

文章编号: 1671-0444(2011)01-0090-05

光伏太阳能电池组件 Matlab 通用仿真模块

彭乐乐, 孙以泽, 孟 焯, 陈玉洁

(东华大学 机械工程学院, 上海 201620)

摘要: 采用工程用太阳能电池 5 参量模型及参数确定法, 获取高精度的光伏组件通用模型, 在 Matlab/Simulink 平台中建立该模型的通用模块, 利用变步长动态仿真法, 快速、准确地获得光伏组件在不同光强度和温度下的输出特性曲线。仿真实验表明, 该通用模块不仅可以准确获得太阳能电池单体输出特性, 而且可以准确获得光伏组件输出特性, 与目前采用的相似模块相比, 其具有使用方便、精度高及通用性强的优点。

关键词: 光伏组件通用模型; 光伏组件通用仿真模块; 光伏组件特性曲线

中图分类号: TP 391.9 **文献标志码:** A

Generalized Photovoltaic Array Module Using Matlab/Simulink

PENG Le-le, SUN Yi-ze, MENG Chuo, CHEN Yu-jie

(College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: A high-precision generalized photovoltaic array module is established based on 5-parameter engineering model of photovoltaic cell equation. The generalized module using Matlab/Simulink, can be representative of photovoltaic array for easy use on simulation platform. Variable dynamic simulation method is used, which can rapidly obtain the output characteristic curves of photovoltaic array with different temperature and insolation levels. The module is demonstrated by the simulation experiments, and the results show that the module can not only get output characteristic curves of photovoltaic cell and array, but also has higher precision and more generalization compared with the similar module.

Key words: generalized photovoltaic array model; generalized photovoltaic array module; characteristic curves of photovoltaic array

随着低碳经济和低碳技术的发展, 太阳能作为一种洁净可再生能源已成为各国研究的热点, 各国政府也相继出台各类政策支持太阳能光伏产业的研究和发展。然而, 由于其较高的研发费用和发电成本, 太阳能光伏技术的发展速度远不能满足社会发展需求。因此, 需要通过软件仿真的方法来对光伏系统进行设计和优化, 以提高工作效率、降低开发成本。光伏组件作为光伏系统中的能量源, 对其进行仿真研究就需要建立相应的仿真模型和仿真

模块。

太阳能电池的经典模型是 5 参量模型^[1-7], 其数学表达式如式(1):

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{IR_s + V}{nV_{th}} \right) - 1 \right] - \frac{IR_s + V}{R_p} \quad (1)$$

式中: I_L 为太阳能电池电流, A; I_0 为反并二极管反向饱和电流, A; R_s 为等效串联电阻, Ω ; R_p 为

收稿日期: 2010-03-09

作者简介: 彭乐乐(1984-), 男, 安徽宿州人, 硕士研究生, 研究方向为机械电子工程. E-mail: peter_peng_01@139.com

孙以泽(联系人), 男, 教授, E-mail: sunyz@dhu.edu.cn

等效并联电阻, Ω ; n 为二极管因子; $V_{th} = KT/q$, K 为玻兹曼常数, 1.38×10^{-23} J/K; q 为电子电荷, 1.6×10^{-19} C; T 为绝对温度, K; I 为太阳能电池输出电流, A; V 为太阳能电池输出电压, V. 该模型中含有 5 个参量, 即 I_L , I_o , R_s , R_p , n . 但是, 太阳能电池生产商实际上只提供标准测试条件下的开路电压 V_{oc} , 短路电流 I_{sc} , 最大功率点电压 V_{mp} 和最大功率点电流 I_{mp} , 其他参量数据并不能从手册中直接查阅, 造成该模型无法应用于实际工程.

