

火电厂 300MW 机组深度调峰高效灵活运行优化研究

朱威彦

国家电投集团贵州金元黔西中水发电有限公司 贵州省毕节市 551500

摘要: 随着电力系统灵活性需求提升,火电厂 300MW 机组深度调峰面临诸多挑战。设备安全隐患突出,燃烧稳定性下降,污染物排放控制困难等问题制约机组高效灵活运行。为解决上述问题,研究提出深度调峰优化策略:通过设备升级与适应性改造增强机组运行可靠性;运用大数据和人工智能技术实现智能运行控制优化,提升负荷响应与燃烧效率;强化环保协同治理,升级脱硝脱硫设备并建立排放预测模型。这些策略有助于提高 300MW 机组深度调峰性能,保障电力系统稳定运行的同时实现节能减排与经济效益提升。

关键词: 火电厂; 深度调峰; 高效灵活运行

在新能源装机规模快速增长、电力系统调峰需求激增的背景下,火电厂 300MW 机组作为电网灵活性调节的重要力量,其深度调峰能力直接影响电力系统稳定性与新能源消纳水平。然而,当前机组在深度调峰过程中面临设备安全风险高、燃烧效率低、污染物控制难等问题。开展深度调峰高效灵活运行优化研究,对提升火电机组灵活性、促进能源清洁高效利用具有重要的现实意义。

1. 300MW 机组深度调峰面临的问题

1.1 设备安全隐患突出

在深度调峰过程中,300MW 机组需频繁进行大幅度负荷变动,这种剧烈的工况转换对设备安全运行带来极大挑战。机组负荷快速下降时,蒸汽流量骤减,主汽压力会出现急剧波动,锅炉受热面与承压部件承受周期性的交变应力,尤其是管道的弯头、焊缝等应力集中部位,极易因疲劳损伤产生微小裂纹。随着调峰频次增加和运行时间延长,这些裂纹会不断扩展,最终导致管道泄漏甚至爆裂,严重威胁机组安全。汽轮机系统同样面临严峻考验,负荷变化会打破转子与轴承间的油膜稳定性,使轴承振动值显著增大。同时,由于低负荷工况下蒸汽流量不足,汽轮机通流部分的冷却效果变差,末级叶片的鼓风摩擦损失增加,产生大量热量无法及时带走,致使轴承温度持续攀升。轴承振动加剧不仅会加速轴承磨损,还可能引发轴系对中偏移,造成动静部件碰磨;而过高的轴承温度会使润滑油黏度下降,润滑性能恶化,进一步加剧轴承的磨损,甚至出现烧瓦事故,严重威胁设备安全稳定运行。

1.2 燃烧稳定性下降

当 300MW 机组进入深度调峰阶段,负荷持续降低致使燃煤量大幅削减,煤粉气流在炉膛内的燃烧特性发生显著变化。低负荷工况下,一次风速与煤粉浓度难以精准匹配,煤粉气流着火延迟甚至无法点燃,极易出现“断火”现象。由于炉膛内整体温度水平下降,火焰传播速度减缓,火焰中心偏移,导致燃烧器区域温度大幅下降,局部区域甚至低于煤粉的着火温度,引发燃烧不稳定。另外,随着燃煤量减少,二次风与煤粉的混合效果变差,部分煤粉无法与充足的氧气接触,导致燃烧不完全。大量未燃尽的煤粉进入烟道,不仅增加了飞灰可燃物含量,降低了锅炉热效率,还会在烟道、空预器等部位积聚,形成可燃物堆积,存在引发二次燃烧的风险。而且,燃烧不稳定还会导致炉膛负压大幅波动,严重时可能引发炉膛爆燃,对锅炉设备的安全运行构成严重威胁。

1.3 污染物排放控制困难

在 300MW 机组深度调峰低负荷运行工况下,炉膛温度急剧下降,由高温热力型主导的氮氧化物生成机理向燃料型转变,脱硝反应所需的最佳温度窗口难以维持。随着温度降低,选择性催化还原(SCR)脱硝系统中催化剂活性显著下降,氨气与氮氧化物的还原反应速率减缓,大量氮氧化物无法被有效脱除,导致排放浓度远超环保标准限值^[1]。同时,低负荷时烟气流速大幅减少,烟气流速降低,使得烟气在脱硝反应器内的流场分布不均,部分区域出现烟气短流或死区,进一步加剧了脱硝效率的下降。在脱硫环节,低负荷工况下烟气

流速下降,导致烟气与脱硫浆液的接触时间缩短,气液传质效率大幅降低。石灰石-石膏湿法脱硫系统中,由于烟气量减少,脱硫浆液循环泵的运行频率需相应降低,但泵的流量调节存在滞后性,容易导致浆液喷淋密度不足,无法与烟气充分接触反应。此外,低负荷时吸收塔内气液两相流态发生变化,浆液的雾化效果变差,部分区域浆液分布不均,造成局部脱硫效率低下。而随着燃煤量减少,炉内喷钙等协同脱硫措施的效果也明显减弱,综合导致脱硫效果难以保证,二氧化硫排放超标风险显著增加,给电厂环保达标带来巨大压力。

