

doi:10.3788/gzxb20144311.1125002

全工况下光伏组件输出特性的预测建模与研究

肖文波,胡方雨,戴锦

(南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室,南昌 330063)

摘 要:在光生电流远大于二极管反向饱和电流,并联电阻为无穷大且二极管反向饱和电流与光强无关的假设条件下,理论上推导出全工况光伏组件输出特性预测模型,并采用 Matlab/Simulink 搭建了仿真系统.对单(多)晶硅光伏组件的实验与预测对比,表明模型可以准确预测组件在任意光强与温度下的输出特性,预测误差在 6% 以下.研究结果发现,相对于光强变化,温度变化对组件输出特性预测影响更大;多晶硅组件预测难于单晶硅组件.对实际环境中单位光强与单位温度实时改变时的预测表明,组件输出主要由所受辐照总光强决定,而不是器件温度;且需要根据外界情况调整组件的输出电压,以实现最大功率输出.

关键词:光伏组件;输出特性;仿真;预测模型;光强与温度

中图分类号:TM 615

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)11-1125002-7

Establishment and Research of a Photovoltaic Module Performance Prediction Model under Different Operating Conditions

XIAO Wen-bo, HU Fang-yu, DAI jin

(Key Laboratory of Nondestructive Testing (Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Assuming that the photocurrent is much larger than the diode reverse saturation current, shunt resistance is infinite and diode reverse saturation current is independent of light intensity, a performance prediction model of photovoltaic module under different operating conditions was proposed and a simulation system was built by using Matlab/Simulink programs. Through the comparison between computer simulations and experimental data for mono/poly crystalline silicon photovoltaic modules, it showed that the proposed model can accurately predict the photovoltaic modules output characteristics at different light intensities and temperatures, and the relative prediction error precisions were all below 6%. The results also reveal that temperature change has a greater impact on modules performance prediction than the light intensity, and it is harder to predict module performance of polycrystalline silicon than that of mono crystalline silicon. Moreover, the prediction results of photovoltaic modules performance in natural environment showed that the output characteristics of the modules are mainly determined by light intensity rather than by temperature. it is found that the output voltage of the modules should be varied when conditions of light intensities and temperatures change, in order to achieve the maximum output power.

Key words: Photovoltaic module; Output performance; Simulation; Prediction model; Light intensity and temperature

OCIS Codes: 250.0250; 040.5350; 230.4320; 000.3860

0 引言

随着大规模光伏发电系统容量的增加,为了避免

光伏发电输出功率固有的间歇性和波动性等缺点对电网的瞬间冲击,人们开始关注发电预测技术^[1].典型的预测技术是基于描述光伏组件电流电压输出特性的五

基金项目:江西省青年科学基金(No. 20143ACB21011)、江西省发明专利产业化技术示范基金(No. 20143BBM26116)、江西省自然科学基金(No. 20132BAB202003)和集成光电子学国家重点联合实验室开放课题(No. IOSKL2012KF14)资助

第一作者:肖文波(1975-),男,副教授,博士,主要研究方向为半导体物理及光伏发电. Email: xiaowenbo1570@163.com

收稿日期:2014-03-07; **录用日期:**2014-05-06

<http://www.photon.ac.cn>

参量(即光生电流、反向饱和电流、理想因子、并联电阻和串联电阻)模型,利用厂商提供的标准测试条件(Standard Test Condition, STC)下(即光强为 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$,温度为 $25\ ^\circ\text{C}$,AM 1.5)组件上四个测量数据(即短路电流、开路电压、最大功率点电流和电压)以及相应四个温度系数(即短路电流系数、开路电压系数、最大功率点电流系数和电压系数),预测全工况(即任意光强和温度)下组件发电^[2-3].但由于五参量模型中参量与光强等的关系十分复杂^[4-5],有研究基于假设条件(即并联电阻为无穷大^[6],或者忽略光强对理想因子的影响^[7])简化上述关系预测,结果表明精确不足,平均预测误差在 20.0% 以下^[8].为了进一步提高预测精度,有研究增加预测模型中参量,例如采用双指数二极管模型预测^[9].尽管该方法预测更精确,尤其是在低照度条件下,但增加了预测的复杂度.此外还有通过大量组件发电的实验数据,利用拟合模型预测^[10].显然大量实验结果下的预测更加精确,但时间成本高昂且不利于电站建设前的发电量估算.

因此,本文在光生电流远大于二极管反向饱和电流、并联电阻为无穷大且二极管反向饱和电流与光强无关的假设条件下,建立了全工况光伏组件输出特性预测模型,利用 Matlab/Simulink 搭建了仿真系统,并对单(多)晶硅光伏组件进行了实验与预测对比.

