

Research on Intelligent Safety Control in Substation Operation and Maintenance Sites

Zhonghua Xia Xiaoyan Ma Wenjing Xing Bingli Zhang

Changji Power Supply Company of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Changji, Xinjiang, 831100, China

Abstract

With the continuous expansion of the power grid and the increasing level of equipment intelligence, traditional substation operation and maintenance (O&M) models are facing significant challenges in terms of safety management and operational efficiency. This paper focuses on the safety control requirements of on-site O&M activities and explores the integrated application paths of advanced technologies such as intelligent inspection, digital twin, and artificial intelligence. By building an intelligent management and control system that integrates multi-dimensional perception, remote coordination, and dynamic decision-making, the entire O&M process can be intelligently monitored, responded to in real time, and managed within a closed-loop risk control framework. The research results show that this system demonstrates significant advantages in hazard prediction, emergency dispatching, and operational safety assurance, providing strong support for the secure and stable operation of next-generation power systems.

Keywords

Substation operation and maintenance; Safety control; Intelligence; Digital twin; Intelligent inspection

变电运维作业现场安全管控智能化研究

夏中华 马小燕 邢文静 张冰丽

国网新疆电力有限公司昌吉供电公司, 中国·新疆 昌吉 831100

摘要

随着电网规模的不断扩大和设备智能化程度的提升,传统变电运维模式在安全管理和作业效率方面面临诸多挑战。本文聚焦于运维现场的安全管控需求,探索智能巡检、数字孪生和人工智能等前沿技术的融合应用路径。通过构建集多维感知、远程联动与动态决策于一体的智能化管控体系,实现对作业全过程的智能识别、实时响应与风险闭环管理。研究结果表明,该体系在隐患预警、应急调度与作业安全保障方面展现出显著优势,为新型电力系统的安全稳定运行提供了有力支撑。

关键词

变电运维; 安全管控; 智能化; 数字孪生; 智能巡检

1 引言

新型电力系统建设对变电站运行可靠性提出更高要求,传统运维模式已难以支撑电网结构复杂化和负荷动态化的发展趋势,在大量设备集中部署背景下人工巡检频次不足与数据利用率低等问题日益凸显。运维人员在高温和高海拔等恶劣环境中长时间作业,人工依赖程度过高也导致作业标准不一致,电网负荷的快速上升进一步加剧了巡检压力,用电高峰期间设备运行状态剧烈波动,对异常识别和风险处置提出时效性挑战。传统运维体系在信息采集与安全防护等方面缺乏闭环支撑,无法满足现阶段运行场景的精细化且实时化需求,构建以数据驱动与远程干预为特征的智能化安全管控体系,已成为提升变电站运维质量与保障能力的关键路径。

【作者简介】夏中华(1998-),男,中国河南商丘人,本科,助理工程师,从事供配电系统研究。

2 传统变电运维安全管控的局限性

2.1 人力依赖度高且效率有限

变电站传统运维作业模式以人工巡检为主,存在极高的人力依赖性,这种方式在面对复杂站点布局和多维运行环境时显得极为被动。作业人员判断隐患往往依靠感官经验,个体差异直接影响故障识别能力,造成技术水平不一致与判断结果偏差。一些老员工虽具备丰富判断力,但难以形成知识标准化机制,新员工在面对异响、异味、振动等细节特征时缺乏足够辨识力,不易察觉设备早期异常^[1]。高海拔地区缺氧,沿海站点湿热腐蚀,西北区域风沙肆虐,多种环境因素对人员状态产生持续消耗,使得高强度巡检下作业稳定性下降。设备运行过程中常存在高压危险、带电部件裸露、空间受限等情况,需频繁靠近操作,容易引发误触、高空坠落、电弧灼伤等安全事故。

2.2 数据采集不全面且信息孤立

传统变电站数据采集以定期抄录为主,采集频次受限

于人员排班与工作强度,无法实现全天候、全流程覆盖。在部分110千伏站点中,关键设备的温升数据每月采集频次不超过4次,振动与接触电阻等参数多依赖便携式设备进行抽检,设备状态变化只能反映瞬时点值,难以形成可用的时间序列曲线。运行信息多以纸质表单或静态截图形式存档,不具备实时性与结构化特征,趋势识别与预警建模失去基础。保护装置、监控系统、环境检测设备采用不同厂商协议,数据格式不统一,平台间无统一中台协调,导致采集系统之间存在连接障碍。在某220千伏站区,视频监控与SF₆气体检测系统分别上传至独立平台,报警信息不能融合触发联动机制,存在数据响应延迟2至5分钟的现象。不同数据源之间无法建立有效关联,故障路径推理与综合状态评估只能依靠运维人员的现场经验与个人判断。信息资源割裂直接影响智能系统的精准判断能力,降低了运维响应的时效性与全面性。

