

不同支架形式的高效 PERC 组件发电性能

邹 晗¹, 邵利刚¹, 秦红刚¹, 钱康文¹, 程远哲¹, 李秀秀²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122;

2. 东南大学能源与环境学院, 江苏省太阳能技术重点实验室, 南京 210096)

摘 要: 为解决目前光伏用地紧张的问题, 使得电站收益最大化, 需要对高效 PERC (passivated emitter and rear cell) 组件的发电性能和光伏支架的选型开展进一步研究。该研究基于中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司天长一期 100 MW 渔光互补光伏发电项目, 以天长光伏电站为试验平台, 对固定式 PERC 方阵 B1、单轴式 PERC 方阵 B2、固定式多晶硅方阵 B3 和单轴式多晶硅方阵 B4 在 2018 年的发电情况进行监测, 对比分析了这 2 种光伏组件在不同支架形式下的单瓦全年日均和单瓦单日的发电数据, 验证 PERC 组件优越的发电性能, 对比分析了不同支架形式下 PERC 组件的单瓦全年日均发电数据, 以及在辐照度最高的 7 月及辐照度最低的 12 月的发电性能。结果表明, PERC 组件全年发电性能优于多晶硅组件, 在固定式和单轴式 2 种支架形式下的年平均发电增益分别为 3.7% 和 5.7%, 单轴 PERC 组件在春夏两季的发电性能均优于固定 PERC 组件, 月均发电增益达到 13.4%。PERC 组件在长期工作时的优越发电性能和不同支架形式下的发电特点, 可为未来光伏电站建设初期的组件和支架选取提供参考, 增加电站投资收益。

关键词: 光伏组件; 太阳能; 试验; 钝化发射极背面接触 (PERC); 硅太阳能电池; 单轴式; 固定式

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.025

中图分类号: TM914.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-05-0220-06

邹 晗, 邵利刚, 秦红刚, 钱康文, 程远哲, 李秀秀. 不同支架形式的高效 PERC 组件发电性能[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 220—225. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.025 http://www.tcsae.org

Zou Han, Shao Ligang, Qin Honggang, Qian Kangwen, Cheng Yuanzhe, Li Xiuxiu. Power generation performance of efficient PERC components with different bracket forms[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(5): 220—225. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.025 http://www.tcsae.org

0 引 言

钝化发射极背面接触 (passivated emitter and rear cell, PERC) 电池技术由常规铝背场 (aluminum back-surface field, Al-BSF) 技术发展而来, 相比于常规电池工艺, PERC 电池增加了 Al_2O_3 背钝化和激光划线 2 道工序, 主要通过提高光伏电池的长波响应来提高电池效率^[1], 被认为是下一代 c-Si 太阳能电池^[2]。由于 PERC 电池的制造与标准 Al-BSF 的处理要求基本一致, 可以沿用现有的工业设备、材料和工艺^[3], 因此 PERC 电池是产业化程度最高的高效电池^[4]。

1983 年初, 澳大利亚新南威尔士大学首次提出 PERC 电池的概念, 在 1989 年作为实验室型太阳能电池产生了 22.8% 的创纪录效率, 由此越来越多的研究人员对 PERC 电池展开研究, 2014 年实验室 PERC 电池已成功实现工业化生产^[5]。2015 年 7 月, 德国制造商 SolarWorld 实现了 PERC 电池 21.7% 的效率, 中国的天合光能在同年 12 月实现了 22.13% 的效率, 2016 年 SolarWorld 利用选择性发射技术实现了 22.04% 的生产线转换效率^[6]。2017 年晶

科能源创造了高效 PERC p 型多晶硅太阳能电池, 光电转换效率达 22.04%, 2018 年隆基乐叶 PERC 单晶硅太阳能电池的转换效率最高已达 23.26%^[7]。随着商用 PERC 效率的提高和批量生产, 近年来晶体硅太阳能电池由传统的 Al-BSF 设计向 PERC 电池设计过渡^[8]。Abhishek^[9]采用一个综合成本模型计算 Al-BSF 硅太阳能电池和 PERC 电池的单瓦成本, 发现在一定条件下, 投资 PERC 电池技术可实现盈利。2019 年国际光伏技术路线图 (international technology roadmap for photovoltaic, ITRPV) 预测, 到 2026 年, PERCs 及其相关技术将主导光伏市场, 市场份额大于 70%^[10]。

