

基于泰勒函数的太阳能电池通用模型研究

邓士锋^{1,2}, 张 臻^{1,2}, 吴 军¹, 全 鹏²

(1. 河海大学常州校区机电工程学院, 常州 213022; 2. 光伏科学与技术国家重点实验室, 常州天合光能有限公司, 常州 213031)

摘 要: 基于太阳能电池等效模型,运用泰勒公式进行降幂求解,使太阳能电池工作电流和工作电压之间的关系呈显性函数。在标准测试条件下,对太阳能电池和组件进行建模仿真,将仿真结果与实测结果进行对比,最大工作点基本与厂家提供的参数重合,偏差度在2%以内,结果验证了模型的有效性和可行性。在此基础上建立太阳能电池、组件和适用于任意遮不均匀光照和温度分布情况下光伏阵列的通用模型。

关键词: 泰勒函数; 太阳能电池建模; 不均匀光照; I - V 特性

中图分类号: TM615 **文献标识码:** A

0 引 言

光伏组件的输出特性受不均匀光照和不均匀温度的影响较大,为提高光伏发电系统的发电效率,需建立一个准确、通用的光伏模型来分析和仿真光伏阵列在任意辐照度和温度情况下的输出特性。太阳能电池是太阳能发电系统的重要组成部分,其输出特性是一个关于 I - V 的非线性超越方程。由于方程中包含 5 个参数,这给求解带来较大困难,同时也使准确分析光伏组件的输出特性变得困难。很多文献对太阳能电池的建模问题进行了深入研究。文献[1]提出标准测试条件下单二极管提取方法,忽略了并联电阻 R_{sh} ;文献[2,3]提出基于迭代法求解超越方程,求解时显示了较好的效果,但对初始值的合理选择要求较高,此外还存在迭代是否收敛等问题;文献[4,5]提出一种基于 Lambert W 函数的求解方法,结果准确,但在构造超越方程 $W(x)\exp[W(x)]=x$ 中的 $W(x)$ 时工作量大,技巧性高,操作较为繁琐。

本文提出一种基于泰勒函数对太阳能电池进行建模的简单方法。首先,基于太阳能电池等效模型,运用泰勒公式进行降幂求解,使电池工作电流和工作电压之间的关系变成显性函数,并通过实测结果

验证模型的有效性和可行性;其次,在此基础上建立太阳能电池、组件和适用于任意遮不均匀光照和温度分布情况下光伏阵列的通用模型;最后,分析不均匀光照、不均匀温度和任意遮挡条件下光伏组件的输出特性,以为太阳能电池建模和光伏发电系统等提供参考。

1 太阳能电池单二极管模型

太阳能电池是以半导体的 p-n 结受太阳光照产生光生伏打效应为基础,直接将光能转换成电能的能量转换器,其典型等效电路如图 1 所示。

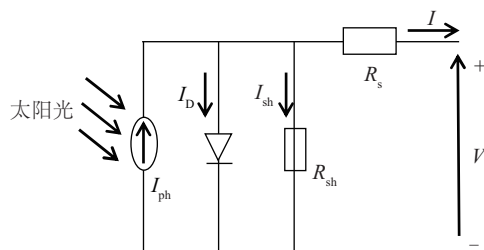


图1 单个太阳能电池的等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of single solar cell

对应太阳能电池的输出特性方程为:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{AV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

收稿日期: 2016-06-30

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20151173); 江苏省重点研发计划(产业前瞻与共性关键技术)(BE2017063); 国家自然科学基金(51777059)

通信作者: 张 臻(1981—), 男, 博士、副教授, 主要从事光伏可靠性、高效光伏组件与系统方面的研究。zhangzhenwl@126.com

式中, I ——工作电流, A; I_{ph} ——光生电流, A; I_0 ——等效二极管的反向饱和电流, A; V ——电池工作电压, V; R_s ——等效串联电阻, Ω ; A ——等效二极管的质量因子; V_T ——电池的热电压, $V_T = kT/q$, 其中 k 为玻尔兹曼常数, 一般为 1.38×10^{-23} J/K, T 为电池温度(K), q 为电荷常数, 一般为 1.6×10^{-19} C; R_{sh} ——电池的等效并联电阻, Ω 。

