

[光伏发电系统]

屋面光伏发电系统仿真模型的研究与验证

文/孙浩哲¹ 嵇世浩² 王乃琦² 张进³ 于国梁¹ 张智新⁴

1. 山东睿冠电能热力有限公司；2. 济南能源工程集团有限公司；

3. 山东济莱新能源有限公司；4. 山东和同信息科技股份有限公司

精确太阳能房屋仿真模型是评估光伏发电系统设计方案及测试系统控制算法的重要工具。基于Modelica语言设计开发了一种新型PV（光伏）系统优化模型，该模型包含两个*i-v*特性模型，采用单二极管和双二极管两种建模方法。同时，结合位于济南市屋面光伏系统测量数据对建模效果进行验证。结果表明，两种模型均能准确地计算出模块的直流功率输出。

建筑领域光伏利用方式包括屋面光伏、外墙集成光伏和区域独立光伏^[1]。建筑综合能源系统与光伏发电集成设计非常复杂，而仿真工具可以对设计方案和控制算法效果进行快速有效地评估。

本文比较了单二极管和双二极管两种光伏系统建模方法，通过济南市一个屋面光伏系统实际测量数据对两种模型进行了比较和验证。

建模方法概述

1. 模型定义

Modelica语言是一种专用于大型、复杂的面向对象的系统建模语言。面向对象和非因果联系是其两个重要特征^[2]。本文采用Modelica语言建立PV发电系统模型，旨在帮助相关设计和研究人员，因此参数化工作应考虑有效的可用信息。另外，模型执行速度要快，以便快速评估不同配置对系统性能的影响。综上，为模型进行以下定义：屋面或独立的光伏系统模型；能源性能评估的普适性；能够简单扩展和调整的模块化建模方法；基于易获取的数据的简单化参数；能够快速进行性能模拟。

2. 光伏建模方法

本文根据PV等效电路，将物理模型分为单二极

管和双二极管模型，并比较不同方法的准确性、计算工作量和参数化工作量。

验证方法：根据测量数据确定电特性选定点，包括最大功率点（MPP）、短路电流 I_{sc} 和开路电压 V_{oc} 。

（1）单二极管方法

将PV电池表示为二极管电路物理模型方法有两种：单二极管和双二极管方法，如图1、图2所示。单二极管模型假设光伏组件电流 I_{pv} 等于光电流 I_{ph} 、漏电流 I_{sh} 和暗电流 I_d 的和。其中， I_d 可由肖克利方程推导

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{u + IR_s}{a}} - 1 \right) \quad (1)$$

式中， a 为修改后的理想因子。

$$a = \frac{N_s n_i k T_{cell}}{q} \quad (2)$$

式中， I_d 和 a 分别与饱和电流 I_s 、理想因子 n_i 、基本电荷 q 、玻尔兹曼常数 k 和电池温度 T_{cell} 有关； R_s 为导致电压损耗的串联电阻； R_{sh} 为导致漏电流 I_{sh} 的分流电阻。

*I-V*特性结果是

$$I = I_{hp} - I_d - I_{sh} \quad (3)$$

$$I = I_{hp} - I_s \left(\frac{u + IR_s}{a} - 1 \right) - \frac{u + IR_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

上述方程有五个未知参数 I_{ph} 、 I_s 、 a 、 R_s 和 R_{sh} ，所以称为5p建模方法，这种方法是准确度、参数化工作和计算量之间的一种折中^[3]。

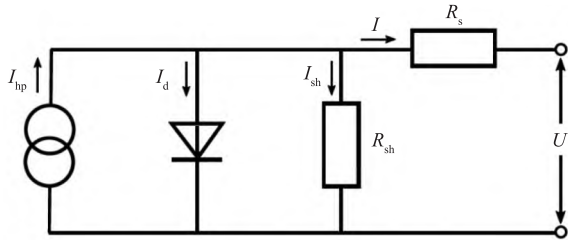


图1 单二极管等效电路

(2) 双二极管方法

双二极管模型是单二极管方法的改进，其在电等效表示中引入第二个二极管如见图2所示。

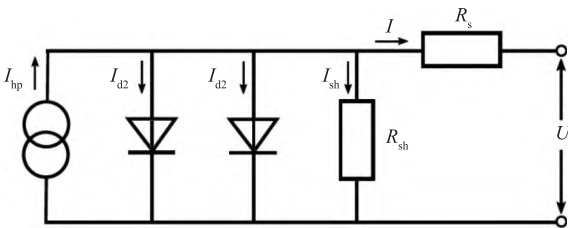


图2 双二极管等效电路

根据该模型，PV组件 I - V 特性可以描述为

$$0 = I_{hp} - I_{s1} \left(e^{\frac{U + IR_s}{n_{ser} U_t} - 1} \right) - I_{s2} \left(e^{\frac{U + IR_s}{2n_{par} U_t} - 1} \right) - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (5)$$

