

Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques

V. BOITIER¹, P. MAUSSION²

email : vboitier@laas.fr tél : 05 61 55 86 89 ; pascal.mauSSION@laplace.univ-tlse.fr

¹ LAAS-CNRS ; Université de Toulouse ; 7, avenue du Colonel Roche, F-31077 Toulouse, France

² IUFM Midi Pyrénées, LAPLACE, Université de Toulouse, INPT, UPS, CNRS

Résumé : L'objectif de cet article est d'illustrer les principes utilisés pour faire fonctionner un générateur photovoltaïque à son maximum de puissance. Divers exemples d'implantations numérique ou analogique de cette fonction particulière sont présentés, avec des résultats expérimentaux ou de simulations.

1. Introduction.

Les énergies renouvelables ont le vent en poupe et constituent un thème porteur vis-à-vis des étudiants. De plus en plus de lycées sont amenés à faire l'acquisition de systèmes photovoltaïques [1] adaptés pour une connexion réseau, ou pour l'alimentation de systèmes autonomes avec stockage. Ces systèmes restent coûteux malgré des coûts de fabrication en baisse. Il convient donc d'en soigner les différents composants pour maximiser le rendement global de l'installation.

Sur les régulateurs de charge ou les onduleurs, deux tendances apparaissent selon les applications visées, on peut minimiser l'électronique de commande pour augmenter la robustesse (chargeur de batterie à partir de panneau photovoltaïque pour les PVD-chargeur STECA [2]) ou privilégier un contrôle plus fin mais plus complexe (chargeur Solar Boost 2000 [3], onduleur connecté au réseau avec fonction MPPT incluse [4]).

Dans le cas où l'on souhaite maximiser l'énergie produite (onduleur connecté au réseau, chargeur de batterie lorsque la batterie est déchargée), il est intéressant d'inclure une recherche du point de puissance maximum (Maximum Power Point Tracking -MPPT-) dans les convertisseurs.

Après un rappel sur les différentes méthodes utilisées pour rechercher le point de puissance maximum d'un générateur photovoltaïque, on présentera différents résultats expérimentaux et/ou de simulation pour valider les algorithmes utilisés, puis on établira le cadre d'utilisation de tels algorithmes et leurs limites de fonctionnement.

2. Modèle de simulation Psim.

Nous présentons ici un modèle à deux diodes d'un générateur PV (et non d'une cellule), plus fidèle qu'un modèle équivalent à une seule diode et résistances. La figure 1 présente les constituants de ce modèle circuit

équivalent qui permet une approximation par trois segments de droites de la caractéristique I(V) du générateur solaire. Les modèles PSim de cet article sont disponibles en téléchargement gratuit sur [5].

La détermination des paramètres du modèle peut se faire comme suit. Prenons par exemple un générateur solaire de caractéristiques : $V_{OC} = 44V$; $V_{opt} = 36V$; $I_{opt} = 4,5A$; $I_{CC} = 5A$ et $R_s = 20\ m\Omega$. Les générateurs V1 et V2 dont fixés respectivement à 32V et 40V, de part et d'autre du point $V_{opt} = 36V$. Les lois des circuits permettent d'aboutir aux équations (1) et (2), d'où peuvent être aisément calculées les valeurs de résistances R1 et R2

$$V_{opt} = R_1 \cdot I_{CC1} + V_1 - (R_1 - R_s) \cdot I_{opt} \quad (1)$$

$$V_{OC} = R_1 // R_2 \cdot (I_{CC1} + V_1 / R_1 + V_2 / R_2) \quad (2)$$

Les perturbations sont prises en compte grâce au générateur de courant Delta_Icc qui simule une variation d'éclairement tandis que le générateur Delta_V1 simule une variation de température.

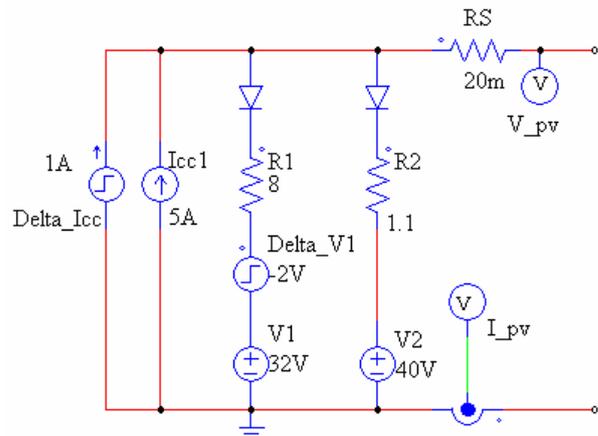


Fig 1 : Modèle 2 diodes d'un générateur PV.

