

影响光伏系统发电量的关键因素分析与优化措施研究

林炜达

广州市哲明惠科技有限责任公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025110012

摘 要： 本文分析影响光伏系统发电量的因素及优化措施。自然因素、设计参数、组件选型等影响发电效率；通过系统结构优化、谐波治理、无功补偿、电压控制等提升电能质量；构建数字孪生、智能清洗模型及优化算法提高运行效能；利用综合能效指标和全生命周期成本模型评估系统，经多环节优化后发电量提升，未来应在材料、技术等方面突破。

关 键 词： 光伏系统；发电效率；优化措施

Analysis of Key Factors Affecting the Power Generation of Photovoltaic System and Research on Optimization Measures

Lin Weida

Guangzhou Zheminghui Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This paper analyzes the factors affecting the power generation of photovoltaic system and the optimization measures. Natural factors, design parameters, component selection and other factors affect power generation efficiency; Improve power quality through system structure optimization, harmonic control, reactive power compensation, voltage control, etc; Build digital twin, intelligent cleaning model and optimization algorithm to improve operation efficiency; Using the comprehensive energy efficiency index and life cycle cost model evaluation system, the power generation will be increased after multi link optimization, and breakthroughs in materials, technology and other aspects should be made in the future.

Keywords： photovoltaic system; generation efficiency; optimization measure

引言

《关于做好可再生能源绿色电力证书全覆盖工作 促进可再生能源电力消费的通知》于2023年7月颁布，旨在推动可再生能源电力消费。光伏作为可再生能源重要组成部分，其系统发电量受多种因素制约。自然因素如太阳辐照度、环境温度、阴影遮挡等通过不同物理机制影响发电效率；系统设计参数如组件倾角、串并联配置、逆变器选型等对发电效率影响显著；组件选型、布置优化、系统结构优化也关乎发电效率与经济性。此外，谐波污染、电能质量等问题同样不可忽视。对这些关键因素分析及采取优化措施，符合政策导向，能有效提升光伏系统发电量与整体效能。

一、光伏系统发电效率影响因素分析

（一）自然因素制约机制

太阳辐照度直接影响光伏系统发电量，其强度变化与发电量呈正相关。光照越强，光伏组件内电子跃迁越活跃，产生的电流越大，进而提升发电效率^[1]。环境温度对光伏组件性能影响显著，温度升高，光伏组件的开路电压会降低，短路电流略有增加，但总体功率下降，导致发电效率降低。此外，阴影遮挡会使光伏组件局部发热，形成热斑效应，严重影响组件发电效率甚至造成组件损坏。被遮挡部分无法有效发电，还会消耗其他正常发电区域的电能，使得整个光伏系统的发电量大幅减少。这些自然因素通过不同的物理机制，综合作用于光伏系统，制约其发电效率。

（二）系统设计关键参数

光伏系统设计中的多个关键参数对发电效率有着显著影响。组件倾角与太阳辐射的接收密切相关，合适的倾角能使光伏组件最大程度地接收太阳光照，进而提升发电效率。若倾角设置不合理，会导致太阳辐射接收量减少，降低发电量^[2]。串并联配置也十分关键，它决定了光伏组件的电气连接方式。恰当的串并联组合可有效避免组件间的失配损耗，让光伏系统输出最大功率。若配置不当，会造成电流或电压不匹配，使发电效率大打折扣。此外，逆变器选型同样不可忽视，逆变器作为将直流电转换为交流电的关键设备，其转换效率直接影响系统整体发电效率。高效的逆变器能减少能量转换过程中的损失，提高发电量；反之，低效逆变器会增加损耗，降低发电效率。

