

火力燃煤电厂集控运行中智能化应用研究

张力

江苏淮阴发电有限责任公司, 江苏 淮安 223001

[摘要]为传统火力燃煤电厂集控运行过程中面临的诸多难题,加速推进其向高效低碳模式转型,文章开展智能化应用体系研究,对当前的技术进行深入剖析,科学构建智能应用整体框架;针对四大核心关键场景,运用先进的控制理论与算法构建优化控制模型,基于系统论与信息科学原理设计智能化集控系统架构,并通过应用严谨的仿真实验进行验证。研究表明,所构建的智能化应用体系可提升机组响应速度、降低主汽温超调量,实现提前预警设备故障隐患、降低供电煤耗,为火电厂智能化升级提供支撑与参考。

[关键词]火力燃煤电厂;集控运行;智能化;智能算法;数字孪生;负荷优化;燃烧控制

DOI: 10.33142/sca.v8i12.18758

中图分类号: TM7

文献标识码: A

Research on Intelligent Application in Centralized Control Operation of Thermal Coal fired Power Plants

ZHANG Li

Jiangsu Huaiyin Power Generation Co., Ltd., Huai'an, Jiangsu, 223001, China

Abstract: To address the many challenges faced by traditional coal-fired power plants during centralized control and operation, and to accelerate their transition to an efficient and low-carbon mode, this article conducts research on intelligent application systems, deeply analyzes current technologies, and scientifically constructs an overall framework for intelligent applications; For the four core key scenarios, advanced control theory and algorithms are used to construct an optimized control model. Based on system theory and information science principles, an intelligent centralized control system architecture is designed and verified through rigorous simulation experiments. Research has shown that the intelligent application system constructed can improve the response speed of the unit, reduce the overshoot of the main steam temperature, achieve early warning of equipment failure hazards, reduce coal consumption for power supply, and provide support and reference for the intelligent upgrade of thermal power plants.

Keywords: thermal coal-fired power plants; centralized control operation; intelligentization; intelligent algorithm; digital twin; load optimization; combustion control

引言

在“双碳”战略目标引领与能源转型加速推进的大背景下,火力燃煤电厂面临新能源调峰需求、发电效率亟待提升、环保标准日益严苛的多重压力^[1]。集控运行作为火电厂生产管控核心,以往多依赖传统控制方式,但是在应对复杂多变的工况时,暴露出一系列突出的问题,例如响应滞后,难以满足当下电力火力系统对火电厂柔性调节的迫切需求。智能化技术为火力发电厂集控运行的升级转型提供了坚实有力的技术支撑^[2],但是,就目前的应用情况来看,存在技术碎片化、虚实融合不充分等问题,各项技术之间缺乏系统、完整性的体系。因此,开展集控智能化应用系统性研究,构建智能控制与优化模型,对于推动火

力发电厂集控运行的高质量发展意义重大。

1 火力燃煤电厂集控运行核心环节技术瓶颈解析

1.1 集控运行核心环节构成

燃煤电厂的集控运行是指通过集中控制系统对电厂内多个机组及其相关设备进行统一管理与调度的运行模式^[3]。该模式的核心在于实现对电厂各个生产环节的高效协调和优化,以确保电厂在安全、经济和环保的前提下,稳定地生产电力。集控运行的特点主要体现在其高度的自动化、智能化和信息化^[4]。

在火力燃煤电厂的集控运行体系中,分布式控制系统(DCS)占据着核心地位,涵盖四大核心环节:(1)在负荷协调控制环节,实现机组负荷与电网调度指令之间的高

度精准匹配。以电网的实际需求为依据,合理调整机组负荷,以此确保机组输出的稳定性;(2)在燃烧过程控制环节,借助风煤比调节技术,并以燃料的特性以及工况为依据,整煤量与风量的配比,在实现燃料高效燃尽的同时,有效降低污染物的排放;(3)在主辅设备参数控制环节,控制主气压、主气温等核心参数;(4)在设备健康管理环节,实时监测设备的运行状态,并提前发现设备所潜在的故障隐患风险,及时预警,及时干预。

1.2 传统集控运行技术瓶颈

1.2.1 负荷协调控制滞后性

负荷分配策略是燃煤电厂运行管理的核心问题之一,其核心目标是合理配置用电负荷、提高发电效率和降低运行成本。然而,传统负荷协调控制用经典 PID 算法,基于理想线性模型,难适应新能源并网后负荷快速波动工况。电网调度指令骤变时,机组负荷响应速度仅 1.0%/min~1.5%/min,不满足调频要求。且在实际应用中,传统负荷分配方法存在明显局限性,未能全面且深入地考量设备老化状况、机组自身特性等,导致能源利用效率低。

