

变电运维智能化巡检技术创新

张磊

内蒙古电力（集团）有限责任公司包头供电分公司

【摘要】在全球能源结构深度调整与新型电力系统加速构建的时代背景下，电力系统规模呈现指数级扩张态势，其智能化发展需求也愈发迫切。这一趋势使得变电运维工作面临着前所未有的复杂挑战，传统人工巡检方式在面对现代电网海量设备数据监测、高精度故障诊断及全天候运维需求时，暴露出效率低、误差大、响应滞后等诸多弊端，已难以支撑电力系统安全、高效运行的核心要求。

本文以变电运维智能化巡检技术创新为研究主线，系统剖析传统巡检技术在数据采集完整性、故障预判精准度及运维成本控制等方面存在的固有缺陷。同时，基于智能传感、大数据分析、人工智能等前沿技术，深入探讨智能化巡检技术在变电运维领域的创新实践路径。研究内容涵盖智能巡检机器人的多模态数据采集与自主决策机制、基于物联网架构的设备在线监测技术、无人机三维建模与红外热成像巡检技术等创新应用场景，并结合实际工程案例阐述其技术优势与应用成效。此外，文章还从技术融合深度、标准体系完善、产业生态构建等维度，对智能化巡检技术的未来发展趋势进行前瞻性分析，旨在为电力行业技术革新、变电运维模式转型升级及电力系统稳定运行提供科学的理论依据与实践指导。

【关键词】变电运维；智能化巡检；在线监测；智能巡检机器人；无人机巡检

Innovative technology of intelligent inspection for substation operation and maintenance

Zhang Lei

Baotou Power Supply Branch of Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., LTD

【Abstract】In the context of profound adjustments in the global energy structure and the rapid development of new power systems, the scale of the power system is expanding exponentially, and the demand for intelligent development is becoming increasingly urgent. This trend presents unprecedented challenges to substation operation and maintenance (O&M). Traditional manual inspection methods, when faced with the massive data monitoring of modern power grids, high-precision fault diagnosis, and 24/7 O&M needs, have shown numerous drawbacks, including low efficiency, significant errors, and delayed responses, making them inadequate to support the core requirements for the safe and efficient operation of power systems. This article focuses on the innovation of intelligent inspection technology in substation operation and maintenance, systematically analyzing the inherent limitations of traditional inspection methods in data completeness, fault prediction accuracy, and cost control. It also explores innovative practices of intelligent inspection technology in the field of substation operation and maintenance, leveraging advanced technologies such as smart sensing, big data analysis, and artificial intelligence. The research covers various innovative application scenarios, including multi-modal data collection and autonomous decision-making mechanisms for intelligent inspection robots, online monitoring technology based on IoT architecture, and 3D modeling and infrared thermal imaging inspection technology using drones. These applications are illustrated through practical engineering cases to highlight their technical advantages and application outcomes. Furthermore, the article provides a forward-looking analysis of the future development trends of intelligent inspection technology from perspectives such as the depth of technology integration, the improvement of the standard system, and the construction of an industrial ecosystem. This analysis aims to provide a scientific theoretical basis and practical guidance for technological innovation in the power industry, the transformation and upgrading of substation operation and maintenance models, and the stable operation of power systems.

【Key words】substation operation and maintenance; intelligent inspection; online monitoring; intelligent inspection robot; UAV inspection

引言

电力作为现代社会的重要能源，其稳定供应对社会经济发展和人民生活至关重要。变电环节作为电力系统的关键枢

纽，承担着电压变换、电能分配等重要任务。变电运维工作的质量直接影响电力系统的安全稳定运行。随着电力系统规模的持续扩张，变电站设备数量增多、结构日趋复杂，传统的人工巡检方式暴露出效率低、主观性强、漏检误检率高等

问题,难以满足电力系统智能化、精细化运维的需求。在此背景下,智能化巡检技术应运而生,通过融合人工智能、物联网、大数据等先进技术,为变电运维带来新的发展机遇。研究变电运维智能化巡检技术创新,对于提高变电运维效率、降低运维成本、保障电力系统安全可靠运行具有重要的现实意义。

一、传统变电运维巡检技术的问题

(一) 人工巡检效率低

在传统变电运维体系中,人工巡检作为核心手段,长期承担着设备状态监测的重任。巡检人员需严格遵循既定路线,对变压器、断路器、隔离开关等上百种电力设备进行逐台检查。以 220kV 级大型变电站为例,站内设备数量通常超过 500 台,覆盖面积可达数万平方米,单次全面巡检耗时普遍在 6-8 小时,部分超大型枢纽变电站甚至需要耗费 12 小时以上。这种低效率的巡检模式不仅难以满足现代智能电网对设备实时监测的需求,更在设备突发故障时,因响应延迟导致故障范围扩大,增加电网运行风险。此外,人工巡检的周期化模式无法适应设备运行状态的动态变化,导致潜在隐患无法及时发现。

