

异质结电池垂直发电研究

吴龙海¹ 钟金枝¹ 张琳¹ 徐飞² 宋新军³ 阿依波拉提·特来西⁴

1. 连云港太瓦新能源有限公司 江苏连云港 222243

2. 华能江苏综合能源服务有限公司 江苏南京 225007

3. 新疆太瓦新能源有限公司 新疆霍尔果斯 835221

4. 新疆智能装备研究院氢能与低碳技术应用研究所 新疆乌鲁木齐 830000

摘要: 通过对比实验研究异质结电池 (HJT) 在垂直发电时, 东西朝向与南北朝向的发电量差异。结果表明, 东西朝向的HJT组件在日出和日落时段发电量较高, 呈现双峰分布; 南北朝向的HJT组件则在中午时段达到发电量峰值。结合HJT较小的负温度系数等优势, 在北方沙漠地区, HJT垂直发电相比常规电池的倾斜发电方式具有更高的发电量和更少的土地的占用。这些发现对于优化光伏系统设计, 提高光能和土地资源利用效率具有重要意义。

关键词: 异质结电池; 垂直发电; 双面发电; 沙漠光伏

引言

全球光伏装机规模持续扩大, 但TOPcon等技术进展逐渐放缓。2018年, 我们注意到HJT组件的安装方向对其发电性能有显著影响; 同年, Fraunhofer ISE的研究表明, HJT组件的双面率高, 垂直安装可降低LCOE(平准化度电成本) 20% ~ 30%^[1]; 此后, 挪威、德国、日本、卡塔尔等地相继开展了HJT垂直发电的实验, 并取得了积极成果。其中日本大阪实验系统安装在反射率0.3的混凝土地面, 离地高度约2米, 垂直安装时发电增益34%^[2]。

本研究聚焦于HJT在垂直安装状态下的发电性能, 通过对比分析东西朝向与南北朝向的发电差异, 为HJT在北方沙漠地区及工商业外墙等场景的创新应用提供理论与实践依据。



图1 HJT垂直发电 (来源: Over Easy Solar AS)

通信作者: 吴龙海 (1980—), 男, 湖北随州人, 硕士在读, 高级工程师, 高级技师, 主要研究方向: 半导体、BNCT, 为本文通讯作者。

一、HJT垂直发电原理

传统的太阳能电池板 (PERC、TOPcon组件) 采用水平安装方式, 虽简单易行, 但存在占地面积较大、光照接收角度受限等问题, 进而影响发电量^[3]。而HJT电池以其高转换效率、低衰减、无PID/LID/LeTID (光照和高温诱导的衰减) 问题以及优异的负温度系数等特性, 在光伏产业中脱颖而出。得益于HJT内部结构中钝化层的金字塔绒面与人类发现的第一种负折射率材料氧化铟锡 (ITO) 共同形成一种陷光结构^[4], 能够捕捉更宽入射角度的光线, 包括来自地面和空中的反射、漫反射和散射光, 减少反射损失。因此, 将HJT组件倾斜至90°, 即垂直安装时, 能发挥其双面率高达95%的优势, 在正面发电同时背面也实现较高的光电转换效能, 整体实现高效发电。

二、实验方法

为全面评估HJT组件在不同安装方向和地理环境下的垂直发电性能, 本研究设计和实施了一系列实验。初期实验地点选在连云港 (北纬35°)。实验设备包括HJT组件 (TOOW-H2型210-0BB组件)、TOPcon组件、可调节支架系统、高精度数据采集器及分析软件。

实验步骤如下:

(1) 安装准备: 在实验场地搭建支架系统, 确保HJT组件垂直安装且固定牢固。

(2) 数据采集: 在实验期间, 每隔5分钟采集HJT组件的输出电压、电流、功率等。

(3) 数据处理：使用数据采集器记录原始数据，通过 Excel 等软件进行整理和处分析，计算每个实验点的发电量。

(4) 结果分析：对比不同朝向的发电量数据，分析其差异和规律。

三、实验结果及分析

通过对比实验，我们得出以下关键发现：

(一) 东西朝向（1P 垂直，方位角 90°）

(1) 我们拟合发电曲线成公式（1）表达，与实际发电曲线较为吻合，可用于半定量分析：

$$y1 = |\cos(\theta)| + \beta * |\cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right)| \quad \text{公式 (1)}$$

