

火电厂锅炉变负荷运行节能控制方法

王 顺

江西赣能股份有限公司丰城发电厂, 江西 宜春 331100

[摘要]本研究针对火电厂锅炉变负荷运行场景,提出通过燃烧过程优化、空气配比动态调节、智能控制系统引入及辅助设备协同调控的综合技术路径,实现多工况下的高效节能运行,基于负荷变化特征构建燃烧优化模型与热力系统协调控制策略,有效提升燃烧效率,降低煤耗与污染物排放,通过 DCS 系统与数据驱动控制算法的深度融合,实现运行参数实时精准调控,增强系统响应速度与热效率,保障机组在宽负荷范围内稳定经济运行。

[关键词]变负荷运行; 节能控制; 燃烧优化; 智能调控; 热效率提升

DOI: 10.33142/hst.v8i6.16904

中图分类号: TM621

文献标识码: A

Energy-saving Control Method for Variable Load Operation of Boilers in Thermal Power Plants

WANG Shun

Fengcheng Power Plant of Jiangxi Ganneng Co., Ltd., Yichun, Jiangxi, 331100, China

Abstract: This study focuses on the variable load operation scenario of thermal power plant boilers and proposes a comprehensive technical path through combustion process optimization, dynamic adjustment of air ratio, introduction of intelligent control system, and collaborative control of auxiliary equipment to achieve efficient and energy-saving operation under multiple working conditions. Based on the characteristics of load variation, a combustion optimization model and a coordinated control strategy of thermal system are constructed to effectively improve combustion efficiency, reduce coal consumption and pollutant emissions. Through the deep integration of DCS system and data-driven control algorithm, real-time and accurate control of operating parameters is achieved, enhancing system response speed and thermal efficiency, and ensuring stable and economic operation of the unit in a wide load range.

Keywords: variable load operation; energy-saving control; combustion optimization; intelligent regulation; thermal efficiency improvement

引言

在电力系统深度调峰背景下,火电厂锅炉面临日益频繁的负荷波动,传统控制策略因调节滞后、多目标协调能力不足,难以同时满足效率提升与环保合规的双重需求,负荷变化直接引发燃烧稳定性下降、煤耗率上升及氮氧化物(NO_x)排放波动等问题,成为制约火电机组绿色高效运行的关键瓶颈,本研究聚焦变负荷工况下的燃烧特性与控制难点,通过智能技术与优化算法的集成应用,探索提升锅炉变负荷适应性的节能控制策略,为火电厂低碳转型提供技术支撑。

1 锅炉变负荷运行特点与能耗分析

1.1 负荷变化对锅炉运行参数的影响

锅炉运行参数随负荷波动呈现显著变化特征,炉膛温度、排烟温度与炉膛压力等关键指标均受直接影响,高负荷工况下,燃料充分燃烧促使炉膛温度上升,传热效能得以优化,排烟温度维持合理区间,利于降低能耗,而进入低负荷运行阶段,燃料供给量减少致使燃烧区域温度下降,不完全燃烧加剧,排烟温度往往随之攀升,造成热损失显著增加。

同时,空气与燃料配比调节难度加大,易引发氧量失衡问题,直接干扰燃烧效率。炉膛负压波动频率显著提升,

对引风系统调节能力提出更高要求,若控制系统响应存在延迟,极易诱发“黑烟”排放、飞灰含量超标等不稳定现象,威胁锅炉运行安全并影响环保性能。

1.2 常见运行问题分析

变负荷运行过程中,燃烧稳定性降低、煤耗攀升及污染物排放超标构成主要运行挑战,燃烧稳定性问题突出表现为炉内火焰剧烈晃动,低负荷(30%以下)运行时更易出现灭火或回火现象,不仅危及锅炉本体安全,还会对受热面设备造成损害。

煤耗增加根源在于燃烧效率衰减、引送风系统效能下降及热能利用不充分,实际运行数据显示,某火电厂锅炉在 50%负荷工况下,单位电量煤耗较满负荷设计值高出约 12%,污染物排放方面, NO_x 、CO 等有害气体浓度随氧量控制精度下降而显著上升,导致排放指标突破环保限值,影响企业达标排放考核。