1 预测模型的建立以及误差判断标准

1.1 预测模型的建立

1.1.1 光伏组件五参量模型的简化

光伏组件是利用性能接近的单体太阳能电池串并联构成,其基本结构由恒流源、二极管、并联电阻和串联电阻组成,描述光伏组件电流电压输出特性的模型为^[11]

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

式中, I 为组件输出电流,单位:A; I_{ph} 为光生电流,单位:A; I_0 为二极管反向饱和电流,单位:A; V 为组件输出电压,单位:V; R_s 为等效串联电阻,单位: Ω ; n 为二极管理想因子; V_{th} 是热电压常数; R_{sh} 为等效并联电阻,单位: Ω .

在光生电流远大于二极管反向饱和电流的假设条件下^[12-13],式(2)化简为

$$\frac{I}{I_{\text{sc}}} = 1 - (1 - \gamma) \frac{V}{V_{\text{oc}}} - \gamma \left(\frac{V}{V_{\text{oc}}} \right)^\alpha \quad (2)$$

式中, I_{sc} 为组件短路电流,单位:A; V_{oc} 为组件开路电压,单位:V; γ 是衡量输出特性曲线中短路电流点处平整度因子, α 是衡量输出特性曲线中开路电压点处倾斜因子.

由式(1)和(2)在短路电流点处的导数相等^[14],可得

$$\gamma = 1 - \frac{V_{\text{oc}}}{I_{\text{sc}} R_{\text{sh}}} \quad (3)$$

当假设主要由复合电流影响的并联电阻为无穷大时^[15-16],即可得 $\gamma = 1$,则式(2)简化为

$$\frac{I}{I_{\text{sc}}} = 1 - \left(\frac{V}{V_{\text{oc}}} \right)^\alpha \quad (4)$$

将最大功率点处电压与电流(V_m, I_m)代入式(4)后求得 α ,则光伏组件电流电压输出特性简化模型为

$$\frac{I}{I_{\text{sc}}} = 1 - \left(\frac{V}{V_{\text{oc}}} \right)^{\ln(1 - I_m/I_{\text{sc}})/\ln V_m/V_{\text{oc}}} \quad (5)$$

由式(5)可知,当全工况下 $I_{\text{sc}}, V_{\text{oc}}, I_m, V_m$ 参数的确定后,就可以重现任意光强和温度的组件输出特性曲线.

1.1.2 全工况下光伏组件参数的确定

通常情况下,组件输出电流与光强成线性关系且随温度的升高而增大,而输出电压与光强成对数关系且随温度增加而减少^[17].因此,首先根据厂商提供的STC下四个测量数据短路电流 $I_{\text{sc-STC}}$ 、开路电压 $V_{\text{oc-STC}}$ 、最大功率点电流 $I_{\text{m-STC}}$ 和电压 $V_{\text{m-STC}}$,以及相应温度系数 a_1, b_1, a_2, b_2 ,建立全工况下 I_{sc}, I_m ^[18];然后,基于STC下开路电压公式以及二极管反向饱和电流与光强无关的条件^[19],推算出全工况下 V_{oc}, V_m 关系

$$I_{\text{sc}} = I_{\text{sc-STC}} \frac{S}{S_{\text{STC}}} (1 + a_1 \Delta T) \quad (6)$$

$$I_m = I_{\text{m-STC}} \frac{S}{S_{\text{STC}}} (1 + a_2 \Delta T) \quad (7)$$

$$V_{\text{oc}} = \frac{1}{\frac{1}{V_{\text{oc-STC}}} \ln \left[\frac{1 + \left(\left(\frac{I_{\text{sc-STC}} - I_{\text{m-STC}}}{I_{\text{sc-STC}}} \right)^{V_{\text{oc-STC}}/(V_{\text{oc-STC}} - V_{\text{m-STC}})} \right)}{\left(\left(\frac{I_{\text{sc-STC}} - I_{\text{m-STC}}}{I_{\text{sc-STC}}} \right)^{V_{\text{oc-STC}}/(V_{\text{oc-STC}} - V_{\text{m-STC}})} \right)} \right]} \cdot \ln \left[\frac{S}{\left(\left(\frac{I_{\text{sc-STC}} - I_{\text{m-STC}}}{I_{\text{sc-STC}}} \right)^{V_{\text{oc-STC}}/(V_{\text{oc-STC}} - V_{\text{m-STC}})} \right) S_{\text{STC}}} + 1 \right] \cdot (1 + b_1 \Delta T) \quad (8)$$

