

双面光伏组件发电性能影响因素及优化方案

张关明

中国水利水电第十四工程局有限公司 云南 昆明 650200

摘要: 为提升双面光伏组件发电效率与项目经济性,本文阐述其结构原理与性能评价体系,从环境气象、安装结构、材料工艺、系统运行四大维度,系统剖析影响发电性能的核心因素。针对性提出环境适配、阵列优化、材料升级等全方位优化方案,通过仿真与户外实证验证,综合优化可显著提升发电量、降低度电成本,为不同场景双面光伏电站设计与运维提供技术参考。

关键词: 双面光伏组件;发电性能;影响因素;优化方案

引言: 双碳目标下,双面光伏组件凭借双面发电、低衰减、高适配性等优势,逐步成为光伏电站主流应用产品。相较于传统单面组件,其发电性能受多重因素耦合影响,实际发电增益波动较大。当前行业缺乏系统化的影响因素梳理与场景化优化体系。为此本文全面探究各类关键影响因子,构建适配多场景的优化方案,旨在最大化挖掘双面组件发电潜力,提升光伏系统利用效率与项目全生命周期经济效益。

1 双面光伏组件工作原理与发电性能评价体系

1.1 双面光伏组件结构与发电原理

(1) 双面光伏组件核心结构由光伏电池片、上下两层封装材料(EVA/POE)、光伏玻璃及背板(或透明背板)组成,其典型特征在于背面亦具备透光与受光能力。双面率是表征背面发电能力的关键参数,定义为相同测试条件下背面与正面光电转换效率之比,主流N型TOPCon组件双面率可达80%~85%,显著高于传统P型PERC组件的65%~75%。(2) 双面组件发电机制体现为正面接收太阳直射与散射光,背面则接收来自地面、周边建筑物及植被等的反射与散射光,二者协同叠加形成总输出功率。背面增益大小取决于地表反照率(通常为0.15~0.90)、组件离地高度及安装倾角等因素,实际运行中背面辐照强度可达正面总辐照的10%~30%^[1]。(3) 目前主流双面电池技术以N型TOPCon和BC为代表。N型TOPCon具备较低的金属复合和优异的钝化接触特性,双面率高、温度系数低(约-0.30%/℃),适合大规模地面电站;BC电池正面无栅线遮挡,短路电流高、外观一致性好,但工艺复杂、成本偏高。两者在效率极限、温度特性和制造成本方面存在显著差异。

1.2 双面组件发电性能核心评价指标

(1) 光电转换效率是衡量电池将光能转化为电能能力的基础指标,双面组件通常以正面效率标称。双面发

电增益率则定量描述背面辐照贡献,定义为相同条件下双面组件较单面组件的发电量提升百分比,是系统设计选型的核心依据。(2) 功率衰减率反映组件长期可靠性,通常以首年衰减和逐年线性衰减表征,N型组件首年衰减可控制在1%以内。温度系数表征输出功率随温度升高而下降的敏感程度,绝对值越小高温性能越优;辐照响应特性描述低辐照条件下组件发电能力,直接影响早晚及阴天工况下的发电表现。(3) 系统发电总量是评价项目收益的直接指标,需结合并网条件与当地气象数据逐年核算。发电稳定性涉及年际衰减一致性及抗PID、抗LID等可靠性维度;经济性指标则包括平准化度电成本(LCOE)、内部收益率及投资回收期等,综合反映项目全生命周期价值。

1.3 发电性能测试与仿真方法

(1) 室外实测试验需搭建专用测试平台,包含双面辐照计(正面与背面分别安装)、背板温度传感器、气象站及高精度IV曲线追踪仪。数据采集应同步记录组件输出功率、正背面辐照度、环境温度、风速等参数,测试周期不少于一年以覆盖不同季节与天气工况。(2) 光伏系统仿真模型基于双二极管或单二极管等效电路建立,需输入组件STC参数、双面率、温度系数及反照率等基础数据。模型校准应利用实测IV曲线与辐照数据进行参数反演,重点调整串联电阻、并联电阻及光生电流等关键变量,确保仿真与实测偏差控制在±3%以内。(3) 性能数据处理需剔除异常值与恶劣天气数据,采用辐照度归一化方法将实测功率修正至标准测试条件。误差修正需考虑温度影响、光谱失配及角度入射效应等,最终通过不确定度分析(一般要求≤±5%)评价测试结果的置信水平。

