

基于数据手册的任意辐照和温度下 光伏电池模型参数提取*

黄磊^{1,2}, 张继元^{1,2}, 舒杰^{1,2†}, 崔琼¹, 吴志锋¹, 丁建宁³

(1. 中国科学院广州能源研究所, 中国科学院可再生能源重点实验室, 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 江苏省光伏科学与工程协同创新中心, 江苏 常州 213164)

摘要: 基于光伏电池数据手册提取光伏电池模型参数, 常利用参数的半经验公式求取任意工况下的模型参数, 但半经验公式仅为近似公式, 将引入较大误差。文中提出一种任意工况下的光伏电池单二极管 5 参数等效电路模型参数提取方法。该方法利用光伏电池数据手册提供的 $I-V$ 曲线关键点数据, 通过短路电流温度系数和开路电压温度系数求得任意工况下的关键点电流、电压, 针对关键点列写方程组求解参数, 从而得出任意辐照和温度下的光伏电池 $I-V$ 特性。以高效单晶硅电池在多种工况下的测量数据为例, 进行光伏电池模型参数提取和 $I-V$ 曲线计算。结果表明, 与利用参数半经验公式求取任意工况下参数的方法相比, 该方法具有更高的准确度, 在所有工况下均方根误差 (RMSE) 均小于 5%。

关键词: 光伏电池; 单二极管模型; 伏安特性; 参数提取

中图分类号: TK514; TM914.4

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2016.06.007

Parameter Extraction of Photovoltaic Cell Model under Different Irradiance and Temperature Based on Manufacture Datasheets

HUANG Lei^{1,2}, ZHANG Ji-yuan^{1,2}, SHU Jie^{1,2}, CUI Qiong¹, WU Zhi-feng¹, DING Jian-ning³

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Photovoltaic Science and Engineering, Jiangsu Changzhou 213164, China)

Abstract: Parameter extraction of photovoltaic cell model based on manufacture datasheets often uses parameter semi-empirical equations to obtain parameters under different conditions. These semi-empirical equations are approximate formulas and can increase model error. This paper proposes a parameter extraction method for 5-parameter single-diode model of photovoltaic cell under different irradiances and temperatures. It uses key-point data of $I-V$ curve in manufacture datasheets to compute key-point current and voltage under different conditions by applying temperature coefficients of short circuit current and open circuit voltage. Based on the key-point data under certain conditions, the model parameters and $I-V$ curve can be obtained by solving the proposed equation set. The proposed method was tested on high-efficiency monocrystalline silicon solar cell for parameter extraction and $I-V$ curve computation. Experiment and simulation results demonstrate that the proposed method outperforms methods using semi-empirical equations to obtain parameters under different conditions, and the root mean square error (RMSE) values were less than 5% under all test conditions.

Key words: photovoltaic cell; single-diode model; $I-V$ characteristic; parameter extraction

0 引言

太阳能光伏发电具有安装要求低、对环境气候

影响小、运行安静、能够与建筑融合等优势, 在城市等用电量以及用电质量要求高的地区得到越来越多的关注。建立准确的光伏系统模型对光伏发电

* 收稿日期: 2016-09-26 修订日期: 2016-10-18

基金项目: 佛山市院市合作项目 (2014HK100051); 广州市创新平台与共享项目 (201509010018); 广东省协同创新与平台环境建设项目 (2014B040404002)

† 通信作者: 舒杰, E-mail: shujie@ms.giec.ac.cn

系统功率评估、最大功率跟踪算法设计、系统能耗分析等具有重要意义。光伏系统电路模型的建立基于光伏电池电路模型的建立^[1]。光伏电池电路模型是光伏电池对外表现的电特性等效模型，并非实际物理模型。光伏电池电路模型种类较多^[2-3]，但常用的有2种，即单二极管模型和双二极管模型。通常情况下，双二极管模型模拟 $I-V$ 伏安特性的精度略高于单二极管模型^[4]；但由于其精度提高较小，建模和计算复杂，单二极管模型得到更广泛的应用^[5-8]。

