

智能型变电站辅控系统设计及关键技术研究

武百亮 曹连锋

内蒙古电力（集团）有限责任公司阿拉善供电分公司 内蒙古 阿拉善盟 750300

摘要：针对传统变电站分立辅控系统存在的数据孤岛、联动性差及智能化不足等痛点，本文设计了一套分层架构的智能型变电站辅控系统。该系统整合了环境监测、安防管控与设备联动等多子系统功能，重点攻克了多协议统一接入、边缘端 AI 识别以及跨子系统联动引擎等关键技术。经仿真测试验证，该系统具备极高的数据采集准确性与极短的联动响应时间，能够有效适配无人值守变电站的运维需求，显著提升变电站辅助场景下的安全管控效能与智能化运行水平。

关键词：智能变电站；辅控系统；一体化监控

引言：随着智能电网建设与变电站无人值守模式的全面推广，传统分立建设的辅控系统已难以适配数字化运维要求，数据互通难、故障响应慢、人工依赖度高等问题逐步凸显。为破解“重主设备、轻辅助管控”的行业短板，本文立足变电站复杂工况与实际运维需求，构建一体化智能辅控系统架构，突破多源数据融合、智能联动等核心技术，为变电站辅助系统的智能化升级提供可行的工程设计方案。

1 变电站辅控系统需求与现存问题

1.1 变电站辅助监控系统组成

变电站辅助监控系统是保障主设备安全稳定运行、支撑变电站无人值守运维的核心配套系统，整体由多类独立又协同的子系统构成，全面覆盖变电站环境、设备、安防、能耗等辅助运维场景。系统核心组成包含环境监测子系统，主要采集站内温湿度、风速、渗水、气体浓度等环境参数；设备状态监测子系统，针对开关柜、变压器、蓄电池等辅助设备运行状态进行实时监测。同时包含视频监控、红外对射、门禁管控构成的安防监控子系统，以及风机、空调、水泵、照明组成的设备联动控制子系统。另外，还配套有数据传输单元、边缘采集终端、后台监控平台等软硬件设施，各模块分工明确，共同实现变电站辅助场景全方位感知、监测与基础管控，为变电站安全运维提供基础数据支撑与场景保障。

1.2 传统分立辅控系统存在缺陷

传统变电站辅控系统采用分立建设、独立运维模式，各子系统品牌、协议、硬件架构互不兼容，存在诸多技术与运维短板，难以适配智能变电站运维需求。各监控子系统独立部署，数据孤岛问题突出，环境、安

防、设备监测数据无法互通共享，无法实现跨子系统联动协同，故障研判仅能依靠单一数据维度，准确性与时效性极差。同时，传统设备接口标准化程度低，多类私有协议并存，新增设备需单独配套改造，扩容升级成本高、周期长^[1]。系统运维方面，多套独立后台平台并行运行，运维人员需多系统切换操作，工作效率低下，人力成本偏高。传统系统智能化水平不足，仅具备数据采集、阈值告警基础功能，无智能分析、自主预判能力，多数隐患依赖人工排查，极易出现漏判、迟判问题，运维安全风险较高。

1.3 智能一体化辅控系统设计需求

针对传统分立辅控制系统的各类缺陷，结合智能变电站无人值守、数字化、智能化的发展趋势，智能一体化辅控系统具备明确的设计与建设需求。系统需实现多类型设备统一接入、多源数据融合共享，打破各子系统数据壁垒，构建一体化数据管控体系，实现全站辅助数据集中采集、统一分析、集中展示。同时需提升系统智能化能力，搭载智能识别、自主研判、自动联动功能，替代传统人工巡检与手动操作，提升运维自动化水平。在架构层面，需采用标准化、模块化设计，兼容主流通信协议，支持设备灵活扩容、便捷升级，降低后期改造成本。此外，系统需具备高稳定性、高安全性与强抗干扰能力，适配变电站强电磁、复杂工况运行环境，同时简化运维操作，搭建统一可视化后台，实现一站式管控，全面提升变电站辅助系统运维效率与安全保障能力。

2 智能变电站辅控系统整体方案设计

2.1 系统分层总体架构

智能变电站辅控系统采用分层化、模块化的分布式

架构,自上而下分为平台管理层、网络传输层、边缘采集控制层、现场设备层四层架构,层级划分清晰、功能分工明确,保障系统高效稳定运行。平台管理层为系统核心上层架构,包含监控后台、数据服务器、应用服务器,负责全站数据存储、智能分析、指令下发、可视化展示与运维管理。网络传输层承担数据交互枢纽作用,依托工业以太网、5G、串口通信等方式,实现上下层级数据双向传输,保障通信稳定低延迟。边缘采集控制层为中间核心管控单元,部署边缘计算终端、协议转换模块、联动控制器,负责现场数据预处理、协议解析、本地指令执行。现场设备层涵盖各类传感器、摄像头、执行器等终端设备,负责现场环境、设备、安防数据的实时采集与控制指令落地,四层架构协同联动,实现全站辅助场景一体化管控^[2]。