苏建徽等^[8]在 5 参量模型的基础上, 利用 V_{oc} , I_{sc} , V_{mp} , I_{mp} 得出硅太阳能电池工程用数学模型, 该模型是目前主要的工程仿真模型^[9-11]. 但是其缺点为: (1) 忽略光伏电池的 R_s , R_p , 使得模型偏向于理想模型, 其仿真电流必然大于实际电流, 造成模块的精度不高(6%以内); (2) 该模型没有考虑光伏组件的结构差异性, 只要光伏组件的 V_{oc} , I_{sc} , V_{mp} , I_{mp} 相同, 无论其结构如何, 所仿真出的特性曲线必然相同, 这使得该模型无法仿真出具有相同测试数据的不同结构、不同类型的光伏组件, 造成模块的通用性不强. 为了解决工程仿真模块精度较低且通用性差的缺点, 本文采用笔者得出的工程用太阳能电池 5 参量模型及参数确定法, 获取了高精度的光伏组件通用模型, 并在 Matlab/Simulink 平台中建立该模型的通用模块, 仿真实验表明, 本模块可以有效地兼顾通用性及高精度.

1 光伏组件仿真模型

1.1 太阳能电池仿真模型

为了便于工程实际应用, 基于太阳能电池经典 5 参量模型, 采用厂商提供的 V_{oc} , I_{sc} , V_{mp} , I_{mp} 数据, 得出了工程用太阳能电池 5 参量模型及参数确定法, 其具体模型如式(2):

$$I = I_{sc}(1 - k_1 k_2) - k_3 \quad (2)$$

其中: $k_1 = 1/(\exp(V_{oc}/nV_{th}) - 1)$, $k_2 = \exp[(IR_s + V)/nV_{th}] - 1$, $k_3 = (IR_s + V)/R_p$. 对于 R_s 和 R_p 的选择, 采用式(3)和(4).

$$R_s = \frac{1}{I_{mp}} \left[V_{oc} - V_{mp} - nV_{th} \ln \left(\frac{V_{mp} + nV_{th} - I_{mp}R_s}{nV_{th}} \right) \right] \quad (3)$$

$$R_p = \frac{(V_{mp} - nV_{th})(V_{mp} - I_{mp}R_s)}{(I_{sc} - I_{mp})(V_{mp} - I_{mp}R_s) - I_{mp}nV_{th}} \quad (4)$$

n 取值为 $1.3^{[3]}$, 这样太阳能电池仿真模型中的参量仅由 V_{oc} , I_{sc} , V_{mp} , I_{mp} 决定. 考虑外界温度及光强度的影响, 则可以采用式(5)和(6)^[7]来确定 I_L , I_o .

$$I_L = I_{sc} = k_4 [1 + T_1(T - T_{ref})] \quad (5)$$

式中: $k_4 = I_{sc}(T_{ref}, E_{ref}) \times (E/E_{ref})$, E_{ref} 为测试光强度, kW/m^2 ; E 为工作环境光强度, kW/m^2 ; T_{ref} 为测试绝对温度, K; $I_{sc}(T_{ref}, E_{ref})$ 为在测试光强度和工作环境光强度下的短路电流, A; T_1 为电流温度系数, mA/K ; T 为工作环境绝对温度, K.

$$I_o = I_o(T_{ref}) \times \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{3/n} \times \exp \left[\left(\frac{-qv_{gap}}{nK} \right) \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (6)$$

式中: v_{gap} 为半导体材料跨越能带间隙能量, 可取 1.12 eV .

1.2 光伏组件仿真模型

光伏组件由太阳能电池串并获得, 其结构如图 1 所示. 假设各个太阳能电池模块相同(即 R_s , R_p 和反并二极管 D 相同), 而且每条支路上的串并联数一样(即各支路串联电流 I_L 相等). 由基尔霍夫定律可以得出, 光伏组件的单个太阳能电池模块的电压 $V = V_s/N_s$, 电流为 $I = I_s/N_p$, 其中: V_s 为光伏组件输出电压, V; I_s 为光伏组件输出电流, A; N_p 为太阳能电池单体并联数; N_s 为太阳能电池单体串联数.