2.3 管理流程滞后且响应缓慢

变电站运维管理流程以静态编排为主,缺少动态响应与闭环联动机制,安全隐患无法实现及时识别与全流程跟踪。在某地市供电单位内部调研中发现,人工巡检间隔平均为72小时,风险信息上传至调度中心的平均滞后时间为45分钟,突发事件处理流程普遍需经历报告、审批、派遣、反馈四个步骤,实际响应时长超过2小时。作业人员普遍缺乏对风险等级的实时认知能力,在高压区域执行任务时未能建立有效的安全边界识别机制^[2]。部分边远地区站点在暴雨或沙尘天气中,数据链路中断概率显著上升,状态信息无法同步至平台,导致指令调度脱节与现场作业协调困难。在处理一起220千伏母线保护误动事件中,因系统未设快速分析模型与可视化支撑工具,从异常信号触发现场处置完成共耗时近6小时,影响范围覆盖两个负荷供区。抢修资源分布未与站点风险等级匹配,调度机制无法根据作业内容智能推荐人力配置方案,出现作业人员重复调派、资源浪费与多点失控问题,流程内部缺少智能判断机制与响应优先级管理结构,直接限制了应急效率和风险控制能力。

3 智能化安全管控的技术基础

3.1 立体智能巡检体系

在变电站高温、高寒、高海拔等复杂环境下开展人工巡检,作业人员面临极大挑战,高温区域设备表面温度常超过60℃,冬季部分站点气温低于-30℃,人工连续作业时间受限,巡检频次不足,状态信息难以覆盖。部分站区设置有超过6米高的构架与分布密集的电缆层,地下通道宽度不足60厘米,人工进入需依赖安全绳、防护器具与照明设备,巡检过程操作空间狭窄、盲区多、效率低。智能巡检机器人具备感知、识别与路径规划能力,四足平台在复杂地形中具备跨越20厘米障碍物与15度斜坡的稳定行走能力,适用于碎石地面、钢结构通道、金属栈桥等区域的全天候巡检任

务^[3]。轮足型设备可在高度不足1米的封闭空间中完成360度旋转与小半径转向,适合在电缆夹层、地下通道、狭窄设备缝隙内进行图像采集、声音监测与温度识别。单次作业时长最长可达6小时,可适应昼夜温差大、气候突变频繁的无人环境运行要求,巡检数据实时上传至平台用于后端分析比对,避免人工数据整理延迟与缺失问题,显著提升作业覆盖范围与运行数据完整性。

3.2 数字孪生技术在变电站运维中的创新实践

数字孪生技术以虚实融合为核心,将物理设备与虚拟模型在空间结构、运行状态、环境变量和操作行为等多个维度实现同步映射。变电站在建设阶段便可完成三维模型构建,并在运维期接入实时监测数据,形成动态演化系统。青海地区一座220千伏站点搭建的孪生平台集成了超过150类传感器数据,每日运行数据量达到1.5万条,模型可在控制中心大屏中实时还原一次设备状态、接地系统通断情况与环境温湿度变化趋势。工作人员作业路径、检修工具使用记录与告警响应动作均可在模型中留痕,关键设备出现温升偏移超过设定阈值时,系统自动触发风险标识与操作流程调整。福建清流变电站在改造中接入设备总数超过380台套,平台支持对巡检进度、工单流转、视频监控和智能报警的统一展示与调度。系统具备交互式分析能力,可开展检修路径推演与应急响应模拟,提升现场人员决策效率与操作精准性,避免重复登高、频繁开箱等高风险动作,有效压缩一次检修作业平均时长至2小时以内。

3.3 AI算法与大数据分析

人工智能算法在变电站运行管理中已实现由图像识别辅助判断向设备状态预测分析的功能扩展,结合大数据平台对运行参数进行时序建模,可对电压波动、负载不均、局部放电等复杂问题建立特征识别模型。安徽某500千伏站部署的智能识别系统在24小时内处理图像总量接近3600帧,能自动提取套管泄漏痕迹、开关位移异常和电缆接头变形等早期信号,并生成风险等级标签。系统支持声纹分析与热成像数据联动,提升异常筛查的空间分辨率与故障指向性。南陵地区一套智能运维平台汇聚站内160个采集点数据,构建设备健康评分模型,对变压器和避雷器等关键部件设定状态因子与行为阈值,在识别出状态漂移或负荷异常后自动发起维护建议并生成巡检工单,平台记录分析频率保持在每天不少于6轮,结合历史数据建模与现场采样动态更新权重参数^[4]。

4 智能化安全管控体系的构建

4.1 技术集成与平台建设

构建面向全天候、全覆盖、全流程的智能化安全管控体系,需以边缘智能设备部署与平台融合能力为基础,实现多源异构数据的统一采集、处理与调度。重庆市区供电公司在城区两座220千伏变电站内同步部署红外测温云台、图像识别模组与噪声采集终端,借助以太网网结构实现设备层