$$V_m = \frac{1}{\frac{1}{V_{\text{oc-STC}}} \ln \left[\frac{1 + \left(\left(\frac{I_{\text{sc-STC}} - I_{\text{m-STC}}}{I_{\text{sc-STC}}} \right)^{V_{\text{oc-STC}}/(V_{\text{oc-STC}} - V_{\text{m-STC}})} \right)}{\left(\left(\frac{I_{\text{sc-STC}} - I_{\text{m-STC}}}{I_{\text{sc-STC}}} \right)^{V_{\text{oc-STC}}/(V_{\text{oc-STC}} - V_{\text{m-STC}})} \right)} \right]} \cdot \ln \left[\left(I_{\text{sc-STC}} \frac{S}{S_{\text{STC}}} + \left(\left(\frac{I_{\text{sc-STC}} - I_{\text{m-STC}}}{I_{\text{sc-STC}}} \right)^{V_{\text{oc-STC}}/(V_{\text{oc-STC}} - V_{\text{m-STC}})} \right) I_{\text{sc-STC}} - I_{\text{m-STC}} \frac{S}{S_{\text{STC}}} \right) / \left[\left(\left(\frac{I_{\text{sc-STC}} - I_{\text{m-STC}}}{I_{\text{sc-STC}}} \right)^{V_{\text{oc-STC}}/(V_{\text{oc-STC}} - V_{\text{m-STC}})} \right) I_{\text{sc-STC}} \right] \right] \cdot (1 + b_2 \Delta T) \quad (9)$$

式中 S 为实际光强,单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; ΔT 为电池实际温度与STC下温度的差值.

由建立的模型可看出,将STC下四个测量数据以及相应的温度系数代入式(6)~(9),就可以获得全工况下的 $I_{\text{sc}}, V_{\text{oc}}, I_m, V_m$ 值,结合式(5),可以预测任意光强和温度下的光伏组件输出特性.

1.2 误差判断标准

为了验证模型的精确性,定义了两种误差^[20],分别为电流相对误差(式(11))和均方根误差(式(12)).

$$e_i = \frac{|I_{s,i} - I_{c,i}|}{I_{s,i}} \times 100\% \quad (11)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_{s,i} - I_{c,i})^2} \quad (12)$$

式中 $I_{s,i}$ 为测量的第 i 个电流数据, $I_{c,i}$ 为模型计算的第 i 个电流数据, N 为采样点个数.

2 仿真系统的搭建与结果分析

2.1 仿真系统的搭建

基于预测模型,采用 Matlab/Simulink 工具,建立了光伏组件输出特性预测系统,如图 1,图中 T 、 S 、 V_p 、 I 、 V 分别为温度、光强、工作电压、输出电流以及电压.在仿真模块中封装了 S_{STC} 、 T_{STC} 、 $I_{\text{sc-STC}}$ 、 $V_{\text{oc-STC}}$ 、 $I_{\text{m-STC}}$ 、 $V_{\text{m-STC}}$ 、 a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 数据.用户可通过点击图 1(a)所示的图标,得出图 1(b)交互界面,方便地设置参数.

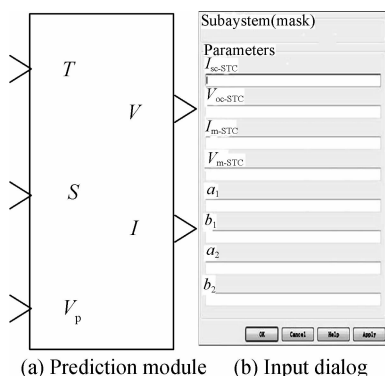


图 1 预测光伏组件输出特性仿真系统

Fig. 1 PV module output characteristics simulation system

2.2 结果分析

为了验证模型,对 Upsolar 公司提供的 UP-M200M-B(UP-M280P)型单(多)晶硅光伏组件的输出

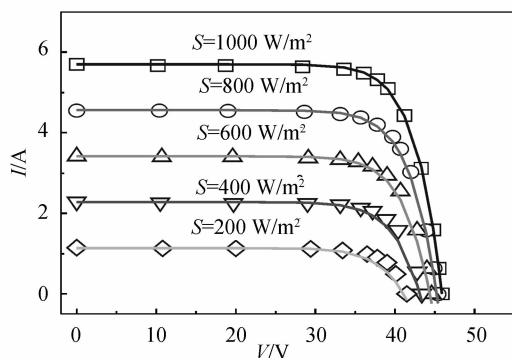
特性进行了仿真与实验对比研究,组件参量如表 1.