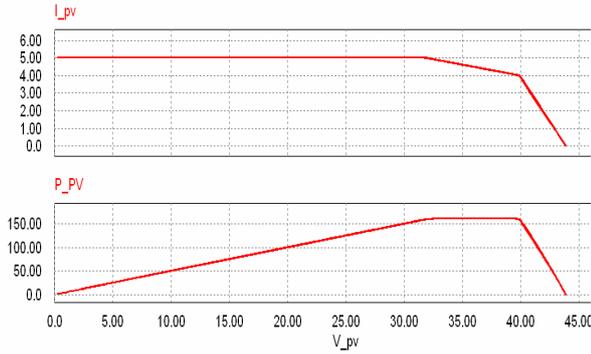


Fig 2 : Caractéristiques du modèle 2 diodes du générateur PV de la figure 1.

3. Commande extrémale.

3.1. Principes de l'adaptation d'impédance

La caractéristique puissance/tension d'un panneau solaire présente un extremum qui varie avec la température, l'éclairement et le vieillissement du panneau. Une connexion directe entre un générateur PV et sa charge a peu de chance de placer le système PV à son point de fonctionnement maximum (noté MPP pour Maximum Power Point). Dans le cas d'une charge type batterie, il faut que la tension de la batterie (qui impose la tension du panneau) soit proche de la tension V_{OPT} pour laquelle la puissance délivrée est maximale (cf fig 3).

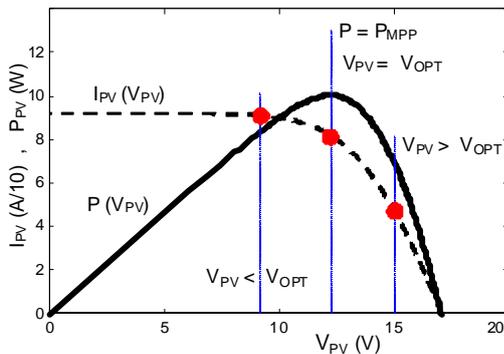


Fig 3 : Caractéristiques $I_{PV}(V)$ en pointillé et $P_{PV}(W)$ en trait plein pour un panneau de 12 Wc.

Si un convertisseur DC/DC est intercalé entre le générateur PV et la batterie on peut modifier le point de fonctionnement du panneau grâce à une loi de commande extrémale afin de maximiser en permanence l'énergie transférée.

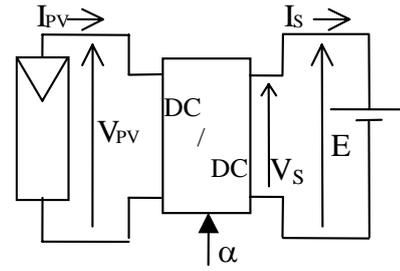


Fig 4 : Principe du convertisseur réalisant l'adaptation d'impédance.

Par exemple, dans le cas d'un convertisseur abaisseur (rapport cyclique α), la relation moyenne liant la tension de la batterie E et celle du panneau V_P s'écrit :

$$E = V_S = \alpha V_{PV} \quad (3)$$

Ainsi, en fixant α tel que :

$$\alpha = \alpha_{OPT} = \frac{E}{V_{OPT}} \quad (4)$$

$$\text{on obtient : } V_{PV} = V_{OPT} \quad (5)$$

$$\text{en conséquence : } P_{PV} = P_{MPP} \quad (6)$$

La même démarche convient pour toutes les charges (à condition qu'il existe une intersection entre les caractéristiques). Pour comprendre comment les caractéristiques se modifient, [6] propose une feuille de calcul sur tableur qui permet notamment de faire varier le rapport cyclique via un curseur et de visualiser, vue du côté de la charge (cf fig. 5 ci après), la modification de l'impédance de la source induite par le rapport cyclique ($V_S = \alpha V_{PV}$ et $I_S = I_{PV} / \alpha$). On peut alors déterminer le gain réalisé ou non suivant le point de fonctionnement choisi. La feuille permet aussi de modifier l'ensoleillement, la température, la charge ...

Les figures 5 et 6 présentent pour une batterie de 13V, respectivement les cas $\alpha=1$ (transfert non optimal,) et $\alpha=0,76$ (transfert optimal).

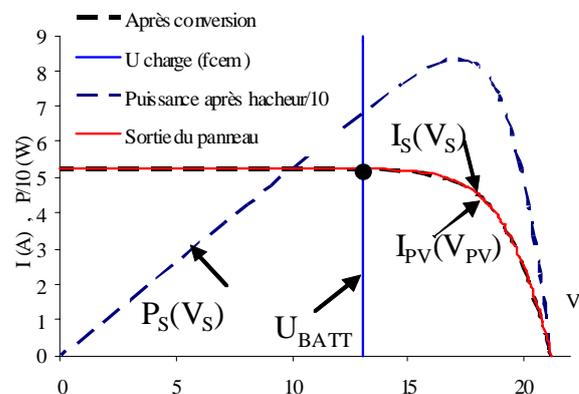


Fig 5 : Convertisseur avec $\alpha = 1$, puissance transmise:68W.

