

Quality Control Management of Photovoltaic Power Generation Projects Based on the Whole Life Cycle

Chengbang Ma

Qinghai Yellow River Upstream Hydropower Development Co., Ltd., Xining, Qinghai, 810000, China

Abstract

As an important carrier of solar irradiance resources, building roofs have great potential for application and promotion value when combined with photovoltaic technology. This article takes a certain photovoltaic power generation project as the research object, models and analyzes its operating characteristics based on the full life cycle theory, and systematically evaluates the energy-saving and carbon reduction effects of building rooftop photovoltaic systems. Research has shown that the system can generate 672900 kW·h of electricity throughout its entire lifecycle, with a corresponding carbon reduction of 390.3 tons, fully demonstrating its outstanding contribution to energy conservation and emission reduction. As the operating years increase, the system's power generation gradually decreases due to factors such as component aging and efficiency degradation. It is proposed to fully consider equipment selection, maintenance strategies, and performance optimization measures during the project design phase. By using scientific quality control management methods, performance degradation can be effectively delayed, and the long-term stability of the system can be improved, providing important reference for the sustainable development of building photovoltaic integration.

Keywords

rooftop photovoltaic system; Photovoltaic power generation model; Power generation performance; Carbon reduction characteristics

基于全生命周期的光伏发电工程项目质量控制管理

马成邦

青海黄河上游水电开发有限责任公司, 中国·青海 西宁 810000

摘要

建筑屋顶作为太阳能辐照度资源的重要载体, 和光伏技术相互结合具有良好的应用潜力和推广价值。本文以某光伏发电工程项目为研究对象, 基于全生命周期理论建模分析其运行特性, 系统性评估建筑屋顶光伏系统的节能降碳效果。研究表明, 该系统在全生命周期内的发电量可达67.29万kW·h, 对应的减碳量为390.3吨, 充分体现其在节能减排方面的突出贡献。而随着运行年限的增长, 受组件老化、效率衰减等因素影响, 系统发电量呈现逐步下降趋势, 提出在项目设计阶段要充分考虑设备选型、维护策略、性能优化措施。通过科学的质量控制管理手段, 有效延缓性能衰减, 提升系统长期运行的稳定性, 为建筑光伏一体化的可持续发展提供重要参考。

关键词

屋顶光伏系统; 光伏发电模型; 发电性能; 减碳特性

1 引言

近年来, 随着建筑运行能耗及碳排放量的持续提高, 很容易影响到周围生态环境。据统计, 2021年我国建筑运行能耗(标准煤)及碳排放量(CO₂)分别达到11.1亿吨和22.4亿吨, 占全国总能耗及总碳排放量的21.0%和18.8%, 该数据体现出降低建筑运行能耗及碳排放的紧迫性, 有利于我国实现预期的“双碳”目标。在此背景下, 光伏发电技术作为一种清洁、高效的节能手段, 和建筑屋顶丰富的太阳能资源进行相互结合, 展现出良好的节能减碳应用潜力。本文

以某综合体项目为研究对象, 通过建模分析其屋顶光伏发电系统在全生命周期内的发电及减碳特性, 深入探讨光伏发电技术在建筑领域的实际应用效果。研究表明, 光伏发电系统能够有效减少建筑运行阶段的化石能源消耗, 降低碳排放量, 从而为建筑行业的绿色发展提供重要支撑。而全生命周期的质量控制管理是确保光伏发电系统长期稳定运行的关键, 工作人员要从设计、施工、运维、退役回收各阶段进行全面优化。未来, 进一步结合智能化监测技术手段, 提升光伏发电系统效率, 推动建筑领域向低碳化、可持续化方向迈进, 为实现“双碳”目标贡献更大力量。

2 工程概况

某光伏发电项目位于海南省文昌市, 总占地面积达2.24万平方米, 是一次以节能减碳为核心目标的综合性改造工

【作者简介】马成邦(1985-), 男, 中国青海乐都人, 工程师, 从事光伏项目工程建设管理研究。

程。项目通过多种创新形式的光伏技术应用，全面提高建筑的能源利用效率。改造方案包括光伏屋顶、光伏追日幕墙、光伏栏杆、光伏玻璃幕墙、光伏遮阳、景观光伏、光伏雨棚以及光储直柔示范系统等多样化设计，充分体现光伏发电和建筑一体化（BIPV）的理念。在光伏组件选型方面，项目采用单晶硅光伏组件、碲化镉薄膜光伏组件、铜铟镓硒薄膜光伏组件，不同组件的应用优势存在较强差异性，能够满足不同场景下的发电需求。如单晶硅组件具有高转换效率，而碲化镉和铜铟镓硒薄膜组件则在弱光性能和柔性应用方面表现出色。项目施工区域划分为区域1至5，光伏总装机容量为504.8 kW，其科学设计有助于提高光伏发电系统运行的高效性，最大化能源产出。项目结合光储直柔技术，优化电力存储与分配，进一步提升系统的稳定性。通过全生命周期的质量控制管理，该项目不仅实现了节能减排的目标，也为建筑领域的可持续发展提供重要参考。

