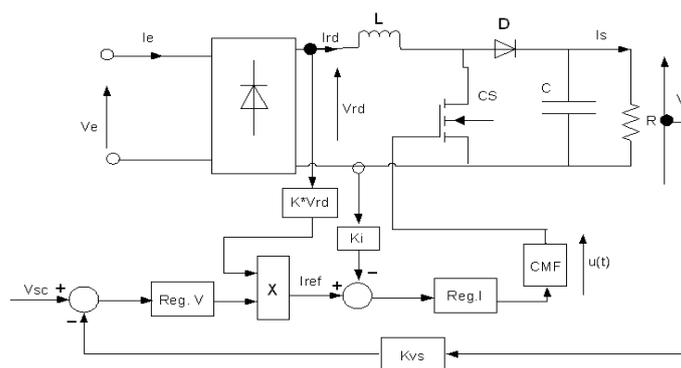
$$F_p = \frac{\cos \phi_1}{\sqrt{1 + TDH^2}} \tag{4}$$

Le facteur de puissance est donc lié au TDH. Ceci montre que ce TDH peut être utilisé comme un paramètre quantifiant le degré de pollution harmonique du réseau (dans la pratique, on exprime le TDH en %). Pour un courant purement sinusoïdal et en phase avec la tension, le facteur de puissance est égal à l'unité ( $F_p = 1$ ). Les **Figures 1** montrent respectivement les allures de la tension et du courant d'entrée pour un redresseur classique ( $C = 100 [\mu F]$ ,  $R = 200 [\Omega]$ ) et le spectre du courant.



**Figure 1 :** Allures de la tension et du courant d'entrée et spectre du courant d'entrée

On note une valeur très élevée du TDH (105,39 %) reflétant une pollution harmonique injectée au niveau réseau et engendrant alors les différents problèmes cités auparavant. Des convertisseurs AC-DC avec correction du facteur de puissance existent en triphasé ou en monophasé utilisant des commandes non linéaires ou linéaires [5, 9, 10]. En monophasé, plusieurs topologies sont proposées [4, 8]. Dans le cadre de cet article, on étudie la version classique. La structure générale présentant un convertisseur AC-DC monophasé classique avec correction du facteur de puissance (Boost PFC) est donnée par la **Figure 2**.

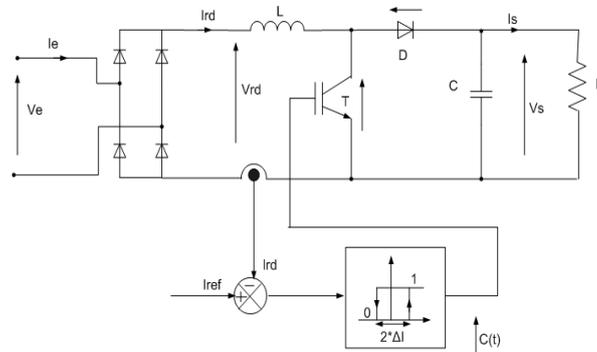


**Figure 2 :** Schéma de principe d'un Boost PFC

L'existence de deux boucles est mise en évidence pour obtenir les solutions mentionnées plus haut. La boucle de tension constitue la boucle principale et celle du courant, la boucle interne. La référence du courant  $I_{ref}$  est obtenue en multipliant l'image de la tension redressée ( $K \cdot V_{rd}$ ) par la sortie du régulateur de tension. La boucle de courant contrôlée par une commande à hystérésis est commune pour les deux types de régulateur appliqués à la boucle de tension.

## 2-2. Boucle de courant

La commande par hystérésis est choisie du fait du non linéarité due à la présence du convertisseur statique. Elle sera appliquée dans les deux modes de régulation pour la boucle de tension. Le **Schéma** de principe est donné par la **Figure 3**.