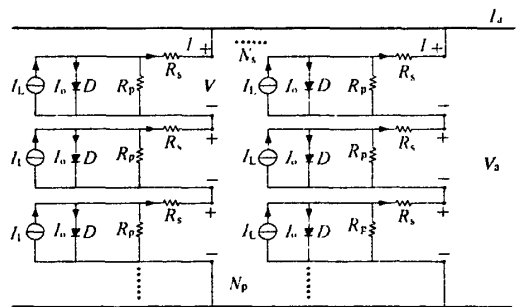


图1 光伏电池组件等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit for photovoltaic array

设组件的开路电压为 V_{oca} , 短路电流为 I_{sca} , 峰值电压为 V_{mpa} , 峰值电流为 I_{mpa} , 则每个太阳能电池模块:

$$V_{oc} = V_{oca}/N_s, I_{sc} = I_{sca}/N_p,$$

$$V_{mp} = V_{mpa}/N_s, I_{mp} = I_{mpa}/N_p \tag{7}$$

利用基尔霍夫定律,可以获得:

每条支路二极管端电压:

$$V_D = I_s R_s / N_p + V_s / N_s \tag{8}$$

每条支路并联电阻的电流:

$$I_p = [V_s / N_s + (I_s / N_p) R_s] / R_p \tag{9}$$

利用式(2)可以推出光伏组件的数学模型为

$$I_a = I_{sc} (1 - k_s k_g) - I_p \tag{10}$$

式中: $k_s = 1 / (\exp((V_{oc}/N_s) / n V_{th}) - 1)$;
 $k_g = \exp(V_D / n V_{th}) - 1$;

$$R_s = \frac{1}{I_{mpa}/N_s} \left[(V_{oc} - V_{mpa}) / N_s - n V_{th} \ln \left(\frac{V_{mpa}/N_s + n V_{th} - I_{mpa}/N_p R_s}{n V_{th}} \right) \right];$$

$$R_p = \frac{(V_{mpa}/N_s - n V_{th})(V_{mpa}/N_s - I_{mpa}/N_p R_s)}{(I_{sc}/N_p - I_{mpa})(V_{mpa}/N_s - I_{mpa}/N_p R_s) - I_{mpa}/N_p n V_{th}}$$

2 光伏电池组件的通用模块的建立及仿真

2.1 光伏电池组件的通用模块的建立

在 Matlab/Simulink 平台下,利用式(10)建立光伏电池组件的通用模块,其封装和参数界面如图 2 和 3 所示.本模块通过设定 N_p 和 N_s 不仅可以对太阳能电池单体进行仿真,同时还可以对较大功率的光伏组件进行仿真.该模型可以计算出当前光辐照度和温度下的功率 P 最大功率点 W_p .

表 1 Solar msx 60PV 参数 ($t_{ref} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $E_{ref} = 1\text{ kW/m}^2$)
Table1 Solar msx 60PV specifications ($t_{ref} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $E_{ref} = 1\text{ kW/m}^2$)

V_{oc}/V	I_{sc}/A	W_p/W	V_{mp}/V	$T_1/(\text{mA} \cdot \text{K}^{-1})$	通常工作温度/ $^{\circ}\text{C}$	V_{oc} 温度系数/ $(\text{mV} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	功率温度系数上限/ $(\text{W} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$
21.1	3.8	60	17.1	3	49	-73	-0.38

在不同光辐照度下利用该模块对 Solarc msx60PV 进行仿真,其输出特性结果如图 4 及表 2 所示;在不同温度下进行仿真,得其输出特性结果如图 5 及表 3 所示.假设在给定条件下,定义相对误差 = (测试值 - 仿真值) / 测试值 $\times 100\%$,则可以获得 W_p 最大相对误差为 0.7%; V_{mp} 最大相对误差为 0.5%.在 0~100 $^{\circ}\text{C}$, V_{oc} 温度系数为 -70 mV/ $^{\circ}\text{C}$,功

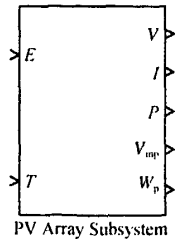


图 2 通用光伏组件封装界面
Fig. 2 Package interface of generalized photovoltaic array module

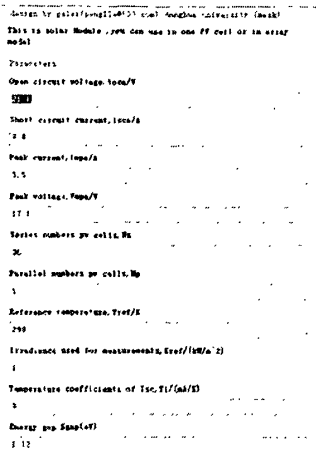


图 3 通用光伏组件参数设定界面
Fig. 3 Parameter interface of generalized photovoltaic array module

2.2 光伏电池组件的通用模块的仿真

采用典型的 Solarc msx 60PV 型号光伏组件,其具体参数如表 1 所示,仿真模块参数设定如图 3 所示.