目前, 世界范围内的研究机构和企业等都在着力于 PERC 太阳能电池的相关研究, 致力于不断提高 PERC 太阳能电池的光衰抑制水平^[11-13]和转换效率^[14-17], 为其市场化奠定了重要的基础。普通晶硅电池的商业应用研究比较成熟, 对不同支架形式的研究有较多探讨^[18-23], 但是关于 PERC 电池的发电性能研究大多依靠理论计算^[24]或者短时间的数据测量, 缺乏长期可靠的试验数据。因此, 本文以中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司天长 100 MW 光伏电站为试验平台, 基于 2018 年全年发电量数据, 通过对比全年单瓦日均发电量和单瓦输出功率, 验证在长期工作时 PERC 组件相比多晶硅组件的优越发电性能, 并对分析 PERC 组件在正南固定式 (倾

收稿日期: 2019-10-16 修订日期: 2020-01-19

基金项目: 华东院越南油汀光伏项目 (20190919)

作者简介: 邹 晗, 高级工程师, 主要研究方向为技术经济。

Email: zou_h3@ecidi.com

角 25°) 和南北单轴跟踪式 (倾角 5°) 下的全年单瓦日均发电量和单月单瓦发电曲线, 得出高效组件的最优发电域。长期工作组件的发电性能对于商业电站的运行具有重大意义, 可为未来光伏电站投资建设的组件选型、方阵支架选型提供技术支撑, 增加电站收益。

1 光伏发电系统简介

1.1 安装位置

项目所在地为安徽省天长市, 地理坐标东经 119.12°, 北纬 32.80°。天长市属于太阳能资源中等地区, 属亚热带北缘季风气候, 温暖湿润, 雨量充沛, 四季分明, 年平均气温 17.4℃, 年均总降水量 1 600 mm, 日照充足, 年均日照总时数为 2 097 h。旱季长 7 个月、雨季 5 个月, 雨季降水量占年降水量的 68%。光伏电站位于天长高邮湖西侧。场地较平整空旷, 地势相对较平缓, 周边暂无建筑物。项目占地类型为鱼塘水域未利用地, 不占农用地, 占地面积为 2 650 hm² [25]。

1.2 系统布置

该项目在场区内布置了 78 个晋能光伏方阵, 包括 72 个多晶硅方阵, 4 个 PERC 方阵, 2 个异质结方阵。其中 70 个方阵为正南固定式安装, 8 个方阵为南北单轴跟踪式安装, 光伏组件纵向 2 排放置, 2 种不同支架形式下的光伏方阵现场图如图 1 所示。

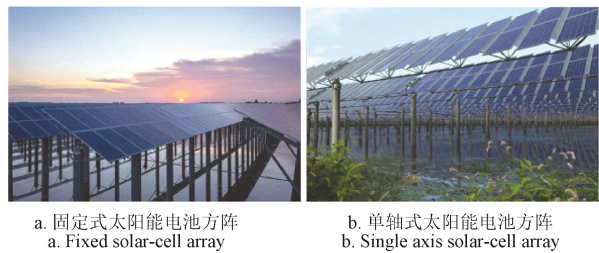


图 1 太阳能电池方阵
Fig.1 Solar-cell array

固定式支架的最佳倾角采用文献[25]的方法计算, 结果发现方阵倾角在 19°~29°范围内的全年日平均太阳总辐射量相差不大, 综合太阳辐射量及支架稳定性等因素考虑, 确定最佳倾角为 25°。单轴式支架的倾角选取考虑工程实践, 最佳倾角确定为 5°。

方阵前后间距约 3 m, 满足冬至日 (一年当中物体在太阳下阴影长度最长的一天) 上午 9: 00 到下午 3: 00 光伏组件之间南北方向无阴影遮挡的要求, 同时考虑场区地势以及便于施工、检修等因素, 光伏组件最低点距水面距离约 1.5 m, 满足当地最大积雪深度、洪水水位、防止动物破坏和防止泥沙溅上光伏组件等要求。

1.3 PERC 电池结构和特点

如图 2 [26] 所示, 相对于标准电池的正面和背面单纯采用复合钝化层, 基于场钝化原理的 PERC 电池在钝化薄膜层局部开孔, 通过孔口与背表面场部分接触, 降低了电池背面的复合速率, 提高了电池的光电转换效率 [27-30]。

