

Commande Floue de la Charge d'une Batterie dans une Installation Photovoltaïque

A. Daoud et A. Midoun

Laboratoire d'Electronique de Puissance et Energie Solaire Institut d'Electronique, U.S.T.O, B.P 1505,
Oran, Algérie E-mail : daoudamine@yahoo.fr

Résumé – Nous présentons dans cet article une approche pour la régulation de la tension de charge d'une batterie au plomb acide dans un système photovoltaïque contenant un module solaire et un hacheur buck. La synthèse de la commande est basée sur une alliance entre le principe de la consigne virtuelle et la commande floue, offrant ainsi une bonne robustesse vis à vis de la variation des paramètres de la batterie. Pour les tests expérimentaux, nous avons construit un banc d'essai permettant de vérifier l'algorithme de contrôle de charge.

Abstract – We present in this paper an approach for the regulation of the charging voltage of a lead-acid battery in a photovoltaic system containing a solar module and a buck converter. The synthesis of the control is based on an alliance between the principle of the virtual set-point and fuzzy control, thus offering a good robustness against the variation of the battery parameters. For the experimental tests, we built a test bench allowing to check the charge control algorithm.

Mots clés : Commande floue – Consigne modifiée – Hacheur dévolteur – Batterie au plomb.

1. INTRODUCTION

Les systèmes photovoltaïques sont classés en trois types : autonomes, hybrides et reliés au réseau. Les systèmes autonomes sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries d'accumulateurs pour stocker l'énergie produite afin de la restituer durant les périodes nocturnes et celles de faible ensoleillement. Les batteries au plomb représentent plus de 90% de la production mondiale [1] vu leur adaptation à tout type d'application et leur coût comparativement aux batteries nickel-cadmium.

La difficulté d'établir un modèle régissant le comportement d'une batterie provient essentiellement de la complexité des phénomènes qui le régissent, à savoir le phénomène chimique et le phénomène électrique. Dans cet article, nous présentons une méthode pour réguler la tension de charge de la batterie au plomb acide par la commande floue à consigne virtuelle ou modifiée puisque cette dernière est très simple à implémenter, robuste et indépendante du modèle du processus (batterie) dont le modèle reste imprécis.

2. COMMANDE FLOUE A CONSIGNE VIRTUELLE

Le but de la consigne virtuelle ou bien modifiée est de diminuer l'amplitude du dépassement ainsi que l'amplitude des oscillations et de diminuer le temps de montée en modifiant la consigne. Le schéma de la régulation à consigne modifiée, Fig. 5, se compose des blocs suivants:

2.1. Le procédé

2.2. Le contrôleur PI+PD flou

Le contrôleur PI+PD flou est un PID flou, composé de l'association entre les deux contrôleurs flous de base (PI flou, PD flou). La commande PI floue est connue pour être très pratique que la commande PD floue car il est difficile à cette dernière d'éliminer l'erreur en régime statique. Mais l'inconvénient de la commande PI floue est d'introduire une mauvaise performance pendant le régime dynamique traduite par un temps de montée grand, qui est résolu en ajoutant la commande PD floue, ceci implique l'association entre ces deux commandes floues.

- **PI Flou**

Le principe du régulateur PI flou [2] est de remplacer par la valeur de défuzzification de la commande, la commande calculée grâce à un PI classique. L'algorithme de base d'un contrôleur PI classique est exprimé par :

$$U_{PI} = K_p e + K_i \int e dt = K_p \int \{e' + e/T_i\} dt \quad (1)$$

Où e l'erreur consigne-mesure, e' la dérivée de l'erreur, $T_i = K_p / K_i$ constante de temps intégrale. Si e et e' sont des variables flous alors U_{PI} de l'équation (1) représentera la commande PI floue. La structure digitale du contrôleur PI flou est la suivante :

