

数字化变电站与安全生产的配合应用

陈 婧

中国能源建设集团新疆电力设计院有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要：数字化变电站依托智能设备、站控层数字化及边缘计算等技术，为安全生产筑牢根基。通过多源数据融合监测、自动化控制与安全联锁、智能人员管控及网络安全防护等应用，达成风险实时预警、故障精准隔离及人员行为规范管理。其安全管理数字化体系融合标准化、应急决策与绩效评估，形成闭环优化。虽面临设备改造、数据互通及网络安全等挑战，但可通过分阶段升级、数据共享及强化培训等措施有效应对。

关键词：数字化变电站；安全生产；配合应用

引言：在电力行业高速发展的当下，安全生产始终是变电站运行的核心要务。传统变电站依赖人工巡检与经验判断，存在风险感知滞后、故障处理效率低、人员安全管控难等问题。随着数字化技术蓬勃兴起，数字化变电站应运而生，其以智能设备、数据融合、自动化控制为特征，为安全生产注入新动能。通过实时监测、智能预警与快速响应，数字化变电站不仅提升了设备运行的可靠性，更强化了人员行为的安全生产管理。本文将深入探讨数字化变电站与安全生产的配合应用，剖析其技术路径与实践价值。

1 数字化变电站技术体系与安全需求

1.1 数字化变电站核心技术架构

(1) 智能一次设备以电子式互感器和智能断路器为核心，前者通过光学或电子原理实现电参量高精度采集，减少传统互感器的误差与损耗；后者集成传感器与控制单元，可实现状态自监测与远程操控，提升设备运行可靠性。(2) 站控层数字化平台基于IEC61850标准通信，统一站内设备数据模型与通信协议，打破传统设备的信息孤岛，实现保护、测控、监控系统的无缝数据交互，支撑全站协同控制。(3) 边缘计算与数据采集系统是SCADA的升级版，将计算能力下沉至设备端，可实时处理海量运行数据，快速生成设备状态报告，为调度决策提供低延迟支持。

1.2 安全生产的核心需求

(1) 实时风险感知与动态评估要求系统能不间断监测设备温度、绝缘状态等关键参数，自动识别异常趋势，并结合历史数据动态调整风险等级，提前预警潜在故障。(2) 故障快速定位与隔离需借助数字化定位技术，在故障发生后10秒内精准定位故障点，同时自动触发隔离程序，避免故障扩大影响供电范围。(3) 人员行为安全管控通过智能穿戴设备与视频监控联动，实时

监测工作人员位置与操作规范，当出现违规进入危险区域、未按流程操作等情况时，立即发出声光报警。

1.3 数字化技术对安全生产的赋能路径

(1) 数据驱动决策替代经验判断，通过整合设备运行、环境参数等多维度数据，利用算法模型分析设备健康状态，替代传统依赖人工经验的运维模式，提升决策准确性。(2) 全生命周期安全追溯能力依托区块链技术，记录设备从出厂、安装、运维到报废的全流程数据，数据不可篡改，可快速追溯故障根源与责任主体。

2 数字化变电站技术在安全生产中的关键应用

2.1 智能监测与风险预警系统

(1) 多源数据融合监测通过部署分布式传感器网络，实时采集设备状态（如变压器油温和绕组温度、断路器机械特性）、环境参数（温湿度、SF6气体浓度、风速）及人员行为数据，借助边缘计算节点对多维度数据进行清洗与融合，消除单一数据监测的局限性，实现对变电站运行状态的全面感知，例如当SF6气体浓度超标与人员靠近同时发生时，系统可立即触发双重预警。(2) 基于机器学习的故障预测模型以变压器局部放电预警为例，通过构建LSTM（长短期记忆网络）模型，对历史局部放电信号、绝缘老化数据进行训练，能精准识别放电类型（如电晕放电、沿面放电），并提前1-3个月预测潜在故障，相比传统定期检测，将故障预警提前量提升80%以上，有效避免突发性设备损坏^[1]。(3) 可视化安全态势感知平台采用三维建模技术还原变电站物理场景，叠加设备运行数据、风险等级等信息生成动态热力图，红色区域代表高风险设备或危险区域，蓝色区域为安全状态。运维人员通过平台可直观掌握全站安全态势，例如当某条线路负荷过高时，热力图会实时呈现负荷分布变化，辅助快速调整运行策略。

