

Modélisation Fine et Simulation d'un Contrôleur MPPT à Base de la Commande à Conductance Incrémentale Destiné au Pompage PV

M. MGHEZZI LARAFI⁽¹⁾, B. BOUZIDI⁽¹⁾, D. GHRIBI ep DIAF⁽¹⁾, M. FATHI⁽¹⁾

⁽¹⁾Unité de Développement des Équipements Solaires (UDES) / Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER)

Bou Ismail, 42415, W. Tipaza, Algérie.

E-mail : lm.mghezzi@yahoo.fr.

Résumé— Ce travail est consacré à la modélisation fine et la simulation d'un contrôleur MPPT boost destiné à l'alimentation d'une nouvelle génération d'onduleurs de pompage solaire triphasés de haute gamme de puissance (2.2 à 37 kW), qui opèrent à une tension entre phases de 380 V, cela a pour avantage de préserver le même groupe motopompe alimenté par le réseau électrique conventionnel. L'algorithme d'adaptation d'impédance vue par le générateur PV est basé sur la méthode de la conductance incrémentale qui permet d'effectuer la poursuite du point de puissance maximale du générateur photovoltaïque (PV). Nous présenterons tout d'abord la méthodologie de modélisation et de simulation du système, ainsi que l'étude des différents facteurs influant sur le bon fonctionnement du convertisseur DC/DC étudié. Nous présenterons enfin les différents résultats de simulation en mettant en évidence les divers phénomènes mis en jeu.

Mots clés— Pompage PV, Contrôleur MPPT, Conductance incrémentale, Modèle d'état, Rapport cyclique.

I. INTRODUCTION

Ces dernières décennies, la demande énergétique mondiale est en perpétuelle accroissement avec le développement technologique. La consommation d'énergies fossiles provoque un réchauffement climatique qui devient une véritable menace de l'environnement. Pour cela, une transition énergétique vers les énergies renouvelables s'impose, elle rentre d'une manière générale dans le cadre de développement durable. L'énergie solaire est à l'origine de la quasi-totalité des différentes formes d'énergies renouvelables, qui peut être exploitée sous deux aspects, photovoltaïque ou thermique. Cependant les applications de pompage photovoltaïque au fil du soleil nécessitent l'utilisation de convertisseurs DC/DC [1] qui constituent des systèmes de conditionnement de puissance, ils permettent de mettre le système dans la zone de fonctionnement optimale, afin d'extraire le maximum de puissance à partir d'un générateur photovoltaïque. Pour toutes ces raisons, nous nous proposons d'effectuer l'analyse des divers phénomènes intervenant dans le tracking du point de puissance maximale (MPP), en effectuant une simulation sous l'environnement Matlab.

II. Modélisation de la chaîne de conversion photovoltaïque

Nous avons opté pour le modèle à deux diodes pour modéliser le générateur photovoltaïque [2] (Fig. 1). La caractéristique courant-tension (I-V) du champ photovoltaïque est décrite par l'équation algébrique non linéaire à deux variables (1), elle est

facilement résoluble par l'algorithme de Newton à pas constant affiné.

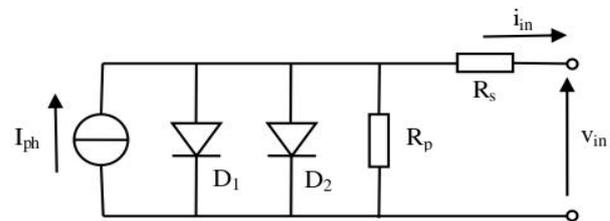


Fig. 1 Schéma équivalent du modèle à deux diodes du générateur photovoltaïque

$$f(i_{in}, v_{in}) = I_{ph} - I_{in} - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{v_{in} + R_s i_{in}}{V_T n_1}\right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp\left(\frac{v_{in} + R_s i_{in}}{V_T n_2}\right) - 1 \right) - \frac{v_{in} + R_s i_{in}}{R_p} = 0 \quad (1)$$

Avec :

I_{ph} : photocourant du générateur PV.

I_{s1} et I_{s2} : courants de saturations des diodes D_1 et D_2 .

n_1 et n_2 : facteurs d'idéalités des diodes D_1 et D_2 .

R_s : résistance série du générateur PV.

R_p : résistance parallèle du générateur PV.

La tension thermodynamique d'un module PV est définie par :

$$V_{T, mod} = \frac{K_B T_j}{q_e} \quad \text{Où : } K_B : \text{constante de Boltzman.} \\ T_j : \text{température de jonction en } ^\circ\text{k.} \\ q_e : \text{charge d'un électron.}$$

La tension thermodynamique V_T du générateur PV est définie aux équations de définitions (3).