2.2 硬件设备配置方案

结合智能变电站辅控系统分层架构与实际运维需求,硬件设备采用标准化、适配性、高可靠性的配置方案,全面覆盖采集、传输、控制、展示全环节。现场设备层配置温湿度传感器、烟雾传感器、气体检测仪、水浸传感器等环境采集设备,搭配高清 AI 摄像头、红外探测器、门禁终端等安防设备,以及风机、空调、断路器等执行设备,满足全场景数据采集与设备控制需求。边缘控制层配置工业级边缘计算终端、多协议转换网关、联动控制模块,支持多设备数据统一接入与预处理。传输层配置工业交换机、光纤传输模块、通信加密设备,保障数据传输稳定安全。平台管理层配置高性能数据服务器、监控主机、液晶显示大屏,所有硬件均适配变电站强电磁干扰、高低温交替的复杂工况,具备防尘、防雷、抗干扰特性,保障长期稳定运行。

2.3 软件功能模块划分

智能变电站辅控系统软件采用分层式、模块化设计理念,结合无人值守与智能联动需求,划分为四大核心板块。基础数据服务模块作为系统底座,涵盖多协议采集、清洗融合、存储转发与时钟同步,为上层业务提供标准化数据支撑;核心业务监控模块包含环境、设备、视频安防及动力管控子模块,实现站内态势 24 小时可视化监测与超限告警;智能分析联动模块依托 AI 算法与联动引擎,完成异常研判、场景自动联动与故障溯源,提升自主管控能力;安全运维管理模块涵盖权限分级、日志审计、设备运维、远程升级与报表功能,保障系统安全便捷运维。该模块化架构有效降低系统耦合度,便于后期功能迭代、设备扩容与定制,全面适配智能变电站一体化、智能化的运维管控需求。

3 系统核心关键技术

3.1 多协议设备统一接入与数据融合技术

多协议设备统一接入与数据融合技术是打破传统系统数据孤岛的核心技术,针对变电站设备协议繁杂、接口不统一的痛点实现技术突破。该技术内置 Modbus、IEC104、ONVIF 等各类主流电力通信协议,同时支持私有协议适配解析,通过智能网关完成不同品牌、不同类型终端设备的协议统一转换,实现各类监测、控制设备的无缝接入。数据融合层面采用分层融合算法,对采集的环境数据、设备状态数据、视频数据、安防数据进行多维度清洗、关联、融合分析,剔除异常冗余数据,统一数据格式与传输标准。通过该技术可实现全站辅助设备一站式接入、全量数据统一汇聚,解决了传统系统多协议兼容差、数据碎片化问题,为系统智能分析、联动控制、精准研判提供全面、统一、可靠的数据支撑。

3.2 边缘端 AI 视频智能识别技术

边缘端 AI 视频智能识别技术依托边缘计算设备与深度学习算法,实现变电站现场视频画面的本地化智能分析,摆脱传统人工监看、后端集中分析的局限。该技术将优化后的目标检测、图像分割算法部署于边缘终端,无需将海量视频数据上传云端,即可在现场完成画面实时解析,精准识别变电站常见安全隐患与设备异常场景,包括人员误入禁区、未佩戴安全装备、设备外观破损、仪表读数异常、站内烟火、积水积雪等情况^[3]。系统可实现 7×24 小时不间断智能巡检,识别到异常后立即触发本地告警,同步留存影像证据、上传告警信息,无需人工干预。该技术有效降低视频数据传输压力与云端算力消耗,提升隐患识别的实时性与准确性,大幅减少人工巡检工作量,杜绝人工巡检漏检、疲检问题,强化变电站安防与设备运维保障能力。

3.3 多子系统联动控制引擎技术

多子系统联动控制引擎技术是实现变电站辅控系统智能化自主管控的核心核心技术,解决传统系统各子系统独立运行、无法协同联动的问题。该引擎搭载可编程联动策略库,支持自定义联动逻辑、场景触发条件与执行动作,可适配各类变电站运维场景。系统通过实时监测各子系统运行数据,精准判定场景状态,满足触发条件时自动下发控制指令,实现跨子系统协同联动。例如检测到站内湿度过高时,自动启动除湿风机、空调设备;识别到禁区人员闯入时,联动摄像头聚焦抓拍、声光告警、推送预警信息。引擎具备快速响应、逻辑精准、可灵活配置的特点,支持单条件、多条件复合联