二、系统效率优化技术体系

（一）组件选型与布置优化

在组件选型方面，不同电池技术路线的能效特性存在显著差异。例如，晶硅电池凭借成熟的工艺和较高的转换效率，在市场上占据主导地位，但不同类型晶硅电池（如 PERC、TOPCon、HJT 等）在效率、成本及稳定性等方面各有优劣，需综合考量。薄膜电池虽转换效率相对较低，但具有轻薄、弱光响应好等特点，适用于特定场景。在布置优化上，智能跟踪支架与双面组件的结合可显著提升发电量。智能跟踪支架能实时跟踪太阳位置，提高组件接收的太阳辐射量；双面组件可利用地面反射光进行发电。然而，这种布置的经济性需深入探讨，要综合考虑初始投资、运维成本以及发电量增益等因素^[3]，通过合理选型与布置，实现光伏系统在成本与发电量间的最优平衡，提升整体经济性。

（二）系统结构优化设计

在系统结构优化设计方面，一方面要建立基于 LCOE 模型的直流侧电压优化方法。通过该模型对光伏系统成本进行综合评估，深入分析直流侧电压与系统发电量、成本之间的关系，以寻找最优的直流侧电压值，提高光伏系统的发电效率与经济性^[4]。另一方面，需提出阵列布局与线损控制综合优化方案。合理规划光伏阵列的布局，考虑光照、阴影遮挡等因素，使光伏组件能获得更多光照，减少因布局不合理导致的发电量损失。同时，注重线损控制，选择合适的电缆规格和线路路径，降低电流传输过程中的能量损耗，通过阵列布局与线损控制的协同优化，提升整个光伏系统的发电效率，最终实现发电量的提升。

三、电能质量综合治理技术

（一）谐波污染抑制策略

1. 逆变器谐波生成机理

在光伏系统中，逆变器是将直流电转换为交流电的关键设备，然而其工作过程会产生谐波污染。逆变器谐波生成主要源于 PWM 调制方式与非线性负荷的耦合作用^[5]。PWM 调制通过控制功率开关器件的通断来模拟正弦波输出，但这种离散的开关动作本身就会引入谐波。当逆变器连接非线性负荷时，二者相互影响。非线性负荷的电流特性改变了逆变器输出电流的波形，使其偏离理想正弦波。同时，逆变器 PWM 调制产生的谐波又进一步加剧非线性负荷的畸变。在这种耦合作用下，谐波频谱变得更为复杂，不仅包含与 PWM 调制频率相关的特征谐波，还会出现因非线性负荷特性导致的非特征谐波，严重影响光伏系统的电能质量。

2. 滤波装置协同控制

研究有源滤波器与 LCL 滤波器的参数匹配技术及动态补偿控制算法，对于滤波装置协同控制至关重要。一方面，精确的参数匹配能使有源滤波器与 LCL 滤波器在谐波抑制过程中发挥各自优势，实现高效协同。有源滤波器可针对特定频率谐波进行灵活补偿，而 LCL 滤波器对高频谐波有良好的衰减特性，二者参数若能精准适配，能大幅提升谐波抑制效果^[6]。另一方面，动态补偿

控制算法需根据光伏系统实时运行状态，动态调整有源滤波器与 LCL 滤波器的补偿参数，确保在不同工况下都能有效抑制谐波。例如，当光照强度、温度等因素变化导致光伏系统输出功率波动时，控制算法能及时响应，保证滤波装置协同工作的稳定性和可靠性，从而有效降低谐波污染，提升光伏系统电能质量。

（二）电压稳定调控方法

1. 无功补偿系统设计

构建基于 STATCOM（静止同步补偿器）的动态无功补偿系统，能够有效改善光伏系统的电能质量与电压稳定性。STATCOM 凭借其快速的动态响应特性，可实时跟踪系统无功需求变化，精确调节输出无功功率，确保电压稳定在合理范围内。优化 SVG（静止无功发生器）装置的容量配置策略也至关重要^[7]。需综合考虑光伏电站的规模、光照强度变化、电网结构及负荷特性等多方面因素。合理的容量配置既能满足系统无功补偿需求，避免因容量过大造成成本浪费和设备闲置，又能防止容量过小而无法达到预期补偿效果，保障光伏系统在各种工况下稳定高效运行，提高发电量。

