

智能变电站工程中的电气自动化应用

付明芝

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, 电气自动化技术通过集成智能设备、传感器与通信网络, 实现全站信息数字化、控制自动化与管理智能化。其核心应用包括实时监测设备状态、基于机器学习的故障预测与定位、自适应电压/频率调节, 以及移动终端远程运维。技术融合IEC61850标准、工业物联网与边缘计算, 构建分层分布式系统架构, 提升数据共享效率与系统兼容性。该技术显著增强了电网可靠性, 降低运维成本, 成为智能电网建设的关键支撑。

关键词: 智能变电站工程; 电气自动化; 应用

引言: 随着能源互联网与智能电网的快速发展, 智能变电站作为电网运行的核心节点, 其自动化水平直接影响电力系统的安全与效率。传统变电站依赖人工巡检与分散控制, 存在响应滞后、数据孤岛等问题。电气自动化技术的引入, 通过集成智能传感器、分布式控制系统(DCS)、工业物联网(IIoT)及机器学习算法, 实现了设备状态实时感知、故障精准预测与自适应控制。这不仅提升了变电站运行可靠性, 还推动了运维模式向智能化、远程化转型。本文将系统探讨电气自动化在智能变电站中的应用架构、关键技术及未来发展趋势。

1 智能变电站与电气自动化技术基础

1.1 智能变电站的定义与架构

智能变电站是采用先进传感、信息通信和智能分析技术, 实现站内设备状态感知、信息交互及运行控制自动化的变电站, 核心是信息数字化、通信网络化、设备智能化。(1) 物理层、网络层、站控层功能划分: 物理层。由各类智能设备构成, 负责采集电流、电压等实时数据, 执行开关操作等控制指令, 是数据采集与控制执行的基础; 网络层。采用光纤以太网等通信方式, 实现物理层与站控层间的数据传输与交互, 保障信息实时性与可靠性; 站控层。作为监控核心, 对全站数据进行汇总、分析与展示, 支持远程监控、操作及故障诊断, 实现变电站运行管理自动化。(2) 智能设备(如智能断路器、电子式互感器)的特点: 智能断路器。集成传感器与控制器, 可实时监测运行状态, 具备自动故障检测、快速分合闸功能, 减少人工运维干预; 电子式互感器。采用光学或电子原理采集信号, 无铁芯饱和问题, 测量精度高、动态范围大, 且体积小、重量轻, 便于安装部署。

1.2 电气自动化技术核心组成

(1) 分布式控制系统(DCS): 采用分散控制、集中管理架构, 将控制功能分散到多个控制器, 避免单点

故障, 提升系统稳定性与可靠性, 广泛用于电力、化工等领域的流程控制。(2) 可编程逻辑控制器(PLC): 基于可编程程序实现逻辑控制, 响应速度快、抗干扰能力强, 适用于开关量控制场景, 如变电站设备的顺序操作控制。(3) 工业物联网(IIoT)与传感器技术: IIoT实现设备互联互通, 传感器实时采集温度、压力等参数, 为自动化控制提供精准数据支撑, 助力设备状态预测性维护。(4) 数字孪生与虚拟仿真: 构建变电站虚拟数字模型, 映射实体设备运行状态, 可模拟不同工况下的系统响应, 用于运维培训、故障模拟与优化设计, 降低实际试验成本与风险^[1]。

1.3 相关标准与协议

(1) IEC61850标准在变电站自动化中的应用: 作为变电站自动化系统的核心标准, 统一数据模型与通信规范, 实现不同厂商设备的互联互通, 简化系统集成, 提升数据共享效率与系统兼容性。(2) 通信协议(如Modbus、Profinet)的适配性: 1) Modbus: 协议简单、易于实现, 适用于低速、小数据量传输场景, 如变电站内部分散设备的小规模数据交互。2) Profinet: 基于以太网技术, 传输速率高、实时性强, 支持分布式控制, 适配变电站对大规模数据高速传输与实时控制的需求。

2 智能变电站工程中的电气自动化应用

2.1 智能监测与故障诊断系统

(1) 实时数据采集与状态评估: 系统整合电子式互感器、无线传感器、红外测温装置等设备, 实现全场景数据采集: 一方面, 实时采集电流、电压、功率等电气参数, 采样频率达2kHz以上, 确保数据精准反映电网运行状态; 另一方面, 通过温湿度传感器、局部放电传感器监测设备环境与绝缘状态, 例如对变压器油箱温度、GIS设备局部放电量进行持续追踪。采集的数据经边缘计算节点预处理后, 传输至站控层平台, 通过预设的状

