

电气工程及其自动化中的光伏电站设计与优化研究

薛 丰

唐山新能源开发有限公司 河北 唐山 063000

摘要：随着电气工程及其自动化技术的迅猛发展，光伏电站作为新能源利用的重要场景，其设计科学性与运行优化水平愈发受到关注。本文聚焦电气工程及其自动化领域下的光伏电站设计与优化。首先阐述电气工程及其自动化与光伏电站的关联，接着剖析光伏电站设计关键环节，涵盖光伏组件选型与阵列设计、逆变器选型与配置、电气系统设计以及防雷与接地设计。随后提出光伏电站优化策略，包括电气性能优化、系统控制策略优化以及经济性优化，旨在提升光伏电站的综合性能与经济效益。

关键词：电气工程；自动化；光伏电站设计；优化研究

引言：在全球能源危机与环境保护需求的双重推动下，可再生能源的开发与利用成为各国能源战略的重点。光伏发电作为最具潜力的可再生能源之一，近年来发展迅猛。电气工程及其自动化为光伏电站的设计、运行与维护提供了关键技术支撑，涵盖电力电子、控制理论、自动化技术等多学科知识。通过优化光伏电站设计，可提高发电效率、降低运维成本、增强系统稳定性。然而，当前光伏电站设计仍面临诸多挑战，如组件选型不合理、系统控制策略不完善等。因此，深入研究光伏电站设计与优化策略具有重要的现实意义。

1 电气工程及其自动化的概述

电气工程及其自动化是一门融合电力系统、控制理论、电子技术与信息技术的综合性学科，核心在于研究电能的产生、传输、分配、转换及利用过程中的自动化控制与优化技术。其学科体系涵盖电力系统自动化、电机与电器控制、电力电子技术、智能控制理论等关键领域，通过多学科技术的协同应用，实现对电气系统的高效调控与智能化管理。在技术层面，该学科以电力电子器件为基础，以自动控制算法为核心，以计算机与通信技术为载体，构建起从底层设备到顶层系统的全链条技术架构。例如，在电力系统中，通过继电保护装置实现故障快速隔离，借助调度自动化系统优化潮流分布；在工业领域，利用PLC（可编程逻辑控制器）与DCS（分布式控制系统）实现生产流程的精准控制。随着新能源革命与数字化转型的推进，学科内涵进一步拓展，与新能源技术（如光伏、风电并网控制）、人工智能（如智能电网调度算法）、物联网（如设备状态在线监测）等深度融合，形成“源-网-荷-储”协同的新型电气自动化体系^[1]。

2 光伏电站设计关键环节

2.1 光伏组件选型与阵列设计

2.1.1 光伏组件选型

光伏组件选型需以性能稳定性和环境适配性为核心。晶体硅组件凭借成熟的技术体系，在多数场景中占据主导地位，不同类型的晶体硅组件在转换效率与成本上各有特点，可根据项目需求灵活选择。薄膜组件则以良好的柔韧性和低温适应性见长，适合一些特殊的安装环境。选型时，需重点关注组件的耐候性，比如抗风沙、耐腐蚀能力，以契合当地的气候特征，同时也要考虑组件在长期使用中的性能衰减速率，确保其在设计使用周期内能够保持稳定的输出。

2.1.2 光伏阵列设计

光伏阵列设计的关键在于实现光照利用最大化和空间布局合理化。需依据安装地点的地理特征来确定阵列的倾斜角度，通过科学规划组件间距，避免相互遮挡。布置方式主要有固定式和跟踪式，固定式结构简单，维护便捷，适合大规模集中安装；跟踪式能通过动态调整方向提升光照接收效率，但初期投资和维护要求相对较高。此外，还需结合地形优化排列形式，坡地可采用阶梯式布局，屋顶安装则要兼顾建筑的承重能力与朝向，平衡发电效率和安装的可行性。

2.2 逆变器选型与配置

逆变器是光伏系统中实现电能转换的核心设备，其选型与配置需围绕转换效率、系统适配性和运行安全性展开。从应用场景来看，集中式逆变器适合大型地面电站，具有单机处理能力强、便于集中管理的特点，但对光伏组件的一致性要求较高，在局部阴影环境下性能易受影响；组串式逆变器以组串为单位进行功率调节，能减少局部遮挡带来的不利影响，更适用于分布式电站和地形复杂的场景；微型逆变器可实现单个组件的独立控制，可靠性较高，但成本相对较高，多应用于小型屋顶

