

Nouvelle Technique de Commande non Linéaire d'un Convertisseur cc/cc pour Applications Photovoltaïques

Mahmoud Drif^{*}, Ali Malek^{*} et Fateh Krim^{**}

^{*} Laboratoire Photovoltaïque, Centre de Développement des Energies Renouvelables,
BP 62, Bouzareah 16340, Algérie

^{**} Institut d'Electronique, Université Ferhat Abbas, El Maabouda, Sétif 19000, Algérie
(Accepté le 29.12.98)

Résumé – *L'objet de ce papier est de présenter le concept et la théorie d'une nouvelle approche de commande non linéaire pour un convertisseur cc/cc dévolteur (Buk Converter) connecté à une charge. Les résultats des études de simulation et de l'expérimentation de ce système électronique sont également présentés. Le principe de base de la technique consiste en l'asservissement en un seul cycle de commutation de la tension d'entrée (par exemple: tension d'un générateur photovoltaïque -GPV-) du convertisseur à une valeur de consigne de nature fixe ou variable (par exemple: tension correspondant au point de puissance maximale -PPM- du GPV). Après avoir effectuée la synthèse de cette technique, une étude de simulation de ce système, utilisant le logiciel de simulation dynamique Matlab/Simulink™ a été réalisée. Afin de valider cette dernière, un appareil de commande a été mis au point et expérimenté.*

Abstract – *The purpose of this paper is to present the concept and the theory of a new non linear control approach for a dc/dc converter (Buk Converter) connected to a load. The results of the simulation and the experimental studies of this electronic system are also presented. The basic principle of the technique consist in the one cycle control of the switching input voltage converter (for example: photovoltaic generator voltage -GPV-) to a fixed or variable reference value (for example: maximum power point voltage -PPM- of GPV). After having carried out a synthesis of this technique, a simulation study of the system has been done, using the dynamic simulation program Matlab/Simulink™. In order to validate this technique, a control apparatus has been set up and experimented.*

Mots clés: Commande non linéaire- Commande en seul cycle OCC- Convertisseur cc/cc- GPV- PPM.

1. INTRODUCTION

Le générateur photovoltaïque (GPV) est considéré comme un dipôle ayant la caractéristique courant - tension non linéaire $I = f(V)$. Du point de vue strictement physique, la charge accouplée directement à ce générateur photovoltaïque, impose son point de fonctionnement, qui correspond à l'intersection de leurs caractéristiques courant-tension (I-V). Les coordonnées de ce point dépendent de divers paramètres dont l'éclairement et la température (Fig. 1). Ce mode de connexion direct n'est pas souhaité dans la conversion photovoltaïque, compte tenu de la nature aléatoire de la puissance délivrée par le GPV.

Cependant, l'exploitation optimale de l'énergie électrique issue du GPV nécessite un système de conditionnement, assurant suivant la nature de l'application photovoltaïque de multiples fonctions, entre autres:

- Régulation en tension: c'est le cas de nombreux dispositifs électriques qui fonctionnent dans des conditions optimales que s'ils étaient alimentés par une source de tension constante.

- Un couplage optimal entre la charge et le GPV: celui-ci nécessite une poursuite en temps réel du point de puissance maximale (PPM) du GPV. Ce système est connu sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking).

En vue de surmonter ce couplage direct entre la charge et le GPV, il est nécessaire d'adjoindre un système électronique annexe qui force à chaque instant le GPV à fonctionner à une tension désirée. En général, le système servant d'interface entre le GPV et la charge est un convertisseur cc/cc commandé en fermeture et en ouverture (on/off) afin que son fonctionnement s'effectue à la tension de consigne (constante ou variable), quelques soient les perturbations d'éclairement et de température.

Les performances d'un tel système dépendent essentiellement de la technique de commande utilisée parmi de nombreuses autres existantes. Dans cet article, une nouvelle technique de commande non linéaire 'One Cycle Control' développée par K.M. Smedley et S. Cuk [1, 2] a été exploitée pour la commande de notre système de conversion. Cette technique s'appuie principalement sur le contrôle non linéaire du rapport cyclique du convertisseur, afin d'asservir le système à une tension de référence. Les avantages de cette technique réside dans la robustesse vis-à-vis des perturbations dues à la source, dans la rapidité à obtenir la tension moyenne en un seul cycle de commutation (le régime transitoire s'établissant en un seul cycle unique) et dans la simplicité de l'implémentation.

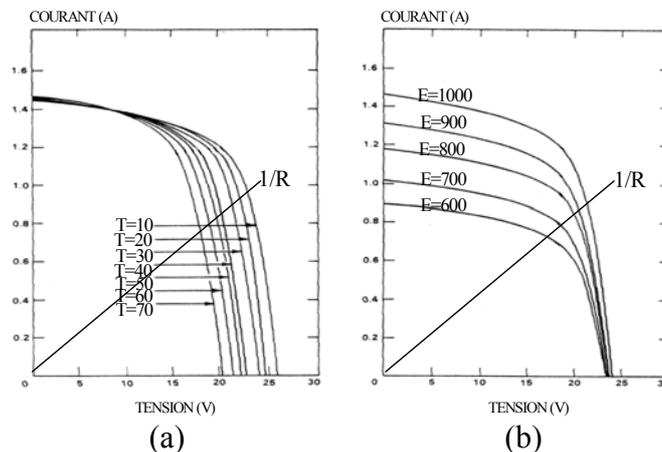


Fig. 1: Courbes I-V d'un module photovoltaïque connecté à une charge résistive [3]
 (a) Eclairement constant ($E = 1000 \text{ W/m}^2$), température variable
 (b) Eclairement variable et température constante ($T = 30$ °C)