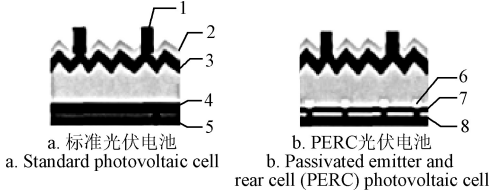


图 2 标准光伏电池与 PERC 光伏电池结构对比
Fig.2 Structure comparison between standard photovoltaic cell and PERC photovoltaic cell

与常规铝背场多晶硅太阳电池相比, PERC 多晶硅太阳电池的开路电压、短路电流密度以及转换效率较高; 有较好的长波光谱响应以及背面 SiNx 和背面铝形成背面反射器具有更高的背反射率, 增加了长波光子的吸收; 背面 SiO₂/SiNx 叠层膜钝化膜有效降低了背表面复合速率, 大大降低了背表面的少数载流子复合 [31]。

2 材料与方法

2.1 试验材料

本文以中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司天长一期 100 MW 渔光互补光伏发电项目为试验平台, 选取光伏电站内固定式 PERC 方阵 B1、单轴式 PERC 方阵 B2、固定式多晶硅方阵 B3 和单轴式多晶硅方阵 B4 为研究对象。

考虑到大型光伏发电系统优先选用单位面积容量大的光伏组件, 以减少占地面积, 降低光伏组件安装量, 该项目选用了 350 W 的 PERC 电池和 320 W 的普通多晶硅电池。其中 PERC 电池电压等级 DC 1000 V, 标称功率 350 W, 尺寸 1 956 mm×992 mm×35 mm, 组件转换效率 18.04%; 普通多晶硅组件电压等级 DC 1000V, 标称功率 320 W, 尺寸 1 956 mm×992 mm×35 mm, 组件转换效率 16.5% [32]。

系统采用若干组逆变器, 每个逆变器具有自动最大功率跟踪功能 (maximum power point tracking, MPPT), 并能够随着光伏组件接收的功率变化, 自动识别并以最经济的方式投入运行。各方阵参数如表 1 所示。

表 1 光伏方阵主要参数 Table 1 Major parameters of photovoltaic arrays				
方阵 Arrays	组件类型 Component type	数量 Numbers	容量 Capacity/MW	汇流箱数量 Numbers of junction box
B1	固定 PERC	4 248	1.487	15
B2	单轴 PERC	4 032	1.411	14
B3	固定多晶硅	4 554	1.457	16
B4	单轴多晶硅	4 608	1.475	16

2.2 试验方法

1) 综合考虑组件类型、光照辐射度和组件支架方式等关键因素, 通过高效组件与普通多晶硅组件的发电数据比较、高效组件固定式与单轴式安装的数据采集分

析, 优化项目投资建设、高效光伏组件选型方案, 为电站运行维护提供参考, 最终提高电站投资收益。

2) 统计试验方阵 2018 年 1 a 的逆变器直流发电数据, 除去系统检修维护等天数, 对数据进行筛选处理。结合本项目所在地的全年辐照度分布图和气候特点, 对各组件在不同支架形式下的全年、单月和单日的发电性能做对比分析。

3) 发电性能与同类型研究的实际或模拟数据进行对比分析, 验证数据的可靠性。

3 试验结果与分析

每个方阵接入 2 台逆变器 (相互对照可确保数据可靠性), 发电量取 2 台逆变器发电量的平均值, 研究 PERC 组件与普通多晶硅组件在全年和典型阴天下的发电性能, 对比 PERC 组件在不同支架形式下的全年和典型月份的单瓦发电性能。

3.1 PERC 组件发电性能

为系统研究 PERC 组件发电性能的优越性以及其在单轴式和固定式形式下的发电性能差异, 选取光伏电站典型的 4 个不同组件、不同支架形式下的方阵进行对比分析。

3.1.1 不同支架形式下的发电量

图 3 为 2018 年 4 个组件的单瓦日均发电量曲线和单位面积日均辐照量曲线。由图 3 可知, 在单轴式支架形式下, PERC 组件单瓦日均发电量相比于多晶硅组件单瓦日均发电量, 年平均发电增益为 5.7%, 在 10 月份发电增益达到 17%。

