

山地复杂气象环境下的光伏阵列优化设计与气象适应性研究

刘文洁¹, 杨琦²

1. 修文县气象局, 贵州 贵阳 550200

2. 国家电投集团贵州金元威宁能源股份有限公司, 贵州 贵阳 550081

摘要: 本文深入研究了山地复杂气象环境下光伏阵列的优化设计与气象适应性问题。通过对山地气象特征的详细分析, 探讨了光照、温度、风速、降水等气象因素对光伏阵列性能的影响机制。在此基础上, 提出了包括阵列布局、组件选型、支架结构和电气系统优化在内的光伏阵列优化设计策略, 以及实时气象监测与预测、智能控制系统应用、散热与保温、防湿与排水等气象适应性措施, 旨在提高光伏阵列在山地环境中的发电效率和稳定性, 为山地光伏电站的高效运行提供理论支持和技术指导。

关键词: 山地; 复杂气象环境; 光伏阵列; 优化设计; 气象适应性

Research on Optimal Design and Meteorological Adaptability of Photovoltaic Arrays in Complex Mountainous Meteorological Environments

Liu Wenjie¹, Yang Qi²

1. Xiuwen County Meteorological Bureau, Guiyang, Guizhou 550200

2. Guizhou Jinyuan Weining Energy Co., Ltd. of the State Power Investment Corporation, Guiyang, Guizhou 550081

Abstract: This paper conducts an in-depth study on the optimal design and meteorological adaptability of photovoltaic arrays in complex mountainous meteorological environments. Through detailed analysis of mountainous meteorological characteristics, it explores the impact mechanism of meteorological factors such as illumination, temperature, wind speed, and precipitation on the performance of photovoltaic arrays. Based on this, the paper proposes optimal design strategies for photovoltaic arrays, including array layout, component selection, support structure, and electrical system optimization. Additionally, meteorological adaptability measures such as real-time meteorological monitoring and prediction, application of intelligent control systems, heat dissipation and insulation, moisture protection and drainage are discussed. The aim is to improve the efficiency and stability of photovoltaic arrays in mountainous environments, providing theoretical support and technical guidance for the efficient operation of mountain photovoltaic power stations.

Keywords: mountainous region; complex meteorological environment; photovoltaic array; optimal design; meteorological adaptability

引言

随着全球能源需求的持续增长和对环境保护的日益重视, 光伏发电作为一种清洁、可再生的能源利用方式, 在能源结构中的占比不断提高。山地地区由于其广阔的可利用土地面积和相对丰富的太阳能资源, 成为光伏电站建设的重要潜在区域。然而, 山地复杂的气象环境给光伏阵列的性能和稳定性带来了诸多挑战, 如光照不均匀、温度变化大、风速不稳定以及降水和湿度变化大等。因此, 深入研究山地复杂气象环境下的光伏阵列优化设计与气象适应性具有重要的理论和实际意义。

一、山地复杂气象环境特点及概述

山地气象环境复杂而独特, 对自然与人类活动影响深远。接下来将深入剖析其垂直气候带气象特征、地形地貌对气象的塑造、多变性与极端天气, 以及对生态系统和人类活动的双重影响, 探究其中奥秘。

(一) 山地垂直气候带的独特气象特征剖析

地形作为地球表层系统中的关键因子, 通过影响水、热、气等物质和能量的流动与赋存等方式, 在不同时空尺度上影响着物质与能量的循环过程。其中, 地形与大气的相互作用在不同尺度下的复杂性导致了地形对气象条件影响形式多样, 在局地具有很强的空间变异性^[1]。在山地环境中, 海拔堪称气象要素变化的核

心要素。随着海拔不断攀升，气温呈现出显著的规律性递减态势，平均每上升100米，气温大约下降0.6℃，这使得不同海拔高度的热量条件差异巨大，以喜马拉雅山脉为例，低海拔河谷温暖湿润，高海拔山峰却常年冰封。降水分布同样复杂，山地迎风坡迫使富含水汽的气流抬升，水汽遇冷迅速凝结成雨；背风坡气流下沉，空气干燥少雨，台湾中央山脉两侧降水量就有着明显的差异。风速在高海拔地区，因地形开阔且受高空急流影响，极易形成强风，像青藏高原的山口，常年大风呼啸。湿度在山地并非随海拔单调变化，在部分山地的半山腰，受水汽输送、凝结及地形综合作用，会出现相对湿度极大值。