3 测试方法和模型验证

3.1 测试方法

本文通过光电建筑监控平台采集屋顶光伏发电系统的运行数据，以实现光伏发电系统的全生命周期质量控制管理。在测试方法设计中，气象参数采集由小型气象站完成，这些参数包括太阳辐照度、环境温度、风速等指标，为分析光伏发电系统的性能提供基础数据支持。同时，光伏发电系统的输出电压、电流、功率等运行数据则通过光伏逆变器进行实时采集，有利于提高数据的准确性。为了保证测试结果的可靠性，相关仪器精度经过严格校准，其具体参数如表1所示。如太阳辐照度传感器测量精度达到±2%，温度传感器的精度为±0.5℃，而光伏逆变器对于电压、电流的采集精度分别达到±0.5%和±1%，能够有效降低测量误差，为后续性能评估提供科学依据。通过多维度分析采集数据，可以全面掌握光伏发电系统在不同气象条件下的运行特性，识别潜在的质量问题。

表1 相关测试仪器的精度

测试仪器	型号	范围	精度
光伏逆变器	GCI-8/12/30/40/50/110K-5G	0~8/12/30/40/50/110 kW	≤5%
风速仪	EC-8SX	0~30 m/s	0.35%
环境温度传感器	PTS-3	-40~120 ° C	±0.2 ° C
辐照表	TBQ-2	0~2000 W/m ²	≤5%

3.2 模型验证

在基于全生命周期的光伏发电工程项目质量控制管理中，模型验证是确保发电计算模型精度和可靠性的重要环节。本文采用MATLAB 2016B软件，计算屋顶光伏系统的发电计算模型，其求解流程如图1所示，具体步骤包括数据预处理、模型参数初始化、迭代计算、结果输出等。为了全面评估模型的性能，采用两种常用的误差评价指标：平均绝对百分比误差（MAPE）和标准均方根误差（nRMSE）。其中，MAPE用于衡量模型计算结果与实际值之间的总体偏离程度，能够直观反映模型的整体预测能力；而nRMSE则对异常数据较为敏感，可以有效捕捉模型在极端情况下的表现。通过这两种指标的综合评价，从不同角度验证模型的精度与鲁棒性；在模型验证过程中，工作人员应用实际运行数据作为参考基准，进一步提升验证结果的可信度。

基于屋顶光伏系统运行数据得到所建发电模型进行验证，发现模型计算值和试验测试值的变化趋势高度一致，表明模型具有较高的拟合精度和良好的预测能力。在平均辐照度为839 W/m²、3种光伏组件平均温度为69.8℃的条件下，模型计算得出的屋顶光伏系统平均发电功率和发电效率分别为373.4 kW和12.70%，而监控平台采集的实际值分别为358.8 kW和12.3%。两者的相对误差仅为3.8%，充分体现模型的高精度特性。进一步分析显示，模型的MAPE和nRMSE分别为4.5%和5.6%，两者全部处于较低水平，说

明模型不仅能够准确反映系统的整体发电性能，还具备较强的抗干扰能力。上述验证结果表明，该发电计算模型能够有效模拟屋顶光伏系统的运行状态，为光伏发电工程项目的全生命周期质量控制提供技术支持。

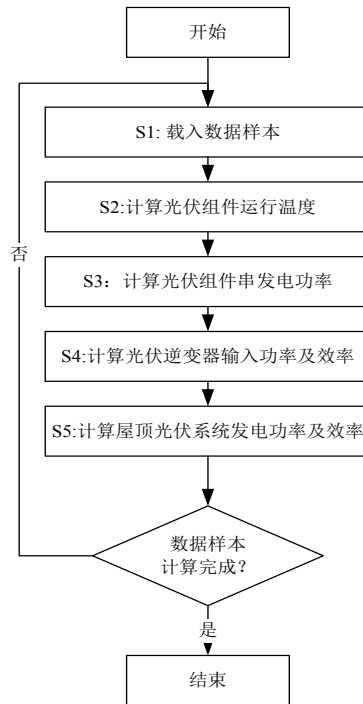


图1 光伏系统发电计算模型求解流程

4 试验结果与讨论

4.1 全年发电性能分析

屋顶光伏系统全年日间发电功率、发电效率、减碳量的变化情况，其数据分析表明，系统发电性能和环境因素有直接关联。全年日间发电功率的变化范围为 0.4~429.2 kW，表现出明显的波动性，和太阳辐照度的动态变化特性高度一致^[1]。太阳辐照度是影响光伏发电功率的关键因素，其强度直接决定了光伏组件的输出能力，但发电效率的变化则呈现出和光伏组件温度相反的趋势，这是因为光伏组件的发电效率和其工作温度呈负相关关系。随着温度不断升高，光伏组件的开路电压持续下降，导致光电转换效率降低，该种现象在单晶硅、碲化镉薄膜和铜铟镓硒薄膜等不同类型的光伏组件中体现得非常明显。

