

复杂山地光伏阵列布局优化与发电效率提升策略

王振博 刘继峰 何旭 宋佳乐 陈俊州
中建八局西南建设工程有限公司 四川 成都 615500

摘要: 本文旨在系统性地探讨复杂山地光伏阵列布局优化与发电效率提升的综合策略。研究首先深入剖析了山地微气候(如风速、温度)及地形要素(坡度、坡向)对光伏组件性能的影响机理;其次,构建了融合多目标优化思想的阵列布局数学模型,并详细阐述了基于NSGA-II等先进算法的求解路径;再次,从电气系统层面,探讨了通过逆变器选型、MPPT技术演进、智能汇流方案以及组件倾角精细化调整来应对局部失配损失的有效措施。本研究旨在为复杂山地光伏电站的科学规划、高效建设和可持续运营提供一套系统性的理论指导与实践参考。

关键词: 山地光伏;阵列布局优化;发电效率;阴影遮挡;多目标优化

引言

21世纪,人类面临能源安全与气候变化双重压力,发展太阳能等可再生能源成全球共识。光伏发电优势显著,IEA预测2030年其装机容量将成全球最大电力来源。但大规模光伏电站建设需大量土地,人口稠密区优质建设用地稀缺且成本高,光伏产业目光转向山地。山地光伏能盘活闲置土地,减少与农、生态用地冲突,有显著效益。然而,山地环境复杂,地形起伏使不同位置光伏组件接收的太阳辐照度差异大,阴影效应引发“木桶效应”,造成发电量损失;崎岖地形增加施工难度、支架成本,阻碍后期巡检维护;大规模土地扰动还可能引发水土流失、破坏植被。因此,在尊重适应山地自然条件基础上,实现光伏阵列布局和发电效率优化,是光伏领域关键问题。本研究将梳理整合全链条优化策略,为提升山地光伏项目综合效益提供理论与技术支撑。

1 复杂山地环境对光伏系统性能的影响机理

山地光伏系统的性能表现是多种环境因素耦合作用的结果。深刻理解这些因素的影响机理,是进行科学布局和效率优化的前提。

1.1 地形要素:坡度与坡向

地形是山地光伏项目成败首要因素,坡度和坡向决定光伏组件接收的有效太阳辐照度。坡度方面,山坡倾角可部分或全部替代支架倾角,节省材料成本,但过大坡度(如超过 25°)会加剧前后排组件阴影遮挡,降低整体收益。坡向方面,在中国大部分地区,正南坡面接收太阳直射辐射最多,偏东或偏西坡面日均辐照量减少,发电曲线有“早高峰”或“晚高峰”特征,北向坡面直射光极少,不宜开发。精确坡向分析需借助数字高程模型(DEM)数据,通过GIS工具结合当地太阳轨迹评估全年有效辐照潜力。

1.2 阴影遮挡模型与失配损失

阴影遮挡是山地光伏效率损失主要来源,包括地形、相邻光伏阵列及周边植被或构筑物等。计算阴影长度和范围需建立动态几何模型,核心输入是太阳位置,由太阳高度角和方位角确定,二者是时间、日期和地理位置的函数,可通过天文算法精确计算。在山地,考虑地面坡度影响,如正南向下坡阴影拉长,上坡阴影缩短,精确间距计算可避免关键发电时段相互遮挡。阴影遮挡不仅减少被遮挡组件输出功率,还会引发失配损失^[1]。在传统串联系统中,一块组件被部分遮挡,其I-V特性曲线出现多个“膝点”,迫使整串组件工作在低效区,导致整串功率大幅下降,这是山地光伏系统设计需重点防范的问题。

1.3 微气候要素:风速与温度

局地微气候环境影响光伏组件性能。组件温度是关键参数,光伏电池开路电压随温度升高线性下降,温度系数通常为负值,温度每升高 1°C ,输出功率下降约0.4%。山地不同位置组件通风条件不同,工作温度有差异,导致性能不一致。风速有双重作用,一方面,风是组件主要散热途径,较高风速可提升发电效率,同等辐照条件下,有风环境组件输出功率可比无风环境高百分之几;另一方面,强风威胁光伏支架结构安全,尤其在山脊、垭口等风道区域,风荷载可能远超设计值。因此,布局时要兼顾散热需求与结构安全,合理利用山地天然风道。

2 基于多目标优化的山地光伏阵列布局策略

鉴于山地光伏布局问题的复杂性和多目标性,采用传统的试错法或单目标优化方法难以获得全局最优解。多目标优化算法为此类问题提供了强有力的解决工具。

2.1 多目标优化问题的构建

山地光伏阵列布局本质上是一个在复杂约束下的多目标决策问题。我们可以将其抽象为以下数学模型：

2.1.1 优化变量 (Decision Variables)

