

智能电网环境下变电站智能安防监控系统研究

范元明 王 峰 单世环
浙江大华技术股份有限公司 浙江 杭州 310052

摘 要：随着能源结构转型与数字技术革命的深度融合，智能电网已成为现代电力系统发展的核心方向。作为电网的关键节点，变电站的安全稳定运行直接关系到整个电力系统的可靠性。传统的安防监控模式已难以满足智能电网对高安全性、高可靠性和高效运维的严苛要求。本文聚焦于智能电网环境下的变电站智能安防监控系统，深入剖析了其研究背景与意义，梳理了国内外研究现状，并系统性地阐述了该系统的总体架构、核心功能模块及关键技术。在此基础上，并进一步探讨了未来发展趋势与面临的挑战。研究表明，融合物联网、人工智能、大数据等前沿技术的智能安防监控系统，能够实现对变电站物理安全、设备状态和运行环境的全方位、全天候、智能化感知与管控，是保障新型电力系统安全、推动电网数字化转型的基石。

关键词：智能电网；变电站；智能安防；监控系统；物联网；人工智能

引言

在“双碳”目标下，我国正加快构建以新能源为主体的新型电力系统，智能电网是其核心支撑，借助先进技术实现信息化、自动化与互动化。变电站作为电能传输分配枢纽，已从“能量中转站”变为集多流于一体的智能节点，其安全防护内涵扩展，除传统物理安全，还涵盖设备状态、内部环境参数及网络信息安全的综合监控。但传统变电站安防系统采用独立分散的子系统模式，信息孤岛严重，缺乏联动协同，依赖事后取证，无法事前预警和事中快速处置，面对复杂安全威胁力不从心，且人力巡检成本高、运维响应慢，制约电网高质量发展。因此，构建与智能电网深度融合的变电站智能安防监控系统意义重大，既能提升变电站本质安全，预防事故；又可支撑新型运维模式，降低成本、提高效率；还能为电网数据分析等提供基础数据，是实现电网全景感知与智慧运营的关键。

1 智能安防监控系统总体架构与功能设计

1.1 系统总体架构

智能电网环境下的变电站智能安防监控系统，应遵循“一体化设计、平台化集成、智能化应用”的原则，其总体架构可分为三个层次：

1.1.1 感知层（前端采集层）

这是系统的“感官”，负责全面采集变电站内外的各类信息。主要包括：（1）视频监控单元：部署高清网络摄像机、红外热成像仪、智能球机等，覆盖主控室、高压室、变压器区、周界围墙等所有关键区域，支持低照度、宽动态及智能聚焦功能，确保全天候清晰成像。（2）环境监测单元：部署温湿度传感器（精度可达

$\pm 0.3^{\circ}\text{C}/\pm 2\%\text{RH}$ ）、水浸传感器、烟雾探测器、SF₆/O₂气体浓度传感器、风速风向仪等，实时监测站内环境安全，并具备自诊断与异常上报能力。（3）安全防护单元：包括电子围栏、红外对射、震动光纤等周界入侵探测设备，以及门禁读卡器、生物识别装置（如指纹、人脸、掌静脉）等，实现多模态身份认证与高安全性出入控制^[1]。（4）智能巡检单元：可选配轨道式或轮式巡检机器人，搭载可见光、红外、局放、超声等多种传感器，执行预设或远程指令的精细化巡检任务，有效降低人工巡检频次与安全风险。

1.1.2 网络与平台层（数据处理与传输层）

这是系统的“神经中枢”，负责数据的汇聚、传输、存储与初步处理。（1）通信网络：采用工业级以太网或5G专网，构建高速、可靠、安全的数据传输通道，支持海量设备接入与低时延通信，同时具备网络冗余和故障自愈能力，保障系统连续运行。（2）综合应用平台：基于统一的信息一体化平台，集成各子系统功能。平台通常部署在站控层，包含视频管理服务器（VMS）、智能分析引擎、数据库、Web服务等模块。关键在于，该平台严格遵循DL/T 860（即IEC 61850）标准，对所有测控单元、视频终端、环境传感器等智能电子设备（IED）进行SCL（变电站配置语言）建模，实现GOOSE（通用面向对象的变电站事件）和SV（采样值）报文的标准化交互，从而彻底消除信息孤岛，实现真正意义上的即插即用与无缝集成。此外，平台还支持边缘计算能力，在前端完成部分AI推理任务，减轻中心负载并提升响应速度。

