光伏电站阴影下输出特性及功率优化器效能提升研究

邸 亮[1]，董 杰[1]，周振宇[1]，闫馨月[1]，白建波[2]
（1.龙源新能源工程设计研究院有限公司，北京 100034；2.河海大学 新能源学院，江苏 常州 213200）

摘 要：光伏组件在实际应用中受到烟囱、树木或其他障碍物遮挡，会出现局部阴影，进而导致系统功率失配，造成损失。为了最大限度地减少阴影的影响，提高光伏系统发电功率，文章提出了降低参数失配导致功率损失的方案。首先，推导了阴影条件下光伏电站的输出特性，并建立基于功率优化器的组串性能提升模型；然后，搭建实验平台，在已知组件表面阴影比例的基础上，运用 3 种实验方案分析实测数据与仿真结果的偏差，并比较接入功率优化器前、后组串的发电量。数据显示，实测与仿真的日发电量偏差均在 4%以内，功率优化器最多可提高 16.14%的发电量。研究结果对实际遮挡场景提升光伏系统发电功率具有重要指导意义。

关键词：光伏电站；遮挡影响；输出特性；功率优化器；效能提升
中图分类号：TK514；TM615 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5292(2025)11-1450-08

0 引言

随着全球清洁能源需求不断增长，作为一种清洁、可再生的发电形式，光伏发电受到广泛的关注并得到了快速发展[1,2]。然而光伏电站在实际运行过程中，障碍物遮挡、组件老化及组件内部不同材料和焊接工艺差异会导致光伏电站中组件电性能不一致，从而造成电站失配[3,4]，尤其是局部遮挡，不仅直接影响被遮挡组件接受到的辐照量，还会因各组件不均匀辐照引起组串发生严重的失配问题，导致光伏电站的发电量急剧降低[5,6]。因此，如何有效应对遮挡，提高光伏电站的输出性能，已成为当前光伏技术研究的重要课题。

李勇[7]从光伏电站建设过程中放样时采集的数据出发，拓展测绘数据应用方式，探索出一种光伏组件间遮挡的预测模型，并用该方法减少或解决光伏电站建成后光伏组件间的遮挡问题。程相奥[8]通过计算屋顶构筑物阴影范围，保证光伏组件在 09:00-15:00 不受周围物体遮挡，从而获得较高的发电量。谭建斌[9]提出了一种基于双向C uk 变换器的光伏组件效率提升控制系统，可基于电压平衡的功率匹配优化算法提高局部遮挡下的系统稳定性。杨洪明[10]构造了以太阳能电池-超级电容为基本单元的串联阵列，提出局部阴影条件下太阳能电池-超级电容串联阵列电流补偿方法，通过太阳能电池-超级电容充电、放电控制对太阳能电池的输出电流进行补偿，提高了局部遮挡下光伏阵列的输出功率。虽然以上方法都能在一定程度上解决遮挡问题，但并未建立组件在阴影下的输出特性模型，且仅有仿真数据而缺乏实际电站数据验证。

针对上述问题，本文推导了光伏电站在阴影下的输出特性，并建立基于光伏功率优化器的组串性能提升模型。在已知组件表面阴影比例的基础上，对接入功率优化器前、后组串发电量进行仿真，设计了 3 种实验方案，搭建了实验平台，验证仿真结果。研究结果表明，功率优化器能够减少由于不均匀阴影遮挡导致组件发生失配时损失的功率。

1 光伏电站阴影下输出特性及优化器性能提升建模方法

导致光伏组串失配的因素可以等效为不同程度的遮挡。阴影情况下组串的输出特性是发电量精确仿真[11]和功率优化器提升发电性能的基础。

1.1 阴影条件下组件输出特性

太阳能电池片可以等效为单二极管四参数、五参数模型，四参数模型虽然求解方法简单，但准

收稿日期：2024-07-16。
基金项目：国家重点研发计划(2022YFB4201000)。
作者简介：邸 亮(1982-)，男，高级工程师，研究方向为新能源电力规划。E-mail:9812715@qq.com
通信作者：白建波(1974-)，男，教授，博士生导师，研究方向为光伏电站建模与仿真技术。E-mail:bai_jianbo@hhu.edu.cn

