基于隐式双二极管模型和反偏模型的光伏阵列建模方法

吴海飞[1]，丁 坤[2]，苏 营[1]，陈 翔[2]，何尧玺[3]，纪方旭[3]，陈泉如[2]
(1.中国三峡集团科学技术研究院，北京 101100；2.河海大学 机电工程学院，江苏 常州 213022；3.长电新能有限责任公司，湖北 武汉 430000)

摘 要：为解决传统光伏阵列建模方法在计算精度与可移植性上的不足，文章提出一种基于隐式双二极管模型(Implicit Double Diode Model,IDDM)和反偏模型(Reverse Bias Model,RBM)的光伏阵列建模方法。该方法首先根据光伏阵列实际运行状态配置环境参数;其次,基于 IDDM 与 RBM 的理论模型,计算不同运行状态下光伏电池的电流电压;再次,计算光伏阵列子串的电流与电压;最后,输出光伏阵列的 *I*-*V*(Current-Voltage,*I*-*V*)特性曲线。实验结果表明,该建模方法具有较高仿真精度,理论与实际电流序列误差可减小到 0.015 A。另外,该方法能够有效模拟光伏阵列在局部阴影遮挡、短路、等效串联电阻和并联电阻老化等状态下的 *I*-*V* 特性,可为光伏电站故障诊断研究提供理论依据与数据支撑。

关键词：光伏阵列；建模方法；双二极管模型；反偏模型
中图分类号：TK51 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5292(2025)12-1588-10

0 引言

光伏发电受环境影响导致发电量产生波动[1],进而影响安全并网。研究光伏阵列建模可深入了解光伏发电机理,对光伏电站故障诊断与性能评估具有重要意义[2]。为此,本文提出一种有效、计算精度高的光伏阵列建模方法。

作为光伏阵列建模研究基础,光伏电池模型可分为单二极管模型 (Single Diode Model,SDM)和双二极管模型 (Double Diode Model,DDM);根据数学表达形式不同可分为隐式模型和显式模型。SDM 的形式简洁，模型参数求解难度较低;DDM 的计算精度高,适应性强[3];隐式方程原理简单明了,可通过牛顿迭代求解 *I*-*V* 特性;显式方程计算精度较高，可采用初等数学求解 *I*-*V* 特性。在低辐照和低电压条件下,DDM 对光伏电池输出特性的描述要优于 SDM[4]。为解决模型参数求解难题,并提高 DDM 实用价值,前期课题组提出一种二阶段式模型参数辨识方法[5],其计算效率与精度均有较大提升。

常见光伏阵列建模可分为基于等效电路模型方法、数值模拟和神经网络方法[6]。Simulink 建模作为第 1 类常见方法,其原理简单且便于理解,但计算精度和适应性有限[7];数值模拟方法通过数学模型表征光伏阵列发电特性，其精度高且可移植性强[8],但模型参数求解较难;神经网络方法通过数据驱动建立环境参数与发电数据的拟合关系,其原理简单且精度较高,但其内部机理难以解释且实用性受限[9]。在前期的研究中,课题组结合 SDM 与 RBM 提出光伏阵列数值模拟建模方法[10-12],可仿真阴影遮挡、老化与短路状态下的 *I*-*V* 特性。

本文在前文研究基础上，提出一种基于隐式双二极管模型(Implicit Double Diode Model,IDDM)和反偏模型(Reverse Bias Model,RBM)的光伏阵列建模方法，进一步提高光伏阵列模型的精度与实用性，并更加全面准确地描述光伏阵列在实际运行条件下的电气输出特性，为光伏阵列性能评估与故障诊断研究提供理论依据与可靠数据源。

1 基础理论模型

1.1 隐式双二极管模型

DDM 具有良好的暗特性与低辐照下电气输出表征能力,在低辐照(G<50 mW/cm^2)和低电压运行条件下,DDM 对光伏电池输出特性的描述优于单二极管模型。对于正常辐照和高电压运行条

收稿日期：2024-11-04。
基金项目：中国长江电力股份有限公司资助(Z342302011);工信部物联网示范项目(Y202101072)。
通信作者：丁 坤(1975-),男,博士,教授,研究方向为光伏发电、智能装备、机电一体化技术。E-mail:dingk@hhu.edu.cn

件,DDM 也能准确描述光伏电池的输出特性。DDM 更适用于硅基材料光伏电池,此类光伏电池成本低、工艺成熟，在光伏发电市场广为应用。DDM 的隐式模型原理简单,便于推广,同时,模型参数辨识方法的进步增强了 IDDM 的适用性,更有利于精确计算出光伏阵列的 I–V 特性。因此本文选用 IDDM 作为光伏阵列建模的基础理论模型,其表达式[5]为

$$I=I_{ph}-I_{01}\left[\exp\left(\frac{V+IR_s}{n_1V_{th}}\right)-1\right]-I_{02}\left[\exp\left(\frac{V+IR_s}{n_2V_{th}}\right)-1\right]-\frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中:I 为光伏阵列的输出电流,A;I_{ph} 为光生电流,A;I_{ph} 与入射光强度成正比,$I_{ph}=(G/G_{stc})\times I_{sc}$;$G$ 和 G_{stc} 分别为实测与标准条件下的辐照度,W/m^2;I_{sc} 为短路电流,A;I_{01} 为第 1 个二极管的饱和电流,A;I_{02} 为第 2 个二极管的饱和电流,A;V 为光伏阵列的输出电压,V;R_s 为串联电阻,Ω;R_{sh} 为并联电阻,Ω;n_1,n_2 为理想因子，通常取值在 1~2;V_{th} 为热电压，定义为 $V_{th}=KT/q$;K 为玻尔兹曼常数,$K=1.38\times10^{-23}$ J/K;T 为光伏电池温度,K;q 为电子电荷常数,$q=1.602\times10^{-19}$ C。

1.2　反偏模型

实际运行条件下，光伏组件受遮挡或出现物理故障时可能导致部分光伏电池承受反向偏置电压,进而引起热斑现象[12]。光伏电池在正偏区域的 I–V 特性与正常情况一致，在反偏区域的电流随电压绝对值增长而呈指数型增长，由于反偏特性的光伏电池 I–V 特性更加符合等效二极管的理论输出特性,可采用 RBM 进行解释,相应的 I–V 特性如图 1 所示。