1.1.3 应用层（业务展现与决策层）

这是系统的“大脑”，面向用户提供直观、高效的交

互界面与智能应用。(1) 可视化监控: 提供三维全景地图、电子沙盘、BIM模型等可视化手段, 直观展示全站设备状态、人员位置、告警分布与安防态势, 支持多屏联动与VR沉浸式漫游。(2) 智能告警与联动: 对异常事件进行智能识别、分级告警(如一级紧急、二级预警、三级提示), 并自动触发预设的联动策略(如启动声光报警、联动摄像头跟踪、关闭相关区域门禁、开启排风系统等), 形成闭环处置流程^[2]。(3) 远程运维与管理: 支持调度中心或运维人员通过PC端或移动端APP进行远程实时监控、历史回溯、设备控制、工单派发与运维管理, 全面提升运维效率与应急响应能力。

1.2 核心功能模块

基于上述架构, 系统应具备以下核心功能模块:

1.2.1 全域视频智能监控

不仅能实现7×24小时无死角录像, 更能利用深度学习算法对视频流进行实时分析, 实现人脸识别、行为分析(如越界、滞留、攀爬、倒地)、设备外观缺陷识别(如油污、锈蚀、表计读数异常、指示灯状态)等功能, 并支持视频结构化处理, 便于后续大数据分析检索。

1.2.2 多维度环境安全监测

对影响设备安全运行的环境因素进行连续、高精度监测, 一旦温湿度超标、发生水浸、烟雾报警或SF₆气体泄漏(浓度超过1000ppm即触发告警), 系统立即发出多级告警并联动风机、排水泵、声光报警器等设备进行自动处置, 同时推送告警信息至相关人员, 确保隐患及时消除。

1.2.3 一体化周界与门禁管理

构建从外围到核心的纵深防御体系。周界入侵探测与视频复核相结合, 通过AI算法过滤误报(如小动物、风雨干扰), 显著提高告警准确率; 门禁系统与人员权限、工作票系统、两票三制流程深度集成, 实现“人-证-岗-票”四维匹配, 确保只有授权人员在授权时间进入授权区域, 杜绝无票作业与越权操作。

1.2.4 智能巡视与辅助决策

通过预设巡检路线或AI自主规划路径, 由机器人或固定摄像机替代人工完成例行巡视任务, 并自动生成结构化巡检报告, 包含异常点位、图像证据、趋势分析等内容。系统还能基于历史运行数据、环境参数与设备状态, 利用机器学习模型对设备健康度进行动态评估, 预测潜在故障风险, 为状态检修与运维决策提供科学、精准的数据支撑, 推动变电站运维模式从“被动响应”向“主动预防”转型。

2 关键技术分析

2.1 物联网(IoT)技术

物联网技术是实现万物互联的基础。通过在各类传感器、执行器和智能终端上嵌入标准化的通信模块, 构建一个覆盖全站的感知网络。这使得海量、多维的物理世界数据能够被实时、准确地采集并上传至平台, 为后续的智能分析提供了源源不断的高质量数据源泉, 是整个系统智能化运作的物理根基。

2.2 人工智能(AI)与计算机视觉

AI, 特别是深度学习驱动的计算机视觉技术, 是系统实现“智能化”的核心引擎。以YOLOv5为代表的卷积神经网络(CNN)模型被广泛应用于图像识别与目标检测任务。在变电站场景中, 经过大量标注数据训练的YOLOv5模型能够以超过98%的准确率实时检测作业人员是否规范佩戴安全帽, 并对未佩戴行为进行即时告警。同时, 结合OCR(光学字符识别)技术, 系统能自动读取并记录各类仪表盘上的油位、气压等数值, 其识别精度在良好光照条件下可达到95%以上。这些技术的深度融合, 将安防监控模式从被动的“看得见”彻底转变为能理解、会思考的“看得懂”, 极大地提升了监控的主动性与精准度。

2.3 大数据分析 with 边缘计算

变电站产生的数据具有体量大、类型多、速度快的特点。大数据技术用于对这些多源异构数据进行清洗、存储、挖掘和关联分析, 从中发现潜在规律和设备劣化趋势。而边缘计算则巧妙地将部分计算任务下沉到靠近数据源的网络边缘, 例如在智能摄像机或边缘网关上直接完成人脸识别、安全帽检测等AI推理任务^[3]。这种“云-边-端”协同的架构, 不仅有效缓解了中心平台的计算压力和网络带宽瓶颈, 更重要的是将关键告警的响应时间缩短至毫秒级, 对于需要快速处置的安全事件至关重要。