利用光伏电池模型前必须确定模型未知参数，单二极管模型包含5个未知参数，且未知参数随电池温度和太阳辐照变化。一类主要的提取模型未知参数的方法为解析法^[5,9-10]，此种方法利用光伏电池产品数据手册提供的关键点的数据（包括短路电流、开路电压、最大功率点电流和电压、温度系数等）及参数随辐照和温度变化规律的半经验公式，推导出不同辐照和温度下的光伏电池模型。一般情况下，单二极管模型的5个待求参数中仅光生电流与温度和辐照有确定的关系，求解时其他四个参数所采用的半经验公式均有所不同。文献[5]假定串联电阻 R_s 不变，并联电阻 R_{sh} 与太阳辐照存在反比例关系，推导出任意光强和温度下的光伏电池 $I-V$ 特性显函数表达式。文献[9]假定二极管理想因子 n 不变、串联电阻 R_s 不变，二极管反向饱和电流 I_s 与温度存在指数关系，并联电阻 R_{sh} 与太阳辐照存在反比例关系。文献[10]则假定 n 、 R_s 、 R_{sh} 均不随温度和辐照变化， I_s 与温度存在指数关系。文献[9]和文献[10]均是先求取标准条件下的模型参数，进一步根据各个参数的半经验公式推导出不同辐照和温度下的 $I-V$ 特性。由于这些参数与温度和辐照不存在确定的数学关系，参数的半经验公式通过近似和假设推导得出，因此利用这些半经验公式求取任意辐照和温度下的光伏电池模型将引入较大误差。

因此，为求取任意辐照和温度下的光伏电池等效电路模型，减少5参数半经验公式的使用，本文提出了一种基于产品手册数据的参数提取方法。推导利用短路电流温度系数和开路电压温度系数求取任意工作条件下特定工作点，进一步提取任意工作条件下的光伏电池参数。以高效单晶硅为研究对象，通过采集光伏电池在不同辐照和温度下的 $I-V$ 曲线，利用仿真实验验证本文参数提取方法的有效性。

1 光伏电池等效电路模型

光伏电池电路等效模型广泛应用于模拟光伏电池 $I-V$ 特性，该模型的主要优点是可以直接应用于 MATLAB 和 PSpice 等软件中，进行光伏系统建模和并网仿真，也能应用于光伏模拟器中。在众多光伏电池等效电路模型中，单二极管5参数模型应用最为广泛，等效电路图如图1所示。模型中待求5参数分别为光生电流 I_{ph} ，P-N 结等效二极管反向饱和电流 I_s ，等效二极管理想因子 n ，由光伏电池内部电阻和接触电阻等效的串联电阻 R_s ，引起漏电流的并联电阻 R_{sh} 。

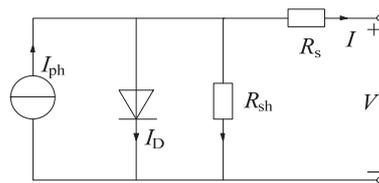


图1 光伏电池单二极管等效电路模型

Fig. 1 Single-diode equivalent circuit model of photovoltaic cell

等效电路模型正向工作的 $I-V$ 特性方程如式(1)所示。

$$I = I_{ph} - I_D - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中： I 为光伏电池输出电流，A； V 为光伏电池输出电压，V； I_D 为流过二极管的电流， $I_D = I_s \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right]$ ，A； T 为光伏电池 P-N 结绝对工作温度，K； k 为玻耳兹曼常数， 1.38×10^{-23} J/K； q 为电子电荷， 1.6×10^{-19} C。

2 标准测试条件下模型参数提取

表1 光伏组件特性产品手册数据

Table 1 Manufacture data sheet of photovoltaic module

	符号	单位
最大功率点电压	V_{mp}	V
最大功率点电流	I_{mp}	A
开路电压	V_{oc}	V
短路电流	I_{sc}	A
开路电压温度系数	β_{oc}	%/°C
短路电流温度系数	α_{sc}	%/°C
最大功率温度系数	γ	W/°C

在没有光伏电池 I - V 测量数据的情况下, 解析法提取光伏电池模型参数是通过采用光伏电池或者组件厂家提供的产品手册数据, 根据待求参数的个数列写方程组, 求取标准条件下的模型参数^[9-10]。光伏组件产品手册数据通常包括标准测试条件 (standard test condition, STC) 下的关键工作点的数据, 也包括组件结构和接线, 如表 1 所示。在 STC 下, 太阳辐照为 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$, 电池温度为 25°C 。

