

变电运维智能化关键技术研究及应用分析

崔国杰 董利国 周 华
国网哈密供电公司 新疆 哈密 839000

摘要: 在电力系统向智能化转型的背景下, 变电运维智能化成为提升电网运行稳定性与运维效率的核心方向。本文聚焦变电运维智能化领域, 系统研究其技术体系架构、关键技术及具体应用。构建了“感知-传输-处理-应用”分层递进的技术体系架构, 梳理了“数字化-网络化-智能化”的演进路径; 剖析了数据采集与传输、数据分析与处理、智能控制、通信四大关键技术的核心要点; 最后阐述各技术在设备监测、状态评估、自动化运维等场景的具体应用。研究表明, 变电运维智能化技术可提升设备运行可靠性、运维效率, 为电力系统从“定期检修”向“预测性维护”转型提供技术支撑。

关键词: 变电运维智能化; 关键技术; 具体应用

引言: 随着电力系统规模扩大与智能化需求提升, 传统变电运维模式面临效率低、响应慢、依赖人工经验等问题, 难以满足电网安全稳定运行要求。变电运维智能化作为解决上述问题的核心路径, 通过融合传感器、大数据、人工智能等技术, 实现设备状态全面感知、故障精准诊断与运维自动执行。本文围绕变电运维智能化技术体系架构、关键技术及具体应用展开分析, 旨在为相关技术研发与工程实践提供参考, 助力电力运维模式升级。

1 变电运维智能化技术体系架构与演进路径

1.1 变电运维智能化技术体系架构

变电运维智能化技术体系架构以“数据驱动、智能决策、协同高效”为核心, 呈现分层递进的结构特征。(1) 底层为感知层, 依托智能传感器、红外测温装置、局部放电监测设备等终端, 实现变电设备运行参数、环境状态的全面感知与数据采集, 为上层应用提供基础数据支撑。(2) 中间层为网络传输与数据处理层, 通过5G、工业以太网、边缘计算节点等技术, 构建低时延、高可靠的数据传输通道, 同时借助大数据清洗、特征提取、机器学习算法, 完成数据的预处理与价值挖掘, 转化为设备状态评估、故障预警等有效信息。(3) 顶层为应用层, 整合智能巡检、状态检修、远程控制、运维管理等功能模块, 形成一体化智能运维平台, 实现运维流程的自动化执行、智能化决策与全流程管控^[1]。

1.2 变电运维智能化技术演进路径

变电运维智能化技术演进围绕“数字化-网络化-智能化”的主线逐步推进。(1) 初期以数字化改造为核心, 完成传统运维设备的智能化替换, 实现运维数据的数字化采集与存储, 打破传统人工记录的局限, 奠定数据基础。

(2) 中期聚焦网络化融合, 搭建全域覆盖的通信网络与数据共享平台, 打通各系统间的数据壁垒, 实现设备、人员、管理系统的互联互通, 支持远程监控、协同运维等功能, 提升运维效率与响应速度。(3) 后期迈向深度智能化, 通过人工智能、数字孪生等技术的深度应用, 实现设备故障的精准预测、运维方案的自主生成、异常状态的自动处置, 推动运维模式从“定期检修”向“状态检修”“预测性维护”转型。

2 变电运维智能化关键技术

2.1 数据采集与传输技术

数据采集与传输技术负责将变电设备运行状态与环境信息转化为可分析的数字信号, 并安全高效传输至处理系统, 为后续智能化应用奠定基础。(1) 高精度采集终端部署: 采用具备宽量程、高灵敏度的智能传感设备, 覆盖设备电气参数(电压、电流、功率)、物理状态(温度、振动、绝缘性能)及环境参数(温湿度、气体浓度、光照), 实现采集范围无死角, 确保数据覆盖的全面性与准确性。(2) 采集模式优化: 结合周期性采集与事件触发采集, 常规工况下按固定频率采集数据以保障连续性, 设备出现异常波动时自动切换为高频采集, 捕捉关键变化节点; 同时通过数据预处理机制, 对采集数据进行初步过滤、去重与格式统一, 减少无效数据占用资源。(3) 稳定传输通道构建: 采用有线传输(工业以太网、光纤)与无线传输(5G专网、LoRa)相结合的方式, 有线传输保障核心数据低时延、高可靠, 无线传输满足复杂环境下灵活部署需求; 建立传输冗余机制, 当主通道故障时自动切换备用通道, 避免数据传输中断。