1.2.2 燃烧控制精准度不足

燃烧过程是多变量强耦合非线性系统,受多种扰动影响。传统燃烧控制靠经验调风煤比,难以实时监测,煤质变化时易出现飞灰含碳量大幅波动、NO_x 排放超标等问题。且脱硝系统与锅炉燃烧控制之间存在着显著的交互干扰现象,导致脱硝系统喷氨量的稳定性受到影响,氨逃逸率超标风险上升,造成氨资源的浪费,对周边环境造成严重污染。

1.2.3 关键参数控制稳定性差

主汽温是影响机组安全与效率的关键参数,其控制质量尤为关键。在实际应用中传统 PID 暴露出诸多不足,控制负荷变动时,导致主汽温出现较大幅度的超调现象(±8℃以上)。同时,响应时间长,超安全要求(±5℃),且因未能对主汽温控制系统中涉及的多变量进行精准建模,导致主汽温控制系统与机组的燃烧控制系统、给水控制系统等多个系统之间产生复杂的相互干扰,降低主汽温的控制稳定性。

1.2.4 设备故障预警能力薄弱

传统设备健康管理靠定期检修、人工巡检和离线数据分析,故障预警滞后、漏判误判率高,汽轮机等潜在故障预警提前量常不足 10min,不能及时实现早期预判,早期预防。

2 集控运行智能化应用核心模型构建

2.1 改进型负荷经济分配智能模型

2.2.1 模型构建

以多机组总煤耗最低、污染物排放最少为目标,构建

含机组非线性特性与复杂约束的负荷经济分配模型,用引入自适应惯性权重和交叉变异算子的改进 PSO 算法求解。

目标函数定义为:

$$\min F = \sum_{i=1}^n (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i) + \lambda \sum_{i=1}^n (d_i P_i^2 + e_i P_i + f_i)$$

设 a_i, b_i, c_i 为第 i 台机组煤耗特性系数, d_i, e_i, f_i 为污染物排放特性系数, P_i 为输出功率, λ 为环保权重系数, n 为机组数。约束:功率平衡 $\sum_{i=1}^n P_i = P_{\text{total}}$; 爬坡速率 $-r_{\text{down},i} \leq \Delta P_i \leq r_{\text{up},i}$; 出力上下限 $P_{\text{min},i} \leq P_i \leq P_{\text{max},i}$ 。

2.2.2 算法改进策略

传统 PSO 存在易于陷入局部最优解的固有缺陷,因此,制定以下改进策略:(1)引入自适应惯性权重调节机制,在算法迭代初期采用较大惯性权重,后期减小权重以提升局部开发精度;(2)引入遗传交叉变异算子,建立混合优化框架,增强种群多样性,抑制早熟收敛;(3)非线性映射边界处理策略确保粒子在可行域内的连续搜索能力。改进 PSO 流程见图 1。

2.3 基于 GA-LSTM 的燃烧优化预测模型

2.3.1 模型结构设计

构建基于遗传算法(GA)与长短期记忆网络(LSTM)深度融合的燃烧优化预测模型,实现锅炉热效率与 NO_x 排放精准预测及参数优化。模型分双层架构:预测层采用 LSTM 构建多输入(给煤量、风量、炉温、氧量等)多输出(热效率、NO_x 排放浓度)预测模型;优化层基于 GA 针对风煤比、二次风配比等关键可调参数展开多目标优化,实现锅炉热效率最大化与 NO_x 排放最小化协同优化。

2.3.2 模型训练与优化

首先对 DCS 的历史运行数据实施系统化的预处理干预,采用中值滤波算法实现数据去噪处理,采用线性插值法对缺失数据进行补充;完成数据预处理后,按照科学合理的方式分为训练集、验证集与测试集,用于 LSTM 模型的训练与验证以提供高质量的数据支撑。在模型训练阶段,采用 GA 优化 LSTM 模型的关键参数,通过 GA 的全局搜索能力,提高模型预测的精度;最后训练完备且性能优化的 LSTM 模型,进一步利用 GA 搜索最优燃烧控制参数组合。构建 GA-LSTM 燃烧优化模型的具体结构详见图 2 所示。

2.4 模糊 PID 复合主汽温控制模型

2.4.1 模型原理

针对主汽温控制所呈现出的非线性与时变性特性,融

合模糊控制与 PID 控制的优势,构建模糊 PID 复合模型。通过借助模糊控制器,实时精准的监测主气温的偏差与变化,基于具体情况动态调整 PID 控制器的参数,实现控制参数的自适应优化。

