

Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque

Rafika Khezzar¹, Moussa Zereg¹ et Abdelmalek Khezzar²

¹ Laboratoire de Physique Energétique Appliquée, 'LPEA'
Département de Physique, Faculté des Sciences, Université Hadj Lakhdar
Avenue Chahid Mohamed El Hadi Boukhrouf, Batna, Algérie

² Laboratoire d'Electrotechnique de Constantine, 'LEC'
Département d'Electrotechnique, Université des Frères Mentouri
Route Ain El Bey, Constantine, Algérie

(reçu le 25 Juin 2010 – accepté le 25 Septembre 2010)

Résumé - *La modélisation mathématique des cellules solaires est indispensable pour toute opération d'optimisation du rendement ou de diagnostic du générateur photovoltaïque. Le module photovoltaïque est représenté généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés expérimentalement en utilisant la caractéristique courant-tension, I-V. La détermination précise de ces paramètres reste un challenge pour les chercheurs, ce qui a conduit à une grande diversification dans les modèles et les méthodes numériques dédiées à leurs caractérisations. Les auteurs dans le présent papier s'intéressent à la caractérisation paramétrique du modèle à quatre paramètres, dont l'objectif de prévoir le comportement du module de test Shell SP75 sous des conditions de fonctionnement réelles.*

Abstract - *Analytical modeling of solar cells is crucial for any performance optimization or diagnosis process of photovoltaic generator. The photovoltaic module is typically represented by an equivalent circuit whose parameters are calculated using the experimental current voltage characteristic I-V. The precise determination of these parameters remains a challenge for researchers, which led to a diversification in the models and numerical methods used for their characterization. The authors in the present paper interested at the parametric characterization of the four parameters model, in order to provide the behavior of the test module Shell SP75 under real operating conditions.*

Mots clés: Module photovoltaïque - Si-cristallin – Modèles - Paramètres spécifiques de la caractéristique I-V – Méthodes numériques.

1. INTRODUCTION

L'électricité est aujourd'hui la forme d'énergie la plus aisée à exploiter, mais avant de la consommer il aura fallu la produire. La production d'électricité photovoltaïque a connue ces dernières années un accroissement d'intérêt par une production dépassant 1800 MW à travers le monde. Cet accroissement était accompagné par une valorisation des recherches visant l'optimisation de l'énergie fournie par les cellules solaires. La modélisation de ces dernières s'impose comme une étape cruciale et a conduit à une diversification dans les modèles proposés par les différents chercheurs. Leurs différences se situent principalement dans le nombre de diodes, la résistance shunt finie ou infinie, le facteur d'idéalité constant ou non, ainsi que les méthodes numériques utilisées pour la détermination des différents paramètres inconnus [1-4].

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles que leurs précisions restent tributaire à la modélisation mathématiques des différents phénomènes physiques intrinsèques intervenant dans le processus de production d'électricité. Dans la plupart des travaux de la littérature, on trouve principalement le modèle équivalent à quatre paramètres basé sur la modélisation mathématique de la courbe-tension courant $I-V$ [5]. Dans ce modèle, l'effet de la résistance shunt est négligé du fait que sa valeur est importante et plus particulièrement pour les modules au Si-cristallin [6, 7]. Le modèle à quatre paramètres fait intervenir quatre paramètres, à savoir: I_L (le photocourant), I_0 (le courant de saturation), A (le facteur d'idéalité) et R_s (la résistance série). Ces paramètres ne sont pas généralement des quantités mesurables ou incluses dans les données de la fabrication. En conséquence, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations $I-V$ à divers points de fonctionnement donnés par le constructeur ou tirés des essais expérimentaux [8].

L'objectif du présent papier est de comparer les méthodes numériques les plus utilisées de point de vue caractérisation des cellules solaires à base du Si-cristallin, à savoir: la méthode de la pente, la méthode explicite simplifiée et la méthode itérative. Les résultats de simulation sont confrontés à ceux des différents constructeurs afin de valoriser les différentes conclusions tirées à propos les différentes méthodes exploitées.

