

Mountain photovoltaics: challenges, opportunities, and exploration of sustainable development paths

Yang Cao Yongqiang Li

China Energy Construction Group Investment Co., Ltd. Southwest Branch, Kunming, Yunnan, 650000, China

Abstract

This paper deeply discusses the mountain photovoltaic, which is of great significance in the context of global energy transition. Through comprehensive analysis of its development status, analysis of terrain, climate, equipment management and ecological environment and other challenges, including advanced photovoltaic modules, flexible support system, intelligent operation and maintenance technology and ecological friendly construction mode, including technological innovation and solutions. At the same time, the economic and social benefits of mountain PV are analyzed in detail, and sustainable development strategies are proposed from the perspectives of policy support, technology research and development, ecological protection and industrial collaboration, aiming at providing comprehensive theoretical support and practical guidance for the further development of mountain PV.

Keywords

mountain photovoltaic; technological innovation; sustainable development

山地光伏：挑战、机遇与可持续发展路径探究

曹阳 李永强

中国能源建设集团投资有限公司西南分公司，中国·云南昆明 650000

摘要

本文深入探讨了山地光伏这一在全球能源转型背景下具有重要意义的领域。通过综合分析其发展现状，剖析面临的地形、气候、设备管理及生态环境等多方面挑战，阐述了包括先进光伏组件、柔性支架系统、智能运维技术以及生态友好型建设模式等在内的技术创新与解决方案。同时，详细分析了山地光伏的经济效益与社会效益，并从政策支持、技术研发、生态保护和产业协同等角度提出了可持续发展策略，旨在为山地光伏的进一步发展提供全面的理论支撑与实践指导。

关键词

山地光伏；技术创新；可持续发展

1 引言

1.1 研究背景与意义

在全球能源需求持续增长以及对环境保护日益重视的双重驱动下，能源转型已成为必然趋势^[1]。光伏产业作为新能源领域的重要组成部分，凭借其清洁、可再生等显著优势，在全球范围内得到了迅猛发展^[2]。然而，随着光伏项目的大规模建设，土地资源紧张问题逐渐凸显，成为制约光伏产业进一步发展的关键因素^[3]。在此背景下，山地光伏作为一种创新的光伏应用形式，因其能够充分利用山地等非传统耕作用地，有效缓解土地资源供需矛盾，正逐渐受到广泛关注^[4]。

1.2 国内外研究现状

国内外学者针对山地光伏开展了广泛而深入的研究。在技术层面，众多研究聚焦于如何克服山地复杂地形和气候

条件对光伏设备安装、运行和维护的影响^[5]。例如，通过研发适应山地地形的光伏支架系统，如柔性支架，以提高土地利用率和光伏组件的稳定性^[6]；利用先进的光伏组件技术，提升发电效率，降低发电成本^[7]。在应用方面，大量案例研究分析了不同地区山地光伏项目的建设经验和运营效果，探讨了“光伏+农业”“光伏+林业”等复合开发模式在提高土地综合效益和生态保护方面的作用^[8]。

尽管已有研究取得了丰硕成果，但仍存在一些不足之处。例如，对于山地光伏项目在不同生态系统中的长期生态影响评估尚显不足；在技术创新方面，如何进一步降低山地光伏项目的建设和运营成本，提高其经济效益，仍是亟待解决的问题；此外，在产业协同发展方面，如何构建更加完善的产业链和产业生态，促进山地光伏产业的可持续发展，也需要进一步深入研究。

1.3 研究方法与创新点

本文采用了多种研究方法，以确保研究的全面性和深入性。通过文献研究法，系统梳理了国内外关于山地光伏的

【作者简介】曹阳（1990-），男，中国四川人，硕士，工程师，从事能源电力项目开发建设运维研究。

相关研究成果,了解该领域的研究现状和发展趋势,为本文的研究提供理论基础。运用案例分析法,对云南、陕西、山西等多地的典型山地光伏项目进行了详细分析,总结项目在建设、运营过程中的成功经验和面临的问题,为提出针对性的解决方案提供实践依据^[10]。同时,结合实地调研法,深入山地光伏项目现场,直观了解项目的实际情况,与项目相关人员进行交流,获取一手资料,使研究更具现实针对性。

在研究视角和内容上,本文具有一定的创新点。在技术应用方面,不仅关注现有技术在地面光伏项目中的应用效果,还深入探讨了技术创新的方向和潜力,为推动山地光伏技术的持续发展提供新思路。在可持续发展策略方面,本文从政策、技术、生态和产业协同等多个维度进行综合分析,提出了一套较为系统的可持续发展策略,强调各因素之间的相互作用和协同效应,为山地光伏产业的可持续发展提供了全面的指导框架。

