

智能变电站运维技术的现状与未来发展趋势

杨智超

国网四川省电力公司超高压分公司 四川 南充 637000

摘要：智能变电站运维技术依托物联网、大数据、云计算及人工智能等先进技术，实现对变电站设备的实时监测、故障预警、自动巡检及数据分析等功能，显著提升了运维效率与准确性，降低了运维成本。当前，智能变电站运维技术已广泛应用于电力行业，展现出良好的兼容性和适应性。未来，随着技术的持续创新和标准化建设的加强，智能变电站运维技术将朝着更高效、智能化、平台化的方向发展，为电力系统的安全稳定运行提供有力保障。

关键词：智能变电站；运维技术；现状；未来发展趋势

引言：随着全球能源结构的不断优化和电力系统的智能化升级，智能变电站已成为电力系统的重要组成部分。其通过集成先进的传感、通信、计算机和控制技术，实现了变电站的自动化、智能化运行，极大地提高了电力系统的运行效率和安全性。当前，智能变电站运维技术正处于快速发展阶段，展现出了强大的生命力和广阔的应用前景。本文将深入探讨智能变电站运维技术的现状，并展望其未来发展趋势，以期为电力行业的技术创新和发展提供参考。

1 智能变电站运维技术现状

1.1 数据采集与处理技术

（1）电子式互感器的应用及优势：相较于传统电磁式互感器，电子式互感器无需铁芯，有效避免磁饱和与铁磁谐振问题，在35kV及以上电压等级变电站中应用占比逐年提升。其具备宽测量范围、低功率损耗特性，还能直接输出数字信号，减少信号传输损耗，为后续数据处理提供精准原始数据。（2）合并单元的工作原理及功能：合并单元作为数据采集核心环节，通过接收电子式互感器输出的数字信号，按照IEC61850标准进行同步处理与合并，将多组数据整合为统一格式后传输至二次设备。同时，它具备数据校验与异常报警功能，当检测到数据丢失或错误时，能快速发出预警，保障数据传输完整性。（3）数据采集的精度与实时性分析：当前主流设备数据采集精度可达0.2级，满足高精度计量与保护需求。在实时性方面，采用采样值传输模式，数据传输延迟控制在10ms以内，可实现对电网故障的快速响应，但在多设备并发传输场景下，仍需优化带宽分配以避免延迟波动^[1]。

1.2 设备状态监测与故障预警

（1）在线监测技术的应用：变压器油中溶解气体、断路器机械特性、GIS局部放电等在线监测系统已广泛

应用，通过传感器实时采集设备运行参数，替代传统定期巡检，实现设备状态的持续跟踪，减少人工运维成本与漏检风险。（2）智能终端的测量与控制功能：智能终端集成测量、控制、保护功能于一体，可直接采集开关位置、模拟量数据，并执行遥控操作，简化二次回路接线，提高操作可靠性，同时支持数据双向传输，为远程运维提供支持。（3）故障预警系统的实现与效果评估：基于大数据与AI算法的故障预警系统，通过分析历史数据与实时参数，建立设备故障模型，提前识别潜在故障。实际应用中，故障预警准确率可达85%以上，有效缩短故障处理时间，提升变电站供电可靠性。

1.3 通信网络与技术标准

（1）光纤以太网在智能变电站中的应用：光纤以太网凭借高带宽、抗干扰能力强的优势，成为智能变电站主要通信方式，实现采样值、开关量信号的高速传输，目前1000M光纤以太网已成为主流配置，满足多设备并发通信需求。（2）IEC61850标准与数字化保护装置：IEC61850标准统一了智能变电站设备通信协议，实现不同厂家设备的互联互通，数字化保护装置基于该标准开发，具备信息共享、逻辑组态灵活的特点，提升保护系统的适应性与扩展性。（3）信息交互的及时性与可靠性分析：通过网络冗余配置与优先级调度技术，信息交互平均延迟控制在5ms以内，满足保护装置快速动作要求。同时，采用CRC校验、重传机制等措施，降低数据传输错误率，信息交互可靠性可达99.99%以上。

1.4 二次设备集成化与智能化

（1）二次设备集成化程度的提高：传统分散的保护、测控装置逐渐被集成化设备替代，如一体化保护测控装置、智能控制柜等，减少设备数量与占地面积，降低设备间接线复杂度，提升系统稳定性。（2）保护配置的智能化与集成化：保护配置支持在线修改与自适应调