2. MODELISATION DU MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

La modélisation des modules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents, en prenant plus ou moins de détails. De nombreux modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque, en utilisant Matlab, comme un outil de simulation et le module Shell SP 75 comme un module de test (**Tableau 1**) [9].

Tableau 1: Caractéristiques électriques du module photovoltaïque Shell SP 75 en condition de test standard

Grandeurs	Valeur
Eclairement standard, E	1000 W/m ²
Température standard, T	25 °C
Puissance crête maximale, P_m	75 W
Tension maximale, V_m	17 V
Courant maximal, I_m	4.4 A
Tension de circuit ouvert, V_{co}	21.7 V
Courant de court circuit, I_{cc}	4.8 A

Le module photovoltaïque est représenté par un circuit électrique (Fig. 1) qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, les pertes sont modélisées par deux résistances, une résistance shunt R_{sh} , une résistance série R_s , et deux diodes pour la polarisation de la cellule et le phénomène de la recombinaison des porteurs minoritaires [6, 10].

L'équation caractérisant la courbe de variation courant-tension I – V est donnée par:

$$I = I_L - I_{D1} - I_{D2} - \frac{(V + I.R_s)}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$I = I_L - I_{01} \left[\exp\left(\frac{q}{N_s A_1 k T} (V + I R_s)\right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp\left(\frac{q}{N_s A_2 k T} (V + I R_s)\right) - 1 \right] - \frac{(V + I R_s)}{R_{sh}}$$

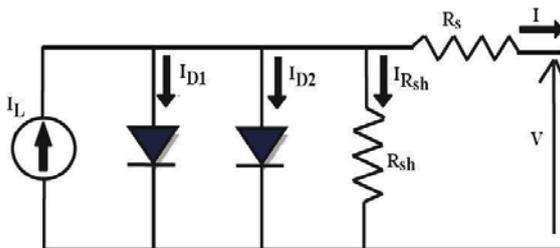


Fig. 1: Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M7P

Le courant résultant I comporte deux exponentielles, d'où son nom. Il est connue aussi par le nom 2M7P, où ce nom spécifie en particulier le nombre 7 des paramètres à déterminer, à savoir: I_L , I_{01} , I_{02} , A_1 , A_2 , R_s et R_{sh} .

Si la résistance shunt est considérée infinie, le nombre de paramètres à déterminer devient 6 et le nom du modèle dans ce cas est 2M6P. Comme on trouve aussi le modèle à 5 paramètres 2M5P où la résistance série est aussi non considérée.

Une description plus simple est obtenue à partir du modèle à une exponentielle. Ce modèle comporte une diode de moins par rapport au modèle à deux exponentielles, ce qui implique que ce modèle comporte dans l'équation de la caractéristique I – V une exponentielle de moins (Fig. 2) [11, 12].

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + I.R_s)}{A k T}\right) - 1 \right] - \frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

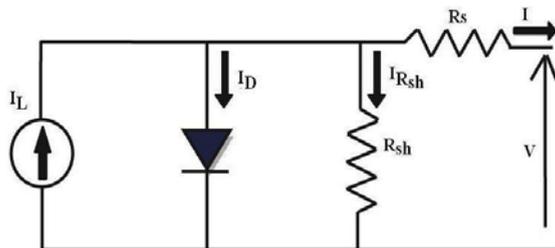


Fig. 2: Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L5P

Le modèle fait donc intervenir les cinq paramètres inconnus suivants: I_L , I_0 , A , R_s et R_{sh} , et il est connu sous le nom L5P. Comme le modèle précédent, le fait de négliger la résistance parallèle en la considérant comme infini donne le modèle à 4 paramètres L4P [5, 6, 13-16], et la non considération davantage de la résistance série donne la modèle à 3 paramètres L3P.

La figure 3 compare entre les différents modèles à deux diodes pour une température de référence de 25 °C et un éclaircement de 1000 W/m². En comparant les modèles 2M7P et 2M6P, on constate que l'effet de la résistance parallèle est négligeable, par contre en négligeant la résistance série dans le modèle 2M5P, cela induit un éloignement entre les résultats de test et seul du modèle. Ce qui accentue l'importance de la résistance série.