2.4 智能巡检机器人技术

作为感知层的延伸与强化, 智能巡检机器人是提升室内/室外精细化巡检能力的关键载体。典型的轮式巡检机器人采用四驱四转高性能底盘, 具备强大的越障(>15cm)和爬坡(>30°)能力, 以适应变电站复杂的地形环境。其感知系统深度融合了4K可见光摄像机、高精度红外热成像仪(测温精度±0.5℃)、3D激光雷达(测距精度±2cm)和超声传感器。尤为关键的是其导航系统, 通过采用基于图优化的Cartographer等先进SLAM(即时定位与地图构建)算法, 并与惯性测量单元(IMU)进行紧耦合融合, 机器人能够在无GPS信号的室内环境中实现厘米级(±1cm)的高精度自主定位与路径规划, 确保巡检轨迹的精确复现和对目标设备的稳定观测。

2.5 网络安全技术

随着系统网络化、智能化程度的加深,其面临的网络攻击风险也急剧增加。因此,必须构建纵深防御的网络安全体系。这包括在网络边界部署工业防火墙和入侵检测/防御系统(IDS/IPS),在不同安全域之间设置安全隔离网闸,以及在应用层面运用国密算法对敏感数据进行加密传输、实施严格的基于角色的访问控制(RBAC)和全过程的安全审计。这套多层次、立体化的防护策略,共同确保了系统数据的机密性、完整性和可用性,是智能安防系统可靠运行的生命线。

3 未来发展趋势与挑战

3.1 发展趋势

展望未来,变电站智能安防监控系统的发展将呈现三大趋势。首先是数字孪生的深度应用,通过构建高保真、高动态的变电站数字孪生体,物理世界的任何微小变化都能在虚拟空间中实时映射,为故障仿真、应急推演等高级应用提供强大支撑。其次是“云-边-端”协同架构的进一步成熟,云端负责全局策略制定与大数据分析,边缘侧承担实时智能处理,终端则专注于高效感知,三者协同形成一个灵活、弹性的智能体系^[4]。最后是系统将朝着具备自主进化与自愈能力的方向发展,借助强化学习等更高级的AI技术,系统能够根据长期运行经验自主优化分析模型和联动策略,甚至在部分软硬件故障场景下实现自我隔离与服务恢复。

3.2 面临的挑战

然而,通往未来的道路并非坦途。首要挑战是数据安全与隐私保护,在万物互联的背景下,如何确保海量敏感数据在采集、传输、存储和使用全生命周期中的安全,防止其被非法窃取或滥用,是一个亟待解决的系统性难题。其次是AI模型的可靠性与可解释性问题,当前

主流的深度学习模型多为“黑盒”,其内部决策逻辑不透明,在关乎电网安全的关键场景中,如何提升模型的可解释性,让运维人员能够理解和信任AI的判断,是推广应用的关键障碍。最后,尽管IEC 61850等标准已在很大程度上解决了互操作性问题,但在多厂商、多代际设备共存的复杂工程现场,依然存在细微的兼容性差异,建立更完善、更具前瞻性的标准体系与一致性测试规范,是实现规模化、高质量推广的前提。

4 结语

智能电网的发展对变电站的安全防护提出了更高、更全面的要求。本文所研究的智能安防监控系统,通过深度融合物联网、人工智能、大数据等新一代信息技术,并严格遵循IEC 61850等国际标准,构建了一个集感知、分析、决策、执行于一体的闭环管理体系。该系统不仅能有效提升变电站的物理安全与设备安全水平,更能驱动运维模式的深刻变革,为智能电网的安全、高效、经济运行提供坚实保障。展望未来,尽管在数据安全、AI可靠性等方面仍面临挑战,但随着技术的不断成熟与标准的持续完善,变电站智能安防监控系统必将朝着更加自主、智能、可靠的方向发展,成为新型电力系统不可或缺的“智慧之眼”与“安全之盾”。

参考文献

- [1]寇鹏伟,李彬,张吉祥,等.数字变电站监控系统的安防措施分析[J].电子技术,2023,52(03):154-155.
- [2]李欢,董振宇.智能变电站一体化监控系统信息交互与数据建模研究[J].吉林水利,2026,(04):60-64.
- [3]崔超,葛霜.智能变电站视频监控联动预警技术设计与应用研究[J].科技与创新,2026,(01):76-78.
- [4]陈杰.基于物联网的智能变电站数据采集与监控系统设计[J].信息与电脑,2025,37(24):177-179.