2. 电压协调控制机制

为实现光伏系统并网点电压的稳定调控，提出融合下垂控制与二次电压调节的并网点电压综合控制方案。下垂控制能够根据系统运行状态，依据预先设定的下垂特性曲线，自动调整光伏逆变器的输出无功功率，以快速响应电压的波动，在一定程度上维持电压稳定。而二次电压调节则从更全局的角度出发，对整个光伏系统的电压进行优化。它基于系统的运行参数与设定的电压目标值，通过协调各个光伏逆变器以及其他无功补偿设备的无功输出，实现对并网点电压的精确调控。二者融合，下垂控制快速应对电压的瞬时变化，二次电压调节则保证电压长期稳定在目标范围内，有效提升并网点电压稳定性，减少电压偏差对光伏系统发电量的影响^[8]。

四、系统运行效能优化实践

（一）智能运维技术应用

1. 数字孪生系统构建

构建数字孪生系统对光伏系统运行具有重要意义。通过采集光伏电站各类设备的实时运行数据，包括光伏板的温度、光照强度、电流电压等，以及周边气象数据如风速、湿度等^[9]。利用这些丰富的数据，在虚拟空间中构建与实体光伏系统高度相似的数字模型，实现对光伏系统全生命周期的精准映射。借助该数字孪生系统，运维人员可直观监测系统运行状态，提前发现潜在故障隐患，例如通过模拟分析预测光伏板的老化趋势，以便及时采取维护措施。同时，还能对不同运行策略进行虚拟验证，如调整光伏板的倾角、优化设备布局等，评估其对发电量的影响，从而为优化光伏系统运行、提升发电量提供科学依据，切实提高光伏系统的运行效能。

2. 智能清洗决策模型

智能清洗决策模型综合考虑积尘预测与经济性分析来优化组

件清洁周期。通过对光伏组件所处环境的气象数据、历史积尘情况等深入分析，构建积尘预测模型，准确预估组件表面积尘量随时间的变化趋势。同时，基于经济性考量，分析清洗成本、发电量损失成本等因素之间的关系。将积尘预测结果与经济性分析相结合，当预测积尘量达到一定程度，且清洗带来的发电量增益所产生的经济效益超过清洗成本时，触发清洗决策^[10]。这种智能清洗决策模型，能在保障光伏系统发电量的同时，最大化经济效益，有效避免不必要的清洗操作，实现光伏系统运行效能的优化，对提升光伏系统整体性能具有重要意义。

（二）MPPT 技术改进

1. 自适应算法优化

在光伏系统中，改进扰动观察法的步长调节机制以提升复杂辐照条件下的追踪精度，是自适应算法优化的关键。传统扰动观察法在复杂辐照环境中，步长固定易导致追踪精度不足或响应速度慢。为此，可设计一种能根据光照强度、温度等环境参数实时调整步长的自适应机制。当光照强度变化剧烈时，增大步长以加快追踪速度，快速捕捉最大功率点的大致位置；而在光照相对稳定时，减小步长提高追踪精度，使系统更精准地锁定最大功率点。通过这种自适应步长调节，光伏系统在复杂辐照条件下能更高效地追踪最大功率，从而提升发电量，增强系统的运行效能。

2. 多峰特性处理技术

在光伏系统中，光伏电池的输特性会呈现多峰特性，这对传统最大功率点追踪（MPPT）技术构成挑战。研究全局扫描与粒子群算法相结合的复合最大功率点追踪策略，能有效应对这一情况。全局扫描算法可对光伏电池输出功率曲线进行全面搜索，快速定位到多个功率峰值所在的大致区域，为后续精确追踪奠定基础。粒子群算法凭借其智能搜索能力，在全局扫描确定的区域内，以较快速度和较高精度寻找到真正的最大功率点。通过这种复合策略，既兼顾全局搜索的全面性，又发挥局部搜索的高效性，从而克服光伏电池多峰特性带来的困难，提升 MPPT 技术性能，最终提高光伏系统的发电量，优化系统运行效能。