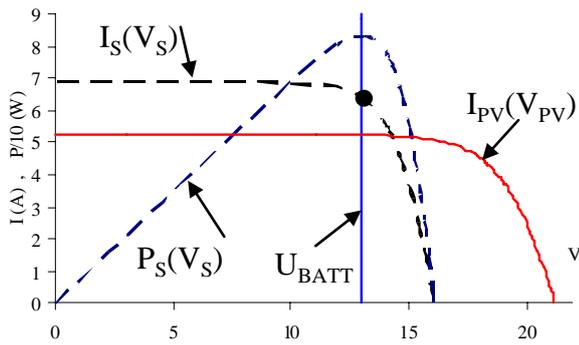


Fig. 6 : Convertisseur avec $\alpha = 0,76$, $P_S = 84 \text{ W}$, soit un gain de 23% par rapport à la connexion directe.

3.2. Commandes extrémales.

Dans tous les cas de figures, l'objectif d'une commande extrémale consiste à amener le système à son optimum de puissance et à l'y maintenir en dépit des variations de paramètres. Plusieurs familles de commandes utilisées sont présentées ci-après.

3.2.1. Commande P&O Perturb and Observ.

Les commandes regroupées sous cette dénomination contiennent une action de commande associée avec une action de recherche. Deux types de commandes présentées ci-après respectent ce cadre.

3.2.1.1 Principes de la commande dite "hill climbing".

Le principe de cette commande extrémale est très simple. On raisonne sur un convertisseur buck connecté à une batterie ($V_{PV} = E/\alpha$ et donc V_{PV} diminue quand α augmente) mais cela ne restreint en rien le principe de fonctionnement. Partant d'une commande avec un rapport cyclique petit (et donc V_{PV} grand), on augmente α régulièrement. Dans un premier temps la puissance croît (le maximum n'est pas encore atteint ①), se stabilise (le maximum est alors atteint ②), puis diminue (le maximum vient d'être dépassé ③). Le système de mesure détecte cette diminution de puissance, ce qui conditionne une inversion du sens de la commande : la puissance va alors augmenter, repasser par le maximum, puis diminuer; dès détection de cette diminution de puissance, le sens de la commande est à nouveau inversé... Finalement, le système se place en oscillation autour du maximum [6].

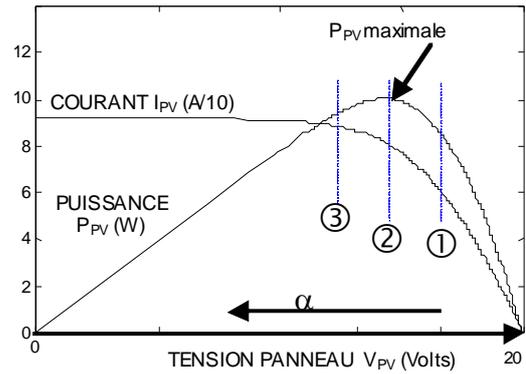


Fig 7. : Caractéristiques $P_{PV}(V_{PV})$ et $I_{PV}(V_{PV})$.

Cette oscillation permet au système de pilotage de vérifier que le maximum ne s'est pas déplacé et le cas échéant de le suivre mais elle entraîne une perte de rendement, le point de fonctionnement moyen étant en dessous du maximum.

La réalisation d'une telle commande peut être effectuée de manière analogique [7], ou par logiciel [8]. Hors le cas d'un onduleur relié au réseau, un convertisseur photovoltaïque ne fonctionnera pas tout le temps en mode MPPT. Dans le cas d'un chargeur de batterie, il y a d'autres modes de charges (régulation de tension quand la batterie est chargée) et/ou d'autres fonctionnalités (déconnexion de la charge ou du générateur), aussi une commande numérique nous semble mieux adaptée par sa modularité.

3.2.1.2. MPPT analogique utilisant cette méthode.

Un exemple de schéma de simulation utilisant une réalisation analogique de cette méthode, est présenté figure 8. Le principe repose sur l'intégration du signe de la dérivée temporelle filtrée de la puissance moyenne sur une période de découpage. Un intégrateur permet de faire varier le rapport cyclique : si la dérivée de la puissance est positive, il faut diminuer le rapport cyclique et l'augmenter dans le cas contraire. Le gain de l'intégrateur règle la convergence de l'algorithme. Le filtre doit éliminer les bruits en particulier ceux liés au découpage, mais ne pas dégrader les performances de la dérivée. Ces deux termes peuvent être réglés expérimentalement.