率温度系数为 -0.15 W/ $^{\circ}\text{C}$,完全吻合 Solarc msx 60PV 给定特性.从表 2 可以明显看出,光辐照度从 1 kW/ m^2 减小到 0.2 kW/ m^2 , V_{oc} 从 21.1 V 减小到 19.2 V,减小了 9%;而 V_{mp} 从 17 V 减小到 16 V,减小了 6%.温度从 0~100 $^{\circ}\text{C}$ 时, V_{oc} 从 22.8 V 减小到 15.8 V,减小了 31%;而 V_{mp} 从 19 V 减小到 11.5 V,减小了 39%.从中可以看出,温度主要影响电压,光

强度主要影响电流, V_{mp} 与 V_{oc} 的变化趋势基本相同, 在 $t=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下, $V_{mp} \approx 0.81V_{oc}$ 可以为定电压最大功率点跟踪法提供理论数据。

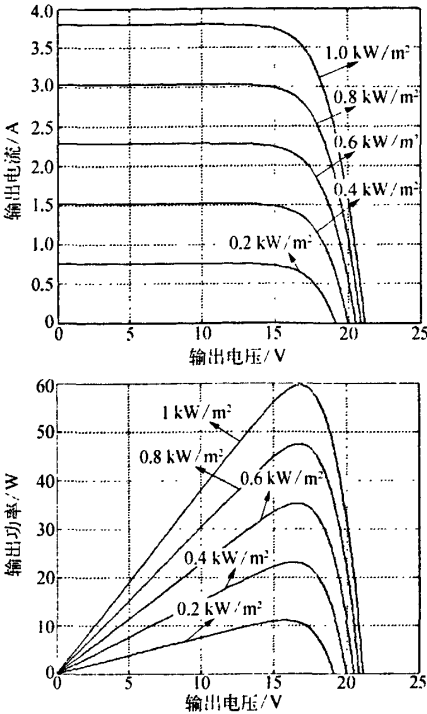


图4 光伏组件在不同光强度下的特性曲线 ($t=25\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Fig.4 Characteristic curves of photovoltaic array with different insolation levels

表2 光伏组件在不同光强度下的特性表 ($t=25\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Table 2 Characteristic table of photovoltaic array with different insolation levels

$E/(\text{kW} \cdot \text{m}^{-2})$	V_{oc}/V	I_{sc}/A	W_p/W	V_{mp}/V	V_{mp}/V_{oc}
1.0	21.1	3.8	59.7	17.0	0.81
0.8	20.8	3.1	47.5	17.0	0.82
0.6	20.5	2.3	35.3	16.5	0.80
0.4	20.0	1.5	23.2	16.5	0.82
0.2	19.2	0.8	11.1	16.0	0.83

表3 光伏组件在不同温度的特性表
($E_{ref}=1\text{ kW/m}^2$)

Table 3 Characteristic table of photovoltaic array with different temperature levels

$t/^{\circ}\text{C}$	V_{oc}/V	I_{sc}/A	W_p/W	V_{mp}/V	V_{mp}/V_{oc}
0	22.8	3.5	62.0	19	0.83
25	21.1	3.8	59.6	17.0	0.81
50	19.3	4.1	56.2	15.0	0.77
75	17.6	4.4	51.8	13.5	0.77
100	15.8	4.7	46.8	11.5	0.73