（三）系统效能评估体系

1. 综合能效评价指标

综合能效评价指标体系中，PR 值（Performance Ratio）至关重要。它反映了光伏系统实际发电量与理论发电量的比值，体

现系统整体运行状况。高 PR 值意味着系统能高效将太阳能转化为电能，若 PR 值低，则需排查组件效率衰减、逆变器损耗、线路阻抗等问题。系统效率直接关乎发电量，涵盖光伏组件转换效率、逆变器效率及其他部件效率。组件转换效率越高，吸收并转化的太阳能越多；逆变器将直流电转换为交流电过程中的效率也影响最终电量。容量因子展示光伏系统实际发电量与装机容量在特定时间内满发理论电量的比例，考量系统利用程度，容量因子越高，系统对光伏资源利用越充分，综合这些指标能全面评估光伏系统综合能效。

2. 全生命周期成本模型

在影响光伏系统发电量的关键因素分析与优化措施研究中，全生命周期成本模型起着重要作用。这里建立涵盖设备折旧、运维成本、电能质量的 LCOE 动态计算模型。设备折旧是光伏系统长期运行中不可忽视的成本部分，随着时间推移，设备性能下降，其价值逐渐损耗，需精准计算折旧成本。运维成本涉及日常维护、故障检修等各类费用，科学的运维能保障系统稳定运行，对成本控制意义重大。电能质量则影响着光伏系统所发电能的质量与价值，不佳的电能质量可能导致电力损耗或设备损坏。通过综合考虑这些因素构建 LCOE 动态计算模型，可全面评估光伏系统全生命周期成本，为系统运行效能优化提供坚实的成本分析基础，助力制定合理的优化策略。

五、总结

在组件选型、系统设计和智能运维等关键环节实施优化措施后，光伏系统发电量得到显著提升。组件选型方面，高效能、适配当地光照条件的组件有效提高了光电转换效率。系统设计时，科学规划布局与电气配置，减少了传输损耗。智能运维则通过实时监测与故障预警，保障系统稳定运行。未来，光伏系统应重点在新型光伏材料研发、提高电池转换效率技术上取得突破，同时，进一步优化系统集成技术，实现各部件间更好的协同工作，挖掘潜在能效。此外，提升智能运维的智能化、精细化程度，利用大数据、人工智能等技术，精准预测发电量，提前应对潜在问题，持续提升光伏系统整体能效，推动光伏产业的可持续发展。

参考文献

- [1] 徐博文. 基于改进蝴蝶优化算法光伏系统 MPPT 仿真研究 [D]. 东北农业大学, 2023.
- [2] 申钰. 建筑屋顶光伏发电系统的应用 [D]. 广西大学, 2021.
- [3] 曾浩升. 四种可再生能源系统产能预测及光伏系统优化 [D]. 广东工业大学, 2021.
- [4] 董卓斌. 基于监测数据的光伏系统监测与预估方法研究 [D]. 长安大学, 2021.
- [5] 徐佳楠. 融合光伏发电量预测的微电网调度优化研究 [D]. 沈阳大学, 2023.
- [6] 崔晓斌, 冷璇. 集中式光伏发电效率优化措施分析 [J]. 电力设备管理, 2023, (20): 211-213.
- [7] 张佳平. 光伏系统发电效率的影响因素 [J]. 上海节能, 2022, (01): 56-61.
- [8] 韩伟民. 集中式光伏发电效率的优化措施分析 [J]. 集成电路应用, 2022, 39(12): 38-40.
- [9] 侯少红, 张悦波, 王二磊, 等. 关于光伏电站光伏组件发电量提升的研究 [J]. 湖北电力, 2023, 47(05): 9-15.
- [10] 王书平. 屋顶分布式光伏电站发电量影响因素分析 [J]. 电力安全技术, 2023, 25(12): 17-20.