La figure 4 à son tour compare les différents modèles à une diode dans les mêmes conditions que les modèles à deux diodes. On constate que la résistance série marque la différence entre les différents modèles et que le modèle à 4 paramètres L4P combine entre la simplicité et la précision et présente le choix que nous estimons le plus intéressant.

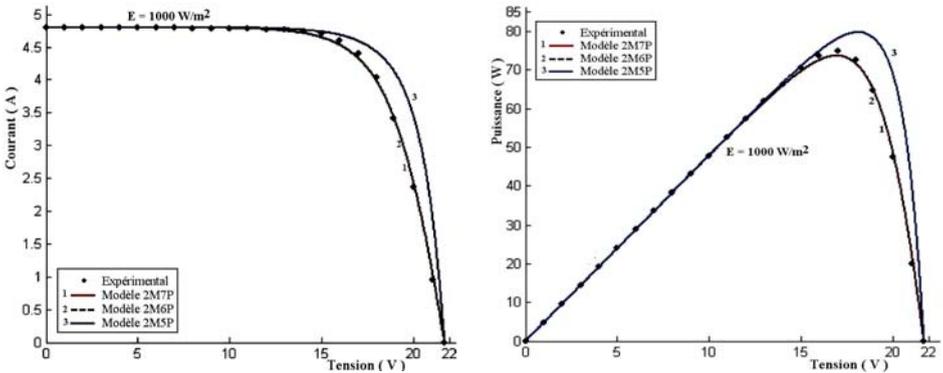


Fig. 3: Caractéristiques I(V) et P(V) pour les modèles à deux exponentielles

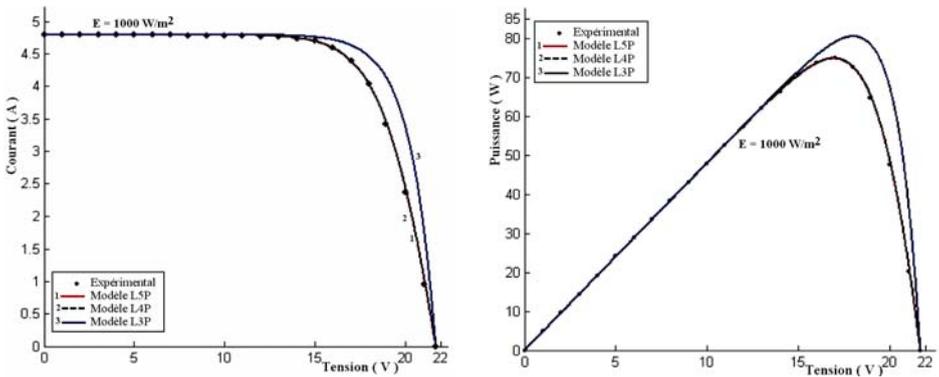


Fig. 4. Caractéristiques I(V) et P(V) pour les modèles à une exponentielle

Ces paramètres ne sont pas généralement des quantités mesurables ou incluses dans les données de la fabrication. En conséquence, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations I–V à divers points de fonctionnement donnés par le constructeur ou issues de la mesure directe sur le module. Dans ce cadre, nous allons ci-après étudier les méthodes d'identification des différents paramètres de la caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque.

3. METHODES D'IDENTIFICATION DES DIFFERENTS PARAMETRES

L'équation caractérisant le modèle à quatre paramètres est la suivante [6, 14]:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + I.R_s)}{N_s A k T} \right) - 1 \right] \quad (3)$$

Les quatre paramètres inconnus dans ce modèle sont I_L (le photocourant), I_0 (le courant de saturation), A (le facteur d'idéalité) et R_s (la résistance série). Ces paramètres sont à déterminer à partir de la mesure de la caractéristique I–V pour un couple d'éclairement et température de référence (E_{ref} , T_{ref}) donné aux STC ("Standard Test Conditions", 1000 W/m², 25 °C, spectre AM1.5) par le constructeur, ou issus de la mesure directe sur le module. Ces mesures sont indispensables afin de spécifier les données de base nécessaire pour la caractérisation des différents paramètres du modèle (les 4 valeurs V_{co} tension de circuit ouvert, I_{cc} courant de court-circuit du module, I_{mp} , V_{mp} tension et courant au point de puissance maximale).

