

分布式光伏电站关键设备的可靠性评估与优化设计

熊磊 陈仲国 张利忠 余华颖 肖凌超

浙江芯能光伏科技股份有限公司, 浙江省海宁市, 314000;

摘要: 随着全球能源结构转型, 分布式光伏电站作为一种清洁、可持续的能源形式, 得到了广泛应用。其关键设备的可靠性直接影响电站的发电效率和经济效益。光伏组件、逆变器、汇流箱、变压器和监控系统是电站的核心设备, 各自的性能与稳定性决定了电站的整体运行效果。通过故障模式与影响分析(FMEA)、可靠性预测模型和加速老化测试等方法, 可以全面评估设备的可靠性, 为优化设计和提高系统稳定性提供依据。设备选型、冗余设计、智能运维系统和环境适应性设计是提升光伏电站可靠性的关键策略。通过综合运用这些优化手段, 可有效提高设备寿命、减少故障率, 从而实现光伏电站的高效、安全运营。

关键词: 分布式光伏电站; 关键设备; 可靠性评估; 优化设计

DOI: 10.69979/3029-2727.24.05.040

引言

分布式光伏电站主要由太阳能电池板、逆变器、汇流箱、变压器和监控系统等组成。这些核心设备的效能、安全性和可靠性直接关系到电站的整体性能和运维成本。因此, 对这些关键设备进行科学的可靠性评估, 并据此优化设计, 对于提升电站的整体效能至关重要。

1 分布式光伏电站关键设备概述

1.1 光伏组件

光伏组件作为分布式光伏电站的核心发电单元, 通过半导体材料的光电效应将太阳能直接转换为电能, 其性能直接决定整个电站的发电效率和经济效益。光伏组件的转换效率是衡量性能的关键指标, 目前市面上主流的单晶硅光伏组件转换效率已达到 20% 以上, 而高效组件更可达 23% 以上, 在耐候性方面, 光伏组件需要在全天候环境下持续工作, 承受温度循环、湿热、紫外辐射等多重环境应力, 组件的封装材料、钢化玻璃、背板等均需具备优异的耐候性能和机械强度。随着使用时间推移产生的效率衰减是不可避免的, 行业标准要求组件的年衰减率控制在 0.5%–0.7% 以内, 质保期 25 年后的输出功率需保持在初始功率的 80% 以上^[1]。

1.2 逆变器

逆变器在光伏发电系统中集成了直流升压、逆变控制、并网同步、最大功率点跟踪等多项关键功能, 现代光伏逆变器的转换效率普遍可达 98% 以上, 在部分负载

运行时仍能保持较高效率水平。逆变器的稳定性体现在电压控制精度、谐波含量、功率因数等多个技术指标上, 优质逆变器可实现电压波动率小于 1%、总谐波失真率低于 3% 的优异性能, 在电网扰动或故障情况下, 逆变器具备低电压穿越、孤岛效应防护、过压过流保护等完善的保护功能。为适应智能电网发展需求, 现代逆变器还集成了无功功率补偿、电网支撑等高级功能, 可根据电网运行状态动态调节输出特性。

1.3 汇流箱与变压器

汇流箱通过集中采集多路光伏组串的输出电流, 实现并联汇流和故障监测, 内部配置的防反二极管、断路器和防雷器等保护元件为系统安全运行提供多重保障, 现代智能汇流箱还整合了电流监测、通讯管理等功能模块, 可实时采集各路组串电流数据。在变压器方面, 光伏电站普遍采用干式变压器或油浸式变压器, 通过调节变压比将逆变器输出电压升高至电网电压等级, 变压器的损耗特性、过载能力和绝缘性能是设备选型时需重点考虑的因素。设备布置上需考虑通风散热和检修空间要求, 合理规划安装位置和走线路径, 确保设备安全可靠运行。

1.4 监控系统

监控系统通过分层分布式架构实现设备状态监测、数据采集存储、故障诊断分析等综合功能, 系统通过各类传感器和通讯接口, 实时采集光伏组件温度、辐照度、逆变器运行参数、环境气象数据等多维信息。在数据分