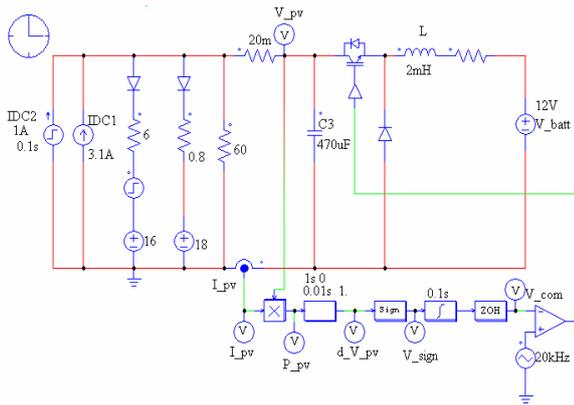


Fig. 8 : MPPT par intégration du signe de la dérivée de la puissance.

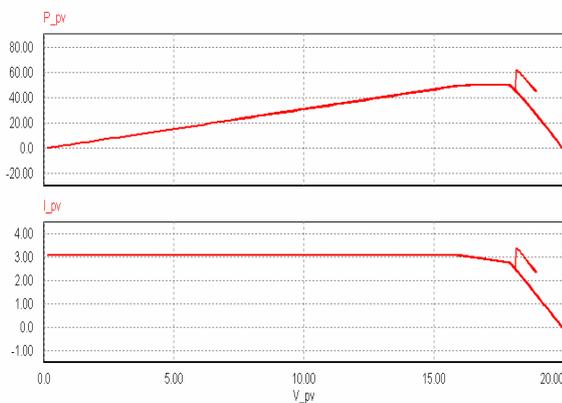


Fig. 8 : résultats de simulation pour des variations du MPP

D'autres structures sont disponibles dans la bibliographie, les fichiers de simulation PSim de certaines d'entre elles seront téléchargeables sur [5]. Citons en particulier le schéma de la figure 9 qui utilise le principe du « hill climbing » mais sans dérivée de la puissance, grâce à l'emploi de deux filtres passe bas avec des constantes de temps décalées.

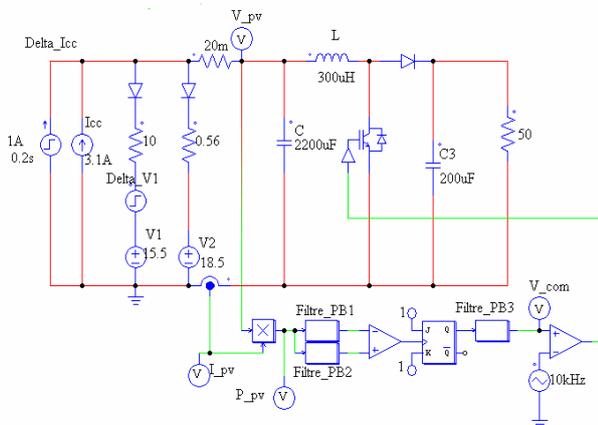
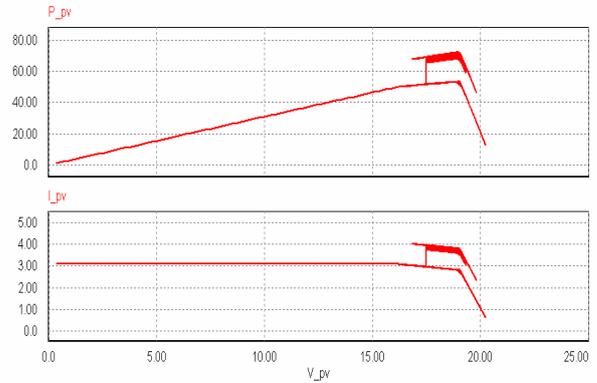


Fig. 9 : MPPT par approximation de la dérivée de la puissance.

La différence réalisée à tout instant entre la puissance et la puissance filtrée donc retardée, donne une image de ses variations. Le signe de ces variation commande la MLI via une bascule et un 3^e filtre.



: résultats de simulation pour des variations du MPP

3.2.1.3. MPPT numérique utilisant cette méthode.

Plusieurs prototypes pédagogiques de 100W [6] ont été réalisés pour cette étude. Une première version à base de 68HC11 délivrait un mot numérique de commande à un convertisseur numérique analogique, suivi d'un circuit SG3525 afin de générer un signal carré à rapport cyclique variable.

Bien que complexe, ce type de montage permet de pouvoir visualiser directement une tension continue image du rapport cyclique en sortie du CAN (figure 12). Sur les prototypes suivants, la commande est complètement intégrée dans un μC PIC16F876 (avec une fréquence de commutation de 150 kHz et une PWM sur 7 bits), cf figure 10. La sortie PWM est ensuite envoyée sur un driver de MOS IR2117. Il faut par ailleurs la filtrer pour visualiser plus facilement l'évolution du rapport cyclique.