Nous distinguons deux cas de figures :

- Dans le cas où un condensateur d'entrée est branché directement aux bornes du générateur PV (Fig 2) la tension du générateur PV devient une variable d'état, alors que le courant du générateur PV devient une variable de commande du modèle d'état du convertisseur dc/dc. Donc la résolution par l'algorithme de Newton s'effectue par rapport à la variable de commande (équation 2), c'est-à-dire dans ce premier cas de figure, par rapport au courant du générateur PV.

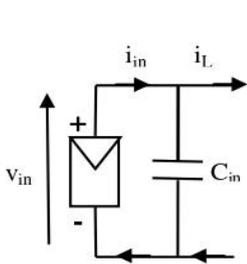


Fig. 2

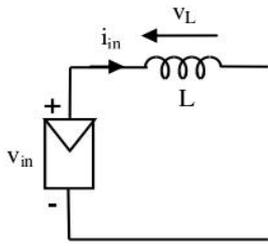


Fig. 3

$$i_{in}(k+1) = i_{in}(k) - \frac{f(i_{in}(k), v_{in}(k))}{\frac{df(i_{in}, v_{in})}{di_{in}}(k)} \quad (2)$$

$$v_{in}(k+1) = v_{in}(k) - \frac{f(i_{in}(k), v_{in}(k))}{\frac{df(i_{in}, v_{in})}{dv_{in}}(k)} \quad (3)$$

- Dans le cas où une bobine est connectée directement en série avec le générateur PV (Fig. 3), le courant délivré par le générateur PV devient une variable d'état, alors que la tension aux bornes du générateur PV devient une grandeur de commande du modèle d'état du convertisseur étudié, et par conséquent la résolution par l'algorithme de Newton s'effectue par rapport à la tension du générateur PV (équation 3).

Le générateur PV préalablement dimensionné est constitué d'une association série-parallèle de module PV. Soient N_s et N_p respectivement le nombre de modules PV associés en série et en parallèle du champ PV, et soient I_{sc} et V_{oc} respectivement le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert du générateur PV. Les paramètres d'un générateur PV sont liés à ceux homologues d'un module PV par les équations de définition (4). L'acronyme mod figure aux indices des paramètres d'un panneau PV.

$$\begin{aligned} I_{ph} &= N_p I_{ph,mod} & R_p &= \frac{N_s}{N_p} R_{p,mod} \\ I_{s1} &= N_p I_{s1,mod} & V_T &= N_s V_{T,mod} \\ I_{s2} &= N_p I_{s2,mod} & I_{sc} &= N_p I_{sc,mod} \\ R_s &= \frac{N_s}{N_p} R_{s,mod} & V_{oc} &= N_s V_{oc,mod} \end{aligned} \quad (4)$$

La figure 4 met en évidence le circuit de puissance d'un contrôleur boost, dédié à l'alimentation d'un onduleur de pompage photovoltaïque.

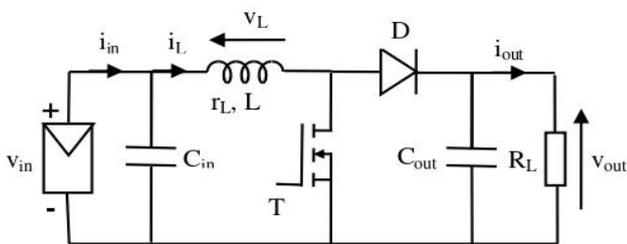


Fig. 4 Schéma de principe d'un hacheur boost

Où :

V_{in} et i_{in} désignent la tension et le courant d'entrées du hacheur. V_L et i_L représentent la tension et le courant de la self d'inductance L et de résistance interne r_L .

V_{out} et i_{out} représentent la tension et le courant de sortie.

C_{in} et C_{out} désignent les capacités d'entrée et de sortie du hacheur.