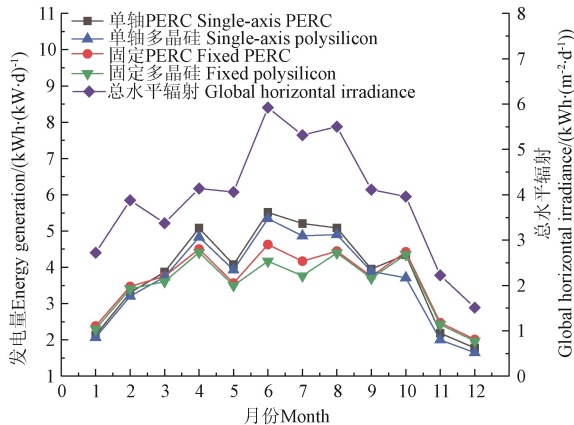


图 3 2018 年单瓦日均发电量

Fig.3 Average daily power generation per watt in 2018

在固定式支架形式下, 相比多晶硅组件, PERC 组件的单瓦日均发电量的年平均增益为 3.7%, 略高于 50 MW 晶澳山西大同领跑者项目固定支架形式下 PERC 组件比普通多晶组件 3.2% 的增益^[33], 在 6、7 月份辐照度较高且天气条件较好的情况下, 发电增益达到 11%。但是总体看, PERC 组件的日均发电量较低, 原因可能是 2018 年天长地区雨量充沛, 月降水天数最多达到 13 d, 使得组件发电量受到影响, 尤其是 5 月份基本为雨天, 使得发电量损失较大。

3.1.2 单日输出功率

为进一步分析 PERC 组件的发电性能, 选取典型阴

天 9 月 30 日 06:00 至 18:15 时段逆变器瞬时输出功率, 每隔 15 min 记录 1 次数据, 结果如图 4。

图 4 中, 在 6:00 至 15:45 的时间段里, PERC 组件的输出功率基本高于多晶硅组件, PERC 组件的全天平均输出功率增益为 26.1%。在 09:00 和 14:00 这 2 个时间点, 天空乌云增多使得辐照度突然降低, PERC 组件的输出功率远高于多晶硅组件, 可见 PERC 组件在乌云突然增多等导致的辐照度突降情况下有着优越的发电性能。

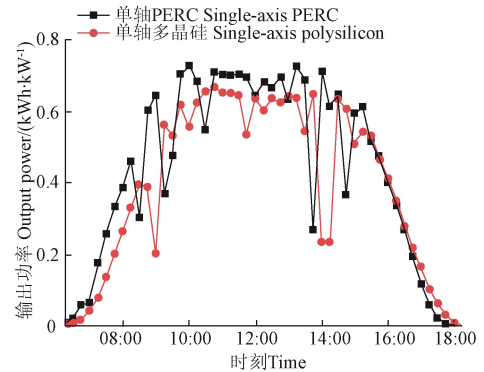


图 4 2018 年 9 月 30 日单瓦输出功率

Fig.4 Output power per Watt on September 30, 2018

结合 2018 年各个组件单瓦日均发电量和单日输出功率数据的对比可以看出, 在单轴和固定式形式下, PERC 组件全年发电性能均优于多晶硅组件, 年平均发电增益分别为 5.7% 和 3.7%, 且 PERC 组件在辐照度突降的情况下仍保持较高的输出功率。

3.2 PERC 组件在不同支架形式的发电量

3.2.1 全年单瓦日均发电量

图 5 为单轴 PERC 组件和固定 PERC 组件在 2018 年全年的单瓦日均发电量和相应的发电增益。

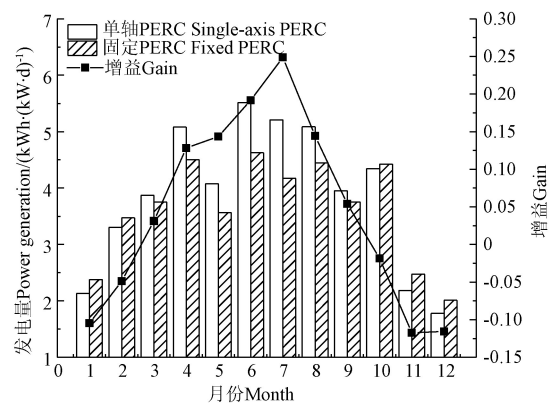


图 5 2018 年 PERC 组件单瓦日均发电量

Fig.5 Average daily power generation per watt of PERC components in 2018

可以看出, 单轴 PERC 组件在 3 月至 9 月, 即春夏两季日均发电量更高, 月均发电增益达到 13.4%, 7 月达到最高发电增益 24.9%; 但是在 10 月至 2 月, 即秋冬两季, 固定 PERC 组件发电性能更好, 月均发电增益为 8.1%。春夏季节的发电增益明显较高, 单轴式 PERC 组