Dans tous les cas, il y a un réglage à trouver entre les paramètres suivants : T_e (période d'échantillonnage de la commande) et $\Delta\alpha$ (pas de variation du rapport cyclique). Si on veut mesurer les variations de puissance, il faut aussi laisser le temps au système de répondre \Rightarrow inutile d'avoir un rafraîchissement trop rapide de la commande $T_e \approx 3 \tau$ convient avec τ la constante de temps du système. Pour un convertisseur de type buck, en première approche, $\tau = R_p C$ où C est la capacité placée en parallèle avec le générateur PV et R_p est la résistance équivalente en régime permanent de l'ensemble convertisseur et charge i.e. : $R_p = V_p / I_p$.



Fig. 10 : Convertisseur 100W type buck.

Pour commencer on prendra aussi $\Delta\alpha$ voisin de 5% de la gamme de variation possible pour avoir une variation de puissance significative. La figure 11 illustre l'algorithme de commande.

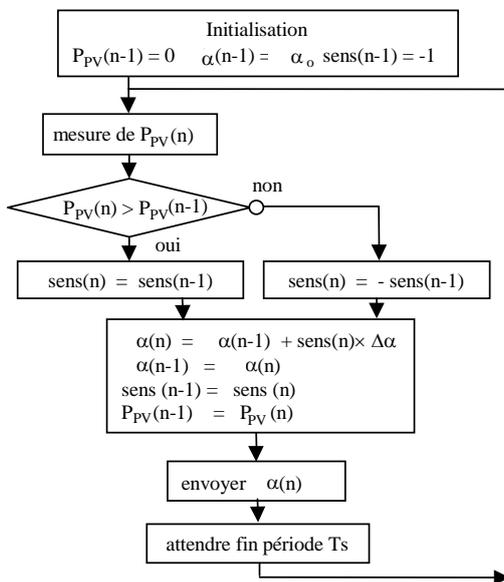


Fig.11 : Algorithme de base de la commande MPPT type hill climbing.

Le fonctionnement correct du système est présenté sur la figure 12 ci-après, où l'on visualise simultanément une tension image du rapport cyclique et une tension image de la puissance du panneau. Le côté gauche de la figure présente un fonctionnement en boucle ouverte de façon à situer l'extremum de puissance, le comportement en boucle fermée est lui sur la droite de la figure. Dès que le bouclage est activé, la puissance rejoint le MPP et reste calée dessus. Suite à une perturbation (une feuille A4 est placée sur le panneau pendant 2 secondes environ) le système se recale sur le nouveau maximum. Dès que la perturbation disparaît, la puissance fournie retrouve bien la valeur du premier MPP. Ces résultats ont été obtenus avec le premier jeu de paramètres i.e. $\Delta\alpha = 5\%$ de $(\alpha_{\min}-\alpha_{\max})$ et $T_s = 50$ ms.

3.2.1.4. Analyse des réglages.

Contrairement aux commandes linéaires type PID, il n'existe pas de méthodes de réglage bien définies dans la littérature; une démarche expérimentale est nécessaire pour optimiser les résultats.

Pour un même T_e , si $\Delta\alpha$ est grand, la convergence est rapide mais cela entraîne une large oscillation autour du MPP (et donc une perte de puissance). En revanche, si $\Delta\alpha$ est petit, l'oscillation autour du MPP est faible mais d'une part le bruit de mesure risque d'être confondu avec une réelle variation de la puissance et d'autre part si l'ensoleillement fluctue le suivi du MPP devient lent.

Si T_e augmente ou si $\Delta\alpha$ diminue, la stabilité augmente au détriment de la dynamique du suivi de puissance. Aussi il est intéressant de travailler avec un pas variable de $\Delta\alpha$ pour assurer à la fois une convergence rapide (même en cas de faibles ensoleillement) et aussi une faible oscillation autour du MPP.