析方面,监控系统运用大数据分析技术,对采集的运行数据进行深度挖掘,建立设备健康评估模型,实现故障预警和诊断,系统的可视化平台提供丰富的数据展示和分析工具,包括发电量统计、设备效率分析、故障告警管理等功能模块。随着物联网技术发展,监控系统逐步引入人工智能算法,提升故障诊断准确性和预测性维护能力。

2 关键设备可靠性评估方法

2.1 故障模式与影响分析(FMEA)

故障模式与影响分析作为系统可靠性工程中的重要方法,在光伏电站关键设备的可靠性评估中发挥着核心作用。通过系统化的分析方法,FMEA可全面识别设备在运行过程中可能出现的各类故障模式,包括功能性故障、性能衰退和潜在安全隐患等。在分析过程中,需针对每种故障模式评估其发生频率、严重程度和检测难度三个维度,通过风险优先数(RPN)量化各类故障的风险等级,为后续优化设计提供决策依据。针对光伏组件,常见的故障模式包括热斑效应、功率衰减、封装材料老化等,而逆变器则需重点关注 IGBT 失效、控制系统异常、散热系统故障等问题;在汇流箱和变压器方面,接触不良、绝缘老化、散热不足等故障模式均需纳入分析范围^[2]。通过建立故障树和可靠性框图,可深入分析各故障模式之间的关联性及其传播路径,识别系统中的薄弱环节和关键故障点。基于 FMEA 分析结果,可有针对性地制定预防措施和改进方案,如优化产品设计、加强质量控制、完善检测手段等,从而提升设备的整体可靠性水平。在实际应用中,FMEA 需要持续更新和完善,结合现场运行经验和新出现的故障类型,不断优化分析模型和评估方法。

2.2 可靠性预测模型

可靠性预测模型通过对历史运行数据的统计分析,结合先进的数学模型和机器学习算法,实现对设备未来可靠性的科学预测。在数据采集阶段,需全面收集设备的运行参数、环境条件、故障记录等多维数据,并对数据进行清洗、标注和特征提取,建立规范化的数据分析流程。传统的可靠性预测方法多基于威布尔分布、指数分布等概率模型,通过拟合设备的寿命分布特征,预测故障发生概率和剩余使用寿命,而随着人工智能技术的发展,基于深度学习的预测模型展现出更强的数据挖掘

能力和预测精度。在模型构建过程中,需充分考虑设备的工作特性和环境因素,如光伏组件受温度循环、湿度变化的影响,逆变器受负载波动、电网扰动的影响等,通过多因素耦合分析提升模型的预测准确性。预测模型的输出结果包括故障概率曲线、可靠度函数、平均失效时间等关键指标,为制定预防性维护策略和更换计划提供重要参考。通过持续积累运行数据和优化算法模型,预测系统的性能将不断提升,实现对设备可靠性的精准评估和预测。

2.3 加速老化测试

加速老化测试通过施加高于正常使用条件的应力,在较短时间内模拟设备的长期老化过程,是评估产品可靠性的重要实验手段。在测试方案设计时,需根据设备的失效机理和使用环境,合理选择加速应力因子,常用的应力类型包括温度循环、湿热交变、机械振动、电气冲击等,并通过加速模型确定应力水平和试验时间。针对光伏组件,IEC 标准规定了一系列加速老化测试项目,如温度循环试验、湿热试验、PID 试验等,通过这些标准化测试评估组件的长期可靠性;对于逆变器和其他电气设备,高温老化、温度冲击、电应力等加速试验可有效验证其耐久性能^[3]。在试验过程中,需通过在线监测和定期检测掌握样品的性能变化趋势,并结合加速模型将试验结果外推至实际使用条件下的寿命预测。加速老化试验不仅适用于新产品的可靠性验证,也可用于优化设计方案的效果评估,通过对比试验结果识别改进措施的有效性。在试验数据分析中,需考虑加速因子的有效性和试验条件的代表性,确保测试结果能够真实反映产品在实际使用中的可靠性表现。