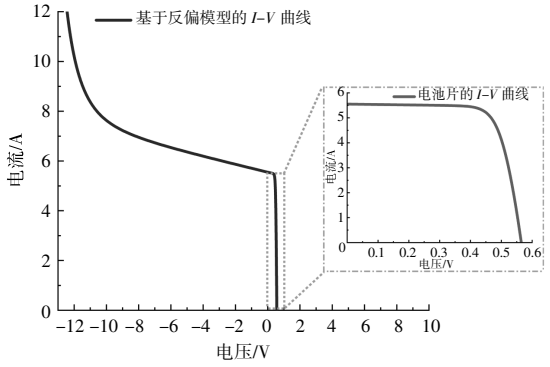


图 1　光伏电池反偏模型原理

Fig.1 Principle of reverse bias model for photovoltaic cell

反偏模型的电流–电压关系式为

$$I_{rev}=I_{ph}-I_0\left[\exp\left(\frac{V}{nV_{th}}\right)-1\right]-\frac{V_{rev}}{R_{sh}} \quad (2)$$

式中:I_{rev} 为反偏输出电流,主要由 I_{ph} 和反偏电压下的二极管电流决定 A;I_0 为二极管的饱和电流,A;V_{rev} 为反偏电压,V;n 为二极管的理想因子。

1.3　模型结合

考虑反偏特性的光伏电池在正偏区域的 I–V 特性与正常的光伏电池完全一致，在反偏区域的电流随电压绝对值增长而呈指数型增长。将 RBM 与光伏电池 IDDM 相结合，可以更加准确地描述光伏阵列在实际运行条件下的电气输出特性,考虑反偏特性的光伏电池模型表达式为

$$I_{cell}=I_{ph}-I_{01}\left[\exp\left(\frac{V_{cell}+I_{cell}R_s}{n_1V_{th}}\right)-1\right]-I_{02}\left[\exp\left(\frac{V_{cell}+I_{cell}R_s}{nV_{th}}\right)-1\right]-\frac{V_{cell}+I_{cell}R_s}{R_{sh}}-b(V_{cell}+I_{cell}R_s)\left(1-\frac{V_{cell}+I_{cell}R_s}{V_{br}}\right)^{-m} \quad (3)$$

式中:I_{cell} 为光伏电池的输出电流,A;V_{cell} 为光伏电池的输出电压,V;b 为雪崩击穿电流相关系数,Ω^{-1};V_{br} 为 P–N 结击穿电压,V;m 为雪崩击穿指数。其中 b,V_{br},m 的取值分别为 0.002 Ω^{-1},−21.29 V,3[12]。

1.4　模型参数求解

解析法在合理的简化和假设基础上，将实测 I–V 特性的特殊点结合光伏电池的数学模型可推导出模型参数 I_{ph},I_0,n,R_s,R_{sh}。R.T.C France 实测的典型光伏电池 I–V 曲线[13]如图 2 所示。

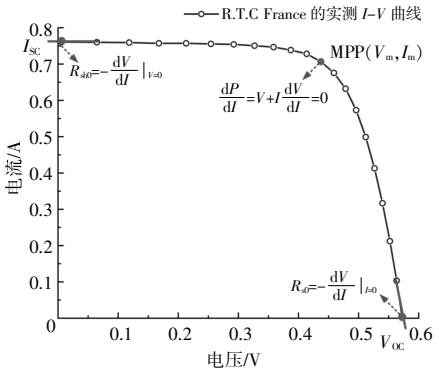


图 2　模型参数解析法的计算原理

Fig.2 Principle of analytical identification method for model parameters

图 2 中包含部分特殊点：短路电流(Short Circuit Current,I_{sc})、开路电压 (Open Circuit Voltage,V_{oc})、最大功率点电流和电压(Maximum

Power Current and Voltage,I_m 和 V_m)、I–V 特性在坐标轴交点附近的斜率(R_{s0} 和 R_{sh0})。V_{oc} 为 I–V 曲线电流为 0 时的电压,I_{sc} 为电压为 0 时的电流,I_m 和 V_m 为 I–V 曲线中功率最大时的电流和电压,R_{s0} 和 R_{sh0} 为 V_{oc} 和 I_{sc} 对应的串联电阻和并联电阻,上述 5 类特殊点利用图 2 中标注方法即可求解。在实际应用中,此 5 类特殊点也可利用计算机软件中的数组指针在实测 I–V 曲线上确定,再结合解析算法,即可求解光伏电池模型参数。

光伏电池 DDM 的参数较多,难以直接从 I–V 特性的特殊点推导并建立模型参数的解析式。基于最大功率匹配(Maximum Power Matching,MPM)的DDM 参数求解方法[14]先设定 n_1 与 n_2 的数值,再给出 I_{ph},I_{01},I_{02} 的解析式,最后以实测 I–V 曲线上的最大功率点为基准,结合牛顿迭代求解 R_s 和 R_{sh}。牛顿迭代算法[14]用于 I–V 特性求解的计算式为

$$\begin{cases} f(I_k)=I_{ph}-I_0\left[\exp\left(\dfrac{V_k+R_sI_k}{nV_{th}}\right)-1\right]-\dfrac{V_k+R_sI_k}{R_{sh}}-I_k \\ I_{k+1}=I_k-\dfrac{f(I_k)}{f'(I_k)} \end{cases} \tag{4}$$

