

电力系统变配电运行的安全技术及管理分析

胡京

武汉隆泰恒发工程技术有限公司, 湖北 武汉 430299

DOI:10.61369/EPTSM.2026050031

摘 要： 新型电力系统高比例新能源接入场景下，变配电设备运行工况趋于复杂，传统安全运维模式的短板持续凸显。本文以某区域配电网变配电工程项目为研究载体，结合智能感知、构网控制、数据融合等新型电力技术，梳理变配电运行核心安全技术体系，剖析现场技术应用痛点。从技术落地成效、运维管理升级两个维度提出优化路径，可为配电网变配电环节安全稳定、高效可控运行提供实操参考。

关 键 词： 新型电力系统；变配电运行；安全技术；运维管理；智能感知

Safety Technology and Management Analysis of Power Transformation and Distribution Operation in Power Systems

Hu Jing

Wuhan Longtai Hengfa Engineering Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430299

Abstract： In the context of a new-type power system with a high proportion of renewable energy integration, the operational conditions of power transformation and distribution equipment are becoming increasingly complex, and the shortcomings of traditional safety operation and maintenance models continue to emerge. This paper takes a power transformation and distribution project in a certain regional distribution network as the research subject, and combines novel power technologies such as intelligent sensing, grid-forming control, and data fusion to organize the core safety technology system for power transformation and distribution operation and analyze the pain points of on-site technology application. Optimization paths are proposed from two dimensions: technological implementation effectiveness and operation and maintenance management upgrades, providing practical references for the safe, stable, efficient, and controllable operation of power transformation and distribution in distribution networks.

Keywords： new-type power system; power transformation and distribution operation; safety technology; operation and maintenance management; intelligent sensing

双碳目标推进进程中，新能源规模化并网重塑传统电力系统运行形态。变配电设备作为电网电能转换、传输、分配的核心枢纽，其运行安全性直接决定全域电网供电可靠性。传统人工巡检、阈值告警及粗放式管控模式，难以适配当前设备工况波动大、隐患隐蔽性强的运行特征。依托新型电力技术迭代安全防控体系、革新运维管理模式，成为变配电领域提质保安全的核心抓手。

一、项目概况

本文研究载体为某县域新能源示范配电网变配电升级改造项

目，项目覆盖5个核心配电台区，整合分布式光伏、储能装置、智能充电桩及多元民用、工业负荷，光伏渗透率最高可达70%。项目配套搭建多源数据采集终端与物联网感知体系，涵盖SCADA量测系统、设备状态传感器、气象监测设备等多维采集模块。项目投运后，电网潮流双向波动、电压瞬变、设备间歇过载等问题频发，对变配电设备运行安全、隐患感知速度、运维管控精度提出严苛要求，具备新型电力系统下变配电运行的典型研究价值。

二、电力系统变配电运行的安全技术应用

（一）多源异构数据驱动的设备状态智能感知技术

1. 分层式数据预处理与质量管控

变配电设备运行安全管控的核心前提，是获取完整、精准、一致的现场运行数据。新型配电网场景下，电压、电流等电气量测数据，设备温度、振动、局部放电等状态数据，光照、温湿度、风速等环境气象数据，存在采样频率、量纲格式、时空尺度的显著差异，原始数据混杂大量缺失、异常、时序错位问题。直接依托原始数据开展状态研判，极易出现隐患漏判、误判问题。

项目现场采用分类分级的数据预处理机制，针对性解决异构数据适配难题。针对电气量测随机缺失数据，依托时序相关性完成线性插值填补，连续多点缺失时段则替换为同期正常运行数据。设备状态非均匀采样数据，通过最近邻填充方式维持状态监测的连续性。异常数据筛查结合 3σ 滑动窗口准则与电力设备物理运行约束，标记并替换超限可疑数据。以GPS授时为基准完成全量数据时序对齐，从完整率、准确率、一致性三个维度把控数据质量，所有准入数据均满足95%以上完整率、 $\pm 1\%$ 以内测量误差、0.98以上交叉相关系数的管控标准。

2. 时空协同的隐患精准识别技术落地

变配电系统各类运行隐患的演化，并非单一参数异常导致，而是多维度数据耦合变化的结果。电压越限、线路过载、设备绝缘老化等常见隐患，很难通过单一监测数据实现早期预判。传统监测模式仅能捕捉显性故障，对渐进式、隐蔽式隐患的识别能力存在明显短板。

项目落地时空协同表征与智能识别融合技术，依托动态时间规整算法完成异构时序数据精准对齐，通过Sakoe-Chiba带约束与分段计算优化方式，大幅降低长时序数据处理算力消耗，单台区小时级数据处理耗时可控制在23ms左右。结合配电网拓扑结构完成空间特征编码，利用电压灵敏度矩阵刻画节点间电气耦合强度，通过图注意力机制自适应调整邻域节点特征权重。搭配多尺度时序卷积模块，同步捕获设备短期瞬态波动、中期工况变化、长期老化退化特征，最终实现变配电隐患精准识别，整体识别准确率达97.2%，F1值稳定在0.958水平。

