

不同地面背景对双面光伏组件发电性能的影响

张继平, 郝国强, 李红波, 叶晓军, 柳 翠, 袁 晓

(华东理工大学材料科学与工程学院, 上海 200237)

摘 要: 以双面光伏组件为研究对象,通过理论计算和实验研究的方法,对双面组件在不同地面背景下的发电性能进行理论分析与实验验证。研究表明:双面组件的功率增益随地面背景的反射率增大而增大,随辐照度增加而降低,双面组件在反射率最大的铝箔地面与反射率最小的草坪地面的最大功率增益分别为25.30%和8.24%。

关键词: 太阳能电池;发电量;数学模型;实验研究;反射率;双面组件

中图分类号: TM615

文献标志码: A

0 引 言

双面光伏组件因具有光致衰减减小、弱光响应好、温度系数低等优点而日益受到关注和重视。与传统单面组件相比,双面组件正、反面均可将光能转换成电能,其发电性能易受到不同背景的影响,主要体现为地面反射率对双面组件输出功率的影响。

目前国内关于双面组件发电性能的研究^[1-2]多为户外实验测试结果的定性分析,通过模型计算进行的理论研究不够全面和成熟。国外则多为相关理论模型的研究^[3-5],但尚未形成一个明确普适的模拟体系,且已有模型的可靠性有待验证。Yusufoglu等^[6-7]通过建立双面组件的光学模型对组件发电性能的影响因素进行理论分析,得出组件在各因素达到最佳时的理论发电量增益为25%。Shoukry等^[8]提出双面组件的发电量增益模型,比较不同安装方式的双面组件在2种反射率下的发电量增益模拟结果,得出反射率较高的组件增益更大。上述研究对双面组件在不同地面背景下的发电性能分析不够全面和细致,且缺乏相应的实验研究。本文结合理论计算和实验研究,对双面组件在不同地面背景下的发电性能进行理论分析和实验验证,得出双面组件在不同背景不同天气下的输出情况,为双面组件的实际应用提供理论指导。

1 理论模型

本文对双面组件光学、热学和电学性能3个方面的模型进行分析,基于双面组件I-V测试的特性参数和户外辐照及气象数据,建立反射率与组件输出性能的数值关系。

1.1 光学模型

组件正面接收的总辐照度 G_t 等于正面的直射辐照度 $G_{b,t}$ 、散射辐照度 $G_{d,t}$ 和反射辐照度 $G_{g,t}$ 之和,组件背面接收的总辐照度 G_r 等于背面的直射辐照度 $G_{b,r}$ 、散射辐照度 $G_{d,r}$ 和反射辐照度 $G_{g,r}$ 之和。模型中的全球水平辐照度(global horizontal irradiance, GHI)、散射水平辐照度(diffuse horizontal irradiance, DHI)和直射垂直辐照度(beam normal irradiance, BNI)通过气象站实时测量。

1.1.1 组件正面接收到的辐照度模型

组件正面的直射辐照度用太阳位置和直射辐照度计算如式(1)。

$$G_{b,t} = BNI \times \frac{\cos \theta_s}{\sin \alpha_s} \quad (1)$$

式中, θ_s ——太阳入射角, (°); α_s ——太阳高度角, (°)。

组件正面的散射辐照度用Perez模型^[9]确定如式(2)。

$$G_{d,t} = DHI \left[(1 - F_1) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin \beta \right] \quad (2)$$

式中, F_1 ——环绕太阳系数; β ——组件倾角, (°); F_2 ——水平亮度系数; a 、 b ——环绕太阳入射圆锥角在倾斜面上和水平面上角度的影响因子。

组件正面的反射辐照度用各向同性模型计算^[10]如式(3):

$$G_{g,t} = GHI \times \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (3)$$

式中, ρ ——地面反射率。

综上所述,组件正面接收的辐照度如式(4):

收稿日期: 2017-11-07

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划(17DZ1201405)

通信作者: 郝国强(1977—), 男, 博士、高级工程师, 主要从事光伏发电方面的研究。haoguoqiang@ecust.edu.cn

$$G_f = BNI \times \frac{\cos \theta_s}{\sin \alpha_s} + DHI \times \left[(1 - F_1) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin \beta \right] + GHI \times \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (4)$$