式中:I_k 和 I_{k+1} 分别为第 k 和 k+1 次牛顿迭代电流值,A;V_k 对应第 k 次迭代计算所得电压值,V。

最大功率匹配求解 R_s 和 R_{sh} 的流程见图 3。

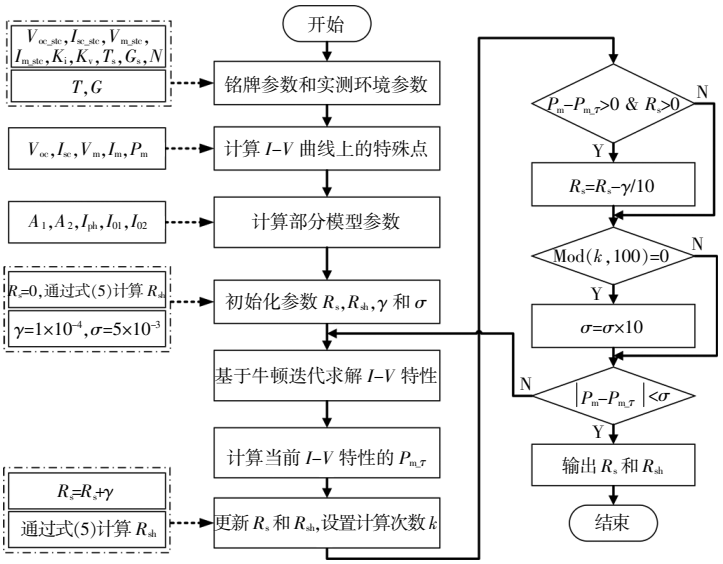


图 3 基于最大功率匹配的 R_s 和 R_{sh} 求解方法

Fig.3 Model parameter identification method based on MPM

图 3 中:K_i 为短路电流温度系数,%/℃;K_v 为开路电压温度系数,%/℃;T 为实测温度,℃;T_{stc} 为标准测试条件下的温度,℃;N_c 为光伏电池串联个数;P_{m_τ} 为理论 I–V 曲线上的最大功率,W;P_m 为实测 I–V 曲线上的最大功率,W;σ 为 P_{m_τ} 和 P_m 间的差值,作为判断程序停止的阈值,取值为 5×10^{-3} W;τ 为迭代次数;γ 为 R_s 的迭代步长,取值为 10^{-4} Ω。

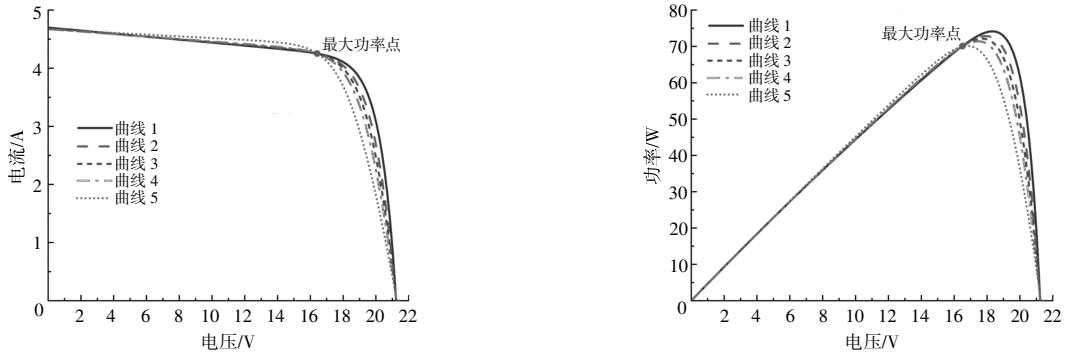
首先利用解析法求解 I_{ph},I_{01},I_{02},n_1 和 n_2 的数值,再利用式(5)[14]求解 R_{sh} 的数值,并初始化 R_s 的数值;然后,采用牛顿迭代法求解当前理论 I–V 曲线,通过对比理论与实测 I–V 曲线上的最大功率偏差 σ 来决定是否进行下一轮迭代,当 σ 小于设定阈值时,算法流程结束,输出所求解模型参数 I_{ph},I_{01},I_{02},n_1,n_2,R_s,R_{sh}。

$$\begin{cases} R_{sh}=\dfrac{V_m+N_cI_mR_s}{N_cI_{ph}-N_cI_{01}A-N_cI_{02}B-N_cI_m} \\ A=\exp\left(\dfrac{V_m+N_cI_mR_s}{N_cn_1V_{th}}\right)-1 \\ B=\exp\left(\dfrac{V_m+N_cI_mR_s}{N_cn_2V_{th}}\right)-1 \end{cases} \tag{5}$$

式中:I_m 和 V_m 为实测 I–V 曲线最大功率点的电流和电压,A 和 V。

采用光伏组件的实测 I–V 曲线对最大功率匹配法进行实验验证。光伏组件的型号为 Shell–SP70[13],其铭牌参数 I_{sc},V_{oc},I_m,V_m,N_c,K_i 和 K_v 分别为 4.7 A,21.4 V,4.25 A,16.5 V,36,0.043%/℃和 –0.36%/℃。基于最大功率匹配法计算所得的模型参数 I_{ph},I_{01},I_{02},n_1,n_2,R_s 和 R_{sh} 分别为 4.7 A,4.202×

10^{-10} A,4.202×10^{-10} A,36,72,0.432 Ω 和 66.193 Ω。图 4 展示了计算 Shell-SP70 模型参数过程中 *I*-*V* 曲线和 *P*-*V* 曲线的变化规律。曲线 1 代表 R_s=0 时的计算结果,曲线 5 为 R_s 最终值对应的计算结果,曲线 2,3,4 代表最大功率匹配计算 R_s 和 R_{sh} 过程中相应的理论曲线。



(a)MPP 匹配过程的 *I*-*V* 曲线　　(b)MPP 匹配过程的 *P*-*V* 曲线

图 4　最大功率匹配法对 Shell-SP70 的 DDM 模型参数求解的主要过程

Fig.4 Solving procedure of DDM parameters for Shell-SP70 by the MPM

2　光伏阵列建模流程

以 IDDM 和 RBM 为理论基础,结合光伏阵列运行状态的分析,提出光伏阵列的建模方法。该光伏阵列建模方法以光伏电池为基本单位，通过分析光伏阵列的运行状态来计算相应的 *I*-*V* 特性。本文建模对象为 22 个 TSM-240 多晶硅组件的串联式光伏阵列,其建模流程如图 5 所示。下面将对建模过程进行具体描述。