表 1 组件参量

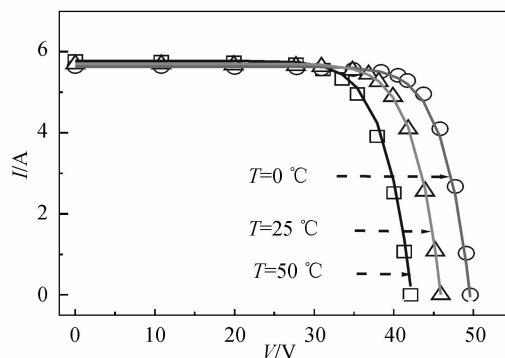
Table 1 modules parameters

Model	UP-M200M-B	UP-M280P
Short-circuit current($I_{\text{sc-STC}}/A$)	5.6	8.35
Open-circuit voltage($V_{\text{oc-STC}}/V$)	45.9	44.8
Max power current($I_{\text{m-STC}}/A$)	5.41	7.95
Max power voltage($V_{\text{m-STC}}/V$)	37	35.2
Temperature coefficients of $I_{\text{sc}}(\%/^{\circ}\text{C})$	0.05	0.05
Temperature coefficients of $V_{\text{oc}}(\%/^{\circ}\text{C})$	-0.32	-0.32
Temperature coefficients of $I_{\text{m}}(\%/^{\circ}\text{C})$	-0.02	-0.02
Temperature coefficients of $V_{\text{m}}(\%/^{\circ}\text{C})$	-0.42	-0.42

图 2 是不同光强和温度下单(多)晶硅组件的预测结果与实验数据对比.从图 2 可以看出,当温度和光强变化时,预测曲线与测量数据总体吻合较好.但是从图 2(a)和(c)的对比中,可以看出不同光照的预测曲线与测量数据之间偏差是不一样的.光强为 S_{STC} 时,误差最小;随着光强减弱,偏差增大;且在同一光强下,预测曲线与测量数据之间偏差随着电压的增大而增加,尤其是从最大功率点处到接近开路电压时.从图 2(b)和(d)对比中可以看出不同温度的预测曲线与测量数据之间偏差也是不一样的,且仅在 T_{STC} 下预测曲线与测量数据之间偏差最小.这些是由于预测模型忽略了并联电阻对组件的影响,所以预测与实验之间存在误差;且预测是基于 STC 下数据,所以 STC 下的输出特性预测最准确,结论与已有研究一致^[21].进一步,由于预测模型在确定全工况下组件 V_{oc} 、 V_{m} 的时候,忽略了光强对二极管反向饱和电流的影响,从而导致同一光强下最大功率点处电压至开路电压时预测值偏小.



(a) Comparison of monocrystalline under T_{STC}



(b) Comparison of monocrystalline under S_{STC}

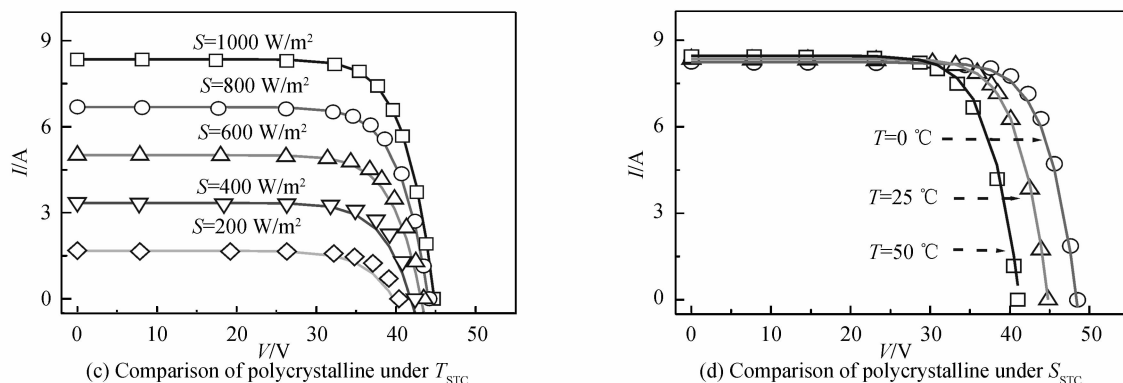


图 2 不同光强和温度下单(多)晶硅组件的预测结果(实线)与实验数据(方框符号等)对比

Fig. 2 Comparison between prediction results (solid line) and experimental data (block symbols etc) of mono (poly) crystalline silicon modules under different temperatures and light intensities

图 3 是不同光强和温度下电流相对误差随电压的变化. 从图 3 可以看出, 在光强和温度变化时, 仅在 STC 下的电流绝对误差最小, 结论与图 2 所得一致; 且电流相对误差随电压的增加而逐步增大. 原因是随着电压的增大, 并联电阻受光强和温度的影响显著增加, 从而导致忽略它们的情况下建立的模型预测误差增加^[22]. 对比图 3 (a)与(c)以及图 3 (b)与(d)的结果, 发

现在相同光强和温度条件下, 多晶硅组件的平均电流相对误差都要比单晶硅组件的大. 原因可能是多晶硅组件存在的缺陷比较多, 因此其非线性特征受光强和温度的影响比较剧烈, 从而影响预测的准确性. 这也说明复杂光伏器件的输出特性预测较难. 值得注意的是, 各个条件下电流相对误差都在 6% 以下.

