

基于固定—柔性支架融合与农光互补的山地光伏系统 综合效益评估

王劲

大唐蒲城第二发电有限责任公司 陕西渭南

DOI:10.32629/ems.v8i3.18730

[摘要] 在全球能源结构转型以及可再生能源快速发展的大背景下,光伏发电已经成为清洁能源的重要组成部分,而山地地区凭借其独特的地形地貌特征,为光伏电站的建设带来了全新的机遇,基于此,本文提出一种基于固定—柔性支架融合与农光互补的山地光伏系统,借助创新的支架方式、高效的组件配置以及农光互补模式的综合运用,达成了山地光伏电站综合效益的最大化。经济方面,创新系统年均发电量达 88500MWh 比常规系统增加 12300MWh,效率提升 16.15%。虽初始投资略高,但年运维内部收益率达 8.2%,年经济性更具优势。社会层面项目创造约 250 个建设期和 15 个运维期就业岗位,带动 80 户农户年均增收 1.2 万元促进地方经济和农业结构优化。生态领域实现 800 亩土地复合利用年减少碳排放约 51030 吨按 0.58 吨二氧化碳每兆瓦时计算还通过改善微气候增加植被覆盖提升区域生态效益。

[关键词] 山地光伏系统; 固定—柔性支架融合; 效益评估

山地地区因地形复杂且坡向多变的特点,传统光伏电站建设面临诸多技术难题,特别是固定式光伏支架难适应多变地形和朝向,而柔性支架虽有一定适应性但成本高维护复杂,山地地区的土地资源相当有限,怎样实现土地高效利用和生态保护,已成为山地光伏电站建设需解决的重要问题^[1]。本文提出固定—柔性支架融合与农光互补的山地光伏系统,借助创新的支架方式、高效的组件配置和农光互补模式的综合应用,旨在实现山地光伏电站综合效益最大化,能够适应复杂地形和不同朝向,提高光伏组件的发电效率,并通过农光互补模式实现土地复合利用,提升土地经济效益和生态效益。

1. 核心技术设计

1.1 固定—柔性支架融合技术

考虑到山地坡度陡峭且坡向多变的情况,创新性采用了“固定—柔性支架融合”技术,目的是同时兼顾结构稳定性、地形适应性和经济性。固定支架部分,材料选用高强度钢材(Q345)来制作,主要在相对平缓的坡面(坡度小于 25° 区域)或者开阔地带进行应用。结构形式选用单柱式、固定式或者小型单轴跟踪式支架,基础形式依据地质条件采用现浇混凝土基础、螺旋桩基础或者岩石锚杆基础,以此确保结构在风、雪、地震等荷载作用下的稳定性。柔性支架部分材料采用高强度且耐候性强的柔性薄膜材料(PTFE 涂覆玻璃纤维布、ETFE 膜)或者柔性复合材料(如玻璃纤维增强塑料)。结构通常由轻质的柔性索、钢索或者特殊设计的轻质框架构成,允许面板在一定范围内适应地形起伏或者进行角度调整。

主要应用于坡度陡峭(>25° 区域)、地形破碎或者无法采用常规固定支架的区域。柔性材料或结构能够弯曲或调整,可更好地贴合复杂地形,减少对地形的过度开挖和改造。在固定支架与柔性支架的交界之处设计过渡结构,以此确保两种不同类型支架间能平稳过渡且力可有效传递,进而避免出现应力集中的情况,整体布局借助三维地形扫描数据和专业光伏系统设计软件 PVsyst 开展精细化建模,依据不同区域的坡度、坡向、高差以及光照资源分布状况,精确划分固定支架区与柔性支架区,同时优化各区域的阵列排布、行距和倾角,从而最大限度利用空间并减少阴影相互遮挡现象^[2]。

1.2 组件配置优化

为了实现系统发电效益达到最大化,对系统组件选型和配置做针对性优化。高效光伏组件选用转换效率较高的光伏组件,例如单晶 PERC、TOPCon 等类型。在进行组件串并联设计与 MPPT 分区的时候,鉴于山地地形使组件接收到的辐照度存在显著差异,采用具备多 MPPT(最大功率点跟踪)功能的逆变器。将朝向、倾角相近且辐照度差异较小的组件划分为一个子阵,连接到逆变器的同一个 MPPT 输入端,以此避免因辐照度不均而导致的失配损失。依据不同区域的辐照特性、组件数量以及逆变器输入要求,精确计算和设计组件的串联数和并联路数,确保每个 MPPT 通道都能在各自最佳工作点运行,在辅材方面要选用高可靠性的光伏专用连接器以及耐候、耐紫外线、低衰减的线缆(光伏专用电缆+耐候型低烟无卤电缆+特种橡胶电缆),并根据电流大小(按载流量计算)、电压