项目。配置过程中,需确保逆变器的输入电压范围、最大输入电流等参数与光伏组件相匹配,并预留一定的功率冗余以应对光照突变。同时,要关注逆变器在低光照条件下的转换效率、对电网的适应性以及远程监控、故障自诊断等智能功能。对于并网型电站,逆变器还需符合电网接入标准,具备防孤岛保护、过欠压保护等安全机制,以保证电网故障时能及时脱离,保障系统和电网的安全。

2.3 电气系统设计

2.3.1 直流侧设计

直流侧设计是光伏系统电能传输的起点,需重点保障电流传输的稳定性与安全性。设计时,首先要合理规划直流电缆的路径,避免与交流电缆并行敷设以减少电磁干扰,同时需根据组件串的输出特性选择适配的电缆截面积,防止因线路损耗过大影响系统效率。汇流箱作为直流侧的关键设备,应具备过流保护、防雷接地等功能,其选型需与光伏组件的串并联方式匹配,确保各支路电流能有效汇总。此外,直流侧还需设置直流断路器等保护装置,以便在检修或故障时快速切断电路,保障运维安全。

2.3.2 交流侧设计

交流侧设计承担着将逆变器输出的交流电接入电网或负载的重要任务,核心在于保证电能质量与并网兼容性。在主接线设计上,需根据电站规模选择合适的拓扑结构,大型电站多采用单母线分段形式,提高供电可靠性;小型分布式电站则可简化为单母线结构。交流电缆的选型需考虑载流量、机械强度及抗腐蚀性能,户外敷设时还需采取防晒、防冻措施。同时,需配置交流配电柜,集成计量、保护、无功补偿等功能模块,确保输出电能符合电网标准,减少对公共电网的冲击。

2.4 防雷与接地设计

防雷与接地设计是保障光伏电站安全运行的关键环节,需构建“拦截-分流-均压-接地”的多层防护体系。外部防雷方面,需在阵列区设置接闪器,优先采用独立避雷针或避雷带,避免直接雷击组件或逆变器;对于屋顶电站,可利用建筑原有防雷设施,通过均压环实现电位均衡。内部防雷则需在直流汇流箱、逆变器输入端及交流配电柜内安装浪涌保护器,分级泄放雷电过电压,保护设备绝缘。接地系统设计需满足低电阻要求,采用水平接地体与垂直接地极组合的方式,确保接地电阻符合规范;同时,将组件支架、设备外壳、电缆屏蔽层等进行等电位连接,防止跨步电压和接触电压危害,形成全方位的安全防护网^[2]。

3 光伏电站优化策略

3.1 电气性能优化

3.1.1 最大功率点跟踪 (MPPT) 技术

最大功率点跟踪 (MPPT) 技术是提升光伏组件发电效率的核心手段,其核心原理是通过实时监测光伏阵列的输出电压与电流,动态调整工作点以匹配当前光照、温度等环境条件下的最大功率输出状态。该技术通过算法持续扫描组件的伏安特性曲线,快速识别并锁定最大功率点,即使在云层遮挡、局部阴影或温度骤变等复杂工况下,也能实时追踪最优工作点,减少能量损失。实际应用中,MPPT 技术需结合系统规模选择适配方案:小型系统多采用 *perturb and observe* (扰动观察法) 或 *incremental conductance* (增量电导法),以简单易实现为优势;大型电站则倾向于采用智能算法,通过融合模糊控制、神经网络等技术,提升跟踪速度与精度,降低在动态环境下的震荡损耗。通过精准的最大功率点跟踪,可显著提升光伏系统在不同环境条件下的能量转换效率,充分挖掘组件的发电潜力。

3.1.2 无功功率补偿与电压调节

无功功率补偿与电压调节是保障光伏电站并网稳定性关键技术,旨在平衡系统无功需求、维持电压稳定,避免因电压波动影响设备寿命或并网质量。无功功率的产生主要源于光伏逆变器、变压器及输电线路的感性负载,若不及时补偿,会导致功率因数降低、线路损耗增加,甚至引发电压跌落。补偿策略需根据电站规模与电网特性制定:分布式电站多采用就地补偿方式,在逆变器侧或交流配电柜内配置电容补偿装置,实时响应负荷变化;大型地面电站则可结合静止无功发生器 (SVG) 或同步调相机,实现动态无功调节,快速抑制电压波动。电压调节方面,通过协调逆变器的无功输出能力与变压器分接头调节,实现电压在允许范围内波动。同时,利用智能监控系统实时监测电网电压与功率因数,动态调整补偿容量,确保系统在不同工况下均能满足并网标准,提升运行稳定性与能源利用效率。

