

水电厂自动化系统的智能化改造研究

张生辉 姬登云 祁斌斌 潘 锋 樊宏强

国网甘肃省电力公司刘家峡水电厂 甘肃 永靖 731600

摘要:为适配新型电力系统发展需求,解决传统水电厂自动化系统硬件老旧、数据孤岛、运维低效等问题,本文开展水电厂自动化系统智能化改造研究。文章分析系统运行现状与改造必要性,搭建四层智能化改造架构,阐述多源数据融合、AI故障诊断等核心技术,制定分步改造实施方案。通过效果验证,改造可显著提升电厂安全运行与经济水平,同时指出现存短板并提出长效优化策略,为水电厂智能升级提供参考。

关键词:水电厂;自动化系统;智能化改造

引言:双碳目标与新型电力系统建设推进下,电网对水电厂调频、调峰的灵活调节能力与运行稳定性要求持续升级。传统水电厂自动化系统存在设备精度不足、数据分析能力薄弱、人工依赖度高等诸多缺陷,难以适配智能化、无人化运维发展趋势。为突破水电厂运行运维瓶颈,提升水能利用率与设备安全管控水平,落实少人值守运行目标,本文系统化探究其智能化改造方案、关键技术与实施策略,助力水电行业数字化智能化转型。

1 水电厂自动化系统现状及改造必要性分析

1.1 传统水电厂自动化系统架构与功能

(1)传统水电厂自动化系统采用分层分布式结构,含过程层(传感器与执行机构)、间隔层(继电保护、测控单元)和站控层(监控主机、操作员站),三层通过专用网以周期性轮询交互,实现集中监视与调度管理。(2)核心功能包括SCADA、机组启停、有功/无功调节、继电保护、故障录波及远程运维,以PLC或专用控制器为枢纽,依托CDT、IEC60870-5-101/104等规约完成数据上传与指令下发。(3)系统采用主备冗余,控制以定值判别和顺序控制为主,通信为串行或低速以太网,运维靠定期巡检与现场消缺,整体呈“静态配置、被动响应”特征。

1.2 现有自动化系统存在的主要问题

(1)硬件设备问题:传感设备精度偏低,水位、流量等关键参数测量误差较大;老旧设备接口协议私有化,与新型智能装置互操作性差;智能化硬件(如状态监测传感器、边缘计算终端)缺失,难以支撑精细管控。(2)软件系统问题:不同厂家系统数据模型不统一,信息孤岛严重,各子系统间难以高效互通;数据分析多停留在阈值报警层面,缺乏基于大数据与人工智能的深度挖掘能力,难以发现潜在劣化趋势。(3)运维管理问题:高度依赖人工定期巡检与经验判断,故障预判能力不足,非计划停机

时有发生;调度优化依赖人工下达指令,水能利用率与经济运行水平仍有较大提升空间。

1.3 智能化改造的必要性与可行性

(1)改造必要性:新型电力系统对水电厂快速响应与灵活调节能力提出更高要求,智能化改造是提升发电效率、降低运维成本、保障运行安全的现实需求,也是实现无人值班(少人值守)目标的必由之路。(2)技术可行性:大数据分析、人工智能算法、物联网感知、边缘计算及IEC61850标准等新一代信息技术日趋成熟,为设备状态评估、故障预测、智能决策提供有力技术支撑^[1]。(3)经济可行性:智能化改造初始投入可通过降低人工成本、减少非计划停运损失、延长设备检修周期等方式在3-5年内收回,长期降本增效与资产利用率提升效果显著,具有良好投资回报预期。

2 水电厂自动化系统智能化改造总体方案与关键技术

2.1 智能化改造总体设计目标与原则

(1)改造设计目标:围绕“安全、高效、智能”三大主线,构建全感知、全互联、全智能的新一代水电厂自动化体系,最终实现设备智能感知(全面状态在线监测)、故障智能诊断(精准定位与溯源分析)、机组智能调控(自适应最优运行)、运维智能高效(无人值班少人值守)以及调度智能优化(水能利用率最大与经济运行最优)。(2)安全性原则:改造全过程确保现役机组安全稳定,制定分阶段切改方案与应急回退机制;强化容错冗余,关键控制器与通信链路主备热备;网络安全遵循等保2.0,构建纵深防御体系,杜绝改造引发运行事故。(3)兼容性与扩展性原则:新系统向下兼容现役主流规约与接口,最大限度利旧测控保护设备,降低一次性更换成本;采用模块化、开放式架构,预留5G专网、云边协同、数字孪生等前沿升级接口,满足未来演进需求。(4)经济性原则:坚持“统筹规划、分步实