确性低于五参数模型[12]。本文使用单二极管五参数模型对光伏组件输出性能进行仿真，根据基尔霍夫电流定律,单二极管模型为

$$I=I_{ph}-I_o\left[e^{\left(\frac{V+IR_s}{nV_{th}}\right)}-1\right]-\frac{V+IR_s}{R_{sh}} \tag{1}$$

$$V_{th}=\frac{kTN_s}{q} \tag{2}$$

$$a=nV_{th} \tag{3}$$

式中:I_{ph} 为光生电流,A;I_o 为二极管反向饱和电流,A;R_s 为串联电阻,Ω;n 为二极管理想因子;V_{th} 为热电压,V;k 为玻尔兹曼常数,1.38×10^{-23} J/K;R_{sh} 为并联电阻,Ω;T 为电池温度,K;q 为电荷常数，取 1.6×10^{-19} C;a 为基于组件层次的修正理想因子;N_s 为串联光伏电池的数量。

五参数模型中参数求解采用 Tao Y[13]提出的一种启发式迭代算法，只需根据制造厂商提供的铭牌参数即可提取五参数。

当光伏组件被阴影遮挡时，由于旁路保护二极管的分流作用，组件的输出性能曲线会出现多峰现象。若每个组件有 N 个电池串,以编号 1 的电池串为例,假设其中有 1 片电池被部分遮挡、其他电池串均未被遮挡,如图 1 所示。

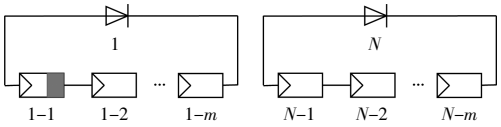


图 1　组串中电池片被遮挡示意图

Fig.1 Schematic diagram of shaded cells in a string

在这种情况下，被遮挡的电池片光生电流变小,根据外接负载的不同,被遮挡电池串的旁路二极管有导通和截止两种状态。

①若此时组件外接的负载电阻大,串联电路的输出电流小于被遮挡电池片 1–1 的光生电流,则被遮挡的电池片 1–1 正常工作,旁路二极管不触发保护,处于截止状态;②若负载电阻减小,串联电路的电流大于被遮挡电池片 1–1 的光生电流,但小于未遮挡电池片 1–2 的光生电流,此时电池片 1–1 被反偏,流经电池片的电流与正常工作时方向相反,被遮挡电池片两端产生反向电压。若组串电流持续增大，当被遮挡电池片所在组串的电压高于旁路二极管的导通阈值,则触发旁路二极管保护,此时旁路二极管导通,假设随着串联电路的电流增大,旁路二极管的电压稳定为正向压降，则整个被保护组串的电压为二极管的正向导通压降[14]。以上 3 种情况对应编号 1 的电池串电压 V_1 为

$$V_1=\begin{cases}a_{1-1}\ln\left(\dfrac{I_{ph,1-1}-I}{I_{o,1-1}}+1\right)-IR_{s,1-1}+(m-1)\left[a\ln\left(\dfrac{I_{ph}-I}{I_o}+1\right)-IR_s\right], 0\leqslant I\leqslant I_{ph,1-1}\\ -(I-I_{ph,1-1})R_{sh}-IR_s+(m-1)\left[a\ln\left(\dfrac{I_{ph}-I}{I_o}+1\right)-IR_s\right], I_{ph,1-1}\leqslant I\leqslant I_{ph}\text{ 且 }V_1>-V_{bd}\\ -V_{bd}, I_{ph,1-1}\leqslant I\leqslant I_{ph}\text{ 且 }V_1<-V_{bd}\end{cases} \tag{4}$$

式中:a_{1-1} 为 1–1 号电池的二极管理想因子;$I_{ph,1-1}$ 为 1–1 号电池的光生电流,A;$I_{o,1-1}$ 为 1–1 号电池的饱和电流,A;$R_{s,1-1}$ 为 1–1 号电池的串联电阻,Ω;V_{bd} 为旁路二极管导通时的正向压降，锗管为 0.3 V,硅管为 0.7 V;其余电池参数默认一致。