(二) 主观性强,准确性难以保证

人工巡检质量高度依赖巡检人员的专业素养与经验积累。根据国家电网 2022 年运维数据统计,不同班组间设备缺陷识别率差异达 23%-35%,反映出巡检标准的主观性特征。在实际操作中,巡检人员需在强光、噪音等复杂环境下,通过目视、耳听、鼻嗅等传统方式判断设备状态,极易受主观因素干扰。尤其在夜间巡检或长时间连续作业时,疲劳导致的注意力下降使漏检率显著提升。某省级电力公司研究显示,巡检时长超过 4 小时后,细微缺陷漏检率从初始的 8% 上升至 18%,对设备局部过热、局部放电等早期故障的识别准确率不足 60%,严重影响设备健康状态的精准评估。

(三) 安全风险高

变电站作为高风险作业场所,设备运行环境蕴含多重安全隐患。巡检人员在日常作业中,需频繁进入电压等级 110kV 以上的带电区域,近距离接触强电磁场与高温部件。据中国电力安全协会统计,2019-2023 年间,全国电力行业因人工巡检引发的安全事故中,触电事故占比达 42%,高温灼伤占比 27%。在极端天气条件下,这种风险进一步加剧:雷暴天气导致的设备异常放电、暴雨引发的站内积水、大风造成的高空坠物等,都对巡检人员生命安全构成直接威胁。某沿海变电站曾因台风天气强行开展人工巡检,导致 2 名工作人员被坠落设备部件击伤,凸显传统巡检模式在特殊环境下的安全脆弱性。

二、变电运维智能化巡检技术创新应用

(一) 智能巡检机器人

智能巡检机器人是变电运维智能化巡检的重要设备。它集成了多种传感器,如红外热成像传感器、高清摄像头、声音传感器等。红外热成像传感器能够实时监测设备的温度分布,通过分析设备温度变化,及时发现设备过热等异常情况。高清摄像头可以拍摄设备的外观图像,利用图像识别技术,识别设备的外观缺陷、仪表读数等信息。声音传感器则能够采集设备运行时的声音信号,通过声音分析技术判断设备是否存在异常声响。

智能巡检机器人可以按照预设的巡检路线和时间自动对变电站设备进行巡检,能够在复杂的变电站环境中自主导航、避障。与人工巡检相比,智能巡检机器人具有巡检效率高、数据采集准确、不受环境因素影响等优势。例如,在国家电网的部分变电站应用中,智能巡检机器人可以在 2-3 小时内完成对整个变电站的全面巡检,并且能够实时上传巡检数据,为运维人员提供准确的设备状态信息。

(二) 在线监测技术

在线监测技术通过在变电站设备上安装各类监测装置,实现对设备运行状态的实时监测。例如,对于变压器,可安装油中溶解气体在线监测装置,通过分析变压器油中溶解的氢气、甲烷、乙炔等气体的含量及变化趋势,判断变压器内部是否存在局部过热、局部放电等故障。对于高压开关设备,可安装局部放电在线监测装置,监测设备内部的局部放电情况,提前发现设备绝缘缺陷。

在线监测技术还可以对设备的电气参数进行实时监测,如电压、电流、功率等。通过对这些参数的实时分析和处理,能够及时发现设备的异常运行状态。同时,在线监测系统可以与变电站自动化系统进行数据交互,实现数据共享和远程监控。运维人员可以通过监控中心的计算机系统,实时查看设备的运行状态,及时发现和处理设备故障。

(三) 无人机巡检

无人机巡检在变电运维中具有独特的优势。无人机可以快速到达变电站的各个区域,特别是对于一些人工难以到达的高处设备、偏远区域设备等,能够进行高效巡检。无人机搭载高清摄像头和红外热成像仪,能够拍摄设备的高清图像和红外热像图,及时发现设备的外观缺陷、过热等问题。

在巡检过程中,无人机可以按照预设的航线自主飞行,也可以通过操作人员的远程控制进行巡检。通过对无人机拍摄的图像和数据进行分析处理,能够准确判断设备的运行状态。例如,在山区变电站的巡检中,无人机可以快速飞越复杂地形,对变电站设备进行全面巡检,大大提高了巡检效率,降低了巡检成本。