Trois points remarquables de la caractéristique (0, I_{cc}), (V_{co} , 0) et (V_{mp} , I_{mp}) [17], peuvent être employés pour déterminer les quatre paramètres inconnus (I_L , I_0 , A , R_s), où:

$$I_{cc} = I_L - I_0 \left[\exp \left(q \frac{I_{cc} \cdot R_s}{N_s A k T} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

$$0 = I_L - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V_{co}}{N_s A k T} \right) - 1 \right] \quad (5)$$

$$I_m = I_L - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V_m + I_m \cdot R_s}{N_s A k T} \right) - 1 \right] \quad (6)$$

En observant les équations (4, 5, 6), il est évident que nous sommes devant un problème de quatre inconnus et trois équations, cela a créé une diversification dans le choix de l'équation additionnel à ajouter. Ce qui amène que nous nous trouvons devant une dizaine de méthodes de résolution citées dans la littérature, avec une précision variable d'une méthode à un autre.

Notre choix était sur trois méthodes les plus utilisées [18-22]. La première méthode est la méthode explicite simplifiée qui est basée sur une résolution purement

mathématique en s'appuyant sur certain simplification. La deuxième méthode est la méthode de la pente et qui basée en partie de son algorithme sur un calcul géométrique et enfin la méthode itérative qui basée en partie de son algorithme sur la résolution numérique.

3.1 Méthode explicite simplifiée

Cette méthode considère comme une première approximation $I_L = I_{cc}$, après simplification des équations (4), (5) et (6), on obtient les relations suivantes [6, 18, 23]:

$$I_L = I_{cc} \quad (7)$$

$$0 = I_L - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V_{co}}{N_s A k T} \right) \right] \quad (8)$$

$$I_m = I_L - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V_m + I_m \cdot R_s}{N_s A k T} \right) \right] \quad (9)$$

De la relation (8), on peut déduire le courant de saturation I_0

$$I_0 = I_{cc} \left[\exp \left(\frac{q}{N_s A k T} V_{co} \right) \right] \quad (10)$$

A partir de la relation (10), on peut réécrire l'équation (3) comme suit:

$$I = I_{cc} \left[1 - \exp \left(q \frac{V - V_{co} + I \cdot R_s}{N_s A k T} \right) \right] \quad (11)$$

L'équation au point de la puissance maximale, devient

$$I_m = I_{cc} \left[1 - \exp \left(q \frac{V_m - V_{co} + I_m \cdot R_s}{N_s A k T} \right) \right] \quad (12)$$

A partir de cette équation, on peut tirer la valeur de la résistance série R_s explicitée par:

$$R_s = \frac{\frac{N_s A k T}{q} \ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}} \right) + V_{co} - V_m}{I_m} \quad (13)$$

Le dernier paramètre à déterminer est le facteur d'idéalité A , en exploitant le fait que la dérivée de la puissance maximale est nulle ($dP/dV = 0$), et en utilisant l'équation (3) et la formulation suivante:

$$\frac{dP}{dV} = 0 = \frac{\partial I}{\partial V} V + I \frac{\partial V}{\partial V} dP / dV = 0 \quad (14)$$

$$\text{On trouve, } A = \frac{q(2V_m - V_{co})}{N_s k T \left[\frac{I_{cc}}{I_{cc} - I_m} + \ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}} \right) \right]} \quad (15)$$

La substitution des différents paramètres par leurs formules respectives, dans l'équation (3) donne une équation simple reliant le courant I et V aux différentes températures et ensoleillements.