式(1)中等效模型包含 I_{ph} 、 I_0 、 A 、 R_s 和 R_{sh} 共 5 个未知参数。通过对太阳电池进行建模, 根据电池厂商提供的标准测试条件(STC)下的相关参数, 求出等效模型中的未知参数, 然后根据相关参数与辐照度和温度之间的关系式, 求出任意环境下的相关电性能参数, 绘制 I - V 特性和 P - V 特性曲线。

2 四参数法求解

通常情况下太阳电池生产厂商提供 STC 下的数据有: 开路电压 V_{oc} 、短路电流 I_{sc} 、最大工作电压 V_m 、最大工作电流 I_m 。因此可获得 I - V 特性曲线中 $(0 \text{ V}, I_{sc})$ 、 $(V_{oc}, 0 \text{ A})$ 、 (V_m, I_m) 3 个关键点。

式(1)中, 由于并联电阻 R_{sh} 较大, 故“ $V+IR_s/R_{sh}$ ”项可忽略, 移项整理得:

$$V = AV_T \ln \left(\frac{I_{ph} - I}{I_0} + 1 \right) - IR_s \quad (2)$$

由式(2)知, 对于单二极管模型中, 光生电流 I_{ph} 、p-n 结的质量因子 A 、等效二极管反向饱和电流 I_0 和等效串联电阻 R_s 这 4 个参数是未知量, 至少需要 4 个方程求解。在辐照度和 p-n 结温度不变的情况下, 短路电流 I_{sc} 是电池能产生的最大电流, 即 $(0 \text{ V}, I_{sc})$ 点, $V=0 \text{ V}$ 时:

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{I_{sc} R_s}{AV_T} \right) - 1 \right] \quad (3)$$

同样, 相同辐照度和 p-n 结温度情况下, 开路电压是电池能产生的最大电压, 即 $(V_{oc}, 0 \text{ A})$ 点, $I=0 \text{ A}$ 时:

$$V_{oc} = \frac{AkT}{q} \ln \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (4)$$

工作在最佳工作点 (V_m, I_m) 时:

$$V_m = AV_T \ln \left(\frac{I_{ph} - I_m}{I_0} + 1 \right) - I_m R_s \quad (5)$$

因此, 在一定辐照度和温度情况下, 电池输出功率 P 为:

$$P = V \left\{ I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{AV_T} \right) - 1 \right] \right\} \quad (6)$$

由于最大功率点是光伏输出特性 P - V 曲线的极值点, P 对 V 的偏微分为零, 即:

$$\frac{dP}{dV} \Big|_{V=V_m, I=I_m} = 0 \quad (7)$$

由式(3)~式(5)和式(7)这 4 个等式求解出光生电流 I_{ph} 、p-n 结的质量因子 A 、等效二极管反向饱和电流 I_0 和等效串联电阻 R_s 这 4 个未知参数, 代入式(2)即可求解工作电流 I 和工作电压 V 的函数关系。运用 Matlab 建模, 设定工作电流从 0 A 开始直到短路电流 I_{sc} 为止, 步长设为 0.001 A, 得出的一系列的工作电压值, 绘制曲线, 得到电池的 I - V 曲线如图 2 所示。

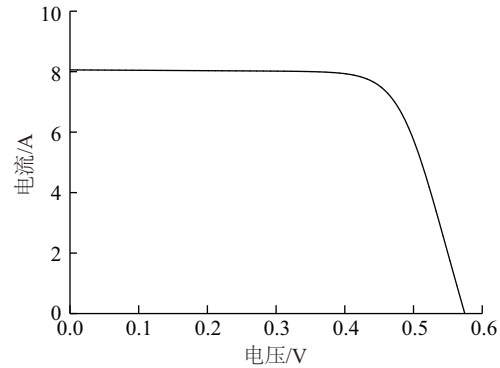


图2 单片电池 I - V 曲线(四参数法)

Fig. 2 I - V curve of single solar cell (4-parameters method)