式中： β 表示背面发电贡献率，取值 0% ~ 100%； θ 表示阳光与地平线的夹角。

该公式提示，(a) HJT 电池垂直发电，相当于将阳光偏移 $\pi/2$ 相位，形成“虚像”，对背面发电做功；(b) 总发电量 $y1$ 是正面与背面发电之总和。

(2) 如图 2 所示，日出和日落时分，发电量曲线呈现双峰分布，与常规组件正午时分达到发电高峰不同。

(3) 中午时分，随太阳高度角的变化，发电量有所下降，类似常规平行组件在日落时的表现；当太阳位于东西朝向组件正上方时，发电量到达一个低点，但仍保持平均电量水平。

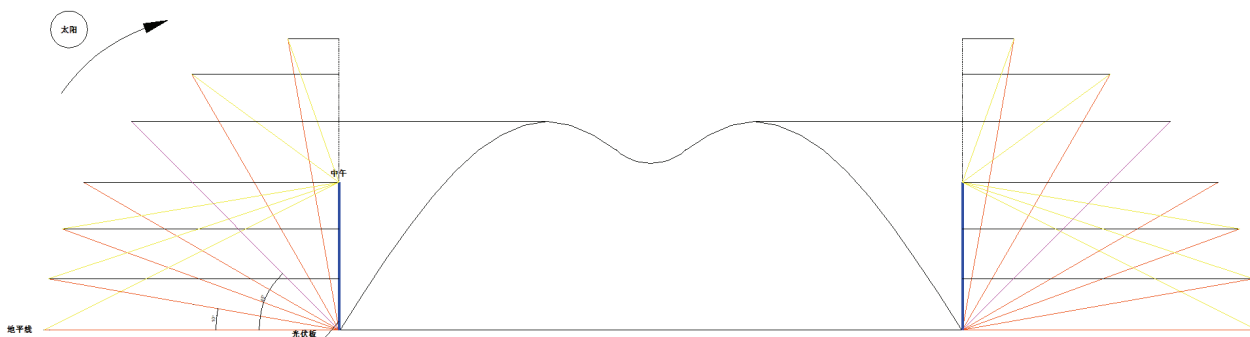


图 2 HJT 组件东西朝向垂直发电曲线

(二) 南北朝向（1P 垂直，方位角 0°）

(1) 与图 3 所示常规倾斜组件水平放置表现一致^[5]，一天内发电量呈现单峰分布。

(2) 中午时，发电量 $y2$ 达到最高值，与阳光与组件夹角 θ 成正弦关系： $y2 = |\sin(\theta)|$ 公式 (2)

(3) 日出和日落时，发电曲线较为平缓。

(三) 发电量统计

实验统计 HJT 组件两种朝向 2024 年最近半年多的

(4) 对公式（1）求导可知，当夹角 θ 达到 45° 和 135° 时，发电量达到峰值，这与实际观测基本一致；

(5) 对公式（1）求取平方和可知，当 β 取值 100% 情况下，峰值高于平均电量水平 41.4%。由于 HJT 组件背面测试的复杂性，2019 年 3 月国际电工委员会（IEC）发布的 TS 60904-1-2 测试标准，在 I_{sc} 不变的情况下，如果只有正面或背面产生电流，则双面组件的表现都相似，因此没有任何寄生或协同效应，即双面组件可用单面表征。我国 2024 年 7 月最新发布的《光伏制造行业规范条件（2024 年本）》也规定“双面组件按正面效率计算”，行业也用单面效率表征 HJT 电池和组件性能。这意味着，HJT 电池理论上可获得最高 41.4% 的增益，也就是说，在按当前终端客户（电站投资方）每瓦定价采购组件和建设电站的情况下，HJT 电池具有较高的性价比。

(6) 日出后发电量曲线迅速上升，源于组件正面直接面对阳光，其入射光的发电贡献几乎不变（阳光对电池板的垂线距离基本不变），而背面、正面接收的散射光和漫反射光则根据太阳高度角有所变动；同理，日落前发电量曲线下降也迅速。

(7) 发电时间日出时早于南北朝向，日落后也晚于南北朝向，日均发电小时数长约 1 个小时，这意味着全年发电小时数高出常规电站设计值 110 ~ 150 小时，也带来年总发电量的增加。