求解式 (1) 中的 5 个参数, 通常采用短路点、开路点、最大功率点列写以下 4 个方程。

在短路点, $I = I_{sc,STC}$, $V = 0$, 得到以下关系式:

$$I_{sc,STC} = \left[I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{qI_{sc}R_s}{nkT}} - 1 \right) - \frac{I_{sc}R_s}{R_{sh}} \right]_{STC} \quad (2)$$

在开路点, $I = 0$, $V = V_{oc,STC}$, 得到以下关系式:

$$0 = \left[I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{qV_{oc}}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right]_{STC} \quad (3)$$

在最大功率点, $I = I_{mp,STC}$, $V = V_{mp,STC}$, 得到以下关系式:

$$I_{mp,STC} = \left[I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{q(V_{mp}+I_{mp}R_s)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V_{mp}+I_{mp}R_s}{R_{sh}} \right]_{STC} \quad (4)$$

在最大功率点, 功率关于电压的求导为零, 即 $dP/dV = 0$, 可以推导出以下关系式:

$$0 = \left[I_{mp} + V_{mp} \left(\frac{-qI_s e^{\frac{q(V_{mp}+I_{mp}R_s)}{nkT}}}{nkT} - \frac{1}{R_{sh}} \right) \right]_{STC} \quad (5)$$

以上 4 个方程常作为解析法提取光伏电池模型参数的基本方程, 求解模型所需要的第 5 个方程则有较多的选择。如采用 I - V 曲线开路点斜率表示 R_s , I - V 曲线短路点斜率表示 R_{sh} ^[10], 开路电压温度系数^[11]列写其他温度下的关系式等。这里采用 I - V 曲线短路点斜率估算 R_{sh} 构造第 5 个方程。

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{I=I_{sc,STC}} = -\frac{1}{R_{sh,STC}} \quad (6)$$

将 $I = I_{sc,STC}$, $V = 0$ 代入式 (6), 可得到以下关系式:

$$\left[-\frac{I_s}{n} (R_{sh} - R_s) e^{\frac{I_{sc}R_s}{n}} - \frac{R_s}{R_{sh}} \right]_{STC} = 0 \quad (7)$$

3 任意条件下模型参数提取

从以上分析可以知道, 只要得到特定辐照和温度下的短路点、开路点、最大功率点的电压电流数据, 即可通过式 (2) ~ 式 (5) 和式 (7) 求解出该条件下的模型参数。

I_{sc} 和 I_{mp} 与温度和辐照有确定的数学关系, 可以用下式计算不同温度和辐照下的 I_{sc} 和 I_{mp} 值:

$$I_{sc} = I_{sc,STC} \frac{S}{S_{STC}} [1 + \alpha_{sc}(T - T_{STC})] \quad (8)$$

$$I_{mp} = I_{mp,STC} \frac{S}{S_{STC}} [1 + \alpha_{sc}(T - T_{STC})] \quad (9)$$

式中, S 为太阳辐照, W/m^2 。

数据手册通常给出 V_{oc} 的温度系数, V_{oc} 与太阳辐照的关系可以通过以下假设和推导得出。

假设:

$$I_s = I_{s,STC} \left(\frac{T}{T_{STC}} \right)^3 e^{\frac{E_g}{k} \left(\frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T} \right)} \quad (10)$$

$$I_{s,STC} = I_{sc,STC} \exp \left(-\frac{q}{n_{STC} k T} V_{oc,STC} \right) \quad (11)$$

式中, E_g 为禁带宽度, 在 STC 条件下, 硅电池 $E_g = 1.121\ \text{eV}$ 。

仅考虑光强变化时, 联立式 (8)、式 (10) ~ 式 (11) 可得:

$$V_{oc} = \frac{n_{STC} k T}{q} \ln \frac{I_{sc}}{I_s} = V_{oc,STC} + \frac{n_{STC} k T}{q} \ln \frac{S}{S_{STC}} \quad (12)$$