1.1.2 组件背面接收到的辐照度模型

组件背面的直射辐照度 $G_{b,r}$ 和散射辐照度 $G_{d,r}$ 计算方法与正面相同, 组件背面的辐照度主要来源于地面反射辐照度 $G_{g,r}$, 由于地面阴影的存在使背面辐照的空间均匀性受到影响, 用各向同性模型会导致结果不准确, 需要基于传热基础的角系数(view factor, VF)^[11]来精确求算, 角系数表示从任意表面 A_1 离开, 到达表面 A_2 的辐照部分。

$VF_{A_1 \rightarrow A_2}$ 通过对微元面 dA_1 到达微元面 dA_2 的辐照部分进行积分:

$$VF_{A_1 \rightarrow A_2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi s^2} dA_1 dA_2 \quad (5)$$

式中, s ——微元面 dA_1 中心到 dA_2 中心的距离, m; θ_1 、 θ_2 —— dA_1 和 dA_2 两表面的法向量与两表面中心连线之间的夹角, ($^\circ$)。

到达组件背面 A_m 的反射辐照度来源于组件在地面形成的阴影区域 A_s 和阴影之外的区域 A_{ns} , 从 A_s 和 A_{ns} 反射回 A_m 的辐照度分别为 DHI 和 GHI , 从地面反射到 A_m 的各部分辐照度大小还与地面反射率 ρ 有关, 因而组件背面接收到来自地面的反射辐照度表示为式(6)。

$$G_{g,r} = \rho \times GHI \times VF_{A_s \rightarrow A_m} + \rho \times DHI \times VF_{A_{ns} \rightarrow A_m} \quad (6)$$

由于组件每片电池到 A_s 和 A_{ns} 的距离不同, 使得每片电池接收到的地面反射辐照度也不同, 为了使 $G_{g,r}$ 计算结果更加精确, 将阴影区域 A_s 平均分为 6 份, 分别对每片电池进行角系数求解。

综上所述, 组件背面接收的辐照度如式(7)。

$$G_r = BNI \times \frac{\cos \theta_s}{\sin \alpha_s} + DHI \times \left[(1 - F_1) \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin \beta \right] + \rho \times GHI \times VF_{A_s \rightarrow A_m} + \rho \times DHI \times VF_{A_{ns} \rightarrow A_m} \quad (7)$$

1.2 热学模型

组件的运行温度高于环境温度, 需要用组件的功率温度系数 α 对输出功率进行温度影响的修正。组件的运行温度 T_m 可通过环境温度 T_a 、组件正面接收到的辐照度 G_f 以及电池额定工作温度(nominal operating cell temperature, NOCT)^[12]来计算。

$$T_m = T_a + \frac{NOCT - 20}{800} G_f \quad (8)$$

文献[13]研究表明, 双面双玻组件的 NOCT 取 47°C 。

1.3 电学模型

基于组件的 I_{sc} 与辐照度呈线性关系, V_{oc} 与辐照度呈对数关系的假设, 当双面组件的正面辐照度为 G_f , 背面辐照度为 G_r 时, 根据双面组件正、反面分别在 STC 条件下测得的短路电流 I_{sc-f0} 、 I_{sc-r0} 和开路电压 V_{oc-f0} 、 V_{oc-r0} 可推出:

$$I_{sc-f} = I_{sc-f0} \frac{G_f}{G_{STC}}, I_{sc-r} = I_{sc-r0} \frac{G_r}{G_{STC}} \quad (9)$$

$$V_{oc-f} = V_{oc-f0} \frac{\ln G_f}{\ln G_{STC}}, V_{oc-r} = V_{oc-r0} \frac{\ln G_r}{\ln G_{STC}} \quad (10)$$

$$FF_f = \frac{I_{m-f} V_{m-f}}{I_{sc-f} V_{oc-f}}, FF_r = \frac{I_{m-r} V_{m-r}}{I_{sc-r} V_{oc-r}} \quad (11)$$