整个光伏组件的输出电压为被遮挡和不被遮挡串联电池串的电压之和,表达式为

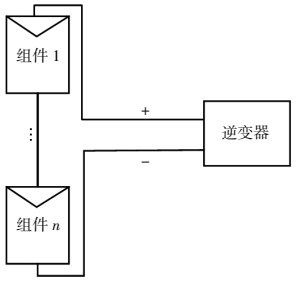
$$V=V_1+\sum_{i=2}^{N}V_i=V_1+(N-1)\left[a_{cs}\ln\left(\frac{I_{ph_cs}-I}{I_{o_cs}}+1\right)-IR_{s_cs}\right] \tag{5}$$

式中:下标 cs 代表将旁路二极管所保护的电池串作为 1 个单元的各性能参数。

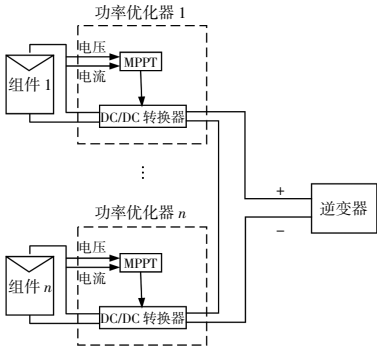
1.2　基于功率优化器的组串性能提升建模方法

常规光伏电站与配置功率优化器电站原理如图 2 所示。

常规光伏电站是多个光伏组件通过串联和并联连接,最终将电能传输至逆变器,由逆变器将直流转换为交流。最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking,MPPT) 电路通常在逆变器级别进行控制，它跟踪整个系统的最大功率点来调节电流和电压。然而,MPPT 电路并不能识别和单独优化失配的组件,如果系统中某个组件出现失配(如



(a)常规光伏电站原理图



(b)基于功率优化器性能提升电站系统原理图

图 2 常规光伏电站与配置功率优化器电站原理图

Fig.2 Diagram of conventional photovoltaic power station and photovoltaic power station with power optimizers

因阴影、污染、老化等原因),它的输出会限制整个阵列的功率输出，从而导致系统的整体功率输出下降。本文提出将 MPPT 控制功能分解到每个光伏组件上,即:每个组件都配备 1 个独立的 MPPT 电路,当某个组件出现失配时,该组件的 MPPT 电路能够独立识别并优化该组件的工作状态，最大程度地输出电能,而不会影响其他组件的性能。这种方式可以显著提升系统的整体发电效率，尤其是在局部遮挡或组件性能差异较大的情况下,本文方案的每个组件都能运行在最佳工作状态。

每台功率优化器的输入端分别连接到对应的光伏组件,功率优化器的输出端则串联形成母线,如图 2(b)所示。忽略系统中线缆损失,系统输出功率 P_t 为

$$P_t=\sum_{i=1}^{n}(V_{o_i}\cdot I_{o_i}) \tag{6}$$

式中:V_{o_i} 为第 i 个功率优化器输出电压,V;I_{o_i} 为第 i 个功率优化器输出电流,A;n 为功率优化器数量。

直流侧电压 V_t 为所有优化器输出电压总和,表达式为

$$V_t=\sum_{i=1}^{n}V_{o_i} \tag{7}$$

直流侧电流 I_t 为

$$I_{o_1}=I_{o_2}=\cdots I_t \tag{8}$$

由式(6)~(8)可知,各功率优化器输出电压 V_{o_i} 和输出功率 P_{o_i} 成正比:

$$V_{o_i}=\frac{P_{o_i}}{P_t}V_t \tag{9}$$

当光伏阵列组件处于正常工作状态时，功率优化器无法提高组件的输出功率，反而会因为自身功率损耗而消耗整个阵列的发电功率[15]。当阵列中组件受到部分遮挡时，由于遮挡面积及位置的不同,每块组件的输出特性也不同[16],光伏阵列中部分组件的输出无法被有效利用，该情况下使用功率优化器可以有效保证每块组件处于最大功率点工作,有效提高阵列输出功率。