2. 火电厂 300MW 机组深度调峰高效灵活运行的优化策略

2.1 设备升级与适应性改造

设备升级与适应性改造是保障 300MW 机组深度调峰高效灵活运行的关键基础。在锅炉燃烧器改造方面,引入浓淡分离燃烧技术,通过特殊设计的一次风喷口结构,将煤粉气流分为富燃料区和贫燃料区,富燃料区在较低温度下实现稳定着火,贫燃料区则抑制氮氧化物的生成,两者协同作用既提升低负荷工况下的燃烧稳定性,又能降低氮氧化物初始排放浓度^[2]。采用新型稳燃结构,如钝体稳燃器、火焰稳定船等,在燃烧器出口形成稳定的回流区,增强煤粉气流与高温烟气的混合,提高煤粉着火性能,确保机组在低负荷运行时火焰稳定,减少灭火风险。

汽轮机系统改造着重于通流部分和汽封结构优化。对通流部分实施增容改造,通过重新设计叶片型线、调整级间间隙,扩大汽轮机在低负荷工况下的高效运行区间,提升蒸汽做功能力;采用先进的蜂窝汽封、布萊登汽封等新型汽封结构,相比传统梳齿汽封,能大幅降低蒸汽泄漏量,减少能量损失,使汽轮机在低负荷运行时依然保持较高的热效率。针对频繁变负荷导致的主蒸汽管道、再热蒸汽管道等关键承压部件疲劳损伤问题,采用应力强化处理技术。通过表面喷丸、激光冲击强化等工艺,在管道表面形成残余压应力层,抵消部分交变应力,提高材料的疲劳强度;对管道焊缝进行无损检测和修复,采用先进的焊接工艺和填充材料,增强焊缝的抗裂纹扩展能力,有效降低管道因应力疲劳产生裂纹、泄漏的风险,保障机组在深度调峰过程中的安全稳定运行。

2.2 智能运行控制优化

智能运行控制优化旨在借助先进的数字化技术,实现

机组深度调峰过程中的精准、高效运行。在机组协调控制系统的构建上,基于大数据平台,整合机组历史运行数据、实时监测数据以及电网负荷调度指令等多源信息,利用机器学习算法中的强化学习、深度学习等模型,对机组负荷响应特性进行深度挖掘与分析。通过不断优化控制策略,系统能够快速预测负荷变化趋势,提前调整锅炉燃烧率、汽轮机进汽量等关键参数,显著提升负荷响应速度,同时将主汽压力、温度等参数的控制精度提升至 $\pm 0.5\text{MPa}$ 、 $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内,确保机组在频繁负荷变动中实现平稳过渡,避免因调节滞后引发的参数大幅波动和设备异常^[3]。

智能燃烧优化系统则以多参数实时监测与智能分析为核心。通过在炉膛内布置高灵敏度的红外测温装置、火焰图像监测系统以及在线飞灰取样分析设备,实时获取炉膛温度场分布、火焰形态特征、飞灰含碳量等关键数据。借助人工智能算法对这些数据进行深度处理,建立燃烧过程动态模型,精准识别不同负荷工况下的最佳燃烧状态。系统可根据模型分析结果,自动调整一次风与二次风的风速、风量配比,优化磨煤机出力和煤粉细度,动态调节给煤量,确保煤粉在炉膛内实现充分、稳定燃烧。在低负荷工况下,该系统能够将飞灰可燃物含量降低 3% - 5%,显著提升锅炉热效率。复合运行策略的创新应用为能耗降低提供了有效途径。通过对机组运行特性的全面分析,制定变压运行与滑压运行相结合的控制逻辑。在高负荷区间,采用变压运行模式,保持汽轮机进汽压力稳定,提高机组发电效率;当机组进入低负荷调峰阶段,系统自动切换至滑压运行模式,使主蒸汽压力随负荷降低而相应下降,减少汽轮机进汽节流损失。

2.3 环保协同治理强化

在深度调峰工况下,机组环保压力剧增,环保协同治理强化势在必行。针对脱硝系统,传统催化剂在低负荷导致的低温环境中活性大幅衰减,对此可引入适用于 200°C - 350°C 低温区间的新型钒钨钛基催化剂,该催化剂采用纳米级多孔结构设计,比表面积较传统催化剂提升 40%,能在较低温度下有效催化氨气与氮氧化物反应。对于现有催化剂,则通过化学清洗、活性组分补充等方式进行再生改造,恢复其活性位点,将脱硝系统的高效运行温度下限从 320°C 降低至 280°C ,确保低负荷时脱硝效率维持在 85% 以上。配套安装催化剂活性在线监测装置,实时评估催化剂性能,精准预判更换周期,避免因催化剂失效导致氮氧化物超标排放^[4]。