式中, G_{STC} ——STC 条件下的辐照度, 1000 W/m^2 。

在此基础上, 根据 Singh 等^[3]提出的电学模型计算双面组件的特性参数。

双面组件短路电流、双面组件开路电压和双面组件填充因子的计算公式如式(12)~式(14)。

$$I_{sc-bi} = I_{sc-f} + \chi I_{sc-r} = R_{I_{sc}} I_{sc-f} \quad (12)$$

$$V_{oc-bi} = V_{oc-f} + \frac{(V_{oc-r} - V_{oc-f}) \ln(R_{I_{sc}})}{\ln(I_{sc-r}/I_{sc-f})} \quad (13)$$

$$FF_{bi} = pFF - R_{I_{sc}} \left(\frac{V_{oc-f}}{V_{oc-bi}} \right) (pFF - FF_f) \quad (14)$$

式中, χ ——组件正反面辐照比, $\chi = G_r/G_f$; $R_{I_{sc}}$ ——双面组件相对单面组件的短路电流增量, $R_{I_{sc}} = \frac{I_{sc-f} + \chi I_{sc-r}}{I_{sc-f}}$; pFF ——假设组件在无串联电阻的理想情况下的填充因子, $pFF = \frac{(I_{sc-r}/I_{sc-f}) FF_f - FF_r (V_{oc-r}/V_{oc-f})}{(I_{sc-r}/I_{sc-f}) - (V_{oc-r}/V_{oc-f})}$ 。

综上所述, 双面组件的输出功率如式(15)。

$$P_{bi} = I_{sc-bi} V_{oc-bi} FF_{bi} [1 + \alpha(T_m - 25)] \quad (15)$$

2 理论计算及实验分析

2.1 理论计算及模型验证

为验证理论计算的准确性开展实验研究, 在上海市华东理工大学奉贤校区(30.92°N , 121.47°E)实验 7 楼楼顶设置铝箔、水泥、黄沙和草坪 4 种面积均为 20 m^2 的地面背景, 并在各地面上方以 30° 倾角朝南安装由 72 片 n 型单晶硅电池组成的双玻双面组件各 1 块, 以及 1 块置于水泥地面的常规 n 型单晶单面组件。各组件下边缘距离地面高度均为 56 cm , 各配置 1 个优化

器,对组件的各项电学输出参数进行实时监控和采集,数据采集周期为 2 min。此外,实验平台搭建了由风向仪、总辐射表、直接辐射表和散射辐射表组成的气象监测站,可实时测量并记录一天中的水平总辐照度、直射辐照度、散射辐照度和气温等气象数据。将互相平行、朝向相反的 2 个总辐射表的读数之比作为该时刻的地面反射率,每 30 分钟测 1 次各背景反射率,实验在晴天和阴天 2 种天气情况下进行。

将测得的相关数据代入建立的数学模型,计算出各组件每 30 分钟对应的瞬时功率模拟值。模型中角系数的求解十分复杂,可借鉴 Gross 等^[11]提出的角系数方程来计算整个地面到组件背面的角系数,并将平行四边形阴影调整为矩形来求解 $VF_{A_m \rightarrow A_m}$,然后通过角系数的可加性,求出 $VF_{A_m \rightarrow A_m}$ 。在理论计算中采用 Matlab 软件编写角系数积分程序进行求解,将模拟值与实测值进行对比,如图 1~图 3 所示。