Ce travail porte sur la simulation de cette technique pour un convertisseur cc/cc par le logiciel Matlab/Simulink™, et la validation expérimentale de cette commande. Deux cas de régulation ont été ainsi étudiés: - tension de référence constante, - tension de référence variable (poursuite du PPM), afin de connaître les aptitudes de ce type de contrôle, quant à la poursuite de la référence, et en vue de montrer la robustesse de la technique vis-à-vis des perturbations de la source (GPV); cette dernière étant assimilée à une source de tension continue, et présentant des fluctuations (bruit).

2. CONCEPT DE LA COMMANDE EN UN SEUL CYCLE

Pour mettre en évidence la technique de commande en un seul cycle 'One Cycle Control - OCC' [1, 2], le convertisseur continu-continu choisi est un hacheur dévolteur (Buck Converter), à base de transistor intercalé entre la source de tension v_g et une charge résistive R

(Fig. 2). Le fonctionnement est à fréquence de commutation fixe $f_s = 1/T_s$, où T_s est la période de commutation du transistor (switch).

Lorsque le transistor est en conduction, la diode étant bloquée et la tension de sortie v_s (aux bornes de la diode) sera donc égale à la tension d'entrée v_g . Le filtre passe-bas LC transmet à la charge, la valeur moyenne de la tension de sortie v_s et en rejette également les harmoniques indésirables de cette tension. Cependant, la tension de la charge v_c est la superposition de la valeur désirée à des ondulations résiduelles.

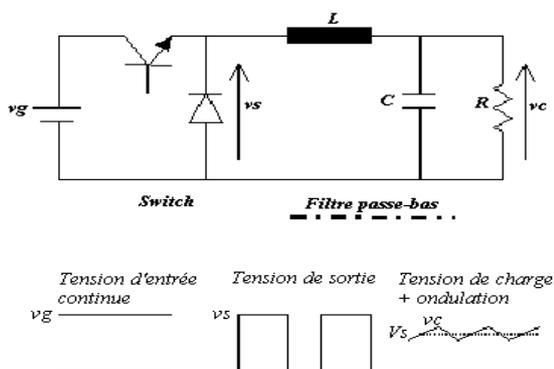


Fig. 2: Convertisseur cc/cc dévolteur

L'observation minutieuse de la variable de sortie du hacheur v_s , amène au constat suivant : la tension de charge est égale à la valeur moyenne de la variable de sortie de l'interrupteur V_s (tension à l'entrée du filtre LC) représenté par l'aire du signal carré obtenu durant un cycle divisé par la période de commutation. Ceci peut être traduit par la relation :

$$V_s = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_s dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{\alpha T_s} v_g dt \quad (1)$$

où α est le rapport cyclique.

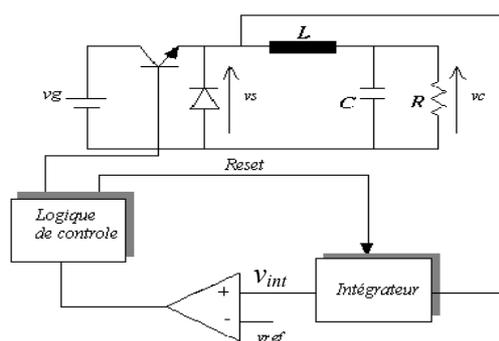


Fig. 3: Commande en un seul cycle du convertisseur dévolteur

Cette observation peut provoquer donc une nouvelle approche de commande pour les convertisseurs cc/cc fonctionnant à fréquence de commutation fixe. Cette technique est schématisée en figure 3. Son principe consiste en l'envoi d'une impulsion d'horloge incorporée à une logique de contrôle, qui permet la fermeture du transistor au début de chaque cycle de commutation. La tension de sortie v_s sera intégrée et comparée à la valeur de référence. Dès que la tension intégrée atteint la valeur de référence, le comparateur change

d'état, provoquant l'ouverture du transistor et la remise à zéro de l'intégrateur. Deux cas distincts peuvent se présenter:

Dans le premier cas, la tension de référence v_{ref} est considérée comme constante. La valeur moyenne de la variable de sortie sera donc constante, ainsi que la tension de charge v_c (Fig. 4). La pente d'intégration est directement proportionnelle à la tension de la source v_g et la tension v_{int} est continuellement comparée à la référence.

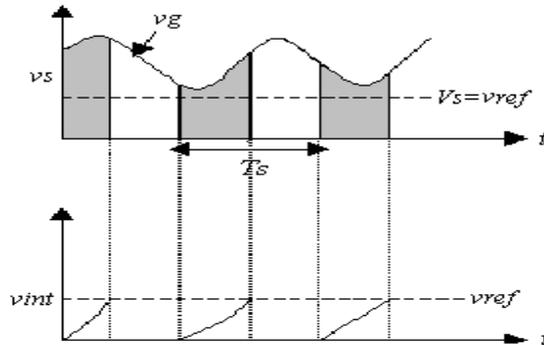


Fig. 4: Commande à tension de référence constante

Lorsque la tension de la source v_g est élevée, la pente d'intégration augmente. Dans ce cas, la valeur d'intégration atteint rapidement la valeur de référence de la commande. Par conséquent, le rapport cyclique α est faible. Quand la tension de la source est faible, le rapport cyclique s'accroît.