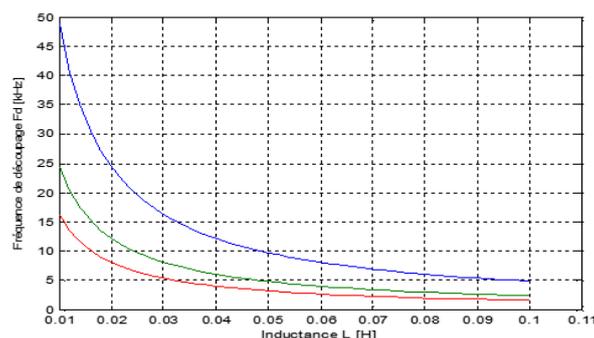


**Figure 3 :** Schéma de principe pour la boucle de courant

La consigne du courant  $I_{ref}$  doit être en phase avec la tension d'entrée. Il est aussi utile voire indispensable d'avoir  $I_{ref} \approx I_{rd}[1]$  : une variation très rapide de  $I_{rd}$  autour de sa référence  $I_{ref}$  doit être ainsi assurée ce qui explique la nécessité de travailler avec une fréquence de découpage élevée ( $F_d > 10$  [kHz]). La valeur de l'inductance  $L$  est alors calculée suivant l'ondulation  $\Delta I$  du courant. La tension de sortie  $V_s$  et la tension redressée  $V_{rd}$  sont supposées constantes [1, 7]. L'expression donnant l'inductance  $L$  est comme suit :

$$F_d = \frac{1}{T_d} = \frac{V_{rd}(V_s - V_{rd})}{2 \cdot L \cdot \Delta i \cdot V_s} \quad (5)$$

La **Figure 4** présente les différentes courbes donnant la fréquence de découpage  $F_d$  en fonction de l'inductance  $L$  suivant les ondulations du courant ( $V_s = 400$  [V],  $V_{rd} = 235$  [V]) :



**Figure 4 :** Courbes donnant  $F_d$  en fonction de  $L$  suivant  $\Delta I$

## 2-3. Modélisation de la boucle de tension

La boucle de tension délivre le signal pour former la référence de courant  $I_{ref}$  qui doit être sinusoïdal conformément à la tension d'entrée. La boucle de courant est très rapide par rapport à celle de la tension et comme mentionné auparavant, il est supposé que  $I_{red} \approx I_{ref}$ . Il est alors possible d'adopter quelques approximations en partant du bilan de puissances [1] et d'aboutir à une expression suivant la relation (6) :

$$\frac{V_s(p)}{I_{red}(p)} \approx \frac{V_s(p)}{I_{ref}(p)} \tag{6}$$

*ainsi,*

$$\frac{V_s(p)}{I_{red}(p)} = \frac{V_M}{4.V_s} \cdot \frac{R}{1 + \frac{R.C}{2} p} \tag{7}$$

avec  $V_M$  l'amplitude de la tension d'entrée,  $V_s$  la tension de sortie,  $R$  représentant la charge et  $C$  la valeur du condensateur.

On peut alors en déduire la fonction de transfert de la boucle ouverte :

$$G(p) = \frac{K}{1 + pT} \tag{8}$$

avec,

$$K = \frac{V_M \cdot R}{4 \cdot V_s} \text{ et } T = \frac{RC}{2} \tag{9}$$

### 2-4. Régulateur PI

La fonction de transfert d'un tel régulateur est donné par,

$$G_R(p) = \frac{1 + p.A.T_i}{p.T_i} \tag{10}$$

Le gain  $A$  et la constante de temps intégrale  $T_i$  peuvent être déterminés en imposant une fréquence de coupure  $F_c$  pour la boucle fermée et de compenser la constante de temps dominante du système. On a alors,

$$\begin{cases} A.T_i = T \\ A = \frac{T}{2K.\pi.F_c} \end{cases} \tag{11}$$

### 2-5. Régulateur hybride RST-flou

L'hybridation part de la loi de commande du contrôleur RST et de faire apparaître la commande à priori.

