

# 双面光伏组件双模式功率控制策略研究

姚晶莹<sup>1</sup>, 马 逊<sup>1,2</sup>, 阚小博<sup>1</sup>, 申凯文<sup>1</sup>

(1.云南师范大学 太阳能研究所, 云南 昆明 650500; 2.云南省高校太阳能供热与制冷技术重点实验室, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 双面光伏组件能够同时吸收光伏面板正面和背面的光照, 相比单面组件提升了发电功率。文章基于双面光伏组件提出了一种双模式功率控制策略, 首先, 利用修正后的等效辐照度模型构建双面组件的电特性参数模型; 然后, 根据双面组件功率输出特性, 以辐照度为判断依据, 提出了最大功率输出和降功率运行的双模式功率控制策略; 最后, 采用该模型对 365 W 晶体硅双面组件进行实验和仿真。实验结果表明, 预测功率与实测功率的相对误差小于 3.5%, 实测条件下最大功率点电压相对误差为 0.3%, 双模式功率控制策略可以在不增加储能的前提下实现有功功率的实时储备, 其中瞬态等效辐照度为 1 006 W/m<sup>2</sup> 时的最大有功备用容量为 69 W, 瞬态等效辐照度为 1 031 W/m<sup>2</sup> 时的最大有功备用容量为 78 W。

**关键词:** 双面组件; 降功率; 最大功率点; 双模式功率控制

**中图分类号:** TK514; TM615 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)12-1609-09

## 0 引言

近年来, 双面光伏组件在可再生能源市场上呈现出越来越特殊的吸引力<sup>[1,2]</sup>, 与此同时, 双面光伏发电系统的最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 技术也备受关注。因此研究双面组件的功率控制策略具有重要意义。

国内外学者主要针对单面光伏组件研究最大功率点控制策略, 系统不具备可调度性和频率、惯性响应, 因此, 在光伏发电系统渗透率较高的场景下, 会因为系统惯性不足导致频率失稳和下行备用不足而出现弃光<sup>[3,4]</sup>。降功率控制 (Power Reserve Control, PRC) 可以通过两种方式实现: 一是增设储能装置; 二是光伏系统弃光运行<sup>[5]</sup>。第一种方式通常在光伏发电系统中配备蓄电池来实现功率储备。文献[6]提出了变功率跟踪技术和储能技术配合控制的策略, 实现了 MPPT 与有功备用控制的优势互补, 但缺点是配置储能装置初始投资大、寿命有限、后期维护费用高。文献[7]采用光伏虚拟同步发电机控制策略, 提高了光伏发电系统中的备用虚拟惯量, 但控制策略较为复杂。第二种方式在光伏发电系统中更容易实现, 且成本更低。该方法利用 PRC 技术使得光伏系统稳定运行在非最大功率点处, 保留一部分有功功率, 使得光伏系统

在不需额外储能装置的情况下具有调节有功功率能力。文献[8]提出了一种 MPPT 和恒定功率运行相结合的策略, 该技术无须增设辐照度测量模块即可估算出光伏电站的可用功率, 但系统动态响应较慢。文献[9]通过在最大功率点 (Maximum Power Point, MPP) 的输出电压加入补偿环节, 实现了光伏组件的降功率运行。这些研究主要针对单面组件, 而双面光伏组件发电功率同时受到正面辐射和背面反射辐射波动的影响, 其输出功率特性亟待研究, 并且需要适用于双面组件输出功率调控的策略, 从而提高组件的有功备用容量。

本文将以前述光伏电池的二极管模型为基础, 利用修正后的等效辐照度模型, 构建双面光伏组件的电特性参数模型, 提出了由最大功率点跟踪和降功率控制协同工作的双模式功率控制策略, 控制双面组件工作在最大功率点或偏离最大功率点 (工作在 PRC 模式时, 系统内部具有一定的功率调节裕度)。最后, 通过仿真和实验验证所提控制策略的有效性。

## 1 数学模型

光伏发电系统是由光伏阵列、控制器和逆变器组成, 如图 1 所示。MPPT 控制器调节直流变换

收稿日期: 2023-09-27。

基金项目: 国家自然科学基金(52267020); 云南省科技人才与平台计划“中青年学术和技术带头人后备人才”项目(202305AC160085); 云南省重点研发计划“智汇云南”项目(202203AM140016)。

通信作者: 马 逊(1980-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为太阳能光伏温室控制与利用。E-mail: maxun@ynnu.edu.cn

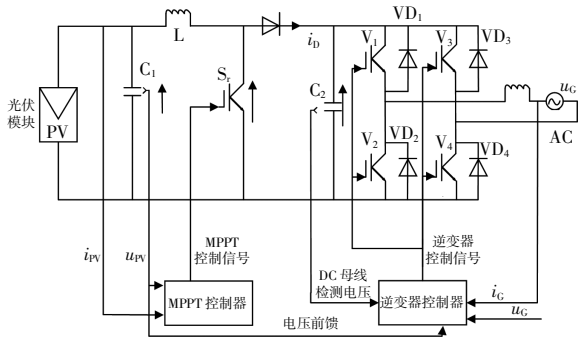


图 1 光伏发电系统的结构

Fig.1 Structural diagram of a photovoltaic power generation system

电路输出最大功率；逆变器中的控制器输出控制信号，控制全桥逆变电路开关管的通、断，将直流逆变成交流。基于上述硬件，本文构建了双面光伏组件的电特性参数模型和双模式功率控制策略模型，实现光伏系统的最大功率输出或有功功率储备的降功率运行。