（二）新型传感与边缘计算的设备监测安全技术

1. 专用智能传感设备适配部署

传感器作为变配电设备状态感知的核心终端，其运行可靠性直接决定整体安全监测体系的有效性。传统通用传感器绝缘性能不足、抗电磁干扰能力弱，无法适配高压、强振动、温湿度骤变的变配电设备运行环境，长期运行易出现数据漂移、精度衰减、传输异常等问题。

项目摒弃通用传感设备，批量适配电力专用新型传感器件。采用光纤布拉格光栅光学传感器，实时监测开关柜、变压器内部温度、振动及应变参数，依托高绝缘、抗干扰特性适配设备内置监测场景。部署MEMS微型传感单元，凭借体积小、响应快、集成度高的优势，捕捉设备电场、声学信号的微弱变化，提前预判绝缘老化、局部放电隐患。搭配巨磁阻磁敏传感器实现电流高精度检测，规避传统互感器体积大、频带窄、无法适配直流检测的缺陷，全面覆盖变配电设备核心运行参数的监测需求。

2. 边缘计算赋能实时安全研判

海量监测数据全部上传云端处理的模式，会产生网络延迟、带宽占用、数据泄露等多重风险，无法满足变配电运行实时安全管控的需求。云端集中处理的滞后性，难以应对新能源接入带来的毫秒级工况波动问题^[1]。

项目搭建端边云协同的监测架构，在配电终端部署轻量化边缘计算节点，完成监测数据的就地筛选、预处理与初步研判。通过轻量化人工智能模型，实现局部放电、红外热缺陷、异常温升

等典型隐患的本地识别，无效数据、正常工况数据无需上传云端，有效降低网络传输压力与系统误报率。边缘节点依托Raft共识机制实现毫秒级交易确认，保障实时监测数据的时效性，整体隐患响应时延可压缩至56ms以内，完全适配变配电系统在线安全预警的实时性要求。

（三）构网型控制的系统运行稳定安全技术

1. 电压频率主动支撑控制

大量跟网型电力电子设备接入变配电系统，会导致系统等效惯量降低、抗扰能力弱化，电压与频率极易受新能源出力波动、负荷突变影响产生偏移，严重时引发设备脱网、保护误动等安全事故。传统调控方式仅能被动应对工况异常，无法实现提前干预与主动支撑。

项目引入构网型控制技术优化变配电系统运行稳定性，将新能源变流器、储能变换器调控为电压源模式，替代传统电流源控制架构。依托自适应惯量阻尼控制策略，根据系统实时运行状态调整支撑参数，有效弥补系统惯量不足的短板。在电压跌落、频率偏移等异常工况下，快速输出无功功率与调频支撑功率，抑制工况波动幅度，提升变配电系统稳态与暂态运行稳定性。

2. 多设备耦合振荡抑制技术

多台新能源设备、储能装置同步并网运行时，设备间功率耦合交互容易引发低频、宽频振荡问题，持续振荡会加剧变配电设备损耗，缩短设备使用寿命，甚至威胁整个配电网的运行安全。传统单一设备调控方式，无法统筹多设备耦合影响。

项目结合阻抗建模与特征根轨迹分析方法，精准识别多设备并网系统的主导振荡模态。通过优化构网型设备控制参数、匹配线路阻抗特性，破解多设备功率耦合引发的振荡难题。搭配自抗扰控制策略优化储能变换器、光伏并网设备的动态响应能力，有效抑制系统宽频振荡，保障变配电网多源协同运行的安全性与稳定性。

（四）联盟链加持的运维数据安全防护技术

1. 数据分级加密与权限管控

变配电运行过程中产生的拓扑数据、保护定值、实时工况、用户用电等数据，涵盖核心电网涉密信息与用户隐私信息。数据传输、存储、共享环节存在泄露、篡改、滥用风险，传统加密方式权限管控粗放、安全性不足，难以适配电力数据安全合规要求。

项目搭建联盟链与属性加密融合的数据安全防护体系，对变配电运维数据实施分级分类加密处理。针对涉控核心数据，采用多属性嵌套加密策略，绑定操作人员岗位权限、操作场景等属性信息，仅满足全部预设条件的授权人员可完成解密访问。实时监测数据、用户侧异构数据通过差异化加密与分片存储方式处理，规避单点数据泄露风险，数据隐私泄露风险系数可控制在0.14以下。

2. 动态容错的安全共享机制

电力运维工作存在多部门交叉协同的作业特征，各类运维数据会在不同网络节点、不同岗位人员之间流转共享^[2]。系统依托多项式拆分算法，对加密后的运维数据做拆分处理，分散存储于

联盟链内部各个核心服务节点。平台可结合节点在线运行状态、外部网络攻击强度两类核心指标，动态调整数据重构所需的校验阈值，适配不同安全等级的运行场景。

三、技术应用效果分析及管理创新路径

（一）技术应用效果分析

各类新型安全防控技术逐步落地县域配电网改造项目之后，现场原有安全防控体系架构得到全方位更新，传统运维模式存在的各类短板得到有效弥补。依托智能传感采集体系与多源数据融合分析手段，系统对现场设备隐患的识别精度达到97.2%，针对电压越限、线路过载等高频多发的电网异常工况，预警前置时长可达12分钟，整体系统误报概率稳定控制在2.1%以下。