$$R(z).U(z) = T(z).Y_c(z) - S(z).Y(z) \tag{12}$$

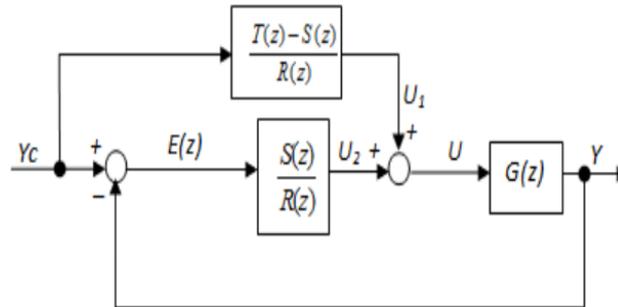
Les démarches pour la synthèse du régulateur polynomial RST sont bien explicitées dans [11]. En remarquant que :

$$S(z).Y_c(z) - S(z).Y_c(z) = 0 \tag{13}$$

La combinaison des relations (12) et (13) permet d'obtenir,

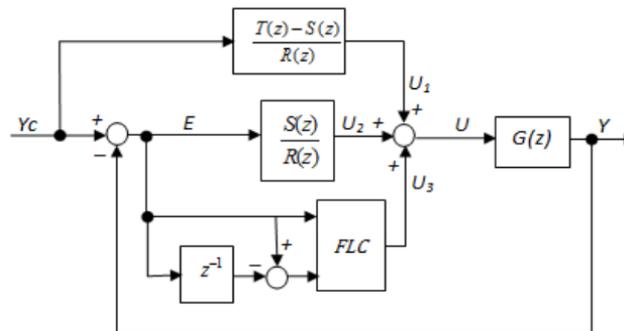
$$R(z).U(z) = Y_c(z)[T(z) - S(z)] + S(z)[Y_c(z) - Y(z)] \quad (14)$$

La traduction de la relation (14) en **Schéma** fonctionnel aboutit à la structure du RST avec la commande à priori.



**Figure 5 :** Régulateur RST faisant ressortir la commande à priori

Comme l'erreur  $E(z)$  est mise en évidence dans le **Schéma** fonctionnel, il est alors possible de mettre en parallèle un régulateur par logique floue. La structure est donnée par la **Figure 6**.



**Figure 6 :** Structure du régulateur hybride proposé

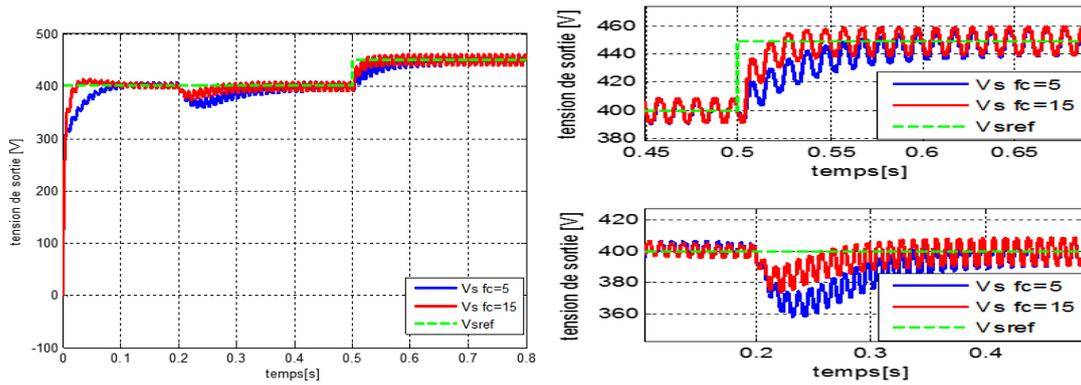
La commande  $U(z)$  a ainsi trois composantes :