施、重点突破”，优先改造瓶颈环节与高收益节点，严控各阶段投资，通过精细化方案比选与设备选型实现全生命周期成本最优，确保改造成本在合理周期内获得充分回报。

2.2 智能化改造总体架构设计

(1) 感知层改造：全面更换高精度数字化传感器（如超声波流量计、振摆传感器、油色谱在线监测装置），在水轮机、发电机、主变压器、调速器、励磁系统等核心设备部署无线智能感知节点，新增振动、温度、局放、油质等多维度监测参数，实现全设备、全参数、全时段的高精度实时采集。(2) 网络传输层改造：将原有串行通信与混杂型工业以太网统一升级为全厂高速工业以太环网，骨干链路带宽不低于1000Mbps；全面推行IEC61850标准建模与MMS/GOOSE/SV统一通信协议，打通各子系统间的数据壁垒，构建低延时、高可靠、可扩展的数据传输通道，满足海量实时数据交互需求^[2]。(3) 平台层改造：搭建基于统一数据对象模型的一体化智能数据平台，归集感知层全量运行数据、历史运维数据及外部水情气象数据；配置高性能实时数据库与历史数据库引擎，提供标准化数据访问接口与服务总线，实现跨系统数据的无缝整合、高效存储、深度分析与安全共享。(4) 应用层改造：基于统一平台开发智能监控、故障诊断、经济运行、调度决策、智能巡检、资产管理等六大核心应用模块，各模块采用微服务架构独立部署、协同联动，支撑运行监视、控制操作、运维管理、决策支持等全场景业务需求。

2.3 智能化改造核心关键技术

(1) 多源数据融合技术：基于IEC61850面向对象建模思想，建立水电厂统一的设备数据模型字典，将各子系统异构数据映射为标准语义模型，通过数据清洗、时空对齐与特征关联实现振动、温度、压力、电气量、水情等多维度数据深度融合，彻底解决系统孤岛与数据碎片化问题。(2) 人工智能故障诊断技术：构建基于深度残差网络与迁移学习的故障诊断模型，对机组振摆、变压器局放、断路器操作机构状态等关键参量进行实时智能研判，实现隐性故障早期识别、故障模式精准分类与根因溯源；结合时序预测算法，在故障发生前7-30天发出预警，将事后抢修转变为事前主动维护。(3) 机组智能优化控制技术：融合水情预报、负荷预测与机组运行特性曲线，采用模型预测控制与强化学习算法，实时优化机组有功/无功分配策略与启停组合方案，实现水能利用率最大化与耗水率最低化；同时快速响应电网AGC/AVC指令，满足一次调频与快速爬坡等辅助服务要求^[3]。

(4) 远程智能运维与集控技术：构建具备远程协同诊断能力的集控中心平台，全面支撑“远程监视-智能巡检-异常告警-远程操作-故障隔离”的闭环运维流程；引入智能巡检机器人与无人机巡检系统，替代人工完成高海拔、高风险区域设备巡查，切实实现少人值守乃至无人值班目标。

2.4 软硬件系统具体改造内容

(1) 硬件改造：有序淘汰投运超15年的老旧测控保护装置与精度退化传感器，更换为具备自诊断功能的智能测控终端与数字化保护装置；在机组现地控制单元加装边缘计算网关，承担数据预处理与实时分析任务；部署工业防火墙与安全隔离网关，强化边界安全防护。(2) 软件改造：升级现有SCADA/监控系统程序至符合IEC61850Ed2.0标准的智能监控平台；集成人工智能算法开发包与可视化组态工具，新增基于数字孪生的三维可视化监视界面，实现设备运行状态的沉浸式呈现与虚实联动操控。(3) 二次回路与防护改造：优化完善全厂误闭锁逻辑，升级微机五防系统并实现与监控系统的信息互通；统一配置网络安全监测审计与入侵检测装置，建立安全日志集中管理平台；关键二次回路增加在线绝缘监测与状态自检功能，全面消除隐性缺陷，切实提升系统整体运行稳定性与抗扰动能力。