发电量，其中 6 月、7 月由于电气故障造成数据失真（数据更好），已被剔除。实验结果为，东西朝向组件发电量比南北朝向组件整体多 23.03%；其中 4 月、5 月发电量较大；8 月、9 月东西方向比南北方向获得 30% 以上的增益。虽然光伏仿真软件 PV_{sys} 模拟同样给出类似且更好的结果，但由于该软件缺乏 1P 垂直发电的精确模型，其模拟结果需谨慎采信，后续需要进一步完善相关模型。（见图 4）

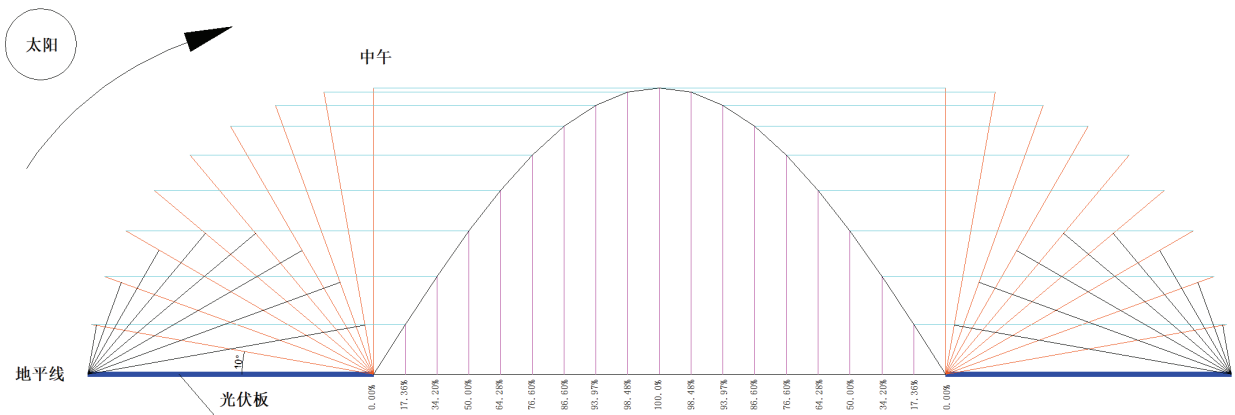


图3 常规组件水平发电曲线

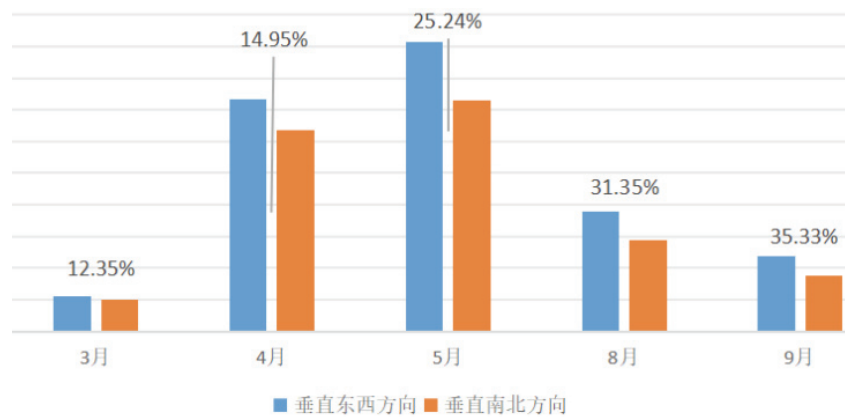


图4 HJT组件两种朝向垂直发电实验发电量统计（2024年）

四、讨论

HJT垂直发电的实验结果对光伏系统的设计和应用具有重要启示：

（一）提高空间利用率

经过研究，密集布局的垂直安装HJT电站，行列间距可远小于常规电站设计，1GW规模最少仅需占地0.8万亩，相比传统水平带倾角安装1GW光伏电站所需的2.1万亩，显著减少了占地面积，这对于土地资源紧张的地区尤为重要。垂直安装的HJT组件不仅可以充分利用建筑的立面空间，如外墙、围墙等，还能在不改变土地原有经济属性的前提下，如农业、畜牧业用途，实现光伏发电与土地双重利用的最大化。