$$\frac{U}{n_{ser}} - \frac{I}{n_{par}} \frac{R_s}{R_{sh}} - \frac{I}{n_{par}} \quad (6)$$

$$U_t = k \frac{T_{cell}}{e} \quad (7)$$

$$I_{hp} = (c_1 + c_2 0.001 T_{cell}) H \quad (8)$$

$$I_{s1} = c_{s1} T_{cell}^3 e^{\frac{E_g}{kT_{cell}}} \quad (9)$$

$$I_{s2} = c_{s2} \sqrt{T_{cell}} e^{\frac{E_g}{2kT_{cell}}} \quad (10)$$

式中，6个参数（ R_s 、 R_{sh} 、 c_1 、 c_2 、 c_{s1} 、 c_{s2} ）无法直接从厂家数据表中获取，需要通过在不同温度下模块的 I - V 特性进行计算。双二极管方法准确性很高，但由于需要拟合额外的过程参数，因此计算量更大，参数化也更复杂^[4]。

方法

1. 模型设计和实现

(1) 模型基本结构

通过PV电气部分模型计算IV特性进行单二极管和双二极管方法进行建模。PV光学部分模型计算的PV材料转换率要作为热学和电学模型的输入变量。模型的输入参数包括天顶角、入射角、漫射水平辐照、倾斜表面辐照、水平表面辐照、干球温度和风速等天气信息。此外，如果不使用参数，也可用实际输入来设定倾斜和方位角。本模型使用一个输出连接器输出直流电源、电流、电压和电池温度作为额外模型变量。

(2) 单二极管建模方法

首先采用单二极管方法来实现PV电气部分模型，该模型有5个未知参数需要计算，计算这些参数有两种方法：迭代法和解析法。由于迭代法计算效率较低，采用解析法进行计算。虽然准确率略低，但它不受初始化问题的影响，并具有一定的鲁棒性。基于厂家数据采用朗伯W函数计算推导出 I - V 特性公式。此外，还为5个未知参数的初始化提供了明确公式。

$$I_{mp} = I_{hp} \left(l - \frac{1}{w} l \right) - a \frac{(w-1)}{R_{sh}} \quad (11)$$

$$U_{mp} = a(w-1)R_s I_{mp} \quad (12)$$

式中， w 为风速，但是还需要考虑温度或辐照影响。

$$\frac{a}{a_0} = \frac{T_{cell}}{T_{cell,0}} \quad (13)$$

$$I_{hp} = \frac{H_{tilt}}{H_{tilt,0}} \left[I_{hp} + \mu_{1,K} (T_{cell} - T_{cell,0}) \right] \quad (14)$$

$$\frac{I_s}{I_{s,0}} = \left(\frac{T_{cell}}{T_{cell,0}} \right)^3 e^{\left(\frac{E_{g,0}}{kT_{cell,0}} - \frac{E_{g,0}}{kT_{cell}} \right)} \quad (15)$$

$$\frac{E_g}{E_{g,0}} = 1 - C(T_{cell} - T_{cell,0}) \quad (16)$$

假设 R_{sh} 串联电阻不变，则有

$$\frac{R_{sh}}{R_{sh,0}} = \frac{H_0}{H} \quad (17)$$

$$R_s = R_{s,0} \quad (18)$$

这种根据厂家数据的方法很容易参数化，提出的方法包括预定义变量的初始值，使用式（12）~式（17）计算对应值。尽管简单，但单

二极管方法是基于对并联和串联电阻行为的有效模拟。

(3) 双二极管建模方法

将双二极管模型表示为

$$0 = I_{hp} - I_{s1} \left[e^{\frac{\frac{U_{mp} + I_{mp} R_s}{n_{ser} + n_{par}} - 1}{U_t}} - 1 \right] - I_{s2} \left[e^{\frac{\frac{U_{mp} + I_{mp} R_s}{2U_t} - 1}{U_t}} - 1 \right] - \frac{U_{mp} + I_{mp} R_s}{n_{ser} + n_{par} R_{sh} n_{par}} I_{mp} \quad (18)$$

$$0 = \frac{I_{mp}}{n_{par}} r - \lambda \frac{I_{Sat1}}{U_t} e^{\frac{\frac{U_{mp} + I_{mp} R_s}{n_{ser} + n_{par}}}{U_t}} + \frac{I_{Sat2}}{U_t} e^{\frac{\frac{U_{mp} + I_{mp} R_s}{2U_t}}{U_t}} + \frac{1}{R_{sh}} \quad (19)$$

$$0 = \frac{U_{mp}}{n_{ser}} - \lambda \frac{R_s I_{s1}}{U_t} e^{\frac{\frac{U_{mp} + I_{mp} R_s}{n_{ser} + n_{par}}}{U_t}} + \frac{R_s I_{s2}}{2U_t} e^{\frac{\frac{U_{mp} + I_{mp} R_s}{2U_t}}{U_t}} + \frac{R_s}{R_{sh} + 1} \quad (20)$$

