

# 智能变电站工程中的电气自动化设计及应用

周 如

中国能源建设集团新疆电力设计院有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

**摘 要：**智能变电站工程中的电气自动化设计依托物联网、边缘计算、数字孪生等关键技术，构建“三层两网”架构，实现全站设备状态可视化与控制智能化。设计遵循IEC61850标准，采用双网冗余通信，集成电子式互感器、智能断路器等设备，结合深度学习故障预测模型，实现设备全生命周期监测。应用层面涵盖智能巡检、自适应保护、能量管理及站域控制，显著提升故障处理效率与供电可靠性，推动变电站向自动化、信息化、标准化方向转型。

**关键词：**智能变电站工程；电气自动化设计；应用

引言：在能源转型与电力需求持续增长背景下，传统变电站面临设备监控低效、故障响应滞后、运维成本高昂等挑战。智能变电站作为电网智能化升级的核心载体，其电气自动化设计通过融合物联网、边缘计算、数字孪生等先进技术，构建分层分布式的“三层两网”架构，实现设备状态实时感知、故障自诊断与自适应保护控制。本文系统阐述智能变电站电气自动化设计的标准化、可靠性及可扩展性原则，分析其在智能监测、控制保护与运维管理中的应用成效，为构建高效、安全、低碳的现代电网提供技术参考与实践路径。

## 1 智能变电站电气自动化设计理论基础

### 1.1 智能变电站架构解析

(1) 三层两网结构：站控层作为核心监控中枢，部署监控主机、数据服务器等设备，实现全站运行状态监视、远程控制及数据汇总分析；间隔层配置保护测控装置，针对变压器、线路等间隔单元，完成故障保护、运行参数测量与控制指令执行；过程层包含合并单元与智能终端，合并单元对电流、电压等模拟量进行采集与数字化转换，智能终端则实现开关设备的智能操控与状态监测，三层协同实现变电站自动化运行。(2) 通信网络：站控层采用MMS协议，该协议具备标准化数据交互能力，可实现监控主机与间隔层设备间的遥信、遥测、遥控等数据传输，保障站控层对全站设备的有效监控；过程层通过GOOSE/SV协议实现高速数据传输，GOOSE协议用于传输开关量信号，如跳闸指令、开关状态等，传输时延低且可靠性高，SV协议负责传输数字化的模拟量数据，满足过程层实时数据交互需求，双协议支撑确保站内数据传输高效稳定<sup>[1]</sup>。

### 1.2 电气自动化设计原则

(1) 标准化原则：严格遵循IEC61850、DL/T860等国际与国内标准，统一设备接口、数据模型及通信协

议，实现不同厂家设备的互联互通，降低系统集成难度，保障变电站自动化系统的兼容性与规范性。(2) 可靠性原则：采用双网冗余设计，站控层与过程层通信网络均配置双网架构，当其中一网出现故障时，可自动切换至另一网运行，且网络切换时间 $\leq 10\text{ms}$ ，避免因网络中断导致系统停运，提升变电站运行的连续性与稳定性。(3) 可扩展性原则：系统设计采用模块化架构，预留设备接口与通信带宽，支持后续新增间隔单元、新能源接入设备的灵活扩容，无需对现有系统进行大规模改造，适应变电站长期发展与功能升级需求。

### 1.3 关键技术支撑

(1) 物联网技术：通过在变压器、断路器等关键设备上安装RFID标签与各类传感器，RFID标签实现设备身份标识与资产追溯，传感器实时采集设备温度、振动、绝缘状态等参数，数据上传至后台系统，实现设备全生命周期监测，及时发现潜在故障隐患。(2) 边缘计算：在过程层部署边缘计算节点，对采集的实时数据进行本地预处理，如数据滤波、异常值剔除、简单故障判断等，减少无效数据向站控层传输，降低主干网络带宽压力，同时缩短数据处理时延，提升系统对故障的快速响应能力。(3) 数字孪生：基于变电站实际布局与设备参数，构建三维数字孪生模型，模型与现场设备状态实时同步，可用于变电站虚拟调试，在系统投运前模拟各类运行场景，验证设备功能与控制逻辑；同时支持故障模拟，通过在虚拟模型中复现故障场景，分析故障原因与影响范围，为现场故障处理提供指导。