边缘计算轻量化处理模式，将单样本数据推理时延压缩至56ms，完全适配现场实时监测。

新型技术体系落地虽显著提升电网运维质效，现场实际应用过程中依旧显现多处亟待优化的技术短板。终端设备大规模并网接入的场景下，边缘计算节点承载的运算压力持续上升，复杂工况产生的海量异构数据会带来小幅处理延迟。高频次、高密度的数据交互场景，会提升属性加密算法的整体运算成本。各类传感终端在极端恶劣工况下的长期运行稳定性，依旧存在可优化空间，以上问题均作为后续技术迭代、管理模式升级的核心优化方向。

（二）技术管理创新路径

1. 构建技术分级落地适配机制

电网变配电场景的技术落地，不适宜采用统一标准化的套用模式，需结合设备重要等级、区域电网运行特质、新能源并网渗透率等多重条件，划分差异化的技术应用场景^[3]。核心枢纽变电设备承担电网关键输电配电任务，需配套部署高精度光学传感、构网型调控、数据加密防护等高精尖技术，筑牢核心设备运行安全底线。台区终端配电装置以常规运维保障为主，优先选用轻量化监测、简易边缘数据分析技术，合理压缩整体运维投入成本。

外界季节环境变化、电网实时运行工况波动，都会影响技术应用的实际成效，需对应调整各类技术运行参数^[4]。汛期多雨潮湿、新能源大发出力峰值阶段，重点强化设备温湿度监测、电网电压波动预警的配置力度。电网运行平稳时段，可适度下调数据

采样频次，降低终端设备能耗损耗。差异化分级适配模式，能够平衡安全防控质量与运维经济成本，规避技术盲目应用、电力运维资源无效消耗的问题。

2. 搭建技管融合协同运维体系

现阶段电力运维工作普遍存在技术应用与现场管理相互割裂的问题，技术落地缺乏管理约束、管理工作缺少技术支撑。需将智能状态监测、故障智能诊断、数据安全防护等成熟技术体系，深度融入运维巡检、隐患排查、应急处置等全业务流程。依托现场智能感知终端采集的海量运行数据，建立电子化设备健康档案，实时更新设备老化状态、故障处置记录、核心运行参数，替代传统纸质台账的粗放式管理手段^[5]。

边缘终端实时反馈的设备运行数据，可作为运维计划优化调整的核心依据。对故障高发、风险等级偏高的设备点位，适当增加人工巡检与智能核查频次，对运行状态稳定、风险偏低的设备执行常规例行巡检制度。运维决策依托真实数据支撑，技术落地遵循标准化管理规范，构建技术赋能运维、管理规范技术落地的闭环运行模式^[6]。

3. 建立动态风险管控考核体系

结合变配电运行安全技术指标，建立贴合现场实际的考核管控机制，摒弃传统以故障次数为核心的单一考核模式。将隐患预警准确率、故障处置效率、数据安全合规性、设备运行稳定性等技术指标，纳入运维考核体系。

依托智能监测数据自动统计运维成效，实现考核数据透明化、精准化。针对技术应用不到位、隐患处置不及时、数据操作不规范等问题，落实对应考核整改措施，通过制度约束倒逼运维标准化、技术应用规范化，持续夯实变配电运行安全基础。

四、结束语

新型电力系统转型进程中，变配电运行安全防控的核心逻辑，已经从传统设备故障处置，转向智能化预判、精细化管控、全维度防护的综合模式。各类新型安全技术的落地应用，可有效破解新能源接入带来的工况波动、隐患隐蔽、数据风险等行业难题。贴合现场实际优化技术适配模式、革新运维管理体系，能够持续提升变配电系统运行稳定性，为新型电力系统安全、高效、低碳运行提供坚实保障。

参考文献

- [1] 唐述，吴敬静. 人工智能技术在电力系统优化运行与控制中的应用分析 [J]. 科技创新与应用，2026, 16(10): 181-184.
- [2] 赵一畅，张楠楠. 面向新型电力系统的多源异构数据驱动式配电网隐患智能感知研究 [J]. 电气应用，2026, 45(1): 33-39.
- [3] 孙辉，朱振洪，刘文建. 面向新型电力系统的10 kV配电线路小电流多点多态单相接地故障区段定位方法 [J]. 电测与仪表，2026, 63(4): 163-172.
- [4] 李福廷，邱朝明，梁东贵. 基于联盟链和属性加密的电力大数据安全共享技术研究 [J]. 电测与仪表，2026, 63(4): 99-111.
- [5] 王勇，陈义龙，陈俊，孔令明，陈勉之，李晓，蔡谦，盛戈峰. 面向新型电力系统的电力设备状态感知关键技术及其应用展望 [J]. 全球能源互联网，2026, 9(1): 85-100.
- [6] 辛焕海，杨永恒，付强. 构网型技术主动支撑新型电力系统运行与控制 [J]. 电力工程技术，2025, 44(2): 2-21.