

发电厂锅炉和汽轮机组的协调控制系统分析

艾波

国家能源集团内蒙古电力有限公司 内蒙古自治区 鄂尔多斯 017200

摘要: 发电厂锅炉和汽轮机组协调控制系统对机组稳定运行至关重要。本文分析锅炉与汽轮机组的动态特性,包括各自系统模型及耦合机理;阐述了协调控制系统架构、核心模块与典型模式;探讨了经典、现代先进及特殊工况下的协调控制策略;最后提出从控制参数、策略、系统结构、辅助技术融合等多维度优化系统性能的方法,以实现机组负荷快速响应、参数稳定控制,提升运行经济性。

关键词: 发电厂; 锅炉-汽轮机协调控制; 单元机组; 负荷响应

引言: 在发电厂运行中, 锅炉与汽轮机组作为核心设备, 其协调控制直接影响机组的安全、稳定与经济运行。锅炉系统具有大惯性、大延迟等特点, 汽轮机组响应快, 二者存在强耦合关系。不同工况下, 机组对协调控制的要求各异。深入研究锅炉-汽轮机组协调控制系统, 分析其动态特性、架构策略并进行性能优化, 对于提高机组运行水平、满足电网需求以及推动发电行业技术发展具有重要意义。

1 发电厂锅炉与汽轮机组动态特性分析

1.1 锅炉系统动态模型

锅炉系统作为发电厂能量转换的核心设备, 其动态特性具有大惯性、大延迟、多变量耦合的显著特点, 动态模型的构建需精准反映燃料燃烧、热量传递、工质相变等关键过程。模型构建以质量守恒和能量守恒定律为基础, 涵盖燃烧系统、汽水系统、烟气系统三大核心子模块。燃烧系统动态主要体现为燃料量与空气量变化对炉膛温度、烟气成分的影响, 存在0.5-3秒的延迟; 汽水系统则涉及省煤器、汽包、过热器等设备的工质流动与换热, 汽包压力对给水量和燃料量的响应延迟可达10-30秒; 烟气系统重点描述烟气流量、温度随燃烧工况的变化规律^[1]。通过机理分析与实验辨识相结合的方法, 可建立包含状态变量(如汽包压力、过热汽温、炉膛负压)和输入输出变量(如燃料量、给水量、引风量)的非线性动态模型, 为协调控制策略设计提供基础依据。该模型需兼顾稳态精度与动态响应特性, 全面覆盖额定负荷、变负荷等典型工况下的系统行为。

作者简介: 艾波, 1979年10月出生, 男, 汉族, 本科学历, 陕西西安人, 助理工程师, 目前在国家能源集团内蒙古电力有限公司上湾热电厂工作, 研究方向: 发电厂锅炉和汽轮机调控系统。

1.2 汽轮机组动态模型

汽轮机组动态特性主要取决于蒸汽能量转换与机械传动过程, 核心是反映蒸汽参数变化与机组功率、转速之间的动态关联, 其响应速度相较于锅炉系统更快, 延迟更小。模型构建围绕汽轮机本体、调速系统、发电机三大核心部分展开。汽轮机本体动态聚焦于蒸汽流量、压力对轮周功率的影响, 高压缸进汽压力变化对功率的响应延迟通常为0.1-0.5秒, 符合一阶或二阶惯性特性; 调速系统动态体现为调节阀门开度与进汽流量的传递关系, 包含油动机响应延迟和阀门流量特性非线性环节; 发电机动态则主要描述电磁功率与机械功率的平衡关系, 以及转速对电网频率的响应规律。模型输入变量为调节阀门开度、主蒸汽压力, 输出变量为机组功率、转速。通过对汽轮机组启停、变负荷、甩负荷等工况的实验测试与数据拟合, 可建立高精度线性化动态模型, 明确不同工况下系统的时间常数、阻尼系数等关键参数, 为协调控制中功率快速响应与转速稳定控制提供理论支撑。

1.3 锅炉-汽轮机耦合机理

锅炉-汽轮机耦合机理的核心是能量转换与传递过程中的相互依存与制约关系, 主要通过主蒸汽参数和机组功率形成强耦合关联。从能量流视角, 锅炉产生的高温高压蒸汽为汽轮机提供驱动能量, 汽轮机的进汽调节阀开度直接影响主蒸汽流量和压力, 进而反向作用于锅炉的燃烧与汽水系统; 反之, 锅炉燃料量、给水量的变化通过主蒸汽压力、温度的改变, 影响汽轮机的做功能力和机组功率输出。具体表现为: 汽轮机调节阀开大时, 进汽流量增加, 机组功率上升, 但主蒸汽压力会随之下降, 此时需锅炉及时增加燃料量和给水量以维持压力稳定; 若锅炉燃料量增加过快, 主蒸汽压力上升, 会推动汽轮机功率被动增加, 可能导致转速波动。另外, 机组负荷变化时, 锅炉的热惯性与汽轮机的快速响应特性

