

# 一种通用性强的晶体硅光伏组件多参数动态模型

焦圣喜<sup>1</sup>, 徐海燕<sup>1</sup>, 王 亮<sup>2</sup>, 文 露<sup>1</sup>

(1. 东北电力大学自动化工程学院, 吉林 132012; 2. 国网宁波供电公司, 宁波 315000)

**摘 要:** 为得到光伏组件动态工作状态,以光伏组件单二极管物理模型为基础,首先结合参数与光强、温度间关系联合 Pade 逼近算法提出一种动态修正方法;其次为解决光伏组件物理模型中  $I$ - $V$  特性方程为电压-电流隐式形式而无法直接使用的问题,综合 Lambert( $W$ ) 函数提出一种显式化算法,将电流表示成电压的显式形式;最后运用 Matlab 软件对模型进行仿真,结合实测数据进行模型验证,验证模型通用性,对比现有高精度模型进行误差分析,分析模型精度。

**关键词:** 光伏组件; 参数提取; 动态模型; Pade 逼近; Lambert( $W$ ) 函数

**中图分类号:** TM914

**文献标志码:** A

## 0 引 言

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时下的研究热点<sup>[1]</sup>,采用数值模拟方法在非实验条件下预估光伏组件在不同光照和温度下的电气输出及性能具有重要意义。

在现有光伏组件物理模型中以隐式单、双二极管 2 种模型较为实用,它们分别包含 5 个和 7 个参数<sup>[2]</sup>。就单二极管模型而言,文献[3]在模型参数确定时为简化模型选择忽略数值较小的串联电阻,虽然降低了求解难度,但预测精度有限;文献[4-5]未忽略参数,但在参数确定时是通过开路点及短路点处斜坡导数值来计算,这就需计算特定光强及温度下  $I$ - $V$  特性曲线上足够量的电流电压点,获取过程过于复杂;文献[6]的参数确定方法简单且预测精度较高,但其未考虑温度对串联电阻影响,故对非晶硅光伏组件电气输出预测误差较大,限制了模型的通用性。就双二极管模型而言,较单二极管模型多引入串联电阻温度系数  $\alpha_{R_s}$  及二极管反向饱和电流辐射系数  $\alpha_{I_0}$ 。由文献[7-8]可知预测精度虽高于单二极管模型,但因  $\alpha_{I_0}$  需由特定工况下最大功率点电流和电压计算得到,获取过程复杂且会引入新测量误差与计算误差。

本文提出一种通用性强的硅光伏组件多参数动态

模型。综合考虑模型通用性、预测精度、计算复杂度及误差等影响因素,在模型研究时首先以特殊点及单条  $I$ - $V$  曲线两点法为基础根据 STC(标准测试条件)条件下参数联立方程确定模型参数;其次由于所得参数无法描述任意光强、温度条件下光伏组件电气输出特性,以参数与光强、温度间关系为基础,引入参数  $\alpha_{R_s}$  联合 Pade 逼近算法对模型参数进行相关动态修正;最后因  $I$ - $V$  特性方程属隐式超越方程,仿真时不能直接使用,故本文以 Lambert( $W$ ) 函数为基础推导出其显示表达式。

## 1 光伏组件基础模型及参数

硅光伏组件属半导体光器件,一个太阳电池实际上是一个大面积的 p-n 结二极管。当太阳光线照射到太阳电池表面时光能便转换成电能。根据电子学理论,光伏组件单二极管模型的等效电路图如图 1 所示<sup>[9]</sup>。由等效电路图可得光伏组件  $I$ - $V$  特性方程:

$$\begin{aligned} I &= I_L - I_D - I_{sh} \\ &= I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{a}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $I$  ——光伏组件输出电流;  $I_L$  ——光生电流;  $I_D$  ——暗电流;  $I_{sh}$  ——流过并联电阻电流;  $I_0$  ——二极管反向饱和电流;  $V$  ——光伏组件电压;  $R_s$  ——光伏组

件串联电阻； $a$ ——理想因子参数； $R_{sh}$ ——光伏组件并联电阻。

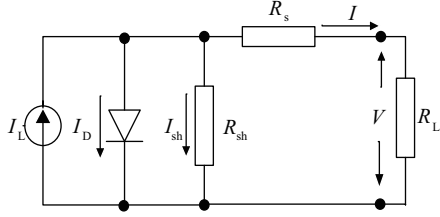


图1 光伏组件单二极管模型等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit model of solar panel in single-diode form