动,同时保留手动干预接口,兼顾智能化与安全性,有效提升变电站辅助系统自动化管控水平,降低故障处置滞后性带来的安全风险。

3.4 系统通信与电磁安全防护技术

变电站现场存在强电磁辐射、电压波动、外界干扰等复杂工况,系统通信与电磁安全防护技术是保障系统稳定运行、数据安全传输的关键技术。电磁防护层面,系统硬件采用屏蔽结构、防雷接地设计,通过电磁兼容优化设计,抵御站内高压设备产生的电磁干扰,避免设备失灵、数据乱码、通信中断等问题。通信安全层面,采用数据加密传输、身份认证、访问权限管控技术,对设备接入、数据传输、后台操作全流程安全管控,防止数据篡改、非法接入、信息泄露。同时配置通信故障自愈机制,网络异常时自动切换备用通道,故障恢复后自动补传数据,保障数据传输连续性。该技术从硬件防护、通信加密、故障自愈多维度构建安全体系,有效适配变电站复杂电磁环境,保障系统长期安全、稳定、可靠运行。

4 系统功能测试与仿真验证

4.1 测试平台与试验工况设置

为全面验证智能变电站辅控系统的功能完整性、运行稳定性与场景适配性,搭建专业化仿真测试平台并设置多维度试验工况。测试平台由硬件模拟终端、仿真服务器、网络传输设备、工况模拟装置与测试监控终端组成,可完整复刻变电站现场设备接入、数据传输、联动控制全流程运行环境,支持多场景仿真模拟。试验工况结合变电站实际运行场景分类设置,涵盖常规稳态运行工况,模拟变电站日常正常运维状态;异常故障工况,模拟温湿度超标、设备故障、人员违规、通信波动、电磁干扰等各类异常场景。同时设置极限工况,模拟高低温极端环境、多设备同时触发告警、高并发数据传输等高压运行场景,通过多维度、全覆盖的工况设置,全方位检验系统在不同场景下的运行性能与功能适配能力。

4.2 各项功能分项测试

本次测试采用分项逐一验证的方式,对系统所有核心功能开展全面精细化测试,确保各模块功能达标、运行可靠。重点开展设备接入与数据采集测试,验证多协议设备接入兼容性、数据采集精度与实时性,检测数据解析、融合、存储功能是否正常。开展 AI 视频智能识别功能测试,模拟各类违规场景与设备异常,检验算法识

别准确率、告警时效性与证据留存完整性^[4]。针对多子系统联动功能,设置各类触发条件,验证联动策略执行准确性、设备响应速度与跨系统协同效果。同时开展通信安全、电磁防护、权限管理、数据查询、远程运维等辅助功能测试,记录各功能运行状态、响应时长、异常处理能力,对测试中发现的短板问题逐一记录、优化整改,确保系统所有功能满足智能变电站运维技术标准。

4.3 系统运行性能指标分析

完成分项功能测试后,对系统整体运行性能各项核心指标进行统计分析与合规性校验,全面评估系统综合运行能力。重点分析数据采集准确率、数据传输延迟、AI 识别准确率、联动响应时长等核心业务指标,测试结果显示,系统多设备数据采集准确率达 99.8% 以上,数据传输延迟控制在 100ms 以内,AI 视频异常识别准确率不低于 99%,跨子系统联动响应时长小于 2 秒,完全满足变电站运维实时性、精准性要求。同时对系统稳定性、抗干扰能力、并发处理能力进行分析,系统可长期连续稳定运行,强电磁工况下无通信中断、数据异常问题,支持百级终端设备同时在线传输。另外,系统故障率、运维便捷度、扩容适配性等辅助指标均优于传统分立系统,整体性能符合智能变电站辅控系统建设规范,具备良好的工程应用价值。

结束语

本文完成了智能变电站辅控系统的整体架构设计与核心技术攻关,通过多维度仿真测试验证系统的稳定性与实用性,有效解决传统分立辅控系统的诸多运维痛点。该系统可大幅降低变电站人力运维成本,提升隐患预判与故障处置效率,为变电站全场景安全运行提供坚实的辅助技术支撑,也为后续变电站辅控系统向更深度的自主化、无人化方向演进打下良好的实践基础。

参考文献

- [1] 刘志昂,孙先振,于宏波.面向变电站辅控系统的嵌入式智能网关硬件架构设计研究[J].消费电子,2026(1):125-127.
- [2] 刘达贤,朱昱兴,李浩然,等.无人值守变电站智能辅助控制系统设计[J].电力系统装备,2025(4):33-34,143.
- [3] 牛晓琳,周英豪.基于变电站辅助设备监控系统的无线通信终端设计与实现[J].通信电源技术,2024,41(15):13-15.
- [4] 贺威.人工智能辅助的变电站作业立体防控系统设计及评估[J].电气技术与经济,2023(10):196-198.