2 山地光伏发展现状

2.1 全球光伏产业发展态势

据国际能源署(IEA)统计数据显示,过去十年间,全球光伏装机容量以年均超过20%的速度增长,2023年全球光伏累计装机容量已突破1TW大关^[9]。政策驱动在全球光伏产业发展中起到了关键作用,各国政府纷纷制定可再生能源发展目标,出台补贴政策、上网电价政策等,激励光伏项目的开发和建设。同时,技术创新也为光伏产业发展注入了强大动力,光伏组件转换效率不断提高,从早期的10%-15%提升至目前的25%-30%,部分实验室研发的光伏组件转换效率甚至突破了40%,有效降低了光伏发电成本,提高了光伏能源的市场竞争力^[10]。

2.2 山地光伏的独特地位

山地光伏在全球光伏产业发展中具有独特的地位和优势。首先,从土地利用角度来看,山地地区拥有广阔的未利用土地资源,开发山地光伏能够有效拓展光伏产业的发展空间,缓解土地资源紧张问题。其次,山地地形起伏,能够为光伏组件提供更好的光照条件,减少阴影遮挡,提高发电效率^[10]。研究表明,在同等条件下,山地光伏电站的发电效率相比平原地区可提高10%-20%。此外,山地光伏项目的建设还能带动偏远山区的经济发展,促进当地基础设施建设和就业增长,具有显著的社会效益。同时,通过合理规划和建设,山地光伏项目还能与生态保护相结合,实现能源开发与生态环境的协调发展。

2.3 典型案例分析

以云南易门的山地光伏项目为例,该项目采用了一道新能源的柔性支架系统,并实施了药光互补的立体光伏与土地综合开发利用模式。云南地区山地面积占比高达90%,地形复杂,传统光伏支架在该地区面临土地占用多、施工难度大等问题。而柔性支架系统具有高净空、大跨距的特点,能够更好地适应山地地形,减少对土地的破坏,最大限度保护山地原有植被。在该项目中,药光互补模式不仅提高了土

地利用效率,还优化了当地农业产业结构,增加了农民收入。据测算,该项目光伏发电效率相比采用传统支架提高了15%左右,土地利用效率提高了30%以上。

3 山地光伏面临的挑战

3.1 地形复杂性难题

山地地形复杂多样,地势起伏大,坡度、朝向各异,这给山地光伏项目的设计和施工带来了极大挑战。在设计阶段,需要精确测量地形数据,考虑地形对光伏组件布局和光照条件的影响,以确保光伏组件能够最大限度地接收光照,减少阴影遮挡。然而,山地地形的不规则性增加了测量和设计的难度,传统的光伏组件布局和支架设计难以适应山地复杂地形,容易导致土地利用率和发电效率降低。研究表明,山地光伏项目的地形测量误差可能导致发电效率下降5%~8%。在施工阶段,山地施工条件艰苦,交通不便,大型施工设备难以到达施工现场,增加了施工成本和施工周期。

3.2 气候条件影响

山地气候条件复杂多变,对山地光伏项目的影响不容忽视。山地地区气温较低,昼夜温差大,极端天气频发,如强风、暴雨、暴雪、冰雹等。低温环境会影响光伏组件的性能,降低发电效率,同时增加组件的热应力,缩短组件使用寿命。强风可能导致光伏支架变形甚至倒塌,对光伏电站造成严重破坏。暴雨和暴雪可能引发山体滑坡、泥石流等地质灾害,威胁光伏电站的安全运行。

3.3 设备管理困境

山地光伏电站设备分布广泛,且多位于偏远山区,交通不便,这给设备的巡检、维护和故障排查带来了极大困难。传统的人工巡检方式效率低下,难以及时发现设备故障,且在恶劣天气条件下,人工巡检甚至无法进行。同时,山地地区通信信号较弱,部分地区甚至没有通信覆盖,导致设备数据无法实时传输至监控中心,管理人员难以实时掌握设备运行状态,无法及时做出决策。

4 山地光伏技术创新与解决方案

4.1 先进光伏组件技术

BC(Back Contact)技术作为一种先进的光伏组件技术,近年来在山地光伏项目中得到了广泛应用。BC技术将电池的正负电极都置于电池背面,减少了正面电极对光照的遮挡,提高了光伏组件的转换效率。采用BC技术的光伏组件转换效率相比传统组件可提高1-2个百分点。某品牌的BC技术光伏组件在山地光伏项目中的实际应用显示,其发电效率比同类型传统组件高出1.5%左右,有效提高了项目的发电量和经济效益。

4.2 柔性支架系统应用

柔性支架系统是解决山地光伏地形适应性问题的有效技术手段。柔性支架采用预应力柔性索结构,能够根据山地地形特点进行灵活布置,实现大跨度跨越,减少对地形的

破坏和土地占用。与传统刚性支架相比，柔性支架可节约用地面积 20%~40%。该项目通过优化支架结构设计，以“双索结构”替代“三索结构”，横向增加稳定索，使光伏阵列形成纵横交错的“网状”稳定结构，极大增强了组件的抗倾覆性，确保了光伏电站在复杂山地环境中的安全稳定运行。