Tandis que dans le second cas, la tension de référence est supposée en fonction du temps, la valeur moyenne de la variable de sortie v_s sera donc égale à la tension de référence à chaque cycle. Ce cas d'augmentation d'un seul palier de la tension de référence est illustré en figure 5.

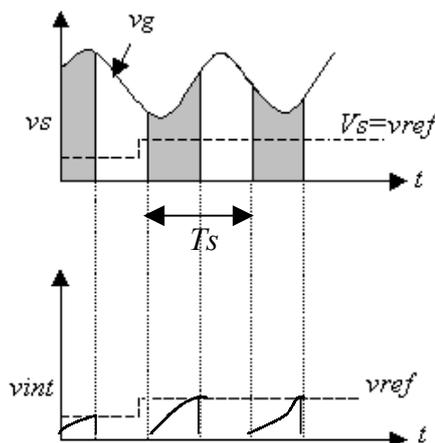


Fig. 5: Commande à référence variable

Au premier cycle, la tension v_{int} aura tendance à atteindre rapidement v_{ref} , et donnera un faible rapport cyclique, puis la pente va en s'élargissant au cycle suivant (le rapport cyclique augmente). Avec cette nouvelle technique, le rapport cyclique α peut s'exprimer implicitement par la relation ci-dessous :

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{\alpha T_s} v_g dt = v_{ref} \quad (2)$$

Ce rapport α , pour un cycle quelconque, est indépendant des états des cycles précédents. C'est pour cela que le régime transitoire de la valeur moyenne de la tension de sortie s'établirait en un seul cycle. D'où le nom approprié définissant cette technique de commande non linéaire est désigné 'commande en un seul cycle' (One Cycle Control -OCC). La variable de contrôle α s'exprime par l'équation non linéaire (2) reliant la tension de la source v_g à la tension de référence. Avec cette nouvelle technique, la tension de charge du convertisseur devient alors une fonction linéaire de la valeur de référence, indépendamment de la tension d'entrée. La fonction de transfert du système est exprimée par la relation suivante:

$$\frac{v_c}{v_{ref}} = \frac{1}{1 + (L/R)S + LCS^2} \quad (3)$$

3. THEORIE DE LA TECHNIQUE

Si l'on considère que le fonctionnement de l'interrupteur est à fréquence de commutation fixe, alors il est régi par la fonction suivante [1, 2]:

$$k(t) = \begin{cases} 1 & 1 < t < t_{on} \\ 0 & t_{on} < t < T_s \end{cases} \quad (4)$$

Pour chaque cycle de commutation, l'interrupteur a une durée de fermeture t_{on} et une durée d'ouverture t_{off} , telles que $t_{on} + t_{off} = T_s$. Le rapport cyclique $\alpha = t_{on} / t_{off}$ est ainsi modulé par le signal de la tension de référence v_{ref} .

Le signal d'entrée $x(t)$ est haché par l'interrupteur (switch) et transféré à la sortie en une forme d'onde comme variable de sortie $y(t)$. La fréquence et la largeur d'impulsion de cette variable de sortie $y(t)$ sont similaires à celles de la fonction interrupteur $k(t)$, tandis que sa forme est celle du signal d'entrée $x(t)$ (Fig. 6). Dans ce cas, le signal $y(t)$ peut s'écrire :

$$y(t) = k(t) x(t) \quad (5)$$

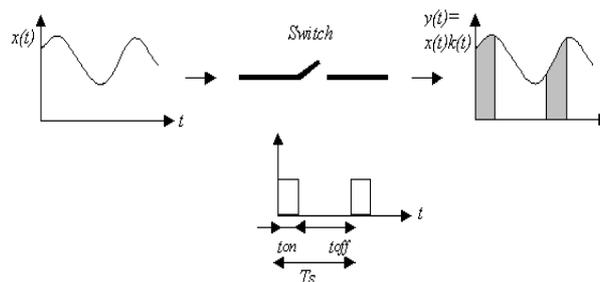


Fig. 6: Fonction interrupteur

Si l'on suppose que la fréquence de commutation f_s est largement supérieure à la bande de fréquence de chaque signal $x(t)$ ou $v_{ref}(t)$, le signal effectif obtenu à la sortie de l'interrupteur, i.e. la valeur moyenne la variable de sortie $y(t)$ est donné par l'expression ci-après :

$$\begin{aligned}
 y(t) &= \frac{1}{T_s} \int_0^{t_{on}} x(t) dt \\
 &\approx x(t) \frac{1}{T_s} \int_0^{t_{on}} dt \\
 &= x(t) \alpha(t)
 \end{aligned} \tag{6}$$

La variable de sortie $y(t)$ est représentée par le produit du signal d'entrée $x(t)$ et du rapport cyclique $\alpha(t)$, ceci montre la non linéarité de l'interrupteur.