下图 1 为该章节思维导图。

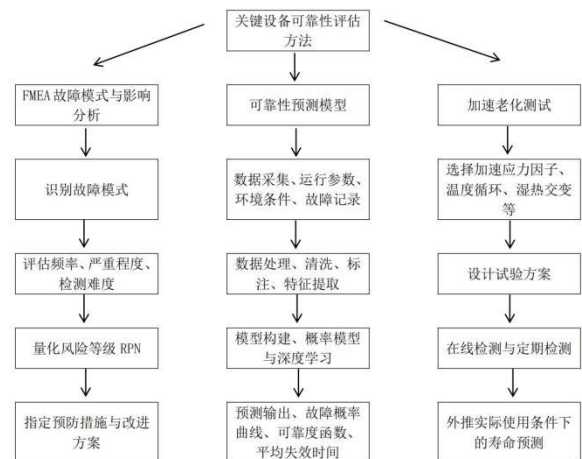


图 1: 分布式光伏电站关键设备的可靠性评估方法

3 优化设计策略

3.1 设备选型与优化配置

设备选型是影响光伏电站整体性能的关键环节,需综合考虑设备的技术参数、可靠性指标、经济性和供应链保障等多个方面。在光伏组件选型时,应重点关注组件的转换效率、温度系数、衰减率等核心参数,优先选用具备可靠产品认证和良好市场业绩的品牌产品,同时考虑组件的尺寸规格与安装条件的匹配性。逆变器选型需要根据电站规模和并网要求,合理确定单机容量和并网方案,优质逆变器应具备高转换效率、宽电压范围、强环境适应性等特点,并配备完善的保护功能和通讯接口。在设备布局优化方面,需充分考虑场地条件和气候特征,合理规划组件倾角和方位角,优化组串配置方案,降低遮挡和不匹配损失;通过电缆截面优化和线路布局合理化,可有效降低系统的传输损耗。汇流箱和变压器的配置应遵循就近原则,合理划分供电区域,降低线损并确保检修便利性。通过系统仿真分析和经济性评估,可对不同配置方案进行对比优化,选择最优的设备组合和系统配置方案。在设备选型过程中,还需重视设备间的兼容性和可扩展性,为系统后期升级预留空间。

3.2 冗余设计

冗余设计作为提升系统可靠性的重要手段,在光伏电站的关键设备和系统节点得到广泛应用。通过合理配置冗余资源,可在单一设备发生故障时维持系统的基本功能,有效降低故障对发电量的影响。在逆变器系统中,采用双机并联或 $N+1$ 冗余配置,可实现故障自动切换和负载分担,提高系统的可用性和维护便利性;通过配置备用通讯链路和监控单元,可确保数据采集和控制系统的持续可靠运行^[4]。针对直流侧设备,可采用多路并联的汇流方案,在部分支路发生故障时仍能保持其他支路正常工作。在供电系统设计中,关键负载通常采用双路供电方案,配置自动切换装置实现电源快速切换。监控系统的数据存储采用多级备份机制,通过本地存储和云端备份相结合,确保数据安全性。在冗余方案设计时,需权衡系统可靠性提升与投资成本增加之间的关系,通过可靠性分析和经济性评估确定合理的冗余配置方案。冗余设计还需考虑设备检修和更换的便利性,确保在维护过程中不影响系统正常运行。