3 泰勒函数法求解

泰勒公式: 若函数 $f(x)$ 在开区间 (a, b) 有直到 $n+1$ 阶的导数, 则当函数在此区间内时, 在 $x=x_0$ 处的展开式为:

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x-x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!}(x-x_0)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}(x-x_0)^n + R_n \quad (8)$$

所以有:

$$e^x = 1 + x + x^2/2! + \dots + x^n/n! \quad (9)$$

取其线性部分即:

$$e^x = 1 + x \quad (10)$$

因此把式(1)中指数项 $e^{(V+IR_s)/(AV_T)}$ 分解为 $e^{V/AV_T} \cdot e^{IR_s/AV_T}$, 对 e^{IR_s/AV_T} 项进行泰勒展开, 并取线性部分即:

$$\begin{aligned}
 I &= I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V}{AV_T}} \cdot e^{\frac{IR_s}{AV_T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \\
 &= I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{V}{AV_T}} \cdot \left(1 + \frac{IR_s}{AV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (11) \\
 &= I_{ph} - I_0 \cdot e^{\frac{V}{AV_T}} \cdot \frac{IR_s}{AV_T} - I_0 \left(e^{\frac{V}{AV_T}} - 1 \right) - \frac{V}{R_{sh}} - \frac{IR_s}{R_{sh}}
 \end{aligned}$$

移项整理后得:

$$I = \frac{I_{ph} - \frac{V}{R_{sh}} - I_0 \left(e^{\frac{V}{AV_T}} - 1 \right)}{1 + \frac{I_0 R_s}{AV_T} \cdot e^{\frac{V}{AV_T}} + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (12)$$

式(12)中光生电流 I_{ph} 、p-n 结的质量因子 A 、等效二极管反向饱和电流 I_0 和等效串联电阻 R_s 这 4 个未知参数同式(13)求出, 等效并联电阻由式(13)求出。

在 I - V 特性曲线中的短路点处:

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=0, I=I_{sc}} = -\frac{1}{R_{sh}} \quad (13)$$

此时式(12)中只有工作电压和工作电流是未知参数, 得出工作电流 I 和工作电压 V 之间的对应关系。运用 Matlab 建模, 设定工作电压从 0 V 开始直到开路电压 V_{oc} 为止, 步长设为 0.001 V, 可得出系列工作电流值, 绘制曲线, 得到电池的 I - V 曲线如图 3 所示。

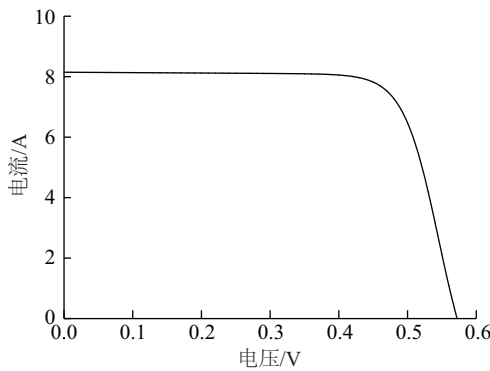


图3 单片电池 I - V 曲线(泰勒函数法)

Fig. 3 I - V curve of single solar cell (Taylor-function method)

4 实验验证

4.1 电池 I - V 特性曲线验证

在标准测试条件下, 某太阳能电池厂商提供的电池参数为 $I_{sc}=8.157$ A、 $V_{oc}=0.573$ V、 $P_m=3.606$ W、 $I_m=7.620$ A、 $FF=77.086\%$ 、 $R_s=0.009$ Ω 和 $R_{sh}=7.535$ Ω , 电池实测 I - V 和 P - V 特性曲线如图 4 所示。