## 2 智能变电站电气自动化系统设计

### 2.1 系统总体架构设计

(1) 感知层：部署温度、湿度、振动等多参数传感器，实现对变电站关键设备与运行环境的全面感知。其中，温度传感器精准监测变压器绕组、断路器触头温

度, 测量误差  $\leq \pm 0.5^\circ\text{C}$ ; 湿度传感器实时采集控制室、高压室等区域湿度, 预防设备受潮损坏; 振动传感器安装于变压器、电抗器等设备本体, 捕捉设备运行时的振动频率与幅值变化, 为设备健康状态评估提供原始数据支撑, 构建变电站感知网络的基础层。(2) 网络层: 配置工业以太网交换机, 采用双网冗余拓扑结构, 保障数据传输的可靠性。该交换机支持IEEE1588PTP协议, 可实现全站设备时间同步精度  $\leq 1\mu\text{s}$ , 确保各层设备采集的数据、执行的指令具备统一时间基准, 避免因时间偏差导致的数据错位或控制延迟。同时, 交换机具备高带宽、低时延特性, 满足感知层海量监测数据与应用层控制指令的高效传输需求。(3) 应用层: 开发智能巡检、故障诊断、能量管理等核心功能模块。智能巡检模块结合机器人巡检数据与传感器数据, 自动生成巡检报告, 识别设备外观缺陷与参数异常; 故障诊断模块通过分析设备运行数据, 快速定位故障类型与位置, 如变压器匝间短路、线路接地故障等; 能量管理模块实时监控站内电能生产、传输与消耗情况, 优化无功补偿与负荷分配, 提升变电站能源利用效率, 各模块协同实现变电站智能化运行管控<sup>[2]</sup>。

## 2.2 硬件系统设计

(1) 智能一次设备: 集成电子式互感器与智能断路器。电子式互感器采用光学或电子式原理, 避免传统互感器的磁饱和、铁磁谐振问题, 测量精度达0.2级, 可准确采集电流、电压信号并转换为数字量输出; 智能断路器内置传感器与控制单元, 分合闸时间  $\leq 30\text{ms}$ , 响应速度远超传统断路器, 同时具备状态自监测功能, 可实时反馈灭弧室气压、触头磨损程度等信息, 实现一次设备的智能化运行与状态检修。(2) 二次设备: 采用基于国产化芯片的保护测控装置, 保障设备自主可控性。该装置集成保护、测量、控制、通信等功能, 支持IEC61850、Modbus等多协议转换, 可与站控层、过程层设备无缝通信。装置具备抗电磁干扰能力, 在复杂电磁环境下仍能稳定运行, 确保对变压器、线路等间隔单元的可靠保护与精准测控。(3) 通信设备: 部署5G基站, 利用5G技术低时延、大带宽、广连接的优势, 实现变电站关键数据传输。针对故障跳闸指令、设备紧急状态信息等关键数据, 传输时延  $\leq 20\text{ms}$ , 保障调度中心与变电站之间、站内各设备之间的实时数据交互, 为远程控制、紧急故障处理提供稳定通信支撑, 同时支持未来多终端、多业务的扩展接入。

## 2.3 软件系统设计

(1) 操作系统: 选用实时Linux系统, 该系统具备

高实时性与稳定性, 通过内核优化可实现控制指令毫秒级响应, 满足变电站对设备控制、数据处理的实时性要求。同时, 实时Linux系统支持多任务并发处理, 可同时运行数据采集、故障分析、人机交互等多个进程, 且具备良好的兼容性, 能够适配各类硬件设备与应用软件, 为软件系统提供可靠运行平台。(2) 数据库设计: 采用时序数据库(如InfluxDB)存储海量监测数据。时序数据库针对时间序列数据的存储与查询进行优化, 具备高写入吞吐量与快速查询能力, 可高效存储传感器采集的设备温度、电压、电流等时序数据, 同时支持数据压缩与生命周期管理, 降低存储成本。此外, 该数据库支持多维度数据聚合分析, 便于后续开展设备状态评估、故障趋势预测等数据应用<sup>[3]</sup>。(3) 应用软件: 开发基于深度学习的故障预测模型, 通过收集历史故障数据、设备运行数据构建训练数据集, 采用CNN-LSTM等深度学习算法训练模型, 使模型对变压器、断路器等关键设备常见故障的预测准确率达95%。模型可实时分析设备当前运行数据, 提前识别潜在故障风险, 并生成故障预警信息与维护建议, 帮助运维人员提前介入处理, 减少设备故障停机时间, 提升变电站运维效率与可靠性。

## 3 电气自动化技术在智能变电站中的应用

### 3.1 智能监测与诊断应用

(1) 设备状态监测: 依托电气自动化技术, 在变压器本体部署高精度振动传感器与数据采集模块, 通过实时采集变压器运行时的振动信号, 结合傅里叶变换、小波分析等算法对信号进行处理, 提取特征参数。当振动频率、幅值出现异常波动时, 系统可精准识别铁芯松动、绕组变形等内部故障隐患, 并自动生成预警信息推送至运维平台, 实现故障早发现、早干预, 避免故障扩大导致设备损坏。(2) 环境监测: 利用自动化监测系统, 在GIS设备室、高压开关柜等关键区域安装SF6气体泄漏传感器, 该传感器灵敏度  $\leq 0.1\text{ppm}$ , 可实时检测空气中SF6气体浓度。一旦检测到泄漏, 系统立即触发声光报警, 同时联动通风设备自动开启, 加速有害气体排出, 保障运维人员人身安全与设备稳定运行; 此外, 系统还可监测站内温湿度、粉尘浓度等环境参数, 实现环境异常的及时调控。(3) 案例: 某220kV智能变电站应用上述智能监测与诊断技术后, 通过振动分析成功预警3起变压器铁芯松动故障, 通过SF6泄漏监测及时处理2处GIS设备泄漏问题。数据显示, 该变电站设备非计划停运时间较应用前减少65%, 设备平均无故障运行时间从180天提升至320天, 显著提升了变电站运行可靠性。

