

复杂地形条件下光伏阵列排布优化设计与发电效率提升研究

王巍桦

唐山市新地工程勘察设计有限公司石家庄分公司

摘要: 针对复杂地形中光伏阵列排布的棘手问题,可着眼新型光伏组件的运用,剖析 2384×1303(峰值功率 620)与 2278×1134(峰值功率 520)两类组件的特质,相关探索推出地形自适应排布算法,联同曲面投影技术让组件与三维地形曲面达成精准映射;搭建动态遮挡补偿模型,凭借时序阴影数据库与组件级 MPPT 优化削减发电损耗;改进运输路径规划,减轻地形复杂程度造成的施工开支,借助多目标优化算法协调发电量与成本关系,增进土地利用效率与发电效能,为复杂地形光伏电站设计供给技术保障。

关键词: 复杂地形;光伏阵列;排布优化;发电效率;新型组件

引言

全球能源转型进程中,光伏发电已成为清洁能源发展的核心方向,山地、丘陵、坡地等复杂地形占据陆地总面积逾 60%,这类区域的光伏开发潜藏巨大潜力,地形起伏引发的阴影遮挡、组件倾角悬殊、运输成本偏高等状况,却让传统排布方法的效率下降,2384×1303、2278×1134 等新型光伏组件的尺寸标准化虽有助于功率密度提升,却对复杂地形的适应能力提出了更严苛的标准,探究组件特性与地形间的耦合机制,摸索排布优化及效率提升的可行途径,对于推动光伏产业的技术升级具备实际价值。

1 复杂地形光伏阵列排布的核心挑战

1.1 复杂地形下阴影遮挡表现出动态与复杂特性

太阳位置变化使山体、植被及组件间阴影动态移动,导致发电效率周期性下降。坡度超过 15° 时,传统矩形布局易造成后排组件在冬至或早晚被遮挡,形成低效区。新型组件尺寸差异加剧问题:长边组件横向排列易形成连续遮影带,宽边纵向排列则因间距不足引发遮挡。遮挡不仅减少光照,还引起电流失配,功率损失非线性放大。微地形如沟壑、凸起形成局部阴影焦点,难以预测。需结合高精度 DEM 与太阳轨迹模型进行动态阴影模拟,识别不同时段遮挡区域,为间距与倾角优化提供依据。

1.2 组件适配性与地形耦合存在多元表现

不同尺寸组件对坡度、坡向适应性不同。2384×1303 组件较长,在东西坡易产生应力集中,长期运行可能导致支架变形或隐裂;2278×1134 较窄,南北坡需密集支架,增加施工成本。长宽比差异(1.83:1 vs 2:1)影响排布密度:长边横向可减支架但易错位;

宽边纵向抗风好但降低装机密度。地形曲率也影响排列方向——凸坡宜沿等高线排列减倾角差,凹坡宜放射状布局。需建立组件—地形耦合模型,通过参数化设计实现最优匹配。

1.3 运输与施工成本约束呈现多维特点

复杂地形中运输路径需绕行障碍,单公里成本上升。传统直线模型不适用,需基于 A* 算法结合 DEM 规划安全路径,降低吊装能耗与人工风险。施工方面,坡度越大,基础钻孔深度与混凝土用量增加以抗倾覆;坡向不同,支架抗风设计需调整。设备作业效率随坡度升高而下降,坡度超过 20° 时起重机能力受限,运输车速需控制在 5km/h 以下。须从路径规划、工艺创新、设备选型三方面构建成本管控体系,应用模块化、轻量化与智能设备降低地形影响。

2 基于新型组件的地形自适应排布算法

2.1 曲面投影技术的地形适配原理

曲面投影技术将二维组件布局映射至三维地形曲面,实现组件与地形精准适配,核心步骤涵盖基于地形高程数据(DEM)构建三维数字地形模型,经梯度分析得出地形坡度(θ)与坡向(α),生成地形特征矩阵 M_{xxx} ;依据组件尺寸(长×宽)与地形曲率,动态调节支架高度与倾角,保证组件安装后与地面夹角误差 $\leq 2^\circ$,规避局部应力集中;借助几何约束条件(组件间距、倾角范围)优化排列方向,使组件长边尽可能沿等高线方向排列,缩减倾角差异,曲面投影技术可处理任意复杂地形,包括连续坡面、断崖、沟壑等非规则地形,优势显著,同时其对地形数据精度要求较高,需采用高分辨率 DEM(分辨率 $\leq 1\text{m}$)保障映射精度,这构成其局限性。

