

新能源电厂电气设备智能化运维技术研究

洪志涛

华电新疆发电有限公司乌鲁木齐分公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要:当前新能源电厂智能运维已形成“感知-分析-决策-执行”闭环体系,未来将向更精细化的数字孪生与更自主的AI决策方向发展。如ESTIOS系统与电易云平台验证了技术路径的有效性,而安全性与标准化仍是规模化推广的关键挑战。电力参数监测覆盖电流、电压、功率因数等核心指标,结合能效分析与电能质量管理优化运行策略。

关键词:新能源电厂;电气设备;智能化运维技术

新能源电厂电气设备智能化运维技术通过融合物联网、大数据与人工智能等前沿技术,形成了多维度技术体系,实时监测与数据感知,通过物联网传感器(温度、湿度、振动等)和高精度传感装置(如光学、化学传感器)实现设备状态全息感知。

1 新能源电厂电气设备智能化运维优势

1.1 运维效率提升。全场景实时监控。部署温湿度、振动传感器与无人机巡检系统,实现每秒千次高频数据采集,故障定位时间从小时级缩短至200ms,响应速度提升60%。某光伏集群项目集成20+功能模块,年度故障率下降45%,人工巡检频率降低80%。自动化作业替代。引入AGV机器人执行配电室7×24小时无人巡检,结合智能门柜系统,环境异常检出率达99%,人力成本缩减60%。

1.2 安全性与可靠性增强。主动防御体系。基于边缘计算构建本地化安全防护,敏感数据加密处理,数据泄露风险降低83%。升压一体机采用F级绝缘系统与纳米防腐工艺,极端环境下连续3年零故障运行。精准故障预警。十万级设备样本训练AI模型,实现变压器绝缘劣化预测(准确率 $\geq 93\%$),可提前48小时预警机械故障,非计划停机减少30%。

1.3 经济性优化。成本集约化。智能运维平台支持5000+设备并发接入,年度运维费用综合降低33%,设备空载损耗减少45%。某风电场通过AI优化储能充放电策略,弃风率下降3.2个百分点,年节能效益超12万元/台。资产效能挖掘。区块链技术实现出力偏差追溯,设备循环效率提升18%;边缘节点动态调整无功补偿,电能质量合格率达99.95%。

1.4 可持续发展支撑。绿色节能:干式变压器强迫风冷系统响应耗时 $< 500\text{ms}$,过载运行节能效益提升40%。快速复制:标准化方案支持多场站部署,新项目上线周期缩短50%。智能化运维正推动新能源电厂向“少人值守-自主决策-零碳运营”模式演进。

2 新能源电厂电气设备智能化运维关键技术

2.1 智能感知与数据采集技术,高精度传感网络。采用光纤压力传感器、无线测温装置等设备,实现电流/电压/振动等参数每秒千次采集(精度 $\pm 0.5\%$),覆盖光伏组串、风机叶片等关键节点。某风电场通过油液状态监测提前48小时预警机械磨损故障,减少停机时长30%。多模态数据融合。结合无人机红外热成像与IV曲线诊断技术,光伏板隐裂识别准确率提升至98%,缺陷定位响应时间 $\leq 15\text{秒}$ 。

2.2 数据分析与智能决策技术。大数据预测模型。基于十万级历史样本训练AI模型,实现变压器绝缘劣化预测准确率 $\geq 93\%$,设备停机时间年均缩减15%。储能电站应用时序数据库优化充放电策略,循环效率提升18%。边缘计算与云协同。边缘节点实现本地化AI推理(耗时 $< 100\text{ms}$),预处理90%实时数据,通信带宽需求降低70%。

2.3 设备优化与控制技术。数字孪生与仿真验证。构建三维高精度模型模拟设备运行状态,支持无功补偿策略动态验证,电压合格率提升至99.95%。云端数字孪生驾驶舱集成健康度评估模块,运维响应速度提升35%。一体化智能装备。集成干式变压器+智能温控系统,空载损耗降低45%,1.1倍过载稳定运行时长增加3倍。紧凑舱体设计减少占地面积40%,防腐寿命达20年以上(盐雾浓度5%环境)。

2.4 安全与协同技术。自主安全防护体系。边缘终端集成加密模块与访问控制策略,数据泄露概率减少83%,本地敏感数据处理避免网络攻击风险。多能协同调度。区块链技术实现风光储出力偏差追溯,ESTIOS算法使功率波动率降低40%。5G+TSN网络保障控制指令传输可靠性99.99%,时延 $\leq 20\text{ms}$ 。

