

# 基于动态环境变量的太阳电池模型研究

张 彦<sup>1~3</sup>, 袁成清<sup>1~3</sup>

(1. 武汉理工大学能源与动力工程学院 可靠性工程研究所, 武汉 430063; 2. 武汉理工大学船舶动力工程技术交通行业重点实验室, 武汉 430063; 3. 武汉理工大学国家水运安全工程技术研究中心, 武汉 430063)

**摘 要:** 为研究动态环境变量与太阳电池输出特性的关系,在分析太阳电池工程数学模型的基础上,根据 MPPT 算法和电池外特性,提出 2 种新的电池模型表征思路。建立动态环境变量与开路电压  $U_{oc}$ 、短路电流  $I_{sc}$ 、最大功率点电压  $U_m$ 、最大功率点电流  $I_m$  和最大功率点功率  $P_m$  这 5 个太阳电池输出特性参数之间的联系,并在 Matlab/Simulink 平台上搭建对应的仿真模型。同时,通过温度变化对太阳电池输出特性影响的试验,说明模型的有效性。试验结果表明基于 MPPT 算法的太阳电池模型相较于基于外特性的仿真模型计算结果误差率更低,但计算过程更复杂。

**关键词:** 动态环境; 太阳电池; 仿真模型; 输出特性

**中图分类号:** TM615

**文献标识码:** A

## 0 引 言

太阳电池是光伏发电的核心部件和整个发电系统的能源供给站,一直以来是该领域的研究重点。由于在研究环境因素变化与太阳电池输出特性之间影响关系的过程中,采用真实的太阳电池成本会很高,也不易分析各因素之间的关系,故仿真研究被广泛采用<sup>[1,2]</sup>。

精确的太阳电池工程数学模型被认为是光伏发电仿真研究的基础,有利于对整个光伏发电系统进行优化设计,可缩短研发周期,提高系统的可靠性和总体效率<sup>[3]</sup>。而常用的太阳电池单体二极管等效电路模型方程是建立在光伏效应与 p-n 特性之上的非线性模型,难以计算闭式解,通常采用数值迭代法求解模型参数。同时为了简化计算过程,也有根据太阳电池的输出特性,对输出特性曲线的数学方程作近似处理,并根据太阳电池短路电流及开路电压等参数得到相应的输出特性表达式<sup>[4~7]</sup>。但通用的太阳电池工程数学模型均为无解析解的超越方程,不能直接用来计算电池每小时的输出,因此难以用来表征动态环境变量与输出特性之间的影响关系<sup>[8]</sup>。

本文根据 MPPT 算法和电池外特性,提出 2 种新的太阳电池工程数学模型表征思路。建立动态环境变量与开路电压  $U_{oc}$ 、短路电流  $I_{sc}$ 、最大功率点电压  $U_m$ 、最大功率点电流  $I_m$  和最大功率点功率  $P_m$  这 5 个太阳电池输出特性参数之间的联系,并在 Matlab/Simulink 平台上搭建对应的仿真模型。以期研究环境因素变化对太阳电池输出特性的影响提供理论基础。

## 1 动态环境因素与输出特性的影响关系

通用的太阳电池工程数学模型,如式(1)所示<sup>[9]</sup>,可发现太阳电池组件的  $I-V$  特性强烈地随辐照度  $S$  和较强烈地随电池温度  $T$  而变化,即太阳能电池输出电流  $I=f(V, S, T)$ 。因此认为温度、辐照度为直接影响太阳电池输出特性的外界环境因素,而其他环境因素主要是通过改变电池温度或者接收到的辐照度来间接影响其输出特性。因此,动态环境因素与输出特性对应关系的研究重点就是探求动态温度以及辐照度对输出特性的影响。

收稿日期: 2016-04-26

基金项目: 工信部高技术船舶专项(工信部联装[2012]540号); 国家科技支撑计划(2014BAG04B01)