2.4.2 模型结构与规则设计

模糊 PID 控制模型由模糊控制与 PID 控制模块构成:

模糊模块采用二维输入(主汽温偏差 e 、偏差变化率 ec)、三维输出 (ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d) 结构,输入输出变量模糊子集均为{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB},用三角形隶属度函数;依经验与理论制定 56 条模糊规则,如“ e 为 NB、 ec 为 NB 时, ΔK_p 为 PB、 ΔK_i 为 NB、 ΔK_d 为 PS”。模型结构见图 3。

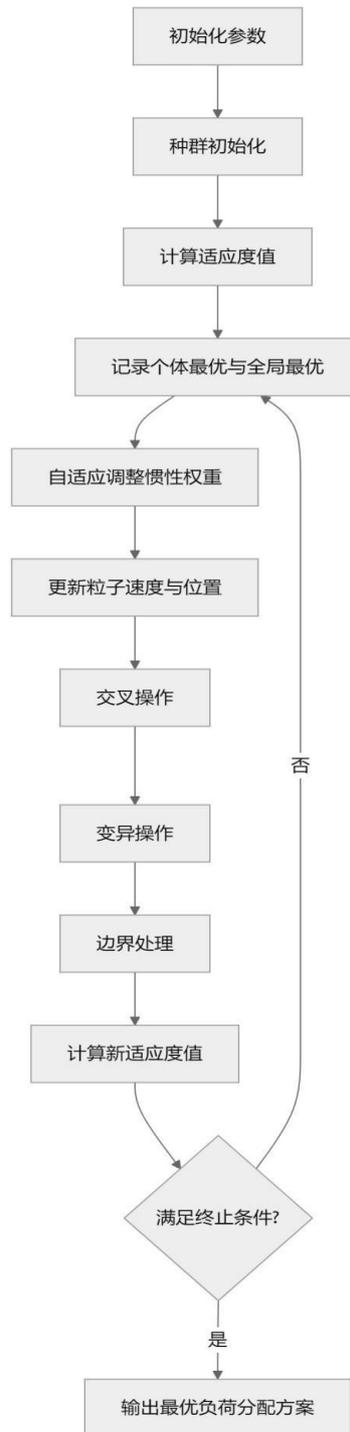


图 1 改进 PSO 算法流程图

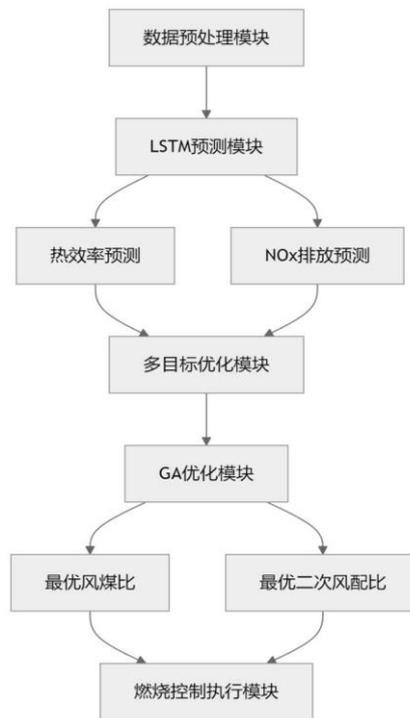


图 2 GA-LSTM 燃烧优化模型结构图

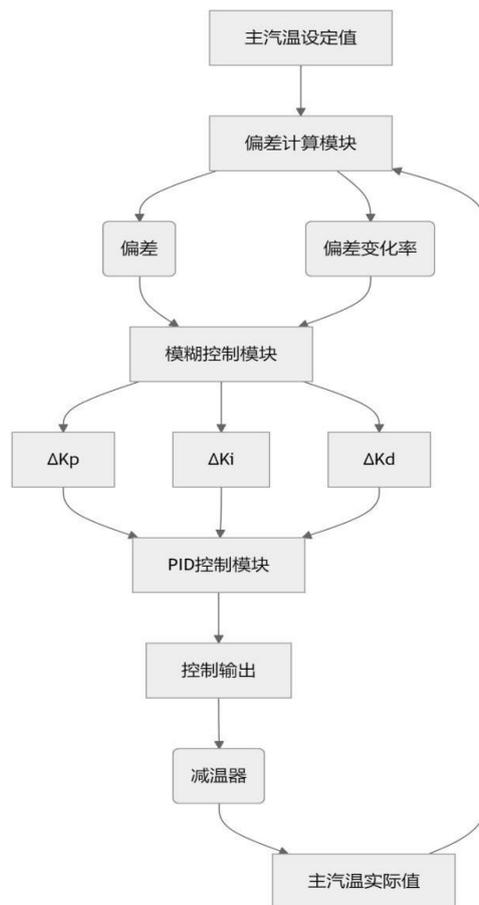


图 3 模糊 PID 复合控制模型结构图

2.5 数字孪生驱动的设备故障预警模型

构建火电机组数字孪生模型,实现物理与虚拟实时映射协同仿真,采用分层架构。物理感知层,部署智能传感设备采集运行参数,用 IEEE 1588v2 协议实现数据时间同步,误差 $<2\text{ms}$ 。虚拟建模层,基于多物理场耦合仿真技术构建核心设备三维精细模型,精准复现运行状态。决策分析层,用基于注意力机制的 Bi-LSTM 算法构建故障预警模型,小波变换提取振动信号时频域特征,输入模型捕捉时序依赖、强化关键特征,经 softmax 分类器输出健康状态实现预警。构建基于注意力机制增强的双向长短期记忆网络 (Attention-augmented Bi-LSTM) 故障预警模型,采用小波变换对振动信号进行多尺度时频分析,构成混合特征向量集;再将特征向量输入模型,通过双向 LSTM 结构实现前向与后向时序依赖关系的联合建模,引入注意力权重分配机制,突出关键时序片段的特征贡献度;最后经 softmax 分类器输出设备健康状态。实时监测不仅有助于电厂及早发现故障,避免事故,而且大大减少了因设备损坏或停机检修造成的经济损失。应急调度机制是对突发事件的有效补充。