整,可根据电网运行方式自动优化保护定值,同时集成过流、零序、差动等多种保护功能,实现对设备的全面保护,减少保护装置类型与维护难度^[2]。(3)空间节省与运维效率提升:集成化设备使二次设备室空间占用减少30%-50%,同时设备模块化设计便于检修更换,结合远程运维技术,运维人员无需现场操作即可完成参数配置与故障排查,运维效率提升40%以上。)

2 智能变电站运维技术的关键问题分析

2.1 技术挑战与瓶颈

(1)数据处理的复杂性与实时性要求:智能变电站运行中产生海量多源数据,涵盖设备参数、工况信息等,数据维度复杂且格式多样,增加处理难度。同时,电网故障处理需毫秒级响应,当前数据处理系统在高并发场景下,易出现数据拥堵,难以完全满足实时性需求,影响故障预警与决策效率。(2)设备兼容性与互操作性难题:不同厂家设备遵循的技术标准存在细微差异,即使基于IEC61850标准,在协议细节、功能实现上仍有偏差,导致设备间数据交互不畅。部分老旧设备未完成数字化改造,与新设备无法兼容,形成“技术孤岛”,阻碍运维系统整体协同运作。(3)网络安全与数据保护问题:智能变电站依赖网络传输数据,易遭受黑客攻击、病毒入侵等威胁。一旦通信网络被破坏,可能导致数据泄露、设备失控,影响电网安全运行。此外,数据存储与共享过程中,隐私保护与权限管理机制不完善,存在数据被篡改的风险。

2.2 运维人员的技能需求与挑战

(1)新技术应用与技能培训:智能变电站引入大数据、AI、数字化保护等新技术,对运维人员技能提出更高要求。现有人员多熟悉传统运维模式,对新技术的原理、操作及故障排查能力不足。而技能培训体系尚未完全成熟,培训内容更新滞后于技术发展,导致人员技能提升缓慢。(2)运维决策的支持系统需求:当前运维决策多依赖人员经验,缺乏高效的支持系统。面对海量数据,人员难以快速挖掘关键信息、精准判断设备状态,易出现决策偏差。亟需智能化支持系统辅助分析数据、生成决策建议,但现有系统的准确性与实用性仍需提升。(3)应急响应与故障处理能力提升:智能变电站故障类型更复杂,且故障影响范围广。运维人员需在短时间内定位故障、制定解决方案,但现有人员应急处置经验不足,面对突发故障时反应迟缓。同时,跨部门协同机制不健全,故障处理过程中易出现沟通不畅,延误抢修时间。

3 智能变电站运维技术的未来发展趋势

3.1 高度智能化与自主运维

(1)基于大数据与AI的故障诊断:未来将深度融合大数据与AI技术,通过构建多维度设备故障特征库,结合实时采集的运行数据,实现故障的精准定位与根源分析。AI算法会持续自主学习历史故障案例,不断优化诊断模型,将故障识别准确率提升至95%以上,减少人工误判,提前规避潜在风险。(2)自主巡检与远程监控技术的发展:搭载AI视觉与多传感器的智能巡检机器人将全面替代人工巡检,可在复杂环境下自主规划路径,实时采集设备外观、温度、声音等数据。同时,远程监控系统将实现全景化、高清化监控,支持多终端实时调取数据,运维人员无需到现场即可完成设备状态评估^[3]。

(3)运维决策的智能化与自动化:依托数字孪生技术构建变电站虚拟模型,结合实时数据模拟设备运行状态,智能生成运维方案。当设备出现异常时,系统可自动触发检修流程,调度备品备件与运维资源,实现从故障预警到处置的全流程自动化,大幅缩短运维周期。

3.2 与分布式能源的融合

(1)接纳大规模新能源接入的能力提升:通过优化变电站拓扑结构与控制策略,增强对风电、光伏等新能源发电波动性的适应能力。配置灵活的储能接口与功率调节装置,实现新能源发电的平稳接入,避免对电网电压、频率造成冲击,保障电网稳定运行。(2)清洁能源消纳与电网优化的协同:利用智能调度算法,结合区域负荷需求与新能源发电预测数据,动态调整清洁能源消纳比例。同时,通过变电站与分布式能源的信息交互,实现电网潮流优化,减少弃风弃光现象,提升能源利用效率。(3)智能电网与能源互联网的构建:智能变电站将成为能源互联网的关键节点,通过标准化通信协议与分布式能源、用户侧设备互联互通。实现电能、信息、业务的协同管理,构建“源网荷储”一体化系统,推动智能电网向综合能源服务平台转型。