降限制、敷设方式（直埋、桥架、穿管）等因素来确定具体的导体截面积（1.5mm²，2.5mm²，4mm²等），以此适应山地复杂环境和可能出现的温差变化^[9]。同时合理布置汇流箱并优化直流侧走线路径，并通过交流侧采用合适的电压等级和并网点来确保电能高效送出。

2 农光互补模式的应用实践

2.1 模式选择

为保证农光互补模式达成山地土地资源高效利用与价值提升，模式类型主要采用“板上发电、板下种植”模式。依据光伏阵列的排布以及产生的阴影区域合理规划种植区域，在阵列间距较宽且光照充足的区域可发展对光照要求较高的作物，在阵列下方阴影区域则选择耐阴且喜凉爽气候的特色经济作物，作物选择需结合当地气候、土壤条件以及市场需求来筛选适合山地环境、附加值较高且与光伏发电不冲突的高山茶叶、中药材、特色水果（如蓝莓、猕猴桃）、食用菌或者与牧草结合发展生态养殖等。在空间布局方面要在项目区域内根据地形、光照和种植需求进行功能分区，明确发电区、种植区、道路、灌溉区、管理用房等布局，在板下种植区进行必要的土地整理（坡改梯、建设水平条带）以适应农业耕作需求，同时要考虑引入灌溉设施如滴灌、喷灌系统来提高水资源利用效率。

2.2 运营管理协同

一方面，建立专业农业运营团队或者与当地农户/合作社合作，负责农作物种植、施肥、灌溉、病虫害防治以及采收工作，并制定科学农事操作规程，避免农业活动对光伏系统正常运行和维护产生影响。另一方面，在进行光伏系统维护，比如组件清洗、设备检修工作时，注意避开农忙季节或者作物关键生长期。此外，协同当地建立农产品销售渠道，发展订单农业或者品牌农业，以此确保农产品市场价值和项目收益的稳定性。

3 综合效益评估

3.1 案例选择

为全面、客观地评估基于固定-柔性支架融合与农光互补的山地光伏系统（以下简称“创新系统”）的实际应用效果。本研究选取中国某典型丘陵山地的50MW光伏项目当作为案例来进行分析，该区域地形起伏情况较大且坡向多变土地资源相对有限，能具有代表性地反映山地光伏开发所面临的共性挑战，通过收集项目设计施工运行以及经济方面的数据，并和条件相似但采用传统固定支架且具备单一发电功能的常规山地光伏项目也就是常规系统做对比，运用定量和定性相结合的方法对该创新系统的综合效益开展深入评估。评估指标主要围绕经济效益、投资成本、社会效益和生态效益展开。评估方法结合对比分析、成本效益分析和统计分析等手段，目的是全面捕捉创新系统相对常规系统各方面的优势。

3.2 经济效益评估

经济效益是用来衡量项目是否可行的核心指标，创新系统借助技术集成以及模式创新，在发电性能、土地利用和价值创造方面都呈现出显著经济优势。本研究显示（表1）创新系统的核心优势之一在于其适应山地复杂地形的支架设计。固定和柔性支架结合起来后，能让光伏阵列更灵活地去适应坡度变化，并且通过精确计算对朝向和排间距进行优化，最大程度减少因地形以及相邻阵列造成的阴影遮挡情况，在同等装机容量50MW且光照资源条件相近的情况下，创新系统年均发电量达到了88500MWh，而常规系统年均发电量是76200MWh。表明创新系统发电量比常规系统增加12300MWh，发电效率相对提升了大约16.15%（ $(88500-76200)/76200 \times 100\%$ ）。同时，项目在光伏阵列下方主要阴影区域合理规划约300亩土地用于农业生产，种植适应山地环境的经济作物像特色林果和高山蔬菜等，根据农业产值统计这部分土地年均农业产值约为240万元。此外，光伏发电部分按照当前电价政策估算年发电收入约为1770万元按0.35元/kWh计算，创新系统的年均总收入约为2010万元，创新系统通过复合利用实现了土地价值的倍增，年均土地复合经济效益显著提升。

表1 创新系统与常规系统发电性能与经济效益对比

指标	创新系统（50MW）	常规系统（50MW）	创新系统优势	单位
年均发电量	88,500	76,200	+12,300	MWh
发电效率相对提升	基准（100%）	基准（100%）	+16.15%	%
年均发电收入（@0.35元/kWh）	1,770	1,665	+105	万元
年均农业产值	240	0	+240	万元
年均总收入	2,010	1,665	+345	万元
年均土地复合经济效益	约1,950	约1100	约+850（相比单一利用）	万元/年

