

600MW 亚临界机组深度调峰运行策略研究

史浩

国能粤电台山发电有限公司，广东台山 529228

摘要：由于新能源大规模并网及电力系统调峰需求迅猛增长，因此 600MW 亚临界机组深度调峰能力成为保障电网稳定性的技术方向，本文对该类型机组深度调峰运行策略作了系统分析：先做机组适应性分析，再讨论燃烧稳定性优化、汽轮机参数控制、环保指标协同、设备安全防护、经济性评价及综合策略制定诸种问题，引出分级燃料控制、滑压运行优化、动态环保协同及预测性防护等创新方法，最终形成多目标约束下深度调峰运行的清晰框架。文中论证清楚：所提科学策略能切实提高机组 30% 以下负荷率工况运行的稳定性，同时兼顾安全、环保、经济三重目标，因而为传统燃煤机组转型为灵活性资源提供了极为严谨可行的解决方案。

关键词：亚临界机组；深度调峰；燃烧优化；滑压运行；环保协同；设备防护；经济性模型；综合策略

引言

能源结构转型背景下，高比例新能源接入加剧了电力系统调峰压力，迫使燃煤机组承担更深度负荷调节任务。600MW 亚临界机组作为我国主力发电装备，其设计初衷聚焦基荷运行，在低负荷工况下面临燃烧失稳、效率衰减、设备损耗及环保失控等系统性风险。现有研究多集中于单一技术点改进，缺乏覆盖“设备-控制-管理”全链条的策略集成^[1]。本文以提升机组深度调峰综合性能为目标，从机组适应性评估切入，逐层解析燃烧系统优化、汽轮机参数调控、环保设施协同、关键设备防护及经济性优化的技术路径，最终提出融合多目标约束的综合运行策略框架。通过打通技术壁垒与系统边界，为同类机组实现安全、高效、合规的深度调峰提供理论范式与实践指南。

一、深度调峰背景与机组适应性分析

深度调峰作为能源结构转型中燃煤机组必须承担的新功能，其本质是机组在低负荷工况下稳定运行的能力，也是对新能源发电间歇性及电网负荷波动加剧两重现实压力的直接响应。由于 600MW 亚临界机组的设计是以基荷运行为基本前提的，其锅炉热力系统、汽轮机通流部分及辅机配置对深度调峰的适应性都存在十分明确的固有局限：锅炉低负荷时易发生循环停滞，汽轮机通流效率降低会带来经济性恶化，机组调峰下限受锅炉最低稳燃负荷、汽轮机振动特性、给

水泵出力范围及环保设施运行门槛诸种因素的联合限制，其中最低稳燃负荷对煤质变化及炉膛结构极其敏感，而给水泵最小流量限制可通过再循环系统改造予以突破。因此，在开展深度调峰之前，务必对机组实际调峰潜力做系统、审慎的评估，先识别主要约束条件，再据此制定合理可行的调峰策略^[2]。可采用热力系统仿真与历史运行数据统计分析相结合的方法进行评估。适应性分析要围绕系统惯性响应特性、热力参数变化规律、设备安全裕度展开，最大限度地保证机组具备可持续、可靠的低负荷运行能力，同时兼顾电网调度指令快速响应的需求，避免因惯性不足而造成频率波动。

二、燃烧系统优化调整策略

燃烧稳定性是深度调峰最核心、最突出的问题，低负荷工况下炉膛温度下降必然导致燃烧效率降低、火焰脉动加剧、灭火风险增大，因此必须对燃烧过程加以精细化控制。对于 600MW 亚临界机组，可以系统、有层次地采用分级燃料控制、燃烧器配风优化及煤粉细度调整诸种措施：分级燃料控制用以分隔燃烧区域稳定热释放，燃烧器配风优化要合理平衡一次风与二次风比例以增强火焰刚度^[3]，进而重构燃烧区配风比例，提高燃烧核心区热强度，同时辅以微油或等离子点火技术进行稳燃。微油技术适合短期调峰，而等离子点火更适用于长期低负荷运行，且油耗更低。

优化一次风速与煤粉浓度的匹配关系有利于改善煤粉气流着火特性，一次风速过高会延迟着火，过低又容易造成结焦，可以用DCS系统实时、精确地进行调控。对混煤机组而言，须制定科学合理的煤种掺配方案，使低负荷时所燃燃煤的挥发分及灰熔点都符合稳燃条件，掺配比例可以从煤质数据库及燃烧试验结果中可靠确定。在燃烧调整时要主动兼顾降低氮氧化物生成，切忌因稳燃措施而加重环保负担，可以采用空气分级燃烧抑制NO_x形成，再配合OFA风门调节优化炉内氧量分布。

三、汽轮机运行参数控制方法

深度调峰对汽轮机安全运行有影响，即低压缸末级叶片颤振、转子热应力累积及疏水系统效率问题，因此运行策略首先要抓好主蒸汽、再热蒸汽温度的稳定性控制，杜绝温度大幅波动加剧热疲劳损伤，而温度控制又可以与锅炉蓄热特性、负荷变化速率相协调，合理动态调整设定值。滑压运行模式有利于提高汽轮机通流效率，但是也必然带来锅炉蓄热能力与负荷响应速度的协调问题，滑压曲线可以从机组热力试验数据出发进行定制化设计，做到效率与设备应力限制两者的最优平衡。低负荷时低压缸排汽温度升高是个突出问题，可以从优化循环水系统运行方式及喷雾减温策略入手解决，循环水流量调节要考虑凝汽器真空稳定性，喷雾系统则要严格避免过量喷水导致叶片侵蚀^[4]。要强化汽轮机振动监测及保护逻辑校验，对轴系偏心、胀差异常等关键参数做到实时可靠预警，预警阈值可以从历史运行数据库和转子动力学模型中自适应、智能化地确定。最终，参数控制可以以汽轮机寿命管理为根本导向，在满足调峰需求的同时主动保护设备耐久性，可以引入疲劳寿命损耗评估模型来指导运行决策，限制负荷变化率以降低热冲击风险。