通信作者: 张 彦(1989—), 男, 博士、实验师, 主要从事水环境下的表面技术研究。zhangyant1223@163.com

$$\begin{cases} I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(U + IR_s)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \\ I_{ph} = I_{sc-ref} \cdot \frac{S}{S_{ref}} [1 + a(T - T_{ref})] \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $I_{ph}$  ——与辐照度成正比的光生电流, A;  $I_{sc}$  ——太阳电池短路电流, A;  $T$  ——太阳电池实际温度, K;  $T_{ref}$  ——太阳电池参考温度, K;  $I_0$  ——反向饱和电流, 数量级为  $10^{-4}$  A;  $q$  ——电子电荷,  $1.6 \times 10^{-19}$  C;  $k$  ——玻尔兹曼常数,  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K;  $A$  ——p-n 结理想因子,  $1 \leq A \leq 2$ ;  $R_{sh}$  ——太阳电池并联电阻,  $\Omega$ ;  $R_s$  ——太阳电池串联电阻,  $\Omega$ ;  $S$  ——实际辐照度,  $W/m^2$ ;  $S_{ref}$  ——参考辐照度,  $W/m^2$ ;  $a$  ——短路电流温度系数,  $^{\circ}C^{-1}$ 。

## 2 太阳电池建模

### 2.1 基于 MPPT 算法的太阳电池模型

通用的太阳电池工程数学模型不能完全用来

表征温度、辐照度与输出特征参数之间随时间变化的关系。但由太阳电池在不同的光照、温度条件下输出的  $P$ - $V$  特性可知, 其输出功率会随着温度和辐照度的变化而变化; 在一定的温度和辐照度下其输出功率会随着工作点的变化而变化且存在最大功率点, 而最大功率点在当前环境条件下是唯一的。同时由于要充分利用光能发电, 光伏发电系统通常都需要采用最大功率追踪 (MPPT) 控制。因此本文提出基于 MPPT 算法, 建立动态温度和辐照度与最大功率点  $P_m$  之间的对应关系, 来表征动态环境变量对太阳电池输出特性的影响。

最常用的 MPPT 算法有扰动观测 (P & O) 法和电导增量 (INC) 法, 扰动观测方法又称爬山法, 算法流程简单, 需要测量的参数较少, 容易实现; 电导增量法在外界环境因素发生快速变化时, 算法的跟踪速度和精度都很高<sup>[10]</sup>。本文选取扰动观测 (P & O) 法作为 MPPT 算法, 根据太阳电池输出特性数学模型与最大功率追踪控制线路, 在 Matlab/Simulink 平台上搭建仿真模型, 如图 1 所示。