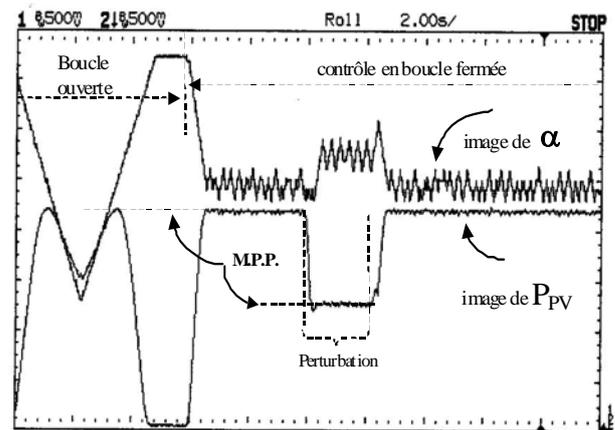


Fig. 12 : Comportement en boucle ouverte et en boucle fermée du convertisseur

3.2.1.4. Limites d'une telle commande

Un problème se pose dans le cas où l'ensoleillement augmente, la puissance mesurée peut augmenter alors même que le sens d'évolution de la commande est mauvais ce qui éloigne le système du MPP, cet ajustement incorrect continuera jusqu'à ce que l'augmentation de l'intensité lumineuse cesse. Un autre problème se pose dans le cas où il n'y a pas un maximum mais *des* maxima (cas de panneaux partiellement ombragés)...dans ce cas ce type d'algorithme doit être raffiné pour être sûr de converger vers le plus haut des maxima. Enfin un problème courant est d'assurer la convergence même par faible ensoleillement lorsque les variations de puissance sont du même ordre de grandeur que les bruits de mesures.

3.2.2. Méthode de la conductance incrémentale

(rem : I/V : conductance, dI/dV conductance incrémentale.)

Dans cette partie, pour alléger les notations, on note V , I , P les grandeurs relatives au générateur photovoltaïque.

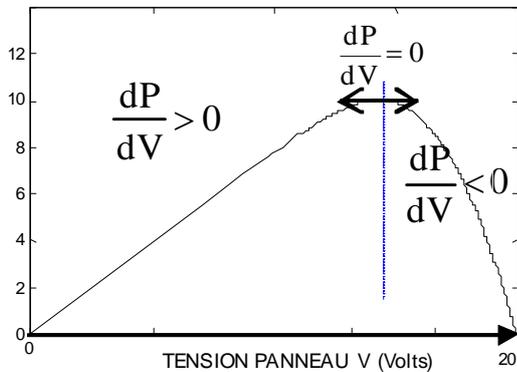


Fig. 13 : Comportement en boucle ouverte et en boucle fermée du convertisseur.

Le maximum de puissance (MPP) est obtenu lorsque :

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (7)$$

A gauche ce point, dP/dV est positive et négative de l'autre côté. Comme $P=I.V$, le calcul différentiel donne $dP=V.dI + I.dV$, soit au MPP :

$$\frac{I}{V} + \frac{dP}{dV} = 0 \quad (8)$$

on montre que : $\frac{dP}{dV} > 0 \Leftrightarrow \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} > 0$

Numériquement, à partir des mesures de $I(n)$, $I(n-1)$, $V(n)$, $V(n-1)$, et en supposant que

$dI \approx \Delta I = I(n)-I(n-1)$ et $dV \approx \Delta V = V(n)-V(n-1)$, on peut calculer $I/V+dI/dV$ et en déduire la direction du MPP par rapport au point de fonctionnement présent (et dans une moindre mesure la distance au MPP). La direction de convergence est donc toujours connue, ce qui est un avantage par rapport à la technique « hill climbing » présenté précédemment en particulier lorsque l'ensoleillement varie rapidement. Toutefois cette méthode pose des problèmes (répercussion des bruits de mesures dans les calculs, division par zéro ...)

La figure 14 ci-après montre le principe de mise en oeuvre d'une telle commande

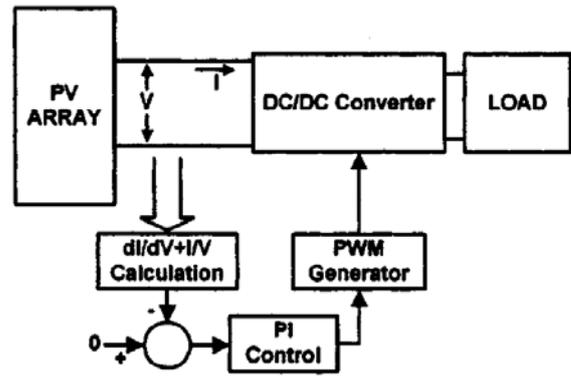


Figure 14 : MPPT par conductance incrémentale [12]

3.2.3. Commande à tension ou courant de référence.

Il existe des méthodes plus simples basées sur le lien entre V_{oc} (tension du panneau en circuit ouvert) et V_{opt} :

$$V_{op} \approx K \cdot V_{oc} \text{ avec } K < 1 \quad (9)$$

En mesurant V_{OC} de temps en temps (10s pour le Solar Boost 2000), on en déduit une tension qui sert de une référence pour la tension du panneau. Un asservissement de tension grâce à un correcteur PI, permet de faire converger V_{PV} à la valeur souhaitée. Elle est évidemment plus simple avec un convertisseur abaisseur. De la même façon une relation similaire existe entre le courant de court-circuit du panneau I_{SC} et le courant à l'optimum de puissance :

$$I_{op} \approx K' \cdot I_{sc} \text{ avec } K' < 1$$

On utilise alors avec une régulation du courant photovoltaïque grâce à un correcteur PI, avec une remise à jour régulière de la consigne. Elle est évidemment plus simple avec un convertisseur élévateur, cf figure 15.