形成固有矛盾,加剧耦合程度。通过分析耦合变量(主蒸汽压力、流量)与输入变量(燃料量、阀门开度)的动态关联,可明确耦合强度与滞后特性,为协调控制系统设计中解耦策略的制定提供关键依据,保障机组运行稳定性与经济性。

2 锅炉-汽轮机组协调控制系统架构与核心模块

2.1 协调控制系统总体架构设计

锅炉-汽轮机组协调控制系统(CCS)以“负荷指令跟踪、参数稳定控制、多系统协同”为核心目标,采用分层递阶结构,含指令管理层、协调控制层、子系统控制层。指令管理层接收AGC或手动指令,经负荷指令处理(速率限制、负荷约束、平滑)后输出目标负荷指令;协调控制层为核心,通过负荷分配模块分配负荷,借助主蒸汽压力控制模块解决机炉动态响应差异矛盾;子系统控制层含锅炉侧燃料、给水等子系统及汽轮机侧转速、功率控制子系统,执行局部指令。架构采用分布式控制(DCS)保障信息交互与指令传输,冗余设计提升容错能力,预留与状态监测、故障诊断系统接口,支撑后续优化升级,确保不同工况下负荷快速响应与参数稳定^[2]。

2.2 核心控制模块解析

锅炉-汽轮机组协调控制系统核心模块含负荷指令处理、负荷分配、主蒸汽压力控制、解耦控制四大模块。负荷指令处理模块预处理AGC或手动指令,设1~3%额定负荷/分钟的变化率限制避免机组冲击,结合设备状态设定负荷上下限保障可行性;负荷分配模块依据机炉动态特性,采用比例或动态优化策略,将目标负荷分解为锅炉侧(燃料、给水调节)与汽轮机侧(阀门开度调节)指令;主蒸汽压力控制模块采集压力偏差,通过PID或先进算法输出指令至机炉侧,维持压力稳定;解耦控制模块设计解耦补偿器,消除压力与功率交叉影响,保障控制通道独立稳定。各模块通过数据总线交互,确保指令快速传递与精准执行。

2.3 典型协调控制模式分析

锅炉-汽轮机组协调控制系统有BF(锅炉跟随汽轮机)、TF(汽轮机跟随锅炉)、CC(机炉协调)三种典型模式。BF模式由汽轮机调功率、锅炉跟调压力,汽轮机调阀门开度快速响应功率需求,锅炉据压力偏差调燃料和给水,功率响应快但压力波动大,适用于电网负荷多变、功率响应要求高的工况。TF模式相反,锅炉据负荷指令调燃料和给水,汽轮机调阀门稳压力间接保障功率,压力稳定好但功率响应滞后,适用于燃料品质波动大、压力要求高的工况。CC模式融合前两者优势,通过负荷分配模块同步向机炉下达指令,锅炉提前调节适配负荷,汽

轮机微调阀门平衡功率与压力,实现双重目标,是大型机组主流模式,适用于额定负荷附近变负荷及稳态工况。

3 锅炉-汽轮机组协调控制策略分析

3.1 经典协调控制策略

经典协调控制策略以PID调节为核心,结合前馈控制、反馈控制与比值控制,构建简单可靠的控制逻辑,适用于中小型机组或工况相对稳定的运行场景。其核心思路是通过前馈控制补偿可测扰动,通过反馈控制消除稳态偏差,通过比值控制维持锅炉与汽轮机的协调配比。具体而言,针对负荷指令变化这一主要扰动,采用前馈控制将负荷指令提前引入锅炉侧燃料控制和汽轮机侧阀门控制,实现“提前调节”,减少动态偏差;在反馈控制环节,以机组功率和主蒸汽压力为核心反馈变量,设计双闭环控制结构,外环为功率控制环,根据功率偏差调整主蒸汽压力设定值,内环为压力控制环,根据压力偏差调节锅炉燃料量和汽轮机阀门开度;同时,引入燃料量与空气量、给水量与蒸汽流量的比值控制,保障锅炉燃烧效率和汽水品质稳定^[3]。经典策略的优势在于结构简单、参数整定方便、可靠性高,能够满足机组稳态运行及缓慢变负荷工况的控制需求。但由于其基于线性化模型设计,对机组非线性特性和复杂扰动的适应性较差,在大幅变负荷或特殊工况下控制性能易下降。

3.2 现代先进协调控制策略

随着机组容量增大和运行工况复杂化,现代先进协调控制策略应运而生,主要包括模型预测控制(MPC)、模糊控制、神经网络控制、自适应控制等,核心优势是能够应对机组的非线性、大延迟和强耦合特性,提升复杂工况下的控制性能。模型预测控制(MPC)是当前应用最广泛的先进策略之一,通过建立机组多步预测模型,预测未来一段时间内功率和压力的变化趋势,结合滚动优化和反馈校正,在满足系统约束(如阀门开度限制、燃料量限制)的前提下,输出最优控制指令,实现多变量协同优化控制;模糊控制基于专家经验设计模糊规则库,无需建立精确数学模型,能够有效处理机组的非线性和不确定性,通过模糊化、模糊推理、清晰化三个环节,实现对功率和压力的自适应调节;神经网络控制利用神经网络的非线性映射能力,自适应学习机组动态特性,可实现控制参数的在线自整定,适用于工况频繁变化的场景;自适应控制则通过实时辨识机组模型参数,动态调整控制策略参数,保障不同工况下控制性能的一致性。现代先进策略通常采用“经典PID+先进控制”的复合控制结构,兼顾稳态精度与动态响应,已成为大型超临界、超超临界机组协调控制的主流方向。