### 1.1 双面光伏组件的电特性参数模型

#### 1.1.1 双面光伏组件的 5 参数模型

双面光伏组件接收到的辐射由正面和背面两部分组成，正面辐射的来源主要是直射光，背面辐射主要是来自地面的反射光和来自空间的散射光。因此，双面组件的单二极管模型如图 2 所示。

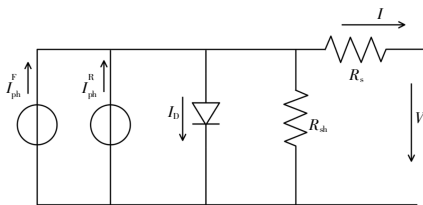


图 2 双面组件的单二极管模型

Fig.2 Single diode models for bifacial PV module

图 2 的  $I-V$  特性方程<sup>[10]</sup>表达式为

$$I = (I_{ph}^F + I_{ph}^R) - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + IR_s)}{nkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中： $I$  为双面光伏组件的输出电流，A； $V$  为双面光伏组件的输出电压，V； $I_{ph}^F$  为双面光伏组件正面光生电流，A； $I_{ph}^R$  为背面光生电流，A； $I_{ph}^F$  和  $I_{ph}^R$  之和为光生电流  $I_{ph}$ ，A； $I_0$  为二极管的饱和电流，A； $n$  为二极管理想因子； $R_s$ 、 $R_{sh}$  分别为双面组件等效串联电阻和等效并联电阻， $\Omega$ ，一般认为  $R_s \ll R_{sh}$ ； $T$  为光伏电池的温度，K； $q$  为电荷常数，值为  $1.602 \times$

$10^{-19}$  C； $k$  为玻尔兹曼常数，值为  $1.381 \times 10^{-23}$  J/K。

根据式(1)，通过赋初值、迭代求解双面光伏组件在标准测试条件 (Standard Test Conditions, STC) 下的 5 参数(光生电流  $I_{ph.ref}$ , A；饱和暗电流  $I_{0.ref}$ , A；串联电阻  $R_{s.ref}$ ,  $\Omega$ ；并联电阻  $R_{sh.ref}$ ,  $\Omega$ ；二极管理想因子  $n_{ref}$ )。

从图 2 可知，由于双面光伏组件可以吸收正、背面的太阳辐射，因此，光生电流  $I_{ph}$  可以分解为正面和背面两部分。并联电阻  $R_{sh}$  和辐照度也存在一定的相关性，故采用等效辐照度对单面组件的  $I_{ph}$  和  $R_{sh}$  进行修正。

全工况下，双面组件 5 参数模型中的光生电流表达式<sup>[11]</sup>为

$$I_{ph(real)} = \frac{G_E}{G_{ref}} I_{ph.ref} [1 + \alpha(T_{cell} - T_{ref})] \quad (2)$$

式中： $I_{ph(real)}$  为双面组件经过辐照度、温度修正后的光生电流，A； $G_{ref}$  为 STC 下的辐照度，值为  $1000$   $W/m^2$ ； $T_{ref}$  为 STC 下光伏电池的温度，值为  $25$   $^{\circ}C$ ； $T_{cell}$  为光伏电池的温度， $^{\circ}C$ ； $\alpha$  为短路电流  $I_{sc}$  的温度系数， $\%/^{\circ}C$ ； $G_E$  为等效辐照度， $W/m^2$ 。

根据误差分析，选取最佳系数对  $G_E$  进行修正，得到的表达式为

$$G_E = G^F + G^R \cdot \varphi \quad (3)$$

$$\varphi = \min \left( \frac{I_{sc.ref}^R}{I_{sc.ref}^F} \times 0.88, \frac{P_{m.ref}^R}{P_{m.ref}^F} \times 0.88 \right) \quad (4)$$

式中： $\varphi$  为双面系数； $G^F$  为正面辐照度， $W/m^2$ ； $G^R$  为背面辐照度， $W/m^2$ ； $I_{sc.ref}^R$  为 STC 下背面短路电流，A； $I_{sc.ref}^F$  为 STC 下正面短路电流，A； $P_{m.ref}^R$  为 STC 下背面最大功率，W； $P_{m.ref}^F$  为 STC 下正面最大功率，W。

饱和暗电流的表达式<sup>[10]</sup>为

$$I_0 = I_{0.ref} \left( \frac{T_{cell}}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[ \frac{E_g(T_{ref})}{n_{ref} v_{th.ref}} - \frac{E_g(T_{cell})}{n v_{th}} \right] \quad (5)$$

式中： $v_{th}$  为热电压，V； $v_{th.ref}$  为在 STC 下的热电压，V； $E_g(T_{ref})$  为当温度等于  $T_{ref}$  时硅太阳能电池的禁带宽度，eV； $E_g(T_{cell})$  为温度在  $T_{cell}$  时硅太阳能电池的禁带宽度，eV，该值由  $E_g(0)$  修正得到，其中  $E_g(0) = 1.1557$  eV，具体表达式<sup>[10]</sup>为

$$T = T_a - 1.52567 + 0.01981336G - 0.000003451G^2 + 273.15 \quad (6)$$

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha_{E_g} T^2}{T + \beta_{E_g}} \quad (7)$$