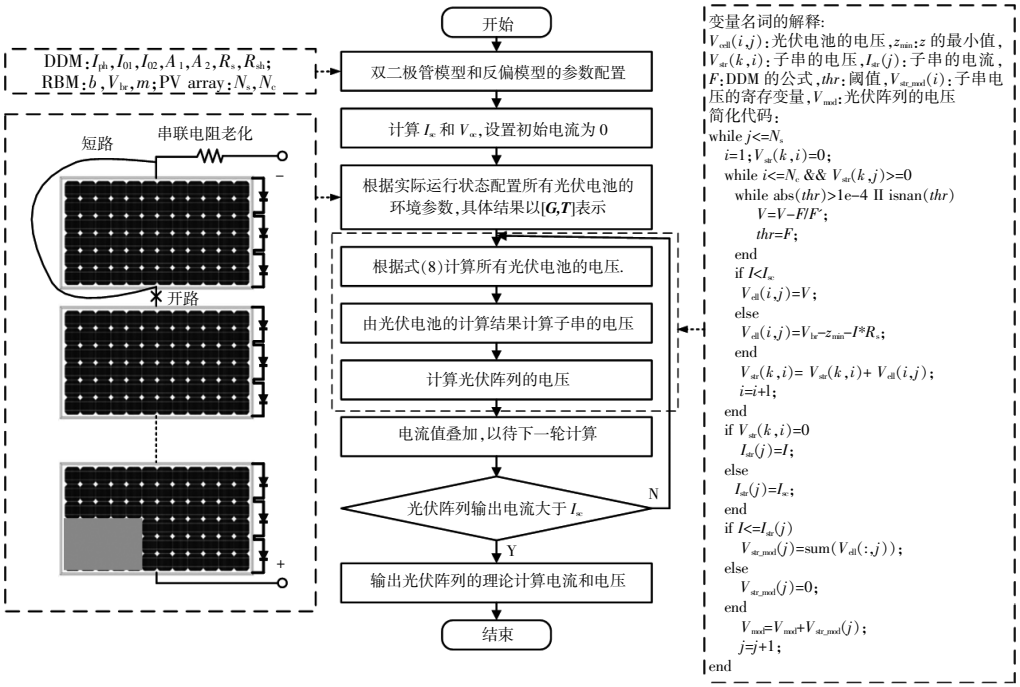


图 5　光伏阵列建模方法流程

Fig.5 Flow of the Photovoltaic array modeling method

①分析光伏阵列的运行状态。光伏阵列的运行状态主要分为正常、短路(Short-Circuit,SC)、局部遮挡(Partial Shading,PS)、串联和并联电阻退化 (Series and Parallel Resistance Degradation, SRD and PRD)。根据实验需求,选择仿真曲线的所属类型,具体实现见后续步骤。

②配置光伏阵列的环境参数。建模对象为 22 个光伏组件串联的阵列。每个组件包含 3 个子串。每个子串由 20 个电池片串联构成。因此,光伏阵列所有电池片对应的环境参数[***G***,***T***]为

$$\begin{cases}\boldsymbol{G}=\begin{bmatrix}G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1j}\\ G_{21} & G_{22} & \cdots & G_{2j}\\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots\\ G_{i1} & G_{i2} & \cdots & G_{ij}\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{T}=\begin{bmatrix}T_{11} & T_{12} & \cdots & T_{1j}\\ T_{21} & T_{22} & \cdots & T_{2j}\\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots\\ T_{i1} & T_{i2} & \cdots & T_{ij}\end{bmatrix}\end{cases}(i\in[1,N_c],j\in[1,N_s]) \tag{6}$$

式中:N_c=20,N_s=60,分别为一个子串中电池片数和光伏阵列的子串数;G_{ij}为每个电池片对应的辐照度,W/m²;T_{ij}为每个电池片对应的温度,℃。

当部分光伏组件被遮挡时,可将对应电池片的辐照度乘上透光率,再代入光伏电池模型中进行计算。

③对光伏电池进行分类并计算对应电压。结合 IDDM 和 RBM 的理论模型,采用牛顿迭代法求解光伏电池电压。I–V 求解的起点为 V_{oc},具体方法和原理为

$$\begin{cases}F(V_{cell})=I_{sc}(j)-I_{01}\left[\exp\left(\dfrac{V_{cell}+I_{cell}R_s}{n_1V_{th}}\right)-1\right]-\\ I_{02}\left[\exp\left(\dfrac{V_{cell}+I_{cell}R_s}{n_2V_{th}}\right)-1\right]-\dfrac{V_{cell}+I_{cell}R_s}{R_{sh}}-\\ I_{cell}(I_{cell}\leqslant I_{sc}(j))\\ V_{cell,\tau+1}=\dfrac{F(V_{cell,\tau})}{F(V_{cell,\tau})'}\end{cases} \tag{7}$$

$$V_{cell}=V_{br}-z_{min}-I_{cell}R_sV_{cell}(I_{cell}>I_{sc}(j)) \tag{8}$$

式中:z_{min}为 z 的最小实根,$z=V_{br}-V-IR_s$[12]。

$$I_{sc}(j)=\frac{I_{ph}}{1+\dfrac{R_s}{R_{sh}}} \tag{9}$$

$$\frac{1}{R_{sh}}\cdot z^4+\left(I_{ph}-I_{cell}-\frac{V_{br}}{R_{sh}}\right)z^3+b\cdot V_{br}^3\cdot z-b\cdot V_{br}^4=0 \tag{10}$$

I_{ph}的数值与 G 呈正比关系,因此式(9)是计算各子串 I_{sc} 的关键。当仿真的类型为 SRD 或 PRD 时,将式(3)中 R_s 数值增大和 R_{sh} 数值减小即可实现。

④计算子串的电流 $I_{str}(k,j)$和电压 $V_{str}(k,j)$。$I_{str}(k,j)=I_{str}(k-1,j)+\Delta I$;$\Delta I=I_{sc}(j)/\delta$,$\delta$ 为 I–V 曲线的点数;k 为计算次数。利用式(7)和式(8)计算光伏电池的电压 $V_{cell}(i,j)$,电池片的电压叠加即可求得子串电压 $V_{str}(k,j)$和 $V_{str_mod}(k,j)$。$V_{str}(k,i)$用于条件判断,确定子串的电流是否等于 $I_{sc}(j)$,而 $V_{str_mod}(k,j)$用于计算阵列电压。具体的计算方法和原理为

$$\begin{cases}V_{str}(k,i)=V_{str}(k,i-1)+V_{cell}(i,j)\\ V_{str_mod}(k,j)=\sum_{i=1}^{N_c}V_{cell}(i,j)\\ V_{mod}(k)=\sum_{j=1}^{N_s}V_{str_mod}(k,j)\end{cases} \tag{11}$$