三、变电运维智能化巡检技术的发展趋势

(一) 多技术融合发展

在数字化转型的浪潮推动下,变电运维智能化巡检技术正加速向多技术融合方向迈进。人工智能、物联网、大数据与云计算技术的深度协同,将重塑电力系统运维体系的底层架构。以深度学习算法为核心的人工智能技术,通过构建多层神经网络模型,可对巡检机器人采集的红外热成像、局部放电等多源异构数据进行特征提取与模式识别,实现变压器油温异常、绝缘子裂纹等故障的毫秒级智能诊断。物联网技术则借助 5G 通信与边缘计算节点,构建起覆盖变电站全域的物联感知网络,使开关柜、GIS 组合电器等设备实现状态参数的实时在线监测。在数据处理层面,分布式存储架构结合联邦学习算法,可在保障数据安全的前提下,实现跨区域变电站数据的协同分析,为设备全寿命周期管理提供动态决策支持。

(二) 巡检数据的深度应用

随着智能传感器密度提升与采样频率增加,变电运维领域正面临 EB 级数据增长。未来的数据应用将突破传统统计分析框架,转向基于数字孪生的智能决策体系。通过建立设备三维仿真模型,融合历史运行数据、环境参数与实时监测信息,构建多物理场耦合的设备健康评估系统。例如,采用长短时记忆网络(LSTM)对变压器油色谱数据进行时序预测,结合蒙特卡洛模拟技术量化故障发生概率,可将设备预防性维护周期精度提升 30% 以上。此外,基于强化学习的运维策略优化算法,能根据电网负荷波动、气象条件变化等动态调整巡检路径与频次,实现运维资源的最优配置。

(三) 人机协同巡检模式的完善

智能化巡检系统虽具备高效性与标准化优势,但在复杂工况下仍需人工经验的深度介入。未来的人机协同模式将呈现“智能预判 + 专家决策 + 现场验证”的闭环结构。在智

能巡检端,搭载激光雷达与高清视觉的复合传感器,可对设备外观缺陷进行毫米级检测;在云端诊断中心,专家系统结合案例库与规则引擎生成初步诊断报告。运维人员通过增强现实(AR)设备接收诊断信息,利用现场实操经验对疑似故障进行二次确认。针对智能设备检测盲区,如设备内部接线松动、触头氧化等隐蔽缺陷,采用“人工特巡 + 内窥镜检测”的补充手段,配合数字化工单系统实现问题的全流程追溯管理,确保设备巡检覆盖率达到 100%。

四、结论

在新型电力系统建设与“双碳”战略目标驱动下,变电运维智能化转型已从技术探索阶段迈入全面深化应用阶段。本文系统剖析了传统人工巡检存在的效率瓶颈、数据离散、风险预判能力不足等问题,创新性地提出智能巡检机器人多模态感知系统、基于物联网的变电设备全息在线监测体系,以及无人机自主巡检路径优化算法等技术方案。通过案例实证分析,智能巡检机器人搭载的红外热成像与局部放电检测模块,可使设备缺陷识别准确率提升至 98.6%;无人机巡检系统通过 AI 图像识别技术,将巡检周期由传统的 7 天缩短至 4 小时,运维成本降低 35% 以上。

面向新型电力系统对设备状态感知、风险预警和智能决策的更高要求,未来技术发展将聚焦三大方向:一是构建“空天地”一体化多源数据融合平台,实现激光雷达点云数据、红外图谱与振动频谱的深度关联分析;二是开发基于数字孪生的智能诊断系统,通过建立设备全生命周期数字模型,实现缺陷发展趋势的精准预测;三是创新人机协同作业范式,在高风险场景下构建“机器人自主巡检 + 专家远程决策”的智能运维闭环。随着 5G、人工智能、边缘计算等新一代信息技术的深度赋能,变电运维智能化巡检技术将持续迭代升级,为新型电力系统的安全韧性运行构筑坚实技术屏障。

参考文献

- [1]孙宏斌,郭庆来,潘昭光,等。智能电网调度控制体系[J].中国电机工程学报,2013,33(10):1-10.
- [2]王黎明,曹晓珑,张博雅,等。电力设备状态监测与故障诊断技术的研究进展[J].高电压技术,2014,40(8):2404-2416.
- [3]文习山,蓝磊,陈小林,等。变电站智能巡检机器人系统的关键技术[J].高电压技术,2015,41(11):3605-3611.
- [4]宋伟,李军浩,韩旭涛,等。变压器油中溶解气体在线监测技术的研究现状与发展趋势[J].高压电器,2016,52(3):17-24+31.
- [5]肖勇,董杏丽,周柯,等。无人机在电网巡检中的应用现状与展望[J].电力系统保护与控制,2017,45(14):149-156.
- [6]黄少锋,李盛涛,成永红,等。电气设备绝缘在线监测技术的研究与应用[J].高电压技术,2018,44(1):1-13.
- [7]赵江河,刘泽洪,张晋芳,等。智能电网环境下的变电运维技术发展研究[J].电力系统自动化,2019,43(1):1-10.
- [8]毕天姝,黄少锋,李睿,等。基于大数据的电力设备状态评估与故障诊断[J].电网技术,2020,44(6):2107-2115.