式(1)中参数  $a$ 、 $I_L$ 、 $I_0$ 、 $R_s$ 、 $R_{sh}$  的变化直接影响光伏组件输出电流,而参数的数值主要由当前工况中光强和温度 2 个主要因素共同决定。由于模型主要输入参数  $a_{ref}$ 、 $I_{Lref}$ 、 $I_{0ref}$ 、 $R_{sref}$ 、 $R_{shref}$  并未直接给出,需由厂商提供的已知 STC 条件下的  $I_{scref}$ 、 $V_{ocref}$ 、 $I_{mpref}$ 、 $V_{mpref}$  值建立方程求解。由于光伏组件实际工作中参数随工况时变,需根据实际工况中温度及光强实时数值进行动态修正,输入经 Lambert ( $W$ ) 函数显式化的  $I$ - $V$  特性方程,可得到随工况时变的光伏组件动态输出模型。

## 2 模型参数的计算与动态修正

### 2.1 模型参数的获取

由于参数  $a_{ref}$ 、 $I_{Lref}$ 、 $I_{0ref}$ 、 $R_{sref}$ 、 $R_{shref}$  的有理值未直接给出,需通过 STC 参数  $I_{scref}$ 、 $V_{ocref}$ 、 $I_{mpref}$ 、 $V_{mpref}$  联立方程组求取。方程组的建立过程为:

1)STC 开路电压点( $0, V_{ocref}$ ),将  $I=0, V=V_{ocref}$  代入

式(1)得到式(2):

$$0 = I_{Lref} - I_{0ref} \left[ \exp \left( \frac{V_{ocref}}{a_{ref}} \right) - 1 \right] - \frac{V_{ocref}}{R_{shref}} \quad (2)$$

2)STC 短路电流点( $I_{scref}, 0$ ),将  $I=I_{scref}, V=0$  代入式(1)可得式(3):

$$I_{scref} = I_{Lref} - I_{0ref} \left[ \exp \left( \frac{I_{scref} R_{sref}}{a_{ref}} \right) - 1 \right] - \frac{I_{scref} R_{sref}}{R_{shref}} \quad (3)$$

3)STC 最大功率点( $I_{mpref}, V_{mpref}$ ),将  $I=I_{mpref}, V=V_{mpref}$  代入式(1)得:

$$I_{mpref} = I_{Lref} - I_{0ref} \left[ \exp \left( \frac{V_{mpref} + I_{mpref} R_{sref}}{a_{ref}} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mpref} + I_{mpref} R_{sref}}{R_{shref}} \quad (4)$$

4)STC 最大功率点导数为 0 点,在  $P$ - $V$  曲线上最大功率点处,输出功率的斜率为零( $dP/dV=0$ ),即:

$$0 = I_{mpref} + V_{mpref} \frac{\frac{-I_{0ref}}{a_{ref}} \exp \left( \frac{V_{mpref} + I_{mpref} R_{sref}}{a_{ref}} \right) - \frac{1}{R_{shref}}}{1 + \frac{I_{0ref} R_{sref}}{a_{ref}} \exp \left( \frac{V_{mpref} + I_{mpref} R_{sref}}{a_{ref}} \right) + \frac{R_{sref}}{R_{shref}}} \quad (5)$$

5)由单条  $I$ - $V$  曲线两点法推导过程中

$$R_s = \frac{V_m}{I_m} - a \left[ \frac{R_{sh} + R_s}{R_{sh}(I_L + I_0 - I_m) - I_m R_s} \right] \quad [10] \text{ 推导得:}$$

$$R_{sref} = \frac{R_{shref}(I_{Lref} + I_{0ref} - I_{mpref}) + V_{mpref} + a_{ref}}{2I_{mpref}} + \frac{\sqrt{H-Q}}{2I_{mpref}} \quad (6)$$

式中,  $H = [R_{shref}(I_{Lref} + I_{0ref} - I_{mpref}) + V_{mpref} + a_{ref}]^2$ ;

$$Q = 4R_{shref} [V_{mpref}(I_{Lref} + I_{0ref} - I_{mpref}) - a_{ref} I_{mpref}]$$

将表 1 中参数值代入式(2)~式(6),求解可得模型输入端参数  $a_{ref}$ 、 $I_{Lref}$ 、 $I_{0ref}$ 、 $R_{sref}$ 、 $R_{shref}$  的有理值。

表1 不同类型光伏组件参考条件下参数值

Table 1 Reference values of various types of solar panels under reference conditions