件的发电性能更好,这是因为春夏较秋冬太阳的高度角更大,日照时间更长,这与陈维等^[34]结论一致。在秋冬季节,固定式 PERC 组件的发电性能优于单轴式,这是因为虽然单轴 PERC 使用了南北单轴跟踪方式,但是考虑 2 种组件本身的倾斜角度,单轴 PERC 电池表面与太阳光的夹角还是小于固定 PERC 电池。

3.2.2 7月单瓦日发电量

选取辐照度最高且发电增益最高的 7 月份,图 6 为 2018 年 7 月 PERC 组件在不同支架形式下的发电量折线图。可以看出,单轴 PERC 和固定 PERC 发电量曲线趋势基本吻合,前者发电量大于或近似等于后者发电量。结合天长市 2018 年 7 月天气统计(7 月雨天长达 13 d)可知,在晴天时,单轴 PERC 的发电性能明显优于固定 PERC,但是雨天天气情况下,单轴 PERC 并没有表现出优越的发电性能,这是因为跟踪支架在直射光比例越高的情况下效果越好,而雨天辐射主要为漫反射,跟踪价值不大,这与陈维等^[34]研究得到的在珠海地区 2 至 4 月雨季时,采用跟踪后太阳辐照度和发电量增加都不明显的发现是一致的。

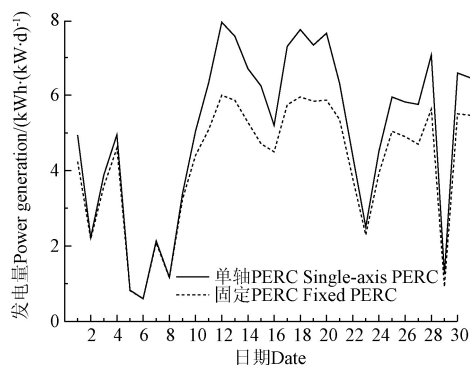


图 6 2018 年 7 月 PERC 组件单瓦日发电量

Fig.6 Daily power generation per watt of PERC components in July 2018

3.2.3 12月单瓦日发电量

选取辐照度最低且发电增益最低的 12 月份,图 7 为 2018 年 12 月 PERC 组件在不同支架形式下的发电量。

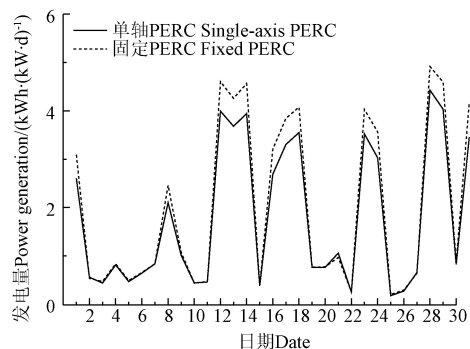


图 7 2018 年 12 月 PERC 组件单瓦日发电量

Fig.7 Daily power generation per watt of PERC components in December 2018

可以看出,单轴 PERC 和固定 PERC 发电量曲线趋

势基本一致,发电量接近。结合天长市 2018 年 12 月天气统计(12 月雨天长达 18 d)可知,这主要是因为 12 月辐照度远低于 7 月且雨天较多,跟踪效果不明显,因此 12 月 2 种支架形式下的发电量曲线重合部分较多。在阴、晴天气情况下固定 PERC 组件的发电性能较好,这是因为对于本项目 2 种跟踪方式的角度设计,冬季时单轴跟踪太阳入射角多数时候大于固定式,使得接收辐照量小于固定式。

4 结 论

本文进行了高效 PERC 组件在不同支架形式下的发电性能研究,初步研究结论如下:

1) 在单轴式和固定式 2 种致支架形式下,PERC 组件全年发电性能均优于多晶硅组件,年平均发电增益分别为 5.7% 和 3.7%,且 PERC 组件在辐照度突降的情况下仍保持较高的输出功率。

2) 单轴 PERC 组件在 3 月至 9 月,即春夏两季日均发电量更高,月均发电增益达到 13.4%,7 月达到最高发电增益 24.9%;但是在 10 月至 2 月,即秋冬两季,固定 PERC 组件发电性能更好,月均发电增益为 8.1%。

3) 在辐照度最高且发电增益最高的 7 月份,晴天时单轴 PERC 组件的发电性能明显优于固定 PERC 组件;在辐照度最低且发电增益最低的 12 月份,晴天时固定 PERC 组件的发电性能明显优于单轴 PERC 组件。而在阴雨天天气情况下辐射主要为漫反射,跟踪价值小,2 种支架形式下 PERC 组件发电量相近。

4) 光伏电站建设初期组件选型和支架选型时,应当充分考察当地的太阳辐照资源和气候特点,如果太阳辐照资源丰富且多晴天,在投资成本等其他条件允许的条件下,可优先使用单轴 PERC 组件。

【参 考 文 献】

- [1] 孙杰. 大同光伏领跑者项目 PERC 单晶组件应用分析[J]. 上海节能, 2017(11): 671—675.
- [2] Myungsu Kim, Sungchan Park, Dongseop Kim. Highly efficient PERC cells fabricated using the low cost laser ablation process[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2013(117): 126—131.
- [3] Blakers Andrew. Development of the PERC solar cell[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2019, 9 (3): 629—635.
- [4] Hannebauer H, Dullweber T, Baumann U, et al. 21.2%-efficient fineline-printed PERC solar cell with 5 busbar front grid[J]. Physica Status Solidi-Rapid Research Letters, 2015, 8(5): 675—679.
- [5] Dullweber Thorsten, Schmidt Jan. Industrial silicon solar cells applying the passivated emitter and rear cell (PERC) concept-A review[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2016, 6(5): 1366—1381.
- [6] Liu Jingjing, Wu Xi, Yao Yao, et al. Review of status development of high efficiency crystalline silicon solar cells[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(12). DOI: 10.1088/1361-6463/aaac6d