Si le rapport cyclique α de l'interrupteur est modulé, de telle façon que l'intégrale de la variable de sortie $y(t)$ serait égale exactement à la valeur du signal de la tension de référence à chacun des cycles, i.e.

$$\int_0^{t_{on}} x(t) dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_{ref}(t) dt \tag{7}$$

alors, la valeur moyenne de la variable de sortie reste égale exactement à la référence, tant que la période de commutation est constante. Par conséquent la valeur moyenne de cette variable de sortie est contrôlée instantanément en un seul cycle, i.e.

$$y(t) = \frac{1}{T_s} \int_0^{t_{on}} x(t) dt \tag{8}$$

$$= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_{ref}(t) dt = v_{ref}(t) \tag{9}$$

La technique de commande régie par ce concept est définie comme la technique de commande en seul cycle 'One Cycle Control -OCC'. Le signal effectif donné à la sortie de l'interrupteur serait :

$$y(t) = v_{ref}(t) \tag{10}$$

Le circuit d'implémentation de cette technique OCC peut être schématisé par la figure 7 [1, 2]. Les principaux éléments clés de cette technique sont l'intégrateur et le resetter (réinitialisateur -RAZ). A chaque cycle de commutation, l'intégration débute au moment où l'interrupteur se ferme, grâce à une impulsion d'horloge. La tension à la sortie de l'intégrateur est de la forme suivante :

$$v_{int} = k \int_0^t x(t) dt \tag{11}$$

Cette dernière est comparée instantanément à la valeur de référence, avec k une constante. A l'instant où la tension v_{int} atteint la tension de référence $v_{ref}(t)$, la logique de contrôle génère le signal de commande pour actionner l'interrupteur de l'état ouvert à l'état fermé et dans le même temps elle remet l'intégrateur à zéro. Le rapport cyclique ($\alpha = t_{on}/T_s$) obtenu correspondant à ce cycle est déterminé à partir de l'équation suivante :

$$k \int_0^{\alpha T_s} x(t) dt = v_{ref}(t) \quad (12)$$

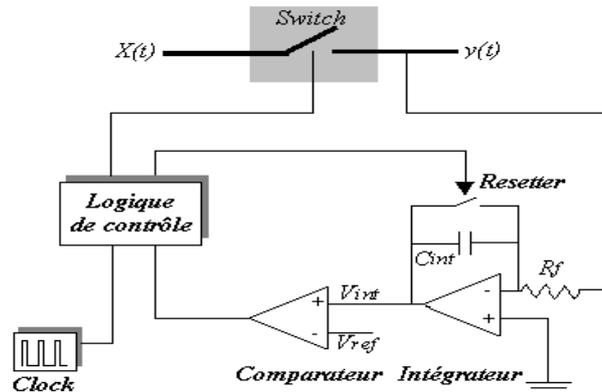


Fig. 7: Commande de l'interrupteur à fréquence de commutation fixe

Etant donnée que la période de commutation est constante et $K = 1/kT_s$, alors la valeur moyenne de la variable la sortie $y(t)$ dans chaque cycle peut se traduire par la relation suivante:

$$y(t) = \frac{1}{T_s} \int_0^{\alpha T_s} x(t) dt = K v_{ref}(t) \quad (13)$$

Les différents signaux du système "hacheur dévolteur - circuit de commande", pour une fréquence de commutation f_s fixe, sont représentés en figure 8.

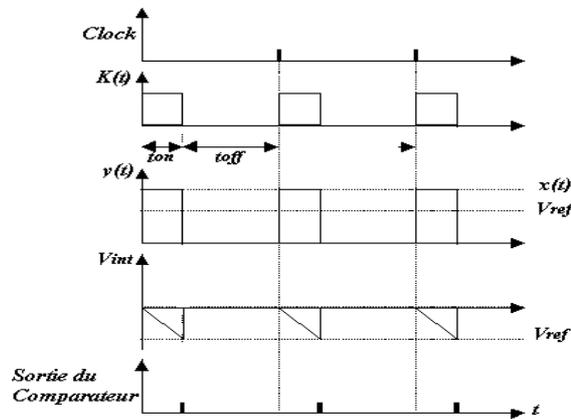


Fig. 8: Formes d'ondes des différents signaux

4. RESULTATS DE L'ETUDE DE SIMULATION

L'étude de simulation de cette nouvelle technique de commande OCC, appliquée à un convertisseur cc/cc connecté à une charge résistive a été effectuée. Pour la mise en équations du montage du convertisseur, représenté en figure 9, la simplification du circuit s'impose.

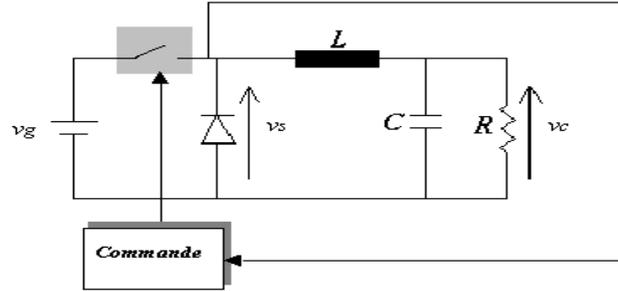


Fig. 9: Convertisseur cc/cc dévolteur

Le schéma équivalent de ce montage modifié et modélisé est montré en figure 10.