式中:  $T_a$  为环境温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $G$  为光伏电池实际辐照度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $\alpha_{E_g}$  和  $\beta_{E_g}$  均为硅太阳能电池的能带参数, 分别为  $7.021 \times 10^{-4} \text{ eV}/\text{K}$  和  $1108 \text{ K}$ 。

串联电阻的表达式<sup>[10]</sup>为

$$R_s = R_{s,\text{ref}} \frac{T_{\text{cell}}}{T_{\text{ref}}} \left( 1 - \beta_{R_s} \ln \frac{G}{G_{\text{ref}}} \right) \quad (8)$$

二极管理想因子的表达式<sup>[10]</sup>为

$$n = n_{\text{ref}} \left( \frac{T_{\text{cell}}}{T_{\text{ref}}} \right)^{\alpha_n} \quad (9)$$

式中:  $\alpha_n$  表示二极管理想因子  $n$  和光伏电池温度  $T$  之间的关系, 在本文中取  $\alpha_n = 0$ , 即认为  $n$  是一个与温度无关的常数;  $\beta_{R_s}$  表示双面组件等效串联电阻  $R_s$  和光伏电池实际辐照度  $G$  的关系, 在本文中取  $\beta_{R_s} \approx 0.217$ 。

并联电阻的表达式<sup>[11]</sup>为

$$R_{\text{sh}(\text{real})} = \frac{G_{\text{ref}}}{G_E} R_{\text{sh,ref}} \quad (10)$$

式中:  $R_{\text{sh}(\text{real})}$  为双面组件经过辐照度和温度修正后的并联电阻,  $\Omega$ 。

### 1.1.2 双面光伏组件的 MPP 电压、电流模型

根据文献[12], 经过简化修正后的双面组件的光伏最大功率点电压、电流的数学模型为

$$I_m = I_{m,\text{ref}} \left[ 1 + \alpha (T_{\text{cell}} - T_{\text{ref}}) \right] \frac{G_E}{G_{\text{ref}}} \quad (11)$$

$$V_m = V_{m,\text{ref}} \left[ 1 + \beta (T_{\text{cell}} - T_{\text{ref}}) \right] \quad (12)$$

式中:  $I_m$  为最大功率点电流,  $\text{A}$ ;  $V_m$  为最大功率点电压,  $\text{V}$ ;  $\beta$  为开路电压  $V_{oc}$  的温度系数,  $\%/^{\circ}\text{C}$ ;  $I_{m,\text{ref}}$  为 STC 下的最大功率点电流,  $\text{A}$ ;  $V_{m,\text{ref}}$  为 STC 下的最大功率点电压,  $\text{V}$ 。

### 1.1.3 双面组件的实时输出功率模型

双面组件的实时输出功率会因室外的天气变化出现波动。根据厂家提供的光伏组件在 STC 测试条件下的初始参数, 双面组件实时输出功率可以表示为<sup>[13]</sup>

$$P_{\text{PV}} = \frac{G_E}{G_{\text{ref}}} \cdot P_{m,\text{ref}} \cdot \left[ 1 + \gamma (T_{\text{cell}} - T_{\text{ref}}) \right] \quad (13)$$

式中:  $P_{m,\text{ref}}$  为 STC 下的峰值功率,  $\text{W}$ ;  $\gamma$  为峰值功率  $P_m$  的温度系数,  $\%/^{\circ}\text{C}$ 。

## 1.2 双模式功率控制策略

由于双面组件与单面组件最大区别在于增加

了背面辐照度, 因此本文提出的双模式功率控制策略是以辐照度为判断依据。首先, 比较双面组件在测试时间段的平均正面辐照度 (以下简称为平均辐照度), 若平均辐照度高于  $500 \text{ W}/\text{m}^2$ , 再计算双面组件的平均等效辐照度  $G_{\text{EA}}$ , 并且采用双模式功率控制策略调控直流变换器的占空比。

根据式(3)计算得到在测试时间段内的平均等效辐照度  $G_{\text{EA}}$  为

$$G_{\text{EA}} = G^{\text{FA}} + G^{\text{RA}} \cdot \varphi \quad (14)$$

式中:  $G^{\text{FA}}$  为双面组件在测试时间段的平均正面辐照度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $G^{\text{RA}}$  为双面组件在测试时间段的平均背面辐照度,  $\text{W}/\text{m}^2$ 。

### 1.2.1 最大功率点跟踪控制模式

当测试时间段平均辐照度高于  $500 \text{ W}/\text{m}^2$ , 但瞬态等效辐照度低于  $G_{\text{EA}}$  时, 双面组件工作在 MPPT 模式下, 并且采用改进的电导增量法作为调控策略。具体实施方式: 根据采样值  $U_n, I_n$  判断双面组件工作点位于 MPP 左侧还是右侧, 若工作点位于 MPP 右侧时, 追踪步长为  $\Delta U$ ; 若工作点位于 MPP 左侧时, 则工作电压以大步长  $\lambda \Delta U$  进行变化。通过分析 MPP 左侧和右侧的斜率, 可知当负载电阻从低值变化到高值时, 曲线呈现较为平缓的上升趋势, 而当负载电阻从高值变化到低值时, 曲线呈现较为陡峭的下降趋势, 因此, 电压的变化可表示为