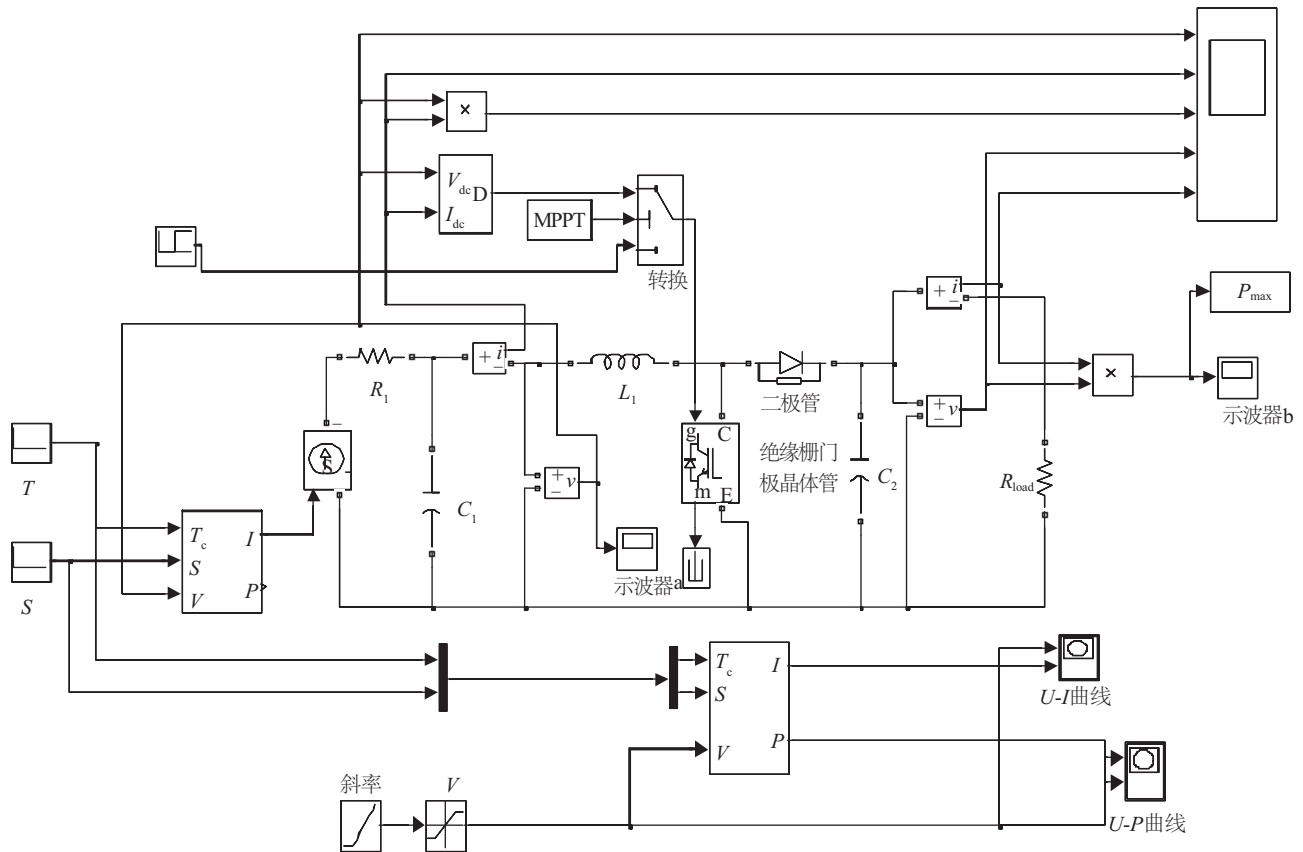


图1 基于MPPT算法的太阳电池模型

Fig. 1 Solar cell model based on MPPT algorithm

该模型有效表征了动态温度和辐照度与对应环境下的最大功率点功率  $P_m$  之间的影响关系,从而可根据温度和辐照度的变化曲线得到太阳电池输出的变化规律。本文所建立的太阳电池模型也可通过采用不同的 MPPT 算法,来满足不同的精度与运算速度要求。

## 2.2 基于外特性的太阳电池模型

基于 MPPT 算法的太阳电池模型的仿真过程较为复杂,同时仅能得到  $P_m$  这一个输出特性参数,因此本文提出另一种基于外特性的太阳电池模型。

式(1)所表征的太阳电池工程数学模型中的参数  $I_{ph}$ 、 $I_{sh}$ 、 $R_{sh}$ 、 $R_s$ 、 $A$  属于太阳电池的内部参数,与电池温度和辐照度有关,确定十分困难,不便应用于工程实际。通常根据太阳电池的外特性,对电路模型进行简化处理,引入 2 个中间修正系数  $C_1$  和  $C_2$ ,得到工程实用数学模型,如式(2)所示。

$$\begin{cases} I = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[ \exp\left(\frac{U}{C_2 U_{oc}}\right) - 1 \right] \right\} \\ C_1 = \left( 1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \cdot \exp\left(\frac{-U_m}{C_2 U_{oc}}\right) \\ C_2 = \left( \frac{U_m}{U_{oc}} - 1 \right) \cdot \left[ \ln\left( 1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right]^{-1} \end{cases} \quad (2)$$

该模型仅需要通过太阳电池供应商提供的四个重要技术参数  $U_{oc}$ 、 $I_{sc}$ 、 $U_m$  和  $I_m$  就能在一定的精度下得到太阳电池的输出特性。考虑实际运行环境中辐照度和外界环境温度的变化,在工程应用中需根据条件的变化情况对太阳电池输出电压和电流的变化量进行修正,如式(3)所示。

$$\begin{cases} I = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[ \exp\left(\frac{U - \Delta U}{C_2 U_{oc}}\right) - 1 \right] \right\} + \Delta I \\ \Delta U = -\beta \cdot U_{oc} (T - T_{ref}) - R_s \cdot \Delta I \\ \Delta I = I_{sc-ref} \left[ \alpha \cdot \frac{S}{S_{ref}} (T - T_{ref}) + \left( \frac{S}{S_{ref}} - 1 \right) \right] \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\alpha$ 、 $\beta$  ——标准测试环境下太阳电池的电流变化温度系数和电压变化温度系数。