1.3 不同负荷区间锅炉能效变化规律

锅炉运行能效在 70%~100%负荷区间表现最佳,该区间内燃烧稳定、换热高效且系统协同性良好,当负荷降至 60%以下时,锅炉效率呈现明显下滑趋势,煤耗增速显著加快,其热效率曲线呈现典型抛物线形态,在中高负荷段达到峰值后,随负荷降低急剧下降。

这一变化规律表明,减少低负荷运行时长或优化控制策略对提升能效至关重要,实测数据显示,锅炉在 70%、50%、30% 负荷工况下,热效率分别可达 90%、83%、75%,充分反映出控制策略对运行能效的关键影响。

1.4 能耗指标计算与典型负荷下的对比数据分析

锅炉运行能耗评估通常采用单位发电煤耗 (g/kWh)、锅炉热效率 (%)、排烟热损失 (q_3)、化学未完全燃烧热损失 (q_4) 等核心指标进行量化分析,如表 1 所示。

表 1 600MW 亚临界锅炉在不同负荷下的主要能耗数据

负荷 (%)	单位煤耗 (g/kWh)	锅炉热效率 (%)	排烟损失 q_3 (%)	化学热损失 q_4 (%)
100	278	90.2	5.1	1.3
75	295	87.5	6.8	2.0
50	312	83.1	8.5	3.6
30	339	75.8	11.2	4.9

监测数据清晰表明,锅炉负荷降低过程中,单位发电煤耗呈明显攀升态势,热效率同步下滑,排烟损失、化学不完全燃烧热损失等指标持续恶化,这种变化趋势充分说明,针对低负荷工况制定精细化调控方案势在必行,此举不仅有助于降低运行能耗、延长设备服役周期,更能显著提升机组运行的经济效益,实际运行中。

2 燃烧优化与空气配比控制策略

2.1 在线检测与燃烧状态诊断方法

准确获取燃烧状态信息是实现锅炉燃烧优化的基础,当前火电厂普遍应用氧量分析仪、红外 CO 检测仪、烟气温度传感器等在线监测设备,实时采集烟气氧含量、 CO 浓度、 NO_x 排放等关键参数,其中,氧含量变化直观反映空气过剩程度, CO 浓度则是衡量燃烧充分性的重要依据。

通过将在线监测数据与锅炉分散控制系统 (DCS) 深度融合,可实现燃烧工况的实时诊断与故障预警,当监测到 CO 浓度异常升高且伴随炉膛温度波动时,系统可快速判定存在局部燃烧不充分或配风失衡问题,进而指导操作人员精准调节燃料供给与空气配比,有效避免能效降低和污染物超标风险。

2.2 空燃比动态调整与配风技术

空气与燃料的合理配比是保障锅炉高效燃烧的关键因素,科学的空燃比设置既能确保燃料完全燃烧,又能减少因过量空气导致的热损失,现有空燃比控制策略多以锅炉负荷为基准,结合氧量反馈信号动态调节送风量,实现精细化控制。在配风技术方面,采用前后墙对冲燃烧、四角切圆燃烧等先进方式,可有效改善炉膛气流分布与火焰中心位置,防止偏燃、偏流现象,提升燃烧稳定性。

2.3 分级燃烧与低氮燃烧策略

在追求高效燃烧的同时,控制氮氧化物排放是锅炉优化运行的重要目标,分级燃烧技术通过分阶段引入燃料或空气,在主燃区营造还原性气氛,有效抑制热力型 NO_x

生成,常见的分级方式包括空气分级、燃料分级及烟气再循环等。

低氮燃烧器的应用可进一步优化火焰形态,降低局部高温区域,从而减少 NO_x 生成量,某 600MW 机组采用分级燃烧与低氮燃烧器相结合的技术方案后, NO_x 排放浓度从 500mg/Nm^3 降至 200mg/Nm^3 以下,且未对锅炉热效率产生明显影响,实现了环保效益与节能效果的协同提升。