2.2 数据分析与处理技术

数据分析与处理技术通过对采集数据的深度挖掘,

提取设备运行规律与故障特征，为运维决策提供科学依据，推动运维从“经验驱动”向“数据驱动”转型。(1) 数据预处理技术：运用数据清洗算法剔除异常值、补全缺失值，通过数据标准化消除不同设备、不同采集终端的数据格式差异；采用特征工程技术，从海量原始数据中提取与设备状态关联度高的特征参数，降低后续分析计算复杂度。(2) 状态评估模型构建：基于设备历史运行数据、运维记录与故障案例，结合机器学习算法构建设备健康状态评估模型，量化评估设备健康等级，精准识别设备潜在劣化趋势，提前发现隐性故障风险。(3) 故障诊断与预测：利用深度学习算法分析数据与故障的映射关系，实现故障类型自动识别与故障位置精准定位；通过时间序列预测模型，基于历史数据预测设备未来运行状态，为预测性维护提供时间窗口。

2.3 智能控制技术

智能控制技术基于数据分析结果实现对变电设备的自动调控与运维流程的自主执行，减少人工干预，提升运维效率与操作安全性。(1) 设备自适应控制：构建闭环控制体系，根据实时监测数据与状态评估结果，自动调节设备运行参数，使设备始终处于最优运行状态；当设备出现轻微异常时，自动触发校正指令，避免异常扩大。(2) 运维流程自动化：通过流程自动化技术(RPA)将运维任务标准化、自动化，无需人工手动操作即可完成全流程执行；建立任务优先级调度机制，根据设备重要性与故障紧急程度自动分配运维资源。(3) 安全操作管控：设置多级权限验证机制，关键控制指令需经过身份认证、操作审批双重校验方可执行；建立操作追溯体系，对所有控制指令的发起、执行过程全程记录，便于事后审计与责任追溯。

2.4 通信技术

通信技术构建起感知终端、处理系统、控制设备间的信息传输网络，保障数据与指令的实时、可靠交互，支撑整个运维系统的协同运行。(1) 通信网络架构设计：采用分层通信架构，底层为感知层与终端设备的短距离通信，中层为变电站内部的区域通信(工业以太网、环网)，上层为变电站与远程监控中心的广域通信，各层级通过标准化接口实现无缝衔接。(2) 通信协议标准化：采用符合电力行业规范的通信协议(如IEC61850、Modbus)，统一数据传输格式与交互规则，避免因协议不兼容导致的数据孤岛；针对关键数据传输，采用协议加密与校验机制，防止数据被篡改或窃取。(3) 网络可靠性保障：通过网络冗余设计(如双链路备份、多节点组网)，当单一通信链路或节点故障时，自动切换至备用

链路或节点，保障通信不中断；部署网络状态监测模块，实时监控通信带宽、时延、丢包率，发现异常及时预警并优化^[2]。

3 变电运维智能化关键技术的具体应用

3.1 数据采集与传输技术的应用

数据采集与传输技术其应用贯穿于变电设备运行监测的全流程，为后续数据分析与决策提供精准、实时的数据来源，主要体现在以下三方面：(1) 设备全状态数据采集应用：针对变电系统中的核心设备，如变压器、断路器、隔离开关等，通过部署高精度传感器，实现设备电气参数(电压、电流、功率因数)、物理状态(绕组温度、油位、机械振动、绝缘性能)的实时采集，同时覆盖设备周边环境参数(温湿度、SF₆气体浓度、烟雾浓度、光照强度)，构建设备“电气-物理-环境”多维度数据采集体系，全面掌握设备运行状态。(2) 采集数据实时预处理应用：在数据采集终端集成初步预处理功能，对采集到的原始数据进行实时过滤，剔除因传感器干扰、信号波动产生的异常值；对缺失数据采用插值算法进行补全，避免数据断链；同时将不同格式的数据统一转换为标准化格式，减少后续数据传输与处理的复杂度，确保上传数据的完整性与规范性。(3) 多场景数据传输应用：根据变电场景的通信需求差异，灵活选择传输方式。对于变电站内部近距离、高带宽的数据传输，采用工业以太网实现设备与本地监控系统的连接；对于偏远区域或移动监测设备(如巡检机器人)，通过5G专网或LoRa无线通信技术实现数据回传。

3.2 数据分析与处理技术的应用

数据分析与处理技术通过对采集数据的深度挖掘，实现设备状态评估、故障诊断与趋势预测，具体应用包括：(1) 设备健康状态量化评估应用：基于历史运行数据、设备出厂参数与运维记录，构建多维度健康评估模型。通过机器学习算法对实时采集的设备数据进行分析，将电压稳定性、温度波动幅度、振动频率等参数转化为可量化的健康指数，划分“正常-关注-预警-故障”四个健康等级，直观呈现设备运行状态，为运维人员提供清晰的设备健康状况参考。(2) 故障智能诊断与定位应用：利用深度学习算法(如卷积神经网络、长短期记忆网络)训练故障特征模型，将实时采集的数据与故障特征库进行比对，自动识别故障类型；同时结合设备各部件的关联数据，通过逻辑推理与数据溯源，精准定位故障发生的具体部位，减少人工排查的时间与难度，提高故障诊断效率。(3) 设备故障趋势预测应用：基于时间序列分析与预测算法，对设备历史运行数据进行拟合，建立故障