式中，模块电压 U_{mp} 和电流 I_{mp} 为未知参数。

在计算MPP电流 I_{mp} 和电压 U_{mp} 时，采用拉格朗日乘数法找到最大功率 $P_{mp} = I_{mp} \times U_{mp}$ ，即可得到 I_{mp} 、 U_{mp} 和 λ 的三个方程组。通过在双二极管模型等效电路中加入第二个二极管，可更精确表示PV模块电学特性。但其缺点是6个参数无法直接从厂家提供数据中直接推导，而必须通过优化计算来确定。

2. 现有研究

以上两种建模方法都在现有研究中得到了部分验证^[5]。

3. 数据验证

通过图3所示屋面光伏系统验证单、双二极管模型的准确性，该建筑位于山东济南市，有84个光伏组件，总功率为9.24 kW，安装在建筑屋顶。



图3 2024年5月1日光伏组件和发电系统布置图

系统分为42组，每组2个光伏模块，使用iCleanPower智能监测平台，选择其中一个模块进行监测，每5 min记录以下数据：模块温度（使用

模块背面的数字传感器）；总辐照水平（使用热量计）；使用微型气象站风速、风向和外部空气温度；使用如图4所示的监控系统，每个模块组的电力（ 4×120 W和 2×115 W）。

实验结果

1. 模型应用

(1) 单二极管模型应用

单二极管型号参数基于厂家数据，分别对115 Wp（和120 Wp模块）进行参数化： $I_{sc,0} = 1.69$ A (1.71 A)， $V_{oc,0} = 101.2$ V (102.3 V)， $e_{ta0} = 0.122$ (0.128)， $\alpha_{isc,0} = 0.01\%/K$ ， $\beta_{voc,0} = -0.27\%/K$ ， $\gamma_{PMPP,0} = -0.32\%/K$ ， $P_{MPP,0} = 115$ W。

(2) 双二极管模型应用

对不同电池温度下 U - I 特性曲线进行分析，样本系统由四个模块组成，峰值功率分别为115 W和120 W。对于双二极管模型，无法直接将测量数据与模拟数据进行比较。为验证双二极管模型准确性，生成第二个验证集，单、双二极管模型都使用110 Wp模块进行参数化，作为双二极管模型的合理性检验。

为获得6个模型参数的最佳组合，采用成本函数计算双二极管模型模块电流与厂家提供的20个不同电压差值的平方。使用GenOpt的Hooke-Jeeves算法，计算参数值： $R_s = 0.027\ 484\ 527\ \Omega$ ， $R_{sh} = 500.0\ \Omega$ ， $c_1 = 0.001\ 196\ 205\ 2$ ， $c_2 = 0.001\ 542\ 755$ ， $c_{s1} = 9.490\ 919$ ， $c_{s2} = 0.007\ 634\ 368$ 。

2. 模型验证与合理性检验

模型验证主要包括三个方面：①以测量数据验证单二极管模型（115 Wp和120 Wp）；②使用单二极管模型（110 Wp）模拟结果对双二极管模型进行合理性检查；③电池温度验证。验证期为5月1日至5月13日，13天。

(1) 单二极管模型的验证

图4显示单二极管模型下模块模拟和实测直流功率输出曲线。通过整个验证期内模拟和实测直流功率数据的比较得出 r_2 值为0.86，平均绝对误差为16.6 W，说明准确性很高。为验证不同条件下模型的准确性，选择兼具高、低辐照时段的5月2日作为典型日。图5为模块模拟和测量直流输出功率，图5b为整体辐照度，模拟和测量直流功率与辐照趋势