型号	$I_{scref}/A$	$V_{ocref}/V$	$I_{mpref}/A$	$V_{mpref}/V$	$\alpha_{I_{sc}}/A \cdot K^{-1}$	$\alpha_{R_s}/A \cdot K^{-1}$	$E_{gref}/eV$
SM-55	3.45	21.7	3.15	17.40	0.00190	0.0042	1.12
MSX-64	4.25	41.5	3.82	32.94	0.00238	0.0025	1.14
US-21	1.59	23.8	1.27	16.50	0.00135	-0.0091	1.60

### 2.2 模型参数的修正

上文运算所得均为 STC 条件下参数值,为获得光伏组件实时动态输出,需从温度及光强 2 方面对所得 STC 条件下参数进行动态修正,过程为:

1)理想因子:实验知理想因子随光强变化微弱,主要受工作温度影响,因此将理想因子与工作温度间关系论述为:

$$a = a_{ref} \frac{T}{T_{ref}} \quad (7)$$

2)光生电流:Townsend<sup>[11]</sup>将光生电流与入射光强  $G$ 、工作温度  $T$  及  $\alpha_{I_{sc}}$  短路电流温度系数间的关系论述为:

$$I_L = \frac{G}{G_{ref}} [I_{Lref} + \alpha_{I_{sc}}(T - T_{ref})] \quad (8)$$

3)反向饱和电流:依据二极管理论将反向饱和电流

与温度  $T$  间的关系论述为:

$$I_o = I_{oref} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[ \frac{1.60207 \times 10^{-19}}{k} \left( \frac{E_{gref}}{T_{ref}} - \frac{E_{gT}}{T} \right) \right] \quad (9)$$

式中,  $E_g$  ——材料能带宽度,具有温度依赖性,故表述为  $E_{gT} = E_{gref} [1 - 0.0002677(T - T_{ref})]$ 。

4) 并联电阻: Schrodner (1988) 指出并联电阻  $R_{sh}$  近似地与短路电流  $I_{sc}$  成反比, 即:  $\frac{R_{sh}}{R_{shref}} = \frac{I_{scref}}{I_{sc}}$ , David 将短路电流与入射光强  $G$ , 工作温度  $T$  及短路电流温度系数  $\alpha_{I_{sc}}$  论述为<sup>[12]</sup>:  $I_{sc} = I_{scref} \frac{G}{G_{ref}} [1 + \alpha_{I_{sc}}(T - T_{ref})]$ , 由于  $\alpha_{I_{sc}}$  数值极小, 可忽略工作温度影响, 将方程论述为:  $\frac{I_{sc}}{I_{scref}} = \frac{G}{G_{ref}} \Rightarrow \frac{I_{scref}}{I_{sc}} = \frac{G_{ref}}{G}$  综上, 将并联电阻修正方程论述为:

$$R_{sh} = R_{shref} \frac{G_{ref}}{G} \quad (10)$$

5) 串联电阻: 经由实验已确认串联电阻是光伏组件工作温度的函数, 且与温度成正比, 在文献[13]中将串联电阻与  $\alpha_{R_s}$  串联电阻温度系数间关系论述为:  $R_s = R_{sref} \cdot e^{\alpha_{R_s}(T - T_{ref})}$ , 由于该式为超越函数, 不能直接计算得到串联电阻  $R_s$  的有理值, 故采用 Pade 逼近进行转化, 由计算可得  $e^x$  的一阶 Pade 逼近  $[1/I]_{exp(x)} = \frac{2+x}{2-x}$ , 令  $x = \alpha_{R_s}(T - T_{ref})$  可得修正方程:

$$R_s = R_{sref} \cdot \frac{2 + \alpha_{R_s}(T - T_{ref})}{2 - \alpha_{R_s}(T - T_{ref})} \quad (11)$$

### 3 Lambert( $W$ )函数的动态模型建立

在  $I$ - $V$  特性隐式超越方程式去超越显式化过程中, 传统解析分析法通常选择忽略部分参数, 从而带来计算误差。为得到更为精准的表达式, 本文采用 Lambert( $W$ ) 函数对式(1)进行等效替换, 既避免传统近似方法带来的计算误差, 又使模型精度得到有效提高。将超越方程为式(12):

$$W(X)e^{W(X)} = X \quad (12)$$

将式(12)的解定义为 Lambert( $W$ ) 函数, 这是由著名数学家 Lambert 在求解三项式方程  $X = q + X_m$  时提出的<sup>[14]</sup>。本文在处理  $I$ - $V$  特性隐式超越方程时, 将首先建立:

$$ax + b = e^{(cx+d)} \quad (13)$$

式中,  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  ——参数。

在式(13)两边同时乘以  $-\frac{c}{a}e^{(-cx-\frac{cb}{a})}$  得到:

$$\left(-cx - \frac{cb}{a}\right)e^{(-cx-\frac{cb}{a})} = -\frac{c}{a}e^{(\frac{ad-cb}{a})} \quad (14)$$

