

1000MW超超临界二次再热机组深度调峰浅析

秦海思

中煤鄂州能源开发有限公司 湖北 鄂州 436000

摘要：本文围绕1000MW超超临界二次再热机组深度调峰展开研究，阐述机组核心特性、深度调峰定义及影响因素，分析深度调峰中锅炉侧燃烧不稳定、汽轮机安全隐患、辅助系统适配不足等问题及机理，结合行业实践提出锅炉、汽轮机、辅助系统及协调控制系统的优化策略，可有效提升机组低负荷稳定运行能力，适配新型电力系统调峰需求，为同类机组深度调峰提供理论参考与实践借鉴。

关键词：1000MW超超临界；二次再热机组；深度调峰

引言：随着新能源大规模并网，电网负荷峰谷差持续扩大，对火电机组调峰灵活性提出更高要求。1000MW超超临界二次再热机组因效率高、环保性好，成为电力系统主力机组，其深度调峰能力直接影响电网安全稳定运行。当前部分机组深度调峰时存在低负荷运行不稳定、能耗升高、污染物排放超标等问题，因此开展机组深度调峰研究，剖析问题机理并提出优化方案，对提升电网调峰能力、推动能源结构转型具有重要意义。

1 1000MW 超超临界二次再热机组及深度调峰相关理论基础

1.1 1000MW超超临界二次再热机组核心特性

(1) 机组结构组成与工作原理：主要由锅炉、汽轮机、发电机及辅助系统构成，锅炉产生高温高压蒸汽，经两次再热提升参数后进入汽轮机做功，驱动发电机发电，实现热能向电能的转化，核心是通过二次再热提升能量利用效率。(2) 超超临界二次再热技术的核心优势：相比常规机组，能显著提升蒸汽参数，降低排烟热损失，提高机组发电效率；同时增强机组调峰灵活性，减少污染物排放，适配电网调峰需求，兼顾经济性与环保性。(3) 机组运行参数范围及调节特性：额定负荷1000MW，运行负荷可在30%~100%额定负荷区间调整，主蒸汽压力、温度需维持稳定；调节特性上，负荷响应速度、参数调节精度直接影响调峰能力，低负荷时调节难度显著增加。

1.2 深度调峰的定义与技术要求

(1) 深度调峰的界定标准：以30%额定负荷为核心参考，当机组运行负荷降至30%及以下额定负荷，且能连续稳定运行一定时长、无异常波动，即为深度调峰，是应对电网负荷峰谷差扩大、保障电网安全稳定运行的关键手段。(2) 电网对机组深度调峰的性能指标要求：核心要求机组低负荷下稳定运行，主辅设备参数波动控制

在允许范围， SO_2 、 NO_2 和粉尘等污染物严格达标排放，负荷升降响应及时准确，满足电网调度的动态调节需求。(3) 深度调峰与常规调峰的差异及技术难点：常规调峰负荷多在50%以上，调节难度低、运维成本低；深度调峰负荷降至30%以下，核心难点是锅炉燃烧不稳定易灭火、汽轮机振动超标等安全风险升高、辅助系统适配性不足^[1]。

1.3 深度调峰的核心影响因素

(1) 锅炉侧燃烧稳定性影响因素：主要包括煤粉特性、配风合理性、炉膛温度，低负荷时炉膛热量不足，易导致燃烧不稳定甚至灭火。(2) 汽轮机侧安全运行约束因素：低负荷下蒸汽流量不足，易出现水冲击、振动超标、胀差异常等问题，威胁汽轮机设备安全。(3) 辅助系统协同影响因素：脱硝、制粉等辅助系统适配性不足，如喷氨过量、制粉不稳定，会影响机组低负荷稳定运行。(4) 煤质波动对深度调峰的干扰作用：煤质热值、挥发分波动会改变着火性能，导致燃烧工况波动，增加深度调峰难度，影响机组稳定性。

2 1000MW 超超临界二次再热机组深度调峰面临的问题及机理分析

2.1 锅炉侧深度调峰核心问题

(1) 低负荷下燃烧稳定性不足，易出现灭火风险：深度调峰时机组负荷降至30%额定负荷以下，炉膛输入热量大幅减少，温度显著降低，煤粉着火点后移、燃烧速度减慢，且炉膛烟气扰动减弱，煤粉与空气混合不均，易出现局部缺氧燃烧，严重时引发炉膛灭火，核心机理是低负荷下炉膛热负荷不足，无法维持煤粉稳定着火的临界温度。(2) 主再热汽温偏差扩大，难以维持额定参数：低负荷时锅炉受热面吸热不均，二次再热回路烟气流量分配失衡，同时汽轮机进汽量减少，汽温调节幅度受限，导致主再热汽温偏差超出允许范围，机理主要是