Le convertisseur DC/DC est constitué essentiellement d'un interrupteur électronique de puissance commandable T comme un transistor MOSFET à tension de sortie élevée (1500 V) et d'une diode à commutation rapide D . L'interrupteur T est commandé par un signal à modulation de largeur d'impulsion (MLI) de période de découpage fixe et de rapport cyclique variable, qui permet d'effectuer une adaptation d'impédance en vue de placer le point de fonctionnement de l'installation photovoltaïque autonome au point de puissance maximale. La conduction des deux interrupteurs est complémentaire. On suppose que le système opère en mode de conduction continu, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'extinction du courant dans l'inductance. On distingue deux modes de fonctionnement du hacheur survolteur selon l'état fermé et ouvert de son interrupteur. Dans le cas où le convertisseur opère en haute fréquence, on pourra lui associer un modèle d'état approximé unique au sens des valeurs moyennes des grandeurs, valable pour les deux modes de fonctionnement du hacheur, sous l'hypothèse d'évolution temporelle linéaire des variables d'état du système. L'onduleur de pompage est vu comme une résistance apparente R_L par le hacheur, il joue le rôle d'une charge électrique. Le modèle d'état continu régissant le comportement dynamique du système est donné par :

$$\dot{X} = A X + B U \quad (5)$$

Avec :

$$X = \begin{bmatrix} v_{in} \\ v_{out} \\ i_L \end{bmatrix} \quad U = [i_{in}]$$

Les paramètres matriciels du système étant :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1}{C_{in}} \\ 0 & \frac{-1}{R_L C_{out}} & \frac{(1-D)}{C_{out}} \\ \frac{1}{L} & \frac{-(1-D)}{L} & \frac{-r_L}{L} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_{in}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Vu que le rapport cyclique est variable au cours du temps lors de la recherche du MPP, la représentation d'état du système est non linéaire. Nous avons opté pour l'algorithme de Runge Kutta à pas constant d'ordre 4 comme solveur du système d'équations différentielles du premier ordre considéré [3]. Le modèle d'état échantillonné du système est la forme de la forme générale :

$$X(k+1) = g(X(k), U(k), D(k)) \quad (6)$$

La figure 5 visualise le schéma synoptique de l'installation PV autonome étudiée, elle est constituée principalement d'un générateur PV, d'un contrôleur MPPT et d'une charge électrique qui comporte un onduleur de pompage PV de pilotage d'un système motopompe.

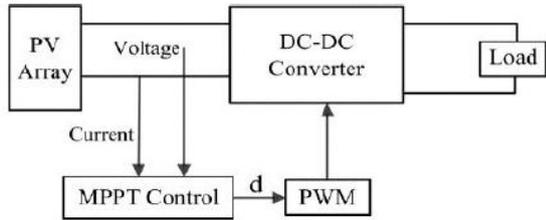


Fig. 5 Schéma block du système PV autonome

implémentation pratique est plus difficile. L'organigramme de l'algorithme de la conductance incrémentale simple est visualisé à la Fig.6. La méthode de la conductance incrémentale est basée sur l'évaluation instantanée de la pente de la caractéristique puissance-tension, afin de détecter la position du point de fonctionnement du générateur photovoltaïque par rapport au MPP, selon laquelle le rapport cyclique du hacheur est ajusté, de telle manière à annuler la pente de la courbe puissance-tension. Cela est numériquement impossible, pour cette raison le point de fonctionnement oscille en permanence autour du MPP. Pour pallier à cet inconvénient, la version améliorée de cette technique introduit une nouvelle condition dans les critères de test d'égalité à zéro de l'algorithme [4]. On définira une erreur marginale ϵ et on prendra la valeur absolue des critères de nullité qui doivent être inférieure au sens large à ϵ , les conditions pour que la puissance maximale soit atteinte sont donc :

$$|\Delta i_{in}| \leq \epsilon, \quad |\Delta v_{in}| \leq \epsilon, \quad \left| \frac{i_{in}}{v_{in}} + \frac{\Delta i_{in}}{\Delta v_{in}} \right| \leq \epsilon \quad (7)$$

III.Principe de la stratégie de commande MPPT à conductance incrémentale

L'algorithme de la conductance incrémentale s'adapte bien aux variations rapides des conditions météorologiques du site, il est relativement plus stable que la méthode P&O, cependant son

