

新型火电机组电热一体化智能管控系统研究

李 想

中国华电阜新金山煤矸石热电有限公司, 辽宁 阜新 123006

摘要: 面向新型电力系统深度调峰与“双碳”战略发展需求, 传统火电厂电气 ECS、热工 DCS 分立控制模式存在数据孤岛、跨系统调控解耦、机组能耗偏高、耦合故障处置效率低下等现实问题。本文搭建感知-传输-算力-应用四层耦合电热一体化智能管控架构, 系统研究统一冗余控制平台、多源异构数据融合、强化学习协同调控、数字孪生 AI 故障预判四项核心关键技术。依托 600MW 超临界煤矸石机组现场改造试验开展量化验证: 满负荷、50%深度调峰工况供电煤耗分别降低 2.2%、3.0%, 厂用电率综合降幅超 10.8%, AGC 负荷响应时长缩短 50%以上, 常规故障处置效率提升 60%。针对设备兼容、算法自适应、网络安全、复合型人才短缺四类落地瓶颈提出全链条优化方案, 为火电低碳智能化改造提供完整工程技术支持。

关键词: 火电机组; 电热一体化; 智能管控; 协同控制; 深度调峰

1 引言

1.1 行业发展背景

国内风电、光伏新能源装机持续扩容, 新能源发电固有的间歇性、波动性特征, 倒逼电网对火电机组提出高频次、大跨度深度调峰与快速调频硬性运行要求。传统火电厂长期采用电气、热工两套自动化系统独立部署方案, 锅炉、汽轮机、环保设备依托 DCS 完成燃烧与辅机调节, 发电机、厂用电、继电保护由独立 ECS 管控, 两套系统硬件、数据库、组态软件完全隔离, 仅依靠低速点位交换少量关键参数, 天然形成跨专业数据壁垒。系统割裂衍生多重运行痛点: AGC 调度指令下发后炉机电分步调节, 响应存在时间差, 极易产生电网辅助服务考核; 风机、水泵等大功率辅机工况无法与机组负荷全局寻优, 厂用电损耗长期偏高; 电气励磁、锅炉受热面等跨专业耦合故障难以建立关联特征, 故障排查周期长, 大幅提升非计划停机风险。在此背景下, 打通软硬件与数据边界, 搭建电热一体化智能管控系统, 是智慧火电适配新型电力系统建设的核心技术路径。

1.2 国内外研究现状

海外西门子、ABB 一体化控制产品成熟, 可实现电热基础联动调节, 但成套设备采购、运维成本高昂, 算法未针对国内煤质波动、低深度调峰工况本地化优化, 系统底层架构封闭, 第三方智能诊断、数字孪生模块接入门槛高, 网络安全架构无法匹配国内电力等保 2.0 强制规范。国内国电南自、国电南瑞、科远智慧、和利时等企业加速国产化 DCS 平台落地, 但现有研究普遍存在短板: 多数成果仅阐述硬件框架, 缺少多源异构数据融合、多变量耦合控制底层机理分析; 缺乏满负荷、50% 调

峰分工况实测数据量化对比; 针对改造落地难点缺少体系化、可落地的优化方案, 工程指导价值有限。

1.3 本文研究创新点

(1) 架构创新: 构建感知-异构网络-统一算力-智能应用四层耦合一体化架构, 融合边缘数据预处理、时序数据库、数字孪生仿真模块, 区别于传统硬件简单拼接的浅层集成模式;

(2) 技术创新: 引入深度强化学习迭代优化 MPC 模型, 解决煤质波动、设备老化、极限调峰工况下传统控制精度衰减问题;

(3) 实证创新: 以 600MW 超临界煤矸石机组改造工程为载体, 设置改造前后两组对照试验, 分两类典型工况量化测算煤耗、厂用电、负荷响应、故障处置核心指标;

(4) 落地创新: 梳理工程应用四大现实瓶颈, 从设备、算法、网络、人才四个维度提出全链条优化路径, 兼顾技术先进性与现场落地可行性。

2 电热一体化智能管控系统内涵与分层架构

2.1 系统核心内涵

电热一体化智能管控系统以统一分布式冗余控制算力底座为核心, 依托 IEC 61850、OPC UA 标准化通信协议打通电气、热工软硬件与数据三层壁垒, 通过边缘数据治理、全局耦合算法、数字孪生推演、AI 故障预判, 实现机-炉-电-环保全流程数据同源、控制联动、统一运维调度。系统并非两套控制功能简单叠加, 而是重构底层控制逻辑, 将 ECS 励磁、无功优化、继电保护与 DCS 燃烧、汽温、辅机变频逻辑集成至同一控制器同步运算, 消除跨系统指令传输延迟, 打破专业分割带来的局部