对比式(12), 令  $W(X) = -cx - \frac{cb}{a}$ ,  $X = -\frac{c}{a}e^{(\frac{ad-cb}{a})}$  将  $X$  代入  $W(X)$  得:

$$W\left[-\frac{c}{a}e^{(\frac{ad-cb}{a})}\right] = -cx - \frac{cb}{a} \quad (15)$$

移项可得关于  $x$  的显式表达式:

$$x = -\frac{b}{a} - \frac{1}{c}W\left[-\frac{c}{a}e^{(\frac{ad-cb}{a})}\right] \quad (16)$$

将  $I$ - $V$  特性方程式(1)移项化简成式(13)形式, 可得:

$$-\frac{R_{sh} + R_s}{I_o R_{sh}}I + \left(\frac{I_L}{I_o} + 1 - \frac{V}{I_o R_{sh}}\right) = e^{\left(\frac{R_s I + V}{a}\right)} \quad (17)$$

把  $I$  看作未知数  $x$ , 对比式(13)可得:

$$\left\{a = -\frac{R_{sh} + R_s}{I_o R_{sh}}, b = \frac{I_L}{I_o} + 1 - \frac{V}{I_o R_{sh}}, c = \frac{R_s}{a}, d = \frac{V}{a}\right\} \quad (18)$$

将式(18)代入式(19)便可求得光伏组件输出电流  $I$  的显示表达式:

$$I = \frac{R_{sh}(I_L + I_o) - V}{R_{sh} + R_s} - \frac{a}{R_s}W\left[\frac{I_o R_{sh} R_s}{a(R_{sh} + R_s)}e^{\frac{R_{sh}(R_s I_L + R_s I_o + V)}{a(R_{sh} + R_s)}}\right] \quad (19)$$

## 4 模型的仿真验证及实验结果分析

根据光伏组件等效电路模型式(7)~式(11)及式(19), 利用 MATLAB/Simulink 搭建光伏组件动态仿真模型如图 2 所示。首先由已知参数结合式(2)~式(6)计算得出模型输入端数据; 之后数据经修正模块进行动态修正; 最后经计算模块计算后输出实时响应数据。至此便可得到任意光强、温度条件下光伏组件动态电气输出特性。

### 4.1 Si 光伏组件动态性能验证

应用较普遍的几类光伏组件分别是由单晶硅、多晶硅及非晶硅制成。为验证模型通用性, 选取单晶硅光伏组件(SM-55)、多晶硅光伏组件(MSX-64)及非晶硅光伏组件(US-21)进行仿真, 选取 2 种动态性实验, 即温度恒定光强变化、光强恒定温度变化。

#### 1) 温度恒定光强变化

将温度设定为 STC 条件下温度 25 °C(298 K), 光强以 200 W/m<sup>2</sup> 为初值, 以 200 W/m<sup>2</sup> 为步长变化, 得到输入不同型号光伏组件参数仿真模型动态电气输出特性曲线, 即  $I$ - $V$ 、 $P$ - $V$  曲线, 并与实际输出曲线对比, 结果如图 3 所示。研究显示, 仅有光强变化时, 本文模型输入不同类型硅光伏组件参数均可给出相应实时动态输出, 且与实际输出数据误差较小。

