

# 锅炉负荷波动下集控操作优化与管控

杨 洋

宁夏银星发电有限责任公司 宁夏 银川 756000

**摘 要:** 本文围绕锅炉负荷波动下集控操作优化与管控展开研究,分析负荷波动核心特性、集控系统组成及二者耦合关系,剖析当前集控操作存在的响应滞后、调节精度不足等问题及成因,设计负荷预判、参数优化、流程协同及智能辅助等优化方案,构建“组织-制度-技术”三级管控体系,结合案例验证方案有效性,可为电厂提升机组运行稳定性、降低能耗、延长设备寿命提供理论支撑与实践参考。

**关键词:** 锅炉负荷波动;集控操作;优化;管控

**引言:** 随着电网调峰需求日益严苛,锅炉负荷波动愈发频繁,其引发的运行参数波动、燃烧不稳等问题,严重影响机组安全经济运行。集控操作作为机组调控核心手段,其合理性直接决定负荷波动的应对效果。当前集控操作存在诸多适配性不足问题,管控体系不完善,因此开展锅炉负荷波动下集控操作优化与管控研究,对解决实际运行痛点、提升机组调控水平具有重要现实意义。

## 1 锅炉负荷波动与集控操作相关理论基础

### 1.1 锅炉负荷波动核心特性分析

(1) 负荷波动的产生原因:主要源于电网调峰需求的动态变化,同时燃料热值、成分等特性波动,受热面灰污导致换热效率变化,以及风机、给水泵等辅机运行状态波动,均会引发负荷波动。(2) 负荷波动的量化特征:关键量化指标包括波动幅度(负荷变化差值)、波动频率(单位时间内波动次数)、持续时间(单次波动的时长),以及负荷区间分布规律(不同负荷段的停留占比)。(3) 负荷波动对机组运行的影响:会导致主蒸汽压力、温度等参数波动,破坏燃烧稳定性,增加机组能耗,长期频繁波动还会加剧设备磨损,缩短设备使用寿命。

### 1.2 锅炉集控运行系统组成与工作原理

(1) 集控系统三层架构:现场控制层负责设备实时控制,集中监控层实现参数集中监视与操作,厂级优化层统筹全局优化,三者通过数据总线实现高效互联。(2) 核心控制模块:DCS系统负责现场设备闭环控制,SIS系统实现运行数据监测与分析,协调控制模块统筹各系统,保障机组稳定运行。(3) 集控操作核心流程:依次为接收电网负荷指令、实时监测运行参数、针对性执行操作调节、根据反馈结果调整操作,形成闭环流程。

### 1.3 集控操作与负荷波动的耦合关系

(1) 负荷波动对集控操作的要求:需具备快速的响应速度、精准的调节精度,以及操作过程中的稳定性,以

适应负荷动态变化。(2) 集控操作对负荷波动的影响:操作滞后、调节幅度不当等问题,会加剧负荷波动,影响机组运行稳定性。(3) 耦合矛盾核心:核心是平衡负荷响应速度与运行参数稳定性,既要快速响应负荷变化,又要避免参数大幅波动。

## 2 锅炉负荷波动下集控操作现存问题及成因分析

### 2.1 集控操作现存核心问题

(1) 负荷响应滞后:当电网负荷指令发生变化时,集控操作中燃料供给、风量调节、给水量调整等环节存在明显滞后,无法及时匹配负荷需求,直接导致主蒸汽参数出现较大波动,影响机组运行稳定性。(2) 操作调节精度不足:锅炉运行参数间存在较强耦合干扰,操作人员在调节过程中难以精准把控各参数匹配关系,导致主蒸汽压力、温度等关键参数波动超出规定允许范围,增加机组运行风险。(3) 变工况适配性差:在低负荷、高负荷等不同运行区间,未针对性调整操作参数,沿用固定操作模式,导致机组在极端负荷工况下稳定性下降,易出现燃烧不稳、能耗上升等问题。(4) 管控体系不完善:缺乏有效的负荷波动预判机制,无法提前预判负荷变化趋势,且未建立负荷波动场景下的标准化操作流程,操作规范性不足,易出现操作混乱<sup>[1]</sup>。

### 2.2 操作问题的成因分析

(1) 操作人员技能不足:部分操作人员对锅炉负荷波动规律掌握不深入,对先进控制算法、集控系统操作技巧熟悉度不够,难以快速应对负荷动态变化。(2) 操作经验依赖度高:现场操作缺乏统一、完善的标准化规范,操作人员多依赖个人经验进行调节,易受主观判断影响,出现人为误操作,加剧操作问题。(3) 应急处置能力欠缺:面对突发负荷大幅波动等异常情况时,操作人员缺乏系统的应急培训,响应不及时,采取的调节措施不合理,无法快速遏制参数波动。