$$\begin{cases} U = U \pm \Delta U, \text{工作点位于 MPP 右侧} \\ U = U + \lambda \Delta U, \text{工作点位于 MPP 左侧} \end{cases} \quad (15)$$

$$\lambda = \frac{|k_{\text{MPP 右}}|}{|k_{\text{MPP 左}}|} \quad (16)$$

式中:  $k_{\text{MPP 左}}$  为 MPP 左侧的斜率;  $k_{\text{MPP 右}}$  为 MPP 右侧的斜率。

若工作点在 MPP 右侧, 则采用改进的电导增量法不断地改变双面组件两端的电压, 从而实现自寻优过程。

### 1.2.2 降功率控制模式

若测试时间段平均辐照度高于  $500 \text{ W}/\text{m}^2$ , 且瞬态等效辐照度高于  $G_{\text{EA}}$  时, 双面组件处于 PRC 模式, 实现有功功率的备用。首先, 根据采样值以及式(15), (16)选择合适的追踪步长; 其次, 根据式(13)确定 PRC 模式的恒定功率  $P_{\text{pva}}$ , 具体表达式为

$$P_{pvA} = \frac{G_{EA}}{G_{ref}} \cdot P_{m.ref} \cdot [1 + \gamma(T_{cell} - T_{ref})] \quad (17)$$

采用测试时间段内的平均等效辐照度确定恒定功率，既避免了复杂的功率曲线分析和实时监测，又使光伏系统可以在不增加额外储能装置的情况下具有调节有功功率的能力。

在辐照度突变情况下，温度对组件的影响可

以忽略不计，即认为光伏系统的输出功率只受到辐照度的影响。因此，根据式(13)计算光伏实时输出功率  $P_{PV}$ ，并与  $P_{pvA}$  比较，从而调整电压变化的步长。

### 1.2.3 双模式功率控制策略仿真流程

本文提出的双模式功率控制策略具体流程如图3所示。

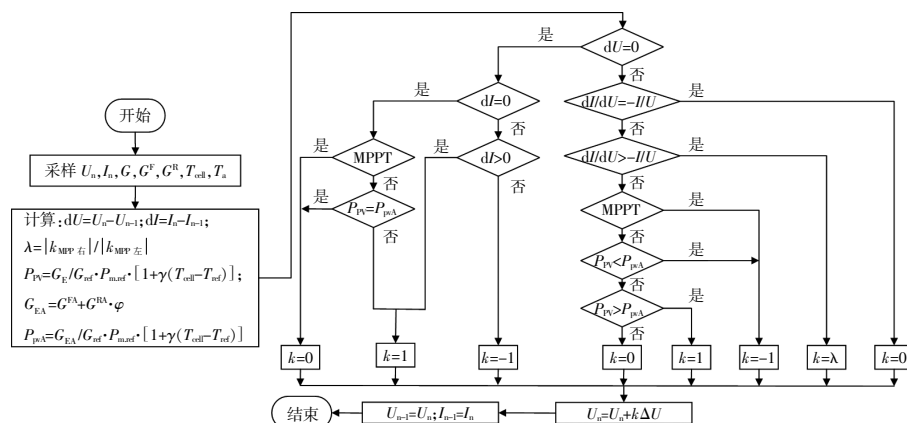


图3 双模式功率控制流程图  
Fig.3 Two-mode power control flowchart

## 1.3 评估模型

### 1.3.1 误差评价

为了验证上述模型的准确性和可靠性，本文选取平均偏差误差 (Mean Bias Error, MBE) 和相对误差 (Relative Error, RE) 这两种误差模型来衡量模型的计算结果是否可靠，误差模型<sup>[14]</sup>为

$$e_{MBE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - M_i) \quad (18)$$

$$e_{RE} = \left| \frac{M_i - S_i}{M_i} \right| \times 100\% \quad (19)$$

式中： $N$  为测试个体数目； $S_i$  为根据模型得到的预测值； $M_i$  为实测值。

### 1.3.2 有功备用容量评估

本文采用有功备用容量衡量双模式功率控制策略的有效性，具体表达式为

$$P_s = P_{ms} - P_{pvA} \quad (20)$$

式中： $P_s$  为双面组件稳定运行于恒定功率点时的最大有功备用容量， $W$ ； $P_{ms}$  为双面组件稳定运行于恒定功率点时的理论最大功率， $W$ 。

## 2 试验系统及仿真流程

### 2.1 试验系统介绍

本文采用双面光伏组件为试验部件，将相同功率的单面组件设置为参考组件，辐照计分别安

装在倾斜角为  $30^\circ$  的光伏组件正面和背面，用于测量双面组件的正面辐照度和背面辐照度。气象站和逆变系统分别记录气象数据和输出功率。试验系统的配置如图4所示。



图4 试验系统的配置  
Fig.4 Configuration of the test system

### 2.1.1 PV 组件

光伏系统由3块型号为 LR6-72BP-365M 晶体硅双面组件串联组成，同时采用3块型号为 LR6-72PE-365M 晶体硅单面组件串联作为参考

组件。在 STC 下,双面组件和单面组件的参数如表 1 所示。

表 1 STC 条件下光伏组件出厂参数  
Table 1 Factory parameters of PV modules under STC conditions