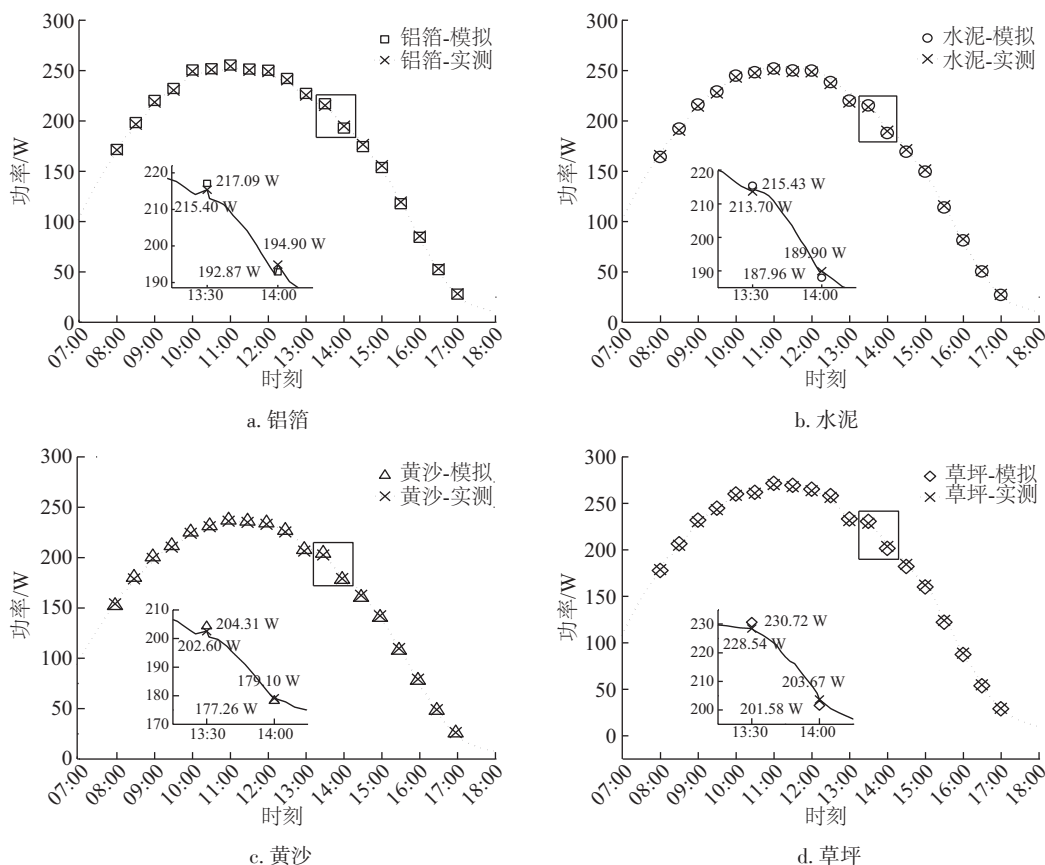
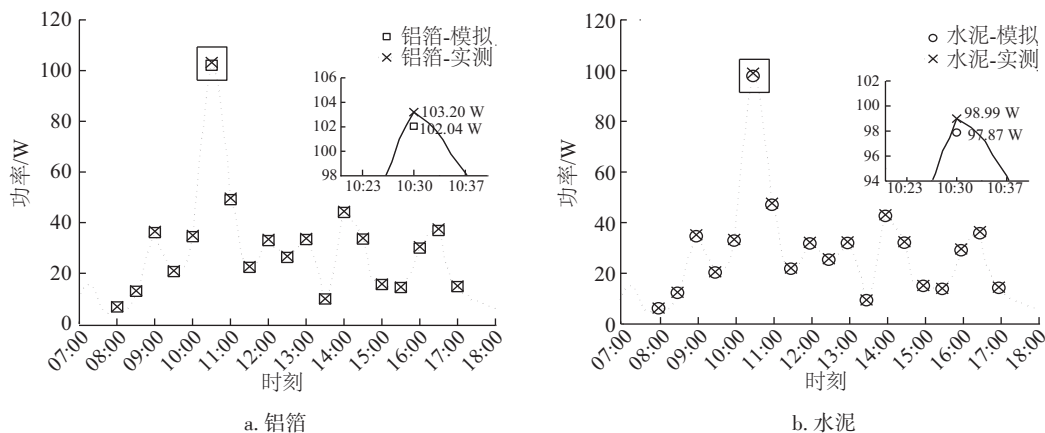


图 1 晴天不同背景下双面组件的输出功率模拟值与实测值

Fig. 1 Power simulated and measured values of bifacial modules with different backgrounds on clear day