⑤计算光伏阵列电流和电压。通过式(11)将子串的电压进行叠加。利用 $V_{str}(k,i)$确定不同子串的 $I_{sc}(j)$。由于建模对象为串联式的光伏阵列,因此阵列的电流与 $I_{str}(j)$一致,短路电流为所有子串 $I_{sc}(j)$中的最大值。若仿真短路故障的 I–V 曲线,减少 N_s 的数值即可。当 $k<\delta$ 时,则返回步骤③继续运行;若不是,则结束流程,输出光伏阵列的电流和电压。

通过上述步骤,可计算不同运行状态下光伏阵列的 I–V 特性,包括正常状态、局部阴影遮挡、组件或旁路二极管被短路以及光伏阵列老化等。

3 实验验证与分析

3.1 单、双二极管模型的性能对比

结合光伏组件 Photowatt–PWP 201 与 ST40[13] 的理论模型参数和实测 I–V 验证 SDM 和 DDM。

首先,利用光伏组件 Photowatt–PWP 201 的数据来对比 SDM 和 DDM 的性能。基于并行小生境粒子群优化算法(Niche Particle Swarm Optimization in Parallel Computing,NPSOPC)和基于重启策略的边界约束 Nelder Mead 单纯形算法(restart–based bound constrained Nelder–Mead simplex method,rbcNM)[15]Photowatt–PWP 201 的 4 种模型参数、实测与理论电流序列的均方根误差(Root Mean Square Error,RMSE)结果见表 1。

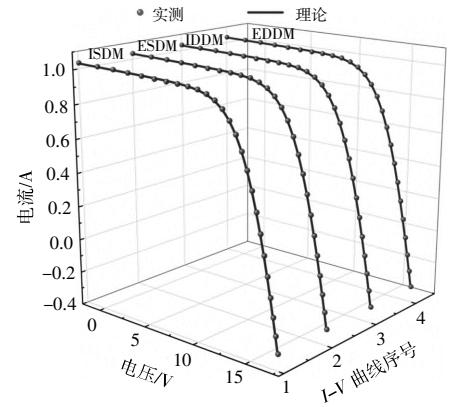
表 1 Photowatt–PWP 201 的 SDM,DDM 隐式和显式模型参数

Table 1 Model parameters of ISDM and EDDM for the Photowatt–PWP 201

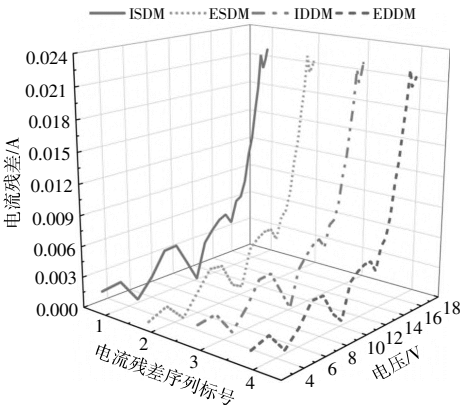
参数	ISDM	ESDM	IDDM	EDDM
I_{ph}/A	1.031	1.032	1.031	1.031
I_{01}/A	3.483×10^{-6}	2.677×10^{-6}	4.154×10^{-7}	2.638×10^{-6}
I_{02}/A	–	–	3.067×10^{-6}	2.527×10^{-11}
n_1	48.643	47.657	48.643	47.598
n_2	–	–	48.643	47.598
R_s/Ω	1.201	1.232	1.201	1.236
R_{sh}/Ω	982.404	748.451	981.983	821.641
RMSE/A	2.425×10^{-3}	2.057×10^{-3}	2.421×10^{-3}	2.016×10^{-3}
参考方法	NPSOPC	NPSOPC	rbcNM	rbcNM

由表 1 可见，前两种模型分别为隐式单二极管模型(Implicit Single Diode Model,ISDM)、显式单二极管模型 (Explicit Single Diode Model, ESDM)，另两种模型分别为 IDDM 和显式双二极管模型 (Explicit Double Diode Model,EDDM)。4 种模型的 I_{ph} 基本一致,n_1 和 R_s 也较为接近,但 R_{sh} 存在一定差别。ISDM,ESDM 和 EDDM 的 I_{01} 处于同 1 个数量级,IDDM 的 I_{01} 高于前三者 1 个数量级。IDDM 和 EDDM 的 n_2 比较接近,但 I_{02} 相差较大。4 种模型中,EDDM 的精度最高,RMSE 为 2.016×10^{-3} A,ISDM 的精度最低,RMSE 为 2.425×10^{-3} A。4 种模型按计算精度从高到底排序:EDDM,ESDM,IDDM 和 ISDM。从 4 种模型对光伏组件 Photowatt-PWP 201 的理论计算结果来看,DDM 的精度高于 SDM。

Photowatt-PWP 201 的 SDM,DDM 隐式和显式模型的性能对比结果如图 6 所示。



(a)实测与理论 *I-V* 曲线的对比



(b)实测与理论 *I-V* 曲线的电流残差

图 6　Photowatt-PWP 201 的 SDM,DDM 隐式和显式模型的性能对比结果

Fig.6 Comparisons of Photowatt-PWP 201's SDM and DDM implicit and explicit functions

3.2　隐式和显式双二极管模型的性能对比

ST40 为 42 块薄膜光伏电池构成的光伏组件[13],实验数据包括 5 种环境条件下模型参数与相应的实测 *I-V* 曲线。NPSOPC 和 rbcNM[15]计算的模型参数及两种模型精度见表 2。