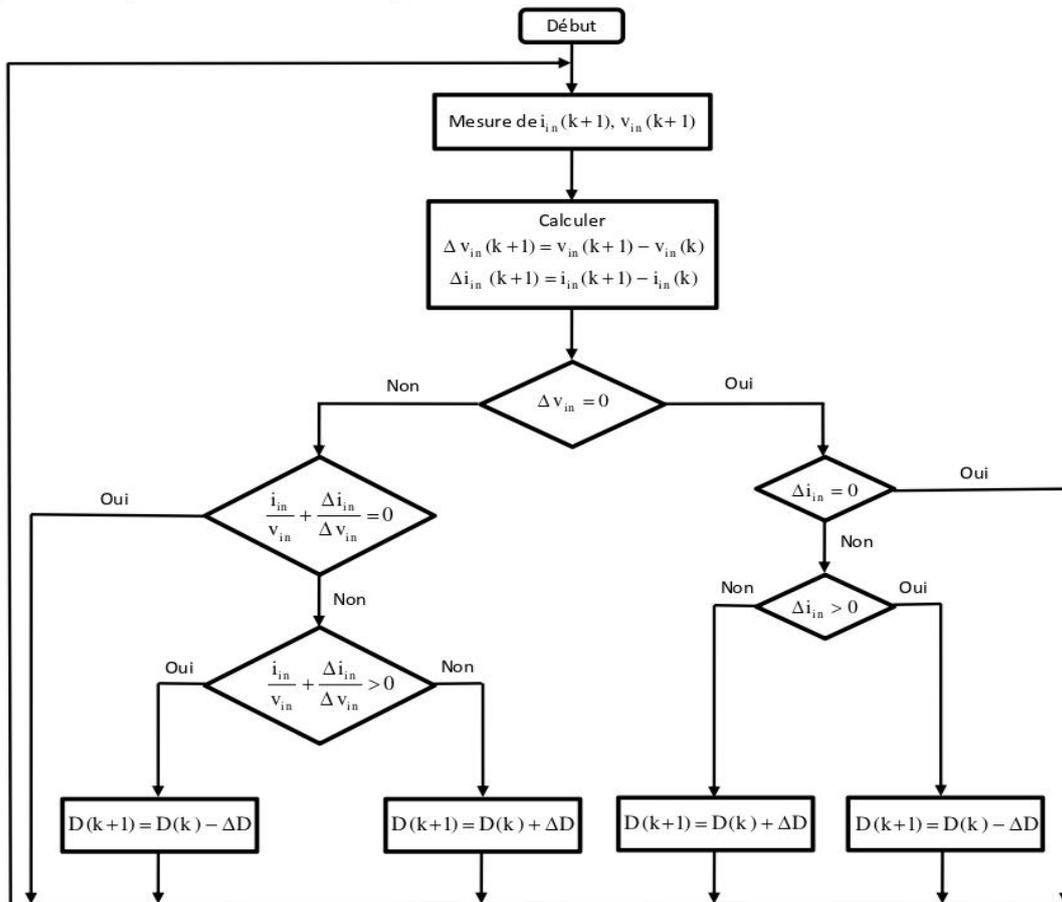


Fig. 6 Organigramme de la méthode de la conductance incrémentale simple

IV. ALGORITHME DE SIMULATION GLOBALE DU SYSTEME

L'algorithme de simulation du contrôleur MPPT (Fig. 7) débute par la lecture des paramètres du système et le tracé de la caractéristique I-V du générateur PV à l'aide de l'algorithme de Newton (équation 2), ainsi que par l'initialisation des variables d'état, de la variable de commande et du rapport cyclique. On définit une fonction d'interpolation linéaire multi-composante qui permet d'estimer la valeur prise par la caractéristique I-V d'un générateur PV entre deux points déterminés consécutifs. Elle consiste à utiliser pour cela la fonction affine (du 1^{er} ordre) passant par ces deux points donnés en vue d'évaluer sous une forme explicite la fonction originale en un point quelconque situés entre les deux points considérés, soit à un instant k d'évolution du processus :

$$i_{in}(k) = f_{interpolation}(v_{in}(k)) \quad (8)$$

avec : $f_{interpolation}$ est une fonction d'interpolation linéaire passant par deux points donnés consécutifs.

La recherche du MPP du générateur PV s'effectue selon trois étapes séquentielles, la résolution de l'équation d'état discrète (6) par la méthode de Runge Kutta d'ordre 4 à pas constant qui permet de calculer, entre autres, la nouvelle tension du