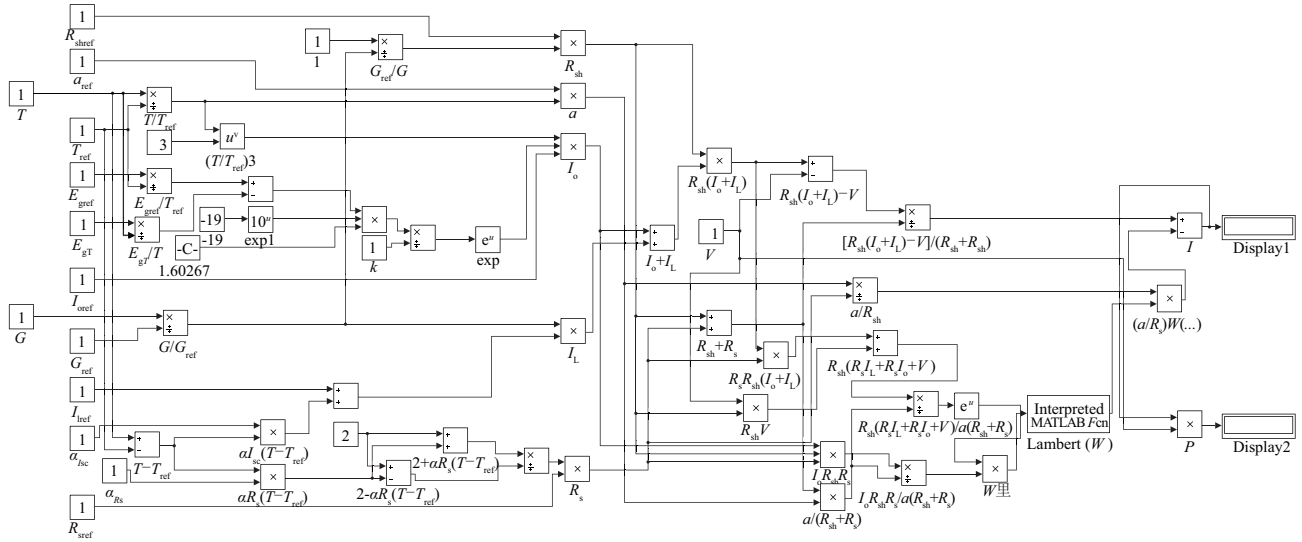
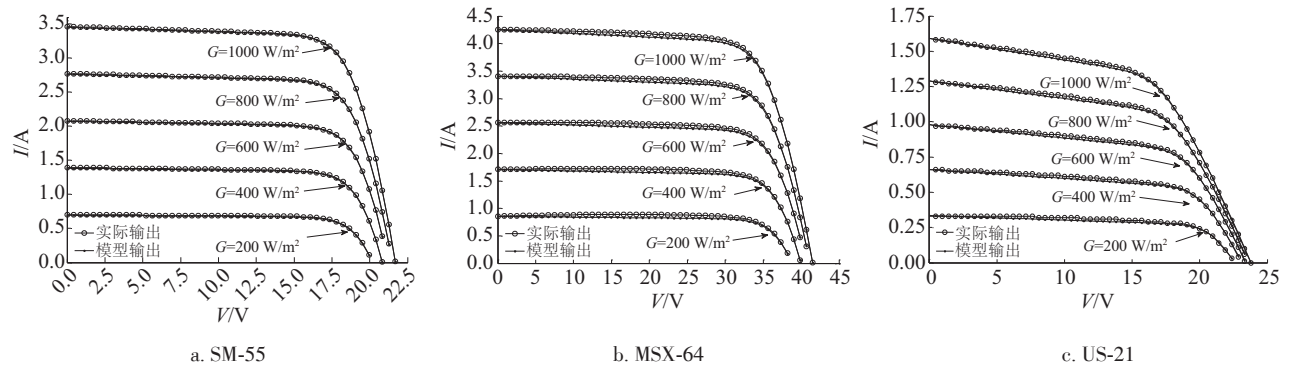


图2 光伏组件动态模型仿真程序图

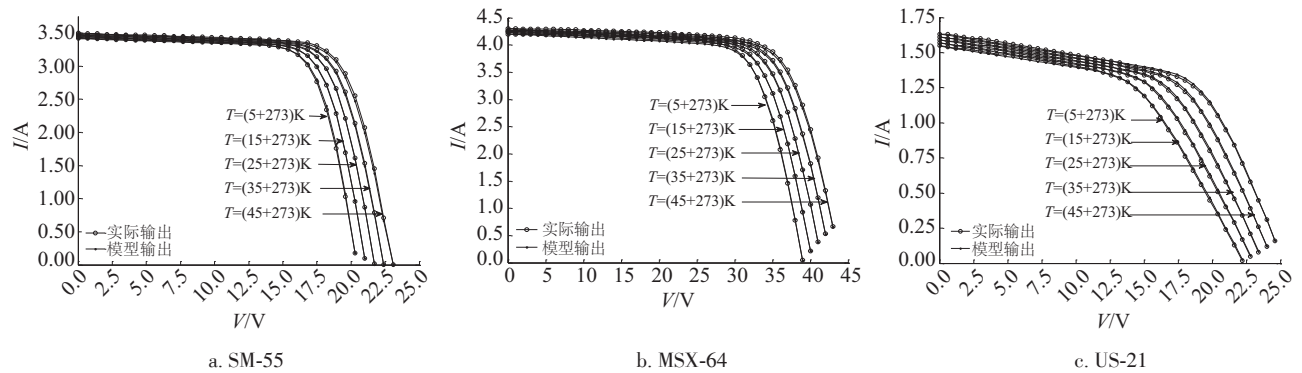
Fig. 2 Dynamic model simulation program of solar panel

