

光伏电站智能运维关键技术及日常效能提升方法探析

来文雅

(国家能源集团国源电力有限公司内蒙古分公司, 内蒙古 呼和浩特 010000)

摘 要 光伏电站传统运维模式效率低、成本高, 难以满足光伏电站发展需求。本文探讨利用智能运维技术提升光伏电站运行效能与经济效益的方法, 聚焦物联网数据采集、智能诊断分析和性能预测预警等关键技术体系, 并结合组件清洁管理、实时数据优化及性能比监控等日常实践方法, 系统阐述智能化运维的实施路径。实践表明, 智能运维能有效提升发电量、降低运维成本、保障电站安全稳定运行, 是光伏电站实现精细化管理和效能优化的必然选择。

关键词 光伏电站; 智能运维; 故障诊断; 效能提升; 性能比

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.026

0 引言

在能源结构绿色低碳转型的全球共识下, 作为清洁能源主力军的光伏发电装机容量持续快速增长, 而随着光伏电站建设规模不断扩大与运行年限增加, 运营维护环节对全生命周期发电效益与投资回报的重要性日益凸显。传统运维模式主要依赖人工定期巡检与被动式故障处理, 这种面对分布广泛、设备数量庞大的光伏电站的方式显露出诸多局限性, 如人工巡检效率低下、成本高昂, 难以做到全面覆盖与实时监控, 对热斑、组串失配等隐性故障发现严重滞后, 故障响应缓慢致停机时间延长、发电量损失显著, 且缺乏数据支撑的预防性维护手段使设备潜在风险无法提前预警, 可能引发更严重的运行安全事故。这些挑战共同制约着光伏电站运行效率与经济效益的提升, 行业迫切需要更智能化、精细化的运维管理新范式。通过融合先进传感、数据分析和人工智能等手段为实现电站降本增效与安全稳定运行提供根本性解决方案的智能运维技术应运而生。

1 光伏智能运维的核心技术体系

1.1 基于物联网的全面数据采集技术

光伏电站智能运维的实体基础是构建一个全方位、立体化的物联网感知层, 其核心任务是将电站物理实体转化为可被持续测量的数据流。这一过程远非简单的数据电子化, 而是通过部署在电站关键节点上的智能传感器网络来实现。在直流侧, 组串式逆变器的每

一条输入支路都集成有高精度电流电压传感器, 实时捕捉每串组件的发电特性, 其采样精度可达毫安级与毫伏级, 能够敏锐识别出因单个组件性能衰减或阴影遮挡导致的微弱电流失配。在交流侧, 逆变器本身作为核心数据采集单元, 持续监测三相交流输出电压、电流、频率、功率因数以及实时发电功率, 同时内部传感器记录 IGBT 模块温度、散热风扇转速、直流绝缘电阻等关键健康指标。环境监测站则构成了分析的基准坐标系, 其测量的水平面总辐照度、组件斜面辐照度、环境温度、风速风向、组件背板温度等参数, 为后续判断电站发电性能是否正常提供了客观气象依据。

1.2 智能数据分析与故障诊断技术

获取海量数据后, 智能运维的核心竞争力体现在利用先进算法模型从数据中提炼出运维决策知识的能力。数据分析与诊断是一个分层递进的多阶段智能处理过程。基础层级是基于预设规则的实时告警, 系统为各类运行参数设定了动态或静态的安全阈值, 一旦监测数据越限即刻触发告警。例如: 监测到某汇流箱支路电流持续为零且电压异常, 则可自动判断为该支路存在断路故障, 并直接定位到具体物理位置, 指导运维人员精准前往处理。更深层次智能诊断则依赖于大数据挖掘与机器学习算法构建的异常检测模型。系统并非孤立地看待单个数据点, 而是将实时发电数据与基于物理机理和实时气象数据计算得到的理论发电功率曲线进行分钟级甚至秒级的持续比对, 当发现特定组串或逆变器的实际输出功率出现系统性、超出

测量误差范围的持续偏低时，算法会自动标记该发电单元为“低效单元”，并启动根因分析。

1.3 电站运行性能的预测与预警模型

智能运维的最高价值体现于其前瞻性，即利用数据模型预测未来趋势，实现从被动响应到主动优化的运维模式变革。这主要依托于两类核心模型，发电量预测模型和设备故障预测与健康管理模型。高精度的短期发电量预测模型是电站参与电网调度和电力市场交易的智能化基石。该模型深度融合历史功率数据、电站设备运行状态以及高分辨率的数值天气预报信息，天气预报输入包括未来逐小时的辐照度、云量、气温、湿度、风速等详尽参数。模型通常采用机器学习算法如梯度提升决策树或长短期记忆网络，通过训练学习历史气象条件与实际发电量之间的复杂非线性映射关系，进而对未来数小时至数天的发电功率进行滚动预测^[1]。预测结果的不确定性也被量化评估，为电站运营者参与竞价上网、制定交易策略提供关键决策支持，有效降低了电力偏差考核风险，提升了电站的市场收益。设备故障预测与健康管理模型则聚焦电站核心资产的全生命周期可靠性管理。