2 光伏电站阴影下优化器效能提升实验研究

2.1 光伏电站阴影下功率优化器对性能提升实验平台

由于阴影遮挡或其他原因导致光伏电站输出功率降低时，安装优化器可以消除阵列失配带来的功率损耗。本实验验证光伏组件优化器接入前后发电量仿真模型的精确性。

无遮挡时的失配主要是由于组件制造公差、老化、污染导致的,组件出厂时组件之间功率公差在 3%以内。为排除无遮挡失配对实验的干扰,在实验之前使用 I–V 测试仪对每块组件的电压、电流等输出特性进行校对,结果显示,所有实验组件的输出特性(I_{SC},V_{OC},P_{MAX})均接近标称值,填充因子为 78%~79%,表明组件性能一致性良好。该结果为后续实验提供了可靠的性能基础。同时,校对过程中未发现异常组件，确保了实验结果的准确性与可重复性。测试设备为 87715D 光伏组件伏安测试仪,性能参数如表 1 所示。

表 1 87715D 光伏组件伏安测试仪参数

Table 1 87715D photovoltaic module volt-ampere tester parameters

参数	量程	误差
直流电压/V	0~200	±0.2%±0.1
直流电流/A	0.01~20	±0.2%±0.01
功率/W	0.1~1 000	±0.2%±0.5

本实验采用 8 块组件串联成 1 个组串，并将 2 个这样的组串接入一台逆变器。具体实验组成见图 3。

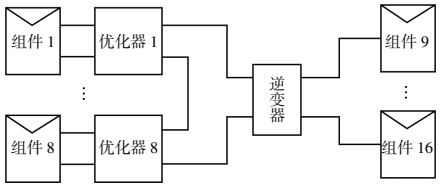


图 3 实验组成示意图

Fig.3 Experimental composition

结合气象站中的辐照、温度、风速、组件温度

等，分别仿真不配置优化器和配置优化器两种情况下光伏系统的输出特性，并与实测数据进行对比。实验地点位于学校实验楼 3 楼楼顶光伏系统仿真实验平台,该地点坐标为东经 119.980 293°,北纬31.817 440°,海拔高度为 7 m。

2.1.1　组件布置及其性能参数

光伏电站作为实验的基础发电单元，为满足逆变器启动所需的电压要求，实验将 8 块组件串联成为 1 个组串，组件采用 LR6-72BP-360M,铭牌参数如表 2 所示。

表 2　LR6-72BP-360M 组件铭牌

Table 2 Component nameplate parameters of LR6-72BP-360M

参数	数值	参数	数值
峰值功率/W	385	短路电流/A	11.35
组件效率/%	21.8	开路电压温度系数/%·℃$^{-1}$	-0.28
峰值电压/V	35.7	短路电流温度系数/%·℃$^{-1}$	+0.06
峰值电流/A	10.78	峰值功率温度系数/%·℃$^{-1}$	-0.36
开路电压/V	43.2	工作温度/℃	-40~85

电站共有 16 块组件，安装在 4 个光伏支架上,每个支架上安装 4 块竖向组件,图 4 为光伏电站的照片。



图 4　实验用光伏电站

Fig.4 Experimental photovoltaic power station

2.1.2　逆变器安装及其性能参数

选用的逆变器除了常规需求功能外，还需要支持接入光伏功率优化器功能。选用 SUN2000-5KTL-L1 逆变器，其输入和输出端的参数如表 3 所示。

表 3　逆变器铭牌参数

Table 3 Huawei inverter nameplate parameters

参数	数值	参数	数值
最大输入电压/V	600	输入路数	2
每路 MPPT 最大输入电流/A	12.5	MPPT 数量	1
每路 MPPT 最大短路电流/A	18	额定输出功率/W	5 000
MPPT 电压/V	90~560	最大视在功率/V·A	5 500
额定输入电压/V	360	最大输出电流/A	25

2.1.3　光伏电站气象环境监测系统及其性能参数

气象及环境监测系统用来采集实验场地的辐照、温度、风向、风速及湿度等气象数据。本实验采用 PC-2-T2 型光伏电站气象环境监测系统实时监测,并通过 RS232 通讯接口与电脑连接,下载、记录数据。气象及环境监测系统的相关参数如表 4 所示。