再考虑开路电压温度系数 β_{oc} , 可得:

$$V_{oc} = [1 + \beta_{oc}(T - T_{STC})] \left(V_{oc,STC} + \frac{n_{STC} k T}{q} \ln \frac{S}{S_{STC}} \right) \quad (13)$$

根据不同辐照和温度下的 I - V 曲线数据, STC 条件下, 开路电压和最大功率点电压随温度变化如图 2 所示, 两者随温度变化趋势相近, 具有相近的温度系数, 因此这里也采用开路电压温度系数来表示最大功率点电压温度系数。此外, 根据 I_{sc} 与 I_{mp} 具有相似的变化规律, 这里假设 V_{mp} 与 V_{oc} 具有相似

的变化规律, 采用 V_{oc} 推导的关系外推至 V_{mp} , 得到 V_{mp} 与温度和辐照的关系式如下:

$$V_{mp} = \left[1 + \beta_{oc} (T - T_{STC}) \right] \left(V_{mp,STC} + \frac{n_{STC} k T}{q} \ln \frac{S}{S_{STC}} \right) \quad (14)$$

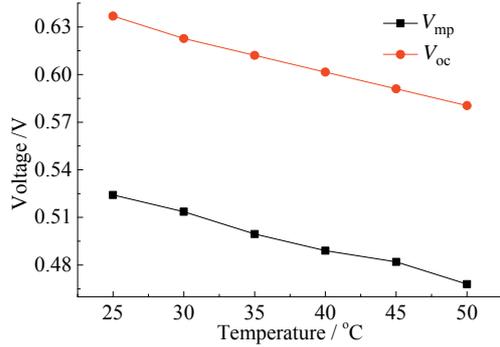


图 2 辐照为 1000 W/m^2 时 V_{oc} 和 V_{mp} 随温度变化情况
Fig. 2 V_{oc} and V_{mp} under different temperatures and 1000 W/m^2

4 算法及模型参数初值估算

采用 MATLAB 最优化工具箱中的非线性数据拟合函数 lsqcurvefit 求解, 将所建立的方程组转化成最小二乘优化问题, 采用信赖域反射算法对所建立的优化问题进行求解。最小二乘优化问题如式 (15) 所示, 将公式 (1) 改写成齐次形式得到最小二乘优化问题的函数 $f(x)$, 如式 (16) 所示。

$$\min_x \|f(x)\|_2^2 = \min_x [f_1(x)^2 + f_2(x)^2 + \dots + f_5(x)^2] \quad (15)$$

$$f(V, I, x) = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} - I \quad (16)$$

通常, 最小二乘优化问题是寻找向量 x 使得包含平方和的目标函数达到最小值。首先需要选定适当曲线类型或模型, 确定最优化问题的目标函数, 其次需要确定函数中的解及其边界问题。这里曲线模型为 5 参数模型, 其解定义为一组向量 $x = [I_{ph}, I_s, n, R_s, R_{sh}]$, 解的边界如表 2 所示。

表 2 光伏电池模型参数边界

参数	下边界	上边界
I_{ph}/A	0	2
$I_s/\mu\text{A}$	0	10
n	1	2
R_s/Ω	0	10
R_{sh}/Ω	0	1000

采用数值迭代算法时需要提供合适的初值, 以便计算结果能够准确、迅速收敛^[12]。二极管理想因子 n 取值范围为 $[1, 2]$, 这里取 $n=1.5$ 作为 n 的初值。在初值估计时, 假设流过二极管的电流很小, 并联电阻很大, 可以得到以下初值估计。

在短路点, 由式 (2) 可以得到 I_{ph} 的初值:

$$I_{ph} \approx I_{sc} \quad (17)$$

在开路点, 由式 (3) 可以得到 I_s 的初值:

$$I_s = I_{sc} e^{-\frac{q}{nkT} V_{oc}} \quad (18)$$

在最大功率点处, 由式 (4) 可以得到 R_s 的初值:

$$R_s = \left[\frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph} - I_{mp}}{I_s} \right) - V_{mp} \right] / I_{mp} \quad (19)$$