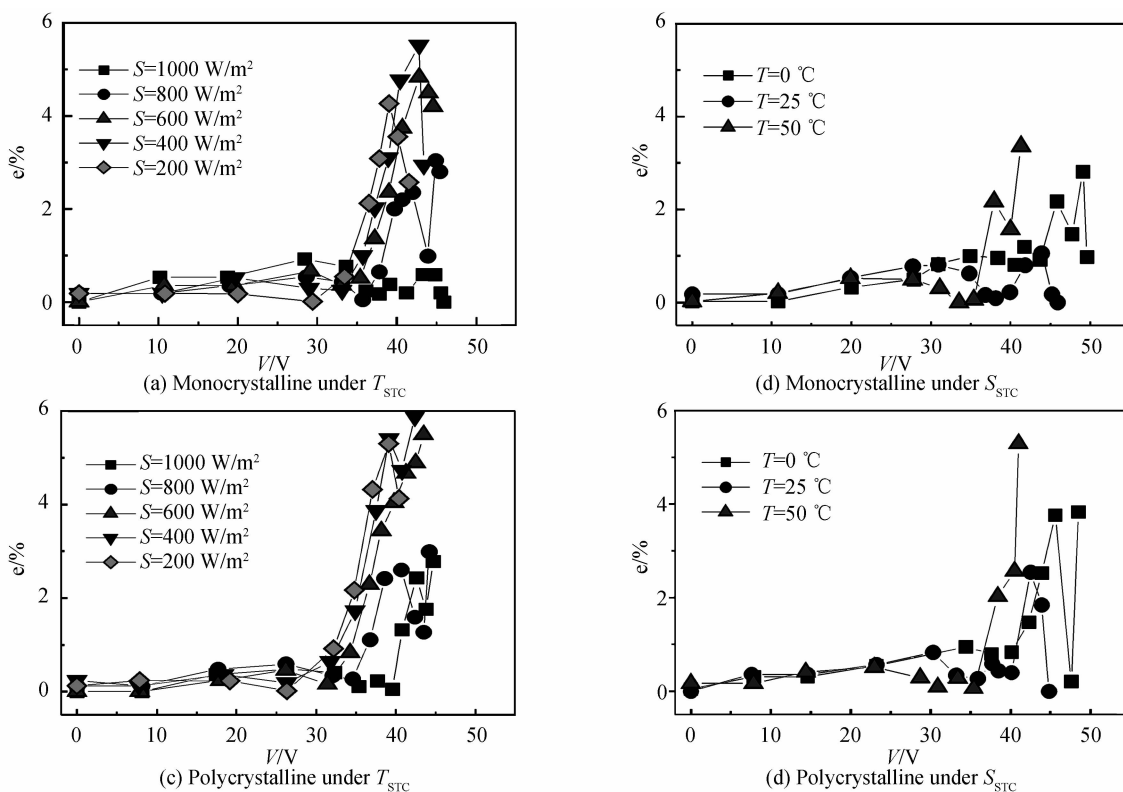


图 3 不同光强和温度下电流相对误差随输出电压的变化

Fig. 3 The relative prediction error precisions change with bias voltage under different temperatures and light intensities

为了进一步判断预测曲线与实验数据的整体拟合精确性, 光强和温度影响的均方根误差见图 4. 从图 4 可以看出, 仅在 STC 下单(多)晶硅组件的 RMSE 值最小, 且单晶硅组件的 RMSE 值都比多晶硅组件的要

小. 注意到, 当光强变化 1 W/m^2 时, 单晶硅组件的 RMSE 值平均变化了大约 0.0003985 A ; 而当温度变化 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 其 RMSE 值平均变化了大约 0.0016 A . 这说明相比较于单位光强的变化, 单位温度的变化对组

件输出特性预测影响更大. 同样的结论也出现在多晶硅组件中.