在任意环境条件下,除可对工程实用数学模型进行修正外,技术参数  $U_{oc}$ 、 $I_{sc}$ 、 $U_m$  和  $I_m$  也会按一定规律发生变化;通过引入相应的补偿系数,可得出任意温度和辐照度下的 4 个参数值,如式(4)所示。

$$\begin{cases} I_{sc} = I_{sc-ref} \cdot \frac{S}{S_{ref}} [1 + a(T - T_{ref})] \\ U_{oc} = U_{oc-ref} [1 - c(T - T_{ref})] \cdot \ln[e + b(S - S_{ref})] \\ I_m = I_{m-ref} \cdot \frac{S}{S_{ref}} [1 + a(T - T_{ref})] \\ U_m = U_{m-ref} [1 - c(T - T_{ref})] \cdot \ln[e + b(S - S_{ref})] \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  ——补偿系数<sup>[11]</sup>,均为常数。根据大量实验数据拟合,典型值为  $a = 0.0025 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $b = 0.0005$ ,  $c = 0.00288 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

由于根据任意环境条件下得到的  $U_{oc}$ 、 $I_{sc}$ 、 $U_m$  和  $I_m$ ,通过式(2)可唯一确定所对应的太阳电池输出特性数学表达式<sup>[12]</sup>。因此本文提出基于式(4),建立动态温度和辐照度与参数  $U_{oc}$ 、 $I_{sc}$ 、 $U_m$  和  $I_m$  之间的对应关系来表征动态环境变量对太阳电池输出特性的影响,在 Matlab/Simulink 平台上搭建仿真模型,如图 2 所示。图中  $S_{new}$  为实际辐照度,  $T_{new}$  为实际太阳电池温度,  $I_{sc-new}$  为变化后短路电流,  $I_{m-new}$  为变化后最大功率点电流,  $U_{oc-new}$  为变化后开路电压,  $U_{m-new}$  为变化后最大功率点电压,  $P_{m-new}$  为变化后最大功率点功率。

## 3 试验及分析

本文通过温度变化与太阳电池输出特性关系的试验,进一步说明所搭建的 2 种太阳电池模型在研究动态环境变量对输出特性影响方面的有效性。

### 3.1 试验方案

试验以型号为 GH-10W 的太阳电池为研究对象,其规格参数如表 1 所列,同时根据表 1 参数调整仿真模型的相关设定值。试验条件模拟太阳电池在水域环境工作过程中水附着在电池表面的情况。国内外研究表明附着于太阳电池表面的水能够起到很好的降温作用,而其对于太阳光的吸收和反射作用相对较弱<sup>[13~15]</sup>。

本文试验在辐照强度为  $355 \text{ W/m}^2$  的人造太阳光源照射下,通过 PROVA210 太阳能模组测试仪与 GM700 红外测温仪,测定试验用太阳电池在水附着前后的输出特性参数和温度参数变化情况,测定周期为 2 min。依据测得的温度参数变化值进行仿真计算,所得仿真数据与测试数据进行对比分析。本文试验只关注温度变化对于仿真模型有效性的影响,并不关注温度对于太阳电池输出特性的影响规律探究。