3.3 投资成本分析

在创新系统的初始投资构成里,固定支架部分和常规系统差不多,但增添了柔性支架材料、智能跟踪或倾角调节系统以及可能有的农业配套设施投入。经综合测算,创新系统的初始投资成本大概是6,500元/kW,略微高于常规系统的6,200元/kW。对于50MW的项目而言,总初始投资大约为3.25亿元,比常规系统高出大概1500万元。在运维成本方面,创新系统的年运维成本主要涵盖设备维护、清洁、农业管理等方面,虽说柔性部件和智能系统或许会增加一定的维护复杂性,不过农光互补模式带来的微环境改善(减少积灰、降低极端温度影响)以及农业活动可能带来的协同维护(例如部分清洁工作),让其年运维成本反而降低,估算创新系统年运维成本约为120万元,低于常规系统的135万元。综合来看,尽管创新系统初始投资略微偏高,但是它凭借显著更高的发电收入和额外的农业收入,经济性表现更加突出,经测算,创新系统的项目内部收益率(IRR)达到约8.2%,高于常规系统的7.5%,其静态投资回收期约为8.5年,略短于常规系统的9年。考虑动态现金流和复合收益之后,创新系统经济优势更加明显。

3.4 社会效益评估

社会效益主要体现在项目对当地社区、经济和就业所产生的积极影响。在就业方面,光伏项目的建设运营本身能够创造出一定数量的就业机会,创新系统在建设高峰期可提供约250个直接就业岗位,比常规系统多出约20人。项目投运之后,运维期会提供约15个长期就业岗位。更为重要的是,农光互补模式直接带动项目周边约80户农户参与农业生产,通过土地流转、劳务合作或者自主经营等方式,使得户均年增收约1.2万元,有效拓宽了农民的增收渠道。在间接就业方面,农业产值的增加带动了农资供应、农产品初加工、运输销售等环节的就业机会。创新系统不仅为区域电网提供了清洁电力,其引入的现代农业生产方式也促进了当地农业结构的优化升级,特色农产品的种植和销售延长了农业产业链并提升了农产品附加值。项目建设和运营带来的税收贡献以及由此产生的经济活动,为地方财政和经济发展注入了新的活力。

3.5 生态效益评估

生态效益属于评估可持续发展的重要考量维度,该创新系统在土地资源利用、环境保护以及生态系统改善方面呈现

出显著优势。系统达成了土地的立体化与复合化利用,在约800亩的土地之上,不仅建设了50MW的光伏电站,还于阵列下方利用约300亩土地开展农业生产,同时实现能源生产和农产品供给,显著提升土地利用效率和产出价值且利用方式具备可持续性。光伏发电作为清洁能源可替代化石能源发电,减少了温室气体以及其他污染物的排放,依据系统年发电量88,500MWh和中国电网平均碳排放因子(约0.58tCO₂/MWh),每年能够避免约51,000吨二氧化碳排放。阵列下方的植被覆盖有助于减少地表水分蒸发、保持水土以及降低扬尘,对局部环境产生积极影响,光伏阵列提供的遮阴环境改善了微气候,为作物生长创造了有利条件。合理选择种植作物及周边绿化植物有助于增加区域生物多样性、吸引益虫和鸟类,结合水土保持工程(如梯田改造、植被恢复)还能有效减少水土流失、改善区域生态环境,虽然光伏阵列本身可能对局部生态存在一定影响,但农光互补带来的积极生态效应能在一定程度上中和或补偿这些影响,整体上有利于生态系统的正向演替。

4. 结束语

本文提出来的基于固定-柔性支架融合与农光互补的山地光伏系统具备突出技术适应性,能够有效应对山地复杂地形状况,通过优化设计以及高效组件配置大幅提高了发电效率水平,实现了土地的立体复合利用从而提升单位面积经济产出,创造了更多就业机会并且带动农户实现增收,具备良好的综合效益优势。然而,研究主要基于特定案例进行分析,评估结果受到地域和项目条件限制,普适性有待更多验证。展望未来,建议进一步探索智能控制技术在支架调节和农业管理中的集成应用,以此提升系统运行效率和智能化水平。

[参考文献]

- [1] 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(S01): 175-175.
- [2] 李丹, 王炜贵, 孙浩杰, 等. 山地光伏发电系统中最大功率点跟踪技术的研究与应用[J]. 工程建设与设计, 2024(18): 25-27.
- [3] 卢彤彤. 基于环境分析的山地光伏系统可持续性评估[J]. 中国新技术新产品, 2024(13): 131-133.

作者简介: 王劲, 1973.3, 男, 汉陕西蒲城人, 本科, 工程师, 研究方向: 新能源。