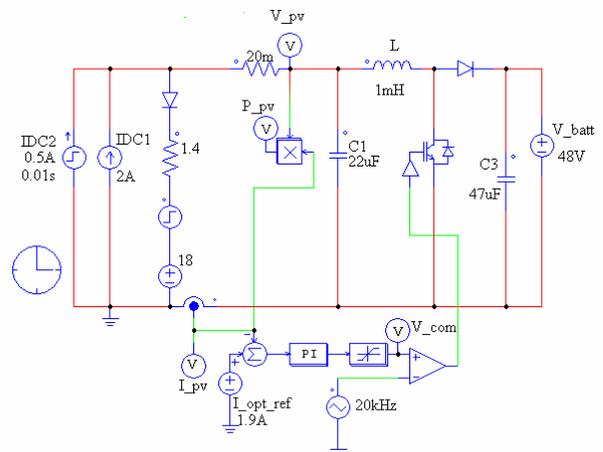


Figure 15 : MPPT par asservissement du courant seul

Dans tous les cas de figure, ces méthodes sont simples à mettre en œuvre car elles ne nécessitent qu'un seul capteur, (ddp ou courant) et sont peu sensibles aux bruits car ne reposant pas sur un calcul de dérivée. Elles néanmoins présentent quelques défauts : d'une part le panneau ne produit plus pendant le temps nécessaire pour les mesures et d'autre part, le coefficient liant les grandeurs mesurées et les grandeurs optimales n'est pas toujours fixé avec exactitude et peu varier dans le temps en fonction du vieillissement. Il dépend en particulier de la température et de l'ensoleillement comme on peut le constater sur la figure 16 ci-après.

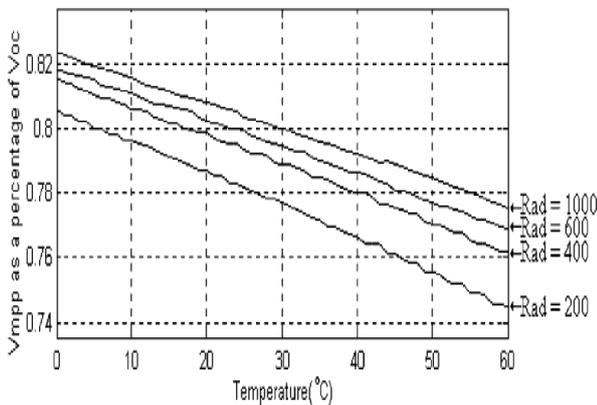


Figure 16 : VMPP en % de en fonction de la température et de l'irradiation [HO]

La connexion directe entre le panneau et la charge donne des résultats qui ne sont pas si mauvais que cela en raison de l'absence de pertes en commutation. Seules existent les pertes des MOS utilisés comme interrupteurs statiques pour connecter les panneaux et la charge à la batterie et les pertes dans la diode qui empêche les retours de courant dans le panneau.

4. Régulateurs à connexion directe

Ce sont les plus répandus. Ces régulateurs à connexion directe doivent intégrer les fonctionnalités de charge, décharge et sécurité citées plus haut.

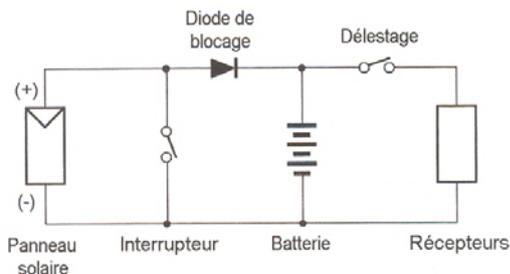


Figure 17 : Régulateur de type shunt [4]

Il est donc indispensable de pouvoir déconnecter aussi bien le panneau (ou du moins faire en sorte qu'il ne fournisse plus d'énergie) que les consommateurs. Deux types de régulateurs sont appropriés à ces exigences, les régulateurs « shunt », figure 17 et les régulateurs « série », figure 18.