3.2 系统控制策略优化

3.2.1 智能监控与故障诊断系统

智能监控与故障诊断系统是提升光伏电站运维效率的核心支撑,通过整合传感器网络、数据传输与分析平台,实现对电站运行状态的全方位感知与动态管理。系统部署覆盖光伏阵列、逆变器、汇流箱等关键设备,实时采集电压、电流、温度、光照等参数,经边缘计算节点初步处理后上传至云端平台。诊断环节融合规则推理与智能算法,基于设备历史运行数据构建故障特征库,

通过对实时数据与正常阈值，快速识别组件老化、线路虚接、逆变器异常等故障类型，并定位具体位置。同时，系统具备趋势预测功能，通过分析参数变化规律，提前预警潜在故障风险，如组件热斑蔓延、电缆绝缘下降等。运维人员可通过可视化界面接收告警信息与处理建议，实现故障从被动抢修向主动预防的转变，大幅缩短停机时间，降低维护成本。

3.2.2 协同控制策略

协同控制策略旨在通过协调光伏系统各环节设备的运行状态，实现整体性能最优，避免局部优化导致的系统失衡。其核心是建立“源-储-荷-网”多环节联动机制：光伏阵列层面，根据光照分布动态调整组串工作模式，平衡各支路出力；储能系统与光伏出力联动，在光照波动时快速充放电，平抑功率波动；负荷侧则通过需求响应机制，引导可控负荷（如水泵、空调）在发电高峰时段运行，提高自用率。控制逻辑依托分布式决策算法，各设备节点在遵循全局目标的前提下自主调节，减少集中控制的通信延迟与算力压力。例如，逆变器与储能变流器协同工作，实时交换功率指令，在电网电压波动时协调无功输出；调度中心根据天气预报与电网调度要求，提前优化次日发电计划，指导储能充放电策略。通过多维度协同，系统能在保证并网稳定性的同时，最大化利用光伏资源，提升抗干扰能力与运行经济性。

3.3 经济性优化

3.3.1 成本分析与控制

成本分析与控制需覆盖光伏电站从规划到退役的全生命周期，通过精细化管理实现各阶段成本最优。前期规划阶段，需结合资源评估与电网接入条件，避免盲目追求规模导致的投资浪费，同时优化选址以减少土地相关费用。设备采购环节，应建立综合评估体系，平衡初始采购成本与长期运维费用，优先选择可靠性高、运维便捷的设备，降低后期故障更换频率。施工阶段，通过模块化设计与标准化施工流程提高效率，减少因工序衔接不畅导致的工期延误成本；同时加强材料管理，避免浪费与损耗。运维阶段，构建基于状态监测的预防性维护体系，根据设备实际运行状态制定维护计划，替代传统的定期维护，减少不必要的工时与备件消耗。此外，

需关注全生命周期的资金成本，合理安排融资方案，降低财务费用，通过全链条成本管控实现项目经济性提升。

3.3.2 收益最大化策略

收益最大化需通过多维度策略组合，实现发电量、电价与附加价值的协同提升。在发电效率方面，除优化硬件布局外，可通过组件清洗周期动态调整、植被遮挡实时清理等精细化管理措施，减少非技术因素导致的发电量损失，确保电站输出能力稳定。电价利用方面，需深入研究分时电价政策，在电价高峰时段通过储能系统释放电量，提高售电收益；对于具备调峰能力的电站，可参与电网辅助服务市场，通过快速响应负荷变化获取调峰补贴。分布式电站应强化与用户侧的协同，通过需求侧管理引导用电负荷与光伏发电时段匹配，提高自发自用比例。此外，可挖掘光伏电站的附加价值，如结合生态修复打造光伏旅游项目，或利用电站闲置空间开展科普教育，形成“发电+”的多元化收益模式，提升项目整体盈利能力^[3]。

结束语

综上所述，电气工程及其自动化技术为光伏电站的设计与优化提供了全方位支撑。从组件选型、系统搭建到运行调控，学科技术的融合应用实现了电站高效、稳定、经济运行。通过多维度优化策略，既提升了电气性能与控制精度，又平衡了成本与收益。未来，需进一步深化智能算法与新能源技术的结合，推动光伏电站向更智能、更协同的方向发展，为能源转型与可持续发展提供更强助力，彰显电气工程自动化在新能源领域的关键价值。

参考文献

- [1] 张凯, 胡志刚. 基于光伏电站运行数据的发电量预测方法研究[J]. 电力工程技术学报, 2020, 39(6): 1907-1917.
- [2] 陈冬青, 黄博, 刘红卫等. 基于光伏电站的功率最大点追踪及梯级控制方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 43(10): 207-215.
- [3] 杨博. 基于改进遗传算法的光伏发电系统功率预测及控制技术分析[J]. 电脑编程技巧与维护, 2021, (09): 246-248.