$$U(z) = U_1(z) + U_2(z) + U_3(z) \quad (15)$$

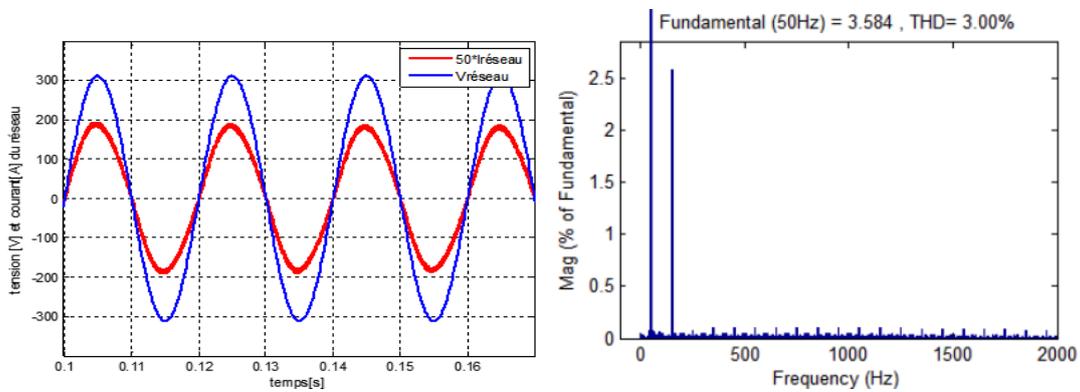
- $U_1(z)$  qui forme la commande à priori : elle joue un rôle important pour la poursuite de la consigne ;
- $U_2(z)$  représente la partie par contre-réaction de la commande. Elle contribue à améliorer la précision ;
- $U_3(z)$ , issue du régulateur flou assurant une robustesse vis-à-vis de la variation des paramètres.

### 3. Résultats et discussion

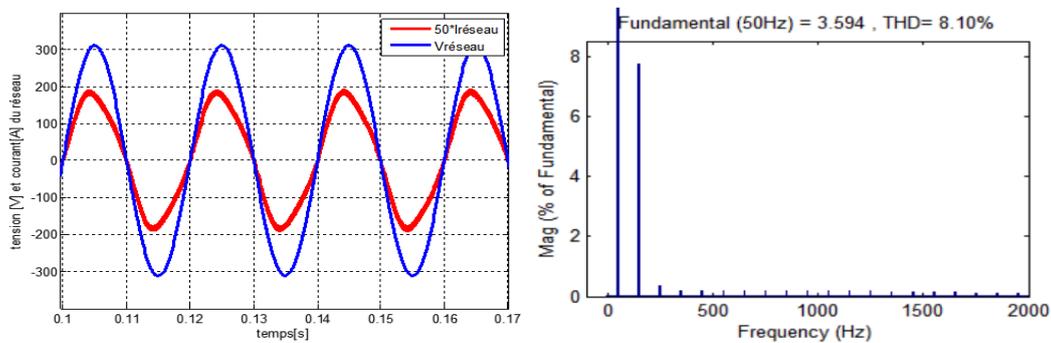
Les paramètres de simulation sont :  $V_M = 220$  [V],  $V_S = 400$  [V],  $C = 470$  [ $\mu$ F],  $R = 328$  [ $\Omega$ ]. Les **Figures 7, 8 et 9** présentent les résultats de simulation pour les fréquences de coupure :  $F_c = 5$  [Hz] et  $F_c = 15$  [Hz]. A  $t = 0.2$  [s], on a fait un saut de charge de 100 % à 50 % et à  $t = 0.5$  [s], un saut de consigne de 12.5 %.



**Figure 7 :** Allures de la tension de sortie Vs suite à un saut de charge et saut de consigne avec leur zoom pour  $F_c = 5$  [Hz] et  $F_c = 15$  [Hz]



**Figure 8 :** Allure du courant et son spectre pour  $F_c = 5$  [Hz]



**Figure 9 :** Allure du courant et son spectre pour  $F_c = 15$  [Hz]

Au vu de ces différents résultats, on peut tirer les conclusions suivantes :