低负荷下受热面热负荷分布不均、汽温调节手段响应滞后,无法及时补偿吸热差异。(3)灰渣含碳量升高、锅炉效率下降的机理:低负荷下煤粉燃烧不充分,未燃尽的煤粉随烟气进入炉膛底部,形成灰渣并残留大量碳元素;同时炉膛温度偏低,煤粉燃尽率降低,排烟热损失增加,双重作用导致锅炉效率显著下降,本质是燃烧工况偏离设计值,煤粉燃尽条件不足^[2]。(4)省煤器出口NO₂生成量增加及尿素供氨系统压力波动大:低负荷下炉膛温度低,热力型NO₂生成量减少,但燃料型NO₂因煤粉燃烧不充分而升高,导致省煤器出口NO₂浓度超标;同时烟气流量减少,脱硝系统烟气流速降低,催化剂反应效率下降,需增加喷氨量,进而引发尿素供氨系统压力波动。

2.2 汽轮机侧深度调峰安全隐患

(1)低负荷下水冲击风险及形成机理:深度调峰时汽轮机进汽量大幅减少,汽阀开度小,蒸汽在管道内流速降低,易发生冷凝形成凝结水;若凝结水未及时排出,随蒸汽进入汽轮机通流部分,会引发水冲击,严重损坏叶片、汽阀等部件,核心机理是低负荷下蒸汽参数降低,冷凝水产生量增加且排出不畅。(2)汽轮机振动、胀差异常的影响因素:低负荷下汽轮机进汽不均匀,转子受力失衡,导致振动超标;同时,机组负荷骤降或骤升时,转子与汽缸膨胀速度不一致,胀差超出允许范围,主要影响因素包括进汽参数波动、机组保温效果不佳及胀差调节系统响应滞后。(3)末级叶片疲劳损伤的潜在风险:低负荷下汽轮机末级叶片进汽量少,蒸汽流速降低,叶片易出现颤振,长期运行会导致叶片疲劳损伤;此外,低负荷下末级叶片承受的离心力、汽动力波动较大,进一步加剧叶片磨损,增加断裂风险。

2.3 辅助系统适配性问题

(1)制粉系统低负荷运行稳定性不足:低负荷时磨煤机出力大幅降低,煤粉细度难以控制,易出现煤粉堵塞、磨煤机振动等问题;同时,热风温度不足,煤粉干燥效果差,影响煤粉输送和燃烧稳定性,适配性不足的核心是制粉系统设计负荷与深度调峰低负荷不匹配。(2)SCR脱硝系统喷氨量过大及氨逃逸问题:低负荷下NO₂浓度波动较大,为满足脱硝达标要求,易出现喷氨量过量情况;过量氨气未充分反应,会与烟气中SO₃结合形成铵盐,造成催化剂和空预器堵塞,同时氨逃逸超标会腐蚀下游设备。(3)给水系统波动对机组运行的影响:低负荷下给水流量需求减少,给水泵调节范围受限,易出现给水压力、流量波动,导致锅炉贮水箱水位不稳定;同时,给水温度波动会影响锅炉受热面换热,进一

步加剧汽温偏差,影响机组整体运行稳定性。

2.4 协调控制系统适应性不足问题

(1)多变量强耦合导致调控精度下降:深度调峰工况下,煤量、风量、给水量、调阀开度等多个变量相互耦合,且参数波动频繁,协调控制系统难以精准把控各变量的匹配关系,导致负荷调控精度下降,无法快速响应电网调度指令。(2)传统控制策略对低负荷工况响应滞后:传统协调控制策略主要针对常规负荷工况设计,对深度调峰低负荷工况的适应性不足,控制参数未及时优化,导致系统对负荷变化、参数波动的响应滞后,易出现调控失衡。(3)负荷指令与煤量、风量、给水量协同性差:深度调峰时负荷指令频繁变化,但煤量、风量、给水量的调节速度与负荷指令不匹配,存在调节滞后或过度调节现象,导致炉膛燃烧、给水流量等参数波动,影响机组稳定运行。

3 1000MW 超超临界二次再热机组深度调峰优化策略

3.1 锅炉侧深度调峰优化措施

(1)燃烧系统优化:等离子体强化燃烧与配风调整。针对低负荷燃烧不稳定问题,投用等离子体点火装置,通过高能等离子体提升煤粉着火温度,缩短着火延迟期,避免局部灭火;同时优化配风方式,采用“分级配风、按需供风”模式,调整一次风风速与二次风配比,增强炉膛烟气扰动,促进煤粉与空气充分混合,提升燃烧稳定性,确保机组在30%以下额定负荷仍能稳定燃烧。(2)煤粉细度优化:基于负荷的动态调整方案。建立负荷与煤粉细度的联动关系,低负荷时适当减小煤粉细度,增加煤粉比表面积,提升着火性能和燃尽率;高负荷时合理增大煤粉细度,降低制粉能耗。通过磨煤机出口煤粉细度在线监测,实时调整磨辊压力、通风量,实现煤粉细度的动态精准控制,减少灰渣含碳量,提升锅炉效率。(3)主再热汽温控制:烟气再循环与燃烧器摆角复合调节。启用烟气再循环系统,通过调整再循环烟量,均衡锅炉受热面吸热分布,缓解主再热汽温偏差;结合燃烧器摆角调节,根据负荷变化动态调整燃烧器垂直摆角,改变火焰中心高度,针对性调整受热面吸热量,实现主再热汽温稳定控制,确保汽温偏差控制在允许范围内,维持额定参数运行^[3]。(4)优化吹灰方式。制定差异化吹灰策略,低负荷时减少吹灰频次,避免炉膛温度大幅波动,高负荷时适当增加吹灰次数,清除受热面积灰,提升换热效率,兼顾燃烧稳定性与锅炉效率。