X_i, Y_i : 第*i*个光伏阵列的平面坐标。

Z_i : 第*i*个光伏阵列的安装倾角。

A_i : 第*i*个光伏阵列的安装方位角。

2.1.2 优化目标 (Objectives)

最大化年总发电量 (E): 这是最核心的目标, 直接关系到项目的收益。

Maximize $E = f(X, Y, Z, A, \text{Terrain}, \text{Weather})$

最小化总投资成本 (C): 包括土地平整、支架、组件、电缆、施工等费用。地形越复杂, 成本越高。

Minimize $C = g(X, Y, Z, A, \text{Terrain})$

最大化土地利用效率 (U): 在有限的可用区域内, 尽可能多地安装组件。

Maximize $U = h(X, Y)$

这三个目标之间存在明显的冲突。例如, 为了最大化发电量, 可能需要增大阵列间距以减少阴影, 但这会降低土地利用效率并可能增加电缆成本。反之, 高密度排布虽能提高土地利用效率, 却会因阴影损失而降低发电量。

2.1.3 约束条件 (Constraints)

(1) 地形约束, 所有阵列必须位于可开发区内, 避开陡崖、冲沟、林地等禁止或限制开发区域。(2) 阴影约束, 在关键时段 (如冬至日9:00-15:00) 内, 任意两个阵列之间不得相互遮挡。(3) 电气约束, 同一组串内的组件数量和总电压/电流需满足逆变器的输入要求^[2]。(4) 安全约束, 支架结构需满足抗风、抗震等安全规范。

2.2 NSGA-II算法原理与应用

在众多多目标优化算法中, 非支配排序遗传算法II (NSGA-II) 因其出色的收敛性和解集多样性而被广泛应用。

2.2.1 原理

NSGA-II的核心思想是模拟生物进化过程, 通过种群迭代来逼近Pareto最优前沿。其关键步骤包括: (1) 快速非支配排序 (Fast Non-dominated Sorting), 将种群中的所有个体根据其目标函数值进行分层。第一层是非支配解 (即Pareto最优解), 第二层是在剔除第一层后的新非支配解, 以此类推。这保证了优秀个体的优先选择。(2) 拥挤度计算 (Crowding Distance Assignment), 在同一层级内, 计算每个个体的拥挤度, 用于衡量该个体周围解的密集程度。拥挤度越大, 说明该区域解越稀疏, 多样性越好。(3) 精英保留策略 (Elitism), 将父代和子代合并后, 优先选择非支配层级高的个体; 若层级相

同, 则选择拥挤度大的个体。这确保了每一代的优秀基因都能被保留下来, 加速收敛。

2.2.2 应用

在山地光伏布局优化中, 算法的执行流程如下:

(1) 初始化, 根据地形DEM数据和可开发区范围, 随机生成一组满足基本约束的初始布局方案 (种群)。(2) 适应度评估, 对每个布局方案, 利用太阳辐射模型和阴影分析模型, 计算其年总发电量; 同时, 根据地形坡度、施工难度估算其投资成本和土地利用效率。(3) 进化操作, 对种群进行选择、交叉和变异, 生成新一代子代种群^[3]。(4) 非支配排序与选择, 将父代和子代合并, 进行快速非支配排序和拥挤度计算, 从中选出新一代父代种群。(5) 迭代终止, 重复步骤2-4, 直至达到预设的迭代次数或解集收敛。最终, 算法会输出一组Pareto最优解。这些解代表了不同侧重点下的最佳权衡方案。决策者可以根据项目的具体需求 (如更看重短期回报还是长期发电量), 从中选择最合适的布局方案。

3 电气系统优化与发电效率提升策略

即使拥有了最优的物理布局, 如果电气系统设计不当, 依然无法充分发挥其潜力。电气系统的优化是提升发电效率的最后一环, 也是应对复杂工况的关键。

3.1 逆变器选型与MPPT技术演进

逆变器是光伏系统的“大脑”, 其核心功能之一是实现最大功率点跟踪 (MPPT)。(1) 集中式逆变器, 适用于地形平坦、光照均匀的大型地面电站。它拥有一个或少数几个MPPT通道, 管理整个直流汇流后的庞大阵列。在山地复杂阴影下, 其单一的MPPT点无法适应不同区域的光照差异, 导致严重的失配损失。(2) 组串式逆变器, 每个光伏组串 (通常10-20块组件) 对应一个独立的MPPT通道。这使得不同朝向、不同坡度甚至受到不同程度遮挡的组串可以各自工作在自己的最大功率点, 大大降低了失配损失。对于地形破碎、朝向多样的山地项目, 组串式逆变器通常是更优的选择。(3) 组件级电力电子 (MLPE), 这是目前应对极端复杂阴影的终极方案。功率优化器 (Power Optimizer) 被安装在每块组件的背面, 为每块组件提供独立的DC/DC转换和MPPT功能。无论其他组件状态如何, 每块组件都能输出其最大功率。虽然初始投资较高, 但在阴影损失严重的场景下, 其带来的发电量增益往往能覆盖额外的成本。