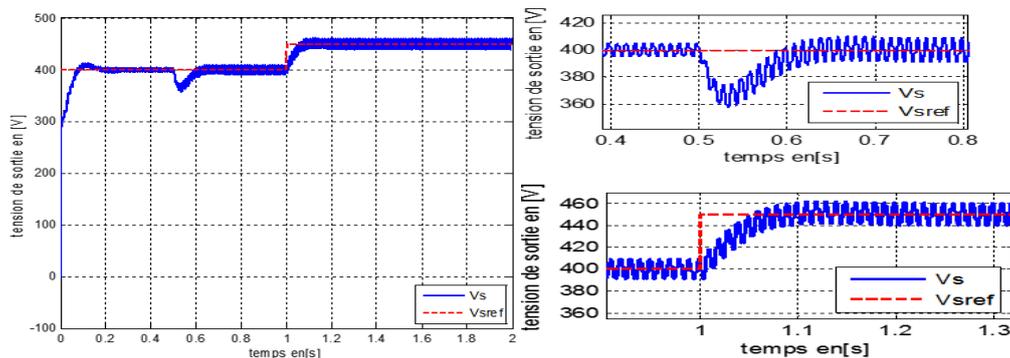
- Le système réagit bien face à la perturbation matérialisée par un saut de charge et arrive à suivre la variation de la consigne ;
- Le courant d'entrée est sinusoïdal et en phase avec la tension ;
- Pour la fréquence de coupure de 15 [Hz], on peut constater :

Un réglage plus rapide toutefois on peut noter une distorsion plus notable :

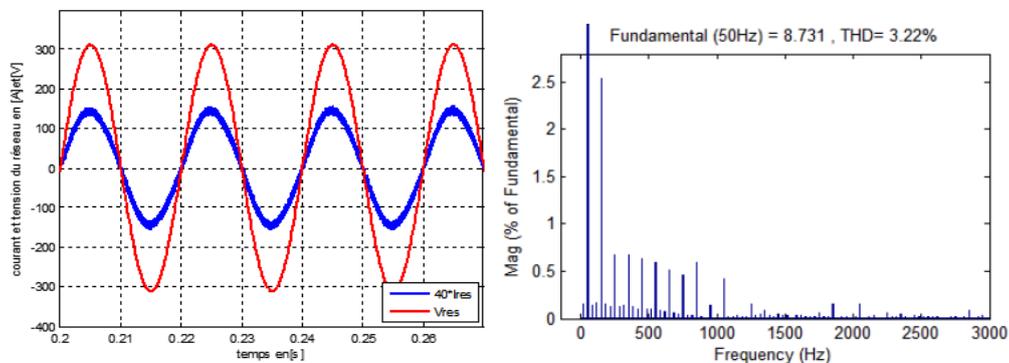
- $F_c = 5$  [Hz]      TDH = 3 % ;
- $F_c = 15$  [ Hz]      TDH = 8,10 % ;

- une ondulation de la tension de sortie. Ce taux d'ondulation dépend de la valeur de  $C$ . Cette ondulation peut être diminuée en augmentant la valeur de  $C$  mais les harmoniques vont augmenter du fait de la croissance de la nature impulsionnelle du courant d'entrée ;
- Après l'analyse de ces spectres, on peut dire qu'un réglage rapide entraîne toujours une distorsion marquée : le TDH est élevé.

Les mêmes paramètres qu'avec le régulateur PI sont utilisés pour le contrôleur hybride RST-flou. La période d'échantillonnage pour le régulateur RST-flou est de  $h = 1$  [ms]. Les **Figures 10 et 11** présentent les résultats de simulation obtenus avec la commande hybride proposée. A  $t = 0.5$ [s], un saut de charge matérialisé par une diminution de la résistance de charge  $R$  de 100 % à 50 % est appliqué et à  $t = 1$  [s], un saut de consigne de 12.5 %.



**Figure 10 :** Allures de la tension de sortie  $V_s$  suite à un saut de charge et à un saut de consigne avec leur zoom



**Figure 11 :** Allure du courant et son spectre

D'après ces résultats, on peut tirer que :

- Le système muni du RST-flou réagit bien face à la perturbation et arrive à suivre la variation de la consigne ;
- Le courant d'entrée est sinusoïdal et en phase avec la tension ;
- Après l'analyse de ces spectres, le  $TDH = 3.22\%$  ;
- On a presque le même TDH obtenu qu'avec le régulateur PI à  $F_c = 5$  [Hz]. Toutefois le réglage est plus rapide.

Le régulateur RST seul appliqué au hacheur élévateur avec correction de facteur de puissance [12] a donné des résultats très satisfaisants. Le contrôleur hybride RST-flou appliqué à un système de conversion d'énergie éolienne [13] a permis aussi d'avoir de bons résultats.