（二）地形地貌如何塑造山地复杂气象环境

山地地形地貌对当地气象环境有着极为深刻的影响。山脉走向不同，气流路径大相径庭。当山脉与气流方向垂直，富含水汽的气流被迫强烈抬升，水汽遇冷迅速凝结，极易形成地形雨，如喜马拉雅南坡；而走向平行时，气流绕行，降水分布相对均匀^[2]。坡度和坡向改变热量分布，阳坡接受太阳辐射多，温度高、蒸发量大，植被生长更茂盛；阴坡则相反，气候与植被明显不同。山谷和峡谷白天受热不均形成谷风，夜晚冷却差异产生山风，极大地影响热量、水汽输送以及空气质量。山地的起伏和粗糙度增加大气湍流交换，加速热量和水汽传输，使山地气象环境愈发复杂多样。

（三）山地气象环境的多变性与极端天气事件

山地气象环境极具多变性。由于地形复杂，不同区域的气象要素，如气温、降水、风速等差异显著，且在短时间内就可能产生剧烈变化。清晨时或许还晴空万里、气候宜人，可到了午后，山谷中水汽迅速汇聚，云层快速堆积，转眼就可能暴雨倾盆，还伴随着电闪雷鸣^[3]。这里也是极端天气高发区，暴雨引发山洪、山体滑坡、泥石流，破坏生态和人类设施；强风在山口、峡谷等地形狭窄处易形成，吹倒树木、损坏建筑；高海拔山区冬季常现暴雪，会掩埋道路房屋、引发雪崩；雷击也常见，高耸地形易遭雷击，威胁人员、牲畜和电力设施安全。

（四）山地复杂气象对生态系统与人类活动的双重影响

山地复杂气象对生态系统和人类活动影响深远。在生态方面，多样气象造就生物多样性，如横断山脉因复杂气候成为珍稀动植物栖息地；但极端气象破坏生态，暴雨毁栖息地、强风影响森林、暴雪致食物短缺^[4]。人类活动上，山地气象提供资源，利于发展特色农业、林业和旅游业；不过也带来挑战，恶劣天气阻碍交通，增加事故率，复杂气象加大山区基础设施建设与维护的难度和成本。

二、光伏阵列优化设计策略

为应对山地复杂气象环境对光伏阵列的不利影响，实现高效稳定发电，需进行全面的优化设计。以下将从阵列布局、组件选型、支架结构以及电气系统这四个关键方面，阐述具体的优化设计策略，以提升光伏阵列的性能与可靠性。

（一）阵列布局优化

根据山地的地形和光照条件，采用分区分块的布局方式，使

光伏组件能够充分接收光照。在不同坡向和坡度的区域，通过精确的测量和计算，合理调整组件的安装角度和方向，以减少阴影遮挡和提高光照利用率^[5]。例如，在朝南的山坡上，可适当增大组件的安装倾角，以在冬季获得更多的光照；而在东坡和西坡，可根据太阳的方位角变化调整组件的方向。

考虑到山地复杂的地形和光照条件，应根据当地的太阳高度角、方位角以及地形坡度等因素，通过专业的模拟软件计算出合理的组件间距，避免前后排组件之间的相互遮挡。在坡度较大的区域，可适当增大组件间距，以确保后排组件在不同时间都能接收到充足的光照。

（二）组件选型优化

选择具有高转换效率的光伏组件，能够在有限的面积内产生更多的电能，提高光伏电站的整体发电效率^[6]。目前，新型的高效光伏组件如PERC、HJT等，在转换效率方面具有明显优势，可优先考虑在山地光伏电站中应用。

由于山地温度变化大，应选用低温度系数的光伏组件，使其在温度变化较大的环境中能够保持相对稳定的性能。低温度系数的组件在高温时输出功率的下降幅度较小，能够有效减少温度对发电效率的影响。