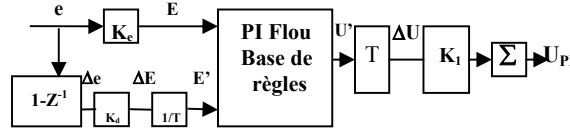


Fig.1: structure digitale du PI flou

Où K_c et K_d sont les gains des entrées du PI flou, alors que K_i est le gain de la sortie. L'action intégrale dans la sortie du PI flou est donnée par l'approximation suivante :

$$U_{PI}(k) = U_{PI}(k-1) + K_i \Delta U(k) \tag{2}$$

Avec $U' = dU/dt \approx \Delta U/T$ (3)

Où T représente la période d'échantillonnage ($T=1s$) et ΔU la variation de la commande, donnée par la formule suivante :

$$\Delta U(k) = U(k) - U(k-1) \tag{4}$$

La dérivée de l'erreur est donnée par l'approximation suivante :

$$e' = de/dt \approx \Delta e/T \tag{5}$$

où Δe représente la variation de l'erreur, donnée par la formule suivante :

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \tag{6}$$

La sortie du PI flou est alors exprimée par :

$$U_{PI} = K_i \sum F\{K_c e, (K_d/T) \Delta e\} \tag{7}$$

avec $F\{*\}$ représente l'opération floue. La table de décision du contrôleur PI flou est tirée de [3], et les règles de commande floue sont regroupées dans la table suivante :

Tableau 1: Les règles du PI flou

Δe	e	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
PL	ZR	PS	PM	PL	PL	PL	PL	PL
PM	NS	ZR	PS	PM	PL	PL	PL	PL
PS	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	PL	PL
ZR	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	PL
NS	NL	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PM
NM	NL	NL	NL	NM	NS	ZR	PS	PS
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZR	ZR

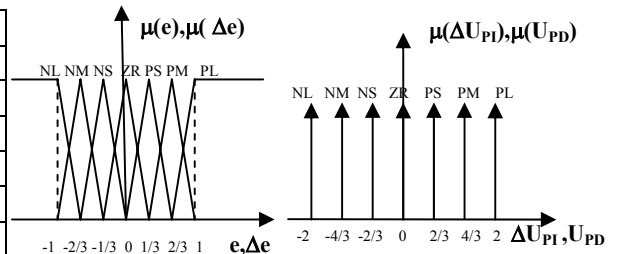


Fig. 2: Fonction d'appartenance de $e, \Delta e$ et de $U_{PI}, \Delta U_{PI}$

Ainsi une règle de commande floue de la table des règles du PI flou sera de la forme suivante :

$$SI e(k) \text{ est PL } ET \Delta e(k) \text{ est PL } ALORS \Delta U_{PI}(k) \text{ est PL.}$$

La forme triangulaire est choisie pour la fonction d'appartenance de chaque entrée et une forme singleton pour la sortie ΔU_{PI} Fig.2. Le raisonnement utilisé pour l'inférence floue est celui de takagi-sugeno et la méthode de défuzzification est celle du centre de gravité.

• **PD Flou**

Le principe du régulateur PD flou [2] est de remplacer par la valeur défuzzification de la commande, la commande calculée grâce à un PD classique. L'algorithme de base d'un contrôleur PD classique est exprimé par :

$$U_{PD} = K_p e + K_d e' = K_p \{e + T_d e'\} \tag{8}$$

Avec $T_d = K_d / K_p$ la constante de temps dérivée. Si e et e' sont des variables flous alors U_{PD} de l'équation (8) représentera la commande PD floue. La structure digitale du contrôleur PD flou est la suivante :

Où K_c et K_d sont les gains des entrées du PD flou, alors que K_2 représente le gain de la sortie. La sortie du PI flou est exprimée alors, par :

$$U_{PD} = K_2 F \{ K_e e, (K_d / T) \Delta e \} \tag{9}$$

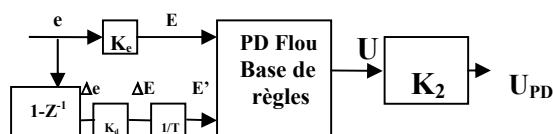


Fig. 3: Structure digitale du pd flou

avec $F\{*\}$ représente l'opération floue. La table de décision du contrôleur PD FLOU est tirée de [3], et les règles de commande floue sont regroupées dans la table suivante :