2 光伏电站日常运维中的效能提升方法

2.1 组件清洁度的智能化管理

组件表面灰尘遮蔽是导致光伏电站发电量损失最普遍且最易被忽视的因素之一，其影响远非简单的发电功率线性下降，严重时因局部遮挡形成热斑甚至可能引发组件永久性损伤。传统固定周期或凭经验判断的清洗模式存在巨大盲目性，可能在不必要的清洁上浪费水资源和人力成本，或在积灰严重时未能及时清洗造成显著发电收益损失。智能运维下的清洁管理核心在于构建一种“数据驱动、按需清洗”的科学决策机制。该机制依赖于对历史发电数据的深度挖掘，系统会持续分析特定方阵在相同气象条件（主要是相近辐照度与温度）下的实际输出功率与理论清洁状态下功率的比值变化趋势，当该比值呈现持续且不可逆的缓慢下降时，即可判定为灰尘积累效应开始显现。更为直观的方法是结合无人机定期巡航采集的高清可见光图像，利用图像识别算法定量分析组件表面的灰尘覆盖面积与灰度等级，从而生成整个电站的“积灰分布热力图”，清晰标识出积灰严重区域与轻微区域。基于这些定量分析结果，运维团队可以做出精准决策：一是选择最佳的清洗时机，即在预估的清洗成本与因积灰导致的发电量损失达到经济平衡点时启动清洗作

业。二是优化清洗资源配置，优先对积灰严重且对全局发电效率影响大的子阵进行清洗，对积灰轻微或近期有降雨预期的区域则可暂缓清洗。这种精细化管理模式在最大限度挽回发电损失的同时，也显著降低了运维过程中的水电消耗与人工成本，实现了电站经济效益与运营效率的双重提升。

2.2 基于实时数据的运行维护优化

智能运维平台的真正价值在于将数据洞察转化为现场运维人员可执行的、高效精准的行动指令，彻底改变传统运维工作中“大海捞针”式的盲目排查模式。当监控平台发出某一具体支路电流异常跌落或为零的告警时，系统会将该告警信息与电站数字化地图关联，精确定位到对应的组串、汇流箱乃至具体物理位置坐标，并通过移动应用程序直接将工单和导航信息推送到运维人员手持终端。工作人员无需在庞大电站内逐排检查，可直接奔赴故障点，排查重点明确集中于该支路的接线端子松动、熔断器熔断或电缆损伤等有限可能性，将平均故障处理时间从以往的数小时缩短至数十分钟，极大地提升了电网的可用性。日常运行优化还体现在对设备运行状态的精细调节上^[2]。运维人员可随时调阅任一逆变器的历史效率曲线，观察其在不同负载率下的转换效率分布。若发现某台逆变器长期运行在低负载率的低效区间，则可综合分析系统配置，判断是否存在优化空间，如调整逆变器容配比或通过策略性启停将负载集中在更少的高效运行的逆变器上。

2.3 系统性能比的关键指标监控与分析

系统性能比作为衡量光伏电站能量转换效率的核心综合性指标，其价值在于剥离了资源波动的影响，真实反映了电站本体从光能到电能转换过程的运行质量健康度。该指标的计算本质是对电站实际输出与在理想条件下理论可能输出的对比，其数值高低直接体现了设备状态、系统损耗以及运维水平的综合效果。在日常运维中，对系统性能比的监控不只是简单地记录一个每日数值，还需要对其进行持续的趋势跟踪、横向对比与深度归因分析。运维团队应绘制出电站月度乃至年度系统性能比的运行区间曲线，建立其正常波动的基准带。当发现系统性能比出现持续低于历史同期水平或呈现明显的单边下降趋势时，就意味着电站整体健康状况出现了需要关注的异常^[3]。此时，需要启动层层递进的诊断分析，首先分析是全场性能普遍下降还是局部区域恶化所致，通过对比不同子阵或逆变器下系统的性能比差异来定位问题范围。其次，深入分析导致系统性能比下降的主要损耗环节，是串