3.2 汽轮机侧安全防护优化

(1)过热度动态修正与水冲击预警机制。建立过热

度动态修正模型,根据负荷、蒸汽参数变化实时调整过热度设定值,避免蒸汽带水;搭建水冲击预警系统,实时监测汽轮机进汽温度、压力、疏水流量等参数,当参数异常时及时发出预警,联动调整锅炉蒸汽品质、开启疏水阀,从源头杜绝水冲击风险。(2)低负荷下汽轮机参数动态监控与调整。搭建汽轮机参数实时监控平台,重点监测振动、胀差、轴向推力、末级叶片温度等关键参数,设定分级预警阈值;当参数出现异常时,自动调整进汽量、转速等参数,或联动降负荷,避免振动超标、胀差异常及末级叶片疲劳损伤,保障汽轮机设备安全。

3.3 辅助系统协同优化

(1)制粉系统协同控制:磨煤机投运数量与出力联动。根据机组负荷需求,优化磨煤机投运组合,低负荷时减少磨煤机投运数量,避免单台磨煤机低出力运行导致的煤粉堵塞、振动问题;实现磨煤机出力与负荷的联动调节,实时匹配锅炉煤粉需求量,确保煤粉输送稳定,同时降低制粉系统能耗。(2)脱硝系统优化:喷氨均匀性调整与氨逃逸控制。优化SCR脱硝系统喷氨格栅布局,调整喷氨支路阀门开度,实现喷氨均匀性提升,避免局部喷氨过量或不足;引入氨逃逸在线监测信号,建立喷氨量与 NO_2 浓度、氨逃逸量的联动控制逻辑,动态调整喷氨量,既确保 NO_2 达标排放,又减少氨逃逸,防止催化剂和空预器堵塞和设备腐蚀^[4]。(3)给水系统稳定性优化:变负荷速率分级控制。根据负荷变化幅度,将变负荷速率分为多个等级,低负荷区间采用低速变负荷模式,避免给水流量大幅波动;优化汽动给水泵转速调节逻辑,提升汽动给水泵调节精度,联动调整给水调阀开度,稳定直流锅炉给水温度,减少对锅炉受热面吸热的影响,保障机组整体稳定。

3.4 协调控制系统升级优化

(1)多变量前馈补偿策略应用。针对煤量、风量、给水量等多变量强耦合问题,引入前馈补偿控制,提前预判负荷指令变化和参数波动,提前调整各控制变量,

减少耦合干扰,提升调控精度,避免参数出现大幅波动,确保机组在低负荷下参数稳定。(2)基于负荷区间的内模控制器参数设定。将机组负荷划分为不同区间,针对低负荷、中负荷、高负荷工况的特性差异,分别设定内模控制器参数,优化控制算法,提升控制系统对不同负荷工况的适应性,解决传统控制策略低负荷响应滞后的问题,实现负荷快速、平稳调整^[5]。(3)控制逻辑组态优化与调试方法。梳理协调控制系统现有逻辑,删除冗余逻辑、优化联锁条件,增强逻辑的合理性和可靠性;采用“分段调试、逐步优化”的方法,先在离线仿真平台调试,再进行现场试运,根据机组实际运行数据调整控制参数,确保控制系统与机组低负荷运行工况精准匹配,提升协同调控能力。

结束语

1000MW 超超临界二次再热机组深度调峰是适配新型电力系统、保障电网稳定的关键举措,其面临燃烧、汽机安全及系统适配等痛点需针对性优化。本文提出的多维度优化策略,可有效解决低负荷运行难题,提升机组调峰灵活性与稳定性。未来需结合技术发展,优化控制策略、融合智能监测技术,持续提升调峰经济性与环保性,为能源结构转型提供有力支撑。

参考文献

- [1]陈飞.1000MW二次再热机组深度调峰安全运行问题浅析[J].技术与市场.2021,9(12):89-92.
- [2]沈志勇.超超临界1000MW机组深度调峰风险分析及措施[J].节能与环保.2022,15(10):124-127.
- [3]吕洪坤.600 MW亚临界锅炉深度调峰动态试验研究[J].锅炉技术.2021,21(2):150-152.
- [4]刘文胜.600MW亚临界锅炉30%额定负荷深度调峰试验研究[J].锅炉技术.2023,7(4):60-63.
- [5]丁建良.大型燃煤电站锅炉宽负荷脱硝技术路径选型及应用分析[J].能源研究与利用.2024,10(2):247-249.