- [7] 中国可再生能源学会光伏专业委员会. 2018 年中国光伏技术发展报告(3)[J]. 太阳能, 2019(6): 19—23.
- [8] Lü Y, Zhuang Y F, Wang W J, et al. Towards high-efficiency industrial p-type mono-like Si PERC solar cells[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2020(204): 110202.
- [9] Abhishek Kumar, Monika Bieri, Thomas Reindl, et al. Economic viability analysis of silicon solar cell manufacturing: Al-BSF versus PERC[J]. Energy Procedia, 2017, 130: 43—49.
- [10] Minkyu Ju, Kumar Mallem, Sanchari Chowdhury, et al. Passivated emitter and rear contact (PERC) approach for small-scale laboratory industrial applications[J]. Solar Energy, 2019(194): 167—176.
- [11] 赵磊. P 型多晶硅 PERC 太阳能电池光致衰减效应的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
Zhao Lei. Study on Light Induced Degradation Effect of P-type mc-Si PERC Solar Cells[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张三洋, 沈鸿烈, 魏青竹, 等. 晶硅掺镓抑制太阳能电池光致衰减效应的研究[J]. 人工晶体学报, 2016, 45(4): 1100—1105, 1114.
Zhang Sanyang, Shen Honglie, Wei Qingzhu, et al. Investigation on suppression of light induced degradation effect in crystalline silicon solar cells with gallium doping[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2016, 45(4): 1100—1105, 1114. (in Chinese with English abstract)
- [13] Fertig F, Lantzsch R, Frühauf F. Excessive light-induced degradation in boron-doped Cz silicon PERC triggered by dark annealing[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2019(200): 109968.
- [14] Choi Jae Myeong, Jung Beomsic, Park Jong-Keuk, et al. Modified laser-fired contact process for efficient PERC solar cells[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2019, 27(12): 1092—1103.
- [15] Baik, Sungsun, Jeong, et al. Improved hot-zone for manufacturing low-oxygen silicon ingots for passivated emitter and rear cell[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57(8S3): 08RB02.
- [16] 中国可再生能源学会光伏专业委员会. 2018 年中国光伏技术发展报告(7)[J]. 太阳能, 2019(10): 21—28.
- [17] Boukortt Nour El Islam, Hadri Baghdad. Simulation of electrical characteristics of PERC solar cells[J]. Journal of Electronic Materials, 2018, 47(10): 5825—5832.
- [18] 余雷, 王军, 王新, 等. 关于不同单轴跟踪方式的对比分析[J]. 太阳能学报, 2011, 32(3): 426—432.
Yu Lei, Wang Jun, Wang Xin, et al. Analysis of different single-axis tracking systems[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2011, 32(3): 426—432. (in Chinese with English abstract)
- [19] Emre Kiyak, Gokhan Gol. A comparison of fuzzy logic and PID controller for a single-axis solar tracking system[J]. Renewables: Wind, Water, and Solar, 2016-02-25: DOI: 10.1186/s40807-016-0023-7
- [20] Vieira R G, Guerra F K O M V, Vale M R B G, et al. Comparative performance analysis between static solar panels and single-axis tracking system on a hot climate region near to the equator[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016(64): 672—681.
- [21] Faranda R, Gualdoni M, Leva, et al. Analysis of a PV system with single-axis tracking energy production and performances[C]//2011 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), 2011:130—136.
- [22] 张冰, 吴红, 张云鹏. 不同太阳能光伏发电系统发电性能的对比研究[J]. 机电信息, 2017(33): 7—8.
Zhang Bing, Wu Hong, Zhang Yunpeng. Comparative study on power generation performance of different solar photovoltaic power generation systems[J]. Mechanical and Electrical Information, 2017(33): 7—8. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张亮, 谢今范, 刘玉英. 东北地区固定式与单轴跟踪式光伏发电量对比[J]. 水电能源科学, 2012, 30(4): 202—204, 158.
Zhang Liang, Xie Jinfan, Liu Yuying. Comparisons of fixed type PV and single-axis tracking type PV in northeast China[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(4): 202—204, 158. (in Chinese with English abstract)
- [24] 陈毅湛, 姚建中, 洗丽娟, 等. 基于高效 PERC 双面太阳能电池的中大型光伏发电系统支架排布分析[J]. 五邑大学学报: 自然科学版, 2018, 32(1): 32—36.
Chen Yizhan, Yao Jianzhong, Xian Lixian, et al. Analysis of bracket configuration of large photovoltaic power generation systems based on high efficiency PERC bifacial solar cells[J]. Journal of Wuyi University: Natural Science Edition, 2018, 32(1): 32—36. (in Chinese with English abstract)
- [25] 俞年昌, 李俊龙, 杨俊杰, 等. 华东院天长一期 100MW 渔光互补光伏发电项目可行性研究报告[R]. 杭州: 华东勘测设计研究院有限公司, 2016.
- [26] 赵孟钢, 冯云峰, 刘皎, 等. PERC 太阳能电池测试分析研究[J]. 太阳能, 2015(12): 43—45.
- [27] Martin A Green. The passivated emitter and rear cell (PERC): From conception to mass production[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2015(143): 190—197.
- [28] 陈毅湛, 陈惠秋, 洗丽娟, 等. 基于高效 PERC 太阳能电池屋顶光伏发电系统的设计及能效分析[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(S1): 184—188.
Chen Yizhan, Chen Huiqiu, Xian Lixian, et al. Design and energy efficiency analysis of roof photovoltaic system based on high efficiency PERC solar cells[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(S1): 184—188. (in Chinese with English abstract)
- [29] Metz A, Adler D, Bagus S, et al. Industrial high performance crystalline silicon solar cells and modules based on rear surface passivation technology[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2014(120): 417—425.
- [30] 陈兵兵, 沈艳娇, 杨林林, 等. 自形成点接触 PERC 太阳能电池[J]. 中国科学: 技术科学, 2017, 47(9): 965—971.
Chen Bingbing, Shen Yanjiao, Yang Linlin, et al. Self-formed point-contact PERC solar cells[J]. Scientia Sinica: Technologica, 2017, 47(9): 965—971. (in Chinese with English abstract)
- [31] 赵素香, 张松, 王振交, 等. PERC 结构多晶硅太阳能电池的研究[J]. 半导体技术, 2012, 37(12): 939—942, 968.