图3 温度恒定( $T=(25+273)\text{K}$ )时光强变化 $I$ - $V$ 特性模拟、实验对比Fig. 3 Simulative, experimental  $I$ - $V$  characteristic curves under temperature constant ( $T=(25+273)\text{K}$ ) and light intensity change

## 2) 光强恒定温度变化

将光强设定为 STC 条件下光强  $1000\text{ W/m}^2$ , 温度按以  $5\text{ }^\circ\text{C}$  ( $278\text{ K}$ ) 为初值, 以  $10\text{ }^\circ\text{C}$  ( $10\text{ K}$ ) 为步长变化, 得

到输入不同型号光伏组件参数仿真模型动态电气输出特性曲线, 即  $I$ - $V$ 、 $P$ - $V$  曲线, 并与实际输出曲线对比, 结果如图 4 所示。

图4 光强恒定( $G=1000\text{ W/m}^2$ )温度变化 $I$ - $V$ 特性模拟、实验对比Fig. 4 Simulative, experimental  $I$ - $V$  characteristic curves under light intensity constant ( $G=1000\text{ W/m}^2$ ) and temperature change

研究显示,仅有温度变化时,本文模型输入不同类型硅光伏组件参数亦可给出相应实时动态输出,且与实际输出数据误差较小。

#### 4.2 动态模型误差验证

结合现有高精度模型<sup>[6]</sup>的误差分析,本文选取典型 SM-55 型光伏组件进对比,随机抽取 3 种不同工况进行对比分析,并给出绝对误差对比;同时采用均方根误差  $RMSE$  对模型整体误差进行评估,  $RMSE$  定义如式 (20) 所示。本文随机抽取的 3 种工况如表 2 所示。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2} \quad (20)$$

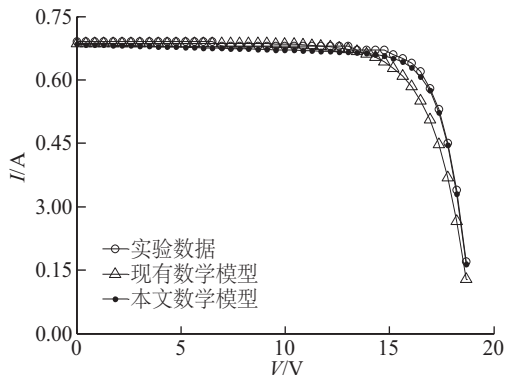
式中,  $N$  ——实验总观测数据取整数;  $X_{obs,i}$  ——第  $i$  个观测值;  $X_{model,i}$  ——第  $i$  个真值。

表 2 随机抽取的 3 种工况条件

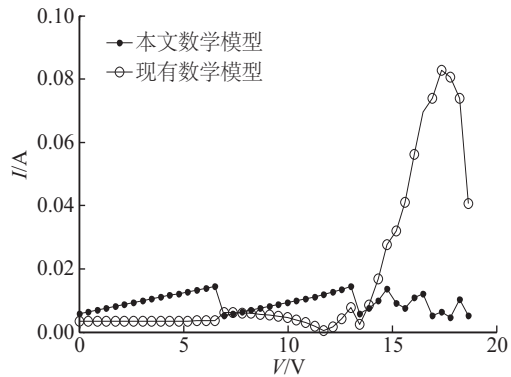
Table 2 Three randomly drawing working conditions

参数	光照强度/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$
工况 1	200	5
工况 2	600	30
工况 3	1000	40

实验结果对比曲线及绝对误差曲线如图 5~图 7 所示。由图 5~图 7 可知,在全电压范围内变化时,本文模型输出电流绝对误差最大值不超过 0.15 A;输出功率绝对误差最大值不超过 1.8 W,且较现有高精度模型本文模型误差更小更稳定。