表 4　气象站铭牌参数

Table 4 Meteorological station nameplate parameters

参数	量程	分辨率	准确度
环境温度/℃	-50~80	0.1	±0.2
风向/(°)	0~360	2.5	±3
风速/m·s^{-1}	0~75	0.1	±0.3
组件温度/℃	-40~150	0.1	±0.2
大气压力/kPa	300~1 100	0.1	±0.3
总辐射/W·m^{-2}	0~2 000	1	≤5%
日照时数/h	0~24	0.1	±0.1
直接辐射/W·m^{-2}	0~2 000	1	≤2%
散射辐射/W·m^{-2}	0~2 000	1	≤5%

2.1.4　光伏功率优化器安装及其性能参数

光伏功率优化器采用华为 SUN2000-450W-P 串联功率优化器,该功率优化器为 Buck 拓扑结构。其技术参数如表 5 所示。

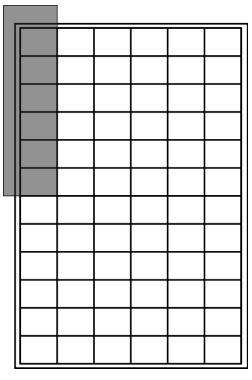
表 5　功率优化器技术参数

Table 5 Power optimizer technical parameters

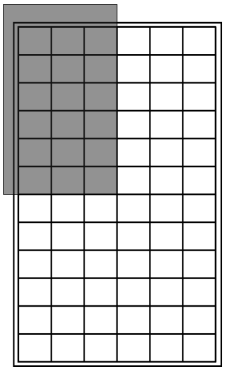
参数	数值	参数	数值
额定输入功率/W	450	最大效率/%	99.50
最大输入电压/V	80	最大输出电压/V	80
MPPT 电压工作/V	8~80	最大输出电流/A	15
最大短路电流/A	13	工作温度/℃	-40~85

2.2　实验方案及数据分析

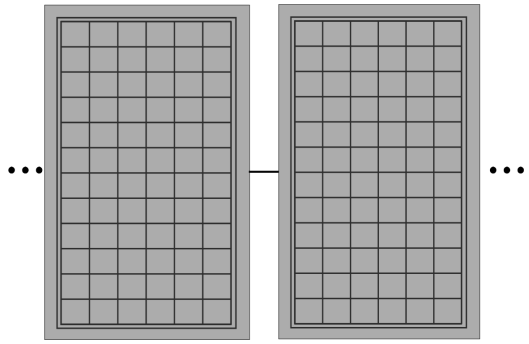
设置两种组串遮挡情况的试验方案，分别为组件被完全不透光的卡片遮挡不同面积、2 块组件被部分透光膜全部遮挡,如图 5 所示。



(a)方案一:不透光膜遮挡左上部竖向 6 片



(b)方案二:不透光膜遮挡左上部竖向 18 片



(c)方案三:50%透光膜遮挡 2 块组件

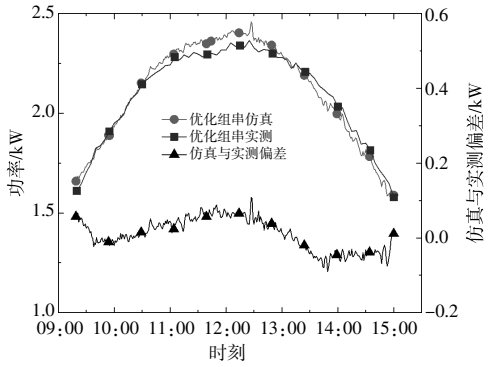
图 5 实验方案示意图

Fig.5 Experimental scheme diagram

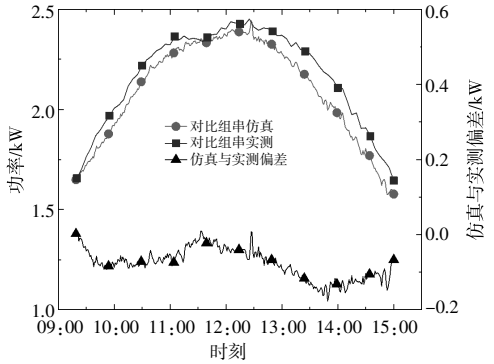
对比安装优化器前、后的发电量仿真情况,并与实测数据对比,验证仿真模型的精确性。每个实验方案周期为 1 d。并根据气象站采集到的气象数据对组串进行仿真,最后将仿真数据和逆变器实测数据进行对比。

