

Research on the Optimization and Response Characteristics of the Unit Coordination Control System in Thermal Power Plant

Xiaobo Li¹ Yiming Kong²

1. State Power Investment Corporation Dalian Power Generation Co., Ltd., Dalian, Liaoning, 116021, China

2. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Dalian Power Supply Company, Dalian, Liaoning, 116000, China

Abstract

The performance of coordinated control systems in thermal power plant units directly impacts operational stability and economic efficiency. This study addresses existing challenges in current coordinated control systems, including strong coupling and response lag, and proposes a research approach centered on optimizing control strategies and enhancing response characteristics. By constructing an improved control model under typical operating conditions and validating its advantages in regulation speed and system stability through simulations, the research demonstrates that this optimization method significantly improves the system's collaborative regulation capability and dynamic response performance. The findings provide theoretical support and technical pathways for ensuring the safe and efficient operation of thermal power units.

Keywords

thermal power unit; coordinated control; response characteristics; system optimization; dynamic performance

火电厂单元机组协调控制系统优化及响应特性研究

李晓博¹ 孔一茗²

1. 国家电投集团大连发电有限责任公司, 中国·辽宁 大连 116021

2. 国网辽宁省电力有限公司大连供电公司, 中国·辽宁 大连 116000

摘要

火电厂单元机组协调控制系统的性能直接关系到机组运行的稳定性与经济性。分析当前协调控制系统存在的耦合性强、响应滞后等问题, 提出一种以优化控制策略和提升响应特性为核心的研究思路。本文结合典型运行工况, 构建改进控制模型, 并基于仿真验证其在调节速度和系统稳定性方面的优势。研究表明, 该优化方法能有效提升系统协同调节能力与动态响应性能, 为火电机组安全高效运行提供理论支撑与技术路径。

关键词

火电机组; 协调控制; 响应特性; 系统优化; 动态性能

1 引言

控制系统的协调性与响应能力是现代火电机组运行中的核心问题。近年来, 随着火电系统负荷波动性增强, 传统控制模式难以满足快速、稳定调节的需求。本文基于实际运行中暴露的问题, 聚焦单元机组协调控制系统优化与响应特性改进, 旨在理论建模与仿真实验, 为火电机组提供更具适应性和效率的控制策略, 推动火电自动化控制技术的发展。

2 火电厂单元机组协调控制系统现状分析

火电厂单元机组协调控制系统是实现锅炉、汽轮机与给水系统等主要设备之间高效协同运行的核心控制架构, 其优化水平直接关系到电厂整体运行的安全性、经济性与调节

性能。当前, 我国大量投运的火电机组采用的是单元制控制模式, 即协调控制系统 (Coordinated Control System, 简称 CCS) 实现对主蒸汽压力、再热汽温及负荷等关键参数的闭环调节。在实际运行过程中, 受限于传统控制逻辑的线性模型假设和滞后环节较多的响应机制, 系统常在负荷变动和扰动工况下表现出一定程度的超调、响应延迟及协同失衡现象, 严重时还可能引发控制振荡或机组不稳定运行, 增加运行人员的干预频率和操作风险。

近年来, 随着电网调峰要求不断提高, 以及可再生能源大规模接入所带来的负荷波动性增强, 传统 CCS 系统的调节速度与精度显得越来越难以满足实际需求。尤其是在中高负荷工况快速切换或频繁启停的情况下, 系统控制耦合度高、回路间干扰大等问题更加凸显^[1]。锅炉燃烧调节滞后于汽轮机负荷变化时, 往往导致主蒸汽压力偏差扩大, 进而引发过热器保护动作或燃烧不稳定。给水调节系统响应缓慢

【作者简介】李晓博 (1987-), 男, 中国吉林吉林人, 硕士, 工程师, 从事火电厂研究。

时,可能出现汽包水位严重偏离,影响锅炉安全运行。这些问题制约了机组对电网负荷的快速响应能力,也降低了整个系统的运行经济性。

目前,为提高协调控制系统的综合性能,部分先进电厂已开始引入基于多变量模型预测控制(MPC)、模糊控制、神经网络自适应控制等新型控制策略,对传统CCS架构进行改进。这些新方法在一定程度上提升了控制的鲁棒性与动态响应能力,但在工程应用中仍面临建模复杂度高、实时性要求严苛以及实际对象非线性强等技术难题。老旧机组的控制系统改造还受到设备兼容性与投资回报周期等因素制约。对火电厂单元机组协调控制系统的现状进行深入分析与问题归因,不但是实现系统优化设计的基础,也是推动智能化控制技术向实际生产深度融合的重要前提。