2.2 自动化控制与安全联锁机制

(1) 程序化操作依托顺控票系统, 将传统人工逐项操作的流程(如断路器分合闸、隔离开关切换)转化为标准化电子操作票, 系统自动校验操作逻辑与设备状态, 操作过程无需人工干预, 使单次操作时间从30分钟缩短至5分钟, 同时将人为误操作率降至0.01%以下, 大幅提升操作安全性与效率。(2) 五防系统(防误闭锁)数字化升级突破传统机械闭锁的局限, 通过与站控层平台实时联动, 实现“防误操作、防带负荷拉合隔离开关、防带电挂地线、防带地线合闸、防误入带电间隔”的全数字化管控, 当检测到违规操作指令时, 系统立即触发软件闭锁, 同时向运维人员推送告警信息, 形成双重安全保障。(3) 紧急情况下的自动切负荷与隔离策略在电网故障(如短路、电压崩溃)发生时, 系统通过实时分析故障范围与影响程度, 自动执行切负荷方案, 优先切除非重要负荷, 保障医院、交通枢纽等关键用户供电; 同时启动故障隔离程序, 通过智能断路器快速断开故障线路, 将故障影响范围控制在最小区域, 平均故障隔离时间缩短至200毫秒^[2]。

2.3 人员安全管控技术

(1) 智能穿戴设备集成UWB定位模块、心率传感器与气体检测功能, 可实时定位工作人员位置(定位精度达1米), 监测心率、血压等生理指标及周围环境中有毒有害气体浓度。当人员进入带电间隔、生理指标异常或环境超标时, 设备立即发出声光报警, 并同步将预警信息上传至管控平台, 确保人员安全。(2) AR/VR培训系统构建沉浸式事故模拟场景(如变压器火灾、人员触电), 运维人员通过VR设备体验事故发生过程, 学习应急处置流程; 借助AR技术, 可在实际设备上叠加操作指引、设备参数等虚拟信息, 辅助新手快速掌握运维技能, 使人员应急处置能力提升60%以上。(3) 作业行为分析通过部署AI视频监控摄像头, 利用计算机视觉技术识别人员违规行为(如未戴安全帽、擅自跨越安全围栏、违规操作设备), 识别准确率达95%以上。发现违规行为后, 系统自动抓拍取证并推送告警至管理人员, 同时现场扬声器发出语音警示, 及时纠正不安全行为。

2.4 网络与信息安全防护

(1) 纵向加密与横向隔离的网络安全架构采用“纵向加密认证装置”实现变电站与调度中心之间的数据加密传输, 防止数据被窃取或篡改; 通过“横向隔离装置”将变电站网络划分为生产控制区、非控制区等独立区域, 不同区域间禁止直接数据交互, 构建“物理隔离、逻辑加密”的双重防护体系, 抵御外部网络攻击。(2) 工业控制系统(ICS)安全审计部署专用审计设备, 对站内PLC、RTU

等控制设备的操作指令、数据传输过程进行全程记录, 形成不可篡改的审计日志。审计系统可自动识别异常操作(如未授权的程序修改、非法指令下发), 实时生成审计报告, 为事后安全分析与责任追溯提供依据^[3]。(3) 攻击溯源与应急响应机制构建网络攻击检测模型, 通过分析网络流量、设备日志识别攻击行为(如勒索病毒、DDoS攻击), 并利用威胁情报库快速定位攻击源(如IP地址、攻击工具); 同时制定标准化应急响应流程, 攻击发生后15分钟内启动应急预案, 通过隔离受感染设备、恢复备份数据等措施, 保障控制系统稳定运行, 将攻击造成的停机时间缩短至1小时以内。

3 数字化变电站安全生产管理体系的数字化升级

3.1 安全标准化与数字化融合

(1) 安全生产责任制在线化管理打破传统纸质记录模式, 构建覆盖变电站各岗位的责任管理平台, 明确站长、运维员、安全员等角色的安全职责与考核标准。系统实时记录岗位安全任务完成情况(如设备巡检、隐患排查), 自动生成责任追溯台账, 当出现安全问题时, 可快速定位责任主体, 同时将责任履行情况与绩效挂钩, 提升人员安全履职积极性。(2) 电子化作业指导书(E-SOP)与审批流程替代传统纸质指导书, 将设备检修、倒闸操作等作业流程转化为标准化电子文档, 嵌入风险提示、操作步骤示意图等内容。作业前, 工作人员通过系统提交审批申请, 各级审批人员在线审核作业方案与安全措施, 审核通过后方可执行作业, 全程留痕可追溯, 既规范作业流程, 又避免纸质审批效率低下、易丢失的问题。

3.2 应急管理与决策支持系统

(1) 数字孪生驱动的应急预案仿真依托变电站数字孪生模型, 模拟各类事故场景(如变压器起火、线路短路), 仿真不同应急预案的执行效果(如灭火方案、人员疏散路径)。通过仿真可优化应急资源配置(如灭火器摆放位置、救援人员数量), 提前发现预案漏洞, 使应急预案的实用性提升70%以上, 为实际应急处置提供科学依据。(2) 多源信息融合的指挥调度平台整合事故现场视频、设备状态数据、人员位置信息等多源数据, 实时呈现在指挥界面。调度人员可直观掌握事故态势, 通过平台向现场人员下达指令、调配救援物资, 实现“信息实时共享、指令快速传达、资源高效调度”, 将应急响应时间缩短30%。

