

基于智能水电厂的水调自动化系统

姬登云 祁斌斌 潘 锋 樊宏强 张生辉

国网甘肃省电力公司刘家峡水电厂 甘肃 永靖 731600

摘 要:为解决传统水电调度经验化、滞后化、效率低的问题,本文依托智能水电厂核心标准与技术体系,探究水调自动化系统的理论基础、关键技术与整体架构。系统融合物联网、大数据与智能算法,搭建多层级调度体系,实现水情感知、负荷预测、机组优化调度全流程自动化。经多工况仿真验证,系统可有效提升水资源利用率与发电效益,降低弃水率,同时梳理了现存短板并给出优化改进方案。

关键词:智能水电厂;水调;自动化系统

引言:双碳背景下,水电作为优质清洁能源,其高效智能调度对电力系统稳定运行至关重要。传统水调模式依赖人工经验,存在预测精度不足、调度响应滞后、资源利用率偏低等问题,难以适配源网荷储协同发展需求。基于此,本文结合智能水电厂建设规范,构建一体化水调自动化系统,整合智能感知、算法优化与自动控制技术,开展系统设计、功能实现与仿真验证,为水电调度智能化升级提供技术支撑与实践参考。

1 智能水电厂水调自动化系统相关理论与关键技术

1.1 智能水电厂与水调自动化系统概述

(1)智能水电厂以“感知数字化、决策智能化、控制自动化”为核心内涵,依据GB/T40222—2021等标准,建设全面状态感知、信息互联互通、自适应优化决策的智慧水电体系,呈现设备自诊断、调度自寻优、风险自预警等智能化特征。(2)水调自动化系统承担水文预报、发电计划编制、泄洪调度及流域防洪联合调度等核心功能,以实现水资源高效利用、发电效益最大化和生态流量保障为综合调度目标,通过“信息采集—预测分析—方案生成—指令下达—反馈修正”的闭环运行机制驱动水库调度决策^[1]。(3)智能模式下,水调系统由“经验驱动”转向“模型驱动与数据驱动融合”,从离线人工编制方案进阶为在线滚动优化与实时校正,设备层由状态监测升级为智能运维,跨系统间从信息孤岛演变为与电网调度、气象水文、流域管理等平台协同联动的智慧调度体系。

1.2 系统核心理论基础

(1)水资源优化调度以水量平衡方程为基础,结合水库入库径流概率分布与用水户需水特征,构建供需平衡模型,采用动态规划或强化学习方法求解满足防洪、发电、供水等多约束的最优水库调度策略。(2)水电厂机组运行特性通过水轮机效率曲线、机组耗流量特性

及振动区约束描述,出力优化理论以等微增率原则为指导,结合机组启停状态与负荷分配,建立厂内经济调度模型,实现水能—电能的高效转换。(3)源网荷储协同调度基础理论将水电纳入含新能源、电网负荷及储能系统的统一优化框架,建立多时间尺度协调调度模型,利用水电的快速调节能力平抑新能源波动,支撑电力系统安全经济运行的全局最优。

1.3 智能化核心支撑技术

(1)物联网感知技术:在水库流域部署水位计、雨量站、流量传感器及机组振动温度监测终端,构建多层级传感网络,实现水文、工况与环境数据的分钟级实时采集与边缘预处理。(2)大数据处理技术:针对多源异构数据,采用时间序列异常检测、插值拟合及分布式存储技术进行清洗融合,建立统一数据湖,支撑后续分析决策。(3)智能预测与算法技术:基于深度学习与集合预报方法开展水文径流预测,采用粒子群优化、混合整数规划等算法实现厂内机组负荷优化分配与流域群调度决策。(4)自动控制与可视化监控技术:依托SCADA系统实现闸门、机组的远程自动控制,结合数字孪生与三维GIS技术,构建人机交互友好的可视化监控平台,实现调度态势感知与智能告警。

2 智能水电厂水调自动化系统总体设计

2.1 系统设计原则与总体目标

(1)系统设计坚持安全性为首要前提,采用自主可控软硬件架构与多层次纵深防御机制,保障数据与操作安全;以智能化为核心驱动,将AI算法嵌入预测、优化、预警环节,实现从经验驱动向数据驱动的决策转型;保证实时性,满足水文数据秒级采集与调度指令秒级下达的时效要求;兼顾兼容性,支持Modbus、IEC61850、MQTT等主流协议,实现与电网调度、流域管理等多系统的无缝对接;注重可扩展性,采用模块化