方案一为遮挡左上部竖向 6 片电池片。在 09:15–15:00 时,优化组串和对比组串的仿真与实测结果见图 6。

由图 6 可知,在发电功率上,优化组串和对比组串的仿真数据与实测趋势一致。2 个组串的仿真数据普遍小于实测数据,这是因为该方案的遮挡只涉及到组件内的 1 个电池片组串,实际工作温度低于仿真模拟温度,导致仿真的功率曲线低于实测。在优化组串中,10:30–13:00 时,发电功率的仿真曲线高于实测曲线,这是由于遮挡区域较小,功率优化器在运行过程中会产生功率损失。



(a)优化组串仿真实测对比

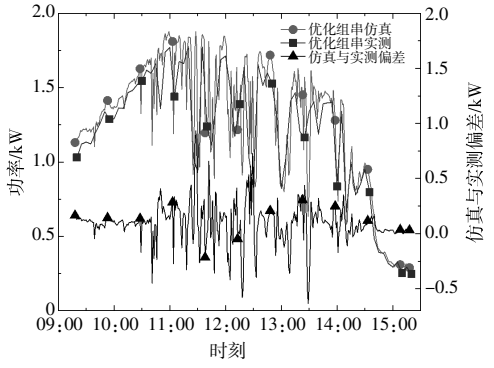


(b)对比组串仿真实测对比

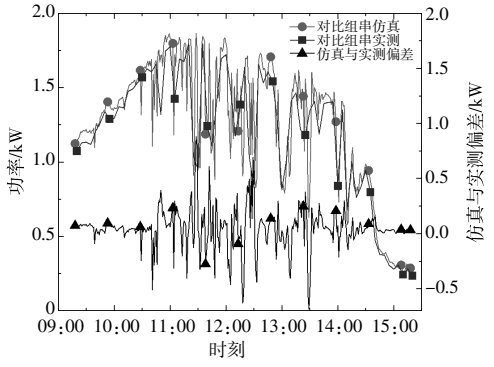
图 6 遮挡左上部竖向 6 片

Fig.6 Masking the 6 vertical pieces on the upper left side

方案二为不透光膜遮挡左上部竖向 18 片电池片,与方案一相比,组件遮挡的位置不变,遮挡面积扩大了 2 倍。在 09:15–15:00,优化组串和对比组串的仿真与实测结果见图 7。



(a)优化组串仿真实测对比



(b)对比组串仿真实测对比

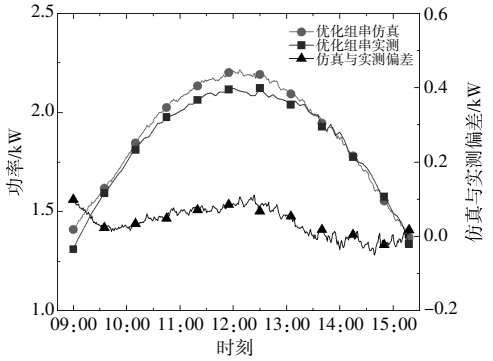
图 7 遮挡左上部竖向 18 片

Fig.7 Masking the 18 vertical pieces on the upper left side

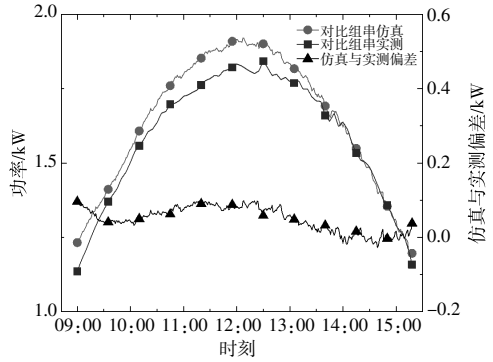
由图 7 可知，仿真与实测的发电功率趋势一致。

方案三用 50%的透光膜完全遮挡了组串中的 2 块组件。实验当天辐照均匀,得到的优化组串和对比组串的仿真与实测结果如图 8 所示。

由 8 图可知，组串发电量仿真和实测趋势一



(a)优化组串仿真实测对比



(b)对比组串仿真实测对比

图 8　2 块组件用 50%透光膜遮挡

Fig.8 Two modules shielded with 50% light-transmitting film

致,而相较于方案一与方案二,方案三仿真曲线高于实测曲线是由于仿真算法对光伏组件的非线性电学特性简单化处理，在光伏强度和温度动态变化的实际场景中无法完全模拟组件的实际输出而产生一定偏差。