3.3 安全绩效评估与持续改进

(1) 大数据分析驱动的安全指标动态优化通过采集变电站安全事故数据、隐患排查数据、人员操作数据

等,运用大数据算法分析安全指标(如事故发生率、隐患排查整改率)的变化趋势,识别影响安全绩效的关键因素(如人员技能不足、设备老化),动态调整安全指标权重与考核标准,使安全评估更精准、贴合实际需求。

(2) PDCA循环的数字化实现路径将“计划(Plan)-执行(Do)-检查(Check)-改进(Act)”流程数字化:在计划阶段,系统辅助制定安全目标与实施方案;执行阶段,实时跟踪任务进度;检查阶段,自动对比实际结果与目标差异;改进阶段,生成改进建议并纳入下一轮循环,形成安全管理的闭环优化,持续提升安全生产管理水平^[4]。

4 数字化变电站安全生产管理的挑战与对策建议

4.1 当前面临的主要问题

(1) 老旧设备数字化改造难度大,部分变电站仍运行超15年的传统一次设备(如电磁式互感器、机械断路器),这类设备缺乏数据接口,无法与数字化系统兼容。改造需中断供电作业,且单站改造成本高达数百万元,同时面临改造技术标准不统一的问题,导致部分变电站因供电可靠性要求高、资金有限,迟迟无法推进数字化升级,影响整体安全管理效率。(2) 数据孤岛与系统兼容性不足,站内不同厂商的设备监测系统(如变压器监测系统、人员管控系统)采用独立数据格式与通信协议,数据无法互通;部分早期建设的数字化平台与新接入的边缘计算、数字孪生系统存在接口不匹配问题,导致设备状态、人员行为等数据分散存储,无法形成完整的安全管理数据链,制约了数据驱动决策的落地。

(3) 网络安全威胁与防护体系缺失,数字化变电站接入互联网后,面临勒索病毒、非法入侵等网络攻击风险,而部分变电站未部署专业工业防火墙,仅依赖传统杀毒软件;同时缺乏专职网络安全人员,无法实时监测网络异常行为,一旦发生攻击,可能导致控制系统瘫痪,引发设备故障或供电中断,威胁安全生产。

4.2 对策建议

(1) 分阶段推进技术升级,采用“试点-推广-标准化”路径:优先选择负荷较低、设备老化严重的变电站开

展改造试点,探索成熟改造方案(如保留核心设备、仅加装数据采集模块);试点成功后在全网推广,同步出台设备改造技术标准,明确接口规范与改造流程;设立专项改造资金,对资金困难的变电站给予补贴,平衡供电可靠性与改造进度。(2) 建立跨部门数据共享机制,成立由运维、调度、信息部门组成的专项小组,制定统一数据标准(如设备状态数据格式、人员行为数据标签);搭建全站统一数据中台,打通各系统数据接口,实现设备、环境、人员数据实时共享;明确数据使用权限,确保各部门按需获取数据,支撑协同安全管理。(3) 强化人员数字化技能培训与认证,制定分层培训计划:对运维人员开展智能监测系统、数字孪生平台操作培训,对管理人员开展数据驱动决策培训;引入认证机制,将数字化技能纳入人员上岗考核,未通过认证者不得参与关键操作;定期组织网络安全演练,模拟攻击场景,提升人员应急处置能力,筑牢安全生产人力防线。

结束语

数字化变电站与安全生产的深度融合,标志着电力行业安全管理迈入智能化新阶段。通过智能设备实时监测、自动化控制精准响应、人员行为智能管控及网络安全严密防护,变电站风险防控能力显著提升,为电网稳定运行筑牢根基。尽管面临设备改造、数据互通等挑战,但分阶段升级、跨部门协同及人员技能强化等对策已初见成效。未来,随着技术的持续创新,数字化变电站将成为保障安全生产、推动电力行业高质量发展的核心力量。

参考文献

- [1]周凯鹏.煤矿数字化变电站技术研究与应用[J].山东工业技术.2022,(03):31-33.
- [2]刘华兴.数字化变电站技术在煤矿变电所的应用[J].煤炭与化工.2020,(17):204-206.
- [3]张源.煤矿数字化变电站的可实现性研究[J].煤炭技术.2022,(09):78-79.
- [4]吴嘉敏.数字化变电站系统可靠性评估与分析[J].电力系统自动化.2021,(15):147-149.