为了应对可能发生的设备失效、电网异常或其它突发情况,电厂需要制定详尽的应急预案^[5]。应急预案应包含清晰的工作流程、职责划分、资源分配方案等,以保证在突发事件中快速有效的反应。例如,当设备发生故障时,调度员可快速调整机组运行状态,使故障机组暂时停机;在此过程中,调度其它机组增加出力,确保电网负荷均衡,供电不中断^[6]。

3 智能化集控运行系统设计

3.1 系统总体架构

基于核心智能模型构建“感知-网络-决策-执行”四层集成化集控系统,系统总体架构如图 4 所示。

3.2 各层详细设计

3.2.1 感知层设计

感知层是系统数据采集核心,全面感知集控运行参数。

部署智能传感网络覆盖主辅设备,如锅炉水冷壁用红外阵列传感器、汽轮机轴系装振动模块等;通过标准接口对接多系统,实时采集各类参数;用边缘计算节点本地预处理数据,确保实时性。

3.2.2 网络层设计

网络层采用“工业以太网+5G”混合架构实现数据的高效传输。工业以太网采用环网拓扑结构,将集控室设备与服务器紧密连接,确保了系统运行的稳定性;5G 负责现场传感器数据传输与远程指令下达,其低延迟、高带宽的显著优势满足移动监测与远程控制。此外,部署了专业的安全设备,保障整个混合架构网络的安全性。

3.2.3 决策层设计

决策层作为系统“智慧大脑”,集成核心智能模型与数字孪生平台,实现运行评估、优化决策与故障预警。以工业控制服务器建立分布式计算平台,部署四大核心模块,模块间数据共享协同决策;数字孪生平台同步设备状态、仿真验证策略;构建运行知识库,提升系统自学习能力。

3.2.4 执行层设计

执行层将决策层优化指令转为设备控制动作,精准调控集控运行。通过分布式 IO 模块对接执行机构驱动设备,运用闭环控制机制构建实时反馈体系,确保指令准确高效执行。对辅机系统实现制粉、脱硫脱硝等一键启停,有效提升机组的自动化运行效能。

4 仿真实验与性能验证

4.1 实验环境搭建

基于 MATLAB/Simulink 建 600MW 超临界燃煤机组集控仿真模型,用 DCS 系统 10 万条历史数据(含多工况)。硬件为 i7-12700H、32GB 内存、RTX 3060;软件用 MATLAB R2023b、Python 3.9、TensorFlow 2.10。采用对比验证,从负荷响应等 4 维度评估传统 (PID+等微增率法) 与智能化控制体系性能。