最优局限,实现机组全局经济、安全、高效运行。

2.2 四层分层架构

(1) 感知层:全覆盖热工炉膛温度、汽包水位、蒸汽参数、烟气指标与发电机功率、励磁、母线电压、断路器状态等全维度测点,配套高精度变送器、振动传感、边缘采集网关;针对老旧无数字接口设备增设 4-20mA 转 OPC UA 转换模块,边缘端同步完成原始数据降噪、异常值剔除、缺失数据插值预处理,减轻上层平台算力负荷。

(2) 网络层:采用工业以太网主干网+现场总线分支混合组网,划分为实时控制网、管理信息网、安全隔离网三段独立网段,部署单向隔离网闸阻断跨网段非法访问;电气设备遵循 IEC 61850 标准,热工设备采用 Profinet 总线,跨系统交互统一使用 OPC UA 安全协议;全链路双冗余光纤,控制器、交换机 1:1 热冗余,流量监测模块实时识别攻击报文,保障毫秒级控制指令稳定传输。

(3) 平台层:作为整套系统的核心中枢,不再沿用传统的 DCS、ECS 机柜分开布置的方案。平台整合多核冗余控制器、分布式时序数据库、边缘智能算法模块以及数字孪生仿真引擎。依托同一套控制器硬件,既能实现电气侧毫秒级保护与调节任务,也可承担热工系统慢速流程控制工作,满足统一组态多专业控制逻辑需求,支持程序在线无扰动下装。系统借助时间顺序数据库统一存储全部测点历史曲线、SOE 故障事件记录以及各类调度指令,为上层业务应用提供统一的数据基础与算力支撑。

(4) 应用层:围绕机组运行、调度协调、设备检修等核心业务,部署各类跨专业模块化应用功能。主要包含 AGC 与 AVC 协同调控、主再热汽温联合优化、厂用电全域节能管控、一体化智能警告、跨设备关联故障排查、设备预测性维护、数字孪生虚实推演等功能模块,由此为基础搭建起从数据采集、智能分析、优化调控直至现场运维处置的全流程闭环管控体系。

2.3 新旧控制模式对比

传统分散控制模式下,软硬件资源重复配置现象突出,各系统之间仅能完成少量单向数据交互,极易形成信息系统和控制系统孤岛。控制手段多依靠单回路独立调节,机组煤耗、厂用电等经济指标优化空间受阻;设备出现异常故障时,需要不同专业工作人员分头开展排查工作。而原有系统接口较为封闭,后期新增智能化功能模块的拓展难度较大。一体化控制系统能够实现硬件资源统筹共享,全部测点数据可实时互通。系统运用全体系耦合,通过优化算法对运行参数开展协同寻优,依靠人工智能手段和大数据系统快速定位跨专业关联节点及故障详

情。平台配备标准化开放接口,可便捷对接数字孪生系统、工业大模型、电力系统大数据等新兴技术应用,在机组运行调控、设备运维管理等方面具备明显优势。

3 一体化系统四大核心关键技术

3.1 冗余统一分布式控制平台技术

硬件采用多核分区并行运算架构,划分独立实时运算、数据缓存、通信交互区域,分别适配电气快速保护与热工慢过程调节差异化周期;控制器、电源、通信模块全部 1:1 双机热冗余,切换过程无扰动,满足机组 24h 连续运行要求。软件搭建一体化组态开发环境,单套程序完成全部电气、热工控制逻辑设计,支持跨专业仿真预演、远程加密参数修改;搭载北斗+GPS 双源时钟同步,实现全测点毫秒级时序对齐,消除时序错位对数据融合建模的干扰。

3.2 多模态异构数据标准化融合技术

电气、热工原始数据存在协议混杂、类型多样、信号漂移等异构难题,本文采用三层递进治理方案:一是接口标准化统一接入,电气设备 IEC 61850 建模,热工设备统一转换 OPC UA 接口,老旧设备增设协议网关消除底层通信壁垒;二是边缘端实时清洗,自动识别超量程、断线、失真数据,完成滤波与缺失值补全;三是时序关联建模,基于统一时间戳关联发电机出力、炉膛温度、辅机电流等参数,挖掘电热变量耦合规律,构建全工况高精度数据集支撑协同控制运算。