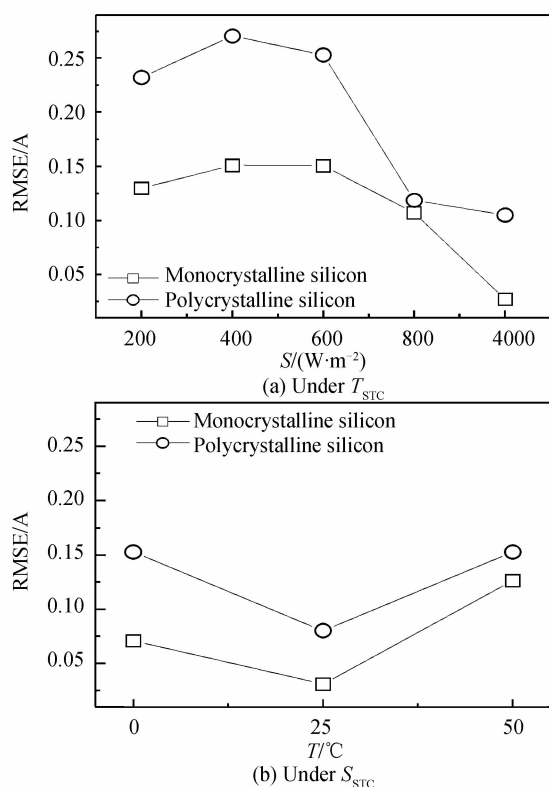


图4 均方根误差随光强和温度的变化

Fig. 4 The root-mean-square errors change with temperatures and light intensities

3 实际环境中光伏组件输出特性预测结果与分析

因为实际环境中光强和温度都会实时改变,因此基于预测模型仿真研究了单(多)晶硅组件输出功率(P)随时间的变化以及输出总功率(P_{tot})随输出电压的变化. 通常认为一天中环境温度变化为正弦分布,环境光强变化为高斯分布. 环境温度变化的正弦分布为^[23]

$$T_{air} = \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \sin\left(\frac{\pi}{12}t - \frac{2}{3}\pi\right) + \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (10)$$

式中 T_{air} 为环境温度; T_{max} 为一天中最大温度,这里假设为 $20^\circ C$; T_{min} 为一天中最小温度,这里假设为 $12^\circ C$; t 为时间, $0 \leq t \leq 24$.

考虑环境温度之后,组件实际表面温度可表示为^[24]

$$T' = T_{air} + \beta H \quad (11)$$

式中 H 为外界光强; β 为常数,一般取 $0.03 (^\circ C m^2)/W$.

忽略遮阴情况,一天当中环境光强的变化可以认为是组件接受的光强,定义为^[25]

$$H = H_{max} \exp\left(\frac{-(t-t_c)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (12)$$

式中 $H_{max} = 1000 W \cdot m^{-2}$ 为最大光强; $t_c = 12$ 为时间常数; $\sigma = 0.5$ 为常数.

图5是一天中光强、温度以及组件输出功率的变化. 从图5(a)可知,光强和温度的变化都存在一个峰值,且峰值位置并不在同一时刻. 对比图5(a)~(c),可以看出,12:00时,无论在任何输出电压下,单(多)晶硅组件输出功率都存在一个峰值,且峰值的位置与此刻最大光强位置相同. 这说明组件的输出特性主要由所受辐照总光强决定,而不是器件温度. 特别注意的是,单(多)晶硅组件的输出功率峰值也随输出电压的变化而变化,单晶硅组件的输出功率峰值大约在 $35 V$ 左右最大,而多晶硅组件大约在 $33 V$ 左右.