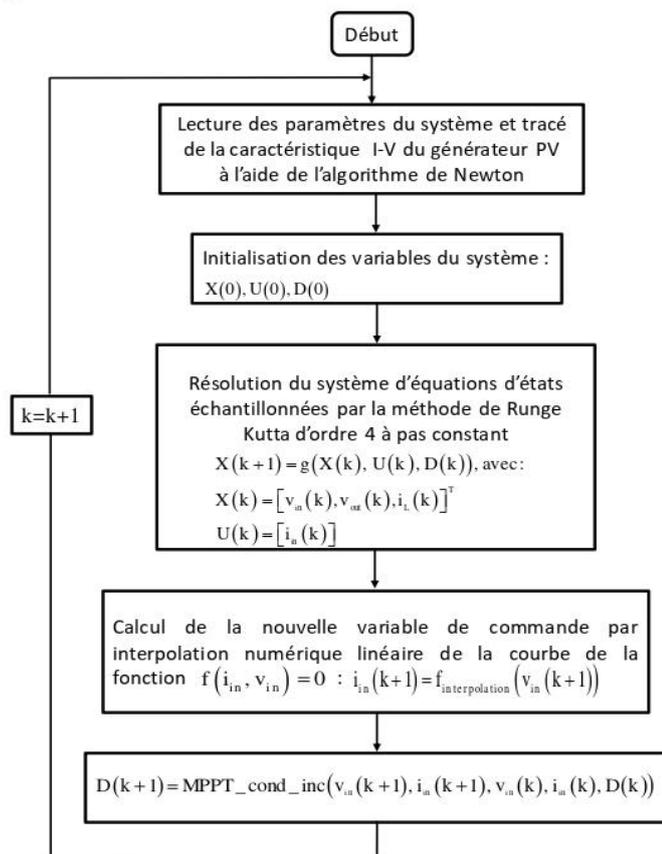


Fig. 7 Organigramme de simulation du système PV

générateur PV $v_{in}(k+1)$, elle est injectée dans la fonction d'interpolation numérique linéaire du générateur PV (8), qui permet de calculer le nouveau courant du générateur PV $i_{in}(k+1)$ représentant la variable de commande actualisée du système. Nous évaluons enfin la nouvelle valeur du rapport cyclique $D(k+1)$ grâce à la méthode de la conductance incrémentale et le processus recommence de nouveau. En résumé, l'algorithme d'optimisation du fonctionnement du système est bouclé entre la résolution de l'équation d'état, le calcul de la nouvelle grandeur de commande et l'évaluation du nouveau rapport cyclique.

V. RESULTATS DE SIMULATION ET DISCUSSIONS

V.1 Données de simulation du système

Les principales grandeurs caractéristiques des modules PV poly-cristallin utilisés dans les conditions météorologiques de référence (25 °C, 1000 W /m²) sont consignées au tableau I:

TABLE I. GRANDEURS CARACTERISTIQUES DU MODULE PV

| Grandeur | Valeur |
|---|---------|
| Puissance crete $P_{max, mod}$ | 120 W |
| Tension nominale $V_{n, mod}$ | 24 V |
| Tension au MPP $V_{mp, mod}$ | 32.52 V |
| Courant au MPP $I_{mp, mod}$ | 3.71 A |
| Tension de circuit ouvert $V_{oc, mod}$ | 40.15 |
| Courant de court-circuit $I_{sc, mod}$ | 3.99 A |
| Facteur de forme | 75.15 % |
| NOCT | 45 °C |

Dans les conditions standards, les paramètres de simulation du module PV utilisé sont donnés au tableau II :

TABLE II. PARAMETRES CARACTERISTIQUES DU MODULE PV

| Paramètre | Valeur |
|---|-----------------------|
| Photocourant $I_{ph, mod}$ | 4 A |
| Courant de saturation de la diode D_1 : $I_{s1, mod}$ | $1.2 \cdot 10^{-9}$ A |
| Courant de saturation de la diode D_2 : $I_{s2, mod}$ | $1.5 \cdot 10^{-5}$ A |
| Résistance série $R_{s, mod}$ | 0.5760 Ω |
| Résistance parallèle $R_{p, mod}$ | 12.24 k Ω |
| Facteur d'idéalité de la diode D_1 : n_1 | 0.9 |
| Facteur d'idéalité de la diode D_2 : n_2 | 1.9 |

Le convertisseur DC/DC alimente un onduleur de pompage PV triphasé qui pilote un moteur asynchrone triphasé d'une puissance de 4 kW et d'une tension entre phases de 380 V, il entraîne à son tour une pompe centrifuge qui assure une alimentation en eau, d'habitats en site isolé du réseau électrique conventionnel. Un dimensionnement préalable

permet de calculer la taille du générateur PV dans les conditions standard, soient :

Nombre de modules PV montés en série par branche : $N_s = 17$.

Nombre de branches du générateur PV : $N_p = 2$.

Les paramètres électriques du hacheur survolteur sont mis en évidence dans le tableau III.

