

变电运维智能化远程管理系统研究

李鹏宁 姚自阳 李营彪

国网新疆电力有限公司哈密供电公司 新疆 哈密 839000

摘要：随着电网规模扩大与结构复杂化，传统人工运维模式已难以满足现代电力系统对高可靠性、高效率和高安全性的要求。融合物联网、大数据、人工智能及5G等技术的变电运维智能化远程管理系统，成为电网数字化转型的核心引擎。本文系统探讨其理论基础、四层架构（感知层、网络层、平台层、应用层）、关键技术（多源数据融合、智能诊断、风险预警、数字孪生）及应用价值。研究表明，该系统可显著提升运维效率、保障电网安全、优化资源配置并改善作业环境。同时，文章指出当前仍面临数据安全、标准不统一、技术成熟度不足与人才短缺等挑战，并展望其向自主化、协同化与生态化发展的趋势，为构建新一代智能变电站运维体系提供理论参考。

关键词：变电运维；智能化；远程管理；物联网；人工智能

引言

变电站是电力系统的关键枢纽，其安全高效运行关乎电网可靠性与社会经济稳定。在“双碳”目标和新型电力系统建设推动下，电网向特高压、交直流混联、源网荷储互动方向快速发展，变电站规模与复杂度激增，传统依赖人工巡检、手动操作和被动抢修的运维模式已难以为继，存在效率低、盲区多、响应慢等缺陷。为此，变电运维智能化远程管理系统应运而生。该系统融合智能感知、高速通信与云边协同计算，实现设备状态的实时、全面、精准采集与分析，支撑全景监视、智能诊断、主动预警和远程控制，是对传统模式的革命性升级，也是构建坚强智能电网和推进企业数字化转型的战略基石。深入研究其架构、技术与应用，对提升电网资产健康水平与运营效能具有重要意义。

1 传统运维模式的局限与智能化转型的必然性

1.1 传统运维模式的主要痛点

传统变电运维模式存在四大核心问题：一是效率低下，人工巡检周期长、频次低，难以连续监控设备状态，隐患易在间隔期恶化；大量重复性抄录工作挤占分析研判时间。二是安全风险高，运维人员频繁进入高压、强电磁等危险区域，尤其在恶劣天气或夜间，人身安全威胁显著增加。三是信息孤岛与决策滞后，设备数据分散于各系统或纸质记录，缺乏整合与关联分析，故障判断依赖个人经验，科学性和时效性不足。四是资源调配粗放，因缺乏对设备健康状态的全局、前瞻掌握，人力与备件等资源分配被动，难以支撑精准化、预防性维护，易造成浪费或保障缺口。这些问题严重制约了电网精益化与本质安全建设。

1.2 智能化远程管理的驱动因素

面对上述痛点，变电运维向智能化、远程化转型已成为不可逆转的趋势，其驱动力主要来自三个方面。第一，技术驱动。物联网（IoT）技术使得低成本、低功耗的传感器得以大规模部署，实现了对设备状态的泛在感知；5G/光纤等高速通信技术为海量数据的实时回传提供了通道保障；云计算和边缘计算提供了强大的算力支撑；而人工智能（AI）则赋予了系统从数据中学习规律、识别模式、预测未来的智能。这些技术的成熟与融合，为构建智能化远程管理系统奠定了坚实的技术基础^[1]。第二，业务驱动。电网企业面临着降本增效、提质增效的双重压力，亟需通过技术创新来优化运维模式，降低人工成本，减少非计划停运，提升供电可靠性指标（如SAIDI、SAIFI），以满足日益严格的监管要求和用户期望。第三，战略驱动。国家层面大力推进能源互联网和新型电力系统建设，要求电网具备更强的灵活性、互动性和自愈能力。作为电网的“神经末梢”，变电站的智能化水平直接决定了整个系统的智能化程度，因此，建设智能化远程运维系统是落实国家战略、抢占未来发展制高点的必然选择。

2 变电运维智能化远程管理系统的体系架构

一个完整的变电运维智能化远程管理系统，通常采用分层解耦、模块化设计的思路，可划分为四个逻辑层次：感知层、网络层、平台层和应用层。

2.1 感知层：全域泛在的智能感知

感知层是整个系统的数据源头，其核心任务是实现对变电站内一次设备（如变压器、断路器、隔离开关、互感器）、二次设备（如继电保护装置、测控装置）及辅助设施（如安防、消防、环境监测）的全方位、全天候、全要素状态感知。这主要通过部署各类智能终端来