架构便于未来功能迭代与新业务接入。(2)短期目标旨在建成涵盖数据采集、方案生成、指令下发、反馈修正的全流程自动化闭环,实现水文数据自动整编入库、发电计划滚动生成、机组状态在线诊断,减少人工干预,提升调度作业效率。(3)长期目标致力于在流域尺度构建多目标水资源优化配置模型,统筹防洪、发电、供水与生态需求;通过与电网深度协同,将水电纳入源网荷储统一调控框架,发挥灵活调节能力;最终建成具备自感知、自决策、自适应能力的无人值守智能调度体系,实现智慧运行新范式。

2.2 系统整体架构设计

(1)感知层采用“固定站点+移动终端+遥感”三位一体部署架构,在坝前、库区及下游布设雷达水位计、翻斗式雨量计、多普勒流速剖面仪等固定传感设备,同步配套无人机巡库与卫星遥感数据接收,实现流域水情、工情全天候立体感知。(2)传输层构建以5G专网为主通道、工业以太网为骨干、物联网低功耗广域网为补充的冗余通信网络,关键测点采用双链路热备与自动倒换机制,核心数据设置QoS保障,链路可用率不低于99.99%^[2]。(3)平台层采用云边协同部署,云端搭建分布式数据湖与GPU算力集群,承担海量存储与模型训练;边端部署流处理引擎与轻量化推理框架,承担实时预处理与在线预测,实现“边端快速响应、云端深度计算”的协同分工。(4)应用层遵循微服务架构,将调度决策、监控预警、报表分析等封装为独立微服务,通过API网关统一注册调用,服务间以消息队列异步解耦,支撑业务敏捷迭代与横向扩展。

2.3 系统核心模块设计

(1)水文数据自动采集与分析模块设计多协议适配器,兼容各厂家传感器格式,实现水位、流量、雨量等数据的自动解码采集;内置统计与机器学习结合的异常识别算法,对缺失数据采用多重插补重构,自动生成符合规范的水文整编成果。(2)智能径流与负荷预测模块集成LSTM、Transformer及新安江模型等多引擎融合架构,采用加权组合策略;支持未来1~7日入库径流与电网负荷滚动预测,提供多置信度方案辅助多情景决策。(3)机组出力优化调度模块以厂内经济运行模型为内核,嵌入改进动态规划与遗传混合优化算法,综合考虑水头变化、振动区约束、启停损耗及检修计划,求解最优机组组合与负荷分配,并支持来水变化下的方案滚动修正。(4)故障预警与应急调度模块构建阈值判据与基于孤立森林、自编码器的无监督异常检测协同预警体系,实现水位超限、设备劣化等分级预警;内置多场

景应急预案库,应急触发后自动匹配预案并多渠道推送告警^[3]。

2.4 系统数据库与交互界面设计

(1)多源调度数据库采用“时序数据库+关系数据库+对象存储”混合架构,时序库承载高频测点数据支撑高速写入与聚合查询,关系库管理设备台账与调度方案等结构化数据,对象存储保存预报成果与影像资料,通过统一数据服务层实现跨引擎透明访问。(2)人机交互界面基于Web组态与数字孪生技术,设计调度驾驶舱总览、水情态势图、机组三维仿真、方案对比推演等可视化面板,支持拖拽布局与图表联动;远程监控采用响应式设计,适配PC、平板及手机,确保随时随地掌握系统状态。(3)权限管理采用基于角色的访问控制模型,细分为系统管理员、调度值班员、分析师等角色,实现菜单、数据、按钮三级精细化管理,结合双因子认证与全链路审计日志确保操作可追溯;数据安全通过国密SSL传输加密、AES-256静态加密及异地灾备,构建全链条防护体系。

3 基于智能水电站的水调自动化系统功能实现与仿真验证分析

3.1 系统运行环境与搭建配置

(1)硬件运行环境配置:系统部署采用机架式服务器集群,配置双路CPU(主频不低于2.6GHz,核心数不少于32核)、512GB内存及RAID10磁盘阵列,数据采集终端选用工业级可编程逻辑控制器与边缘计算网关,控制终端配置多屏显示工作站,网络设备部署核心交换机与硬件防火墙,确保各节点冗余供电与散热设计。(2)软件运行环境配置:服务器操作系统选用国产Linux发行版(内核版本不低于5.4),算法平台基于Python3.9搭建并集成TensorFlow、PyTorch及SciPy等计算框架,实时数据库选用国产分布式时序数据库,关系数据库采用PostgreSQL,监控组态软件选用国产化SCADA平台,Web应用容器采用Docker与Kubernetes编排管理。(3)系统整体调试与运行参数初始化设置:依次开展单机测试、通信链路测试与全系统联调,完成传感器量程校准与零漂修正,设置水位告警阈值、预测滚动周期(每15分钟滚动一次)、调度方案重算触发条件及应急响应分级参数。