参数	LR6-72BP-365M	LR6-72PE-365M
峰值功率 $P_m/W$	365	365
最大功率点电压 $V_m/V$	39.5	39.3
最大功率点电流 $I_m/A$	9.25	9.29
开路电压 $V_{oc}/V$	48.3	48.0
短路电流 $I_{sc}/A$	9.84	9.74
峰值功率温度系数/ $\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	-0.370	-0.370
开路电压温度系数/ $\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	-0.300	-0.286
短路电流温度系数/ $\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	0.060	0.057

### 2.1.2 系统控能设备

实验系统配备型号为 MIN-5000TL-X 的光伏逆变器,记录发电数据的采样周期为 1 min,具体参数如表 2 所示。

表 2 光伏逆变器的具体参数  
Table 2 Specific parameters of solar inverters

参数	数值
最大直流输入功率/W	7 000
最大直流输入电压/V	550
启动电压/V	100
MPPT 工作电压/额定输入电压/V	80~550/360
各组串最大输入电流/A	13.5
MPPT 数量/每路 MPPT 组串数	2/1+1
额定交流输出功率/W	5 000
最大交流输出功率/W	5 500
最大交流输出电流/A	23.9
额定输出电压/V	220/160~300
额定电网频率/Hz	50,60/±5
功率因数	1

### 2.1.3 测量设备

本文所用测量仪器的规格和精度等参数如表 3 所示,其中气象站中辐照度、温度数据的采样周期为 1 min。

表 3 测量仪器的规格和精度  
Table 3 Specifications and accuracy of instruments

数据采集设备	型号	量程	精度
辐照计	TBQ-2	0~3 000 W/m <sup>2</sup>	±2%
温湿度记录仪	Cos-03	-40~+80 °C	±0.1 °C
		0~100% RH	±1.5%
I-V 特性分析仪	I-V400	10~99.99 V	±(1.0%+2.0)
		0.1~10 A	±(1.0%+2.0)

### 2.2 计算及仿真流程

将双面组件的电特性参数模型、双模式功率控制策略模型以及评估模型进行耦合,利用 MATLAB/Simulink 进行方程求解和仿真测试,具体流程步骤如下。

①双面组件参数求解。以测量的环境温度  $T_a$ 、光伏电池温度  $T$ 、正面辐照度  $G^F$ 、背面辐照度  $G^R$  作为方程的输入,根据式(1)~(13)计算双面组件的各个参数。

②根据式(14)计算开始点到测试点(测试时间段内)的平均等效辐照度  $G_{EA}$ ,根据式(15)和式(16)计算下一时刻的工作点电压,根据式(17)计算恒定功率点  $P_{pVAO}$  将  $G_{EA}$ ,  $\lambda$ ,  $P_{pVA}$  和第一步求得的  $V_{oc}$ ,  $V_m$ ,  $P_m$ ,  $P_{PV}$  输入到图 3 的双模式功率控制流程中。

③将步骤①模型计算的预测值和实测值通过式(18)和式(19)进行误差评价,若相对误差结果大于 6%,迭代精度大于  $10^{-5}$  则重新计算;若误差满足要求,将利用 MATLAB/Simulink 对步骤②进行仿真,并且利用式(20)对双模式功率控制策略的有效性进行评估。

## 3 模型验证与仿真分析

### 3.1 全工况下双面组件模型的验证

#### 3.1.1 5 参数模型的验证

实验测试时间为 2023 年 7 月 15 日。首先,根据文献[10]中双面组件 5 参数显性表达式求得双面组件在 STC 下的 5 参数初值;然后,利用式(2)~(10)可得双面组件在实测条件下的 5 参数值,如表 4 所示。

表 4 不同测试条件下双面组件 5 参数初值

Table 4 Initial values of five parameters of bifacial photovoltaic modules under different test conditions

测试条件	$G/W \cdot m^{-2}$	$T_{cell}/^\circ\text{C}$	$I_{ph}/A$	$I_0/A$	$R_s/\Omega$	$R_{sh}/\Omega$	$n$
实测条件	776	34.3	8.698	$2.119 \times 10^{-10}$	0.378	346.799	0.990
STC	1 000	25.0	9.851	$3.412 \times 10^{-11}$	0.348	304.511	0.990

采用 I-V 特性分析仪得到的结果作为表 5 数据中的实测值,将表 4 的数据代入(1)式中,得到通过模型计算的双面组件输出电特性参数,并根据式(18)和式(19)计算双面组件输出电特性参数的 MBE 和 RE,如表 5 所示。

由表 5 中数据可知,  $P_m$  在实测条件下和 STC 下的 RE 分别为 5.43% 和 4.55%, MBE 分别为

表 5 不同测试条件下双面组件输出电特性  
Table 5 Output electrical characteristics of bifacial photovoltaic modules under different test conditions

测试条件	$V_{oc}/V$	$I_{sc}/A$	$V_m/V$	$I_m/A$	$P_m/W$
实测条件	45.26	7.71	36.71	7.38	270.77
模型计算	47.60	7.95	36.60	7.80	285.48
MBE	2.34	0.24	-0.11	0.42	14.71
RE/%	5.17	3.11	0.30	5.69	5.43
实测条件(STC)	47.16	9.86	38.08	9.45	359.74
模型计算(STC)	48.97	10.18	37.65	9.99	376.12
MBE(STC)	1.81	0.32	-0.43	0.54	16.38
RE(STC)/%	3.84	3.25	1.13	5.71	4.55