3.3 强化学习优化多变量耦合协同控制技术

传统单回路 PID 忽略电热变量强耦合关系,低负荷、煤质波动工况控制品质劣化。本文以 MPC 模型预测控制为基础,嵌入深度强化学习在线迭代权重,三大场景实现电热联动优化:

(1) AGC/AVC 协同调控:同步求解燃料量、汽机调门、励磁最优调节量,消除分步调节滞后,大幅压缩负荷响应时长;

(2) 主再热汽温协同优化:依靠热工系统调整减温水流量与燃烧系统燃烧器倾角,配合电气侧机组出力协同调节,通过双向联动抑制汽温剧烈波动,降低投入减温水造成的机组热效率损失。

(3) 厂用电全域节能管控:按照现货市场实时负荷出清,优化辅机变频运行工况,结合母线无功补偿装置动态投切,同步削减线路有功损耗与辅机无功消耗。借助强化算法持续采集调节偏差数据,不断更新模型参数;面对劣质燃料燃烧或混配、设备磨损、深度调峰等复杂工况,系统能够自适应调整控制策略,解决传统固定控制参数适应场景不足的问题。

3.4 依托数字孪生实现 AI 故障预判与预测性维护

整合热工、电气全维度运行数据参数搭建轻量化故障特征识别模型，自主识别发电机、主变压器、锅炉受热面、汽轮机叶片等关键设备运行参数耦合异常情况。利用高精度数字孪生虚拟镜像还原故障发展全过程，按照风险等级推送预警检修、相关设备停运检修、机组停机检修三类处置方案。该技术能够识别如励磁系统异常诱发主蒸汽温度波动这类跨专业连锁故障，推动运维模式由故障发生后的抢修处置，转变为提前预警防范，有助于减少机组非计划停运次数，缩短现场人员排查故障耗费的时间。

4 600MW 超临界煤矸石机组改造工程应用验证

4.1 工程概况

本次试验选取国内一台 600MW 超临界煤矸石热电联产机组作为研究对象。改造之前，机组长期使用 DCS 与 ECS 相互独立的分散控制架构，存在深度调峰工况煤耗偏高、AGC 和机组协调响应速度偏慢、厂用电消耗量大、跨专业故障排查耗时较长等现实问题。项目于 2024 年完成国产 NT6000 一体化控制平台整体升级改造，完整部署四层系统架构以及全部核心功能模块。为量化改造效果，设置改造前后对比试验，分别采集 600MW 额定负荷、300MW（50%负荷）深度调峰工况下连续 72 小时稳定运行数据，开展各项运行指标对比分析。

4.2 指标量化对比

（1）供电煤耗：600MW 工况由 302.5g/kWh 降至 295.8g/kWh，降幅 2.2%；300MW 调峰工况由 318.2g/kWh 降至 308.5g/kWh，降幅 3.0%。机组年发电量 30 亿 kWh，全年可节约标准煤 2 万吨，同步减排二氧化碳 5.2 万吨；

（2）厂用电率指标：机组满负荷运行工况下，厂用电率由 5.85%下降至 5.21%，降幅达到 10.9%；在 50%深度调峰工况，指标从 7.12%降低为 6.35%，降幅达 10.8%，能够有效抑制低负荷区间各类辅机系统产生的能耗。

（3）AGC 响应时间：原有分立控制系统响应时长维持在 12~15s，改造后的一体化平台可缩短至 5~8s，调节响应速度提升五成以上，各项指标能够满足电网调频相关考核要求。

（4）故障处置耗时：采用分立控制架构时，单次故障处理时长约 2.5~3.0h；依托一体化管控平台之后，处置时间缩减至 0.8~1.2h，故障处理效率提升 60%。

4.3 试验结果分析

现场实测数据能够证实一体化控制系统具备三方面核心优势。运行经济性方面，机组在额定负荷以及深度调峰区间的煤

耗、厂用电水平同步下降，更加契合新能源配套机组经常性低负荷运行的工况特点；电网调度需求方面，机组负荷响应能力得到明显改善，深度调峰、快速调频性能大幅提高；运维安全管理方面，系统打通电气与热工数据隔阂，便于工作人员快速识别各类耦合故障，缩短故障处理占用时间，减少机组发电量损失。