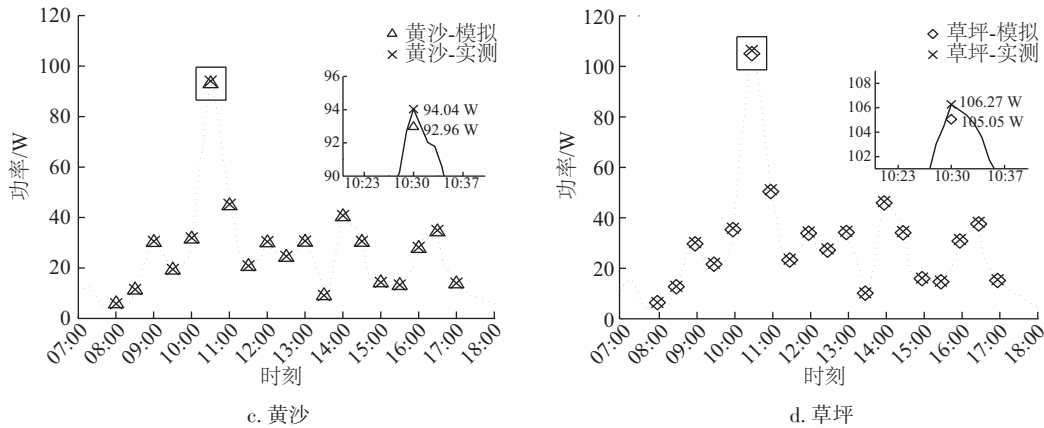


图2 阴天不同背景下双面组件的输出功率模拟值与实测值

Fig. 2 Power simulated and measured values of bifacial modules with different backgrounds on cloudy day

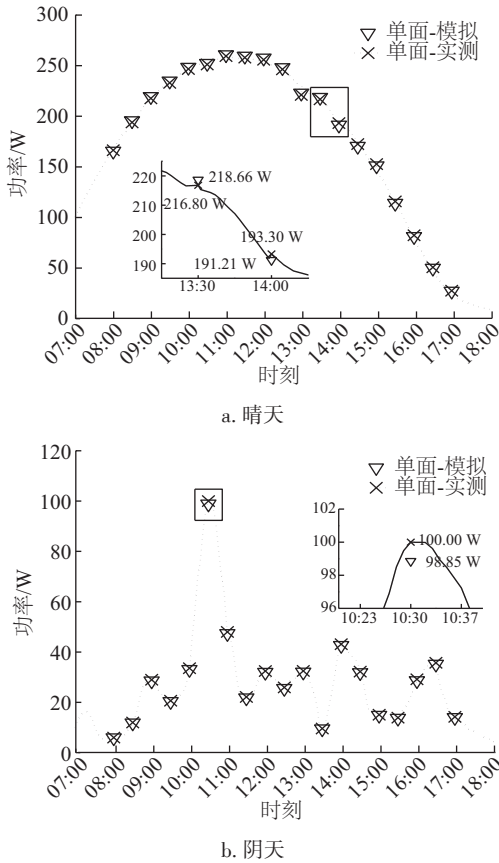


图3 晴天和阴天单面组件的输出功率模拟值与实测值

Fig. 3 Power simulated and measured values of monofacial module on clear and cloudy day

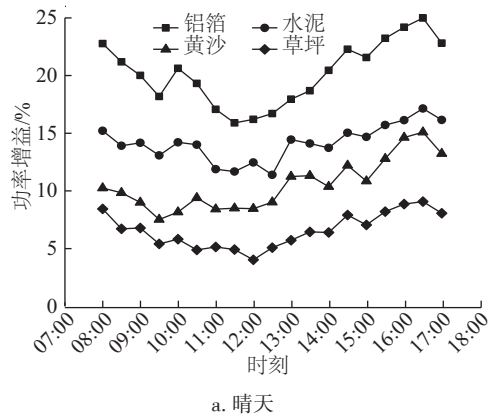
图1~图3分别为晴天和阴天,置于不同地面背景上的双面组件和水泥地面上的单面组件不同时刻的输出功率模拟值与实测值的比较。如图1和图3a中13:30和14:00对应的模拟值与实测值所示,晴天辐照度较高时各组件输出功率模拟值与实测值误差均小于

1%,辐照度较低时,误差在1%~2%之间。如图2和图3b中10:30对应的模拟值与实测值所示,阴天全天辐照度较低,各组件输出功率模拟值与实测值的误差介于1%~2%。由于在 V_{oc-bi} 建模过程中忽略高辐照度下漏电流造成的并联电阻损失,以及 FF_{bi} 建模时提出组件运行电流随辐照度的变化趋势与短路电流一致的假设,削弱串联电阻对 FF_{bi} 和 I_{sc-bi} 的影响,使得模拟结果与实测值在低辐照度下的误差比高辐照度下较大。而2%的误差在可接受范围内,证明模型的可靠性。