TABLE III. PARAMETRES CARACTERISTIQUES DU CONTROLEUR MPPT

| Paramètre | Valeur |
|---|--------------|
| Capacité d'entrée du hacheur : C_{in} | 5 μ F |
| Capacité de sortie du hacheur : C_{out} | 30 μ F |
| Inductance du convertisseur DC/DC : L | 6.3 mH |
| Résistance interne de l'enroulement : r_L | 0.1 Ω |
| Résistance apparente vue par le hacheur : R_L | 90 Ω |

Les données de simulation du circuit de commande du convertisseur DC/DC sont comme suit :

Rapport cyclique initial : $D_0 = 0.0$

Fréquence de porteuse : $f_{sw} = 10$ kHz

Pas du rapport cyclique : $\Delta D = 0.001$

Erreur marginale : $\epsilon = 0.001$

V.2 Conditions d'atteinte du MPP d'un générateur PV dans le cas d'un convertisseur DC/DC boost

Le point de fonctionnement du système à un instant k donnée est obtenu par la détermination du point d'intersection entre la caractéristique I-V du générateur PV décrit par l'équation (1) et celle de la droite des charges définie à l'instant k de la manière suivante :

$$i_{in}(k) = \frac{1}{R_T(k)} v_{in}(k) \quad (9)$$

Avec :

$$R_T(k) = r_L + (1-D(k))^2 R_L \quad (10)$$

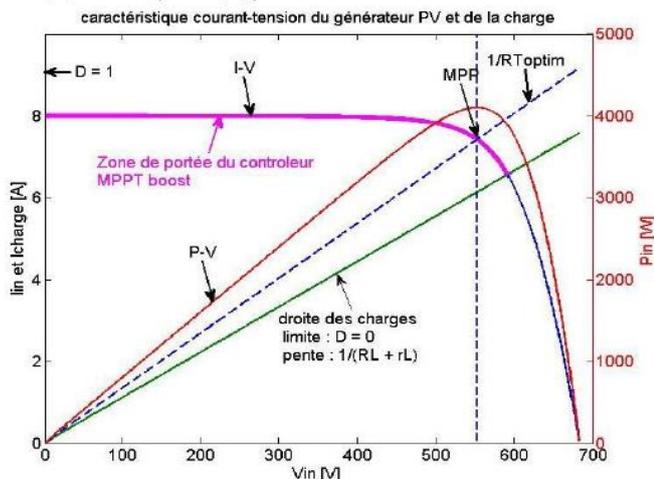


Fig. 8 Zone de portée en tension d'entrée d'un convertisseur DC/DC boost

$R_T(k)$: représente la résistance apparente vue par le générateur PV, qui dépend de la résistance de charge R_L et du rapport cyclique D à l'instant k .

La figure 8 montre les caractéristiques I-V et P-V (puissance-tension) du générateur PV étudié pour un éclairement et une température constants, soient ceux des conditions météorologiques de référence (1000 W/m^2 , 25°C), ainsi que les droites de charge de diverses situations du point de vue convergence vers le MPP. La portion de la courbe I-V délimitée par les deux droites de charge limites correspondant aux deux valeurs extrêmes du rapport cyclique : $D=0$ et $D=1$, définit la plage de variation de la tension d'entrée d'un convertisseur DC/DC boost (courbe en couleur violette à la Fig. 8), à laquelle doit appartenir l'abscisse du MPP pour qu'il puisse être atteint par l'algorithme d'optimisation du fonctionnement d'un générateur PV, cela n'est vrai que si la condition nécessaire suivante, est satisfaite pour une résistance de charge R_L donnée, soit :

$$\frac{1}{R_L + r_L} \leq \frac{1}{R_{T_{optim}}} \quad (11)$$

$R_{T_{optim}}$ étant l'impédance d'entrée du hacheur survolteur, correspondant au rapport cyclique du MPP du générateur PV.

Cependant, le choix du rapport cyclique initial dépend de la résistance de charge R_L , qui détermine la position du point de fonctionnement initial par rapport au MPP. A titre d'exemple, dans le cas où le point de fonctionnement initial est situé à gauche du MPP et si le rapport cyclique initial correspondant est nul ($D(0) = 0$), l'algorithme de recherche du MPP doit faire augmenter la tension v_{in} du générateur PV pour qu'il puisse atteindre le MPP et vu que le rapport cyclique $D(k)$ et la tension d'entrée du hacheur $v_{in}(k)$ ont des sens de variation opposés, le rapport cyclique doit décroître, ce qui est impossible que $D(k)$ devient négatif, dans ces conditions l'algorithme se bloque et reste figé au point de fonctionnement initial et le MPP n'est jamais atteint. Cela montre que le choix du point de fonctionnement initial et du rapport cyclique correspondant est déterminant pour que l'algorithme puisse atteindre le MPP. Par ailleurs, il faudra limiter la valeur maximale prise par le rapport cyclique en vue d'éviter une baisse considérable du rendement du convertisseur.