对于 R_{sh} , 初值设定为 $R_{sh} = 100 \Omega$ 。

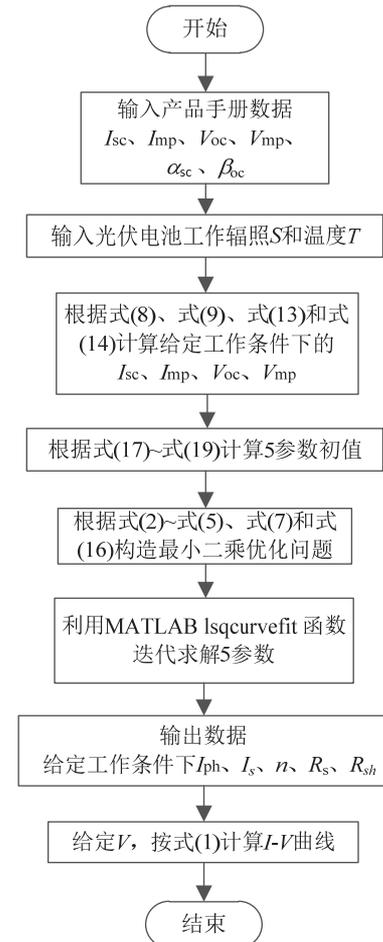


图 3 光伏电池等效电路模型计算流程图

Fig. 3 Flowchart of photovoltaic cell model parameter extraction and I - V curve computation

计算流程如图 3 所示。首先输入 STC 条件下的组件参数 I_{sc} 、 I_{mp} 、 V_{oc} 、 V_{mp} 、 α_{sc} 和 β_{oc} ，应用式 (8)、式 (9)、式 (13) 和式 (14) 计算给定工作条件下的 I_{sc} 、 I_{mp} 、 V_{oc} 、 V_{mp} ；再根据关键工作点的电路方程 [式 (2) ~ 式 (5) 和式 (7)] 构造最小二乘优化问题，计算 5 参数初值，利用 MATLAB Isqcurvefit 函数求解 5 参数；最后利用计算得到的等效电路模型，给定电压，计算相应的电流值，得到 I - V 曲线。

5 实验验证与误差分析

以高效单晶硅光伏电池为实验对象，测量其在不同辐照和温度下的 I - V 曲线数据，以验证本文所提参数提取方法的有效性。使用具有 3A 等级认证的 Abet Technologies 太阳模拟系统进行测量，通过网格衰减器获得 8 种太阳辐照，分别为 200、258、385、440、540、675、810、1 000 W/m^2 ，通过恒温板获得 6 种温度，分别为 25 $^{\circ}C$ 、30 $^{\circ}C$ 、35 $^{\circ}C$ 、40 $^{\circ}C$ 、45 $^{\circ}C$ 、50 $^{\circ}C$ 。光伏电池的电气特性如表 3 所示。

表 3 高效单晶硅光伏电池电气特性 (STC 条件下)

Table 3 Electrical characteristics of high-efficiency monocrystalline silicon solar cell (under STC)

I_{sc} / A	V_{oc} / V	I_{mp} / A	V_{mp} / V	P_{mp} / W
1.927 3	0.657 8	1.765	0.538 2	0.95

根据实验可以得到 48 种工作条件下的 I - V 曲线，模型计算结果使用均方根误差 (root mean square error, RMSE) 进行评价，RMSE 值计算如下：

$$E_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(I_{c,i} - I_{mes,i})^2}{I_{sc,STC}^2}} \quad (20)$$

式中， $I_{c,i}$ 是光伏电池模型输出电流计算值， $I_{mes,i}$ 为光伏电池输出电流测量值， N 为测量点个数。

将本文所提参数提取方法与一类常见的参数提取方法^[10]进行比较，此类方法先计算 STC 条件下的模型参数，后通过各个参数的半经验公式计算得到任意工作条件下的参数数值，并得到任意工作条件下的光伏电池模型。两种参数提取方法的 RMSE 值

计算结果如图 4 所示。在低温下，两种方法具有相似的模型计算精度；但随着温度的上升，对照方法的模型误差快速增大，使得模型由于精度过大导致其 I - V 特性计算无效。本文所提参数模型在温度上升时，误差也有所上升，但上升幅度较小，RMSE 值均在 5% 以内，其中，有 70.8% 的 RMSE 值小于 2.5%。