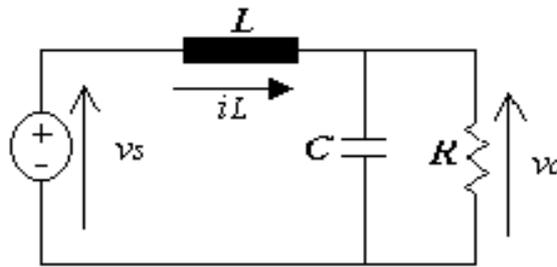


Fig. 10: Modèle d'étude

Ce circuit peut être régi par une équation différentielle linéaire du second ordre, dont la fonction de transfert est donnée par l'expression suivante :

$$\frac{v_c}{v_s} = \frac{1}{1 + (L/R)S + LCS^2} \quad (14)$$

Sachant que la tension d'entrée v_s peut prendre les deux valeurs v_g ou 0. La variable de contrôle α sera déterminée à partir de l'équation 15.

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{\alpha T_s} v_g dt = v_{ref} \quad (15)$$

Compte tenu des possibilités offertes en matière de modélisation et de simulation pour des systèmes dynamiques et de la simplification d'implémentation des modèles grâce à son interface graphique, l'étude de simulation de notre système a été menée par le logiciel Matlab/Simulink [4, 5]. Comme extension à Matlab, Simulink est donc un programme de simulation de systèmes dynamiques, et offre de nombreux outils tout en conservant la puissance et les fonctionnalités de Matlab. Simulink procède en deux étapes : le système à étudier est défini par un modèle mathématique représenté par sa fonction de transfert, puis ce dernier est introduit dans ce programme sous forme de blocs, ce qui constitue la première étape. Quant à l'étape suivante, elle consiste en l'analyse du comportement de système précédemment défini. Le déroulement de la simulation peut être visualisée graphiquement simultanément à l'exécution. Les résultats obtenus de cette simulation sont facilement accessibles et exploitables sous la forme graphique par le biais de bloc "graph" de Simulink.

Le schéma de notre système 'convertisseur cc/cc – boucle de régulation' étudié, dans l'environnement Matlab / Simulink est représenté en figure 11.

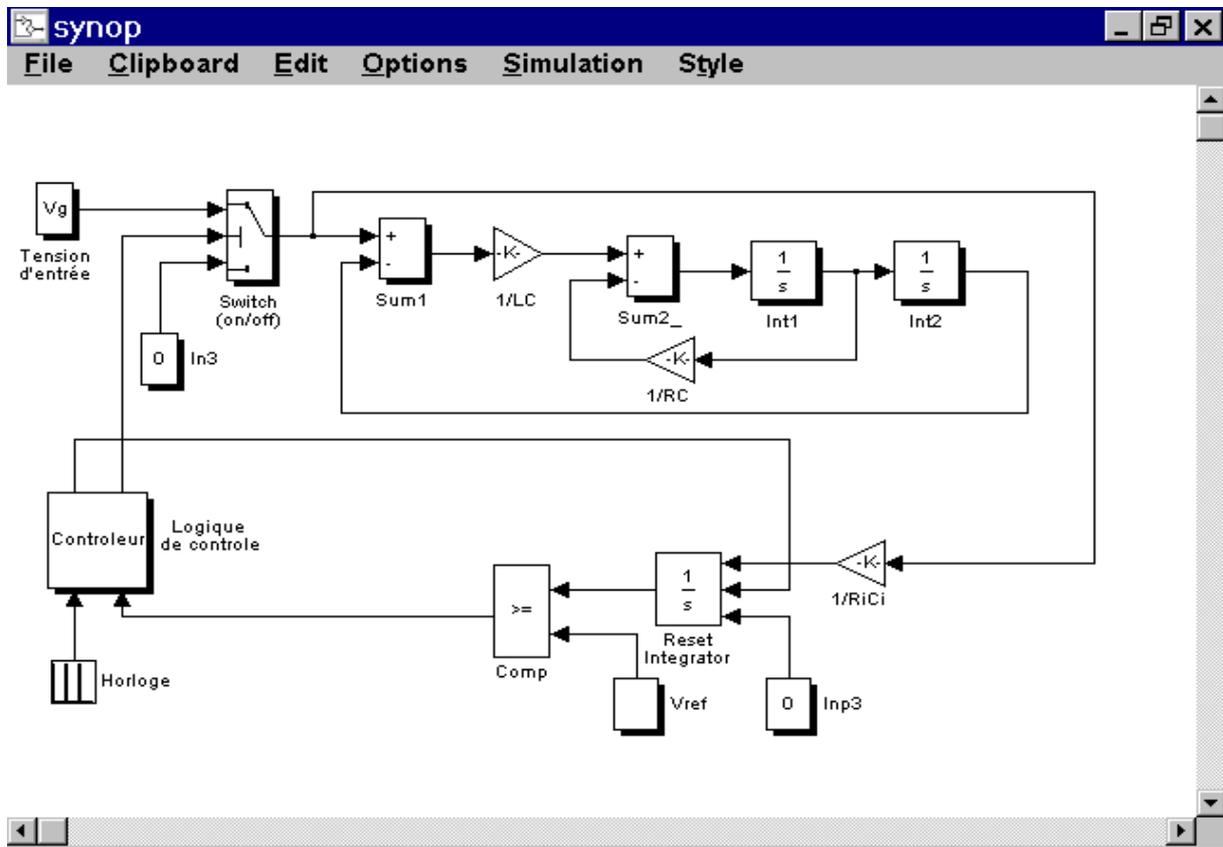


Fig. 11: Schéma bloc du système dans l'environnement Matlab/Simulink

Au vu de l'indisponibilité du modèle caractérisant le GPV pour l'appliquer dans le programme Simulink, deux cas de figure ont été étudiés pour connaître les performances de la technique OCC, à savoir:

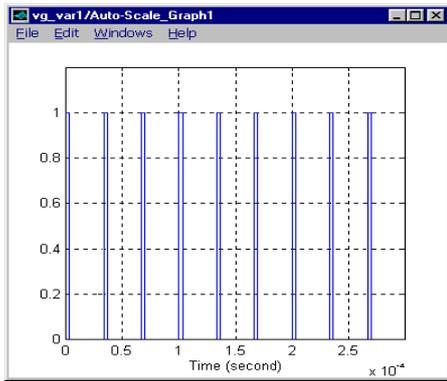
- Tension d'entrée v_g variable (tension de 18 à 20 V + bruit), tension de référence v_{ref} constante ($v_{ref} = 14$ V)
- Tension d'entrée v_g variable (tension de 18 à 20 V + bruit), tension de référence v_{ref} variable ($v_{ref} = 12 + \sin(2\pi ft)$, $f = 5$ kHz).

Les hypothèses de simulation, pour illustrer les résultats obtenus sur notre système, sont données ci-après :

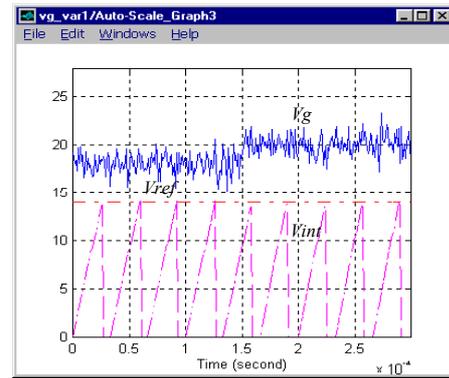
- Fréquence de commutation: $f_s = 1/T_s = 30$ kHz,
- Paramètres du filtre: $L = 1.5$ mH, $C = 25$ μ F, $R = 6$ Ω ,
- Interrupteur et diode considérés idéaux,
- Méthode de calcul numérique: Runge-Kutta 5.

Les résultats obtenus par simulation par le biais du programme Simulink, dans les deux cas étudiés, sont représentés sur les figures 12 et 13.

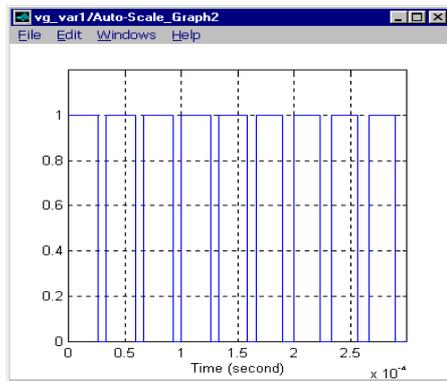
Dans le premier cas étudié, les paramètres caractéristiques sont les suivants: tension d'entrée variable ($v_g = 18 - 20$ V), et tension de référence constante ($v_{ref} = 14$ V).



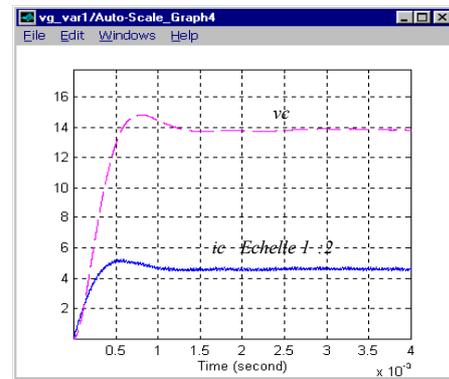
a) Signal d'horloge



b) Tension à la sortie de l'intégrateur



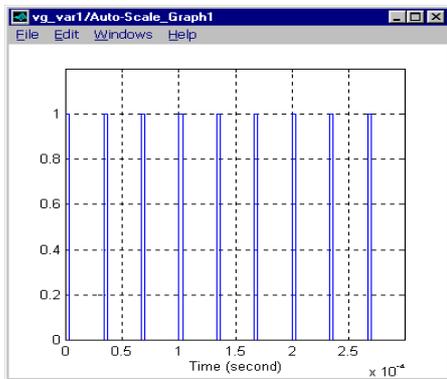
c) Signal de commande



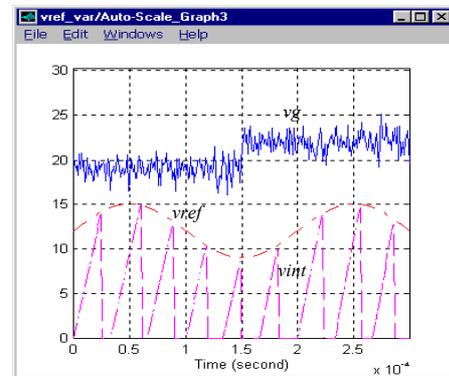
d) Tension et courant de charge

Fig. 12: Différents signaux obtenus pour les tensions v_g variable et v_{ref} constante

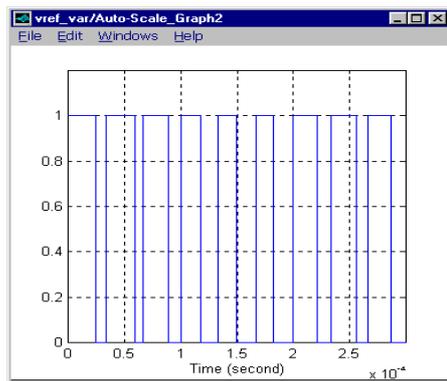
Tandis que dans le deuxième cas étudié, les paramètres caractéristiques sont les suivantes : la tension d'entrée est variable ($v_g = 18 - 20$ V), et la tension de référence est variable et peut être assimilée à une sinusoïde ($v_{ref} = 12 + \sin(2\pi ft)$, $f = 5$ kHz).