（二）便于运维管理

积尘是影响光伏发电的重要因素之一，垂直安装的HJT组件减少积尘、积雪，降低清洁频率和运维成本。卡塔尔HJT垂直发电实验表明，常规组件在灰尘污染后损失达到60%（单面组件）和45%（双面组件），而垂直组件污染损失几乎可以忽略不计。

（三）更高的发电效率

HJT组件的垂直安装方式能够更充分地利用阳光的反射和散射光。在北方沙漠地区，夏季砂石和冬季冰雪的反射光都能为HJT组件提供额外的光照资源，提升发电量30%左右^[6]，这与本实验结果基本一致。再加上HJT优异的负温度系数，HJT组件在高温下发电损失更小。在高纬度地区，HJT垂直发电可以实现增益100%以上^[7]。

（四）优化发电曲线

此前，国内电站90%以上使用PERC/TOPcon组件，由于其单峰发电曲线特点，造成正午时分发电同时达到高峰，造成电网调节困难，多个省份陆续出台此时段限制上网、收取力调电费等限制措施，国家能源局也于2024年10月9日发布《分布式光伏发电开发建设管理办法（征求意见稿）》不再保证全额上网。而HJT垂直发电的双峰发电的高峰时刻恰好错开常规组件的高峰时刻，有助于优化电网的供需平衡。另外，HJT垂直发电高峰时刻仍在电网高电价时段附近并有重叠，因此即使在上

网限制情况下仍能产生更多收益，在低电价时段减少弃电。HJT垂直发电也可降低储能需求，即从常规的1 kW 电池配2 kWh 储能下降到1 kW 配1.5 ~ 1.8 kWh。这些特性提升了光伏电站的经济效益，改善了电网的稳定性，增强电站投资者的信心。

（五）提高太阳能综合利用率

HJT垂直发电组件与封装玻璃的整体光学特性和设计有效减少光线反射，反射至其它HJT组件阵列上的光线可被再次利用，提高了太阳能的综合利用率。这将为后续HJT电站设计优化以及HJT电池工艺结构改进提供了新方向。

（六）降噪与环境融合

HJT组件的镀膜玻璃具有多孔二氧化硅的微观结构，能够吸收和反射部分声波，从而降低环境噪音。垂直安装的HJT组件更容易与建筑结构相融合，实现BIPV（光伏建筑一体化）的设计理念。这种设计不仅美观大方，还能提升建筑物的整体能效和环保性能。

（七）广泛的适用场景

除沙漠光伏、建筑物屋顶/外墙两个突出应用场景以外，HJT垂直安装技术亦可广泛用于围墙、栅栏、护栏等常规组件表现不佳的地方。这些应用场景的拓展为HJT的发展提供了更广阔的市场空间和发展机遇。

结论

该研究通过对比实验深入探讨了HJT组件在不同安装方向下的垂直发电性能。实验结果表明，东西朝向的

HJT组件在日出和日落时发电量较高，整体发电量优于南北朝向。在北方沙漠等特定环境下，垂直安装的HJT组件相比倾斜安装的常规组件年发电量提高20%以上。这些发现为优化光伏系统的安装设计提供了重要参考，助力HJT在未来光伏市场中的快速发展。

参考文献

- [1]Bodlak L,Hernandez H,Bierbaum J,et al.PRICE-BIFACIALITY RELATIONSHIP OF BIFACIAL MODULES IN VERTICAL EAST-WEST ORIENTED PV SYSTEMS[C].35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition,Brussels,Belgium,2018:2134-3127.
- [2]广东省国际工程咨询有限公司.潮州市政府可控屋顶光伏资源特许经营项目可行性研究报告[R].2023-10: 53.
- [3]代松,王占友,梁新田,等.太阳能光伏组件支架的设计选型[J].环球市场信息导报,2011,(8): 125-126.
- [4]陈杨,吴龙海,张琳.异质结光伏电池厂安全管理[M].纽约:中国文化出版社,2023: 5-5.
- [5]李雷,肖丽仙,何永泰,等.倾角对光伏组件输出特性影响的研究[J].楚雄师范学院学报,2016,31(03): 15-21.
- [6]李正平,沈文忠.高效HIT太阳电池组件及其应用[J].上海节能.2015,(1): 41-45.
- [7]郭晨,姚伟,孙子元,等.异质结(c-Si/a-Si)双面组件发电特性研究[J].智能建筑与智慧城市.2019,(10): 46-48.