2 双面光伏组件发电性能核心影响因素分析

2.1 环境气象因素影响分析

(1) 地表反照率决定了背面可接收反射辐照的上限。不同地表反照率差异显著(雪地0.6~0.9, 草地0.15~0.25), 每提升0.1, 背面年累计辐照量增加约8%~12%, 双面增益率相应提升1.5%~2.5%。(2) 晴天直射光主导时正面发电占绝对优势; 散射辐射比例增大时, 光线方向趋于分散, 背面可接收更广阔范围的漫反射光, 其相对贡献上升, 有助于平抑弱光条件下的发电曲线波动。(3) 环境温度升高使组件工作温度上升, 开路电压下降, 功率以温度系数斜率降低。高湿度加速封装材料水解老化、降低透光率并加剧PID衰减, 高温高湿地区年衰减率较干燥地区高出0.3%~0.5%^[2]。(4) 沙尘沉积遮挡入射光、改变表面光谱透过特性, 透光率下降3%~15%。积雪覆盖形成物理遮挡, 但雪地高反照率使背面反射增强, 若组件底部未被完全掩埋, 背面补偿效应可部分抵减正面损失。

2.2 结构与安装参数影响分析

(1) 倾角增大时组件背面朝向地面反射区域的投影范围缩小, 背面辐照随之降低, 双面组件最优倾角较单面组件偏低3°~5°。安装高度每提升0.5m, 背面辐照均匀性改善约10%~15%, 但过高时反射光逸散损失增加, 经济合理高度一般为1.0~1.5m。(2) 行距通过遮光与辐照的双重耦合效应影响输出: 行距过小引发前排对后排正面遮光, 同时限制地面反射光进入背面; 增大行距缓解遮光但降低土地利用率。东西向与南北向排布下背面受光时间分布不同, 年累计背面辐照差异可达5%~10%。(3) 窄边框结构可减少边缘遮挡, 提升有效受光面积约1%~2%。高透光POE胶膜较EVA在紫外波段透光率高出2%~4%; 透明背板较白色背板双面增益贡献可高出8%~15%^[3]。

2.3 组件自身材料与工艺因素影响分析

(1) 双面率从70%提升至85%时, 系统发电增益率约提高2.0%~3.5%。TOPCon电池采用SiO₂/多晶硅叠层钝化接触结构, 背面复合电流密度可低至2~5fA/cm²; BC电池通过背面电极设计消除正面栅线遮挡, 二者在双面率与转换效率之间各有侧重。(2) 前板玻璃透光率每提高1个百分点, 短路电流增加约0.8%~1.0%, 双层减反膜较单层镀膜在300~1100nm波段平均透光率提升1.5%~2.0%。背板透光率最优区间通常为88%~92%, 过低损失入射光, 过高则部分光线穿透电池片间隙造成漏光损失。(3) 焊接偏移、隐裂、虚焊等工艺缺陷导致电池片失配, 初始功率损失约1%~3%, 长期作用下年衰减率额外增加0.2%~0.5%, EL检测中暗片与明暗不均现象是识别此类缺陷的重要依据。

2.4 系统运行因素影响分析

(1) N型TOPCon组件LID通常低于1%, 优于P型PERC的1.5%~3.0%。积灰与风沙冲刷造成玻璃表面微观划伤, 二者叠加可使运行5年后组件实际输出下降约3%~7%。(2) 沙尘地区每月清洁一次较每季度清洁一次年发电量可提升4%~8%, 水洗较干擦可减少表面磨损约30%~50%, 检修响应速度决定系统可利用小时数的保障水平。(3) 双面组件IV曲线呈多峰特征, 多路独立MPPT可将失配损失控制在1%以内, 合理的容配比设计(通常1.1~1.3)直接影响系统在全辐照区间内的整体转换效率。

3 双面光伏组件发电性能优化方案与效果验证

3.1 环境适配性优化方案

(1) 地表反射材料改造是提升背面辐照利用率的直接手段。在高反照率需求场景下, 铺设白色砾石层(粒径5~10mm, 厚度≥30mm)或涂覆高反射率涂层(掺TiO₂聚合物涂层), 可将地表反照率由0.20~0.25提升至0.50~0.60, 从而增加背面年累计辐照量15%~25%。材料选型需兼顾耐久性(抗紫外线老化≥10年)与自清洁能力, 施工压实度应满足抗风要求(≥85%)^[4]。(2) 智能倾角适配优化策略基于当地气象数据库, 建立月均最优倾角模型, 通过可调支架或跟踪系统实现倾角逐月调节。该策略尤其适用于反照率季节性波动显著的高纬度地区(如雪季反照率骤增), 可实现年发电量较固定倾角方案提升3%~6%, 且可通过远程控制系统实现免人工干预。(3) 防沙尘措施包括组件表面涂覆超疏水自清洁涂层(接触角≥150°, 灰尘附着力降低40%~60%)及边缘无缝密封设计; 防积雪策略包括冬季增大倾角(≥40°)促进自然滑落、采用双玻结构减少背面结冰点, 配合电阻式融雪膜(功耗≤30W/m²)可在极端雪区保障发电连续性。