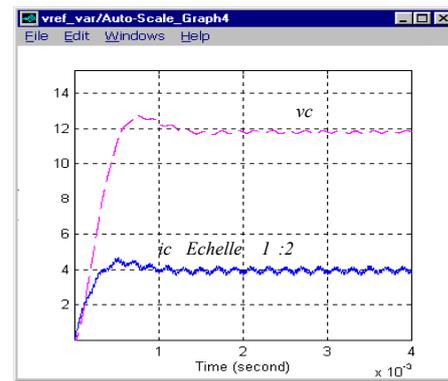
a) Signal d'horloge



b) Tension à la sortie de l'intégrateur



c) Signal de commande



d) Tension et courant de charge

Fig. 13: Signaux obtenus pour les tensions v_g variable et v_{ref} variable

En effectuant l'analyse des résultats de simulation, illustrés en figures 12 et 13 et obtenus pour la technique OCC de notre système, nous pouvons noter que le suivi de la tension de référence est fait d'une façon parfaite dans les deux cas. La technique est insensible aux perturbations dues à la source de tension. La valeur moyenne de la variable de tension de sortie du hacheur (tension à l'entrée du filtre) est atteinte en un seul cycle de commutation, grâce aux modulations par la référence du signal de commande. Toutefois, les signaux de sortie (tension et courant de charge) ne présentent aucune ondulation dans le premier cas (l'erreur entre les deux tensions v_c et v_{ref} est nulle), tandis que dans le second cas, des petites ondulations sont présentes et peuvent être annihilées par un dimensionnement fin du filtre LC.

5. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Après avoir effectuée l'étude de simulation de cette technique sur notre système (convertisseur cc/cc – circuit de commande) et pour valider les résultats de cette dernière expérimentalement, un appareil de commande a été donc mis au point. La vérification du fonctionnement de cet appareil a été effectuée en laboratoire, à l'aide d'une source de tension stabilisée réglable. L'interface servant d'interrupteur entre la source de tension et la charge a été, quant à lui simulé et est représenté par un simple transistor bipolaire. La charge connectée est une résistance.

En ce qui concerne les différentes tensions appliquées pour notre système, deux cas ont été étudiés :

- Tension d'entrée v_g constante ($v_g = 12$ V), tension de référence v_{ref} constante ($v_{ref} = 8$ V)
- Tension d'entrée v_g constante ($v_g = 12$ V), tension de référence v_{ref} variable ($v_{ref} = 5 + \sin(2\pi ft)$, $f=15$ kHz).

Les résultats de cette étude expérimentale sont représentés en figures 14 et 15.

Dans le premier cas étudié expérimentalement, les paramètres caractéristiques sont les suivants : la tension d'entrée et celle de la référence sont maintenues constantes et ont pour valeurs respectives, 12 et 8 volts.

Tandis que dans le deuxième cas étudié expérimentalement, les paramètres caractéristiques concernant les diverses tensions sont les suivants : pour la tension d'entrée, elle est maintenue

constante ($v_g = 12$ V), tandis que celle de la référence est variable ($v_{ref} = 5 + \sin(2\pi ft)$, $f = 15$ kHz).

L'analyse des résultats expérimentaux obtenus pour la technique OCC de notre système, illustrés en figures 14 et 15 montre une similitude avec les résultats obtenus par la simulation. Le suivi de la tension de référence est également effectuée d'une manière convenable dans les deux cas étudiés. La valeur moyenne de la variable de tension de sortie du hacheur (tension aux bornes de la charge résistive) est également atteinte en un seul cycle de commutation, grâce aux modulations par la référence du signal de commande. Toutefois, les signaux de sortie (tension et courant de charge) obtenus présentent notamment des harmoniques, qui peuvent être éliminés en plaçant en aval un filtre passe-bas dans notre montage.

6. CONCLUSION

Dans cet article, le concept, la théorie et la simulation de la nouvelle technique de contrôle en un seul cycle 'One cycle Control' du hacheur dévolteur cc/cc ont été présentées. Les résultats issus de la simulation et de l'expérimentation, qui ont été obtenus, dans le cas de notre système utilisé pour les applications photovoltaïques sont appréciables. L'analyse de ces résultats confirme que cette technique de contrôle est bien adaptée à notre application, avec notamment des avantages suivants :

- le régime transitoire de la tension de sortie s'établit en un seul cycle,
- la valeur moyenne de la tension de sortie du hacheur est capable de suivre la valeur de référence,
- l'erreur entre la tension de charge et de la consigne, au régime permanent, est pratiquement nulle.