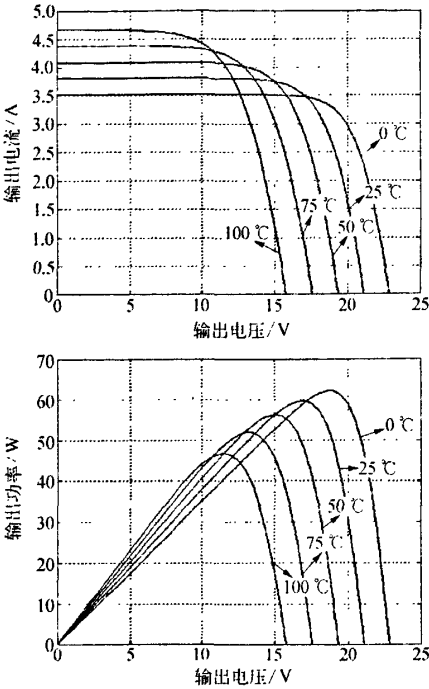


图5 光伏组件在不同温度下的特性曲线
($E_{ref}=1\text{ kW/m}^2$)

Fig.5 Characteristic curves of photovoltaic array with different temperature levels

2.3 模块的实际仿真应用

假设光强度在一天中满足高斯分布, $E(t) = E_{max} \exp(-(t-t_c)^2/2\sigma^2)$, 其中 t 为时刻; t_c 为一天中最大光强度时刻; σ 为偏差. 设最大光强度在中午 12:00, 则对应参数可设为: $t_c=12$. $\sigma=0.5$, $E_{max}=1\text{ kW/m}^2$, 利用该模块可以仿真一天中光伏组件在不同输出电压下的输出功率, 如图 6 及表 4 所示. 当光伏组件输出电压为 15 V 时, 输出功率最

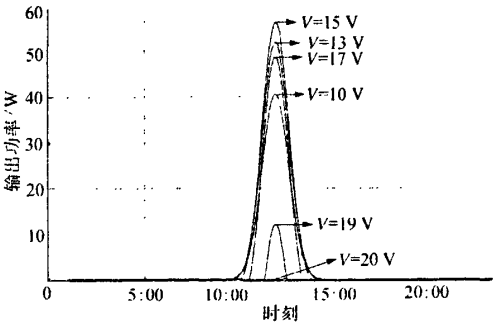


图6 一天中光伏组件在不同输出电压下的功率特性曲线 ($t=49\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig.6 Power characteristics during a sample day for different voltage ($t=49\text{ }^{\circ}\text{C}$)

大;当输出电压为 10 V 时,输出功率为 15 V 时的 70%;当输出电压为 19 V,输出功率仅为 15 V 的 22%;当输出电压大于 20 V 时,输出功率为 0,为了提高光伏组件的效率,需要根据不同的外界光强度和温度来改变光伏组件的输出电压,实现最大功率跟踪控制。

表 4 一天中光伏组件在不同输出电压下的
输出最大功率 ($t = 49\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Table 4 Maximum power during a sample day
for different voltage ($t = 49\text{ }^{\circ}\text{C}$)

V_o/V	10	13	15	17	19	20
W_p/W	40.6	52.0	56.4	48.8	12.3	0

3 结 论

对光伏组件进行准确快速的仿真,关键是采用合理的模型并建立相应的模块.本文采用工程用太阳能电池 5 参量模型及参数确定法,获取高精度的光伏组件通用模型,并在 Matlab/Simulink 中建立其相应模块.采用动态仿真技术,可以快速、准确获得光伏组件在不同光辐照度、温度下的输出特性曲线、最大功率点和峰值电压.通过对光伏组件进行仿真试验对比,表明本模块具有精度高、通用性强的优点。

参 考 文 献

[1] GOW J A, MANNING C D. Development of a Photovoltaic Array Model for Use in Power Electronics Simulation Studies [J]. IEE Proceedings of Electric Power Applications, 1999,