表 2 3 类光伏发电系统发电量及减碳量情况

类型	发电量/(万 kW·h)	减碳量/t	发电量/减碳量占比/%
单晶硅	60.17	349	89.4
碲化镉薄膜	6.24	36.2	9.3
铜铟镓硒薄膜	0.89	5.1	1.3
总计(屋顶光伏系统)	67.29	390.3	100

4.2 全生命周期发电性能分析

在基于全生命周期的光伏发电工程项目质量控制管理试验中，发电性能分析研究系统随运行年限增长，出现的性能衰减规律^[2]。相较于光伏组件出厂标称的装机容量，不同类型光伏系统的首年发电量呈现出不同程度的减少：单晶硅、碲化镉薄膜和铜铟镓硒薄膜光伏发电系统首年发电量分别减少 1.81 万 kW·h、0.19 万 kW·h 和 0.03 万 kW·h，而屋顶光伏系统整体首年发电量下降 2.03 万 kW·h。这种初始衰减主要和光致衰减效应 (Light-Induced Degradation, LID)、早期材料老化直接关联，尤其是单晶硅组件对 LID 更为敏感。随着运行年限的增加，各类光伏系统的年发电量均呈现逐年下降趋势，其中单晶硅、碲化镉薄膜和铜铟镓硒薄膜光伏发电系统的年均发电量分别减少 0.37 万 kW·h、0.05 万 kW·h 和 0.01 万 kW·h，表明单晶硅组件的长期性能衰减速率较高，而薄膜组件则表现出较强的稳定性。从全生命周期的角度来看，屋顶光伏系统中单晶硅、碲化镉薄膜、铜铟镓硒薄膜光伏发电系统的平均年发电量分别为 54.4 万 kW·h、5.51 万 kW·h 和 0.82 万 kW·h，而整个屋顶光伏系统的平均年发电量为 60.73 万 kW·h，充分体现了不同技术路线在实际应用中的性能差异^[4]。此外，结合全年日间小时数和发电功率的变化发现，发电效率在日照强度较高的时段达到峰值，但随着组件温度升高，其效率受到热效应因素影响，出现不同程度的下降。同时，系统的减碳量也和发电量呈正相关关系，全年减碳量波动范围较大，进一步验证了

全年发电效率的变化范围为 15.7%~19.2%，平均值为 17.4%，表明系统在大部分时间内能够保持较高的能量转换性能。同时，减碳量的变化范围为 0.3~244.7 kg，全年平均减碳量为 84.27 kg，充分体现了屋顶光伏系统在节能减排方面的显著贡献^[2]。不同类型光伏组件的发电及减碳性能如表 2 所示，其中单晶硅组件因其较高的光电转换效率，在相同辐照条件下表现出高发电功率和良好的减碳效果；而碲化镉薄膜和铜铟镓硒薄膜组件则在弱光条件下的表现更为优异，具有较强的应用优势。在实际工程中，设计人员要注重优化组件散热设计，进一步提升系统整体的发电效率，加强其经济效益。同时，结合不同类型光伏组件的特点进行合理配置，进一步提高系统的减碳效果，为实现“双碳”目标提供有力支持。

光伏发电在节能减排方面的巨大贡献^[5]。

5 结语

本文以屋顶光伏系统为例，建立屋顶光伏系统并网发电模型，真实模拟分析深入探讨其全年运行温度变化特性。研究重点分析屋顶光伏系统在全年运行过程中发电效率、发电量、减碳效果的变化规律，同时结合全生命周期理论评估了其节能潜力。结果表明，光伏组件的运行温度和发电效率呈负相关关系，随着运行年限增长，系统发电量呈现逐渐下降趋势，给项目长期经济效益和节能减排目标提出挑战。而本研究仅针对单一场景下的屋顶光伏系统进行了分析，在未来研究中，进一步拓展至更多多样化的应用场景，不同气候条件、建筑类型及光伏技术路线的综合对比分析，推动建筑光伏一体化技术的可持续发展。

参考文献

- [1] 孙夺.基于全生命周期的光伏发电工程项目质量控制管理探讨[J].水利电力技术与应用,2024,6(20).
- [2] 刘拴林,张景华,荣建平.光伏发电项目土建工程质量控制[J].工程施工新技术,2024,3(17).
- [3] 赵亮.试论光伏发电项目土建工程质量控制[J].门窗,2023(22):136-138.
- [4] 程俊豪.光伏电站机电设备安装工程施工质量控制措施[J].电力设备管理,2024(24):231-233.
- [5] 王苑.全过程项目管理在光伏发电工程中的应用[J].商品与质量,2023(39):117-120.