

变电运维数字化管理体系建设发展探析

王晓鹏 余虹洁 贾振威

国网新疆电力有限公司哈密供电公司 新疆 哈密 839000

摘要：在全球能源结构深刻变革与数字技术飞速发展的双重驱动下，构建现代化、智能化的电力系统已成为保障国家能源安全、推动经济社会高质量发展的核心战略。作为电网运行的关键节点，变电站的运维管理模式正经历一场由传统人工经验驱动向数据智能驱动的深刻转型。本文旨在系统性地探析变电运维数字化管理体系的建设与发展路径。文章首先从宏观政策背景与行业需求出发，阐述了数字化转型的必然性与紧迫性；其次，深入剖析了该体系的核心内涵、目标愿景及多层次架构模型，并详细论述了支撑其运转的关键技术集群；再次，探讨了在体系建设过程中面临的核心挑战，并提出了相应的对策建议；最后，对体系未来的演进趋势进行了展望，旨在为我国变电运维领域的数字化、智能化、精益化发展提供理论参考与实践指引。

关键词：变电运维；数字化管理；体系建设；人工智能；物联网

引言

电力是现代社会的基石，变电站堪称其“心脏”。随着新型电力系统加速构建，新能源高比例接入使电网结构更复杂、运行特性更多变，传统依赖人工巡检、经验判断的运维模式已难以为继，暴露出响应滞后、效率低下、成本高、安全隐患突出等问题。与此同时，物联网、大数据、云计算、人工智能和5G等数字技术迅猛发展，正深刻重塑能源行业。国家政策亦明确要求加快电网全环节、全要素数字化智能化升级，提升设施全生命周期管理水平。在此背景下，构建科学、系统、高效的变电运维数字化管理体系，已成为保障能源安全、服务“双碳”目标、推动电力企业提质增效的关键路径。本文将围绕该体系的内涵、架构与实施路径展开深入探析，为行业数字化转型提供理论支撑与实践参考。

1 变电运维数字化管理体系的内涵与目标

变电运维数字化管理体系是融合信息技术与现代管理理念的系统工程，旨在构建覆盖设备全生命周期、贯穿运维全流程、连接人-机-物-环全要素的数字化平台，实现对变电站的全面感知、精准映射、智能分析与协同管控。其核心目标是在四大维度实现跃升：一是提升安全可靠，通过实时监测与智能预警，推动运维从“事后抢修”转向“事前预防”，降低故障率与停电风险；二是提高运维效率与质量，借助自动巡检、远程操作等手段替代重复性人工劳动，减少差错、释放人力，聚焦高价值决策；三是优化资产全生命周期价值，基于数据精准评估设备状态、预测寿命、制定检修策略，避免过度或不足检修，延长设备寿命、降低运维成本；四是支撑科学管理决策，依托数据分析提供全景洞察与前瞻预

判，实现资源配置、应急响应和规划调整的智能化，推动决策从“经验驱动”向“数据驱动”转变。

2 变电运维数字化管理体系的架构模型

一个成熟的变电运维数字化管理体系，通常呈现出清晰的分层架构，各层之间职责分明、协同联动，共同构成一个有机整体。借鉴业界主流实践，该体系可划分为以下五个层次：

2.1 感知层

感知层是整个体系的神经末梢，负责采集变电站内外部环境的原始数据。它由部署在一次设备（如变压器、断路器、互感器）和二次设备（如保护装置、测控单元）上的各类传感器、在线监测装置、高清视频摄像头、智能巡检机器人、无人机以及环境监测设备（温湿度、水浸、烟雾等）构成^[1]。这些设备如同无数个“感官”，7x24小时不间断地捕捉设备的电气参数、机械状态、声纹、热像、外观图像以及环境信息，为上层应用提供丰富、实时、多维的原始数据流，构成了整个数字化体系赖以存在的数据根基。

2.2 网络层

网络层扮演着“信息高速公路”的角色，负责将感知层采集的海量数据安全、可靠、低延时地传输至处理中心。其技术选型需兼顾有线与无线、公网与专网。站内通常采用工业以太网、EPON等有线技术保证关键数据的高可靠传输；对于移动终端、机器人等，则广泛采用Wi-Fi 6、5G专网或LoRa等无线技术。尤为重要的是，必须严格遵循《电力监控系统安全防护规定》等法规标准，通过纵向加密、横向隔离等安全措施，构建坚固的网络安全防线，确保生产控制大区（I/II区）与管理信息