14.71 W 和 16.38 W,  $I_m$  在实测条件和 STC 下的 RE 分别为 5.69% 和 5.71%, MBE 分别为 0.42 A 和 0.54 A,  $P_m$  和  $I_m$  的 MBE 均大于 0。结果表明: 计算值大于实测值, 这是由于电流和辐照度强相关, 而在根据式(3)计算  $G_E$  时未考虑组件高度和太阳入射角的影响; 另一方面,  $V_m$  在实测条件和 STC 下的 RE 分别为 0.30% 和 1.13%, MBE 分别为 -0.11 V 和 -0.43 V, 说明组件背面温度对特性参数的影响可以忽略, 其中, 实测条件下最大功率点电压相对误差为 0.30%, 小于文献[15]采用 TUV NORD 测试法计算出的相对误差 1.61%。

3.1.2 功率模型的验证

将组件的实时输出功率与采用等效辐照度  $G_E$ (预测值 1) 和光伏电池实际辐照度  $G$ (预测值 2) 计算得到的输出功率进行对比, 如图 5 所示。

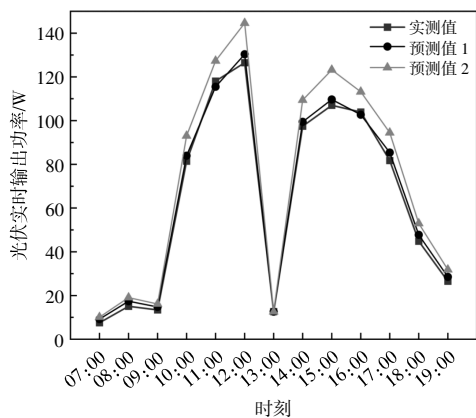


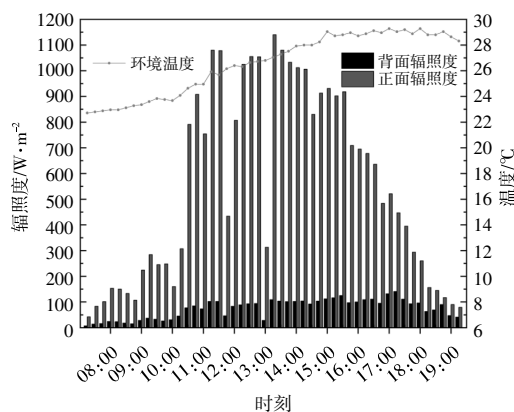
图 5 双面组件实时输出功率实测值与计算值的对比  
Fig.5 Comparison of measured and calculated real-time output power values of bifacial photovoltaic modules

由图 5 可见: 功率的预测值要大于实测值, 原因是模型没有考虑双面组件性能衰退。预测值 1 的 MBE 为 1.627 W, RE 为 0.13%~21.90%, 其中

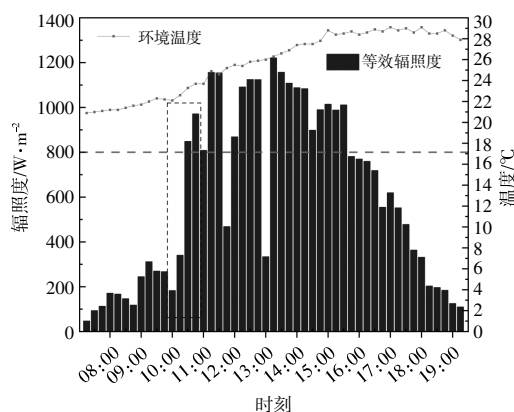
在 10:00~16:00, RE 为 0.13%~3.10%; 预测值 2 的 MBE 为 8.606 W, RE 为 0.13%~33.26%, 其中在 10:00~16:00, RE 为 0.13%~15.14%。结果表明, 计算得到的双面组件实时输出功率具有可靠性。

3.2 双面组件双模式功率控制策略仿真

选取 2023 年 6 月 29 日气象数据, 利用双模式功率控制策略对辐照度突变情况下双面组件输出功率进行仿真。测试时间段内辐照度和环境温度变化曲线如图 6 所示。



(a) 辐照度和温度变化



(b) 等效辐照度和温度变化

图 6 6 月 29 日环境温度和辐照度变化

Fig.6 Variation in ambient temperature and irradiance on 29 June

由于平均辐照度为  $710 \text{ W/m}^2$ , 因此可以采用本文提出的双模式功率控制策略调控功率输出。由图 6(b) 可见: 测试时间段内的平均等效辐照度为  $800 \text{ W/m}^2$ , 在辐照度突变情况下, 由于热惯性可以认为温度不变, 根据式(17)计算得到光伏输出的恒定功率  $P_{pVA}$  为 301 W; 当瞬态等效辐照度低于  $800 \text{ W/m}^2$  时, 双面组件工作在 MPPT 模式; 其他情况下, 双面组件工作在 PRC 模式。