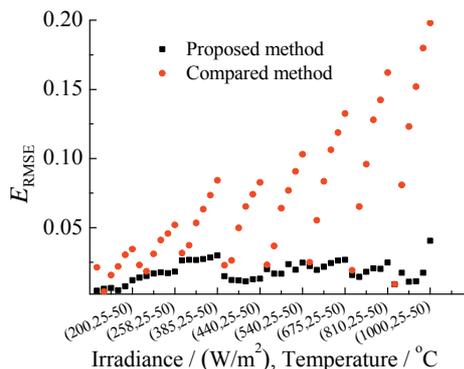


图 4 光伏电池等效电路模型计算误差

Fig. 4 RMSE of photovoltaic cell modeling

选取 STC、高辐照和低温、高辐照和高温度、低辐照和低温、低辐照和高温度五种工作条件， I - V 曲线计算结果如图 5、图 6 所示。其中 STC 条件下，所提方法和对照方法计算结果相同，具有准确的 V_{oc} 、 I_{sc} 、 V_{mp} 、 I_{mp} 数值，模型精度较高，RMSE 值仅为 0.0091。其他辐照条件下，由于测量时的偏差，按式 (8) 计算 I_{sc} 值均有一定误差。而对照方法在高温下， V_{oc} 偏差较大，导致模型 I - V 特性计算误差较大。本文所提参数提取方法在各种工作条件下均具有较高的计算精度。

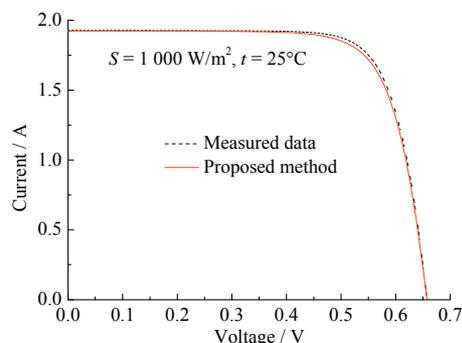
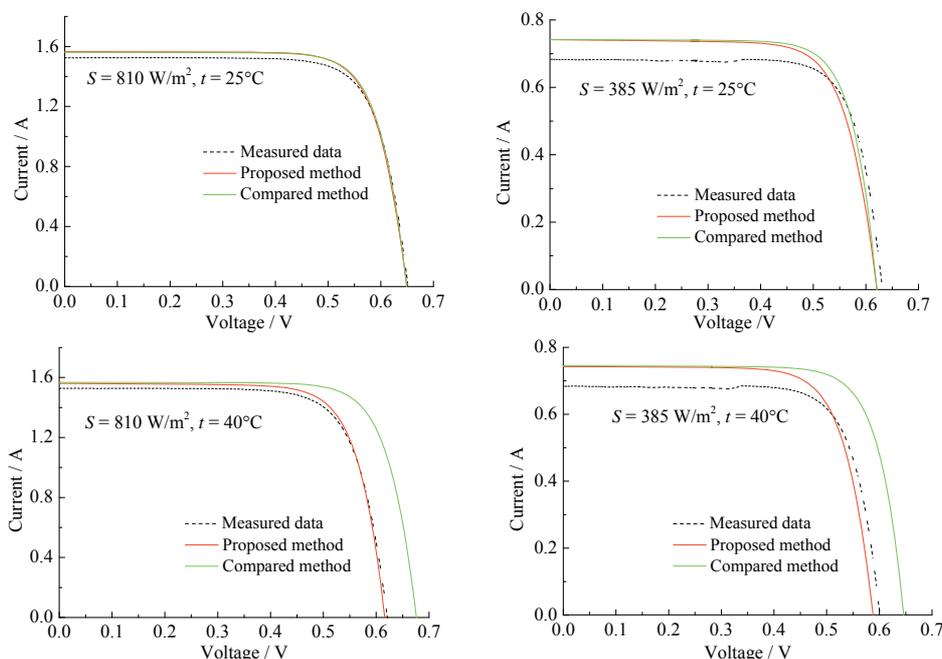