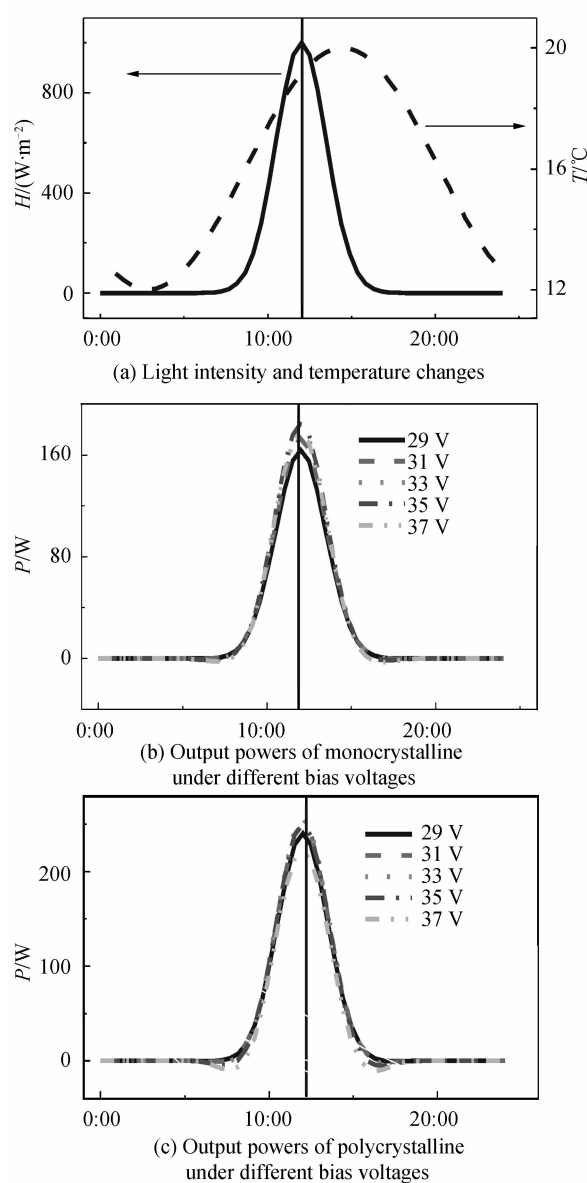


图5 一天中组件上光强、温度以及输出功率的变化
Fig. 5 Changes of light intensities, modules temperature and output power in a day

图6是单晶与多晶硅组件在不同输出电压下的输出总功率. 从图中可知,在不同的输出电压下,组件输

出总功率是不同的,原因是当输出电压改变的时候,影响了组件的工作效率;且发现单晶硅组件在输出电压为 33 V 时,存在一个最大的输出总功率;而对于多晶硅组件最大输出总功率却是在 35 V,与图 5 讨论结果一致.所以,为了提高光伏组件的输出效率,需要根据外界条件调整组件的输出电压,以便实现最大功率输出.

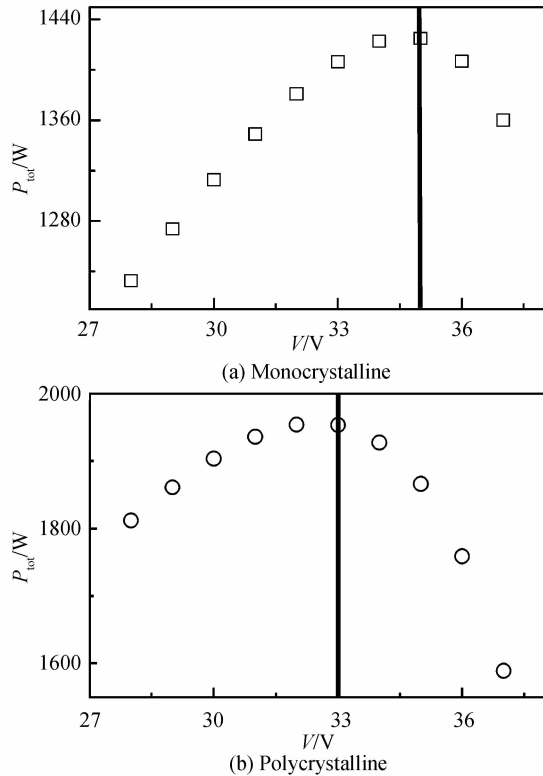


图 6 单晶与多晶硅组件不同输出电压下的输出总功率
Fig. 6 Changes of output total powers of mono (poly) crystalline silicon modules with bias voltages

4 结论

本文基于光生电流远大于二极管反向饱和电流、并联电阻为无穷大以及二极管反向饱和电流与光强无关的假设条件,理论上建立了全工况光伏组件输出特性预测模型,并利用 Matlab/Simulink 搭建了仿真系统.对单(多)晶硅光伏组件的实验与预测对比,表明模型可以准确预测组件在任意光强与温度下的输出特性,预测误差在 6% 以下.研究结果还发现,相对于单位光强的变化,单位温度的变化对组件输出特性预测影响更大;且多晶硅组件预测难于单晶硅组件.对实际环境中光强和温度实时改变时的预测表明,组件输出主要由所受辐照总光强决定,而不是器件温度;且需要根据外界环境调整组件的输出电压,以实现最大功率输出.本研究对于光伏发电系统设计具有一定参考价值.