辐照度突变的情况如图 7 所示。

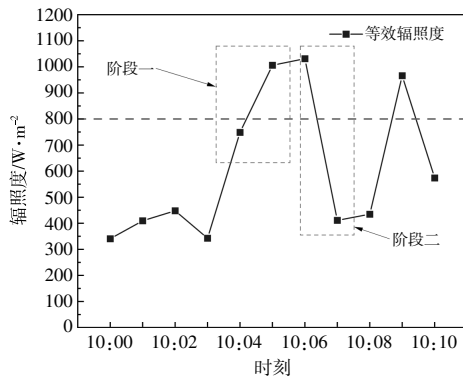
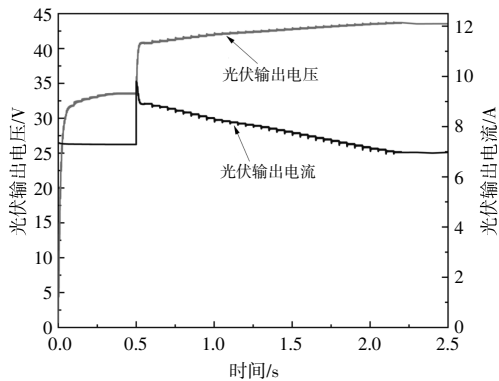


图7 阶段一和阶段二的等效辐照度变化

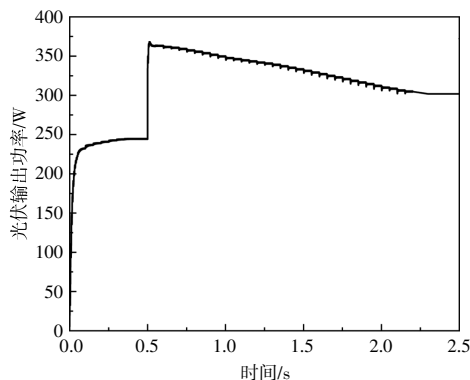
Fig.7 Changes in equivalent irradiance for stage 1 and stage 2

从图7可见,在10:04-10:05,瞬态等效辐照度由 $748 \text{ W/m}^2$ 变化至 $1006 \text{ W/m}^2$ ,为了表述方便,将此阶段命名为阶段一;10:06-10:07,瞬态等效辐照度由 $1031 \text{ W/m}^2$ 变化至 $411 \text{ W/m}^2$ ,将此阶段命名为阶段二。

辐照度突变时双模式功率控制策略测试结果如图8,9所示。



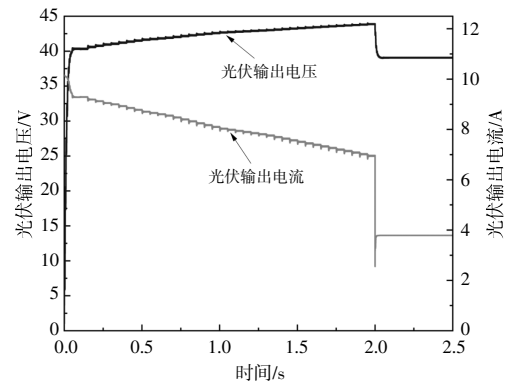
(a) 光伏输出电压、电流变化



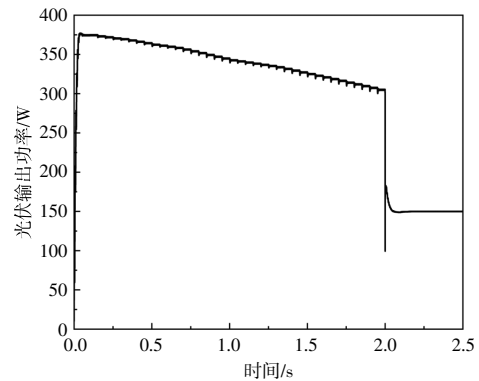
(b) 光伏输出功率变化

图8 辐照度突升时双模式功率控制策略测试结果

Fig.8 Test results of two-mode power control strategy during irradiance surge



(a) 光伏输出电压、电流变化



(b) 光伏输出功率变化

图9 辐照度突降时双模式功率控制策略测试结果

Fig.9 Test results of two-mode power control strategy during sudden irradiance drop

从图8(a),(b)可见,当等效辐照度在阶段一变化时,双面组件从MPPT工作模式转变至PRC模式。组件工作在PRC模式时,光伏输出功率在短暂的升高后,稳定在恒定功率点 $301 \text{ W}$ 。

由图9(a),(b)可见,当等效辐照度在阶段二变化时,双面组件从PRC工作模式转变至MPPT模式。双面组件首先运行在PRC模式,输出恒定功率 $301 \text{ W}$ ,随着辐照度下降,组件转变为MPPT运行模式,双面组件工作在最大功率点 $151 \text{ W}$ 。

采用传统的最大功率点跟踪控制策略时,双面组件始终处于满发状态,无有功功率储备。采用本文提出的双模式功率控制策略,在阶段一中,组件的最大有功备用容量为 $69 \text{ W}$ ;在阶段二中,最大有功备用容量为 $78 \text{ W}$ ,从而实现了有功功率的实时储备,提高了光伏组件调节的灵活度。

#### 4 结论

本文对双面光伏组件的输出电特性参数以及双模式功率控制策略开展了实验研究及分析,得到以下结论。

①通过理论分析,建立双面光伏组件的数学模型,利用等效辐照度修正双面组件的输出电特性参数,在实测条件和 STC 下  $P_m$  的 RE 分别为 5.43% 和 4.55%。在 10:00–16:00,利用等效辐照度和光伏电池实际辐照度修正光伏实时输出功率  $P_{pv}$  的 RE 分别为 0.13%~3.10% 和 0.13%~15.14%,进一步提高了双面组件的参数精度。