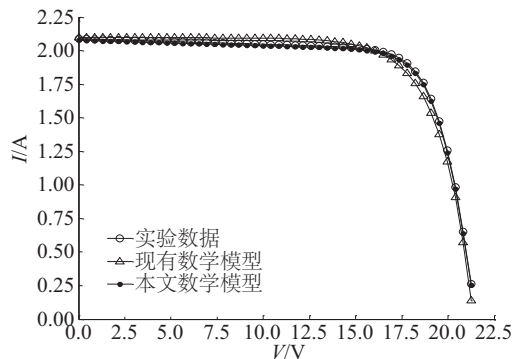
a.  $I$ - $V$ 特性模拟、实验曲线



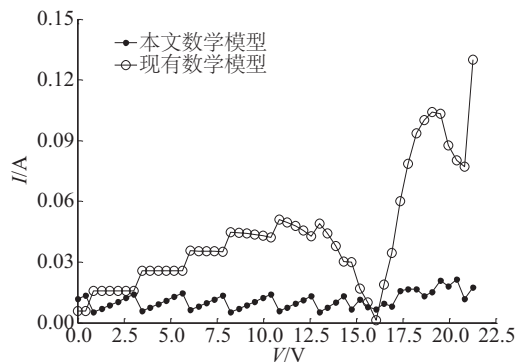
b. 输出电流  $I$  绝对误差

图 5 工况 1 的 SM-55 光伏组件  $I$ - $V$  特性模拟、实验曲线及绝对误差曲线

Fig. 5 Simulative, experimental  $I$ - $V$  characteristic curves and its' absolute error curves of SM-55 under the first working condition



a.  $I$ - $V$ 特性模拟、实验曲线



b. 输出电流  $I$  绝对误差曲线

图 6 工况 2 的 SM-55 光伏组件  $I$ - $V$  特性模拟、实验曲线及绝对误差曲线

Fig. 6 Simulative, experimental  $I$ - $V$  characteristic curves and its' absolute error curves of SM-55 under second working condition

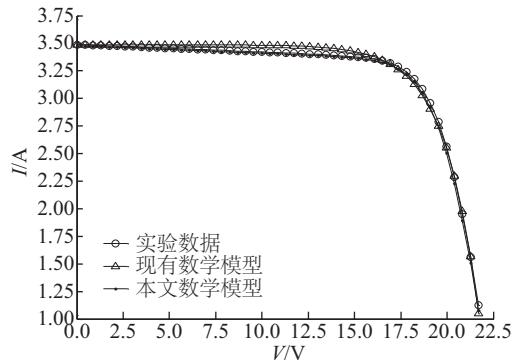
整体误差评估:均方根误差  $RMSE$  公式定义如式 (21)、式 (22)。



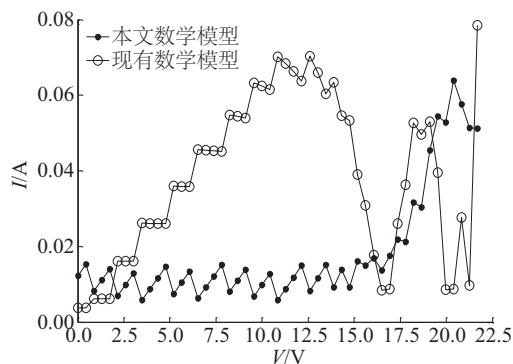
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_m - I_e)^2} \quad (21)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_m - P_e)^2} \quad (22)$$

式中,  $n$  ——电气特性曲线中实验数据取整数;  $I_m$ 、 $P_m$  ——本文模型输出电流, 功率值;  $I_e$ 、 $P_e$  ——实验实测值。



a.  $I$ - $V$ 特性模拟、实验曲线



b. 输出电流  $I$  绝对误差曲线

图7 工况3的SM-55光伏组件 $I$ - $V$ 特性模拟、实验曲线及绝对误差曲线

Fig. 7 Simulative, experimental  $I$ - $V$  characteristic curves and its' absolute error curves of SM-55 under the third working condition

由表3可知,随机抽取的3种工况下本文模型的 $RMSE$ 值均远小于现有高精度模型,由此可知本文模型整体性能更好。

表3 不同模型与实验数据对比所得 $RMSE$ 值

Table 3  $RMSE$  values under comparison of different models with experimental data

工况	光照强度/ $W \cdot m^{-2}$	温度/ $^{\circ}C$	现有高精度 数学模型	本文 模型
工况1	200	5	0.029192498	0.009730158
工况2	600	30	0.050718313	0.011739778
工况3	1000	40	0.042634459	0.023659737