2.4 燃烧优化对节能与环保的协同增效作用分析

燃烧优化技术的应用可显著降低煤耗、提升热效率,同时有效减少污染物排放,提高环保达标率,实践表明,综合实施各项优化措施后,锅炉运行煤耗可降低 2%~5%,单位电量热耗减少约 100kJ/kWh ,烟尘和 SO_2 排放量也明显下降,兼具良好的经济与环境效益。

此外,燃烧优化有助于减少炉膛结焦和受热面积灰,提升换热效率,延长设备检修周期,降低维护成本,通过构建“在线监测-智能诊断-精准优化-实时反馈”的闭环控制体系,可实现燃烧过程的精细化管理,为火电厂高效低碳运行提供有力技术支撑。

3 智能控制与自动化节能策略

3.1 基于 DCS 系统的锅炉自适应负荷控制策略

分布式控制系统 (DCS) 作为火电厂自动化控制的核心枢纽,集成数据采集、实时监控与参数调节等功能,为锅炉负荷动态调整提供精准技术支撑,在变负荷运行场景下,DCS 通过闭环控制锅炉主汽温度、主汽压力、水位及氧含量等关键参数,实现运行状态的自适应调节。

自适应负荷控制策略依据负荷变化趋势及历史运行数据,动态优化控制模型中的比例、积分、微分参数,显著提升对非线性系统的响应性能,例如,当锅炉负荷快速下降时,DCS 系统基于预测算法提前感知温度过冲风险。

3.2 应用人工智能与大数据分析的运行优化模型

伴随人工智能与大数据技术的深度发展,锅炉节能运行进入智能化新阶段,通过对海量历史运行数据开展聚类分析、模式识别与回归建模,可构建锅炉运行数字孪生模型,精准预测不同负荷工况下的最优控制参数组合,实现精细化运行优化。

基于神经网络、遗传算法、强化学习等人工智能技术构建的智能决策模型,能够实时分析运行状态与目标参数的偏差,动态生成最优调节方案,以深度学习训练的燃烧优化模型为例,该模型可综合锅炉实时负荷、环境温度、煤质特性等参数,智能推荐最佳空燃比与配风策略,实测可提升燃烧效率 2%~3%,同步降低煤耗与污染物排放水平。

3.3 模糊控制、PID 整定与专家系统辅助控制方法

针对锅炉系统多工况耦合、参数强非线性、大滞后及动态变化频繁的特性,传统 PID 控制存在调节精度不足的问题,为提升控制效能,引入模糊控制算法与改进型 PID 整定策略成为关键技术路径,模糊控制基于经验规则

与实时参数变化,实现控制量的自主调节,尤其适用于负荷剧烈波动场景。

融合专家系统构建的智能辅助控制体系,将知识驱动与规则推理有机结合,专家系统凭借内置的操作逻辑与工况分析能力,可快速识别异常运行状态并提供优化建议,有效弥补人工操作经验局限。

通过集成 PID 优化、模糊推理与专家决策,可构建全工况自适应调节框架,显著提升自动化水平,降低人为操作误差,为锅炉高负荷效率与低负荷稳定性提供双重技术保障。

4 辅助系统协同与系统热力优化

4.1 给水系统、引风送风系统的协同节能调节

给水系统作为锅炉热力循环的物质与能量传输枢纽,其运行效率对整体能耗具有决定性影响,在变负荷工况下,主蒸汽压力、温度随负荷波动产生动态变化,传统定速泵供水模式易出现流量调节滞后或过度供水问题,采用变频调速泵组结合智能 PID 控制算法,可依据蒸发量、主汽压力等参数实时调整给水流量,实现给水与负荷的精准匹配,某 300MW 机组应用数据显示,变频改造后给水泵平均节电率达 18%,同时避免了因过量供水导致的额外蒸发能耗。

引风送风系统是保障锅炉稳定燃烧的核心子系统,其风量调控需与燃料输入、炉膛负压及空燃比策略形成动态协同,引入基于变频器的风机智能控制技术,通过采集氧量、负荷指令、炉膛压力等多参数构建模糊控制模型,可实现一、二次风量与负荷变化的毫秒级响应,在典型变负荷运行场景中,引送风机联合优化控制使风机电耗降低 8%~12%,厂用电率下降 0.5%~0.8%,有效提升了机组运行经济性。