②本文基于双面光伏组件的输出电特性模型提出双模式功率控制策略,通过控制双面组件工作在非 MPP 点可以实现有功功率的实时储备。经验证,瞬态等效辐照度为  $1\ 006\ \text{W}/\text{m}^2$  时的最大有功备用容量为 69 W,瞬态等效辐照度为  $1\ 031\ \text{W}/\text{m}^2$  时的最大有功备用容量为 78 W。

③本文提出的双模式功率控制策略以辐照度为判别依据,双面光伏组件按辐照度分别工作在 MPPT 和 PRC 模式。经验证,瞬态等效辐照由  $748\ \text{W}/\text{m}^2$  突升至  $1\ 006\ \text{W}/\text{m}^2$  时,双面组件工作从 MPPT 模式转变至 PRC 模式,而当瞬态等效辐照度由  $1\ 031\ \text{W}/\text{m}^2$  突降至  $411\ \text{W}/\text{m}^2$  时,双面组件工作从 PRC 模式转变至 MPPT 模式。

#### 参考文献:

- [1] 陈琦,王海华,韩学栋,等.双面组件阵列辐照模拟与系统效率分析[J].可再生能源,2022,40(12):1591–1595.
- [2] 孙韵琳,陈荣荣,陈思铭.基于户外实证的双面光伏组件输出特性数值模拟优化研究[J].可再生能源,2019,37(8):1133–1138.
- [3] 颜湘武,张世峥,贾焦心.光伏机组虚拟惯量控制下电力系统频率特性分析[J].可再生能源,2023,41(1):81–89.
- [4] 孙华东,许涛,郭强,等.英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J].中国电机工程学报,2019,39(21):6183–6192.
- [5] Omran W A, Kazerani M, Salama M M A, et al. Investigation of methods for reduction of power fluctuations generated from large grid-connected photovoltaic systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(1): 318–327.
- [6] 王子衡.考虑源荷功率随机波动性的光伏发电机组频率平滑调节方法研究[D].北京:华北电力大学,2021.
- [7] Liu Z X, Qin L, Yang S Q, et al. A comprehensive control strategy for photovoltaic virtual synchronous generator considering frequency regulation capability [J]. Energy Reports, 2022, 8(S12): 153–163.
- [8] Sangwongwanich A, Yang Y H, Blaabjerg F, et al. Delta power control strategy for multistring grid-connected PV inverters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(4): 3862–3870.
- [9] 李震.光伏电池降功率控制方法探究[J].现代商贸工业,2017(1):178.
- [10] Ma X, Li M, Peng Y, et al. Development of thermo-electrical loss model for photovoltaic module with inhomogeneous temperature [J]. Energy, 2022, 248: 123542.
- [11] Gu W, Ma T, Li M, et al. A coupled optical-electrical-thermal model of the bifacial photovoltaic module [J]. Applied Energy, 2020, 258: 114075.
- [12] Chen Y, Sun Y, Meng Z. An improved explicit double-diode model of solar cells: Fitness verification and parameter extraction [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 169: 345–358.
- [13] Skoplaki E, Palyvos J A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations [J]. Solar Energy, 2009, 83(5): 614–624.
- [14] Peng Y, Ma X, Wang Y F, et al. Energy performance assessment of photovoltaic greenhouses in summer based on coupled optical-electrical-thermal models and plant growth requirements [J]. Energy Conversion and Management, 2023, 287: 117086.
- [15] 石文胜.双面光伏发电系统的建模及最大功率点跟踪算法研究[D].保定:河北大学,2020.

## Research on two-mode power control strategy of bifacial photovoltaic module

Yao Jingying<sup>1</sup>, Ma Xun<sup>1,2</sup>, Kan Xiaobo<sup>1</sup>, Shen Kaiwen<sup>1</sup>

(1.Solar Energy Research Institute, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2.Key Laboratory of Solar Heating and Cooling Technology of Yunnan Provincial Universities, Kunming 650500, China)

**Abstract:** Bifacial photovoltaic modules are designed to generate electricity by absorbing both front and rear irradiance at the same time, which enhances the power generation compared to mono-facial photovoltaic modules. In this paper, a two-mode power control strategy is proposed based on bifacial photovoltaic modules. Firstly, the modified equivalent irradiation model is used to construct a parametric model of the electrical characteristics of bifacial photovoltaic modules; according to the power output characteristics of bifacial photovoltaic modules and then based on the judgement of irradiance, a two-mode control strategy with the maximum power output and the power reserve control is proposed; finally, the model is used to experiment and simulate the 365 W crystalline silicon bifacial photovoltaic module. The experimental results show that the relative error between the predicted power and the measured power is less than 3.5%, and the relative error of the voltage at the maximum power point under the measured condition is 0.3%. The two-mode power control strategy can achieve the real-time active power reserve without increasing the energy storage, in which the maximum active standby capacity at the transient equivalent irradiance of 1 006 W/m<sup>2</sup> is 69 W, and at the transient equivalent irradiance of 1 031 W/m<sup>2</sup> is 78 W.

**Keywords:** bifacial PV module; power reserve; maximum power point; two-mode power control