3.3 特殊工况下的协调控制策略

特殊工况下的协调控制策略针对机组启停、甩负荷、燃料品质突变、设备故障等非稳态工况设计，核心目标是保障机组安全稳定运行，避免参数大幅波动或设备损坏。在机组启停工况下，采用分段式控制策略，启动阶段以炉膛温度、汽包水位、主蒸汽温度为核心控制目标，通过缓慢增加燃料量和给水量，控制升温升压速率（通常升温速率不超过 $2^{\circ}\text{C}/\text{分钟}$ ，升压速率不超过 $0.1\text{MPa}/\text{分钟}$ ），避免热应力过大；并网初期逐步提升负荷，采用软着陆控制逻辑，确保功率平稳接入电网。在甩负荷工况下，核心是快速切断燃料供给、调整汽轮机阀门开度，维持机组转速稳定，避免超速跳闸，同时通过旁路系统排放多余蒸汽，维持主蒸汽压力稳定，待转速稳定后转入孤立运行或停机备用模式。针对燃料品质突变工况，引入燃料热值在线监测模块，根据热值变化动态调整燃料量给定值，同时优化空气量配比，保障燃烧稳定和环保指标达标。在设备故障工况（如一台给水泵故障、引风机跳闸）下，采用故障容错控制逻辑，自动调整负荷指令至故障工况下的最大允许负荷，重新分配各运行设备的负荷，确保系统在降级运行状态下的稳定性与安全性。

4 协调控制系统性能优化

发电厂锅炉与汽轮机组协调控制系统（CCS）是保障机组安全高效运行的核心“大脑”，其核心使命是协调锅炉侧能量供给与汽轮机侧能量需求，实现负荷精准跟踪与主汽压力、温度等关键参数稳定，适配电网AGC调度要求。该系统通过机跟随、炉跟随、机炉协调三种模式灵活切换，其中机炉协调模式采用“前馈+反馈”双闭环控制，既能通过汽轮机调门快速响应负荷指令，又能提前向锅炉下发燃料、给水前馈指令，兼顾响应速度与运行稳定性。当前CCS运行面临诸多挑战，机组强非线性、大滞后、参数时变特性，以及煤质波动、负荷骤变等干扰，易导致传统PID控制出现超调量大、调节时间长、参数耦

合失衡等问题，影响供电质量与节能效益。因此，性能优化成为提升机组运行水平的关键^[4]。优化工作以“精准协调、快速响应、稳定高效”为目标，核心策略包括三方面：一是引入智能控制算法，采用模糊PID自整定、模型预测控制等技术，动态调整控制器参数，增强系统鲁棒性，适配复杂工况变化；二是优化前馈补偿逻辑，增设给水、燃料加速指令前馈，解决锅炉响应滞后问题，尤其提升快速变负荷时的压力稳定性；三是强化硬件支撑与逻辑协同，通过高精度传感器网络、冗余DCS控制器提升信号采集与运算效率，完善煤水比、风煤比交叉限制逻辑，保障燃烧安全。实践表明，经优化后的CCS可使负荷响应延迟缩短至30秒内，主汽压力偏差控制在 $\pm 0.3\%\text{MPa}$ 以内，AGC投入率超99%，不仅显著提升电网调峰适配能力，还能降低供电煤耗，实现安全运行与节能减排的双赢。

结束语

发电厂锅炉-汽轮机组协调控制系统研究意义重大。通过对动态特性、系统架构、控制策略及性能优化的全面分析，我们明确了各环节的关键要点与优化方向。未来，随着技术发展，需持续探索更先进的控制方法与优化手段，进一步提升协调控制系统的性能，以适应发电行业日益复杂多变的运行需求，实现机组高效、稳定、安全运行，为电力供应提供坚实保障。

参考文献

- [1]杨博文.发电厂锅炉和汽轮机组的协调控制系统分析[J].仪器仪表用户,2025,32(11):145-147,150.
- [2]王川.发电厂锅炉和汽轮机组的协调控制系统分析[J].电器工业,2023(8):67-70.
- [3]伏慧珍.发电厂锅炉和汽轮机组协调控制系统分析[J].百科论坛电子杂志,2020(10):1230-1231.
- [4]王小辉,孙钢虎,张文斌,等.汽轮发电机转子绕组匝间短路检测方法的研究与应用[J].大电机技术,2020(3):36-41.