脱硫系统的优化聚焦于气液传质效率提升。重新设计喷淋层结构,采用大流量、小角度的螺旋喷嘴替代传统实心锥喷嘴,使浆液雾化粒径从 1200 μm 降至 800 μm ,增大气液接触面积;优化浆液循环方式,将固定流量循环升级为变频调节的分段循环,根据烟气流实时调整浆液循环泵转速与流量,在低负荷时降低能耗的同时保证脱硫效果。增设增效环和均流装置,在吸收塔内形成稳定的气液湍流环境,促使烟气与浆液充分混合,将脱硫效率从 92% 提升至 96%。此外,引入双塔双循环脱硫工艺,高低 pH 值的两级吸收塔串联运行,针对低负荷下烟气成分变化灵活调整运行参数,进一步提高脱硫效率和系统稳定性。污染物排放实时监测与预测体系则构建起环保达标的智能防线。部署高精度 CEMS (烟气连续监测系统),对氮氧化物、二氧化硫、烟尘等污染物进行秒级监测,数据传输误差控制在 $\pm 1\%$ 以内。基于机器学习算法建立污染物排放预测模型,融合机组负荷、煤质特性、环保设备运行参数等多源数据,通过 LSTM 神经网络捕捉数据间的动态关联,实现未来 30 分钟至 2 小时的污染物排放趋势预测。系统根据预测结果,联动环保设备自动调整运行参数,如提前增大脱硝系统的氨逃逸量、增加脱硫系统的石灰石浆液供给量,在负荷变化导致污染物浓度上升前完成预调节,确保排放浓度始终低于国家超低排放标准,实现环保治理与机组深度调峰的协同优化。

2.4 运行管理与协同机制创新

运行管理与协同机制创新是实现火电厂 300MW 机组深度调峰高效灵活运行的重要保障。在深度调峰运行数据库建设方面,通过整合机组 DCS (分散控制系统)、SIS (厂级监控信息系统)、环保监测系统等多源数据,构建涵盖机组启停过程、不同负荷区间运行参数、设备故障记录、环保排放数据等内容的综合性数据库。利用数据挖掘技术中的关联规则分析、聚类分析等方法,对海量历史数据进行深度剖析,例如通过分析不同煤质、环境温度下机组调峰过程中主汽压力、温度、氧量等参数的变化规律,总结出低负荷稳燃、快速负荷响应等工况下的最优运行参数组合。基于这些分析结果,编制详细的标准化调峰操作指南,涵盖负荷升降速率控制、燃烧调整策略、设备参数优化等内容,为运行人员提供科学、规范的操作依据,有效降低因人为操作不当导致的设备异常风险^[5]。

与电网调度的协同联动机制进一步强化机组调峰的精准性和灵活性。建立电厂与电网调度之间的实时信息交互平台,除常规的负荷指令、机组出力等数据外,还共享机组实时运行状态、设备健康状况、环保设施运行参数等信息。引入需求响应机制,电厂根据电网负荷波动情况,提前向调度部门上报机组调峰能力曲线和可调节范围,调度部门结合全网负荷需求进行优化调度。同时,利用先进的通信技术和智能算法,实现电网负荷指令与机组控制系统的直接对接,当电网发出调峰指令时,机组能够快速响应,自动调整运行参数,将负荷调节时间缩短 30% 以上,确保机组调峰能力与电网负荷需求的精准匹配,提升电网运行稳定性和电厂调峰效率。

3. 结语

火电厂 300MW 机组深度调峰的高效灵活运行,是保障电网稳定与能源结构转型的关键环节。通过系统梳理设备安全、燃烧稳定性、污染物控制等现存问题,并针对性提出设备改造、智能控制、环保协同等优化策略,能够有效提升机组调峰能力与运行经济性。未来,随着新能源占比持续攀升,需进一步探索融合储能技术、新型材料应用的创新路径,深化机组灵活性提升研究,推动火电机组在深度调峰中实现安全、高效、绿色运行,为新型电力系统建设提供坚实支撑。

参考文献:

- [1] 王称红. 火电厂 300MW 机组集控运行策略研究 [J]. 中国金属通报, 2022, (06): 147-149.
- [2] 张天贺. 300MW 火电机组辅机设备厂用电优化研究 [J]. 中国设备工程, 2021, (18): 88-89.
- [3] 王仁雷, 王丰吉, 戴瑜, 兰永龙. 300MW 机组脱硫废水旁路蒸发干燥系统性能试验研究 [J]. 工业用水与废水, 2021, 52 (03): 23-26.
- [4] 李进军. 300MW 机组运行优化管理及应用 [J]. 中国新通信, 2020, 22 (14): 150.
- [5] 张桂滨. 降低 300MW 机组火力发电厂用电率的方法研究 [J]. 科技风, 2020, (16): 195.

作者简介: 朱威彦; 性别: 男; 出生日期: 1995 年 8 月; 民族: 汉族; 籍贯: 云南曲靖; 学历: 大学本科; 职称: 助理工程师; 研究方向: 火力发电厂系统研究与应用