为应对山地光照不均匀和阴影遮挡的问题，选择抗阴影性能好的光伏组件至关重要。这类组件通常采用特殊的电池结构和电路设计，能够在局部阴影遮挡的情况下，减少功率损失和热斑效应的产生，提高光伏阵列在复杂光照条件下的稳定性。

（三）支架结构优化

设计合理的光伏支架结构，提高其抗风能力和稳定性。可采用加固的基础和支撑结构，如增加基础的埋深、使用高强度的钢材等，以增加支架的强度和刚度。在风速较大的区域，还可设置防风拉索或采用框架式支架结构，进一步提高支架的抗风性能^[7]。

根据不同的地形和风速条件，选择合适的支架形式。固定支架结构简单、成本较低，适用于光照条件相对稳定、风速较小的区域；跟踪支架能够实时跟踪太阳的位置，提高光照接收效率，但成本相对较高。在山地光伏电站中，可根据具体情况在光照资源丰富、地形较为平坦的区域采用跟踪支架，而在地形复杂、风速较大的区域采用固定支架。

（四）电气系统优化

在山地光伏电站建设中，优化电气连接方式至关重要。采用多路MPPT逆变器，能精准识别并分别跟踪不同朝向、角度的光伏组件，让各组件都尽可能工作在最大功率点附近，有效避免因组件差异导致的失配损失^[8]。智能汇流箱也发挥着关键作用，它可对组件输出的电流、电压进行智能调节与控制，进一步提升系统的发电效率。

此外，合理配置电缆和电气设备对电站稳定运行不可或缺。依据光伏电站的规模大小、布局特点，科学选择电缆截面与类型，能显著减少电缆电阻带来的损耗。在电气设备布置上，需充分考虑维护管理的便利性，确保设备间距合理、线路清晰，保障电气设备安全运行，降低故障风险，为光伏电站的高效、稳定发电筑牢基础。

三、光伏阵列气象适应性措施

在山地复杂气象环境下，光伏阵列要实现稳定高效运行，必须具备良好的气象适应性。接下来，将从实时气象监测与预测、智能控制系统应用、散热与保温以及防湿与排水等方面，详细阐述提升光伏阵列气象适应性的有效措施。

(一) 实时气象监测与预测

在山地光伏电站构建气象监测站至关重要。需配备一系列专业的气象观测设备，涵盖光照传感器、温度探头、风速仪、雨量计以及湿度监测器等，以对光照强度、温度、风速、降水、湿度等气象要素展开实时且精准的监测^[9]。气象监测站的布局，应紧密结合电站的规模大小和复杂的地形特点进行合理规划。像在地势开阔、易受强风影响处多设风速监测点；在光照变化复杂区域加密光照强度监测设备。通过这种方式，确保能全面、准确地获取电站区域内的气象信息。同时，将数值天气预报模型与当地长期积累的气象历史数据深度融合，对未来气象变化进行科学预测。依据预测结果，提前采取相应措施，如预测到强风来临前，及时调整支架角度或增设防风拉索；暴雨来临前，认真做好排水系统的检查与清理工作，为光伏电站的稳定运行和高效维护提供坚实科学依据。

(二) 智能控制系统应用

在现代化的光伏电站中，智能控制系统发挥着至关重要的作用。该系统能够紧密贴合实时气象条件，对光伏阵列的工作状态进行精准且自动地调整。当光照强度变低，或是温度攀升至较高水平时，系统会迅速做出反应，自动降低组件的工作电压，以此有效减少不必要的功率损耗^[10]。而在遭遇风速较大的恶劣天气时，它不仅能自动调整支架的角度，还会及时采取防风措施，全方位保障光伏阵列的安全。

此外，智能控制系统还具备远程监控与故障诊断功能。运维人员无需亲临现场，便能实时掌握电站的运行状况。通过采用最大功率点跟踪技术，系统能够实时追踪光伏组件的最大功率点，无论外界气象条件如何复杂多变，都能确保组件始终稳定工作在最佳状态，显著提升电站的运行效率与可靠性。