联电阻增大导致的线损增加，还是组件性能衰减加速，或是逆变器等设备效率下滑，抑或是灰尘遮挡、阴影等外部因素影响加剧。

3 智能运维实施的挑战与未来展望

3.1 当前面临的主要挑战

智能运维体系的全面落地应用面临着一系列深刻且相互关联的现实挑战，这些挑战根植于投资效益、技术整合与人力资源等核心层面。初始资本支出构成了首要壁垒，部署一套覆盖大型电站的智能运维系统不仅需要采购大量高精度传感器、自动巡检无人机及通信网络硬件，其隐性成本更体现在定制化数据中台的建设、具有核心算法的诊断模型授权费用以及后续的系统维护升级上，这对于许多已步入平稳运行期的存量电站而言，高昂的改造费用与难以在短期内明确量化的投资回报使其管理层在决策时趋于保守。在技术集成层面，数据孤岛与协议异构问题极为突出，一个电站内往往并存着多个不同厂商提供的逆变器、汇流箱、监控系统及环境监测设备，这些设备采用的通信协议千差万别，从 Modbus、CAN 到各类厂商私有协议，数据格式、采样频率与传输机制各不相同，导致全景数据采集在源头就遭遇梗阻，需要进行复杂的数据清洗、转换与对齐工作，这不仅增加了系统复杂性和实施成本，更可能因数据丢失或失真影响后续分析的准确性与可靠性^[4]。最为根本的挑战来自运维团队能力模型的转型困境，传统运维人员精通设备维护、故障处理等现场实操技能，而智能运维则要求他们具备数据思维，能够解读分析平台提供的趋势图表、理解算法诊断报告的逻辑、并将数据洞察转化为高效的现场行动，这种从“技工”到“数据分析师”的角色转变并非一蹴而就，现有人员培训体系的不完善以及复合型人才稀缺，极易导致先进运维系统与现场执行之间出现脱节，从而制约了整个系统效能的充分发挥。

3.2 技术发展趋势展望

面对当前挑战，智能运维技术正朝着更智能、更自主、更协同的方向迅猛发展，其发展路径清晰可见。故障诊断与预测能力将实现从“感知描述”到“认知决策”的质变，下一代诊断系统将深度融合深度学习与物理机理模型，通过对海量历史故障数据与运行工况的学习，不仅能够精准识别已知故障，更能从微小的数据异常中发现潜在的新型故障模式。预测性维护模型将进化到能够量化评估关键设备如逆变器、变压器的剩余使用寿命，并基于风险评估结果自动推荐最

优维护策略与调度方案，真正实现视情维修。巡检作业将迈向全面无人化与自适应智能化，集成于自动机场的无人机舰队可根据预设任务或系统指令，自主完成对电站的日常巡飞，其搭载的多光谱传感器与高分辨率相机能够同步采集可见光、红外及紫外图像，通过机载 AI 进行边缘计算实时初筛异常，并将结果回传。地面巡检机器人则将负责组件下方、箱变基础等无人机盲区的检查，形成立体化、高频次的无人巡检网络^[5]。超越电站边界，“光储荷”一体化智能能量管理将成为运维核心新职能，运维系统不再局限于保障发电设备安全，而是需要统筹管理光伏阵列、储能系统以及站内负荷，基于超短期功率预测、电网电价信号和储能 SOC 状态，动态优化运行策略，实现电站整体收益最大化，并具备参与电网调频、备用等辅助服务的能力。未来的光伏电站智能运维将成为一个具备自学习、自优化、自决策能力的综合性能源管理“大脑”，持续驱动光伏资产价值的提升。

4 结束语

本文系统阐述了以物联网、大数据分析和预测模型为核心的智能运维技术体系，详细探讨了其在组件清洁管理、实时运维优化和系统性能监控等方面的具体实践方法，客观分析了当前面临的挑战与未来发展趋势，为光伏电站运营者提供一套清晰可行的智能化转型路径。明确指出通过智能化手段能精准定位并高效处理故障、科学制定维护策略、深度挖掘发电潜力，实现运维成本显著降低与发电收益实质性提升，不仅对单个电站降本增效有直接指导意义，更从行业层面为推动光伏产业从粗放式规模扩张向精细化运营管理转变提供坚实的支撑，是保障光伏电站全生命周期安全、稳定、高效运行，推动清洁能源事业高质量发展的关键。

参考文献:

- [1] 施昊旻. 基于大数据的光伏电站智能运维技术研究[J]. 智能建筑与智慧城市, 2025(10):121-123.
- [2] 杜涵宇. 光伏电站智能运维管理系统设计与应用研究[J]. 电力设备管理, 2025(19):84-86.
- [3] 刘兴杰. 光伏电站中的智能运维平台控制架构设计与实现[J]. 集成电路应用, 2025,42(08):234-235.
- [4] 高翔. 基于物联网技术的分布式光伏电站智能运维系统[J]. 内蒙古科技与经济, 2025(12):157-160.
- [5] 田志杰, 唐耀斌, 马维琛, 等. 基于大数据分析的光伏电站故障预测与智能运维策略研究[J]. 电工技术, 2025(S1): 240-242,245.