V.3 Simulation du comportement du contrôleur MPPT en régime de petites dynamiques

Il s'agit d'effectuer l'étude et la simulation du comportement dynamique du système entre deux points de fonctionnement du régime établi, lors de la recherche du MPP du générateur PV à l'aide de la méthode de la conductance incrémentale améliorée sous l'environnement MATLAB (langage de programmation). Les Figures 9 montrent les représentations graphiques simulées des diverses grandeurs décrivant le comportement du convertisseur DC/DC en régime dynamique à faible degré d'agitation, telles que respectivement les évolutions temporelles du rapport cyclique et de la puissance de sortie du convertisseur, ainsi que les tensions d'entrée et de sortie du

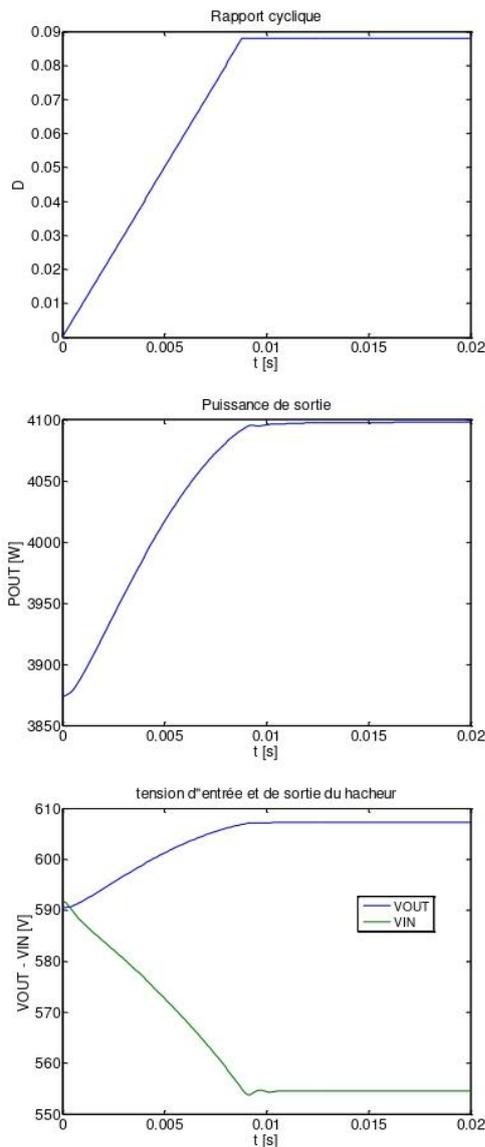


Fig. 9 Résultats de simulation de l'algorithme de la conductance incrémentale améliorée en régime de petites dynamiques

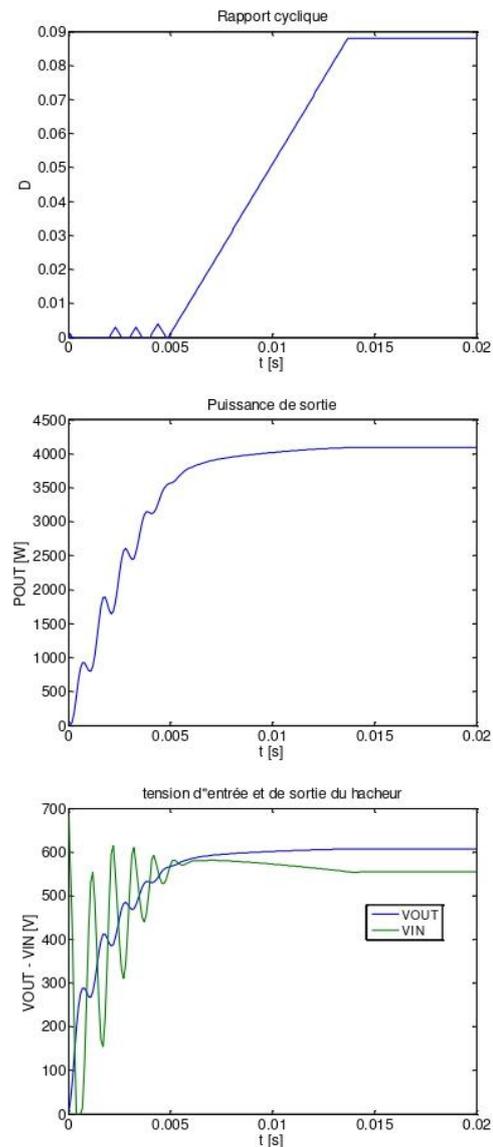


Fig. 10 Résultats de simulation de l'algorithme de la conductance incrémentale améliorée en régime de larges dynamiques

contrôleur MPPT. On constate que les réponses du système sont rapides, de l'ordre de 10 ms, on pourra considérer que l'éclairement est constant pendant ce lap de temps très réduit. Par ailleurs, on voit bien que les réponses dynamiques temporelles du convertisseur sont amorties, la convergence est pratiquement directe et sans fluctuations du système en régime établi.