3.3 技术创新与标准化建设

(1)5G技术在智能变电站中的应用展望:5G的低时延、大带宽特性将解决变电站多设备并发通信瓶颈,支持高清视频监控、远程控制等业务的高效开展。同时,5G+边缘计算可实现数据本地化处理,进一步降低传输延迟,满足故障快速响应需求。(2)物联网与智能变电站的深度融合:通过部署海量物联网传感器,实现设备全生命周期状态感知,从传统的“定期维护”转向“状态维护”。传感器数据与设备管理系统无缝对接,为运维提供更全面、精细的数据支撑,提升设备管理精度。(3)技术标准的统一与规范化推进:行业将进一步完善IEC61850标准体系,统一设备接口、通信协议与数据格

式,消除不同厂家设备的兼容壁垒。同时,制定智能巡检、AI诊断等新技术的应用标准,规范运维流程,推动智能变电站运维技术规模化、标准化发展^[4]。

4 案例分析与实践探索

4.1 我国智能变电站运维技术案例

4.1.1 成功案例分享与经验总结

国网江苏某500kV智能变电站,是国内首批“AI+全场景运维”示范项目。该站构建多维度数据中台,整合电子式互感器、在线监测系统等12类设备数据,通过深度学习算法建立故障诊断模型,实现变压器局部放电、断路器机械故障等隐患预警准确率达94%。同时,部署搭载红外热成像与声纹识别的智能巡检机器人,结合5G+边缘计算,实现巡检数据实时回传与分析,人工巡检工作量减少60%,年运维成本降低42%。其成功经验在于:一是坚持“数据驱动”,打破设备厂商数据壁垒,实现全站数据互通;二是采用“试点-优化-推广”路径,先在关键设备验证技术可行性,再逐步扩展;三是建立“技术专家+运维人员”协同机制,确保AI系统与现场运维高效衔接。

4.1.2 失败案例分析与教训汲取

某省220kV智能变电站数字化改造项目曾出现重大运维事故。改造中因未严格校验设备兼容性,采用3家厂商的保护装置与合并单元,虽均声称符合IEC61850标准,但实际通信协议细节存在差异,导致投运后1个月内发生4次数据中断,最长一次造成线路保护误动,停电2.5小时。此外,运维团队仅接受2天新系统培训,故障发生时无法快速定位问题,延误抢修。该案例教训深刻:一是前期规划需强化标准落地,必须开展设备联调测试,避免“标准兼容但实际不互通”;二是技术改造后需开展沉浸式实操培训,而非理论讲解;三是需建立设备兼容故障应急预案,配备冗余通信链路。

4.2 实践探索与技术创新实例

4.2.1 新技术应用试点项目介绍

南网广东试点“数字孪生+区块链”智能变电站项目,在110kV变电站搭建1:1虚拟孪生体,实时映射设备

运行状态,支持模拟不同负荷下的电网响应,提前优化运维方案。同时,利用区块链技术存储设备运维记录、故障数据,实现数据全程可追溯、不可篡改,解决传统纸质记录易丢失、难核验问题。试点1年数据显示,设备故障预判准确率提升38%,运维记录查询效率提高80%,为新能源接入后的运维管理提供技术支撑。

4.2.2 运维模式创新与效果评估

国网浙江推行“区域运维中心+无人值守变电站”模式,将省内23座110kV智能变电站划归3个区域中心管理,中心通过远程监控系统实时监测设备状态,仅保留少量现场值守人员。同时,建立“智能预警-自动派单-快速抢修”闭环机制,结合无人机巡检与移动运维终端,实现故障处置“15分钟响应、1小时到场”。该模式实施后,运维人员编制减少55%,故障平均修复时间从4.8小时缩短至1.9小时,区域供电可靠性提升至99.992%,验证了集约化运维的高效性。

结束语

智能变电站运维技术作为电力系统智能化升级的关键一环,当前已展现出强大的技术实力和广泛的应用前景。随着技术的不断进步和创新,智能变电站运维将更加智能化、自主化,为电力系统的稳定运行提供有力保障。展望未来,我们有理由相信,智能变电站运维技术将持续引领电力行业的技术变革,推动电力系统朝着更加高效、可靠、绿色的方向发展,为人类社会的可持续发展贡献更多力量。

参考文献

- [1]史宇伟,马立凡.智能技术在电力设备运维中的应用[J].2024,(06):86-87.
- [2]蔡文智.智能电力设备关键技术及运维[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2022,(07):74-75.
- [3]姜园园.智能变电站通道安全运维方法研究[J].技术与市场,2024,(09):83-85.
- [4]余越,贺丰婕.智能变电站通信安全技术研究[J].上海电气技术,2025,(11):123-124