3.2 安装与阵列结构优化方案

(1) 基于场景的最优安装参数设计采用多因素正交实验法, 综合考虑地表反照率(0.15~0.60)、纬度(0°~50°)及土地成本约束, 确定不同场景下最优倾角(15°~30°)与最优高度(1.0~1.5m)。高反照率场景(如雪地、沙漠)适当降低高度(1.0~1.2m)以增强反射利用率, 低反照率场景(如草地)则抬高(1.3~1.5m)以减少近地阴影不均。(2) 阵列行距优化以全年遮光损失与背面辐照增益之和最大化为目标函数, 推荐行距为阵列高度的1.2~1.5倍。排布方式选择上, 东西向排布适合低纬度地区(<25°), 南北向排布适合高纬度地区(>35°), 混合排布可在不规则地块上兼顾土地利

用与发电效率平衡。(3)轻量化高透光边框采用超薄铝合金型材(壁厚 $\leq 1.0\text{mm}$)与无A面设计,减少背面遮挡面积3%~5%;配合蜂窝状支撑结构在保证抗风压($\geq 2400\text{Pa}$)前提下降低边框宽度,使有效受光面积提升1.5%~2.5%。

3.3 组件材料与本体性能优化方案

(1)高双面率电池工艺优化聚焦于背面掺杂浓度调控与金属化接触优化,通过激光开槽(槽宽 $\leq 20\mu\text{m}$)与选择性发射极技术,使双面率由80%提升至88%以上。钝化层采用 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ 叠层结构(厚度15nm/80nm),背面复合电流密度降至 $2\text{fA}/\text{cm}^2$ 以下,开路电压提升3~5mV。

(2)封装材料选用高透光率($\geq 92\%$)、低紫外衰减的POE胶膜替代传统EVA,配合镀双层减反膜的超白压花玻璃(透光率 $\geq 94.0\%$),可使组件初始功率提升2%~3%。背板采用含氟透明材料(透光率 $\geq 90\%$),经湿热老化测试($85^\circ\text{C}/85\%\text{RH}$,3000h)后透光率衰减 $\leq 3\%$ 。(3)工艺缺陷管控引入在线EL检测与IV曲线实时追踪,实现焊接温度($220\sim 240^\circ\text{C}$)、层压压力($80\sim 120\text{kPa}$)等关键参数的闭环控制。通过电池片严格分档(电流偏差 $\leq 1\%$)与智能串焊补偿,将组件失配损失由2%~3%压缩至1%以内^[5]。

3.4 优化方案仿真与试验效果验证

(1)采用PVsyst与SAM软件建立优化前后双面组件仿真模型,输入各地典型气象年数据对倾角、高度、反照率等参数进行敏感性分析。仿真结果表明,综合优化方案(反射材料+智能倾角+高双面率组件)可使年发电量提升8%~15%,其中反射材料贡献约4%~7%,倾角优化贡献2%~4%。(2)选取荒漠(反照率0.35)、草地(0.20)、雪地(0.65)三类典型场景搭建户外实证平台,对优化前后组件进行同条件背靠背对比测试。实测

数据表明,优化组背面辐照提升12%~20%,双面增益率提高2.5%~4.0%,发电量提升幅度与仿真偏差控制在 $\pm 2.5\%$ 以内,验证了仿真模型的可靠性。(3)技术经济分析以平准化度电成本(LCOE)和内部收益率为核心指标,综合考虑材料改造成本、安装增量成本与发电增益收益。在反照率 ≥ 0.30 的场景下,优化方案LCOE可降低3%~6%,动态投资回收期缩短1~2年;在雪地场景中经济适用性最为突出,其次为沙漠、草地场景。

结束语

本文系统厘清了双面光伏组件发电性能的各类影响因素,形成一套涵盖环境、安装、材料、运维的一体化优化方案。经仿真与实地测试证实,优化策略可有效提升组件发电增益、降低运行损耗与度电成本。后续可结合不同地域气候、地形条件细化参数标准,深化智能适配技术研究,进一步提升双面光伏电站的适配性、稳定性与经济性,助力光伏产业高效高质量发展。

参考文献

- [1]王浩宇,张军,李然.基于反射机制的双面光伏组件背面增益特性及参数优化[J].可再生能源,2026,44(02):189-195.
- [2]刘畅,赵鑫.双面双玻光伏组件发电性能衰减影响因素及优化策略[J].太阳能学报,2025,46(07):321-327.
- [3]陈阳,白建波.双面光伏组件电池失配损耗机理及发电性能优化模型[J].电力系统保护与控制,2024,52(11):98-105.
- [4]周天宇,吴佳伟.不同气候区双面光伏组件发电性能影响因素对比分析[J].电源技术,2023,47(09):115-119.
- [5]李明泽.PERC与TOPCon双面光伏组件发电性能差异及优化设计[J].光伏产业技术,2025,13(03):45-51.