

数字化技术在变电站运维中的应用现状与前景

曹旭东

国家管网集团天津液化天然气有限责任公司 天津 300450

摘要: 本文聚焦数字化技术在变电站运维领域的应用,系统阐述物联网、人工智能、数字孪生、智能运维平台等核心技术原理。结合当前智能巡检、设备状态监测、故障诊断等应用场景,分析数字化运维在提质增效、安全避险、降本节能方面的成效,梳理技术应用不均、数据壁垒突出、技术成熟度不足及人才制度欠缺等问题,同时预判行业发展趋势,提出针对性优化对策,为智慧变电站运维建设提供参考。

关键词: 数字化技术; 变电站运维; 应用现状; 前景

引言: 在新型电力系统快速建设的行业背景下,电网运行对变电站运维的安全性、精准性与高效性提出了更高标准要求。传统人工运维模式存在作业繁琐、预判能力薄弱、管控精度不足等诸多弊端,已难以适配现代化电网发展需求。数字化技术的落地应用,为变电站运维模式革新提供了全新路径。基于此,本文探究数字化技术运维应用现状,分析现存短板,研判行业发展前景,助力变电站运维实现数字化、智能化转型升级。

1 变电站运维数字化核心技术与理论基础

1.1 物联网感知技术

(1) 传感器实时采集技术: 基于温度、电流、电压、振动、局放等多类传感器,对变压器、开关柜、GIS等核心设备运行数据进行实时采集。采集原理依托模数转换与信号调理技术,将物理量转化为标准化数字信号,经通信协议上传,为运维系统提供高频率、高精度的状态源数据。(2) 边缘计算技术: 在站端部署边缘计算节点,对传感器原始数据进行就地清洗、过滤与特征提取,减轻上云带宽压力。依据预设阈值规则与轻量化判别模型,对越限、突变、缺失等异常数据进行快速甄别,即时触发本地声光告警或控制指令输出,实现毫秒级本地响应,确保异常工况下运维处置的及时性与可靠性。

1.2 人工智能与大数据技术

(1) AI 图像识别技术: 基于卷积神经网络等深度学习算法,通过对标注设备图像进行特征训练,构建外观缺陷识别、表计读数提取、设备状态判别等模型。技术原理涵盖图像采集与预处理、目标检测与特征提取、分类推理与结果输出等环节,实现对锈蚀、渗漏油、仪表超差、异物挂载等异常的非接触式智能研判。(2) 大数据分析技术: 运用数据挖掘、机器学习与统计分析方

法,对历史运维数据进行清洗、关联、聚类与回归建模,提取设备故障演化规律与多维状态量关联特征。通过构建健康度评价模型与故障概率预测模型,实现设备状态趋势预判,为差异化运维策略制定提供数据支撑^[1]。

1.3 数字孪生与三维可视化技术

(1) 变电站三维建模技术: 依托激光点云扫描与倾斜摄影测量技术,采集变电站建筑、设备及场地空间三维数据,经点云配准、三角网构建、纹理映射及模型轻量化处理,生成高精度地理信息模型与设备精细模型,实现物理变电站全要素、全景化的数字复现。(2) 虚实交互运维技术: 建立物模型与实时数据映射通道,将传感器实测数据动态驱动至三维模型,支持远程虚拟巡查、操作预演与历史状态复刻。运维人员在数字场景中模拟操作,系统同步评估操作影响并反馈至物理端,实现物理变电站与数字孪生体的双向协同与闭环联动。

1.4 智能运维平台技术

(1) 运维数据集成技术: 构建统一数据中台,制定标准化数据接口与通信协议,实现 SCADA 系统、在线监测、巡检机器人、人员工单等多源异构数据的汇聚、清洗、融合与共享,打破系统壁垒,形成全局统一、实时更新的运维数据视图,为上层智能应用提供高质量数据服务。(2) 全流程闭环管理技术: 基于运维业务流程数字化建模,将巡视、检修、缺陷发现、故障处置、验收归档等环节全线上化,建立任务派发、过程追踪、结果评价的闭环管控机制。各环节状态可追溯、操作可留痕、效果可量化,实现运维管理从计划安排到执行反馈的全流程数字化、规范化与精细化管控。