Tableau 2: les regles du PD flou

Δe	e	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
PL		NS	NS	NS	PS	PL	PL	PL
PM		NS	NS	NS	PS	PM	PL	PL
PS		NM	NS	NS	PS	PM	PL	PL
ZR		NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
NS		NL	NL	NM	NS	PS	PS	PM
NM		NL	NL	NL	NS	PS	PS	PS
NL		NL	NL	NL	NS	PS	PS	PS

La forme triangulaire est choisie pour la fonction d'appartenance de chaque entrée et une forme singleton pour les sortie U_{PD} Fig.2. Le raisonnement utilisé pour l'inférence floue est celui de takagi-sugeno et la méthode de défuzzification est celle du centre de gravité.

2.3. Le contrôleur flou

C'est un simple régulateur flou qui possède deux entrées ($e_1(k), \Delta e_1(k)$) et une sortie Fig.5, Où :

- $e_1(k)$: Erreur consigne réelle-mesure ;
- $\Delta e_1(k)$: Variation de cette erreur.

Les fonctions d'appartenances des entrées et la sortie sont données par la Fig.4.

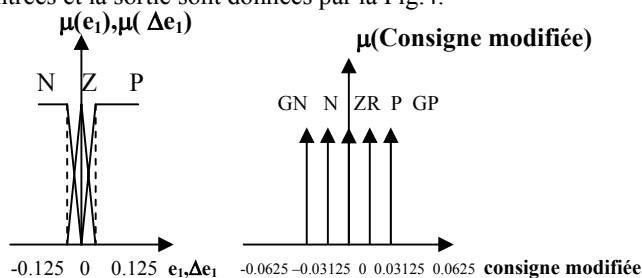


Fig. 4: Fonction d'appartenance de $e_1, \Delta e_1$ et de la consigne modifiée

La table des règles donnée ci-dessous est associée au contrôleur flou et comporte 9 règles de commande floue. Le raisonnement utilisé pour l'inférence floue est celui de takagi-sugeno et pour la défuzzification, nous utilisons la méthode du centre de gravité pour calculer la variation de la consigne. La consigne modifiée est calculée à partir de l'erreur consigne réelle-mesure et de sa variation ainsi que la consigne réelle pour remplacer la consigne dans l'algorithme du PI+PD flou par une nouvelle consigne obtenue par la commande floue puisque cette dernière diminue l'amplitude du dépassement et ainsi nous pouvons minimiser toute surcharge de la batterie qui diminuera sa durée de vie.