2.2 多目标优化算法的参数协同机制

多目标优化算法引入 NSGA-II (非支配排序遗传算法-II), 以发电量最大化(F_1)、成本最小化(F_2)、土地利用最大化(F_3)为优化目标, 构建约束条件模型, 通过遗传算法迭代生成帕累托最优解集, 每个解代表一组参数组合(组件倾角、间距、排列方向); 经非支配排序与拥挤度计算筛选出兼顾效率与经济性的排布方案, 其能处理多目标间冲突(发电量增加可能伴随成本上升), 提供多种可选方案供决策者选择, 优势明显, 不过计算复杂度较高, 需依托高性能计算平台缩短优化周期, 这是其局限性所在。

2.3 动态阴影补偿的 MPPT 优化策略

动态阴影补偿建立时序阴影数据库, 记录不同季节、时段的阴影投射轨迹, 结合组件级 MPPT (最大功率点跟踪) 技术动态调整工作电压, 核心逻辑体现为检测到阴影遮挡时, 系统自动切换至“部分遮蔽模式”, 通过功率优化器隔离受影响组件, 减少全局功率损失; MPPT 控制器实时调整未遮挡组件的工作点, 使其始终运行在最大功率点附近, 实验显示该技术可提升阴影工况下发电效率, 其优势在于能适应阴影动态变化, 无需人工干预即可实现效率优化, 局限性则是需部署大量传感器(光照传感器、电流传感器)实时监测阴影状态, 增加系统复杂度与成本。

3 新型组件特性与排布模式创新

3.1 组件尺寸标准化的模块化优势

2384×1303 组件(峰值功率 620)与 2278×1134 组件(峰值功率 520)的尺寸标准化设计优势突出, 矩形硅片设计让 2384×1303 组件较传统方形组件功率提高, 长边孔位距(400/790/1400mm)方便支架系统模块化设计, 减少现场加工环节以缩短施工周期; 2278×1134 组件优化电池片间距降低内部电阻损耗, 窄边设计使其纵向排列更灵活, 可适应更陡地形坡度, 尺寸标准化核心价值在于推动光伏系统工业化进程, 组件、支架、电缆等部件实现批量预制与标准化安装, 降低对现场施工技术依赖, 标准化设计也便于运维人员快速掌握组件特性, 提升故障处理效率。

3.2 混合排布模式的空间利用逻辑

混合排布根据地形差异优化组件布局: 坡度 $\leq 15^\circ$ 区域采用 2384×1303 组件横向排列, 减少支架数量, 降低单位成本; 坡度 $> 15^\circ$ 区域使用 2278×1134 组件纵向排列, 增强抗风稳定性; 微地形(如沟壑、凸起)采用定制小尺寸组件“填补式”安装, 提升空间利用率与装机容量。该模式适应复杂坡度与坡向变化, 克服单一布局局限, 显著提升土地利用效率。

但需配套多种支架类型与安装工艺, 增加系统设计复杂性与初始成本。

3.3 组件倾角动态调整的辐照优化路径

双轴跟踪系统(可选配)可进一步优化倾角, 实时监测太阳位置调整组件方位角与倾角, 使组件始终垂直于太阳光线, 实验数据显示动态调整较固定倾角年发电量提升, 倾角动态调整优势在于显著提升辐照利用率, 尤其适用于高纬度地区(中国北方)或光照资源丰富地区(沙漠、戈壁), 局限性是需部署跟踪系统, 增加初始投资与运维成本。

4 复杂地形施工与运维成本优化策略

4.1 运输路径规划的成本管控逻辑

基于 A* 算法的优化系统输入地形高程数据(DEM)、障碍物位置、组件尺寸等参数生成最短安全路径, 系统自动规避坡度 $> 25^\circ$ 区域(因吊装设备易打滑或倾覆)减少吊装设备使用频率降低单公里运输成本, 模块化运输架设计提升单次可装载组件数量减少往返次数进一步降低运输成本, 路径规划需考虑季节性因素, 雨季避开泥泞路段, 冬季避开积雪覆盖区域, 运输路径规划优势在于显著降低运输成本尤其适用于地形复杂、交通不便的地区(如山地、高原)。

4.2 施工工艺创新的效率提升路径

施工工艺创新通过“轻量化+可调节”支架系统、导轨式安装结构与无人机辅助监控提升施工效率与质量, 采用高强度铝合金材料降低支架自重减少基础施工量(如钻孔深度、混凝土用量), 导轨式安装结构实现组件快速定位单兆瓦安装时间从 7 天缩短至 5 天人工成本降低, 无人机辅助施工监控通过实时采集组件位置数据结合 BIM (建筑信息模型) 技术校正安装偏差确保安装精度 $\leq 1\text{cm}$, 施工工艺创新优势在于显著提升施工效率缩短建设周期降低人工成本局限性是需引入新型材料与设备增加初始投资。