4.3 智能运维技术发展

智能运维技术在山地光伏电站中的应用，有效提高了设备管理效率和运维水平。自动化监控系统能够实时监测光伏电站设备的运行状态，通过传感器采集设备的温度、电压、电流、功率等参数，并将数据传输至监控中心。利用大数据分析和人工智能算法，对采集的数据进行分析处理，能够及时发现设备故障隐患，并进行预警。

5 山地光伏的经济效益与社会效益

5.1 成本效益分析

山地光伏项目的成本主要包括建设成本、运营成本和维护成本。建设成本方面，由于山地地形复杂，施工难度大，交通不便，导致土建工程、设备运输和安装成本相对较高。然而，随着技术的不断进步和创新，如柔性支架系统的应用，减少了基础施工量和用钢量，降低了建设成本。运营成本主要包括设备折旧、人员工资、水电费等，通过采用智能运维技术，提高了设备运行效率，降低了设备故障率，从而降低了运营成本。在发电收益方面，山地光伏电站凭借其较高的发电效率和清洁电力输出，能够获得稳定的电费收入。

5.2 对地方经济的带动作用

山地光伏项目的建设和运营能够为地方经济发展带来多方面的积极影响。在项目建设阶段，需要大量的人力、物力和财力投入，能够直接带动当地建筑、运输、设备制造等相关产业的发展，增加就业机会。例如，某山地光伏项目在建设期间，为当地提供了数百个就业岗位，包括建筑工人、技术人员、管理人员等。在项目运营阶段，需要专业的运维人员进行设备维护和管理，也为当地创造了长期的就业机会。

5.3 能源供应与保障

山地光伏作为一种清洁能源，能够为当地提供稳定的电力供应，尤其是在偏远山区，电力基础设施相对薄弱，能源供应不足。山地光伏项目的建设能够有效改善当地的能源供应状况，提高能源供应的可靠性和稳定性。

6 山地光伏的可持续发展策略

6.1 政策支持与引导

政府在山地光伏产业发展中应发挥重要的政策支持和引导作用。在土地政策方面，应制定专门针对山地光伏项目的土地利用政策，明确山地光伏项目的土地性质和使用方式，简化土地审批流程，保障项目用地需求。在补贴政策方面，加大对山地光伏项目的补贴力度，延长补贴期限，引导社会资本投入山地光伏产业。同时，建立健全补贴退坡机制，激励企业通过技术创新和成本控制提高项目的经济效益。在

产业规划方面，结合各地的资源禀赋和发展需求，科学制定山地光伏产业发展规划，合理布局项目建设，避免盲目跟风和无序发展。

6.2 技术研发与创新投入

持续的技术研发和创新投入是推动山地光伏产业可持续发展的核心动力。企业和科研机构应加大在光伏组件技术、支架系统、智能运维技术等方面的研发力度，提高山地光伏项目的技术水平和经济效益。政府应通过设立科研专项资金、税收优惠等政策措施，鼓励企业增加研发投入，加强产学研合作，促进科技成果转化。

6.3 生态保护与修复措施

在山地光伏项目建设和运营过程中，必须高度重视生态保护和修复工作。在项目规划阶段，应进行全面的生态环境影响评估，充分考虑项目对山地生态系统的潜在影响，制定相应的生态保护措施。在项目建设阶段，采用生态友好的施工方法，尽量减少土地平整和植被破坏，保护山地

7 结论

山地光伏的开发不仅有助于增加清洁能源供应，优化能源结构，减少对传统化石能源的依赖，降低碳排放，助力实现全球碳中和目标，还能为偏远山区带来新的发展机遇，促进当地就业、税收增长以及产业多元化发展，推动乡村振兴战略的实施。深入研究山地光伏的发展，具有重要的现实意义和战略价值。

参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022: 456-478.
- [2] IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2021[R]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2022.
- [3] 李俊峰, 王斯成. 中国光伏产业发展路线图(2023年版)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2023: 89-102.
- [4] Hernandez R R, et al. Environmental impacts of utility-scale solar energy[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 29: 766-779.
- [5] 张强, 等. 山地光伏电站设计关键技术研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(3): 345-352.
- [6] 湖南建投集团. 索网柔性支架技术白皮书[R]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2022.
- [7] Green M A. Solar cell efficiency tables (Version 62)[J]. Progress in Photovoltaics, 2023, 31(7): 685-718.
- [8] 云南省能源局. 云南山地光伏项目发展报告(2020-2023)[R]. 昆明: 云南人民出版社, 2023.
- [9] 国家发展改革委. 关于促进光伏产业链健康发展有关事项的通知[Z]. 发改能源〔2022〕1351号, 2022.
- [10] 中国能源研究院课题组. 山地光伏项目实地调研报告(2023)[R]. 北京: 中国能源研究院, 2023.
- [11] 王建国, 等. 新能源产业四维协同发展模型构建[J]. 中国软科学, 2023(5): 45-53.