3.2 Méthode de la pente au point ($V_{co}, 0$)

La différence apportée par cette méthode par rapport la méthode précédente est principalement dans la manière de calcul de la résistance série R_s [24, 25]. Elle est basée sur le fait que la résistance série influe remarquablement sur la pente de la courbe caractéristique $I-V$ au voisinage du point ($V_{co}, 0$). Donc afin de calculer R_s , on dérive l'équation (3) afin d'obtenir:

$$\frac{dI}{dV} = -I_0 \left[\exp\left(q \frac{V + I.R_s}{n k T} \right) - 1 \right] \frac{q}{n k T} \left(1 + R_s \frac{dI}{dV} \right) \quad (16)$$

Ce qui donne au point ($V_{co}, 0$):

$$R_s = - \left. \frac{dV}{dI} \right|_{V_{co}} = \frac{1}{\frac{I_0 q}{N_s A k T} \exp\left(\frac{q V_{co}}{N_s A k T} \right)} \quad (17)$$

La pente M dans le point V_{co} est donné par $M = \frac{dV}{dI}$ ($I = 0$). Cette valeur est déduite à partir des résultats expérimentaux (Fig. 5).

Le facteur d'idéalité "A" est déterminé par des méthodes itératives, en vérifiant la concordance entre les résultats de simulation et ceux du fabricant aux conditions de mesure standard.

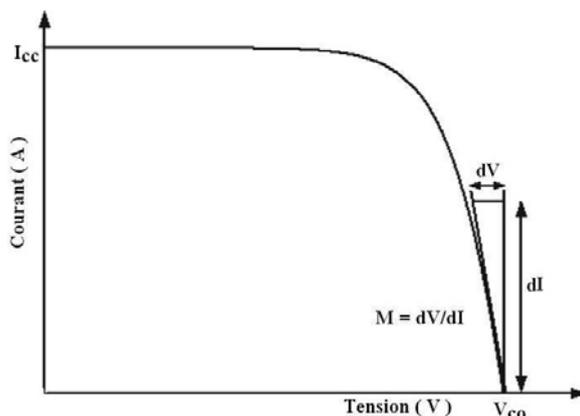


Fig. 5: Détermination de la pente

3.3 Méthode itérative

Cette méthode aussi se différencie par rapport aux deux méthodes précédentes par le calcul de la résistance série, où le coefficient de température de la tension de circuit

ouvert $\mu_{V_{co}}$ donné par le fabricant peut être employé pour fournir une équation additionnelle donnant la résistance série.

Le coefficient de température $\mu_{V_{co}}$, n'est que la dérivée de la tension de circuit ouvert par rapport à la température :

$$\mu_{V_{co}} = \frac{\partial V_{co}}{\partial T} = \frac{N_s A k}{q} \left[\ln \left(\frac{I_{cc}}{I_0} \right) + \frac{T \mu_{cc}}{I_{cc}} - \left(3 + \frac{q E_G}{A k T} \right) \right] \quad (18)$$

En donnant une valeur à R_s , les trois autres paramètres sont calculés de la même manière que les sections précédentes. En utilisant des méthodes itératives [6, 8] autant que la bisection, et en palliant l'intervalle $[0, R_{s_{max}}]$, où $R_{s_{max}}$ est la valeur maximale possible de R_s .

La valeur du facteur d'idéalité est proche à 1 pour $R_{s_{max}}$, donc pour déterminer la valeur maximal de $R_{s_{max}}$, il suffit de remplacer $A = 1$ dans l'équation (13), ce qui donne:

$$R_{s_{max}} = \frac{1}{I_m} \cdot \left[\frac{N_s k T}{q} \ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}} \right) + V_{co} - V_m \right] \quad (19)$$

3.4 Résultats et discussion

Les équations de la section précédente pour les différentes méthodes de calculs des paramètres de la caractéristique courant-tension ont été simulées dans l'environnement Matlab pour le module solaire SP75 (**Tableau 1**) [9]. Les résultats ont été comparés avec ceux fournies par le constructeur.

On remarque sur la figure 6 que malgré le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert sont les mêmes pour les différentes méthodes, le suivi à proximité du point de puissance maximal reste tributaire de la précision des paramètres déduits.