大区（III/IV区）之间的数据交互安全可控，为整个体系的稳定运行提供坚实的通信保障。

2.3 平台层

平台层是体系的“大脑”和“数据中心”。它主要包括边缘计算节点和云端大数据平台两部分。边缘计算部署于变电站本地，负责对感知层数据进行初步的清洗、过滤、聚合与实时分析，例如对红外热像进行即时温度异常判断，或对局部放电信号进行特征提取，这可以有效减轻云端负担，并对需要毫秒级响应的紧急事件做出快速处置^[2]。云端大数据平台则作为核心数据枢纽，接收并存储来自多个变电站的汇聚数据，具备强大的数据湖/仓能力，能够处理结构化、半结构化和非结构化数据，并提供统一的数据治理、数据服务API以及基础的计算资源，为上层应用开发提供坚实底座，是实现数据价值挖掘的核心引擎。

2.4 应用层

应用层是体系价值的直接体现者，面向不同业务场景提供丰富的智能化应用。它集成了智能巡视与状态监测、预测性维护与辅助决策、数字孪生与三维可视化以及一体化运维管理等核心功能。通过融合机器人、无人机、视频AI等技术，实现设备外观、表计读数、发热缺陷等的自动识别与诊断；运用机器学习算法，对设备历史数据进行深度挖掘，预测潜在故障，生成最优检修计划，并为调度、运维人员提供处置建议；构建变电站的高保真三维数字模型，与实时数据动态绑定，实现“虚实联动”，为远程监控、应急演练、辅助操作等提供直观、沉浸式的交互界面；同时，集成工单管理、缺陷管理、两票管理、应急管理等功能，实现运维业务的全流程线上化、标准化、闭环化管理，将数字化能力转化为实实在在的业务价值。

2.5 交互层

交互层是人机交互的窗口，决定了用户体验的好坏。它通过PC端Web应用、移动APP、大屏驾驶舱、AR/VR眼镜等多种终端形态，将应用层的服务以直观、易用方式呈现给各级用户，包括集控站值班员、现场运维人员、管理人员及决策者。这种多模态、个性化的交互方式，确保了信息的有效触达与指令的顺畅执行，使得复杂的数字化系统变得易于理解和操作，从而极大地提升了用户的满意度和工作效率。

3 支撑体系运转的关键技术集群

3.1 物联网（IoT）与泛在感知技术

物联网技术是实现设备全面互联、状态全面感知的基础。通过在设备上部署低成本、高可靠的传感器，并

建立统一的物模型与接入标准（如遵循IEC 61850），可以打破设备间的信息壁垒，形成覆盖全站的“感知一张网”。这使得海量、异构的设备数据得以被统一采集、描述和管理，为后续的智能分析提供了可能，是整个体系感知能力的物理载体。

3.2 大数据与云计算技术

变电站产生的数据具有典型的“4V”特征（Volume, Velocity, Variety, Veracity）。云计算提供了弹性可扩展的计算与存储资源池，解决了传统IT架构难以应对数据洪峰的问题。大数据技术则提供了从数据采集、存储、处理到分析挖掘的全套工具链，能够从PB级的历史与实时数据中提炼出有价值的知识，支撑预测性维护、能效优化等高级应用，是处理和驾驭海量数据洪流的核心技术支柱。

3.3 人工智能（AI）与机器学习

AI是赋予数字化体系“智慧”的核心引擎。计算机视觉技术被广泛应用于视频监控中的人员行为识别、安全帽/工装穿戴检测、设备外观缺陷识别以及表计自动读数等场景。深度学习则用于对变压器油色谱、局部放电、振动等复杂信号进行模式识别与故障分类，其准确率远超传统阈值告警方法。自然语言处理可用于自动生成巡检报告、解析设备说明书、构建智能知识库问答系统^[3]。而知识图谱技术则将设备、部件、故障现象、处理方案等实体及其关系结构化，形成运维领域的专业知识网络，支撑更复杂的因果推理与决策，使系统具备了类人的认知与推理能力。

3.4 数字孪生（Digital Twin）技术

数字孪生通过构建物理变电站的虚拟镜像，实现了物理世界与数字世界的双向闭环。它不仅是三维可视化的载体，更是集成了几何、物理、规则、行为等多维模型的综合仿真体。通过与实时数据的驱动，数字孪生体可以模拟设备在不同工况下的运行状态，甚至进行“假设分析”（What-if Analysis），为运维策略的优化和应急方案的推演提供强大支持，成为连接物理实体与数字世界的桥梁。

3.5 标准化与互操作性技术

缺乏统一的标准是制约数字化体系规模化推广的最大障碍之一。国际标准IEC 61850为变电站自动化系统定义了统一的通信架构、数据模型和服务接口，是实现不同厂商设备“即插即用”、信息无缝共享的基石。在国内，DL/T 860系列标准等同采用了IEC 61850，为我国数字化变电站的建设提供了重要规范。未来，还需在数据格式、API接口、安全协议等方面进一步完善标准体系，