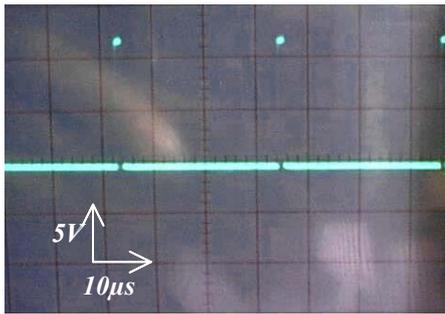
Les particularités de cette technique de contrôle résident dans :

- la robustesse vis-à-vis des perturbations dues à la source de tension (cas du GPV),
- la rapidité d'action (convergence en un seul cycle),
- la simplicité d'implantation.

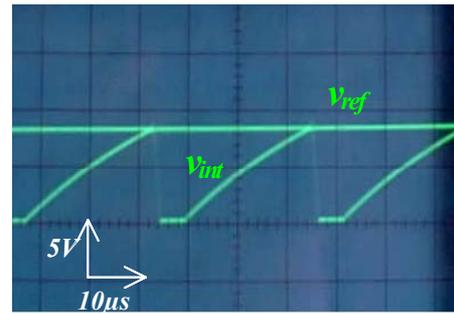
Enfin, ce type de commande s'adapterait bien à un régulateur de tension ou un système de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) pour un générateur photovoltaïque, vu le caractère aléatoire de la puissance produite.

RÉFÉRENCES

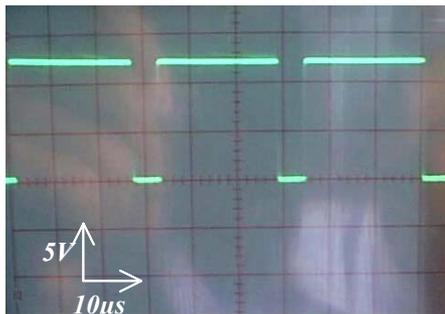
- [1] K. M. Smedley and S. Cuk, "One Cycle Control of Switching Converters", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 10, N° 6, pp. 625-633, November 1995
- [2] K. M. Smedley and S. Cuk, "Dynamics of one cycle controlled Cuk Converter", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 10, N° 6, pp. 634-639, November 1995
- [3] G. W. Hart, "Experimental tests of open-loop maximum power point tracking techniques for photovoltaic arrays", Solar cells, Vol.13, N° 6, pp. 185-195, 1994
- [4] "SIMULINK, Dynamic System Simulation Software", User's guide, For the X Window System, The MATH WORKS Inc., March 1992
- [5] S. Colombi, "Design and Simulation of Mechatronic Applications and Power Electronic Systems with Matlab/Simulink", EPFL-LEI Lausanne, June 1996



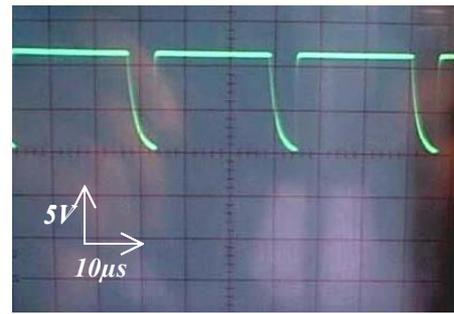
a) Signal d'horloge



b) Tension à la sortie de l'intégrateur

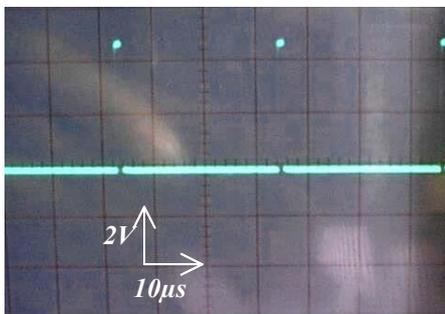


c) Signal de commande

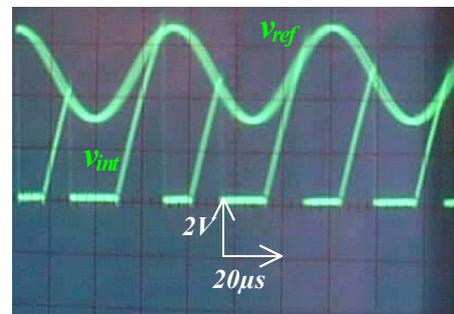


d) Tension de charge

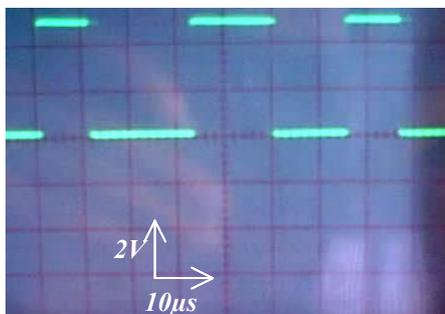
Fig. 14 Différents signaux obtenus pour les tensions v_g constante et v_{ref} constante



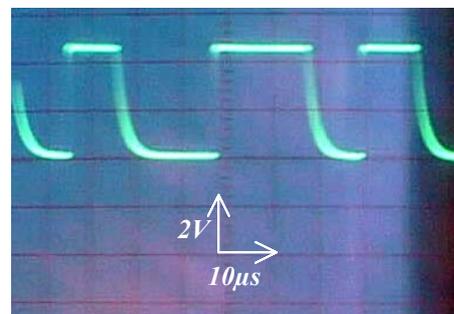
a) Signal d'horloge



b) Tension à la sortie de l'intégrateur



c) Signal de commande



d) Tension de charge

Fig. 15 Différents signaux obtenus pour les tensions v_g constante et v_{ref} variable