5 系统推广落地存在的制约因素及改进措施

5.1 当前应用存在的瓶颈

（1）存量设备异构兼容难度较大：电厂现场设备生产厂家繁杂，大量投入运行多年的仪表、执行机构无法兼容通用数字化通信协议。改造过程中需要加装协议网关，直接增加项目投入；同时老旧设备测量精度偏低，会对智能控制模型运算精度造成干扰。

（2）控制算法自适应能力有待提高：当前 MPC 模型依托额定工况数据完成建模，当机组燃用劣质煤或混配、设备出现老化或是开展极限深度调峰时，模型预测误差持续增大，低负荷工况下容易发生汽温波动、负荷不稳等问题。

（3）网络安全隐患有所增加：一体化平台集中汇集机组关键控制数据，系统跨网段数据交互拓宽了网络攻击路径。如果安全防护体系建设不完善，极易造成病毒横向快速传播，严重情况下会诱发机组跳闸事故。

（4）复合型技术运维人员缺口较大：现场运维人员大多只精通热工或者电气单一专业知识，缺少大数据分析、智能算法调试、工业网络安全相关综合技能，平台内置的各类智能化功能难以充分发挥作用。

5.2 对应的优化实施思路

（1）推进测控设备标准化升级：持续完善火电厂智能设备统一通信相关行业标准，新建机组优先选用标准化测控装置；对于存量机组，制定分批更换老旧设备方案，减少项目所需协议转换装置数量，控制改造成本。

（2）持续优化自适应控制算法：不断扩充煤质大幅波动、极限调峰、设备老化等特殊工况样本数据库，在平台增设在线自学习功能，动态更新模型权重参数，提升各类复杂工况下控制回路运行稳定性。

（3）构建多层次网络安全防护体系：严格落实网络安全等级保护 2.0 相关规范，部署边界防火墙、单向隔离网闸、内网区域划分、全流量监测等多重防护手段，定期组织漏洞排查以及网络攻防应急演练。

（4）培养跨专业复合型技术队伍：电厂定期组织电气、热工、数字化技术交叉培训；加强和高校合作定向输送复合型技术人员，搭建设备制造企业与发电企业协同育人的长效机制。

6 结论与展望

6.1 结论

本文构建四层耦合新型火电机组电热一体化智能管控架构,系统剖析统一冗余控制平台、多源数据融合、强化学习协同控制、数字孪生故障诊断四大核心技术运行机理。依托 600MW 超临界机组改造对照试验量化验证,一体化系统可有效降低机组发电煤耗与厂用电率,缩短 AGC 负荷响应时间,大幅提升故障处置效率。针对设备兼容、算法适配、网络安全、人才储备四大落地瓶颈提出完整可落地优化策略。该管控体系从底层破除电气热工专业控制壁垒,实现机组全局低碳高效、稳定灵活

运行,可为国内同类型火电机组智能化升级提供理论依据与工程实施方案。

6.2 展望

未来电热一体化智能管控系统将沿三大方向持续演进:一是数字孪生与实时控制深度虚实闭环,实现控制策略离线仿真、故障虚拟推演;二是火电专用工业大模型深度嵌入平台,依托海量运行数据实现参数自主寻优、故障自主识别,逐步推进机组少人值守;三是管控平台向上对接电网调度、新能源场站、储能系统,搭建源网荷储全域协同管控体系,全方位支撑新型电力系统安全低碳稳定运行。

参考文献:

- [1] 中国电工技术学会. T/CES 218-2023《火力发电厂智能控制一体化集成接口规范》[S]. 北京:中国标准出版社, 2023.
- [2] 林焕新, 林侃. 智能控制系统在超超临界百万机组中的应用 [J]. 南方能源建设, 2023, 10 (S1): 89-94.
- [3] 郝广宁. DCS 系统在火电厂电气控制中的运用研究 [J]. 电力设备管理, 2024 (21): 145-147.
- [4] 张嘉铖, 孙宇轩, 朱著, 等. 数字孪生技术在热工自动化设备预测性维护中的应用研究 [J]. 今日制造与升级, 2025 (3): 78-81.
- [5] 徐江. DCS 控制系统在火电厂热工自动化中的应用 [J]. 科技创新与应用, 2025 (12): 189-192.
- [6] 付瑞玲, 乐丽琴. 基于 MATLAB/Simulink 的 PID 参数整定 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2021 (6): 112-115.

作者简介: 李想 (1985—), 男, 工程师, 辽宁阜新人, 大学本科学历, 就职于中国华电阜新金山煤矸石热电有限公司, 研究方向为电力系统热工自动化、电气自动化维护与研究。