4.3 智能运维系统的故障预测机制

智能运维系统通过物联网、无人机巡检、传感器监测与大数据分析实现故障的早期预警与快速处理, 无人机搭载高精度红外热成像仪每季度全面扫描组件表面识别热斑、裂纹等缺陷, 地面传感器实时采集电流、电压数据通过机器学习算法预测组件衰减趋势, 系统自动生成运维工单以指导运维人员精准定位故障点, 并缩短响应时间至 2 小时内, 智能运维系统优势在于显著降低运维成本(实证项目显示运维成本降低至 0.03 元/W, 传统方案 0.05 元/W)同时提升发电效率(通过及时处理故障减少功率损失), 但局限性是需部署大量传感器与通信设备增加系统复杂度与初始投资。

5 实证研究与效果验证

5.1 实证项目选址与数据采集方法

实证项目选址需综合考量地形复杂性、光照资源禀赋及典型性特征,某山地光伏项目坡度范围 $10^{\circ}\sim 35^{\circ}$,既包含缓坡连续坡面,又涉及陡峭断崖与纵深沟壑等特殊地形,其地形组合模式在同类山地光伏项目中具有较强代表性;项目所在区域年太阳辐照量达 $1600\text{kWh}/\text{m}^2$,且光照时长分布均匀,夏季峰值辐照度可达 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 以上,为精准验证优化设计对发电效率的提升效果提供了理想光照条件,数据采集体系构建中,通过卫星遥感影像获取宏观地形轮廓,结合无人机航测生成厘米级地表纹理,搭配LiDAR激光扫描技术捕捉细微地形起伏,最终构建分辨率 0.5m 的高精度DEM模型,确保地形数据误差控制在 3cm 以内;部署的多要素气象站除监测太阳辐照、温度、风速外,还同步记录大气湿度与降水数据(采样频率 $1\text{次}/\text{分钟}$),为发电量计算提供全维度气象参数;组件级与阵列级安装的智能传感器不仅采集电流电压数据,还可记录组件表面温度与环境辐射量,为效率评估与故障溯源提供多维度分析依据。

5.2 排布方案对比与优化效果

传统排布方案采用固定倾角(25°)、等间距(8m)的刚性布局,因未考虑地形起伏导致组件利用率仅 78% ,部分区域甚至出现 30% 以上的无效安装面积;优化后排布方案创新采用“地形适配型混合模式”, 2384×1303 组件根据实时太阳轨迹实现倾角动态调整($15^{\circ}\sim 30^{\circ}$), 2278×1134 组件则依据坡度变化采用阶梯式错落排列,使组件利用率提升,实际运行数据显示,优化后方案较传统方案发电量提升,线缆传输损耗降低,且通过参数化设计工具将方案设计周期从传统方法的 50 天压缩至 10 天。

5.3 长期发电效率跟踪与经济性分析

实证项目运行 12 个月数据显示,优化方案年均

发电量达 620 万 kWh ,较传统方案提升明显,冬季低辐照增益突出;组件年衰减率 $\leq 1.2\%$,优于行业 1.5% 标准,高温高湿环境下性能稳定;智能运维使运维成本由 0.05 元/ W 降至 0.03 元/ W 。全生命周期分析表明,项目内部收益率(IRR)提升 2.1 个百分点,投资回收期缩短 1.2 年,具备抗电价波动能力。长期监测验证了方案的耐久性与经济性,但 12 个月监测周期推高研究成本。未来需结合SCADA与边缘计算,构建自动化监测网络,实现数据实时传输与智能分析,在保障精度的同时降低监测成本。

6 结语

复杂地形光伏阵列排布优化要融入地形分析、组件特性、智能算法与运维技术,凭借曲面投影算法达成地形自适应排布,配合多目标优化协调效率与成本,运用动态阴影补偿与MPPT优化削减发电损失,能明显提高土地利用与发电效率,往后,随着数字孪生、人工智能等技术的深入应用,光伏电站设计会朝着“全生命周期智能化”迈进,完成从规划、建设到运维的全流程优化,为全球能源转型提供更高效、更经济的解决办法。

参考文献:

- [1]姚丹.复杂地形区域内光伏阵列布置方案优化[J].电工技术,2022(4):55-57.
- [2]蔡大勇,马腾,高江虎,等.复杂地形光伏场站光伏支架及组件安装技术[J].安装,2025(9):65-69.
- [3]金建荣,文一茗,潘国星,等.山地复杂地形下阵列柔性光伏支架结构风洞试验与风荷载特性研究[J].特种结构,2025,42(4):47-55.
- [4]孙周.数字化设计技术在复杂地形光伏设计中的应用[J].电子技术与软件工程,2019(4):246.
- [5]张美玲.复杂地形下光伏电站优化设计方法研究[D].华北电力大学(北京),2018.