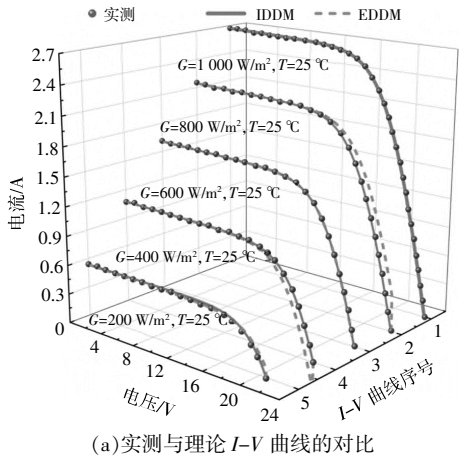
表 2　ST40 的 DDM 模型参数

Table 2 Model parameters of DDM for the ST40

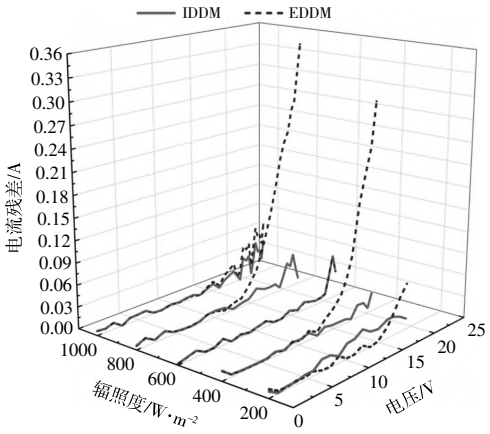
环境条件	200 W/m² 25 ℃	400 W/m² 25 ℃	600 W/m² 25 ℃	800 W/m² 25 ℃	1 000 W/m² 25 ℃
I_{ph}/A	0.532	1.071	1.606	2.143	2.678
I_{01}/μA	1.286	0.812	1.196	1.035	1.196
I_{02}/μA	1.503	74.719	47.383	1.125	62.278
n_1	1.484	1.438	1.477	1.462	1.477
n_2	3.101	3.678	3.605	3.305	3.724
R_s/Ω	1.140	1.147	1.123	1.138	1.121
R_{sh}/Ω	314.232	322.026	339.454	313.832	332.997
$RMSE_{_IDDM}$/A	0.018 83	0.016 40	0.017 19	0.009 47	0.017 19
$RMSE_{_EDDM}$/A	0.030 28	0.146 32	0.017 22	0.101 62	0.020 76
参考方法	NPSOPC	NPSOPC	rbcNM	rbcNM	rbcNM

由表 2 可见:I_{ph} 的变化规律仍与辐照度呈正相关;I_{01} 的数值较为接近,为 0.8~1.3 μA;I_{02} 的数值变化较大，第 1 组和第 4 组的 I_{02} 为 1.503 μA 和 1.125 μA，其余 3 组的相应数值分别为 74.719,47.383,62.278 μA。5 组模型参数中,n_1 和 n_2 的数值较为接近,R_s 的取值为 1.13 Ω 左右,R_{sh} 的取值为 313~340 Ω。IDDM 的 RMSE 分别为 0.018 83,0.016 40,0.017 19,0.009 47,0.017 19 A,EDDM 的 RMSE 分别为 0.030 28,0.146 32,0.017 22,0.101 62,0.020 76 A。IDDM 和 EDDM 最高精度分别为 0.009 47 A 和 0.017 22 A，最低精度分别为 0.018 83 A 和 0.146 32 A,EDDM 的精度明显低于 IDDM。

ST40 模型与实测值的对比见图 7。



(a)实测与理论 *I-V* 曲线的对比



(b)实测与理论 *I–V* 曲线的电流残差

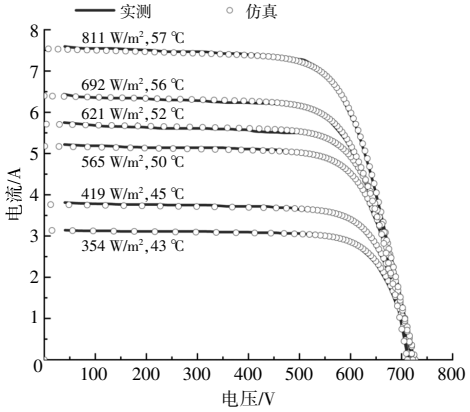
图 7 ST40 的 DDM 模型参数相应 *I–V* 曲线和电流残差

Fig.7 Comparison results of *I–V* curves and current residuals for the ST40

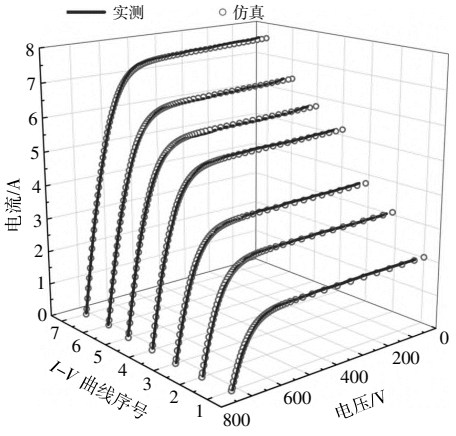
图 7(a)中,EDDM 的理论 *I–V* 曲线与实测 *I–V* 曲线出现明显误差,辐照度为 400 W/m² 和 800 W/m² 时的差异更为突出,辐照度为 200 W/m² 时理论 *I–V* 曲线与实测 *I–V* 曲线间存在可观测的误差。IDDM 理论 *I–V* 曲线与实测 *I–V* 曲线基本重合,无明显差异。图 7(b)中进一步证明了 EDDM 的精度劣于 IDDM,除了辐照度为 1 000 W/m² 和 800 W/m² 的组别,其他 3 组 EDDM 的电流残差序列在电压较高区域的数值远大于 IDDM 的相关数值。从 ST40 的实验结果来看,EDDM 不适用于以薄膜电池为基础的光伏组件。综合上述光伏组件的实验结果,IDDM 的精度较高,适应性强,较适合作为光伏阵列建模的基础理论模型。

3.3 光伏阵列建模方法的仿真计算结果分析

不同辐照度和温度下光伏阵列的正常 *I–V* 曲线如图 8 所示。



(a)*I–V* 曲线的二维图像



(b)*I–V* 曲线的三维图像

图 8 不同辐照度和温度下正常的理论 *I–V* 曲线计算结果

Fig.8 Normal *I–V* curves at different irradiance and temperature

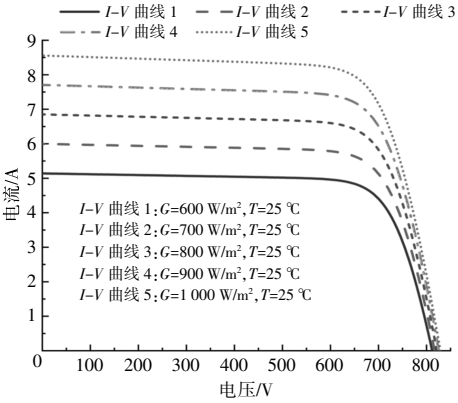
由图 8 可见,6 组理论 *I–V* 曲线与实测 *I–V* 曲线间电流序列的 RMSE 数值为 0.015~0.085 A,RMSE 的平均值为 0.024 3 A,其计算精度能够满足较为广泛的应用场合。