2 数字化技术在变电站运维中的应用现状及现存问题

2.1 数字化运维主要应用场景现状

(1) 智能巡检应用: 目前多数变电站已部署巡检机器人、无人机及固定摄像头, 实现设备表计、红外温度、外观状态等自动采集与识别。巡检路线采用规划算法优化覆盖路径, 缺陷识别逐步由人工判读转向 AI 辅助判别, 可自动生成巡检报告, 但复杂场景下的识别准确率仍有待提升。(2) 设备状态监测: 一次设备(变压器、GIS、断路器)在线监测已较成熟, 涵盖油色谱、局放、机械特性等参数实时采集; 二次设备状态监测起步较晚, 主要依赖自检告警与报文分析。异常预警功能在部分试点站实现阈值报警与趋势预警结合, 但大规模落地仍面临传感器部署密度、通信可靠性等制约。(3) 故障智能诊断与处置: 远程诊断依托运维平台实现专家知识库与在线数据联动, 可对典型故障进行溯源分析与处置策略推荐。应急辅助决策初步实现预案数字化推送与操作票自动生成, 但面对复杂复合故障, 智能诊断准确性不足, 仍需人工深度介入^[2]。(4) 全生命周期数字化管理: 设备采购、投运、检修、缺陷、退役等环节已初步实现电子化台账管理, 部分系统具备状态评价与寿命预估功能, 但全流程跨阶段数据贯通程度不高, 检修历史与运行状态关联分析仍需人工整合, 闭环管理尚处于建设阶段。

2.2 数字化运维应用成效

(1) 运维效率提升: 智能巡检与在线监测替代了大量人工重复性作业, 例行巡视耗时缩短约 40%~60%, 数据报表自动生成减少人工录入工作量, 运维人员可聚焦于分析判断与异常处置, 整体作业时长明显压缩。(2) 运维安全性提升: 远程巡检与操作减少人员进入高压区域频次, 降低触电、误操作等现场作业风险。实时监测与预警机制可提前发现设备异常, 变被动抢修为主动防控, 有效遏制故障扩大化。(3) 运维成本优化: 数字化手段替代人工巡检与现场检测, 降低人力成本与耗材消耗; 通过状态检修减少不必要的定期检修费用; 故障提前预警避免了设备严重损坏导致的停运损失, 综合运维成本呈下降趋势。

2.3 现阶段应用存在的核心问题

(1) 技术应用不均衡: 新建智能站数字化水平较高, 而大量老旧变电站因设备老化、空间限制、改造投入大等因素, 数字化升级推进缓慢, 新技术规模化复制落地不足, 整体发展不协调。(2) 数据体系不完善: 各系统数据接口标准各异, SCADA、在线监测、巡检系统、生产管理系统之间数据壁垒明显, 数据孤岛现象突

出。同时, 海量历史数据缺乏有效治理与深度挖掘, 数据价值未充分发挥。(3) 技术成熟度有限: 数字孪生在模型精度、实时驱动、动态更新方面仍有较大提升空间; AI 诊断对复杂工况、罕见故障的泛化能力不足, 场景适配性差, 智能化程度难以满足实际运维要求。(4) 人才与管理短板: 兼具电力专业与数字化技能的复合型人才供给不足, 基层运维人员数字化素养参差不齐。现有管理制度与标准规范仍沿用传统运维模式, 对数字化作业流程的适配性不够, 制约了技术效能的充分发挥。

3 数字化技术在变电站运维中的发展前景与优化对策

3.1 行业发展整体趋势

(1) 运维模式智能化: 行业正加速从传统人工定期巡检、事后被动抢修, 向基于状态全息感知的主动预判与自主决策方向转型。依托人工智能研判、数字孪生推演与大数据预测的深度融合, 未来变电站运维可实现设备健康状态在线自评估、异常趋势自发现、运维策略自优化, 逐步减少人工干预, 迈向少人值守、无人操作的智能化运维新阶段, 真正实现从“人防”向“技防+智防”的根本转变。(2) 运维体系一体化: 着力打破各专业系统间的信息壁垒, 推动 SCADA、在线监测、巡检机器人、生产管理系统、调度自动化等多源系统深度集成, 实现全站数据纵向贯通与横向协同。一体化运维中台将成为标准配置, 支撑运行监控、设备管理、检修决策、安全管控等业务高效协同, 构建“感知—分析—决策—执行”全链条智能管控体系, 达成全流程闭环管理^[3]。(3) 运维场景全域化: 基于高精度数字孪生技术, 实现物理变电站与数字模型的实时动态映射, 运维场景从实地现场拓展至远程全息感知、虚拟操作与沉浸式巡检。在此基础上, 无人值守变电站将由试点示范走向规模化普及, 形成“中心站集中监控+现场智能终端联动”的全域化运维格局, 覆盖城市、乡村、山区等各类地理环境, 大幅提升偏远地区变电站的可达性与管控水平。

3.2 核心技术未来发展前景

(1) AI 深度赋能: 人工智能将从当前设备外观识别、阈值比较告警, 向设备故障精准预测、剩余寿命评估、检修策略自动生成等高阶应用深入演进。融合电力系统专有知识图谱与大模型技术, 可对复杂故障进行多因素关联推理, 辅助生成最优处置方案, 推动运维模式从经验驱动向数据驱动、知识驱动的全面升级, 实现设备从“定期检修”向“精准预测检修”的跨越。(2) 数字孪生技术普及: 数字孪生建模将从外观几何复现向内部物理机理建模深化, 时延由秒级向毫秒级跃升, 模型