基本一致。但15:00左右测量数据出现一个峰值，而模拟和辐照数据没有，可能是辐照传感器检测模

块受瞬时阴影、校准不良或测量误差影响，但其时间很短，因此对总体测量数据影响不大。

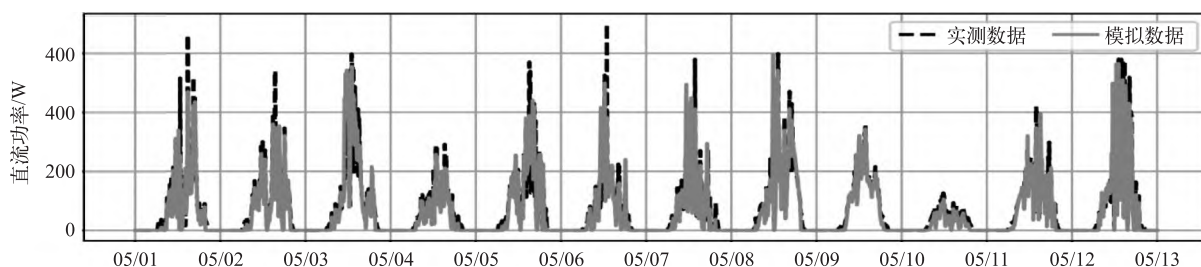


图4 验证期内单二极管方法实测和模拟直流功率输出数据比较

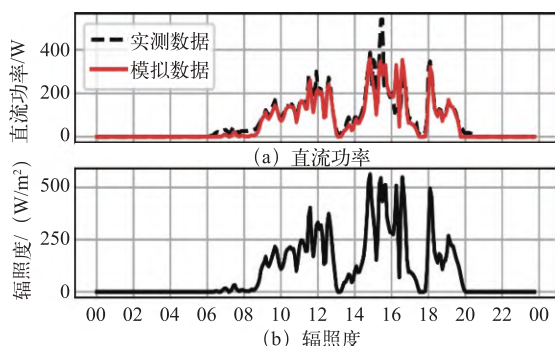


图5 7月30日为单二极管模型准确性对比

(2) 双二极管模型的合理性检验

由于测量数据未包含110 Wp模块，所以将双二极管模型与单二极管模型仿真数据进行比较。单二极管模型是根据110 Wp模块厂家数据进行参数设定，图6显示5月13日两种建模方法模拟直流功率输出几乎相同。同时，整个12 d验证期比较的 R^2 值为0.99，平均绝对误差为5.5 W，证明模拟准确度较高，且两种模型模拟的直流电源输出相近。

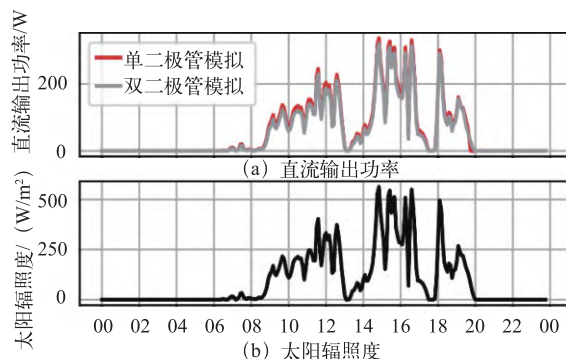


图6 5月13日单二极管和双二极管模型模拟输出对比

单二极管模型有544个方程，双二极管模型有534个方程。为了比较CPU计算时间，在验证期内对两个模型进行10次模拟。实验平台为Core i5-

8250U cpu、操作系统Windows 10的Lenovo计算机。双二极管模型平均CPU时间为0.19 s，单二极管为0.2 s，模拟速度可满足大多数应用。

结束语

本文提出一种新型PV系统Modelica模型。该模型包括单二极管法和双二极管法两种典型光伏组件电特性建模方法。采用山东济南一座屋面建筑的真实测量数据对PV组件进行验证，在2024年5月验证期对直流功率输出和电池温度进行分析。研究表明，两种模型都很好地模拟了PV直流功率输出（见图5、图6）。但是，由于双二极管模型没有合适的测量数据，无法评估哪种建模技术是更准确的，因此只能基于单二极管模型验证其准确性。EA

(收稿日期：2024-10-03)

参考文献

- [1] 唐莉芸. 光伏发电系统在绿色建筑中的应用及其节能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [2] 赵建军, 丁建完, 周凡利, 等. Modelica语言及其多领域统一建模与仿真机理[J]. 系统仿真学报, 2006(S2): 570-573.
- [3] 肖文波, 刘伟庆, 吴华明, 张华明. 太阳能电池单二极管模型中的参数提取方法[J]. 物理学报. 2018, 67(19): 25-35.
- [4] 陈玉洁, 孙以泽, 孟焯, 等. 太阳能电池显式双二极管模型建立及其参数提取研究[J]. 太阳能学报. 2020, 41(7): 120-128.
- [5] 张国玉, 王宏华, 赵慧文. 光伏组件双二极管模型参数辨识混合方法研究[J]. 电源技术. 2021, 45(8): 1061-1065.