3.2 核心功能模块实现

(1)数据自动采集、实时更新与异常筛查功能实现:开发多线程采集服务,按秒级周期轮询各传感器数据,经边缘端预处理后实时推送至平台层,内置滑动窗口均值滤波与 3σ 原则异常筛查算法,自动标记超限数据

并触发补采重传机制。(2)智能预测与优化调度算法落地实现:将径流预测模型封装为RESTful API服务,接入实时水情数据驱动滚动预测;优化调度算法采用Python实现,调用并行计算资源,在分钟级内完成多约束条件下的机组组合求解并输出调度方案。(3)自动调度指令下发与机组协同控制功能实现:建立调度方案到机组控制指令的映射转换中间件,通过标准通信协议将开停机、负荷调整指令下发至机组现地控制单元,并实时接收执行反馈形成闭环修正^[4]。(4)运行状态监控、故障预警与日志记录功能实现:构建系统健康度实时监控面板,对CPU负载、内存占用、网络延迟及数据采集完整率等指标持续监测,预警触发后联动日志归档系统,记录故障上下文信息便于事后追溯分析。

3.3 系统仿真实验与结果分析

(1)仿真实验方案设计、实验参数与评价指标设定:选取某流域水电厂历史水文数据为输入,设计枯水期、平水期、丰水期三类型工况实验方案,设定预测平均绝对百分比误差、调度方案生成耗时、发电量增益率及弃水率四项评价指标。(2)不同工况下系统调度精度、响应速度仿真测试:实验结果显示,径流预测MAPE控制在8%以内,机组组合方案生成耗时平均约45秒,指令下发至执行反馈闭环时间小于3秒,系统在各工况下均满足实时调度时效要求。(3)水资源利用率、发电效益优化效果对比分析:相较于传统调度方式,智能系统在枯水期发电量提升约4.2%,丰水期弃水率降低约6.8%,综合水资源利用率提升约5.5%,验证了优化算法的有效性与经济性。

3.4 系统应用优势与现存问题分析

(1)相较于传统水调自动化系统的应用优势:系统实现从人工经验调度到数据驱动智能决策的跨越,具

备在线滚动优化能力,多源数据融合提升预测准确性,全流程自动化闭环显著降低人工劳动强度与操作失误风险。(2)系统运行过程中存在的技术短板与适配问题:极端气象条件下水文预测精度下降明显,多机组多流域联合调度时算法收敛速度有待提高,老旧电站现地控制设备通信协议不标准增加接口适配复杂度^[5]。(3)针对现存问题的优化改进思路:引入集合预报与在线学习机制增强极端工况预测鲁棒性,探索基于深度强化学习的端到端调度框架以加速联合优化求解,研制通用协议转换网关解决异构设备接入难题。

结束语

本文完成了智能水电厂水调自动化系统的整体设计与功能落地,通过仿真实验证实系统可显著提升调度精度与发电效益,实现水资源精细化利用。同时明确了系统在极端天气适配、多流域联合调度、老旧设备适配等方面的不足。后续将引入在线学习、强化学习算法优化调度模型,完善异构设备接入方案,持续提升系统稳定性与通用性,助力水电调度无人化、智慧化发展。

参考文献

- [1]刘启够,邹文河.基于集控中心的梯级智能水电厂水调自动化系统建设研究[J].浙江水利水电学院学报,2024,36(04):62-67.
- [2]黄永国,万刚.大型智能水电厂水调自动化系统国产化改造与智能升级[J].水电站机电技术,2024,47(08):50-53.
- [3]王铭,李刚.大数据驱动的智能水电厂水调自动化决策系统优化[J].水电能源科学,2023,41(11):178-182.
- [4]陈曦,周宇.智能水电厂水情水调自动化系统功能架构与关键技术[J].水力发电,2022,48(09):95-99.
- [5]林泽宇.智能水电厂水调自动化系统智能化功能优化与应用[J].水利科技与经济,2025,31(03):76-79.