参考文献

- [1] PARIDA B, INIYAN S, GOIC R. A review of solar photovoltaic technologies [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, **15**(3):1625-1636.
- [2] SALMI T, BOUZGUENDA M, GASTLI A, et al. Matlab/Simulink based modelling of solar photovoltaic cell [J]. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2012, **2**(2):213-218.
- [3] AHMED A E T. PV system behavior based on datasheet [J]. *Journal of Electron Devices*, 2011, **9**:335-341.
- [4] ZHOU Jian, LI Hong-fei, LIU Yu-cheng et al. A comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic module under natural environment [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(9):1077-1082.
周健,李红飞,刘毓成,等.基于改进型双二极管模型的户外模组电量预测技术研究[J]. *光子学报*, 2013, **42**(9):1077-1082.
- [5] DEZSO S, REMUS T, PEDRO R. PV panel model based on datasheet values [C]. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2007, 2392 - 2396.
- [6] ALTAS I H, SHARAF A M. A photovoltaic array simulation model for Matlab-Simulink GUI environment [C]. *International Conference on Clean Electrical Power*, 2007, 341 - 345.
- [7] TSAI H F, TSAI H L. Implementation and verification of integrated thermal and electrical models for commercial PV modules[J]. *Solar Energy*, 2012, **86**(1):654-665.
- [8] CUI Yang, SUN Yin-chuan, CHANG Zhuo-lin. A review of short-term solar photovoltaic power generation prediction methods [J]. *Resources Science*, 2013, **35**(7):1474-1481.
崔洋,孙银川,常倬林.短期太阳能光伏发电预测方法研究进展[J]. *资源科学*, 2013, **35**(7):1474-1481.
- [9] ISHAQUE K, SALAM Z, TAHERI H. Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, **95**(2):586-594.
- [10] TSANG K M, CHAN W L. Model based rapid maximum power point tracking for photovoltaic systems [J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, **70**:83-89.
- [11] WANG Yu-ling, SUN Yi-ze, PENG Le-le, et al. Parameter extraction or photovoltaic module based on Lambert-W function[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(24):248402-1-248402-6.
王玉玲,孙以泽,彭乐乐,等.基于 Lambert W 函数的太阳能电池组件参数确定法[J]. *物理学报*, 2012, **61**(24):248402-1-248402-6.
- [12] DAS A K, KAMALKAR S. Analytical derivation of the closed-form power law - model of an illuminated solar cell from the physics based implicit model [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2011, **58**(4):1176-1181.
- [13] KAMALKAR S, SALEEM H. The power law J-V model of an illuminated solar cell [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, **95**(4):1076-1084.
- [14] KAMALKAR S, HANEEFA S. A physically based explicit - model of a solar cell for simple design calculations [J]. *Electron Device Letters*, 2008, **29**(5):449-451.
- [15] KIM W, CHOI W. A novel parameter extraction method for the one-diode solar cell model [J]. *Solar Energy*, 2010, **84**(6):1008-1019.
- [16] KHAN F, SINGH S N, HUSAIN M. Effect of illumination intensity on cell parameters of a silicon solar cell [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2010, **94**(9):1473-1476.
- [17] SINGER S, ROZENSHTEN B, SURAZI S. Characterization of PV array output using a small number of measured

- parameters[J]. *Solar Energy*, 1984, **32**(5): 603-607.
- [18] LIAO Zhi-ling, RUAN Xin-bo. Non-linear engineering simplification model of silicon solar cells in arbitrary solar radiation and temperature[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2009, **30**(4): 430-435.
廖志凌,阮新波.任意光强和温度下的硅太阳能电池非线性工程简化数学模型[J].*太阳能学报*,2009,**30**(4):430-435.
- [19] SOTO W D, KLEIN S A, BECKMAN W A. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance [J]. *Solar Energy*, 2006, **80**(1): 78-88.
- [20] GHANI F, DUKE M, CARSON J. Numerical calculation of series and shunt resistance of a photovoltaic cell using the Lambert W-function; experimental evaluation [J]. *Solar Energy*, 2013, **87**: 246-253.
- [21] KASHIF I, ZAINAL S, SYAFARUDDIN. A comprehensive MATLAB simulink PV system simulator with partial shading capability based on two-diode model [J]. *Solar Energy*, 2011, **85**: 2217-2228.
- [22] PENG Le-le, SUN Yi-ze, MENG Zhuo, *et al.* A new method for determining the characteristics of solar cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, **227**: 131-136.
- [23] JIANG Hui-fei, WEN De-yong Y, LI Nan, *et al.* A new simulation method for the diurnal variation of temperature-sub-sine simulation[J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 2010, **33**(003): 61-65.
姜会飞,温德永,李楠等.利用正弦分段法模拟气温日变化[J].*气象与减灾研究*,2010,**33**(003):61-65.
- [24] VENGATESH R P, RAJAN S E. Investigation of cloudless solar radiation with PV module employing Matlab - Simulink [J]. *Solar Energy*, 2011, **85**(9): 1727-1734.
- [25] TSAI H L, TU C S, SU Y J. Development of generalized photovoltaic model using MATLAB/SIMULINK [C]. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*. 2008, 1-6.