3.2 智能汇流与系统架构

合理的汇流方案不仅能降低线缆损耗, 还能简化故障排查。在山地项目中, 应遵循“就近汇流、分级汇集”的原则。(1) 智能汇流箱, 现代汇流箱不仅具备基本

的汇流和防雷功能,还集成了组串级电流、电压监测。通过RS485或无线通信,可以将每一路组串的运行数据上传至监控平台,实现精细化的性能管理和故障定位。

(2) 直流侧优化,在长距离、大高差的山地项目中,直流线缆的压降损耗不容忽视。可以通过提高系统的工作电压(在逆变器允许范围内)、选用更大截面的电缆或优化汇流路径来减少这部分损耗。

3.3 组件倾角的精细化调整策略

在传统的山地光伏设计中,常采用“一刀切”的方式,即所有组件都采用统一的固定倾角,或者简单地跟随山体坡度。然而,这种粗放式的做法忽略了局部微地形和季节性太阳高度角变化的影响。精细化调整策略主张,根据每个光伏阵列所在位置的具体地形(坡度、坡向)和当地的气象数据(太阳辐照、温度),为其单独计算并设定一个最优倾角。这个倾角的目标不再是最大化单块组件的接收辐照,而是在考虑了阴影遮挡、组件温度、系统失配等多重因素后,使该阵列在整个生命周期内贡献的净发电量最大。实现这一策略依赖于高精度的数字高程模型(DEM)和强大的计算能力^[4]。在完成初步的多目标布局优化后,可以对每个选定的阵列位点进行二次优化,微调其倾角,以榨取最后一点效率潜力。虽然这会略微增加支架的复杂性和成本,但对于追求极致效率的高端项目而言,其收益是值得的。

3.4 直流侧线缆损耗的建模与优化

在山地光伏系统中,由于地形高差大、阵列分布分散,直流侧线缆的总长度往往远超平原电站。线缆上的功率损耗($P_{loss} = I^2R$)会直接转化为热量,不仅浪费能源,还会导致线缆温升,影响系统安全。为了最小化直流损耗,可以从以下几个方面入手:(1) 优化阵列分组,在电气设计阶段,应尽量将地理位置相近、高程差较小的阵列划分为同一个组串或接入同一个汇流箱,以缩短

直流线缆的物理长度。(2) 提升系统电压,根据欧姆定律,在传输功率不变的情况下,提高电压可以显著降低电流,从而以平方关系减少 I^2R 损耗。因此,在逆变器输入电压允许的上限内,应尽可能设计更高的系统工作电压。(3) 精准选型,根据每个回路的实际电流和允许的压降(通常不超过1-2%),精确计算所需的电缆截面积。避免过度设计(浪费成本)或设计不足(增加损耗和安全隐患)。

4 结语

复杂山地光伏的开发是一项系统工程,需要多学科、多技术的深度融合。本文系统性地阐述了从环境机理认知、多目标布局优化、电气系统优化的全链条策略。研究表明,通过科学的方法和技术手段,完全可以克服山地环境的不利因素,打造出高效、经济、绿色的光伏电站。未来,随着人工智能、数字孪生、新材料等技术的进一步发展,山地光伏的优化将迈向更高层次。例如,基于数字孪生的虚拟电站可以实现对物理电站的全要素、全过程、全周期的映射和仿真,为实时优化和预测性维护提供强大支持。同时,轻质、柔性、高效率的新型光伏组件也将为适应极端复杂地形提供更多可能性。总之,复杂山地光伏的潜力巨大,其健康发展对于我国实现“双碳”目标具有重要的战略意义。

参考文献

- [1] 兰博.山地光伏阵列空间布局优化研究[D].西安建筑科技大学,2024.DOI:10.27393/d.cnki.gxazu.2024.001150.
- [2] 范鑫,李明泽.基于人工智能技术优化光伏电池阵列的布局设计与实现[J].电气技术与经济,2024,(12):87-89+99.
- [3] 梁晓越.山地光伏电站阵列倾角与间距设计对发电效率的影响[J].电力设备管理,2025,(22):128-130.
- [4] 陈思奇,郑增坚.太阳能光伏电站阵列配置对发电效率的影响分析[J].中国战略新兴产业,2024,(09):93-96.