态评估模型（如基于设备额定参数与历史数据的对比分析），自动生成设备健康度评分（0-100分），健康度低于80分时触发预警，提醒运维人员介入检查^[2]。（2）基于机器学习的故障预测与定位：引入机器学习算法（如LSTM神经网络、随机森林）构建故障预测模型，通过分析历史故障数据（如短路故障、设备老化故障）与实时监测数据的关联关系，实现故障提前预测：例如针对断路器机械故障，模型可通过分合闸时间、操作电流等特征参数，提前7-14天预测故障风险，准确率超90%。在故障定位方面，结合拓扑分析与数据溯源技术，当发生线路故障时，系统可在50ms内定位故障区段（精度达100米以内），并自动推送故障位置、类型及处置建议至运维终端，缩短故障排查时间。

2.2 自动化控制与保护系统

（1）继电保护装置的智能化升级：传统继电保护装置升级为“采集-分析-决策-执行”一体化智能装置：一方面，装置具备多源数据融合能力，可同时接收电子式互感器的采样数据、设备状态监测数据，通过逻辑判断排除干扰信号（如励磁涌流），避免保护误动；另一方面，支持IEC61850标准下的GOOSE报文传输，保护动作时间从传统的200ms缩短至50ms以内，实现故障快速切除。例如在变压器差动保护中，智能装置可自动识别铁芯饱和、CT断线等异常工况，动态调整保护定值，提升保护可靠性。

（2）自适应控制策略在电压/频率调节中的应用：针对电网负荷波动与分布式能源接入带来的电压、频率波动问题，采用自适应控制策略实现动态调节：在电压调节方面，系统根据母线电压实测值与设定值的偏差，自动控制SVG（静止无功发生器）、有载调压变压器的调节量，确保母线电压稳定在±2%额定电压范围内；在频率调节方面，结合负荷预测数据与分布式电源出力情况，自适应调整储能系统充放电功率与常规电源出力，当电网频率偏离50Hz±0.2Hz时，系统可在100ms内启动调节，将频率恢复至正常范围，避免频率崩溃事故^[3]。

2.3 信息化与数字化管理平台

（1）站控层一体化监控系统：整合监控、保护、计量、安防等多系统数据，构建统一的可视化监控界面，支持2D/3D场景切换。运维人员通过界面可实时查看设备运行参数、视频监控画面、告警信息，实现“一屏观全站”。系统具备数据联动分析功能，例如当断路器跳闸时，自动关联显示对应的电流波形、保护动作记录、现场摄像头画面，帮助运维人员快速判断故障原因。同时，支持历史数据查询与趋势分析，可生成设备运行报表、电量统计报表，为运维决策提供数据支撑。（2）移

动终端与远程运维技术：基于5G或工业以太网，开发移动运维APP，支持运维人员通过手机、平板等终端远程访问站控层系统，实现设备参数查询、告警接收、操作指令下发等功能。例如，运维人员在现场巡检时，通过APP扫描设备二维码，即可查看设备台账、历史故障记录、检修计划；对于轻微故障，可远程下发控制指令（如重启保护装置），无需进入高压设备区操作。此外，结合AR（增强现实）技术，在移动终端实时叠加设备内部结构、接线图等虚拟信息，辅助运维人员进行复杂检修作业，提升检修效率与安全性。

2.4 能源管理与优化调度

（1）需求响应与负荷预测：采用基于时序分析与用户行为特征的负荷预测模型，结合气象数据、节假日因素、工业生产计划，实现短期（24小时）、中期（7天）负荷预测，预测准确率达95%以上。根据负荷预测结果，制定需求响应策略：当预测负荷高峰时，通过价格激励、行政引导等方式，引导工业用户、商业用户调整用电时间（如将高耗能设备运行时间转移至负荷低谷期）；当电网供电紧张时，自动切除非关键负荷（如路灯、广告灯箱），保障居民用电与重要工业负荷供电稳定。（2）分布式能源接入的协同控制：针对分布式光伏、风电、储能等接入变电站的场景，构建协同控制系统，实现分布式能源与大电网的协调运行。系统通过实时监测分布式能源出力（如光伏出力受光照强度影响的波动数据）、电网负荷变化，采用模型预测控制算法，优化分布式能源出力计划与储能充放电策略。例如，当光伏出力骤增时，系统控制储能系统充电，吸收多余电能；当光伏出力骤降时，储能系统放电补充出力缺口，同时调整电网购电计划，避免电压、频率大幅波动。此外，支持分布式能源参与电网调频、调峰服务，通过市场化机制提升分布式能源利用效率与经济效益^[4]。