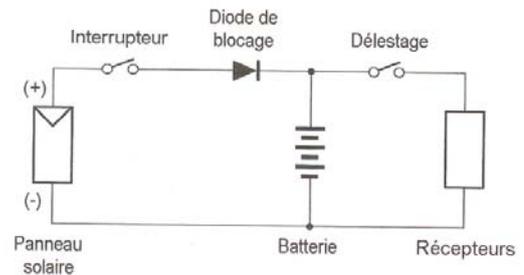


Figure 18 : Régulateur série [4]

5. Rendements

G étant l'irradiation du soleil W/m², A la surface du panneau et P_{MPP} la puissance maximale possible, le rendement du panneau η_{PV} (typiquement 10%) est défini par :

$$\eta_{PV} = \frac{P_{MPP}}{G.A}$$

Les divers algorithmes P&O ou conductance incrémentale donnent des rendements MPPT (ratio entre la puissance réellement tirée du panneau et la puissance maximale disponible) entre 95 et 98% et d'environ 90% pour un algorithme à tension constante.

Malheureusement, plus le convertisseur est complexe, plus son rendement propre noté η_{CONV} est faible.

Pour l'utilisateur, seul importe le rendement global η de toute la chaîne [10] [11]:

$$\eta = \frac{P_S}{G.A} = \frac{P_{MPP}}{G.A} \cdot \frac{P_{PV}}{P_{MPP}} \cdot \frac{P_S}{P_{PV}} \text{ soit :}$$

$$\eta = \eta_{PV} \cdot \eta_{MPPT} \cdot \eta_{CONV}$$

Dans tous les cas il est nécessaire de surveiller la tension continue en sortie du convertisseur, c'est à dire soit la tension de la batterie pour un chargeur, soit la tension du bus continu pour un onduleur. De plus il est aussi utile pour contrôler la charge des batteries, de mesurer le courant de batterie, il est alors plus facile de maximiser la puissance en sortie de l'ensemble générateur + convertisseur car c'est bien cette puissance qui est utile et non celle extraite du panneau.

6. Conclusion

Dans cet article nous avons montré la diversité des commandes extrémales dites "MPPT". Même s'il n'est pas toujours facile de connaître le type de MPPT implanté dans un produit industriel, nombreux sont ceux qui utilisent le principe du hill climbing. Primordial pour les systèmes photovoltaïques connectés au réseau EDF, ce type de commande n'est pas utilisé en permanence pour les systèmes autonomes avec stockage sur batterie et cohabite avec d'autres modes de charge.

Les commandes MPPT ne se limitent pas au photovoltaïque, ainsi pour rester dans le domaine des énergies renouvelables et compléter ce travail, il serait intéressant d'étudier, compte tenu des dynamiques beaucoup plus lentes, les commandes MPPT spécifiques associées aux aérogénérateurs.

7. Bibliographie.

- [1] L. Protin, S. Astier, « Convertisseurs photovoltaïques », Techniques de l'ingénieur, D3360 - Vol DAB, <http://ti.idm.fr>
- [2] <http://www.steca-solar.com/>
- [3] SOLAR BOOSTTM 2000 Installation and operation Manual, RV POWER PRODUCTS Inc. <http://www.rvpowerproducts.com>.
- [4] <http://www.mastervolt.com/>
- [5] http://www.iufmrese.cict.fr/contrib/2008/PM/PSim_MPPT.shtml.
- [6] C. Glaize, « Photovoltaïque : Caractéristiques et recherche du point de puissance maximale » http://www.clubeea.org/enseign/mediat_et.htm
- [7] C. Jaouen, E. Lacombe, O. Bethoux, JP Kleider, « Etude didactique des systèmes photovoltaïques, optimisation thermique et électrique », revue 3EI n° 52 mars 2008.
- [8] 10 Amp Charge Controller Model: PT 12/24-10 Product specification, SOLAR CONVERTERS Inc. <http://www.solarconverters.com>
- [9] Solar Lighting Controller Model LS-2, Product specification, SOLAR CONVERTERS Inc. <http://www.solarconverters.com/>
- [10] D.P.Hohm and M.E.Ropp « Comparative study of Maximum Power Point Tracking Algorithms », in Progress in Photovoltaics : Research and Applications, 2003; 11:47-62
- [11] S.Jain and V. Agarwal, "Comparison of the performance of maximum power point tracking schemes applied to single-stage grid-connected photovoltaic systems", IET Electr. Power Appl.,2007, 1, (5), pp 753-762

- [12] E. Koutroulis, K.Kalaitzakis, N.C. Voulgaris, "Development of a Microcontroller-Based,Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System", IEEE Transactions on power electronics, Vol. 16, N°1, jan 2001, pp 46-54

Ouvrages sur le photovoltaïque

- F. Antony, C. Dürschner, K.H. Remmers, "Le photovoltaïque pour tous, Conception et réalisation d'installations", Ed. Observ'ER, ISBN-10:2-913620-38-8, 2006
- Anne Labouret, Michel Viloz, "Energie solaire photovoltaïque, le manuel du professionnel", Ed. Dunod, 2003.
- Jacques Bernard, " Energie Solaire", Coll. Génie Energétique, Ed. Ellipses, 2004.