实验的具体数据如表 6 所示。

表 6　3 种方案仿真、实测数据

Table 6 Simulation &measurement data of 3 schemes

方案		实测最大功率 W	仿真最大偏差 %	仿真最小偏差 %	仿真发电量 kW·h	实测发电量 kW·h	日发电量仿真偏差/%	优化发电量增益/%
方案一	优化组串	2 364.57	-4.74	0.13	12.01	11.93	0.67	-3.32
	对比组串	2 450.65	-9.40	0.47	11.93	12.34	-3.32	
方案二	优化组串	1 725.15	-49.60	0.05	7.06	6.81	3.67	-2.99
	对比组串	1 796.60	-47.15	0.00	7.30	7.02	3.99	
方案三	优化组串	2 123.14	7.04	0.00	11.97	11.73	2.05	16.14
	对比组串	1 842.02	7.79	-0.01	10.41	10.10	3.07	

方案一功率最小偏差为 0.13%，最大偏差为-9.4%，并且方案一中的优化组串和对比组串的日发电量仿真偏差分别为 0.67%和-3.32%,在 4%以内,具有一定的参考价值。相对于方案一,方案二遮挡面积增大，仿真最小偏差在 0.5%以下,仿真最大偏差为-49.6%,其原因是仿真采用气象站的数据,采集周期为 1 min/次,而实测数据由逆变器采集,采集周期为 5 min/次,因此在仿真和实测时,有些数据在时间点上不一致。若恰巧天气转阴天,辐照突然变低,仿真功率正常,而逆变器的实测数据没有同步,导致数据之间出现断层,在辐照波动比较大的区域,仿真精度误差较大。分析整天的发电量仿真误差均在 4%以内，从全天的数据来看,方案二的仿真仍具有较高的精度。

在方案一和方案二中，均对组串中的某一部分组件施加遮挡，并且优化组串中的全部 8 块组件均配备了功率优化器。由于遮挡面积较小,功率优化器对发电性能的提升有限,同时,8 个优化器的总效率损耗超过了其带来的优化增益，导致优化组串的总功率低于对比组串的总功率。实验结果显示,两个方案的优化发电增益均为负值,分别为-3.32%和-2.99%。

方案三中优化组串和对比组串的日发电量仿真偏差分别为 2.05%和 3.07%，均在 4%以内,表明仿真结果具有较高的精度。功率优化器的发电增益达到 16.14%。与前两种方案相比,方案三通过透光膜遮挡了 2 块组件，且对组件进行了完全遮挡,整个组串的阴影不均匀性显著提高,导致组串失配更加严重,因此,在安装优化器后,优化器的增益超过了其自身损耗，为组串整体带来了正

向的发电增益。

对比 3 种方案可知:功率优化器本身会产生一定的效率转换损失，在组件遮挡区域较小时，光伏系统加装的优化器对系统的优化不足以弥补效率损失;在遮挡区域较大时,串联组串失配现象明显,此时优化器对光伏系统的提升效果显著。

3 结论

首先，本文推导了光伏电站在阴影遮挡下输出特性，并建立了基于光伏功率优化器对组件性能提升模型，在已知组件表面遮挡比例的情况下对接入优化器前后组串发电量进行了仿真;然后,搭建了实验平台,并设计了 3 种实验方案,对比仿真数据和实测数据。结果表明,3 种实验方案的日发电量仿真偏差均在 4%以内，具有一定的参考价值;同时,对比接入功率优化器前、后组串的发电量可知，功率优化器能减少因组串受到不均匀阴影遮挡导致的功率损失。在遮挡面积较少时优化器提升效果不明显,阴影遮挡严重时,功率优化器可提高 16.14%的发电量。

参考文献:

[1] 李莉莉,白羽,黄宏宇,等.太阳能光电/光热一体化技术及其应用进展研究 [J]. 可再生能源,2020,38(6):752-757.