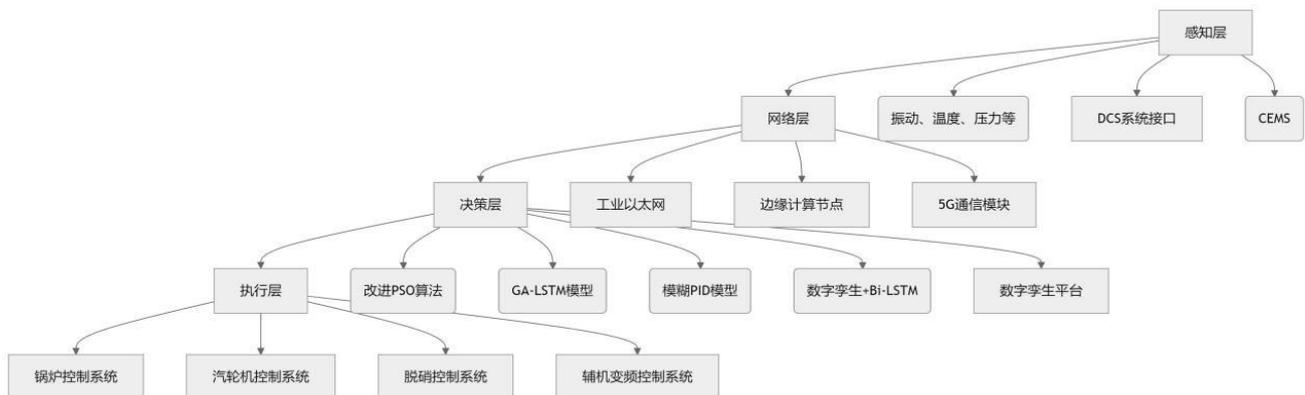


图 4 智能化集控运行系统总体架构图

4.2 性能验证

设总负荷需求 400-600MW, 变化速率 2%/min, 对比传统等微增率法与改进 PSO 算法负荷分配效果, 实验表明, 改进 PSO 算法提升了负荷分配经济性与响应速度, 一次调频合格率高, 总煤耗和 NO_x 排放量均降低, 验证了智能模型有效性。

实验对比传统经验控制与 GA-LSTM 燃烧优化模型在煤质波动下的控制效果, GA-LSTM 模型能实时跟踪煤质变化、精准调风煤比, 使锅炉热效率、飞灰含碳量、NO_x 排放浓度更稳定。

实验在主汽温设定 540°C、负荷骤升工况下, 对比传统 PID 与模糊 PID 复合控制动态响应效果。结果显示, 模糊 PID 复合控制超调量降低, 动态响应时间缩短, 提升了主汽温控制的稳定性与快速性。

仿真实验显示, 本文提出的火力燃煤电厂集控运行智能化应用体系成效显著, 大幅提升负荷响应速度与一次调频合格率, 稳定锅炉热效率并降低 NO_x 排放浓度, 优化主汽温控制, 提前且精准预警设备故障, 降低供电煤耗, 达成安全、高效、低碳运行目标。

5 结论

本文聚焦于火力燃煤电厂集控运行领域, 针对其传统技术中存在的瓶颈问题进行分析, 并开展深入的智能化研究, 结论如下: 对火力燃煤电厂集控运行的四大核心环节所面临的技术瓶颈进行了全面且细致的解析, 明确智能化升级需求。其次, 基于对集控系统复杂特性的深入理解,

构建多维度智能模型体系, 运用多种先进算法与技术手段对集控系统的运行特性进行精准刻画。设计了一套四层架构的智能化集控系统, 更好地适应火力燃煤电厂复杂多变的运行环境, 实现协同联动。实验结果表明, 所提出的模型与系统在提升集控运行性能方面成效显著, 有助于提升集控运行性能。未来研究可融合多源数据, 不断优化模型, 全面开展数字孪生模型轻量化专项研究, 探索多能互补集控的智能化前沿技术, 推进智能化与国产化分散控制系统 (DCS) 的深度融合。

[参考文献]

- [1]陈琳鹏.燃煤电厂集控运行与机组协调控制[J].内蒙古煤炭经济,2021(12):11-12.
- [2]邓万平.基于燃煤电厂集控运行和机组协调控制的研究[J].河南科技,2016(13):21-23.
- [3]李裕琨.火电厂辅控网集中控制系统的研究[J].自动化仪表,2010(5):55-58.
- [4]胜利蒲.火力发电厂汽机辅机现状和优化措施分析[J].工程管理,2024,5(7):103-105.
- [5]孙伟佳.关于燃煤电厂集控运行与机组协调控制[J].中国科技期刊数据库科研,2016(12):288.
- [6]席裕庚,李德伟,林姝.模型预测控制——现状与挑战[J].自动化学报,2013,39(3):222-236.

作者简介: 张力 (1976.9—), 单位名称: 江苏淮阴发电有限责任公司, 毕业学校和专业: 南京电力高等专科学校电厂热能动力工程。