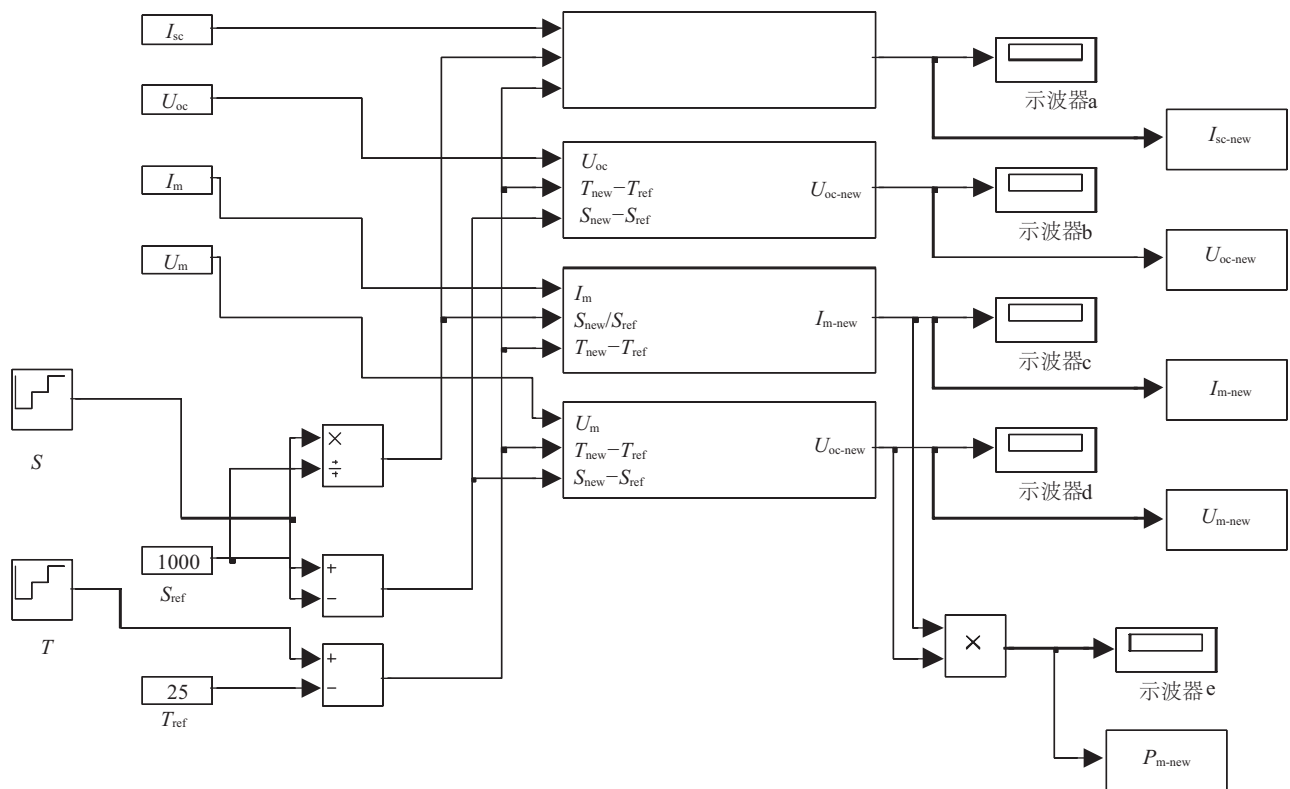


图2 基于外特性的太阳能电池模型

Fig. 2 Solar cell model based on external characteristic

表1 太阳能电池组件标称技术参数				
Table 1 Technical data of PV modules				
$P/W$	$V_{oc}/V$	$I_{sc}/A$	$V_m/V$	$I_m/A$
10	21.6	0.67	17.6	0.57

3.2 结果分析

试验测定数据如表 2 所示,其中 6 min 后电池表面有水附着。根据测得的温度参数  $T$  的变化情况,利用基于 MPPT 算法的太阳能电池模型和基于外特性的太阳能电池模型分别进行仿真计算。仿真结果与实测数据进行对比,如图 3 所示。

根据表 2 可知,附着于太阳能电池表面的水具有较好的降温作用,使得电池温度有明显的下降。基于温度的变化规律,由图 3a~图 3d 的仿真结果仅来自于基于外特性的太阳能电池模型,图 3e 的仿真结果来自于基于外特性的太阳能电池模型和基于 MPPT 算法的太阳能电池模型)可知,仿真结果显示降温使得最大功率点随之上升,开路电压变大,变化趋势与实测结果相同。仿真与实测的对比结果说明本文所搭建的仿真模型能较好地显示动态环境变量对太阳能电池输出特性的影响情况。

表2 输出特性实测数据								
Table 2 Measured data of output characteristic								
参数	0 min	2 min	4 min	6 min	8 min	10 min	12 min	14 min
$V_{open}/V$	18.821	18.769	18.756	18.756	19.042	19.218	19.240	19.180
$I_{short}/A$	0.234	0.229	0.226	0.225	0.217	0.220	0.223	0.214
$V_{max}/V$	13.585	13.757	13.752	13.832	14.287	14.316	14.300	14.220
$I_{max}/A$	0.193	0.191	0.187	0.186	0.181	0.184	0.184	0.184
$P_{max}/W$	2.622	2.621	2.566	2.568	2.581	2.630	2.631	2.616
$T/^{\circ}C$	48.20	48.27	48.70	48.73	36.43	37.27	37.30	38.27

进一步分析图3可发现,仿真结果与实测结果在数值的重合度上还存在一定误差,本文认为这主要是因为仿真模型的建立需引入补偿系数,而准确的补偿系数较难获得,从而导致其输出结果有所失真。同时根据图3e,基于MPPT算法的太阳电池模型所得仿真结果与实测结果相比的误差率( $\approx 2\%$ )小于基于外特性的太阳电池模型( $\approx 8\%$ )的对应值,可能是由于基于外特性的仿真模型是一种较为理想的电路模型,部分影响因素被简化,例如该模型假设太阳电池内部的等效串联内阻是固定的,即只计算出标准条件下的等效串联内阻。在计算过程中基于MPPT算法的太阳电池模型相较于基于外特性的仿真模型计算过程会更为复杂,同时该模型