[2] 姚玉璧,郑绍忠,杨扬,等.中国太阳能资源评估及其利用效率研究进展与展望 [J]. 太阳能学报,2022,43(10):524-535.

[3] Group G L M.IEA sounds alarm:geopolitical tensions in Middle East pose serious threat to global oil supplies[J]. Global LNGG Monitor,2024,797:1-6.

[4] 崔烨彬,白建波,陶云坤,等.半片光伏组件阴影遮挡下性能模拟方法研究 [J]. 可再生能源,2024,42(3):331-339.

[5] Torres J P N,Nashih S K,Fernandes C A F,et al.The effect of shading on photovoltaic solar panels[J].Energy Systems,2018,9:195-208.

[6] Choi S J,Lee D S,Jo J H.Method of deriving shaded fraction according to shading movements of kinetic facade[J].Sustainability,2017,9(8):1449.

[7] 李勇,邱亚军,覃茂欢,等.光伏组件间阴影遮挡预测模型的建立[J].太阳能,2023,(11):33-38.

[8] 程相奥,周刘俊,宋碧昊,等.屋顶光伏构筑物阴影遮挡范围计算[J].科学技术创新,2023,(23):211-215.

[9] 谭建斌,欧阳萍,段春艳,等.基于局部阴影遮挡下的光伏组件效率提升优化控制技术及实验分析[J].科学技术创新,2022,(24):37-40.

[10] 杨洪明,陈博文,王懂,等.局部阴影遮挡下太阳能电池-超级电容器件阵列建模及其缺失电流协同补偿方法[J].电力自动化设备,2021,41(6):15-23.

[11] 郝玉哲,白建波,张臻,等.一种阴影情况下光伏组件输出特性的计算方法 [J]. 可再生能源,2012,30(9):11-15.

[12] 彭乐乐,孙以泽,林学龙,等.工程用太阳电池模型及参数确定法[J].太阳能学报,2012,33(2):283-286.

[13] Tao Y,Bai J,Pachauri R K,et al.Parameter extraction of photovoltaic modules using a heuristic iterative algorithm[J].Energy Conversion and Management,2020,224:113386.

[14] 白建波.太阳能光伏系统建模、仿真与优化[M].北京:电子工业出版社,2014.

[15] Zhang X,Chen M,Fu Y,et al.A step-down partial power optimizer structure for photovoltaic series-connected power optimizer system [A].2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition(PEAC)[C].New York:IEEE,2018:1-4.

[16] 张传升. 部分遮挡条件下 CIGS 组件性能实验研究[J].可再生能源,2017,35(10):1479-1483.

Performance enhancement of power optimizers and output characteristics of photovoltaic power plants under shading effects

Di Liang[1], Dong Jie[1], Zhou Zhenyu[1], Yan Xinyue[1], Bai Jianbo[2]
(1.Longyuan New Energy Engineering Design and Research Institute Co.,Ltd., Beijing 100034, China; 2.College of Renewable Energy, Hohai University, Changzhou 213200, China)

Abstract: In practical applications,photovoltaic (PV) modules often experience partial shading due to obstructions such as chimneys,trees,or bird droppings,leading to power mismatch losses in the system.To minimize the impact of shading and further enhance the power generation capacity of PV systems,this paper first derives the output characteristics of PV power stations under shaded conditions and establishes a model for improving string performance based on power optimizers. Subsequently,based on the known proportion of shading on the module surface,an experimental platform was built to analyze the deviation between measured and simulated results using three experimental schemes and to compare the power generation of the strings before and after incorporating power optimizers.Data show that the deviation in daily power generation between measured and simulated results is within 4%,and power optimizers can increase power generation by up to 16.14%.The research findings provide important guidance for enhancing the power generation capacity of PV systems under shading conditions in practical scenarios.

Keywords: photovoltaic power station; shading effects; output characteristics; power optimizer; efficiency improvement