辐照度不同、温度相同和辐照度相同、温度不同时光伏阵列的理论 *I–V* 曲线见图 9。

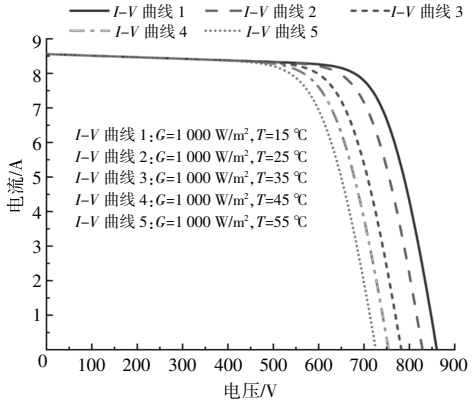
由图 9 可以发现,光伏阵列的短路电流与辐照度呈正相关,即辐照度越高,短路电流越大;开路电压与温度呈负相关,即温度越高,开路电压越小。

光伏阵列在不同局部阴影遮挡条件下的 *I–V* 特性见图 10。

图 10(a)模拟了光伏阵列在单个局部阴影遮挡不同透光率时的 *I–V* 特性;图 10(b)模拟了多个局部阴影遮挡条件下光伏阵列的 *I–V* 特性。图



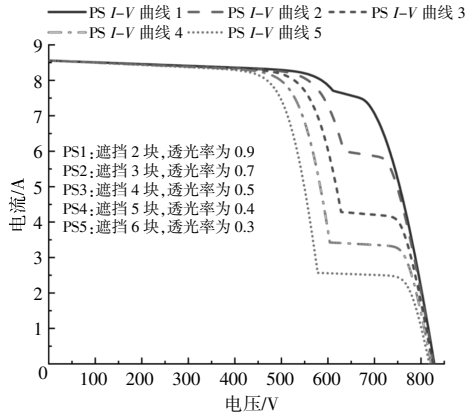
(a)*G* 不同 *T* 相同的 *I–V* 曲线



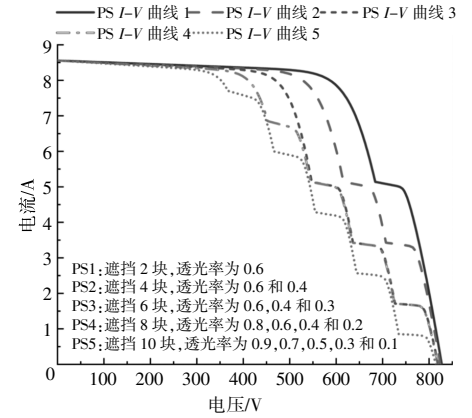
(b)T 不同 G 相同的 I–V 曲线

图 9　辐照度相同和温度不同与温度相同和辐照度不同条件下的理论 I–V 曲线

Fig.9 Theoretical I–V curves for the same irradiance and the same temperature



(a)单个局部遮挡下的 I–V 曲线



(b)多个局部遮挡下的 I–V 曲线

图 10　单处阴影遮挡和多处阴影遮挡配置条件下的理论 I–V 曲线

Fig.10 Theoretical I–V curves for single and multiple partial shading

10 (a) 中的局部阴影遮挡有 5 种故障配置,为 PS1~PS5,分别遮挡不同数量的组件,并且遮挡物透光率也不相同。图 10(b)中故障配置有 5 种,为 PS1~PS5, 模拟多局部阴影遮挡情况。对比图 10 (a),(b)可以发现,遮挡物的透光率类型与 I–V 特性中的台阶数呈正相关,即透光率种类越多,台阶数越多。图 10 表明,本文提出的光伏阵列建模方法可模拟光伏阵列在各种局部阴影遮挡条件下的 I–V 特性, 有利于后续对光伏阵列局部阴影遮挡故障的深入研究。

图 11 为被短路光伏组件数量不同 (SC1~SC5)时光伏阵列的 I–V 特性。

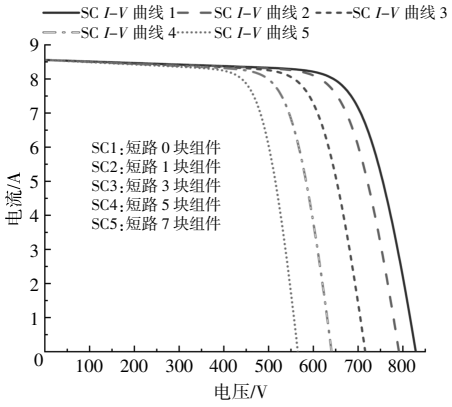


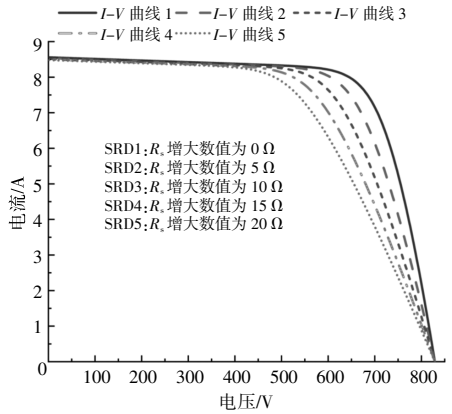
图 11　不同数量组件被短路时的理论 I–V 曲线

Fig.11 Theoretical I–V curves when different PV modules are short-circuited

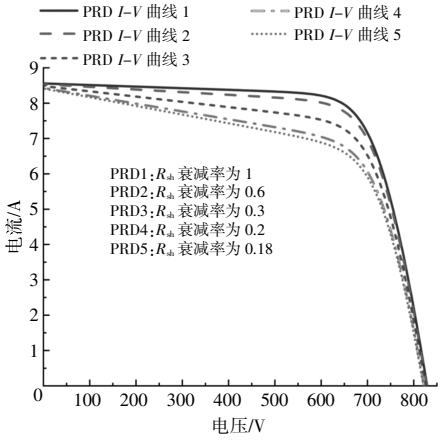
从图 11 可以观察到, 被短路组件的数量与 I–V 特性的开路电压呈负相关, 即被短路组件数量越多,则开路电压越小。