Tableau 3: les règles du contrôleur flou

$\Delta e_1(k)$	$e_1(k)$	N	Z	P
N		GN	N	P
Z		N	ZR	P
P		P	P	GP

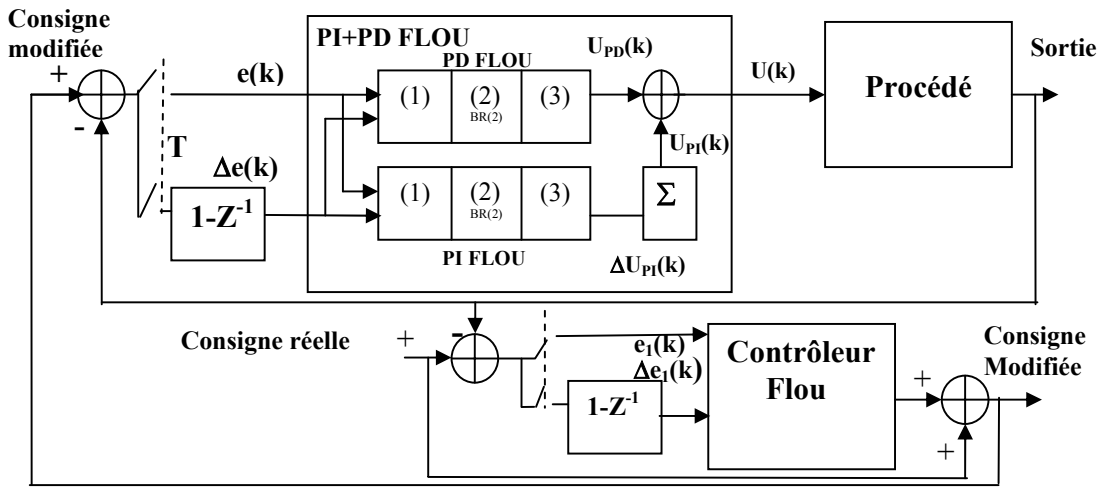


Fig. 5: Schéma bloc de la commande PI+PD floue a consigne modifiée

La table des règles donnée ci-dessous est associée au contrôleur flou et comporte 9 règles de commande floue. Le raisonnement utilisé pour l'inférence floue est celui de takagi-sugeno et pour la défuzzification, nous utilisons la méthode du centre de gravité pour calculer la variation de la consigne. La consigne modifiée est calculée à partir de l'erreur consigne réelle-mesure et de sa variation ainsi que la consigne réelle pour remplacer la consigne dans l'algorithme du PI+PD flou par une nouvelle consigne obtenue par la commande floue puisque cette dernière diminue l'amplitude du dépassement et ainsi nous pouvons minimiser toute surcharge de la batterie qui diminuera sa durée de vie.

Tableau 3: Les règles du contrôleur flou

$\Delta e_1(k)$	$e_1(k)$	N	Z	P
N		GN	N	P
Z		N	ZR	P
P		P	P	GP

3. HACHEUR DEVOLTEUR

Nous représentons dans la Fig. 6 un hacheur de type Buck alimenté par un panneau solaire (1seul module de $V_{oc}=21.2V$, $I_{sc}= 3.25A$) permettant de diminuer la tension du panneau pour assurer l'alimentation de la batterie avec une tension inférieure ou égale à celle du panneau. Un filtre L, C permet d'assurer le filtrage de la tension et le courant du hacheur.

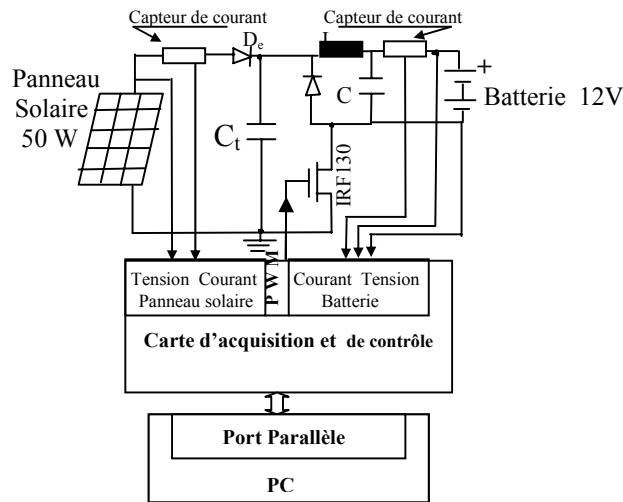


Fig. 6: Banc d'essai

La valeur de l'inductance [4] est calculée par la formule suivante :

$$L = (V_i - V_0) * V_0 * T / (V_i \Delta I_L) \quad (10)$$

La valeur de la capacité [5] est donnée par la formule suivante :

$$C = (V_i - V_0) * V_0 / (8 * V_i * \Delta V_C * F^2 * L) \quad (11)$$

avec F représentant la fréquence du signal de commande du MOSFET de puissance.

Pour le filtrage de la tension d'entrée du hacheur (diminuer les ondulations) on branche aux bornes du panneau un condensateur tampon dont la valeur est $C_t \approx 4,4$ mF. Entre le panneau solaire et cette capacité C_t , une diode D_e (anti-retour) est insérée afin d'éviter la décharge du condensateur dans le panneau quand la tension de ce dernier tombe au-dessous de la tension du condensateur tampon C_t .