精度与实时性同步提升。未来将实现虚实双向交互——虚拟空间的操作指令可驱动真实设备执行动作,真实设备运行状态变化即时映射至孪生模型,为运维人员提供高保真的全场景仿真推演与事故反演试验环境,显著增强运维决策的科学性与应急处置的准确性^[4]。(3) 5G+物联网融合: 5G 网络大带宽、低时延、海量连接的技术特性,将支撑海量传感器数据实时上传与远程操控指令的高速下达。结合新型低功耗广域感知终端与边缘计算协同,实现设备状态全息采集、现场作业远程精准管控与移动巡检高效协同,为无人运维、应急指挥、移动运维提供坚实的通信基础设施保障,有效解决偏远站点通信瓶颈问题。

3.3 数字化运维优化提升对策

(1) 统筹数字化改造: 制定差异化、分阶段的数字化改造方案,对老旧变电站优先实施关键设备在线监测与智能巡检部署,对新建变电站全面推进全流程数字化设计。通过财政补贴、专项基金等政策引导,缩小区域间技术应用差距,确保各电压等级、各运行年限的变电站数字化水平协调发展,避免“数字鸿沟”进一步扩大。(2) 完善数据标准体系: 建立覆盖数据采集、传输、存储、共享全链条的统一技术标准与接口规范,推动各业务系统数据格式互联互通。建设企业级数据中台,实现多源异构数据的汇聚治理与质量管控,建立健全数据共享机制与安全合规体系,从根源上破除数据孤岛,充分激活数据资源价值,为 AI 训练与大数据分析提供高质量数据底座。(3) 加速技术迭代落地: 围绕数字孪生、AI 智能诊断、5G 远程操控等前沿方向设立试点示范区,在真实运行环境下开展规模化验证与应用迭代,建立技术成熟度分级评估机制。及时总结试点经验,形成标准化、可复制、可推广的技术方案,持续提升新技术对不同电压等级、不同气候区域、不同运行场景的适配能力,推动技术成果快速转化应用^[5]。(4) 强化人才与制度建设: 构建电力与数字化交叉学科人才培养体系,面向运维人员系统开展 AI 应用、数据分析、数字孪生操作等专项技能培训,建立数字化技能等级认证制度。同步修订完善运维管理制度、安全操作规程与绩效考核标准,使之全面适配数字化作业模式与流程,为数字化技术的效能发挥提供坚实的制度保障与人才支撑。

3.4 行业应用展望

(1) 短期展望: 未来 3 至 5 年内,智能巡检、在线监测、数据集成分析等成熟技术将在主要变电站实现标准化配置与常态化运行,数字化运维流程全面嵌入日常生产管理体系。运维效率与安全性显著提升,形成以数据驱动的标准化作业规范与可量化评价体系,数字化运维从“示范应用”走向“全面落地”,为全面智能化奠定坚实基础。(2) 中长期展望: 展望 2030 年及以后,随着人工智能、数字孪生、5G 通信、边缘计算与自主控制等前沿技术深度融合,将全面建成全域感知、虚实融合、自主可控、高效安全的智慧变电站运维体系。届时设备状态全息可知、风险隐患提前预判、远程操作精准执行、故障处置智能闭环,真正实现变电站运维从数字化管理向全场景智能化运行的跨越式发展,为新型电力系统安全稳定运行提供坚强支撑。

结束语

综上所述,数字化技术彻底改变了传统变电站运维模式,有效弥补了人工运维的诸多不足,大幅提升了电网运维管控质效。但目前行业数字化运维建设仍存在技术、数据、人才、管理等多方面短板,制约了智能化转型进度。未来通过统筹设备改造、完善数据标准、迭代核心技术、健全人才制度体系,可全面推进智慧变电站建设,实现运维工作提质增效,为新型电力系统安全稳定运行提供坚实保障。

参考文献

- [1] 刘冲,陈亚天,王丹丹.基于人工智能的数字化变电站的研究与应用[J].电工技术,2025,17(18):89-95.
- [2] 任思成,邵鹤明,石磊.基于大数据分析的 220kV 变电站运维预测模型构建[J].电工技术,2025,14(25):78-81.
- [3] 张梦梦.基于大数据与人工智能的变电站运维风险及应对措施研究[J].电力技术研究,2025,7(10):135-138.
- [4] 张珏,庄志翔,简思亮,等.变电站智能运维业务设计与应用[J].南方能源建设,2024,11(S1):74-79.
- [5] 孙彤.数字化技术在智能变电站中的应用[J].集成电路应用,2024,41(9):226-229.