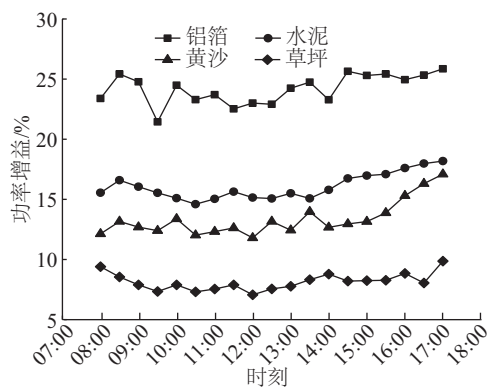
2.2 双面组件发电性能分析

基于上述建立并验证后的模型,从不同背景对应的双面组件相对单面组件的功率增益,以及同一双面组件背面输出功率 P_r 与双面输出功率 P_{bi} 之比,分析不同地面反射率对双面组件发电性能的影响,如图4~图6所示。

图4为晴天和阴天不同地面背景上的双面组件相对单面组件的功率增益变化趋势,图5为晴天和阴天各地面背景上的双面组件背面输出功率与双面输出功率之比,即双面组件背面贡献的功率增量。从图4中可看出,双面组件的功率增益由大到小对应的背景依次为铝



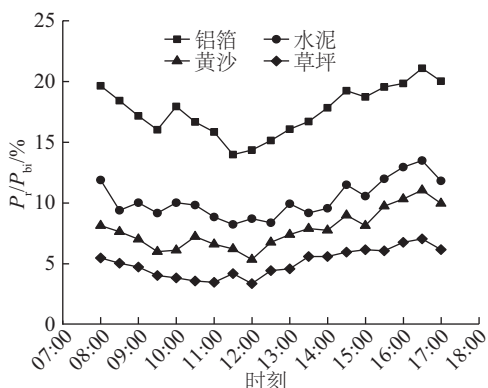
a. 晴天



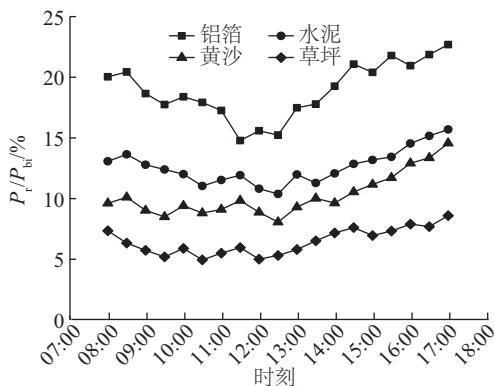
b. 阴天

图4 晴天和阴天不同背景下双面组件相对单面组件的功率增益

Fig. 4 Power gain of bifacial relative to monofacial with different backgrounds on clear day and cloudy day



a. 晴天



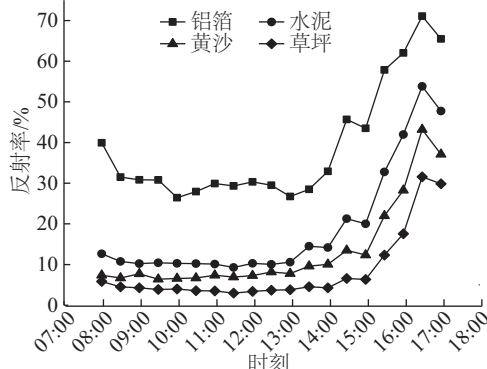
b. 阴天

图5 晴天和阴天不同背景下双面组件背面与双面输出功率之比

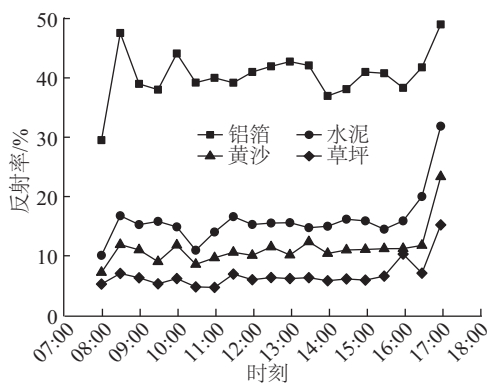
Fig. 5 P_t/P_m of bifacial modules with different backgrounds on clear day and cloudy day