4. RESULTATS EXPERIMENTAUX

La batterie utilisée pour l'expérimentation est du type plomb acide de 12V et de capacité de 24Ah (YUASA BATTERY) connectée avec un panneau à travers un hacheur dévolteur. La batterie est mise dans une petite armoire fermée avec une ventilation naturelle permettant un fonctionnement dans une gamme de température pour une durée de vie optimale. En fonction de la tension atteinte par la batterie, le contrôleur flou à consigne modifiée génère une commande comprise entre 0 et 255. Cette suite de bits est envoyée sur le port parallèle du PC et en suite transformée en tension comprise entre 0 et 10 V par un convertisseur numérique analogique. Cette tension est comparée à un signal triangulaire pour obtenir un signal MLI (PWM). Ce dernier est appliqué par l'intermédiaire d'un driver à un transistor MOSFET de puissance qui hache la tension continue du panneau solaire. La tension et le courant injectés à la batterie sont prélevés par la carte d'acquisition et de contrôle Fig.6 à base d'un filtre du 2^{ème} ordre et un convertisseur analogique numérique ainsi qu'un convertisseur numérique analogique pour la l'acquisition des grandeurs de tension et courant.

Pour un ensoleillement de 59% et une température de 24,8°C, le courant initial fournit par le panneau solaire Fig.7 dépend du point de fonctionnement de ce dernier, correspondant dans la Fig.8 à une tension proche de 15,5 V. La valeur du courant du panneau décroît puisque la tension du panneau se déplace vers la région où le panneau se comporte comme une source de tension. Pendant ce temps, le courant de charge de la batterie Fig.9 garde la même allure que le courant du panneau avec une valeur un petit peu supérieure. La tension de la batterie Fig.10, partiellement chargée, augmente en fonction du courant de charge. Au fur et à mesure que la tension de la batterie s'approche de la consigne qui est de 13.65Volts, le courant de charge décroît permettant à la tension de charge de garder une valeur proche de la consigne après une durée de charge de 2H30mn.

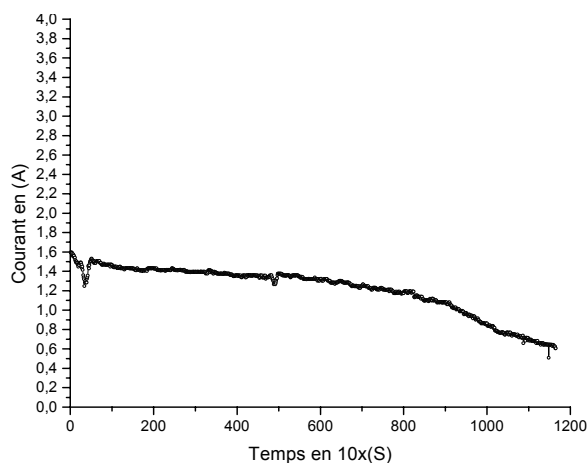


Fig. 7: Courant du panneau

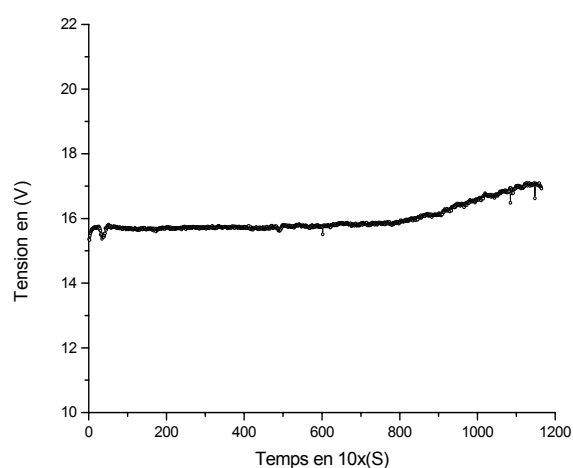


Fig. 8: Tension du panneau

5. CONCLUSION

Le présent travail est une contribution au développement d'un régulateur basé sur la logique floue dont l'algorithme de réglage est un PID flou à consigne modifiée, basé essentiellement sur les deux tables de règles des contrôleurs PI et PD flou dont la consigne est issue d'un autre contrôleur flou, génère une commande permettant

d'obtenir le signal PWM appliqué au MOSFET de puissance du hacheur. Cet algorithme permet de charger la batterie avec un courant initial assez élevé issu du panneau solaire et au fur et à mesure que la tension de charge s'approche de la consigne réelle le courant de charge décroît en fonction des règles de commande floue afin d'atteindre la tension de pleine charge sans la quitter.