实现,包括但不限于:用于监测设备温度、局部放电、油色谱等关键状态量的在线监测装置;用于替代人工视觉巡检的高清视频摄像头、红外热像仪和巡检机器人;用于采集电气量(电压、电流、功率)的智能电表和测控单元;以及用于环境安全监控的温湿度、水浸、烟雾、SF₆气体浓度等传感器。这些终端共同构成了一个覆盖变电站全域的“神经末梢”网络,为上层应用提供丰富、实时、准确的原始数据。

2.2 网络层:高速可靠的通信通道

网络层负责将感知层采集的海量数据安全、高效、低延时地传输至平台层。鉴于变电站对通信可靠性和安全性的极高要求,该层通常采用有线与无线相结合的混合组网模式。站内骨干网络普遍采用高带宽、低延迟、抗干扰能力强的工业以太网或光纤环网,确保关键控制指令和实时数据的稳定传输。对于移动巡检机器人、可穿戴设备等移动终端,则可利用5G专网或Wi-Fi 6等无线技术,提供灵活的接入能力。此外,网络层还需具备完善的安全防护机制,如物理隔离、防火墙、入侵检测、数据加密等,以抵御外部网络攻击,保障电力监控系统的安全。

2.3 平台层:数据融合与智能分析的中枢

平台层是系统的大脑和心脏,承担着数据汇聚、存储、处理、分析和共享的核心职能。它通常构建于云-边协同的计算架构之上。边缘计算节点部署在变电站本地,负责对感知层上传的原始数据进行初步的清洗、过滤、压缩和实时分析,例如执行简单的阈值告警、视频流的智能分析(如识别表计读数、设备外观异常)等,以减轻云端负担并满足毫秒级响应的控制需求^[2]。云端平台则拥有近乎无限的存储和计算资源,用于汇聚来自多个变电站的数据,进行更复杂的跨设备、跨站点、跨时段的深度挖掘与智能分析。平台层的核心功能包括统一的数据湖/数据仓库建设、微服务化的业务组件开发、强大的AI模型训练与推理引擎,以及标准化的API接口,为上层应用提供稳定、高效的服务支撑。

2.4 应用层:面向业务的价值呈现

应用层直接面向最终用户,将平台层的分析结果转化为直观、易用、可操作的业务功能。其主要应用模块包括:(1)全景可视化监控:通过三维数字孪生、GIS地图等方式,直观展示变电站的物理布局、设备实时状态、告警信息等,实现“一图总览”。(2)智能巡检管理:自动生成最优巡检路径,调度机器人或无人机执行任务,并自动识别和分析巡检结果,形成电子化巡检报告。(3)设备状态评估与诊断:综合运用多种数据源,

对设备健康状态进行量化评分,并精确诊断故障类型、定位故障部位、评估故障严重程度。(4)风险预警与辅助决策:基于历史数据和AI模型,预测设备未来可能出现的故障或性能劣化趋势,并提前发出预警;在故障发生时,为运维人员提供最优的处置方案建议。(5)远程操作与应急指挥:在授权和安全校验的前提下,支持对部分开关、刀闸等设备进行远程分合闸操作,并在应急事件中提供统一的指挥调度平台。

3 系统运行的核心支撑技术

3.1 多源异构数据融合技术

变电站产生的数据类型繁杂(结构化、半结构化、非结构化)、来源多样(在线监测、SCADA、巡检图像、日志文件)、时间尺度不一。多源异构数据融合技术旨在打破数据壁垒,通过数据清洗、格式转换、时空对齐、特征提取等手段,将这些分散的数据整合成一个逻辑上统一、语义上一致的数据视图,为后续的智能分析提供高质量的数据基础。

3.2 设备状态智能诊断技术

这是系统智能化的核心体现。它利用机器学习(如支持向量机、随机森林)和深度学习(如卷积神经网络CNN、长短期记忆网络LSTM)等算法,从海量的历史和实时数据中自动学习设备正常与异常状态下的特征模式^[3]。当新数据输入时,模型能够快速、准确地判断设备是否存在故障,并进一步识别具体的故障类型(如变压器绕组变形、断路器机构卡涩)。相较于传统的阈值告警,智能诊断能发现更早期、更隐蔽的潜伏性缺陷。

3.3 风险预警与辅助决策技术

在状态诊断的基础上,系统通过构建预测性维护模型(如基于生存分析、Prophet时间序列预测等),可以预估设备剩余使用寿命(RUL)或下一次故障发生的概率。结合电网运行方式、负荷情况等因素,系统能够对风险进行量化评估和分级预警。辅助决策技术则是在故障或异常发生时,利用知识图谱、规则引擎或强化学习等方法,综合考虑安全规程、操作票流程、备品备件库存等约束条件,为运维人员生成一套或多套最优的应急处置预案,极大地缩短了决策时间。