On constate que la méthode de la pente comme une méthode qui se base sur le calcul géométrique de la pente est la méthode la plus précise. Par contre les performances de la méthode itérative suivent la précision du facteur de test à savoir le coefficient de température, ce qui explique qu'elle bascule entre bon et moins bon.

De même pour la méthode explicite, ces performances sont fortement influencées par les données du constructeur.

Nous remarquons également, un écart élevé entre les résultats expérimentaux les résultats simulés par ces deux méthodes pour l'éclairement 400 et 800 W/m². Cet écartement peut être la conséquence de la détermination imprécise des paramètres I_m , V_m .

Le **Tableau 2** regroupe l'erreur quadrature entre les résultats expérimentaux et ceux calculés par chaque méthode de résolution, et confirme les conclusions tirées auparavant.

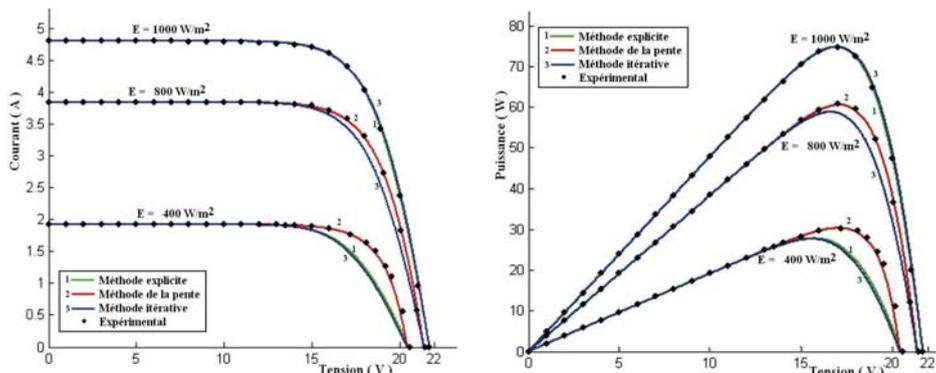


Fig. 6: Caractéristiques I(V) et P(V) du module Sp75 pour différents éclairements et à T = 25 °C

Tableau 2: Erreurs obtenues pour différentes valeurs d'ensoleillement à température constante (25 °C)

Erreur	Méthodes numériques	Variation de l'éclairement		
		E=1000 W/m ²	E=800 W/m ²	E=400 W/m ²
Erreur RMS (%)	M. explicite	0.01	2.71	19.95
	M. itérative	0.01	2.71	21.41
	M. de la pente	0.01	0.9	1

4. CONCLUSION

L'objectif de la modélisation des panneaux solaires est évidemment de décrire leurs comportements dans toutes les conditions d'utilisation. Trois différentes méthodes de résolution ont été présentées afin de déterminer les différents paramètres spécifiques de la caractéristique courant-tension. La méthode de la pente basée en partie de son algorithme sur le calcul géométrique, la méthode explicite simplifiée basée sur la résolution analytique et enfin la méthode itérative basée sur la résolution numérique. En comparant leurs résultats avec ceux donnés par le constructeur pour le module de test SP 75, nous a permis de conclure que la méthode de la pente qui est moins liée aux données de constructeur est la plus précise.

REFERENCES

[1] A. Wagner, 'Peak-Power And Internal Series Resistance Measurement under Natural Ambient Conditions', EuroSun Conference, 2000 Copenhagen, June 19-22, 2000.

[2] D.L. King, 'Photovoltaic Module and Array Performance Characterization Methods for All System Operating Conditions', Proceeding of NREL/SNL Photovoltaic Program Review Meeting, Lakewood, Colorado, November 18-22, 2000.

[3] A.S.H. van der Heide, A. Schönecker, J.H. Bultman and W.C. Sinke, 'Explanation of High Solar Cell Diode Factors by Nonuniform Contact Resistance', Progress in Photovoltaic, Vol. 13, N°1, pp. 3 – 16, 2005.