箔,水泥,黄沙和草坪,且晴天相同背景下的功率增益比

阴天小。一天中辐照度较低的上午和下午功率增益较大,辐照度较高的中午功率增益较小。图5与图4有相同的趋势。



a. 晴天



b. 阴天

图6 晴天和阴天不同背景反射率变化

Fig. 6 Variation of different backgrounds albedo on clear day and cloudy day

选取晴天和阴天3个具有代表性时刻对应的各背景反射率与功率增益和 P_t/P_m 进行对比分析,如表1所示。由表1可知,相同时刻反射率由大到小对应的背景依次为铝箔、水泥、黄沙和草坪,表1中晴天不同时刻反射率在下午最大,上午次之,中午最小,相应的各背景对应的双面组件功率增益和 P_t/P_m 在下午达到最大,中午最小。其中,反射率最大的铝箔地面在15:00时刻功率增益达21.57%,相比同一时刻反射率较小的水泥,黄沙和草坪地面的功率增益分别多6.89%、10.72%和15.41%。表2中同一背景阴天的地面反射率比晴天大,各背景对应的双面组件功率增益和 P_t/P_m 也比晴天大。15:00时刻反射率最大的铝箔地面对应的双面组件功率增益达25.3%,比同一时刻的晴天多3.73%。

表1 晴天和阴天不同时刻双面组件在不同背景反射率下的功率输出情况

Table 1 Power output of bifacial modules with different backgrounds albedo at different moments on clear and cloudy day

时刻	天气	铝箔			水泥			黄沙			草坪		
		反射率/%	功率增益/%	$P_r/P_{bi}/\%$	反射率/%	功率增益/%	$P_r/P_{bi}/\%$	反射率/%	功率增益/%	$P_r/P_{bi}/\%$	反射率/%	功率增益/%	$P_r/P_{bi}/\%$
09:00	晴天	31.00	20.01	17.17	10.00	14.17	10.03	8.00	9.00	7.02	4.00	6.78	4.73
	阴天	39.00	24.77	18.65	15.00	16.05	12.79	11.00	12.69	9.07	6.00	7.89	5.74
12:00	晴天	30.00	16.20	14.36	10.00	12.46	8.71	7.00	8.46	5.35	3.00	4.03	3.37
	阴天	41.00	23.01	15.59	15.00	15.15	10.82	10.00	11.80	8.87	6.00	7.06	5.01
15:00	晴天	44.00	21.57	18.73	20.00	14.68	10.57	12.00	10.85	8.14	6.00	7.05	6.16
	阴天	41.00	25.30	20.40	16.00	16.97	13.18	11.00	13.15	11.17	6.00	8.24	6.95

图6为晴天和阴天不同地面背景的反射率变化趋势,上午和下午太阳方位角远离正南方向,阴影在组件斜下方形成平行四边形,下午阴影与组件距离比上午更长,使得组件在下午接受到来自地面的反射辐照度较大,且这2个时段太阳高度角较低,总辐照度较小,因而下午地面反射率较上午大;中午时段,太阳接近正南方位角,阴影在组件下方形成矩形,此时组件背面的辐照度分布均匀但较小,且中午太阳高度角较大,总辐照度大,使得地面反射率减小。因此,一天中功率增益和 P_r/P_{bi} 随反射率的变化在中午最小,在下午达到最大,阴天受周围环境和散射辐照度的影响,组件功率增益和 P_r/P_{bi} 随反射率变化趋势不如晴天明显。此外,组件在晴天正面接收的辐照度比阴天大,而组件背面接收的反射辐照度在晴天相对正面辐照度的占比小于阴天,使得同一背景对应的组件在晴天的反射率比阴天小,因此辐照度较高的晴天功率增益和 P_r/P_{bi} 小于辐照度较低的阴天。

3 结 论

- 1)不同背景上的双面组件输出功率模拟值与实测值误差小于2%,验证了模型的准确性。
 - 2)一天中同一时刻反射率由大到小的背景依次为铝箔、水泥、黄沙和草坪,相应背景对应的双面组件功率增益和 P_r/P_{bi} 依次变小。
 - 3)一天中不同时刻反射率在下午最大,上午次之,中午最小,各背景对应的双面组件功率增益和 P_r/P_{bi} 与反射率变化相同。
 - 4)不同天气,辐照度较低的阴天比辐照度较高的晴天功率增益和 P_r/P_{bi} 更大。
- 综上所述,对于以当地纬度为组件最佳安装倾角的低辐照度地区,可通过设置高反射率的地面背景,来增

加双面组件发电量。

[参考文献]

[1] 王宁,徐刚,舒杰,等.双面太阳能电池垂直安装发电性能测试分析[J].太阳能学报,2008,29(8):976-978.