146(2); 193-200.
[2] WALKER G. Evaluating MPPT Converter Topologies Using a Matlab PV Model [J]. Journal of Electrical & Electronics Engineering, 2001, 21(1): 49-56.
[3] TSAI H L, TU C S, SU Y J. Development of Generalized Photovoltaic Model Using Matlab/Simulink[C]// Proceedings of the Word Congress on Engineering and Computer Science, San Francisco USA. 2008; 846-854.
[4] CHOWDHURT S, CHOWDHURT S P, TAYLOR G A, et al. Mathematical Modeling and Performance Evaluation of a Stand-Alone Polycrystalline PV Plant with MPPT Facility [C]// Power and Energy Society General Meeting Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, IEEE. 2008; 1-7.
[5] FRANCISCO M, GONZA-LONGAT T. Model of Photovoltaic Module in Matlab™ [C] // 2Do Congerso Iberoamericano de Estuaantes de Ingenieria Electrica, Electronica YComputacion, 2005; 1-5.
[6] NEMA R K, NEMA S, AGNIHOTRI G. Computer Simulation Based Study of Photovoltaic Cells/Modules and Their Experimental Verification [J]. International Journal of Recent Trends in Engineering, 2009, 1(3); 151-156.
[7] CARRERO C, RODRIGUEZ J, RAMIREZ D, et al. Simple Estimation of PV Modules Loss Resistances for Low Error Modeling [J]. Renewable Energy, 2009, 18(2); 1-6.
[8] 苏建徽,余世杰,赵为,等. 硅太阳能电池工程用数学模型[J]. 太阳能学报,2001, 22 (4); 409-412.
[9] 茆美琴,余世杰,苏建徽. 带有 MPPT 功能的光伏组件 Matlab 通用仿真模型[J]. 系统仿真学报,2005, 17(5); 1248-1251.
[10] 王长江. 基于 MATLAB 的光伏电池通用数学模型[J]. 电力科学与工程,2009, 25(4); 11-14.
[11] 吴忠军,刘国海,廖志凌. 硅太阳能电池工程用数学模型参数的优化设计[J]. 电源技术,2007, 31 (11); 897-901.

作者: [彭乐乐](#), [孙以泽](#), [孟焯](#), [陈玉洁](#), [PENG Le-le](#), [SUN Yi-ze](#), [MENG Chuo](#), [CHEN Yu-jie](#)
作者单位: [东华大学, 机械工程学院, 上海, 201620](#)
刊名: [东华大学学报 \(自然科学版\)](#) [ISTIC](#) [PKU](#)
英文刊名: [JOURNAL OF DONGHUA UNIVERSITY \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)
年, 卷(期): 2011, 37 (1)

参考文献(11条)

1. 吴忠军;刘国海;廖志凌 [硅太阳能电池工程用数学模型参数的优化设计](#)[期刊论文]-[电源技术](#) 2007 (11)
2. 王长江 [基于MATLAB的光伏电池通用数学模型](#)[期刊论文]-[电力科学与工程](#) 2009 (04)
3. 茆美琴;余世杰;苏建徽 [带有MPPT功能的光伏组件Matlab通用仿真模型](#)[期刊论文]-[系统仿真学报](#) 2005 (05)
4. 苏建徽;余世杰;赵为 [硅太阳能电池工程用数学模型](#)[期刊论文]-[太阳能学报](#) 2001 (04)
5. CARRERO C;RODRIGUEZ J;RAMIREZ D [Simple Estimation of PV Modules Loss Resistances for Low Error Modeling](#) 2009 (02)
6. NEMA R K;NEMA S;AGNIHOTRI G [Computer Simulation Based Study of Photovoltaic Cells/Modules and Their Experimental Verification](#) 2009 (03)
7. FRANCISCO M;GONZA-LONGAT T [Model of Photovoltaic Module in MatlabTM](#) 2005
8. CHOWDHURT S;CHOWDHURT S P;TAYLOR G A [Mathematical Modeling and Performance Evaluation of a Stand-Alone Polycrystalline PV Plant with MPPT Facility](#) 2008
9. TSAI H L;TU C S;SU Y J [Development of Generalized Photovoltaic Model Using Matlab/Simulink](#) 2008
10. WALKER G [Evaluating MPPT Converter Topologies Using a Matlab PV Model](#) 2001 (01)
11. GOW J A;MANNING C D [Development of a Photovoltaic Array Model for Use in Power Electronics Simulation Studies](#) 1999 (02)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_zgfzdxxb201101018.aspx