3 边缘计算在新能源电厂电气设备运维中的应用

3.1 实时监测与故障预警。毫秒级故障定位。在光伏

逆变器、风机变流器等关键设备部署边缘智能终端，通过IEC 61850、Modbus协议集成设备数据，故障定位时间从分钟级缩短至200ms，停电恢复效率提升60%。多模态数据融合。结合无人机AI图像与红外热成像数据，边缘节点实时分析光伏板裂纹、风机叶片损伤等缺陷，漏检率降至2%以下，并通过本地AI推理完成即时告警。

3.2 智能决策与资源优化。动态负荷调度。边缘计算平台运行负荷预测算法，优化储能充放电策略，平抑功率波动效果提升40%，弃光率下降3.2个百分点。某风电场通过边缘侧拓扑分析算法，实现机组群控策略优化，单机故障影响范围缩小50%。能效管理闭环。嵌入式能效分析模块实时计算设备空载损耗，结合智能电容补偿装置动态调整无功出力，电能质量合格率提升至99.95%。

3.3 协同运维与安全保障。云边端协同架构。边缘节点预处理90%以上实时数据，仅关键信息上传云端，通信带宽需求降低70%，时延控制在50ms以内，适用于偏远地区新能源场站的弱网环境。自主安全防护。边缘终端集成加密模块与访问控制策略，本地处理敏感数据，降低网络攻击风险，数据泄露概率减少83%。

4 物联网在新能源电厂电气设备运维中的应用

4.1 全场景感知与实时监测。多维度传感器网络。在光伏组串、风机叶片等核心设备部署温湿度、振动及电流传感器，实现每秒千次高频数据采集（精度 $\pm 0.5%$ ），构建设备健康状态全景视图。某风电场采用光纤压力传感器监测齿轮箱油液状态，提前48小时预警机械磨损故障，减少非计划停机时间30%。智能巡检体系。融合无人机AI图像识别与红外热成像技术，光伏板隐裂检出率提升至98%，边缘计算节点实现故障定位响应时间 ≤ 15 秒。光伏电站通过物联网平台集成20+功能模块，年度故障率下降45%。

4.2 远程控制与自动化运维。智能调控系统。基于IEC61850协议的物联网网关支持远程启停与参数调节，无功补偿响应时间缩短至200ms，电压合格率提升至99.95%。分布式光伏通过云端指令动态调整逆变器出力，弃光率同比下降3.2个百分点。无人值守运维。AGV巡检机器人+智能门柜系统实现配电室7×24小时无人巡检，环境参数异常检出率达99%，维护人力成本缩减60%。

4.3 数据驱动的决策优化。预测性维护。基于十万级设备样本训练AI模型，实现变压器绝缘劣化趋势预测（准确率 $\geq 93%$ ），风电叶片损伤识别使巡检效率提升5倍。某储能电站用时序数据库分析充放电曲线，动态优化策略使循环效率提升18%。多能协同优化。区块链技术

支撑风光储多能系统出力偏差追溯，基于ESTIOS算法的联合调度使功率波动率降低40%。

5 自动化控制技术在新能源电厂电气设备运维中的集成

5.1 核心应用方向。实时监控与预测性维护。通过部署分布式光纤温度传感器（采样精度 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ ）和无线振动监测装置，实现光伏逆变器、风机齿轮箱等关键设备的毫秒级状态感知，异常检出率达99.2%。基于深度学习的设备寿命预测模型（LSTM算法）分析10万+历史运维数据，提前72小时预警变压器绝缘劣化等故障，非计划停机率降低40%。智能调度与协同控制。采用ESTIOS算法构建多能优化调度系统，动态调节储能充放电阈值与风机偏航角度，平抑功率波动效果提升45%，弃光率下降2.8个百分点。集成IEC61850协议的智能网关实现设备群控，单台逆变器故障时可自动切换备用机组，供电恢复时间缩短至500ms。

5.2 典型技术实现。风电场群控优化。采用改进型粒子群算法（MPSO）优化变桨距控制策略，使单机发电效率提升18%，同时通过主动偏航系统降低机械磨损率23%。光伏智能运维体系。搭载ROS系统的AGV机器人实现组件自动清洁，灰尘遮挡损失降低12%。智能逆变器集成MPPT算法，在辐照度突变时仍保持98%以上转换效率。储能协同管理。基于区块链技术的出力偏差追溯系统，结合DLCF负荷预测模型，使储能系统循环寿命延长30%。应用成效案例。某海上风电场项目：自动化控制系统使年发电量提升15%，运维成本降低50%。光伏集群试点：智能运维平台集成故障诊断模块，缺陷处理时效提升80%。