3.4 数字孪生技术

数字孪生技术通过在虚拟空间中构建变电站物理实体的高保真、动态、实时的数字化镜像,实现了物理世界与信息世界的深度融合。这个虚拟模型不仅包含了设备的几何、物理属性,还集成了其实时运行数据和历史行为数据。运维人员可以在数字孪生体上进行仿真推演、故障复现、操作预演等,为实际运维工作提供强大

的可视化和交互式支持,是实现高级应用(如沉浸式培训、智能巡检路径规划)的重要载体。

4 系统应用的综合效益分析

4.1 提升运维效率与经济效益

系统通过自动化巡检、远程抄表、智能告警等功能,将运维人员从大量重复、低效的体力劳动中解放出来,使其工作重心转向数据分析、策略制定等高附加值活动,人均运维效率可得到数倍提升。同时,精准的预测性维护能够有效避免突发性故障导致的大规模停电损失和高昂的紧急抢修费用,并通过优化检修计划,延长设备寿命,降低全生命周期的运维成本。

4.2 增强电网安全与供电可靠性

系统实现了对设备状态的7x24小时不间断监控,能够比人眼更早、更准地发现潜在隐患,将故障消灭在萌芽状态,从根本上提升了变电站的本质安全水平^[4]。在故障发生后,快速的故障定位和智能的辅助决策能极大缩短故障隔离和恢复供电的时间,显著改善用户的用电体验,提升供电可靠性的关键指标。

4.3 优化人力资源配置与改善作业环境

系统大幅减少了运维人员进入高危区域的频次和时长,有效保障了人身安全。通过对人员技能、位置、任务的智能匹配与调度,实现了人力资源的最优配置。同时,远程化、集中化的监控模式,使得运维人员可以在舒适的集控中心完成大部分工作,极大地改善了传统模式下风吹日晒、夜以继日的艰苦作业环境。

5 面临的挑战与未来发展趋势

5.1 主要挑战

首先是数据安全与隐私保护。系统高度依赖网络,一旦遭受网络攻击,可能导致数据泄露甚至电网失控,因此必须构建纵深防御的安全体系。其次是标准规范不统一。不同厂家设备的通信协议、数据格式各异,给系统集成带来巨大困难,亟需建立统一的行业标准。再次是核心技术的成熟度。部分AI算法在复杂场景下的泛化能力和可解释性仍有待提高,数字孪生模型的构建与更新也面临成本和精度的平衡难题。最后是复合型人才短缺,既懂电力系统又精通IT、AI技术的跨界人才十分稀缺。

5.2 未来发展趋势

未来,该系统将朝着三个方向深化发展。一是更高层次的自主化。AI将从辅助决策走向自主决策,在特定场景下(如常规倒闸操作)实现“无人干预”的全自动闭环控制。二是更广范围的协同化。系统将不再局限于单个变电站,而是向上与调度主站、向下与配电网、横向与发电侧、用户侧实现数据贯通和业务协同,成为能源互联网的一个有机组成部分。三是更深层次的生态化。系统将开放平台能力,吸引第三方开发者共同构建丰富的应用生态,并探索基于设备健康数据的新型商业模式,如“运维即服务”(MaaS),推动产业链的价值重构。

6 结语

变电运维智能化远程管理系统代表了电力系统运维模式的根本性变革,是构建新型电力系统、实现电网企业高质量发展的关键支撑。本文系统地构建了其四层体系架构,深入剖析了多源数据融合、智能诊断、风险预警、数字孪生等核心支撑技术,并全面论证了其在提效、保安、降本、优环等方面的巨大价值。尽管在安全、标准、技术和人才等方面仍存挑战,但其向自主化、协同化、生态化发展的趋势不可阻挡。未来,随着相关技术的不断成熟与融合,一个更加智慧、高效、安全、绿色的变电运维新时代必将到来,为国家能源安全和社会经济发展提供坚强保障。

参考文献

- [1]何霞,惠得材,肖晶鑫.国网变电运维智能化远程管理系统的应用策略[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集(一).国网宁夏电力有限公司石嘴山供电公司,2025:19-20.
- [2]陈超,赵莹,牛晓程,等.智能化远程管理系统在变电运维中的应用[J].电子技术,2025,54(02):178-179.
- [3]张萌.变电运维智能化远程管理系统的应用[J].集成电路应用,2023,40(12):204-205.
- [4]朱子太.变电运维智能化远程管理系统的应用策略探究[J].现代工业经济和信息化,2023,13(08):163-165.