图 12 模拟了光伏阵列发生退化时的 I–V 特性。其中: 图 12 (a) 为等效串联电阻发生退化(SRD1~SRD5)时的 I–V 曲线;图 12(b)为等效并联电阻发生退化(PRD1~PRD5)时的 I–V 曲线。

R_s 的数值变化与 I–V 特性的最大功率呈负相关,即 R_s 数值越大,最大功率越小。R_{sh} 的数值变化与 I–V 特性上的最大功率呈正相关,即 R_{sh}



(a)SRD 不同程度时的 I–V 曲线



(b)PRD 不同程度时的 *I–V* 曲线

图 12 串联电阻不同程度增大和并联电阻不同程度衰减时相应的理论 *I–V* 曲线

Fig.12 The theoretical *I–V* curves for the different increasing R_s decreasing R_{sh}

的数值越大,最大功率越大。通过对图 11 和图 12 的实验分析,可明确看出光伏阵列发生短路故障、等效串联电阻老化或等效并联电阻老化后,随故障程度加深时光伏阵列 *I–V* 特性的变化规律。

4 结束语

本文提出了一种基于 IDDM 和 RBM 的光伏阵列建模方法,针对光伏阵列在复杂运行状态下的建模需求,提供了一种高精度、高适应性的解决方案。通过引入 IDDM 与 RBM,结合光伏阵列运行状态的分析,建立了考虑反偏特性的 IDDM,并基于实测数据验证了模型参数的求解方法。实验结果表明,IDDM 在描述光伏阵列 *I–V* 特性方面具有显著优势,为最佳基础理论模型。本文所提建模流程能够在不同环境条件、局部阴影遮挡、短路组件数量及等效串联和并联电阻退化状态下,生成光伏阵列理论 *I–V* 曲线。基于上述理论曲线的分析,总结了光伏阵列 *I–V* 特性与环境参数及故障条件之间的映射关系。

本文研究为光伏阵列建模提供了新思路,可用于光伏系统的特征提取及故障诊断研究。实验结果验证了所提方法的有效性与实用性,为后续光伏系统性能评估及故障预测研究提供了坚实的理论与数据支持。

参考文献:

[1] 吴佳兵,丁坤,陈富东,等.计及反射辐射的分布式光伏阵列建模研究[J].可再生能源,2020,38(2):233-238.

[2] 朱青云,刘凡,曾伟.基于 *I–V* 曲线逆推法的光伏组件故障诊断策略[J].可再生能源,2024,42(8):1029-1036.

[3] 马骏.局部阴影下光伏阵列的建模与仿真分析[J].电子世界,2019(9):39-40,43.

[4] 肖文波,章文龙,李欣蕊.光伏电池及阵列的老化故障研究[J].实验室研究与探索,2024,43(2):60-64,131.

[5] Chen X,Ding K,Zhang J,et al.A two-stage method for model parameter identification based on the maximum power matching and improved flow direction algorithm [J].Energy Conversion and Management,2023,278:116712.

[6] 雷雨,李光辉,王伟胜,等.计及光伏阵列的光伏发电阻抗建模与特性分析[J].中国电机工程学报,2024,44(13):5122-5135.

[7] Li X,Mi J,Zhang Y,et al.Current-injected photovoltaic array for concentrated space solar power station [J]. Frontiers in Energy Research,2023,11:1140537.

[8] Chen Z,Wu L,Cheng S,et al.Intelligent fault diagnosis of photovoltaic arrays based on optimized kernel extreme learning machine and *I–V* characteristics [J]. Applied Energy,2017,204:912-931.

[9] Chen Z,Yu H,Luo L,et al.Rapid and accurate modeling of PV modules based on extreme learning machine and large datasets of *I–V* curves [J].Applied Energy, 2021,292:116929.

[10] Li Y,Ding K,Zhang J,et al.A fault diagnosis method for photovoltaic arrays based on fault parameters identification[J].Renewable Energy,2019,143:52-63.

[11] 丁坤,翁帅,张经炜,等.基于改进混沌粒子群算法的光伏阵列建模方法研究[J].可再生能源,2021,39(3):324-332.

[12] Liu Y,Ding K,Zhang J,et al.Fault diagnosis approach for photovoltaic array based on the stacked auto-encoder and clustering with *I–V* curves [J].Energy Conversion and Management,2021,245:114603.

[13] Gao X,Cui Y,Hu J,et al.Lambert W-function based exact representation for double diode model of solar cells:Comparison on fitness and parameter extraction[J]. Energy Conversion and Management,2016,127:443-460.

[14] 张俊红.光伏阵列及其关键技术的研究[D].北京:北京交通大学,2020.

[15] Lin X,Wu Y.Parameters identification of photovoltaic models using niche-based particle swarm optimization in parallel computing architecture[J].Energy,2020,196: 117054.

Modeling method for photovoltaic arrays based on implicit double-diode model and reverse bias model

Wu Haifei[1], Ding Kun[2], Su Ying[1], Chen Xiang[2], He Yaoxi[3], Ji Fangxu[3], Chen Quanru[2]
(1.Three Gorges Group Science and Technology Research Institute, Beijing 101100, China; 2.College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China; 3. China Yangtze Power Renewables Co.,Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: To address the limitations of traditional photovoltaic (PV) array modeling methods in terms of computational accuracy and portability,this study proposes a novel PV array modeling approach based on the Implicit Double Diode Model (IDDM) and the Reverse Bias Model (RBM). The proposed method first configures environmental parameters according to the actual operating conditions of the PV array. Subsequently,it calculates the current and voltage characteristics of PV cells under various operating states based on the theoretical frameworks of IDDM and RBM. Following this,the method determines the current and voltage characteristics of PV array substrings and finally outputs the current-voltage (I-V) characteristics of the PV array. Experimental results demonstrate that the proposed method achieves high simulation accuracy,with a theoretical-to-actual current sequence error of only 0.015 A. Additionally,the model effectively simulates the I-V characteristics of PV arrays under scenarios such as partial shading,short circuits,and degradation of equivalent series and parallel resistances. This modeling approach provides a robust theoretical foundation and data support for PV power plant fault diagnosis and analysis.

Keywords: photovoltaic array; modeling approach; double diode model; reverse bias model