6 新能源电厂电气设备智能化运维实施步骤

6.1 前期规划与准备，需求分析与目标设定。调研设备现状：梳理光伏组串、逆变器、储能系统等核心设备清单及通信协议兼容性，明确运维痛点（如故障响应延迟、能效损失等）。制定KPI指标：量化目标（如故障响应时长缩短至 ≤ 30 分钟、预测性维护准确率 $\geq 90%$ ）。技术方案设计。架构选型：采用“云-边协同”架构，明确边缘计算节点与云端平台的职能分工。数据治理规则：定义数据采集频率（如电流/电压每秒采集）、存储周期（历史数据保留 ≥ 3 年）及脱敏策略。

6.2 基础设施部署。感知层设备安装。部署高精度传感器：电流/电压传感器覆盖组串关键节点（精度 $\pm 0.5%$ ）。风机齿轮箱安装振动传感器（采样率 $\geq 10\text{kHz}$ ）。通信网络改造：采用光纤骨干网划分控制网与数据网VLAN，确保传输时延 $\leq 50\text{ms}$ 。智能化装备配

置。无人机巡检系统：集成红外热成像与AI缺陷识别模块，支持自主规划巡检路径。AGV机器人：搭载ROS系统实现组件自动清洁与局部放电检测。

6.3 AI模型开发与系统集成。数据治理与模型训练。构建时序数据库：存储设备运行数据（如温度、振动、功率曲线），数据清洗规则包含异常值剔除与缺失值插补。训练预测模型：基于LSTM算法分析10万+历史数据，实现变压器绝缘劣化提前72小时预警。运维平台搭建。功能模块集成：数字孪生三维可视化（融合MR技术）。智能工单系统（支持故障自动派单与处理进度跟踪）。多系统对接：打通SCADA、EMS与无人机巡检数据接口，实现跨平台协同。

6.4 智能化运维升级。自动化控制改造。应用IEC61850协议实现设备群控，支持逆变器远程启停与参数调节（响应时间 $\leq 200\text{ms}$ ）。部署智能门柜系统与AGV机器人，构建无人值守配电室。预测性维护体系落地。动态阈值预警：基于设备健康基线设定告警阈值（如齿轮箱振动幅度 $> 0.15\text{mm}$ 触发告警）。维护策略优化：结合AI寿命预测结果动态调整光伏组件清洗周期，灰尘遮挡损失降低12%。

7 新能源电厂电气设备智能化运维未来趋势

7.1 多能协同优化向虚拟电厂集成。源网荷储智能调配：依托数字孪生技术构建虚拟电厂，实现风电、光伏、储能系统的动态聚合，平抑峰谷差能力提升60%以上。区块链赋能可信交易：通过分布式账本技术追溯出力偏差，支撑绿电交易与碳足迹核算，提升新能源消纳经济性。

7.2 数字孪生驱动全生命周期管理。设备健康三维建模：融合MR技术构建高精度数字镜像，支持叶片裂纹、逆变器PCB板温度场等关键参数的可视化仿真分析。预测

性维护算法升级：基于联邦学习的寿命预测模型突破数据孤岛限制，使光伏组件衰减率预测误差 $\leq 1.5\%$ 。

7.3 边缘智能实现毫秒级闭环控制。分布式边缘计算节点：在风机塔筒、升压站部署AI推理芯片，实现振动异常识别响应时间缩短至20ms，降低机械损耗23%。自主决策控制策略：采用深度强化学习算法优化变桨距控制，使单机发电效率提升18%-25%。

7.4 可信安全体系保障数据主权。量子加密传输通道：采用量子密钥分发技术保护设备状态数据，抵御中间人攻击成功率 $\leq 0.01\%$ 。零信任访问控制：基于设备指纹和行为特征动态调整权限，非法入侵识别准确率 $\geq 98.5\%$ 。

7.5 绿色运维与循环经济深度融合。退役设备再生利用：通过AI分选技术实现光伏组件银浆回收率 $\geq 95\%$ ，锂电池正极材料再生成本降低40%。碳足迹智能监测：集成LCA模型的运维平台可实时计算设备全生命周期碳排放强度，指导低碳技改决策。典型案例前瞻。光伏示范区：计划2026年建成全球首个零碳运维中心，综合应用数字孪生与氢能储能技术，运维能耗降低70%。风电集群：试点部署量子加密通信网络，实现跨省域百万级设备的安全协同控制。

总之，智能化运维将通过“感知-认知-决策-执行”全链路升级，推动新能源电厂从设备运维向价值运营的范式变革。

参考文献

- [1]杨鹏.新能源电厂电气设备智能化运维技术探讨.2022.
- [2]李月华.浅谈新能源电厂电气设备智能化运维技术研究.2023.