V.4 Simulation du comportement transitoire du contrôleur MPPT en régime de larges dynamiques

Nous procéderons à l'analyse transitoire du comportement du système présentant une dynamique très agitée. Au départ, le générateur PV est à circuit ouvert, le système est à l'état de repos. Lorsque le champ de modules PV est connecté à l'entrée du convertisseur DC/DC à l'aide à titre indicatif d'un contacteur statique, on observe des dynamiques très rapides du système, cela est montré clairement aux Fig. 10 qui visualisent les diverses réponses temporelles transitoires du contrôleur MPPT, ils présentent plusieurs fluctuations violentes du point de fonctionnement du système, le régime établi est rapidement atteint ce qui garantit la convergence

de l'algorithme vers le MPP. La courbe caractéristique du rapport cyclique varie globalement dans le sens opposé de la tension d'entrée du hacheur, néanmoins elle présente des zones d'annulation qui correspondent à des saturations forcées software du seuil inférieure du rapport cyclique par zéro en vue d'éviter qu'il prenne des valeurs négatives pour qu'ils ne conduisent pas à des résultats erronés. Le fait que la tension du générateur PV s'annule ne cause aucune anomalie de fonctionnement, puisque la tension de sortie du convertisseur varie régulièrement dans le sens opposé de sa tension d'entrée. Les ondulations de la courbe de puissance de sortie du hacheur sont tolérables. Dans le cas où le contrôleur MPPT alimente un onduleur de pompage solaire qui pilote un groupe motopompe, les inductances des enroulements du moteur permettent d'amortir considérablement les oscillations des réponses dynamiques transitoires du convertisseur DC/DC, par contre le temps de réponse devient plus lent.

CONCLUSION

Nous avons effectué une modélisation fine du comportement d'un contrôleur MPPT boost. L'algorithme de recherche du MPP est bouclé entre la résolution de l'équation d'état, le calcul de la nouvelle variable de commande et l'évaluation du rapport cyclique actualisé. La méthode de la conductance incrémentale améliorée est très robuste quelque soit le degré d'agitation dynamique du système, elle permet de supprimer totalement les bruits d'ondulations des diverses réponses dynamiques temporelles du contrôleur MPPT en régime établi. Un compromis s'impose dans le dimensionnement de l'inductance du convertisseur DC/DC, afin d'assurer d'une part une bonne caractéristique d'amortissement et d'autre part un temps de réponse rapide du système. En perspective, nous pourrions rapporter des améliorations des algorithmes MPPT basés sur la méthode de la conductance incrémentale en introduisant les techniques de recherche du MPP à pas variable [5], les concepts de l'intelligence artificielle [6], ainsi que les algorithmes de filtrage des signaux entrées-sorties du système de la discipline du traitement du signal, qui peuvent être combinés en vue de réaliser des méthodes de poursuite du MPP de hautes performances dynamiques.

REFERENCES

- [1] Guy. Séguier, "Les Convertisseurs de l'Electronique de Puissance, Commande et Comportement Dynamique", vol. 5. Technique & Documentation, 1998.
- [2] L. Sandrolini, M. Artioli, U. Reggiani, "Numerical method for the extraction of photovoltaic module double-diode model parameters through cluster analysis", *Applied Energy* 87 (2010) 442-451, Elsevier.
- [3] Yang Cao Chung and Morris, "Applied Numerical Methods Using MATLAB", WILEY, 2005.
- [4] Khaled SOBAIHI, "Etude et réalisation d'un hacheur MPPT à contre réaction de tension", Mémoire de Magister, 2003.
- [5] Emad M. Ahmed, Masahito Shoyama, "Stability Study of Variable Step Size Incremental Conductance/Impedance MPPT for PV systems", 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia May 30-June 3, 2011, The Shilla Jeju, Korea.
- [6] L. R. Muniz ; M. M. Severo ; G. T. Braga ; F. G. Guimarães, "Neuro-fuzzy structure applied in maximum power point tracking in photovoltaic panels", *Power Electronics Conference, COBEP, Brazilian, IEEE*, 2015.