### 2.3 操作问题的成因分析

(1) 集控系统算法滞后: 当前多数机组采用传统PID控制算法, 调节响应慢, 无法适配负荷快速波动场景, 且缺乏预测性调节功能, 难以提前规避参数波动风险。(2) 参数监测精度不足: 现场传感器存在老化、校准不及时等问题, 数据采集过程中存在误差, 导致操作人员获取的运行参数不准确, 影响操作判断的科学性和准确性。(3) 设备协同性差: 锅炉侧与汽轮机侧的操作调节缺乏有效的协同机制, 两者调节时序存在明显差异, 无法形成联动调节, 导致负荷响应效率下降, 参数波动加剧<sup>[2]</sup>。

### 2.4 操作问题的成因分析

(1) 缺乏完善的操作管理制度: 未结合负荷波动场景制定专项操作规范, 对操作流程、调节标准未明确界定, 导致操作缺乏依据, 规范性不足。(2) 培训与考核体系不完善: 未开展针对性的负荷波动操作培训, 操作人员难以提升专项技能, 且缺乏对应的技能考核机制, 无法督促操作人员提升操作水平。(3) 反馈改进机制缺失: 对每次负荷波动下的操作效果未及时总结分析, 未梳理操作中的问题与不足, 无法形成“操作-反馈-改进”的闭环, 操作水平难以持续优化。

## 3 锅炉负荷波动下集控操作优化方案设计

### 3.1 负荷波动预判与前置调节优化

(1) 基于LSTM神经网络的负荷需求预测模型构建, 整合电网调度历史数据、燃料特性参数、锅炉实时运行数据及环境因素数据, 搭建高精度负荷预测模型, 重点实现未来10-15min的负荷变化趋势精准预判, 为前置调节提供可靠的数据支撑, 提前规避负荷突变带来的操作被动局面。(2) 前置调节策略: 根据负荷预测结果, 提前精准调整燃料供给量、送引风量及给水量, 打破“负荷指令下达后再调节”的传统被动模式, 有效缩短调节滞后时间, 使各运行参数提前适配负荷变化需求, 显著减少主蒸汽参数的波动幅度, 提升机组运行稳定性<sup>[3]</sup>。(3) 预测模型优化: 实时采集锅炉炉膛压力、受热面温度等运行参数及电网负荷波动实时数据, 动态修正模型预测参数, 不断降低预测误差, 持续提升预判精度, 确保前置调节的科学性和针对性, 避免因预测偏差导致的调节失当问题。

### 3.2 核心操作参数优化

(1) 燃料调节优化: 通过在线监测装置实时捕捉受热面灰污程度, 结合灰污厚度数据修正锅炉换热效率参数, 根据修正后的换热效率动态调整给煤量及配风比例, 确保燃料充分燃烧, 同时减少因灰污堆积导致的负荷波动, 降低机组能耗, 提升燃烧经济性。(2) 汽水系统调

节优化: 优化直流路水煤比调节参数, 结合主蒸汽压力、温度的实时变化趋势, 动态调整水煤比调节幅度及调节速率, 有效平衡主蒸汽压力与温度的耦合关系, 使关键运行参数稳定在规定允许范围, 大幅提升汽水系统运行稳定性。(3) 变工况操作参数自整定: 按负荷区间划分为30%-50% (低负荷)、50%-80% (中负荷)、80%-100% (高负荷) 三个核心区间, 针对不同区间的燃烧特性、换热效率差异, 设定适配的操作参数阈值, 实现变工况下参数自整定, 显著提升机组变工况适应能力<sup>[4]</sup>。

### 3.3 集控操作流程与协同机制优化

(1) 标准化操作流程制定: 全面梳理不同负荷波动场景 (小幅波动、大幅突变、持续波动), 明确各场景下的操作步骤、参数调节范围、操作时限及应急处置措施, 编制完善的标准化操作手册, 规范操作人员操作行为, 减少人为误操作, 确保操作的统一性和规范性。(2) 机炉协同调节机制: 建立锅炉侧与汽轮机侧操作协同逻辑, 通过数据总线实现负荷指令、运行参数的实时共享, 同步调节锅炉燃料供给、风量分配与汽轮机调门开度, 有效消除两者调节时序差, 提升负荷响应效率和机组整体运行协调性。(3) 操作权限与分工优化: 明确各岗位操作人员的职责与操作权限, 划分负荷监测、参数调节、应急处置等专项分工, 明确各环节操作责任人, 避免操作重叠与遗漏, 确保负荷波动时操作流程顺畅、高效, 实现责任到人、闭环管理。

### 3.4 智能化操作辅助系统优化

(1) 集控系统算法升级: 引入模型预测控制 (MPC) 算法与多变量解耦控制技术, 替代传统PID控制算法, 有效解决各运行参数间的耦合干扰问题, 显著提升调节精度, 实现各参数的精准协同调节, 进一步减少参数波动幅度。(2) 操作预警系统完善: 结合机组运行标准及安全规范, 科学设置主蒸汽参数、负荷波动的预警阈值, 当参数接近阈值或出现负荷突变时, 通过声音、灯光双重提醒操作人员及时调整, 提前规避运行风险, 保障机组安全稳定运行<sup>[5]</sup>。(3) 数据可视化优化: 优化CRT监控画面布局, 整合负荷波动曲线、操作参数变化趋势、预警信息及设备运行状态等内容, 实现负荷波动与操作参数的实时联动显示, 方便操作人员快速、全面掌握机组运行状态, 提升操作效率和准确性。