打通从设备层到应用层的全链条,确保整个生态的开放与兼容。

4 体系建设面临的挑战与对策

4.1 数据安全与网络安全挑战

随着大量关键生产数据上网、上云,网络安全边界被极大拓展,攻击面也随之增加。勒索软件、APT攻击等高级威胁对电网安全构成严峻挑战。对此,必须坚持“安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证”的十六字方针,构建纵深防御体系^[4]。一方面,强化技术防护,如部署新一代防火墙、入侵检测系统、数据加密与脱敏技术;另一方面,健全安全管理机制,加强全员网络安全意识培训,定期开展攻防演练,确保安全责任落实到人,将安全视为数字化转型的生命线。

4.2 标准不统一与系统孤岛问题

历史原因导致不同年代、不同厂商的设备与系统林立,数据模型各异,接口协议不一,形成了一个个“信息烟囱”和“数据孤岛”,严重阻碍了数据的贯通与价值的释放。解决之道在于以顶层设计为引领,强力推行IEC 61850等国际国内先进标准。对于存量系统,可通过部署数据中台或API网关,进行数据抽取、转换与标准化,逐步实现异构系统的互联互通。新建项目则必须严格执行统一的技术规范,从源头上杜绝新孤岛的产生,为数据的自由流动扫清障碍。

4.3 投资回报与效益评价难题

数字化转型投入巨大,但其带来的效益(如安全提升、效率增益)往往是隐性的、长期的,难以精确量化,这给项目的立项与持续投入带来了不确定性。应尽快建立科学的数字化转型效益评价指标体系。该体系不仅要包含传统的财务指标(如运维成本节约),还应纳入非财务指标,如设备可用率、平均故障修复时间(MTTR)、巡检覆盖率与准确率、人员效能指数等。通过多维度、量化的评估,清晰展现数字化转型的价值,为决策提供有力支撑,确保投入产出比的合理性。

5 未来发展趋势展望

5.1 从“数字化”迈向“智能化”与“自主化”

未来的体系将不仅仅是数据的记录者和展示者,更是具备自主学习、自主决策、自主执行能力的智能体。AI大模型(如电力行业的垂直大模型)的应用,将使

系统能够理解更复杂的业务逻辑,处理更模糊的现场信息,甚至能像经验丰富的老师傅一样,对未知故障进行推理和处置,实现从“辅助人”到“代替人”乃至“超越人”的跨越。

5.2 与新型电力系统的深度融合

变电运维数字化体系将不再是孤立的单元,而是作为新型电力系统数字化生态的重要组成部分。它将与源网荷储各环节的数字化平台深度协同,共享数据,联合优化。例如,根据上游新能源发电预测和下游负荷变化,动态调整变电站的运行方式和设备维护计划,实现全网资源的最优配置,从而更好地服务于高比例可再生能源消纳和电网灵活调节的需求。

5.3 绿色低碳成为内生要求

在“双碳”目标下,数字化体系自身的能耗也将受到关注。未来的发展将更加注重绿色计算,通过优化算法、采用低功耗硬件、利用清洁能源供电等方式,降低数字化基础设施的碳足迹,使其本身也成为绿色低碳发展的践行者,实现技术赋能与自身减排的双重目标。

6 结语

变电运维数字化管理体系的建设是一项复杂的系统工程,是技术、管理、人才、文化等多要素协同演进的过程。它不仅是应对当前挑战的权宜之计,更是塑造未来电力核心竞争力的战略之举。面对机遇与挑战并存的局面,电力企业必须保持战略定力,以开放的心态拥抱变革,以务实的举措稳步推进。通过持续的技术创新、标准引领、人才培养和机制优化,我们必将建成一个更加安全、高效、智能、绿色的变电运维新生态,为构建世界一流现代化电网、保障国家能源安全贡献坚实力量。

参考文献

- [1]刘朝阳,蔡荣,刘小昌,等.基于数字化提质增效的变电运维专业管理体系构建[J].农电管理,2024,(07):49-50.
- [2]梁海洋,于俊杰.以提质增效为目标的变电运维数字化管理模式探索[J].电气时代,2024,(02):95-98.
- [3]李探宇.基于数字化与智能化技术的变电运维策略分析[J].电子技术,2025,54(11):415-417.
- [4]王若愚.数字化技术在变电运维工作中的运用探究[J].中国战略新兴产业,2024,(33):75-78.