3 协调控制系统响应特性问题剖析

协调控制系统的响应特性是衡量火电厂单元机组自动控制水平与调节能力的重要指标,其优劣直接影响系统在负荷变化和扰动条件下的动态行为。在实际运行中,常见问题包括响应滞后、超调过大、调节过程波动频繁以及控制回路间耦合失衡等现象。这些问题源于协调控制系统内部控制结构设计不合理,或执行机构响应速度受限,特别是在传统PID控制策略中,面对非线性、强耦合、多时滞的复杂热力系统,容易出现反馈延迟和调节冗余,造成主蒸汽压力、汽包水位等关键参数偏差放大。

从系统结构上看,锅炉、汽轮机和给水系统各自具有独立的调节目标,但在协调控制系统中,这三者需实现协同配合。由于控制器之间存在信息传递延迟,以及执行装置如调节阀、泵组响应速度有限,导致系统整体调节速度难以跟上负荷变化的节奏^[2]。系统建模往往采用线性化处理,难以反映实际运行中的动态非线性特性,使得仿真优化结果与现场表现存在差距。在负荷快速上升阶段,若给水系统调节响应不及时,无法同步补充水量以维持汽包水位平衡,将导致水位剧烈波动,可能引发锅炉低水位或高水位报警,触发连锁保护逻辑动作,迫使机组降负荷运行或紧急停机,既影响正常发电出力,又对锅炉本体及附属设备造成潜在损害,增加运行风险与维护成本。

为改善响应特性问题,目前部分机组尝试引入更复杂的多变量控制策略,如基于状态空间建模的模型预测控制、模糊控制或自适应控制方法。这些先进控制策略能够对耦合关系进行动态预测与实时调整,从而提升系统整体协调能力与响应速度。但在工程应用中,仍需面对算法运算复杂度高、控制系统硬件升级成本大等现实难题。现场运行工况的不确定性与传感器数据精度波动,也可能影响控制系统的稳定性。在优化协调控制系统响应特性的过程中,必须从工程实际出发,综合评估所选控制算法的可实现性与工程部署复杂度,确保其在各种工况下具备良好的鲁棒性。还应充分考虑

电厂运行环境的动态变化特性,使控制系统具备良好的适应能力,从而实现整体系统的安全、高效与稳定运行目标。

4 基于系统优化的控制策略设计方法

针对火电厂单元机组协调控制系统响应滞后与动态性能不足的问题,基于系统优化的控制策略设计方法正成为提升控制质量的重要路径。在传统控制模式中,各子系统之间以串级逻辑进行信号传递,导致调节过程存在多级时滞与耦合干扰。优化控制策略的设计核心在于将整个协调控制系统视为一个多输入多输出(MIMO)系统,采用统一的控制架构进行建模与优化。在此基础上,引入模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)技术,可对系统当前运行状态的实时采集与分析,结合建立的动态预测模型,对未来一段时间内的系统行为进行滚动优化计算。控制器在每一控制周期内基于预测结果做出最优控制决策并不断更新,实现前馈与反馈的有机结合,从而显著减少系统响应时间,有效抑制动态偏差,提高整体调节精度与稳定性。

在系统建模阶段,需考虑锅炉热惯性、汽轮机惯性响应、给水系统调节特性等多个动态因素,构建完整的状态空间模型。为了适应非线性与扰动不确定性的影响,部分优化策略采用模糊逻辑或神经网络作为辅助补偿机制,实现控制器参数的自适应调整^[3]。引入多变量约束控制,可以在确保蒸汽温度、压力、水位等关键参数稳定的前提下,对主调节目标进行权重分配,实现多目标优化。在负荷快速提升工况下,控制策略将主蒸汽压力稳定性优先级提高,自动延迟非关键参数的调节响应,以避免系统扰动的放大。这种动态权重分配机制显著提高了系统的抗扰性能和鲁棒性,提升了整个控制系统的综合响应质量。

在控制策略的实现过程中,还需结合实际运行平台的硬件特性与数据处理能力,进行控制算法的实时部署。对控制回路的动态调试与参数整定过程必须仿真平台进行先期验证,以确保控制器在典型和极端工况下均具备良好的稳定性与快速性。优化控制策略需具备良好的可扩展性,以适配未来更多传感器数据、自动巡检系统和智能调度接口的接入。在此基础上,构建开放式控制平台,使得系统具备持续自优化能力,是当前火电厂协调控制系统智能化升级的重要方向。系统优化不再局限于单点控制器性能提升,而是着眼于整个控制体系的协同与适应,真正实现从经验控制向数据驱动、模型导向的现代控制模式转变。

5 优化控制策略的仿真验证与性能评估

为了验证优化控制策略在火电厂单元机组协调控制系统中的有效性,需要仿真建模与运行测试对系统动态响应和调节性能进行定量评估。仿真平台通常采用基于MATLAB/Simulink或Dymola等多物理场仿真工具,构建涵盖锅炉、汽轮机、给水系统、主蒸汽通道等子系统的综合动力学模型。在建模过程中,需引入系统非线性、时滞特性以及扰动源参