图 5 STC 条件下 I - V 特性曲线

Fig. 5 I - V curves under standard test condition

图 6 任意工作条件下 I - V 特性曲线Fig. 6 I - V curves under different conditions

6 结 论

本文提出一种基于光伏产品数据手册的单二极管 5 参数光伏等效电路模型参数提取方法，建立任意工作条件下光伏 I - V 特性计算模型。该模型使用标准测试条件下的 6 个电气参数 (V_{oc} 、 I_{sc} 、 V_{mp} 、 I_{mp} 、 α_{sc} 和 β_{oc})，先计算出给定辐照和温度下的 V_{oc} 、 I_{sc} 、 V_{mp} 、 I_{mp} ，再利用这三个特殊点列写方程组，从而解出该工作条件下的 5 参数 (I_{ph} 、 I_s 、 n 、 R_s 、 R_{sh})，便可得到任意工作条件下的光伏电池的 I - V 特性曲线。以高效单晶硅光伏电池为例，测量 6 种温度和 8 种辐照共 48 种工作条件下的 I - V 曲线，验证算法的有效性，并与一类常见的参数提取方法进行比较。仿真实验证明：利用参数半经验公式得到任意工作条件下参数值的 I - V 特性计算方法在高温下误差较大；本文所提参数提取方法在任意工作状态下均具有较好的光伏电池 I - V 特性计算结果。单二极管 5 参数等效电路模型能够准确等效硅电池的 I - V 特性，并且硅光伏电池存在确定的电压和电流温度系数，因此该模型对硅光伏电池具有良好的适应性与精确度，具有很好的实用参考价值。

参考文献：

[1] PENG L L, SUN Y Z, MENG Z, et al. A new method for determining the characteristics of solar cells[J]. Journal

of power sources, 2013, 227: 131-136. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.07.061.

- [2] HUMADA AM, HOJABRI M, MEKHILEF S, et al. Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: A review[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2016, 56: 494-509. DOI: 10.1016/j.rser.2015.11.051.
- [3] CIULLA G, LO BRANO V, DI DIO V, et al. A comparison of different one-diode models for the representation of I - V characteristic of a PV cell[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2014, 32: 684-696. DOI: 10.1016/j.rser.2014.01.027.
- [4] ASKARZADEH A, REZAZADEH A. Extraction of maximum power point in solar cells using bird mating optimizer-based parameters identification approach[J]. Solar energy, 2013, 90: 123-133. DOI: 10.1016/j.solener.2013.01.010.
- [5] 王明达, 赵瑞杰. 基于数据手册的光伏电池特性及参数实用估算方法[J]. 可再生能源, 2012, 30(3): 102-107. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5292.2012.03.022.
- [6] 高献坤, 姚传安, 高向川, 等. 光伏电池组件隐式、显式单二极管模型准确性对比研究[J]. 物理学报, 2014, 63(17): 366-375. DOI: 10.7498/aps.63.178401.
- [7] 韩伟, 王宏华, 陈凌, 等. 光伏组件参数拟合及输出特性研究[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 100-107. DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.09.016.
- [8] 李善寿, 张兴. 改进的光伏组件工程数学模型建模方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 108-112. DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.09.017.
- [9] 孔祥雨, 徐永海, 曾雅文, 等. 一种求解光伏电池 5 参数模型的方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22):

- 46-50.
- [10] 邱纯, 蔡涛, 段善旭, 等. 任意辐射强度与温度下硅光伏电池模型参数的计算方法[J]. 太阳能学报, 2013, 34(9): 1626-1632.
- [11] CHENNI R, MAKHLOUF M, KERBACHE T, et al. A detailed modeling method for photovoltaic cells[J]. Energy, 2007, 32(9): 1724-1730. DOI: 10.1016/j.energy.2006.12.006.
- [12] DOBOS AP. An improved coefficient calculator for the california energy commission 6 parameter photovoltaic module model[J]. Journal of solar energy engineering, 2012, 134(2): 021011. DOI: 10.1115/1.4005759.

作者简介:

黄 磊 (1986-), 女, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事可再生能源发电预测及微网技术研究。

张继元 (1990-), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事电力电子在电力系统中的应用。

舒 杰 (1969-), 男, 博士, 研究员, 主要从事可再生能源发电及微网技术研究。