- [4] J.H. Smith and L.R. Reiter, '*An In-Depth Review of Photovoltaic System Performance Models*', The American Society of Mechanical Engineers, 84-WA/Sol-12, 8 p., 1984.
- [5] T.U. Townsend, '*A Method for Estimating the Long Term Performance of Direct-Coupled Photovoltaic Systems*', MS Thesis, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 1989.
- [6] W.L. De Soto, '*Improvement and Validation of a Model for Photovoltaic Array Performance*', MS Thesis, Solar Energy Laboratory University of Wisconsin-Madison, 2004.
- [7] F. Bryan, '*Simulation of Grid-Tied Building Integrated Photovoltaic Systems*', MS thesis, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 1999.
- [8] Shell Solar Product Information Sheets.
- [9] J. Cabestany and L. Castaner, '*Evaluation of Solar Cell Parameters by Non Linear Algorithms*', Journal of Physics D: Appl. Phys., Vol. 16, pp. 2547 - 2558, 1983.
- [10] W. De Soto, S.A. Klein and Beckman, '*Improvement and Validation of a Model for Photovoltaic Array Performance*', Solar Energy, Vol. 80, N°1, pp. 78 - 88, 2006.
- [11] E. Karatepe, M. Boztepe and M. Colak, '*Neural Network Based Solar-Cell Model*', Energy Conversion and Management, Vol. 47, N°9-10, pp. 1159 - 1178, 2006.
- [12] Cashing Wang, '*Modeling and Control of Hybrid Wind/Fuel Cell/Distributed System*', PhD Thesis, Montana State University, Bozeman, Montana, 2006.
- [13] J.H. Eckstein, '*Detailed Modeling of Photovoltaic Components*', MS thesis, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 1990.
- [14] J.M. Enrique, E. Duran, M. Sidrach de Cardona, J.M. Andujar, M.A. Bohorquez and J. Carratero, '*A New Approach to Obtain I-V and P-V Curves of Photovoltaic Modules by Using DC/DC Converters*', Rec. IEEE Photovoltaic Specialist Conference, pp. 1769 - 1722, 2005.
- [15] Y.C. Kuo, T.J. Liang and J.F. Chen, '*Novel Maximum-Power- Point-Tracking Controller for Photovoltaic Energy Conversion System*', IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 48, N°3, pp. 594 - 601, 2001.
- [16] J.P. Charles, M. Abdelkhrim, Y.H. Muoy and P. Mialhe, '*A Practical Method of Analysis of the Current-Voltage Characteristics of Solar Cells*', Solar Cells, Vol. 4, N°2, pp 169 - 178, 1981.
- [17] D. Chan and J. Phang, '*Analytical Methods for the Extraction of Solar Cell Single- and Double-Diode Model Parameters from I-V Characteristics*', IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 34, N°2, pp. 286 - 293, 1987.
- [18] D. Sera, R. Teodorescu and P. Rodriguez, '*PV Panel Model Based on Datasheet Values*', ISIE-07, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 2392 - 2396, 2007.
- [19] G. Araujo and E. Sanchez, '*A New Method for Experimental Determination of the Series Resistance of a Solar Cell*', IEEE Transactions on Electronic Devices, Vol. 29, N°10, pp. 1511 - 1513, 1982.
- [20] M. Alonso-Garcia and J. Ruiz, '*Analysis and Modeling the Reverse Characteristic of Photovoltaic Cells*', Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 90, N°7-8, pp. 1105 - 1120, 2006.
- [21] M. Chegaar, Z. Ouennoughi and A. Hoffmann, '*A New Method for Evaluating Illuminated Solar Cell Parameters*', Solid-State Electronics, Vol. 45, N°2, pp. 293 - 296, 2001.
- [22] J.A. Gow and C.D. Manning, '*Development of a Photovoltaic Array Model for Use in Power Electronics Simulation Studies*', IEE Proceedings on Electric Power Applications, Vol. 146, N°2, pp. 193 - 200, 1999.
- [23] G.R. Walker, '*Evaluating MPPT Converter Topologies using a MATLAB PV Model*', Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia, IEAust, Vol. 21, N°1, pp. 49 - 56, 2001.