3 智能变电站电气自动化技术的挑战与发展趋势

3.1 当前面临的主要问题

（1）网络安全与数据隐私风险：自动化系统依赖网络传输海量敏感数据（如设备控制指令、电网负荷数据），但当前网络架构存在安全漏洞：一方面，IEC61850标准下的GOOSE/SV报文传输缺乏高强度加密机制，易遭受中间人攻击、报文篡改，可能导致保护装置误动；另一方面，边缘计算节点、移动运维终端的接入，扩大了攻击面，黑客可通过植入恶意程序窃取数据或瘫痪系统。此外，数据共享过程中，用户用电行为、电网运行参数等隐私信息存在泄露风险，现有数据脱敏技术难以平衡数据利用与隐私保护。（2）多系统兼容性

与标准化不足：不同厂商的自动化设备（如监控系统、保护装置）虽遵循IEC61850标准，但在数据模型扩展、功能实现细节上存在差异，导致系统集成时出现“标准不统一”问题。例如，A厂商的站控层平台与B厂商的继电保护装置对接时，常因数据标签定义不一致无法正常通信。同时，新兴技术（如数字孪生、边缘计算）缺乏统一的行业应用标准，各企业自主研发的解决方案难以兼容，增加了变电站升级改造的成本与难度。（3）极端环境下的设备可靠性：变电站多分布在高温、高湿、高海拔或强电磁干扰区域，自动化设备易受环境影响：高温会导致传感器精度下降（如光纤光栅传感器温度漂移超差），高湿环境加速设备绝缘老化（如PLC模块短路），强电磁干扰可能引发通信中断（如500kV母线附近的无线信号受干扰）。此外，极端天气（如暴雨、暴雪）可能破坏户外监测设备，导致数据采集中断，影响自动化系统决策准确性，甚至引发电网事故。

3.2 未来发展方向

（1）人工智能与大数据的深度融合：未来将实现AI与大数据技术从“辅助分析”到“主动决策”的转变：一方面，通过深度学习算法挖掘多源数据关联（如结合气象数据、设备参数预测故障），提升故障预测准确率至98%以上；另一方面，开发AI驱动的自适应控制算法，实现保护定值动态优化、能源调度自主决策，例如电网负荷突变时，系统无需人工干预即可在50毫秒内调整控制策略。同时，大数据平台将构建跨区域数据共享机制，为电网全局优化调度提供支撑。（2）5G通信在变电站中的应用前景：5G的低时延（ $\leq 1\text{ms}$ ）、大连接（每平方公里百万级连接）特性，将解决现有通信技术痛点：其一，替代工业以太网实现设备间实时通信，支持更多传感器接入，满足全景监测需求；其二，基于5G+边缘计算，实现远程控制指令的毫秒级传输，推动“无

人值守变电站”向“远程操控变电站”升级，运维人员可在异地完成断路器分合闸等关键操作；其三，5G+AR技术将优化检修流程，现场人员通过AR眼镜接收远程专家指导，实时调取设备数据，提升检修效率。（3）模块化与标准化设计趋势：为解决兼容性问题，行业将推进“模块化硬件+标准化软件”设计：硬件层面，开发通用化设备模块（如可互换的传感器模块、控制模块），实现“即插即用”，降低更换成本；软件层面，制定统一的应用程序接口（API）与数据模型规范，推动自动化系统从“定制化开发”转向“标准化组装”。此外，模块化设计将提升变电站扩建灵活性，新增分布式能源接入时，仅需加装对应功能模块，无需重构整体系统，适应电网多元化发展需求。

结束语

智能变电站工程中电气自动化技术的应用，极大提升了电网运行的智能化水平，实现了设备状态实时监测、故障精准预测及自适应控制，有效增强了电网的可靠性与经济性。然而，面对网络安全风险、系统兼容性挑战及极端环境适应性问题，仍需持续技术创新。未来，随着5G、人工智能等技术的深度融合，智能变电站将迈向更高阶的自主运行模式，为新型电力系统建设提供坚实支撑，引领能源行业智能化变革。

参考文献

- [1]杨洋.电气工程智能变电站设计与应用研究[J].光源与照明,2025,(02):27-29.
- [2]冉飞,黄金彪.基于电气工程标准的电气智能化技术应用分析[J].电工技术,2024,(S2):215-216.
- [3]吴剑坪.智能化技术在电力工程自动化中的应用[J].中国新技术新产品,2021,(10):105-107.
- [4]姚宇轩,任香亭,钦宇轩.智能变电站自动化系统的运维技术应用[J].集成电路应用,2024,(09):110-111.