联通,每日上报数据条目数量超过3万条,具备电压、电流、SF6浓度、局放特征量等信息的实时同步能力。数据平台架构采用三层设计,底层完成信号采集与预处理,中层进行状态融合与风险评估分析,上层为图形交互界面与业务联动模块,支持状态趋势展示、任务调度、资源调用与报警响应。淮安供电公司平台融合站区视频、环境、保护、测控4个子系统,平台日均处理数据点达到65万个,在一次变压器绝缘异常事件中完成预警、指令下发、现场复核与工单关闭全过程不到20分钟。平台统一标准的数据结构模型使不同厂家的设备能够实现无障碍接入,满足新建站与改造站多类型设备协同运行的要求,形成结构闭合、功能统一的智能感知与控制体系^[5]。

4.2 业务流程再升级

智能化系统落地并不止于设备接入与平台运行,更需要深度重构传统业务流程,在作业路径、任务分发、风险识别与闭环反馈方面形成系统化逻辑。白银供电公司在2024年秋检期重新设计巡检模式,将原先每日4小时的人工定点检查转变为定时任务推送与移动终端反馈组合模式,现场作业人员借助穿戴式终端接收任务,并在设备识别完成人工确认后自动生成记录。平均每轮巡检覆盖设备数量从45台上升至82台,单次任务时长从240分钟缩短至135分钟。荆门变电站搭建远程支持系统后,高风险操作环节由后台专家组远程辅助指导,在一例500千伏母线分合闸操作中,实现无现场主管参与情况下的精准作业控制,远程判定时间不超过2分钟,作业完成后数据实时归档入平台^[6]。系统具备按故障特征自动分类任务、按作业性质匹配作业资质、按现场风险等级调配支援资源的能力,使调度精度与执行效率显著提升,减少人员高压接触频次,增强异常处理机制的灵活性与可靠性。流程重构后的各环节之间具有关联逻辑与触发机制,使状态识别、任务生成、指令执行与结果归档形成闭环结构。

4.3 标准规范完善

为解决设备兼容性差、平台对接困难等问题,国家能源局推进统一接口标准体系建设,已发布《智能巡检设备通信接口规范》《状态监测数据模型结构规范》等文件,明确设备标识格式、通信频段、采样时间间隔和传输加密机制。在实践中,白银供电公司“五级五控”责任体系嵌入调度平台,五级包括集团、省公司、地市中心、站区管理与作业人员五个层级,五控涵盖作业风险识别、作业审批、行为监控、过程留痕与结果反馈,系统自动匹配作业任务与人员权限,每项作业均有定位追踪与数据归档,具体如图1所示:

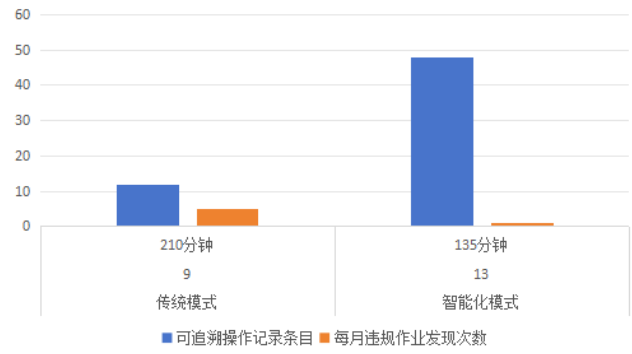


图1 传统与智能化安全管控流程对比

白银供电公司应用标准体系后,每日高风险作业量增加4项,但作业时长缩短75分钟,单日记录数据增长3倍,违规次数下降至每月1次,反映出标准化体系不仅未造成流程阻滞,反而提升了执行效率与作业可控性^[7]。标准建立推动了系统功能集成、数据一致性及安全边界清晰化,是支撑变电运维智能化运行的核心要素。

5 结语

随着电网规模持续扩张与设备运行复杂度提升,传统依赖人工的变电运维模式已无法满足高可靠性与高效率的双重要求,智能巡检与人工智能等先进技术为构建全天候且安全可控的运维体系提供可行路径,构建以数据为核心及标准为基础的智能安全管控机制,有助于提升作业闭环能力与风险响应水平,未来需在统一接口与人才建设等方面持续发力,推动管理机制与技术体系协同升级,为新型电力系统提供坚实保障。

参考文献

- [1] 李志强,王建军,张红梅.基于数字孪生的变电站智能运维系统研究[J].电力系统自动化,2021,45(15):112-120.
- [2] 陈刚,吴涛,周明.物联网技术在变电站设备状态监测中的应用进展[J].高电压技术,2022,48(5):1893-1904.
- [3] 薄艳平,杨丹.变电运维一体化作业风险管控的实践研究[J].前卫,2024(33):0237-0239.
- [4] Liu Y, Chen X, Wang L. Intelligent inspection robot for substation equipment: A review[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(3): 2405-2416.
- [5] Zhang H, Li W, Wu Q. Digital twin-based predictive maintenance for power transformers[J]. Applied Energy, 2020, 278: 115401.
- [6] 万靖宜,康云鹏.变电运维智能化管理的研究与实践[J].2024(23):55-57.
- [7] 陈领.探究变电运维现场作业安全防护及监控技术[J].中国科技期刊数据库 工业A, 2021(10):3.