发展趋势模型。通过分析设备参数的变化规律,预测未来一段时间内设备可能出现的故障风险,并给出风险等级与预计发生时间,为运维人员制定预测性维护计划提供依据,避免突发故障导致的供电中断^[3]。

3.3 智能控制技术的具体应用

智能控制技术通过自动化执行与自适应调节,实现变电运维流程的高效运转与设备的安全稳定运行,其具体应用主要包括:(1)设备自动化操作控制应用:基于数据分析结果与预设控制逻辑,实现变电设备的远程自动操作。当设备健康指数低于预警阈值或出现轻微异常时,系统自动触发调节指令,如调整变压器分接开关以稳定电压、控制冷却系统启停以降低设备温度;对于常规运维操作,通过远程控制平台实现一键操作,无需人工现场干预,减少操作误差与人员安全风险。(2)运维流程自动化管理应用:借助流程自动化技术(RPA),将运维任务全流程标准化、自动化。系统根据设备健康状态与运维周期,自动生成巡检计划、检修任务与备品备件需求清单;通过任务分配算法,结合运维人员的技能特长与地理位置,自动派发任务并实时跟踪执行进度;任务完成后,自动生成运维报告并归档至数据库,实现运维流程“计划-执行-反馈-归档”的闭环管理。(3)设备运行自适应优化应用:构建设备运行优化模型,结合电网负荷变化、环境条件与设备性能参数,动态调整设备运行策略。例如,在电网负荷高峰期,自动优化变压器负载分配,避免单台设备过载;在高温环境下,提前启动冷却系统并调整运行功率,防止设备因高温导致性能下降;通过实时数据反馈与模型迭代,使设备始终处于能耗最低、效率最高的运行状态。

3.4 通信技术的应用

通信技术具体应用如下:(1)变电站内部协同通信应用:采用分层通信架构,实现变电站内部设备与系统的互联互通。底层感知设备(传感器、巡检机器人)通过短距离通信技术(ZigBee、蓝牙)与本地边缘计算节点连接,快速传输实时数据;边缘计算节点与变电站监控系统通过工业以太网进行高带宽数据交互,实现数据处

理结果与控制指令的实时传递;监控系统与站内运维终端通过无线局域网(Wi-Fi6)连接,方便运维人员现场查看数据与接收任务,构建站内“感知-处理-控制-人员”的协同通信网络。(2)跨区域远程调控通信应用:针对多变电站集群与远程调控中心的通信需求,采用5G专网或光纤广域网构建长距离通信链路。通过网络切片技术,为变电运维数据传输划分独立的通信信道,保障数据传输的安全性与低时延;利用SD-WAN技术实现多链路动态切换,当某一通信链路出现故障时,自动切换至备用链路,确保远程调控中心能实时获取各变电站的运行数据,并向变电站下发控制指令,实现跨区域变电设备的集中管控。(3)通信网络状态监控与优化应用:部署通信网络监测系统,实时采集通信链路的带宽利用率、传输时延、丢包率、信号强度等参数,通过数据分析识别网络拥堵、链路故障等异常情况,并及时触发预警;同时基于网络负载变化,自动优化通信资源分配,如在数据采集高峰期动态提升传输带宽,在低负载时段降低资源消耗^[4]。

结束语:本文全面分析了变电运维智能化的技术体系架构、四大关键技术及具体应用场景,明确了技术从基础感知到深度智能的发展逻辑与实践路径。研究证实,数据采集的全面性、分析处理的精准性、智能控制的高效性及通信的可靠性,是保障变电运维智能化落地的关键。未来,需进一步推动人工智能与数字孪生技术的深度融合,完善技术标准体系,解决跨系统协同等问题。

参考文献:

- [1]彭鑫.智能化技术在变电运维技术中的应用分析[J].新潮电子,2025(19):19-21.
- [2]靳海云,杜晓飞,刘志清.智能化变电运维技术应用研究[J].电力设备管理,2025(10):24-26.
- [3]马德萍,沈梦雨.智能化技术在变电运维中的应用研究[J].通信电源技术,2025,42(6):240-242.
- [4]强德毓.智能化变电站运行维护技术应用与实施要点[J].中国科技纵横,2025(16):7-9.