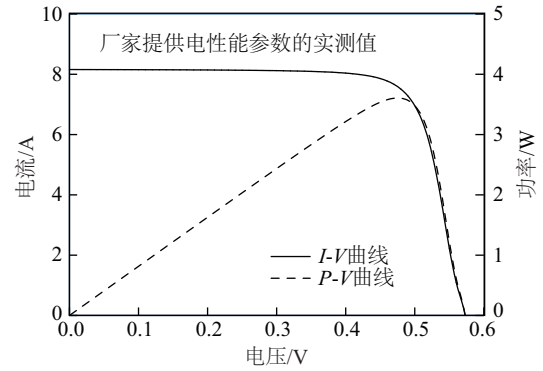


图4 单片电池 I - V 和 P - V 曲线

Fig. 4 I - V & P - V curve of single solar cell

利用 Matlab 软件, 分别绘制四参数法和泰勒函数法求解的 I - V 特性曲线与实测数据进行对比, 如图 5 所示。

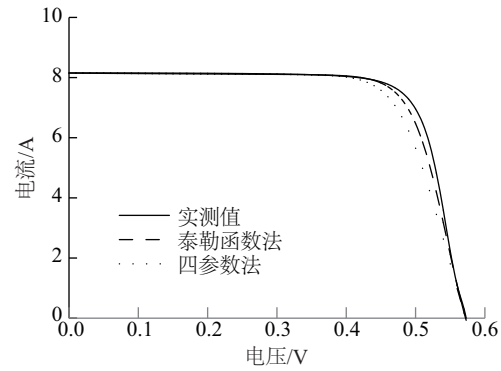


图5 单片电池 I - V 对比曲线

Fig. 5 I - V contrast curve of single solar cell

对比分析泰勒函数法与实测值在不同电压下的性能特性的偏差度如图 6 所示。

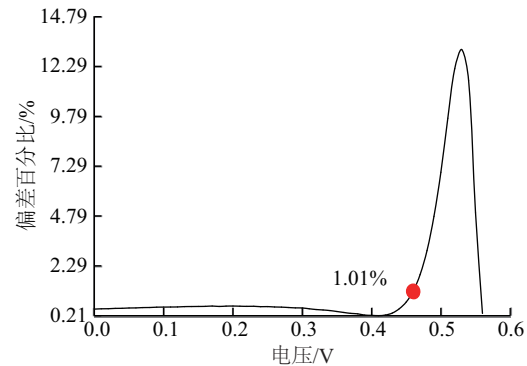


图6 单片电池输出功率的泰勒函数法偏差度

Fig. 6 Deviation of single solar cell power output

采用泰勒函数法对电池电性能进行模拟, 在电池最佳工作点处, 最佳工作电压偏差值小于 0.05 V,

最佳工作点基本与厂家提供的参数重合,偏差度为1.01%,整体平均偏差度在2%以内。

4.2 光伏组件不均匀辐照和温度下的电性能分析

不同环境下光伏组件最佳工作点的输出功率曲线如图7所示。

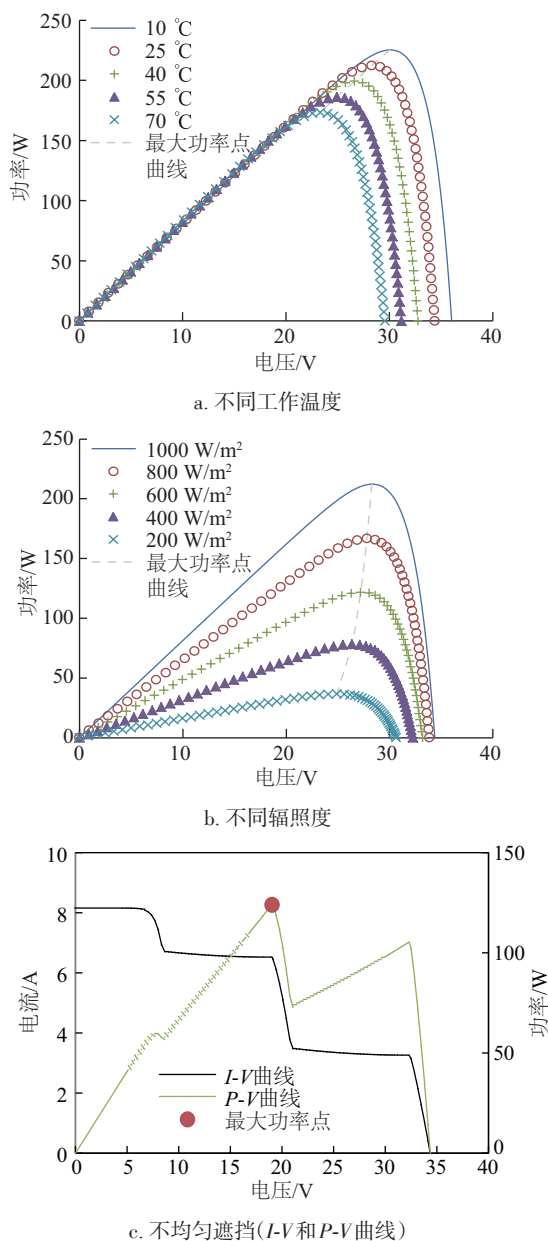


图7 不同环境下最大功率点曲线

Fig. 7 Maximum power point curve under different circumstance

5 结 论

本文根据太阳电池等效模型,列出其输出特性

的等效方程,运用泰勒公式进行降幂求解,使电池工作电流和工作电压之间的关系呈显性函数。在标准测试条件下对太阳电池和组件进行建模仿真,将仿真结果与实测结果进行对比,最佳工作点基本与厂家提供的参数重合,偏差度在2%以内,结果验证了模型的有效性和可行性。在此基础上建立太阳电池、组件和适用于任意遮不均匀光照和温度分布情况下光伏阵列的通用模型。仿真分析了不均匀工作温度、不均匀辐照度和不均匀遮挡情况下光伏组件的输出特性,为不同工作环境下的组件电性能评估提供参考依据,有益于降低光伏电站的运营成本,提高发电量等。

[参考文献]

- [1] Ishibashi K, Kimura Y, Niwano M. An extensively valid and stable method for derivation of all parameters of a solar cell from a single current-voltage characteristic[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(9): 455.
- [2] 胡庆焱, 王 冰, 张鹏飞, 等. 基于高斯-赛德尔迭代法的光伏电池参数辨识与最大功率点基准曲线的研究[J]. 可再生能源, 2015, 33(12): 1803—1808.
- [2] Hu Qingyi, Wang Bing, Zhang Pengfei, et al. Research on parameter solution algorithm and reference curve at maximum power point of photovoltaic cell based on Gauss-Seidel iteration[J]. Renewable Energy Resources, 2015, 33(12): 1803—1808.
- [3] Raj S, Sinha A, Panchal A K. Solar cell parameters estimation from illuminated $I-V$ characteristic using linear slope equation and Newton-Raphson technique [J]. Renewable of Sustainable Energy, 2013, 5(3): 401—404.