3.3 智能运维系统

智能运维系统通过整合物联网、大数据和人工智能技术,实现光伏电站全生命周期的智能化管理和优化运营。系统架构采用分层设计,包括数据采集层、通讯传输层、平台处理层和应用服务层,各层级通过标准化接口实现数据交互和功能协同。在数据采集方面,通过部署智能传感器网络,实现对设备运行状态、环境参数和电能质量的全面监测,采集数据经过边缘计算节点预处理后上传至云平台。基于机器学习算法,系统能够建立设备健康评估模型,通过分析历史数据和实时数据,及时发现异常工况和潜在故障。智能诊断引擎结合专家知识库,可快速定位故障原因并给出处理建议,实现故障的预测性维护。在运维调度方面,系统根据天气预报、电价政策和设备状态,自动生成优化的运维计划和发电策略,通过移动应用实现工单智能派发和现场作业指导。系统的可视化平台提供丰富的数据分析工具和决策支持功能,包括发电性能评估、设备健康管理、经济效益分析等,为运维管理提供全方位的数据支撑。

3.4 环境适应性设计

环境适应性设计是确保光伏电站在复杂气候条件下稳定运行的重要保障,需针对不同地区的环境特征,采取有针对性的防护措施和优化设计。在沿海地区,设备需具备良好的防盐雾性能,通过选用耐腐蚀材料、加强表面防护处理和密封设计,延长设备使用寿命;对于多尘地区,需重点考虑防尘设计,采用高防护等级的外壳,配置防尘过滤装置,并优化设备的散热结构。在雷电频发地区,应建立完善的防雷接地系统,包括直击雷防护和感应雷防护,通过合理布置避雷针和等电位连接,保护设备免受雷击损害。高原地区面临低气压、强紫外线等特殊环境因素,设备设计需考虑降额使用和加强散热,并采用抗 UV 材料提高耐候性。针对高温、严寒等极端气候条件,需通过热设计优化和材料选型,确保设备在全温度范围内可靠运行^[5]。在防护设计中,还需综合考虑防水、防冰雪、防风沙等要求,通过结构优化和材料创新,提升设备的环境适应能力。通过环境模拟试验和现场验证,可评估设计方案的有效性,并持续改进优化设计方案。

图 2 为该章节思维导图。

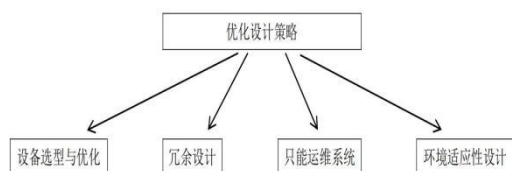


图 2：分布式光伏电站优化设计策略

4 结论

光伏电站的高效可靠运行依赖于关键设备的稳定性和长期耐用性，故障模式与影响分析（FMEA）、可靠性预测模型等评估方法为设备优化提供了科学依据。通过综合考虑设备选型、冗余设计、智能运维系统以及环境适应性等方面的因素，可以有效提升光伏电站的整体可靠性，减少停机时间，提高能源转换效率。特别是冗余设计和智能运维系统的引入，使得设备故障的预测性维护成为可能，减少了人为操作和环境变化对设备运行的影响。与此同时，环境适应性设计对于确保电站在各种气候条件下的稳定运行至关重要。对光伏电站关键设备进行可靠性评估与优化设计，能够实现设备性能的最大化，促进清洁能源的广泛应用，推动能源产业的可持续发展。

参考文献

- [1] 杜胜南. 计及通信可靠性影响的分布式光伏集群功率预测方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2022(3): 36-37.
 - [2] 张波, 高远, 李铁成, 等. 考虑光伏电源可靠性的新能源配电网数据驱动无功电压优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(15): 153-154.
 - [3] 郝旭芃. 分布式光伏发电系统优化设计研究[J]. 2024(8): 74-75.
 - [4] 赵路. 试析分布式光伏电站发电效率的提升[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2024(2): 26-27.
 - [5] 田逊逸, 王欣媛. 微电网中的分布式光伏发电技术分析[J]. 模型世界, 2023(8): 88-90.
- 熊磊, 男, 汉族, 1983 年 08 月出生, 本科学历(2006 年 7 月毕业于湖北民族学院), 湖北省宜昌人, 工程师职称, 浙江芯能光伏科技股份有限公司总经理助理兼电站事业部副总经理, 主要从事光伏电站运营与技术开发工作。