## 4. Conclusion

Dans cet article, une nouvelle structure de commande hybride a été proposée. L'hybridation consiste à combiner le régulateur polynomial RST avec la logique floue en faisant ressortir une commande à priori pour le régulateur RST dans le but d'avoir accès à l'erreur. Cette erreur et sa variation sont ensuite utilisées comme entrées pour le contrôleur flou. Les résultats de simulation nous montrent la possibilité de l'hybridation de ces deux régulateurs :

- la tension et le courant du réseau sont bien en phase : le facteur de puissance est proche de l'unité ;
- la tension de sortie du Boost PFC est constante ;
- le taux de distorsion harmonique respecte la norme IEC-61000-3-2.

En agissant sur les gains de normalisation et de dénormalisation pour le contrôleur flou, on peut rendre cette commande hybride plus rapide et plus performante mais il faut noter que vouloir un réglage rapide engendre une augmentation du taux de distorsion harmonique.

## Références

- [1] - G. FELD, A. CUNIERES, "Etude et simulation d'un AC-DC à absorption sinusoïdale de courant", Publication ENS Cachan, (2009).
- [2] - SABATA M. JEAN N. RAZAFINJAKA, JEAN DANIEL LAN SUN LUK, "Réglage par logique floue d'un Boost PFC", article présenté au Forum de la Recherche organisé par le MENRS, Diego Suarez, Madagascar, (2010).
- [3] - A. Benaïssa, "Commande par mode de glissement d'un convertisseur AC-DC avec correction de facteur de puissance," Acta Electrotehnica, Vol. 47, N°2, (2006) 67 - 72.
- [4] - B. SINGH, "Modelling and simulation of power factor corrected AC-DC converters", IJEEE, (2003).
- [5] - H. TEDJINI, Y. MESLEM, M. RAHLI, "Contrôle non linéaire avancé du redresseur MLI triphasé en absorption sinusoïdale de courant", Acta Electrotehnica, Vol. 49, N°3, (2008) 231 - 300 p.
- [6] - S. KERAÏ, G. MEKI, A. FODIL, K. GHAF FOUR, "Calcul de convertisseur AC-DC avec correction de facteur de puissance, Publication LMER, Département d'Electronique, Université Abou Bakr Belkaid, Algérie, (2003).
- [7] - B. MULTON, N. BERNARD, H. BEN AHMED, "Le redresseur MLI en absorption sinusoïdale de courant", Revue ENS Cachan, Antenne de Bretagne, (2003).
- [8] - B. AKIM, Comparison of Conventional and Interleaved PFC Boost Converters for Fast and Efficient Charge of Li-ion Batteries Used in Electrical Cars, International Conference on Power and Energy Systems, Vol. 12, (2012) 499 - 504.
- [9] - M. RENJU, N. AGARWAL, M. SHAH, P. N. TEKWANI, Design, Modelling and Simulation of Three- Phase Front - End for Unity Power Factor and Reduced Harmonics in Line Current, Nirma University International Conference of Engineering (NUI-CONE), (2013).
- [10] - C. B. ANDRIANIRINA, Correcteur de facteur de puissance et stockage d'Energie, Mémoire pour l'Obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches, Faculté des Sciences, Université d'Antsirana, (Sept. 2007).
- [11] - R. LONGCHAMP, "Commande adaptative", Cours d'été, Institut d'Automatique, EPF Lausanne, (1991).
- [12] - TSIORY PATRICK ANDRIANANTENAINA, JEAN N. RAZAFINJAKA, Commande d'un convertisseur AC-DC avec correction de facteur de puissance par un régulateur polynomial RST, Colloque International sur le Monitoring des Systèmes Industriels, 2<sup>e</sup> édition, Marrakech, Maroc, (2014).
- [13] - JEAN N. RAZAFINJAKA, TSIORY PATRICK ANDRIANANTENAINA, Hybrid controller for wind turbine based on Doubly fed Induction Generator, 7<sup>th</sup> International Conference on Fuzzy Computation Theory and Applications, Lisbonne, Portugal, (2015).