3 水电厂自动化系统的智能化改造实施、效果分析与优化策略

3.1 智能化改造实施流程与施工方案

(1) 改造前期准备：组建专项工作组，完成全厂设备台账梳理与运行状态评估，针对每台机组制定差异化改造清单；开展现场勘查与接口复核，细化施工图纸与接线方案；完成设备选型与工厂预调试，编制分阶段施工计划、安全技术交底文件及专项应急预案，落实备品备件与应急抢修物资储备。(2) 分步实施流程：按照“先外围后核心、先监控后保护、先单机后全厂”的次序推进，依次完成传感层设备更换、网络传输链路割接、边缘计算节点部署、平台软件安装配置、应用模块功能调试，每完成一台机组即投入分段试运行，经72小时稳定考核后再转入下一台机组施工，最终实现全系统并网切换^[4]。(3) 改造施工重难点：新旧系统规约转换与实时数据映射是调试最大难点，须配置规约转换网关并逐点核对上万条测点映射关系；不停机改造要求所有涉及运行系统的接线作业须在机组停备窗口内完成，施工精度与时间控制要求极高；数据迁移过程中需实施双轨并行运行机制，确保历史数据完整无损且实时数据不中断。

3.2 改造效果综合分析

(1) 运行性能分析: 改造后传感器精度提升至0.1级, 数据刷新速率由秒级提升至毫秒级, 机组AGC调节响应时间缩短40%以上, 设备故障识别准确率提高至95%以上, 机组启停成功率提升至99.5%。(2) 安全性能分析: 故障预警准确率达92%以上, 可提前识别轴承磨损、绝缘劣化等隐性缺陷; 事故处置从人工判断升级为系统自动隔离与策略推送, 处置时间缩短60%; 网络安全防护实现纵深部署, 通过等保二级测评。(3) 经济效益分析: 运维人力成本降低50%以上, 设备大修周期延长30%, 年非计划停运损失减少约200万元, 水能利用率提升2-3个百分点, 综合年经济效益增加300万元以上, 投资回收期约4年。(4) 管理效益分析: 运维模式由计划检修向状态检修转变, 调度策略由经验决策升级为数据驱动优化, 全厂运行管理实现标准化、流程化、可视化, 为集控运行奠定制度基础。

3.3 改造后系统运行存在的问题

(1) 智能算法在机组开停机、甩负荷等瞬态过渡工况下特征提取困难, 预判精度降至80%以下, 误报率有所上升, 尚需积累更多典型工况样本加以训练优化。(2) 部分投运超过20年的机电设备通信接口为私有非标协议, 经规约转换后偶发通信超时与数据跳变, 存在运行监视盲区与误动隐患。(3) 运维人员对智能分析工具掌握不足, 对报警信息智能研判的信任度偏低, 仍依赖传统经验复核, 智能化运维管理体系的操作规程、应急流程与考核标准尚不健全。

3.4 系统优化与长效运维策略

(1) 技术优化: 持续采集各类工况样本扩充训练数据集, 优化深度学习网络结构与超参数配置, 逐步提升复杂过渡工况下的诊断精度; 增加规约转换中间件的断

线重连与数据校验机制, 对顽固适配问题设备实施局部二次回路改造。(2) 管理优化: 制定智能监控系统运行管理制度, 明确日常巡检内容、异常处置流程与数据质量考核标准; 建立设备健康档案与预警闭环管理流程, 确保每一条预警均有原因分析、处理记录与效果追踪^[5]。

(3) 人员优化: 分层分类开展智能化专项培训, 设置理论授课、仿真演练与现场实操课程, 考核合格方可上岗; 组建跨专业运维团队, 融合自动化、通信与数据分析技能, 培养复合型技术人才梯队, 切实提升人员智能化系统实操与应急处置能力。

结束语

本文完成水电厂自动化系统智能化改造的全流程研究, 明确改造核心方案与关键技术, 证实改造可有效提升电厂安全、经济与管理效益。同时研究发现, 系统在瞬态工况识别、老旧设备适配、人员运维能力方面仍存在短板。后续需持续优化智能算法、完善设备适配体系与人才培养机制, 构建长效运维体系, 持续挖掘水电厂智能化运行潜力, 赋能电力系统高质量发展。

参考文献

- [1]刘沛,汪林,任刚.水电厂自动化系统的智能化改造技术研究[J].水电站机电技术,2022,45(12):85-88.
- [2]张毅.基于大数据的水电厂自动化系统智能改造与运维优化[J].水电能源科学,2023,41(07):186-189.
- [3]王海涛,陈曦.水电站自动化监控系统智能化升级改造关键技术[J].水力发电,2024,50(04):92-96.
- [4]曾召山.水电厂自动化系统的智能化改造研究[J].中国设备工程,2023,15(08):232-237.
- [5]陈国霖.水电厂自动化系统智能化改造路径与应用效果[J].今日自动化,2024,26(11):102-104.