## 5 结 论

结合 Pade 逼近算法与 Lambert( $W$ )函数提出一种通用性强的硅光伏组件多参数动态模型,对多种工况下多参数的动态变化进行仿真研究。研究表明,本文提出的模型通用性较强;能实现小误差范围内随工况动态变化,仿真数据与实验数据接近程度高;当电压在全范围内变化时,模型输出电流、输出功率的最大误差及 $RMSE$ 值远低于现有高精度模型。综上,本文建立的硅光伏组件模型具有通用性好、动态性强及精度高等优点,具有较高实用性。

## [参考文献]

- [1] LUDERER G, PIETZCKER R C, CARRARA S, et al. Assessment of wind and solar power in global low-carbon energy scenarios: an introduction[J]. Energy economics, 2017, 64(1): 542-551.
- [2] 龚焯杰. 微分平坦控制和P&O结合的光伏发电最大功率追踪[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.  
GONG H J. Maximum power point tracking combining differential flatness control and P&O [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [3] CELIK A N, ACIKGOZ N. Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four-and five-parameter models[J]. Applied energy, 2007, 84(1): 1-15.
- [4] COTFAS D T, COTFAS P A, KAPLANIS S. Methods to determine the DC parameters of solar cells: a critical review[J]. Renewable & sustainable energy reviews, 2013, 28(8): 588-596.
- [5] SINGH P, SINGH S N, LAL M, et al. Temperature dependence of  $I$ - $V$ , characteristics and performance parameters of silicon solar cell[J]. Solar energy materials & solar cells, 2008, 92(12): 1611-1616.
- [6] 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.
- [7] ET-TORABI K, NASSAR-EDDINE I, OBBADI A, et al. Parameters estimation of the single and double diode photovoltaic models using a Gauss-Seidel algorithm and analytical method: a comparative study [J]. Energy conversion & management, 2017, 148(1): 1041-1054.
- [8] JAMADI M, MERRIKH-BAYAT F, BIGDELI M. Very accurate parameter estimation of single- and double-

- diode solar cell models using a modified artificial bee colony algorithm [J]. *International journal of energy & environmental engineering*, 2016, 7(1): 13-25.
- [9] 谢波实, 代盼, 罗向东, 等. 不同背场的GaAs基单结太阳能电池伏安特性及分析[J]. *光学学报*, 2017, 37(2): 226-233.
- XIE B S, DAI P, LUO X D, et al. *IV* characteristics and analysis for gas based single junction solar cells with different back surface fields[J]. *Acta optica sinica*, 2017, 37(2): 226-233.
- [10] 陈筑. 晶体硅太阳能组件功率损失研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- CHEN Z. The study of crystal silicon solar module power loss [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [11] GHONEIM A A, AL-HASAN A Y, ABDULLAH A H. Economic analysis of photovoltaic-powered solar domestic hot water systems in Kuwait [J]. *Renewable energy*, 2002, 25 (1): 81-100.
- [12] SOTO W D, KLEIN S A, BECKMAN W A. Improvement and validation of a model for photovoltaicray performance[J]. *Solar energy*, 2006, 80 (1): 78-88.
- [13] VIRTUANI A, LOTTER E, POWALLA M. Performance of Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>, solar cells under low irradiance[J]. *Thin solid films*, 2003, 431(1): 443-447.
- [14] ISHKHANYAN A M. A singular Lambert- W. Schrödinger potential exactly solvable in terms of the confluent hypergeometric functions[J]. *Modern physics letters A*, 2016, 31(33): 1303-1354.

## A STRONG VERSATILE MULTIPLE-PARAMETER DYNAMIC MODEL FOR SILICON PV MODULES

Jiao Shengxi<sup>1</sup>, Xu Haiyan<sup>1</sup>, Wang Liang<sup>2</sup>, Wen Lu<sup>1</sup>

(1. College of Automation Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. State Grid Ningbo Power Supply Company, Ningbo 315000, China)

**Abstract:** On basis of the physical model of the solar panel in single-diode form, a dynamic correction method for the changeable working state of solar panel is proposed, which fuses the correlativity analysis among related parameters, light intensity and temperature, and considering Pade approximation algorithm as well. Moreover, due to the practical restriction derived from the implicit  $I$ - $V$  characteristics within physical model, combined with lambert( $W$ ) function-based, an explicit algorithm is proposed to fulfill the current expression in terms of voltage. With the numerical simulation carried out, together with samples of measured data, the present model is proved to possess strong versatility as expected. Finally, the model precision estimate is given by means of error comparison analysis with existing model with high precision.

**Keywords:** PV modules; parameter extraction; dynamic models; Pade approximation; Lambert( $W$ ) function