WANG N, XU G, SHU J, et al. Characteristic tests of vertically installed bifacial PV module[J]. Acta energiae solaris sinica, 2008, 29(8): 976-978.

[2] 周艳方,徐德生,刘志锋,等.N型双面电池发电性能研究[C]//第14届中国光伏大会(CPVC14),北京,2014:16-21.

ZHOU Y F, XU D S, LIU Z F, et al. Study on the power generation performance of n-type bifacial solar cells [C]//14th China Photovoltaic Conference (CPVC14), Beijing, 2014: 16-21.

[3] SINGH J P, ARMIN G A, TIMOTHY M W, et al. Electrical characterization method for bifacial photovoltaic modules[J]. Solar energy materials and solar cells, 2014, 127: 136-142.

[4] GABY J M, BAS B V A, ANNA J C, et al. Outdoor performance of bifacial modules by measurements and modelling[J]. Energy procedia, 2015, 77: 364-373.

[5] GUO S Y, WALSH T M, PETERS M, et al. Vertically mounted bifacial photovoltaic modules: a global analysis [J]. Energy, 2013, 61: 447-454.

[6] YUSUFOGLU U A, LEE T H, PLETZER T M, et al. Simulation of energy production by bifacial modules with revision of ground reflection[J]. Energy procedia, 2014, 55: 389-395.

[7] YUSUFOGLU U A, PLETZER T M, KODUVELIKULATHU L J, et al. Analysis of the annual performance of bifacial modules and optimization methods [J]. IEEE journal of photovoltaics, 2015, 5

- (1): 320-328.
- [8] SHOUKRY I, LIBAL J, KOPECEK R, et al. Modelling of bifacial gain for stand-alone and in-field installed bifacial PV modules [J]. *Energy procedia*, 2016, 92: 600-608.
- [9] PEREZ R, INEICHEN P, SEALS R, et al. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance [J]. *Solar energy*, 1990, 44 (5): 271-289.
- [10] INEICHEN P, OLIVER G, PEREZ R, et al. Ground-reflected radiation and albedo [J]. *Solar energy*, 1990, 44(4): 207-214.
- [11] GROSS U, SPINDLER K, HAHNE E, et al. Shapefactor-equations for radiation heat transfer between plane rectangular surfaces of arbitrary position and size with parallel boundaries [J]. *Letters in heat and mass transfer*, 1981, 8(3): 219-227.
- [12] ROSS R G. Flat- plate photovoltaic array design optimization [C]//14th Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, CA, USA, 1980, 1: 1126-1132.
- [13] ALONSO GARCIA M C, BALENZATEGUI J L. Estimation of photovoltaic module yearly temperature and performance based on nominal operation cell temperature calculations [J]. *Renewable energy*, 2004, 29: 1997-2010.

INFLUENCE OF DIFFERENT BACKGROUNDS ON POWER GENERATION PERFORMANCE OF BIFACIAL PV MODULES

Zhang Jiping, Hao Guoqiang, Li Hongbo, Ye Xiaojun, Liu Cui, Yuan Xiao

(School of Materials Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: The bifacial modules were prepared by theoretical calculation and experimental research method. The power generation performance of bifacial modules with different backgrounds was studied by theoretical analysis and experimental verification. The results show that the power gain of bifacial modules increases with the increase of background albedo, and decreases with the increase of irradiance. The maximum power gain of bifacial modules with the largest albedo of the aluminum foil and the least albedo of the grass are 25.30% and 8.24% respectively. This work provides theoretical direction for the application of bifacial module.

Keywords: solar cells; power generation; models; experiments; albedo; bifacial module