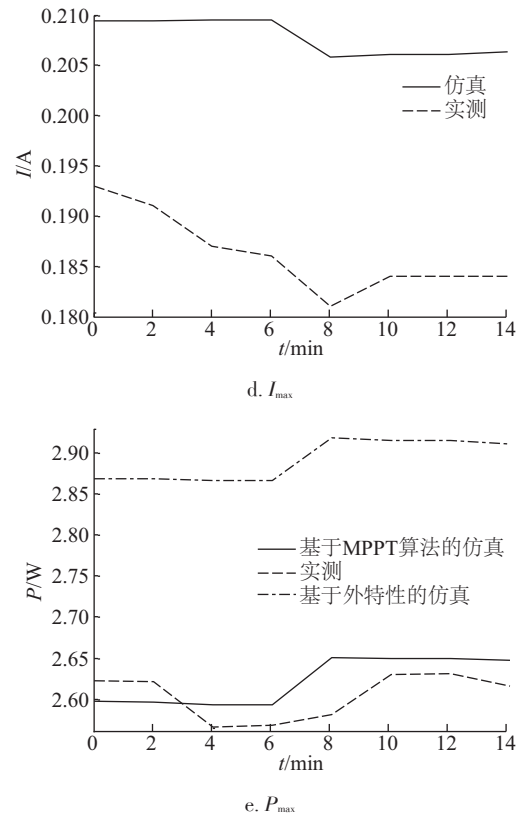
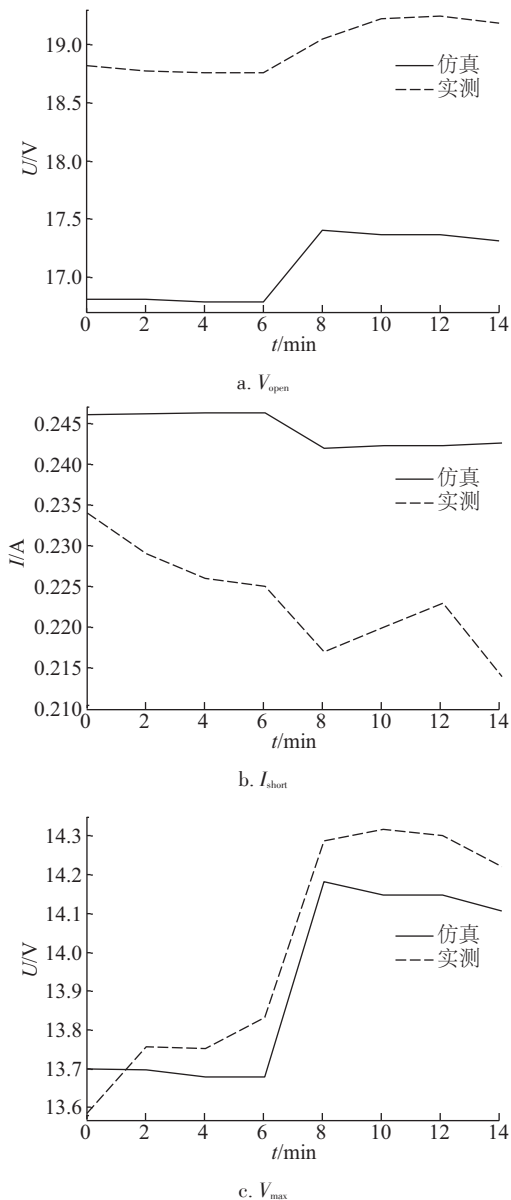


图3 仿真结果与实测结果对比

Fig. 3 Results comparison between simulation and measurement

可通过改进 MPPT 算法来提高精度与运算速度。

## 4 结 论

本文根据 MPPT 算法和电池外特性,提出 2 种新的太阳电池工程数学模型表征思路,为研究动态环境变量与太阳电池输出特性之间的影响关系提供了一种新的途径。在 Matlab/Simulink 平台上搭建对应的仿真模型,并通过温度变化对太阳电池输出特性影响的试验,说明模型的有效性。同时,仿真与实测结果的对比表明基于 MPPT 算法的太阳电池模型相较于基于外特性的仿真模型计算结果误差率更低,但计算过程会更为复杂,且只能得到  $P_m$  一个输出特性参数。