- [4] 段其昌, 周 华, 赵钦波, 等. 基于 Lambert W 函数的光伏阵列通用模型研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(5): 768—773.
- [4] Duan Qichang, Zhou Hua, Zhao Qinbo, et al. Research of the general model for PV array based on Lambert W-function[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2013, 34(5): 768—773.
- [5] Ortiz-Conde A, Garcia F J, Muci J. New method to extract the model parameters of solar cells from the explicit analytic solutions of their illuminated $I-V$ characteristics[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2006, 90: 352—361.

RESEARCH OF GENERAL MODEL FOR SOLAR CELL BASED ON TAYLOR FUNCTION

Deng Shifeng^{1,2}, Zhang Zhen^{1,2}, Wu Jun¹, Quan Peng²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China;

2. Technology Department, State Key Lab of PV Science and Technology, Trinasolar Co. Ltd., Changzhou 213031, China)

Abstract: The Taylor function is used to carry power reduction solution based on the equivalent circuit of solar cell, and make the relationship between the operating current and the operating voltage of the solar cell become a dominant function. Modeling and simulation of solar cells and PV modules under standard test condition are carried out; the simulation results are compared with the measured results, the maximum working point is basically coincident with the parameters provided by the manufacturer, and the degree of deviation is less than 2%, the results verify the validity and feasibility of the model. Based on this, the general model suitable for solar cell, PV module and PV array under non-uniform illumination and temperature distribution is established.

Keywords: Taylor function; solar cell modeling; non-uniform illumination; I - V characteristic