数,确保仿真环境能真实反映机组实际运行行为。在系统模型构建完成后,将优化控制策略嵌入控制器模块,设定典型运行工况(如负荷跃变、外部扰动、给水压力波动等),观察系统关键变量的响应过程,如主蒸汽压力、水位波动幅度和响应时间等。

从仿真结果来看,优化控制策略在负荷扰动下展现出更快的响应速度与更小的超调幅度,相较于传统PID控制器,其主蒸汽压力调节上能够实现更稳定的闭环控制。控制系统对锅炉燃烧量的调节更为精准,有效减缓了蒸汽流量突变对汽包水位的影响,显著降低了汽包水位偏差带来的运行风险^[4]。在仿真平台中引入故障扰动条件(如执行机构响应滞后、信号干扰等),优化控制策略仍表现出较强的鲁棒性,能在参数偏移或传感器失准的条件下保持系统稳定运行。这一过程体现了优化控制器对实际运行中不确定因素的良好适应性与容错能力,进一步提升了系统整体的调节可靠性。

在性能评估方面,对比分析控制器的响应时间、调节稳定性、抗扰动能力和能效指标,可以量化优化控制策略的实际应用价值。采用标准性能评估指标,如超调量、稳态误差、调节时间、积分绝对误差(IAE)与积分平方误差(ISE)等,对比传统控制系统与优化控制系统在不同工况下的表现。结果显示,优化控制策略在多个性能维度上均实现显著提升,尤其在负荷动态响应能力和协调控制精度方面,表现出更高的控制水平。该仿真验证体系为优化控制策略的工程应用提供理论依据,也为后续在实际火电机组中推广部署奠定了技术基础。持续优化仿真参数与评估方法,可实现对控制系统的闭环设计、迭代验证与工程化落地。

6 提升响应特性的关键技术路径探讨

提升火电厂单元机组协调控制系统响应特性,需要在控制理论、系统结构及技术集成等多个层面协同推进,构建以快速响应与稳定性兼顾的优化路径。响应特性差的问题本质上源于系统内部的耦合干扰与动态非线性复杂性,关键技术路径的构建应围绕减小控制滞后、增强调节鲁棒性与提高执行机构响应速度展开。在整体系统架构上,需强化控制层的信息融合能力,高速总线与分布式控制平台,实现多通道信号的实时采集与智能分析,从而缩短数据处理周期,提高指令下发的精准性与及时性。

在控制算法方面,引入先进的多变量控制策略是提升响应特性的核心技术路径之一。模型预测控制(MPC)、

广义预测控制(GPC)以及自适应模糊控制等方法能够对系统未来状态进行预估,并基于约束优化策略提前修正控制信号,减少系统惯性带来的滞后影响^[5]。结合遗传算法或粒子群优化算法的智能整定机制,可实现对控制参数的全局搜索与动态调优,有效应对复杂工况下的控制非线性问题。在执行环节中,应用高速比例调节阀、变频调速泵组等新型设备,提高控制命令的执行精度与反应速度,从而在整个控制链条中建立起快速、高效的响应通路。

为了保障关键技术路径在实际系统中的可落地性,还需建立以仿真平台为核心的响应特性评价机制,结合实测数据与场景模拟对策略进行迭代验证。控制系统应具备一定的自诊断与自适应能力,在运行过程中可自动识别控制死区、信号漂移与工况变化等不利因素,并进行动态调整。构建开放式控制接口,与厂级调度系统进行信息交互,实现协同优化与实时联动,也将进一步拓宽响应特性的提升空间。最终,提升火电协调控制系统响应性能依赖于单一技术的突破,更需在控制理论、软硬件平台与运行机制等方面形成系统性技术路径,从根本上增强机组对动态负荷与复杂工况的快速适应与稳定运行能力。

7 结语

本文围绕火电厂单元机组协调控制系统的优化与响应特性展开系统研究,提出了多变量建模、控制策略升级与关键技术路径集成的整体思路。对现状分析、响应特性剖析、控制策略设计与仿真验证的深入探讨,明确了提升系统动态性能和运行稳定性的技术方向。研究表明,只有在控制架构、算法优化与设备响应能力三方面协同推进,才能实现火电机组协调控制系统的高效运行与智能升级,为电力系统的安全、灵活调节提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 蔡旭,郭子腾,宗皓翔,等.新能源发电并网装备技术发展综述[J].高电压技术,2025,51(08):3972-3991.
- [2] 赵子泰.火电机组深度调峰调频性能评价研究[D].华北电力大学(北京),2024.
- [3] 刘滢君.双轴全控器件励磁同步调相机控制策略[D].华中科技大学,2024.
- [4] 江涛.含风光发电的两区域互联电网频率控制策略研究[D].西安科技大学,2022.
- [5] 谭昌奇.含多种分布式电源的孤岛微电网功率分配及频率稳定问题研究[D].武汉大学,2022.