## 4 锅炉负荷波动下集控操作管控体系构建与案例验证

### 4.1 集控操作管控体系构建

(1) 组织管控体系: 明确各层级管控职责, 建立“决策-执行-监督”三级架构。决策层负责管控方向及优化方案审批; 执行层由集控操作人员、技术人员组成, 承

担方案落地与日常操作；监督层全程监督操作规范性及方案执行效果，形成权责清晰、层层落实的组织体系。（2）制度管控体系：完善集控操作全流程制度，制定负荷波动场景专项操作规范；健全分层分类培训制度，开展负荷预判、应急处置等技能培训；建立考核制度，将操作精度、响应速度纳入考核；补充应急管理制度，明确突发负荷波动处置流程与责任分工。（3）技术管控体系：搭建操作数据监测平台，实时采集负荷波动、操作参数、设备运行等数据；建立数据综合分析机制，挖掘操作与负荷波动的关联规律；完善反馈改进机制，梳理管控问题，形成“监测-分析-反馈-优化”闭环，推动管控体系持续完善。

#### 4.2 管控体系实施路径

（1）前期准备：开展全员专项培训，重点讲解优化方案、管控流程及操作技巧，提升操作人员专业能力；对集控系统、预测模型进行全面调试，确保设备与系统稳定运行；通过专题宣讲、手册发放等方式，宣贯管控制度与实施要求，确保全员知晓、落实。（2）分步实施：按负荷区间逐步推进优化方案与管控体系落地，先在50%-80%中负荷区间试点，总结实施经验、优化细节后，再推广至30%-50%低负荷、80%-100%高负荷区间，确保实施过程平稳有序，避免因全面推进导致的运行波动。（3）后期维护：定期开展集控系统、监测设备的检修校准，保障系统稳定运行；每月组织操作复盘，分析负荷波动下的操作效果与管控漏洞；结合机组运行变化，持续优化管控体系与操作参数，提升管控适配性。

#### 4.3 案例验证

（1）案例概况：选取某电厂600MW超临界锅炉机组作为验证对象，该机组主要承担电网调峰任务，负荷波动频繁，波动幅度为 $\pm 15\%$ 额定负荷，原有集控操作存在响应滞后、调节精度不足等问题，影响机组运行稳定性与经济性。（2）优化与管控实施：应用本文提出的优化方案及管控体系，搭建LSTM负荷预测模型，优化核心操作参数与集控系统算法，制定标准化操作流程与三级管控架构，按中-低-高负荷区间分步推进实施，强化人员

培训与过程监督。（3）效果分析：对比实施前后各项指标，负荷响应时间缩短30%以上，主蒸汽压力、温度波动幅度控制在允许范围的80%以内，机组供电煤耗降低2.3g/kWh，未发生因负荷波动导致的安全事故，充分验证了优化方案与管控体系的有效性。

#### 4.4 问题与改进建议

（1）案例实施中存在的问题：低负荷区间操作适配性不足，预测模型在极端负荷突变时误差略有增大；集控系统在高负荷工况下稳定性有待提升，偶尔出现数据传输延迟；部分操作人员应急处置技能仍需加强。（2）针对性改进建议：进一步优化LSTM预测模型，增加极端负荷突变样本训练，提升预判精度；对集控系统进行升级，优化数据传输链路，增强高负荷工况下的系统稳定性；完善培训体系，增加应急处置实操演练，提升操作人员专项技能。

#### 结束语

本文通过系统研究锅炉负荷波动与集控操作的关联问题，提出针对性优化方案与管控体系，案例验证表明，方案可有效缩短负荷响应时间、降低参数波动幅度、减少能耗。研究虽取得一定成效，但仍存在低负荷适配性等不足，后续将进一步优化预测模型与系统稳定性，完善培训体系，持续提升集控操作管控水平，助力电厂实现安全、高效、经济运行。

#### 参考文献

- [1]王超,张宝瑞.超临界660MW机组直流锅炉动态特性仿真研究[J].热力发电.2024,53(1):74-77.
- [2]吕建,白东海.新型电力系统下基于深度调峰的火电机组控制技术研究[J].山西电力.2023,14(6):59-62.
- [3]高奎.超超临界试运机组深度调峰控制优化[J].热力发电.2021,7(3):47-51.
- [4]张祖哲,朱锋杰.350MW超临界机组给水流量波动的原因及处理[J].科技资讯.2022,12(5):106-109.
- [5]钟伟,马达夫.660MW超超临界对冲燃烧锅炉低负荷试验[J].发电设备.2021,35(6):435-439.