### [参考文献]

- [1] Wenham S R, Green M A, Watt M E, et al. Applied Photovoltaics[M]. UK & USA: Earthscan, 2007.
- [2] Villalva M G, Gazoli J R, Filho E R. Comprehensive



- approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(5): 1198—1208.
- [3] 万晓凤, 张燕飞, 余运俊, 等. 光伏电池工程数学模型比较研究[J]. 计算机仿真, 2014, 31(3): 113—117.
- [3] Wan Xiaofeng, Zhang Yanfei, Yu Yunjun, et al. Comparison study on photovoltaic cell engineering mathematical model[J]. Computer Simulation, 2014, 31(3): 113—117.
- [4] Rata Y, Noro S, Aoki T. Diagnosis photovoltaic failure by simple function method to acquire  $I$ - $V$  curve of photovoltaic modules string[A]. Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)[C], Austin, USA, 2012: 1340—1343.
- [5] Zhou Jianliang, Wang Bing, Zhang Yiming. Parameter identification and output power prediction of photovoltaic array based on the measured data[J]. Renewable Energy Resources, 2012, 30(7): 1—4.
- [6] 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.
- [6] Qiu Chun, Cai Tao, Duan Shanxu, et al. Extraction of solar cell model parameters under arbitrary irradiance and cell temperature[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2013, 34(9): 1626—1632.
- [7] Yazdani A, Dash P P. A control methodology and characterization of dynamics for a photovoltaic (PV) system interfaced with a distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1538—1551.
- [8] 陈 维, 沈 辉, 刘 勇. BIPV 中光伏阵列朝向和倾角对性能影响理论研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(2): 206—210.
- [8] Chen Wei, Shen Hui, Liu Yong. Performance evaluation of PV arrays at different tilt angles and orientations in BIPV[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2009, 30(2): 206—210.
- [9] 杨永恒, 周克亮. 光伏电池建模及 MPPT 控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(Sup1): 229—234.
- [9] Yang Yongheng, Zhou Keliang. Photovoltaic cell modeling and MPPT control strategies[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(Sup1): 229—234.
- [10] Syafaruddin, Karatepe E, Hiyama T. Performance enhancement of photovoltaic array through string and central based MPPT system under non-uniform irradiance conditions[J]. Energy Conversion and Management, 2012, 62: 131—140.
- [11] 傅 望, 周 林, 郭 珂, 等. 光伏电池工程用数学模型研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 211—216.
- [11] Fu Wang, Zhou Lin, Guo Ke, et al. Research on engineering analytical model of solar cells[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 211—216.
- [12] Azzopardi B, Mutale J, Kirschen D, et al. Cost boundaries for future PV solar cell modules sustainable energy technologies[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies[C], Singapore, 2008, 24(3): 589—594.
- [13] Mekhilef S, Saidur R, Kamalisarvestani M. Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(5): 2920—2925.
- [14] Skoplaki E, Palyvos J A. Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlation[J]. Renewable Energy, 2009, 34(1): 23—29.
- [15] Yuan Chengqing, Dong Conglin, Zhao Liangliang, et al. Marine environmental damage effects of solar cell panel[A]. PHM-2010 Macau, IEEE-Prognostics & System Health Management Conference 2010[C], Macau, 2010.

## RESEARCH ON SOLAR CELL MODEL BASED ON DYNAMIC ENVIRONMENT VARIABLE

Zhang Yan<sup>1-3</sup>, Yuan Chengqing<sup>1-3</sup>

(1. Reliability Engineering Institute, School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

2. Key Laboratory of Marine Power Engineering & Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

3. National Research Engineering Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** In order to study the relationship between the dynamic environment variable and the output characteristics of solar cell, two new battery models have been proposed based on the research on the mathematical model of the solar cell. According to the MPPT algorithm and the external characteristic, the connection between the dynamic environment variable and the parameters on the output characteristics of solar cell has been established, including open circuit voltage, short circuit current, voltage, current and power of the maximum power point. Meanwhile, the simulation models in the Matlab/Simulink platform have been put up and the test on the effect of the temperature to the output characteristics of the solar cell has been developed, which shows the validity of the model. And the test results show that the calculation error rate of the solar cell model based on MPPT algorithm is less than that of the solar cell model based on external characteristic, while the calculation process will be more complicated.

**Keywords:** dynamic environment; solar cell; simulation model; output characteristics