### 3.2 智能控制与保护应用

(1) 自适应保护: 基于电气自动化的自适应保护系统, 可通过实时采集电网电压、电流、功率等运行参数, 分析电网拓扑结构与运行方式变化。当电网发生负荷转移、线路投退等情况时, 系统自动调整保护装置定值, 如过流保护定值、零序保护时限等, 确保保护装置始终处于最优工作状态, 大幅缩短保护动作时间, 避免传统固定定值保护在电网方式变化时出现误动或拒动的问题。(2) 顺序控制: 借助自动化控制技术, 构建变电站顺序控制系统, 预先编制断路器、隔离开关的操作逻辑与流程。运维人员通过远方操作指令, 系统可自动完成设备状态核对、操作票生成、顺序执行等步骤, 实现倒闸操作的自动化完成。相较于传统人工操作, 顺序控制无需人员现场逐一操作, 操作时间从平均40分钟缩短至8分钟, 同时避免人为操作失误, 提升操作安全性与效率<sup>[4]</sup>。(3) 案例: 某500kV智能变电站在一条220kV线路发生单相接地故障时, 自适应保护系统迅速分析电网运行方式, 15ms内完成保护定值调整, 保护装置在2个工频周期(40ms)内准确动作, 切断故障线路; 同时, 顺序控制系统自动执行备用线路投运操作, 30秒内恢复供电, 故障隔离与供电恢复效率较传统方式提升80%, 有效降低了故障对电网供电的影响。

### 3.3 智能运维与管理应用

(1) 机器人巡检: 融合电气自动化与机器人技术, 配置智能巡检机器人, 机器人搭载红外热像仪、局放检测仪、高清摄像头等设备, 按照预设巡检路径自主移动。红外热像仪可检测设备接头、绝缘子等部位的温度异常, 局放检测仪能捕捉设备局部放电信号, 高清摄像头实现设备外观缺陷识别; 巡检数据实时上传至自动化运维平台, 系统自动对比分析数据, 生成巡检报告, 巡检效率较人工巡检提升3倍, 且可实现24小时不间断巡检, 覆盖人工难以到达的高危区域。(2) 资产管理: 运用自动化的RFID资产管理系统, 为变电站变压器、断

路器、互感器等所有设备粘贴唯一RFID标签, 标签存储设备型号、出厂日期、安装时间、维护记录等信息。运维人员通过手持RFID读写器或站内固定读写终端, 可快速读取设备信息, 实现设备台账的自动更新与查询; 同时, 系统记录设备全生命周期内的采购、安装、维护、报废等环节数据, 为设备检修计划制定、资产盘点提供精准数据支撑。(3) 案例: 某110kV智能变电站应用智能运维与管理系统后, 智能巡检机器人替代人工完成70%的巡检工作, 年减少人工巡检成本约12万元; RFID资产管理系统使设备盘点时间从15天缩短至2天, 资产信息准确率达100%。综合数据显示, 该变电站年检修成本较应用前降低40%, 运维人员工作效率提升55%, 实现了运维管理的降本增效。

### 结束语

智能变电站电气自动化设计通过标准化架构、可靠通信与智能技术融合, 实现了设备状态全景感知、故障快速处置与运维精益化管理, 显著提升了电网运行的安全性与经济性。未来, 随着5G、人工智能及数字孪生技术的深化应用, 智能变电站将进一步向全息感知、自主决策方向演进, 推动电网调度智能化、设备检修预测化、能源配置最优化。本文的研究与实践表明, 电气自动化是智能变电站建设的核心驱动力, 其持续创新将为构建新型电力系统、实现“双碳”目标提供关键技术支撑。

### 参考文献

- [1] 翟二龙. 基于综合自动化控制技术的智能变电站继电保护技术研究[J]. 建设科技, 2024, (S1): 39-40.
- [2] 唐竹青. 110kV智能变电站中的自动化技术分析[J]. 集成电路应用, 2024, (08): 98-99.
- [3] 赵博涛. 变电站电气自动化控制系统分析及其应用[J]. 中国设备工程, 2022, (12): 112-114.
- [4] 王鉴梁. 智能变电站工程中的电气自动化设计及应用[J]. 智能与信息化, 2022, (11): 90-91.