(三) 散热与保温措施

考虑到山地环境温度变化幅度极大的显著特点，在应对高温时段时，需采取一系列有效措施来降低组件温度。自然通风是一

种低成本且环保的方式，通过在光伏组件下方巧妙设置通风通道，让自然风顺畅流通，带走热量。若自然风不足以满足散热需求，可安装通风设备进行强制通风，增强散热效果。对于大型光伏电站，水冷系统则是更为高效的选择，其能够迅速带走大量热量，极大地提高散热成效。

而在低温时段，防止冻害成为关键。此时，选用合适的保温材料对组件和电气设备进行妥善包裹必不可少。岩棉、聚氨酯泡沫等都是不错的选择，将它们用于包裹光伏组件的边框、支架以及电气设备的外壳，能够有效阻止热量向外散失，避免因低温导致设备损坏，保障光伏电站在低温环境下的稳定运行。

(四) 防湿与排水措施

降水与高湿度环境会对光伏组件的性能和寿命产生不利影响，因此需采取多重防护措施。在组件安装环节，必须保证其排水性能良好，通过优化安装角度与结构，杜绝积水隐患。与此同时，在组件表面涂覆疏水涂层是行之有效的办法，该涂层能显著减少水膜形成，让组件透光率得以提升，使水滴在组件表面迅速滑落，最大程度降低水分对组件的侵蚀。

在电站规划阶段，选址与设计要高度重视排水系统建设。充分考量山地地形特点，科学设置排水沟、集水井与排水管道，将雨水有序引导至电站外的排水系统。在易遭受洪水侵袭的区域，增设防洪堤、挡土墙等防洪设施尤为关键，以此全方位提高电站的防洪能力，确保电站在各种天气条件下都能稳定运行。

四、结束语

山地复杂气象环境对光伏阵列的性能产生了显著影响，但通过合理的优化设计和有效的气象适应性措施，可以提高光伏阵列在山地环境中的发电效率和稳定性。在光伏阵列优化设计方面，应注重阵列布局、组件选型、支架结构和电气系统的优化；在气象适应性方面，要加强实时气象监测与预测、智能控制系统应用、散热与保温以及防湿与排水等措施。未来的研究还需要进一步深入探索山地复杂气象环境下光伏阵列的长期运行性能和可靠性，以及开发更加先进的优化设计方法和气象适应性技术，推动山地光伏发电产业的可持续发展。同时，随着技术的不断进步和创新，光伏阵列在山地复杂气象环境中的应用前景将更加广阔。

参考文献

- [1] 刘朋, 吴鹏, 刘源. 城市尺度地形特征对气象影响的量化研究 [J]. 农业与技术, 2021, 41(09): 70-76. DOI: 10.19754/j.nyyjs.20210515019.
- [2] 田亮, 徐序, 盛智强, 等. 山地地形下光伏电站阵列设计与分析 [J]. 建设科技, 2023, (17): 104-107. DOI: 10.16116/j.cnki.jskj.2023.17.026.
- [3] 廖敬文, 王岷, 屈显拥. 山地光伏电站方阵支架及桩基基础设计施工方法 [J]. 中国高新科技, 2023, (17): 135-137. DOI: 10.13535/j.cnki.10-1507/n.2023.17.43.
- [4] 孙迎鑫, 徐松. 山地光伏地质勘察现状与对策分析 [J]. 上海建设科技, 2023, (04): 61-63.
- [5] 卢强. 浅谈山地光伏区施工难点及应对措施 [J]. 人民黄河, 2023, 45(S1): 175-177.
- [6] 张祺. 山地光伏电站局部阴影检测及 IAVOA 动态重构研究 [D]. 太原科技大学, 2023. DOI: 10.27721/d.cnki.gyzjc.2023.000370.
- [7] 王卉, 颜宇光. 光伏发电技术在山地地形中的应用研究 [J]. 中国战略新兴产业, 2022, (36): 73-75.
- [8] 马文婷. 基于山地光伏电站时序数据的故障诊断研究 [D]. 合肥工业大学, 2022. DOI: 10.27101/d.cnki.gfhgu.2022.001620.
- [9] 罗耿. 山地光伏阵列布置方法和排间距计算 [J]. 发电技术, 2022, 43(02): 320-327.
- [10] 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, (04): 55-57. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2022.04.018.