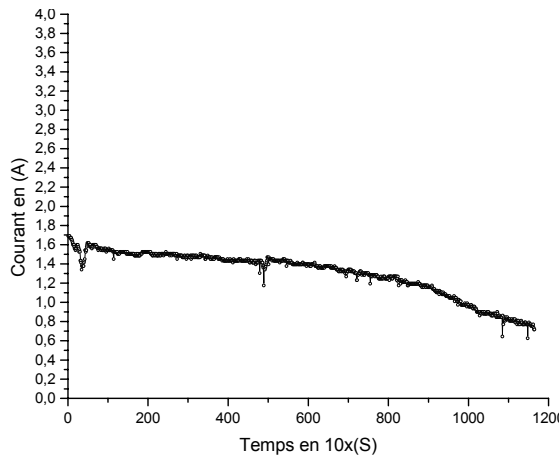


Fig. 9: Courant de charge

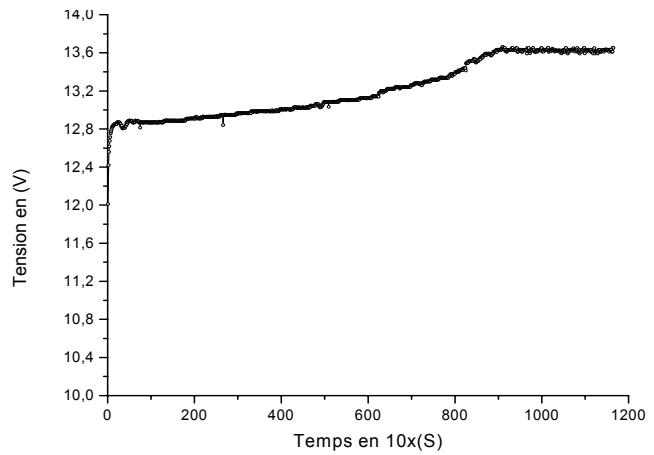


Fig. 10: Tension de charge

NOMENCLATURE

NM : négatif moyen	C : La capacité du condensateur (Farad) ;
NS : négatif petit	C_t : La capacité du condensateur tampon ;
P : positif	L : La self de la bobine du filtre (Henry) ;
PL : positif large	GN : grand négatif
PM : positif moyen	GP : grand positif
PS : positif petit	N : négatif
ZR : zéro	NL : négatif large

REFERENCES

- [1] N. Achaïbou, A. Maleket N. Bacha, 'Modélisation de Batterie au Plomb-Acide Dans un Système Photovoltaïque', 1^{er} Séminaire sur la Contribution de l'Énergie Solaire et Éolienne Dans le Développement Durable Adrar, Octobre 2001.
- [2] P. Pivonka et J. Zizka, 'The use of Fuzzy pi/pd/pid Controllers in Fuzzy Control' Third European Congress on Intelligent Technique and Soft Computing, Vol2 PP.1041-1045, August 28-31, 1995.
- [3] Hang-xiong li et H. B. Gatland, 'Conventional Fuzzy Control and its Enhancement', IEEE Transaction on SMC, Part b: Cybernetics Vol 26 N°5, October 1996.
- [4] 'Designing With the L296 Monolithic Power Switching Regulator' SGS Thomson Microelectronics, Application Note. <http://www.salleurl.edu/cedei/hardware/power/4269.pdf>
- [5] Power designers, 'Switch Mode Power Supply-Basic Circuit Operation'; <http://Powerdesigners.com/InfoWeb/resources/Pe.html/ch07s1/bas-cht.html>