4.2 抽汽供热与余热利用技术在变负荷条件下的匹配

在热电联产机组中,抽汽供热系统承担着能源梯级利用的重要功能,但变负荷运行时抽汽参数波动易导致汽轮机效率下降与热网供需失衡,通过构建“抽汽量-热网流量-蓄热调节”联动控制策略,结合相变蓄热装置的动态调峰能力,可实现热电解耦运行,某供热机组应用案例表明,该技术使供热负荷响应速度提升 30%,汽轮机热耗率降低 3.2%,显著提高了供热系统的稳定性与经济性。

锅炉尾部烟气余热回收是低负荷节能的关键突破口,采用低温省煤器与冷凝式换热器组合装置,可将排烟温度从 130℃降至 90℃以下,回收的余热用于加热补给水或厂区供暖,在 60%以下低负荷工况中,余热回收系统可使锅炉热效率提升 2%~4%,年回收热量相当于节约标煤约 3000t,该技术不仅减少了排烟热损失,还降低了脱硫系统的耗水量,实现了能源与资源的双重节约。

4.3 系统综合效率提升策略

火电厂锅炉节能增效不能仅着眼于单个设备改进,需实现各子系统的协同运作,从而达成整体能效的最优化,构建系统级优化模型,将锅炉本体、给水处理、引风送风、

烟气排放、燃料输送、除灰除渣等系统进行集成,实现多参数的协同控制。

建立运行工况评估体系与班组能效考核制度,促使运行人员依据能耗指标优化操作策略,形成节能管理的闭环机制,在某 600MW 机组的实践中,通过实施系统集成优化方案,单位发电量煤耗降低 4g/kWh,热效率提升 1.8%,充分彰显了协同调节在节能方面的显著成效。

4.4 系统热力过程模拟与节能潜力评估

运用热力系统建模与仿真技术,能够精准还原锅炉各子系统的运行状况,对热量传递、能量损耗及设备负荷分配进行量化分析,EBSILON、GateCycle 等专业模拟软件可对不同负荷条件下的热力循环过程进行模拟,开展系统能量平衡计算与优化诊断,为节能改造方案制定提供数据支持。

通过模拟分析能够定位系统高耗能环节与低效运行设备,评估各类技术改造措施的节能效果,以低负荷运行为例,模拟发现引风风机运行效率较额定值低 30%以上,据此提出加装变频器的优化建议,热力模拟结果还可指导设备选型与参数匹配,确保系统设计契合实际运行需求,提升技术经济效益。

将系统模拟分析与数据评估相结合,为火电厂节能工作提供科学依据,推动运行管理从经验驱动向数据驱动转变,实现辅助系统协同效率的最大化与节能潜力的充分挖掘。

5 结语

对火电厂锅炉变负荷运行特性深入剖析,结合燃烧优化策略、智能控制技术以及辅助系统协同调节手段,可实现机组在复杂工况下的高效节能运行,优化燃烧空气与燃料比例,引入智能控制算法与热力仿真技术,有效提升了锅炉燃烧效率与整体热效率,降低了燃煤消耗与污染物排放,依托 DCS 系统实施协同控制策略,保障了各子系统的动态响应与有机联动,兼顾运行安全性与经济性,未来需持续推进智能化改造与数据驱动优化,为火电厂绿色低碳转型筑牢技术根基。

[参考文献]

- [1]慕昀翰.基于燃煤机组深度调峰安全性条件下负荷优化分配[D].北京:华北电力大学(北京),2021.
- [2]高耀岩,王林,高海东,等.火电厂智能控制系统体系架构及关键技术[J].热力发电,2022,51(3):166-174.
- [3]戴赞.基于 APHC 控制策略的火电厂烟气 NOX 浓度控制与优化[D].湖北:湖北工业大学,2021.
- [4]鲁骥.火电厂锅炉燃烧控制系统优化[D].青岛:青岛科技大学,2019.
- [5]罗文强.火电厂集控运行技术与机组协调控制研究[J].电力设备管理,2024(20):86-88.

作者简介:王顺(1998.5—),男,沈阳工程学院,能源与动力工程。