- Zhao Suxiang, Zhang Song, Wang Zhenjiao, et al. Study of PERC polycrystalline silicon solar cells[J]. *Semiconductor Technology*, 2012, 37(12): 939—942, 968. (in Chinese with English abstract)
- [32] 郭晨, 江代君, 孙子元, 等. 渔光互补光伏电站中 PERC 单晶组件发电效益研究分析[J]. *工程建设与设计*, 2019(3): 97—99.
- Guo Chen, Jiang Daijun, Sun Ziyuan, et al. Research and analysis on the benefit of PERC single crystal module in yuguang complementary photovoltaic power plant[J]. *Construction & Design for Engineering*, 2019(3): 97—99. (in Chinese with English abstract)
- [33] 孙杰. PERC 单晶组件光伏电站案例分析[J]. *上海节能*, 2019(3): 232—235.
- [34] 陈维, 沈辉, 舒碧芬. 光伏系统跟踪效果分析[J]. *中国科学技术大学学报*, 2006, 36(4): 355—359.
- Chen Wei, Shen Hui, Shu Bifen. Effect of photovoltaics with sun tracking[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2006, 36(4): 355—359. (in Chinese with English abstract)

Power generation performance of efficient PERC components with different bracket forms

Zou Han¹, Shao Ligang¹, Qin Honggang¹, Qian Kangwen¹, Cheng Yuanzhe¹, Li Xiuxiu²

(1. *Huadong Engineering Corporation Limited, Power China, Hangzhou 311122, China*; 2. *Jiangsu Provincial Key Laboratory of Solar Energy Science and Technology, School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China*)

Abstract: At present, research on power generation performance of PERC (passivated emitter and rear cell) components mostly depends on theoretical calculation or short-term data measurement, and there is a lack of long-term reliable test data. Based on the Tianchang 100 MW photovoltaic power station of Huadong Engineering Corporation Limited Power China, this paper collected the power generation data of fixed-tilt (the positive-south fixed tilt, the inclination angle is 25°) PERC array B1, single axis (the north-south single-axis tracking, the inclination angle is 5°) PERC array B2, fixed-tilt polysilicon array B3 and single-axis polysilicon array B4 in 2018. The data of DC power generation of the test array inverters in 2018 were screened and processed. By analyzing the average daily power generation per watt of four arrays in 2018 and output power per watt of array B2 and array B4 on September 30 in 2018, the superior power generation performance of PERC module was verified. Then, for the further research on PERC modules (array B1 and B2), the average daily power generation per watt with the corresponding power generation gain and the daily power generation per watt in July with the highest irradiance and in December with the lowest irradiance were analyzed. The results showed that PERC component had better power generation performance than polysilicon component in the whole year whether it's single-axis tracking or fixed-tilt, with an average annual power generation gain of 5.7% and 3.7%, respectively, and PERC component maintained a high output power in case of a sudden decrease in irradiance. From March to September, the average daily power generation per watt of the single-axis PERC component was higher, with the average monthly generation gain of 13.4%, and the maximum generation gain reaching 24.9% in July. But in October to February, the fixed-tilt PERC component performed better, with an average monthly generation gain of 8.1%. In July with the highest irradiance and the largest power generation gain, the generation performance of single-axis PERC was significantly better than that of fixed-tilt PERC in sunny days. By contrast, with the lowest irradiance and the smallest power generation gain, the generation performance of fixed-tilt PERC in sunny days was significantly better in December. Because the irradiation in rainy days is mainly diffuse reflection with little tracking value, the power generation of PERC components under the two bracket forms was similar. The superior power generation performance of PERC module in the long-term operation and the power generation characteristics under different bracket forms will make it play an important role in the photovoltaic power plant. Therefore, the selection of modules and brackets in the initial stage of the photovoltaic power station construction should fully investigate the local irradiance resources and climate characteristics. If a place is rich in irradiation resources and sunny days, the single-axis PERC modules can be used preferentially under the same investment cost. The research results can provide technical support for module selection and bracket selection of the photovoltaic power station construction in future.

Keywords: photovoltaic cells; solar energy; experiment; passivated emitter and rear cell (PERC); silicon solar cells; single-axis; fixed-tilt