四、环保指标协同控制技术

低负荷运行必然导致脱硝、除尘、脱硫各系统效率下降，瞬时排放超标的风险增大，因此对SCR脱硝系统可以采取优化喷氨策略、合理管理催化剂活性的措施，同时可考虑增设省煤器旁路或进行分级省煤器改造来提高烟温，但必须注意烟温提升方案与锅炉热

平衡计算的衔接，避免影响机组效率。布袋除尘器可以从压差控制及清灰周期调整两方面入手，防止低烟气流速下滤袋堵塞，清灰策略可以采用压差反馈自适应控制，动态、智能地调节脉冲频率及强度。湿法脱硫系统要重点保证浆液循环泵运行效率及PH值的稳定性，防止负荷突变时SO₂逃逸，因此PH值控制可以引入前馈补偿算法来主动应对烟气量波动。要建立机组负荷与环保设施运行之间的动态关联模型，让污染物控制与机组工况真正协同响应，模型本身可借助多变量回归分析及机器学习技术来构建，先预测排放趋势再提前干预。环保控制可以前置化设计，把排放约束纳入调峰策略制定框架之中，即在负荷指令中直接嵌入环保限值逻辑，调峰过程绝不会触碰环保红线。对于氨逃逸问题，可以系统、严谨地进行AIG喷氨均匀性测试及调整，辅以CFD模拟优化喷嘴布局。最后，开发环保设施性能在线评估工具，实时准确地诊断催化剂量失效或吸收剂活性下降的情况，由此切实支撑预防性维护决策。

五、关键设备安全防护措施

深度调峰必然加速机组设备老化、加剧设备损耗，因此要采取有层次、有针对性的防护措施来保证长期可靠性：锅炉方面首先要防止水冷壁局部超温及高温腐蚀，可以从优化减温水分配、合理安排受热面吹灰两方面加以控制，吹灰策略可以根据积灰特性及负荷变化动态调整频次。给水泵组要避免最小流量工况，可以采用再循环系统改造或变频调速技术来扩展安全运行区间，变频技术可做到给水流量与负荷完美匹配，同时最大限度地降低节流损失。空预器要严格监控冷端温度，主动、及时地进行吹灰管理，以防低温腐蚀及堵灰，温度控制可以与烟气酸露点模型直接联动。辅机系统可以推行状态检修及劣化趋势分析，对风机、磨煤机等高负荷设备做系统的疲劳寿命评估，所用方法可以将振动频谱与运行工况参数结合起来。安全防护要建立完善的“预测、防护、反馈”闭环机制，利用在线监测系统实时诊断设备状态，譬如用声发射技术对承压部件的微裂纹做早期可靠检测。最后，防护体系要无缝接入全厂数据平台，做到异常工况自动溯

源、分级预警，配套有明确、可行的分级响应预案以快速隔离风险。

六、运行经济性评估与优化

由于深度调峰直接关系机组发电成本，首先要从经济性角度予以科学论证，再据此制定优化策略以保证可持续运行。低负荷时机组供电煤耗明显升高，因此可以采用优化主汽参数、降低厂用电率、回收余热诸种手段提高能效，而余热回收可用于暖风或补水加热。在辅助服务市场环境下，必须将调峰补偿收益正式、系统地纳入经济性模型，合理选择调峰深度及持续时间以最大化净收益，同时模型要充分考虑市场规则的波动性及机组响应特性。燃料成本管理方面可以结合现货煤价及机组效率曲线，动态调整燃料采购策略，并建立煤质、负荷、成本三者联动的数据库作为决策支持工具^[5]。调峰频次增加必然带来设备维护成本的上升，可以优化检修周期及备件管理，主动开展预防性维护以降低非计划停运损失。因此，经济性分析可以构建全生命周期成本模型，为调峰决策提供真正有量化的支撑，即把资本支出、运维成本、残值评估、政策风险因子都完整地纳入模型之中。最后，优化路径还应考察机组灵活性改造的投入产出比，以技术经济比较的方法筛选高性价比方案，诸如低压缸零出力改造与蓄热系统集成的协同效益便是一个极佳的示范。

七、综合运行策略制定与应用

深度调峰必然要统筹安全、环保、经济诸种目标，因此首先要制定系统、有层次的运行方案来处理复杂工况，即从机组特性测试数据出发，厘清不同负荷区间最优控制参数集，再用多目标优化算法求取帕累托前沿。在此基础上采用分阶段调峰模式，将启停调峰、负荷跟随、深度调峰诸种工况明确划分为不同工况库，各工况均配以相应的操作规范及风险管控清单。更重要的是建立多专业协同调度机制，把DCS系统、SIS平台、预警系统衔接起来，决策引擎中可以嵌入专家规则与机器学习预测模块。同时针对燃烧恶化、参数超限等异常工况设计完备、有梯度的应急预案，附带具体人员操作指引。策略应用时辅以仿真培训提高运

行人员技能，又以实际运行数据作为反馈源，借助数字孪生技术对策略的有效性做实时、可靠的验证。综合调峰策略的根本就是构建动态调峰知识库，将设备边界条件、环保限值、经济模型三者有机融合，由此直接生成自适应负荷指令曲线。

结论

本研究系统探讨了600MW亚临界机组深度调峰运行策略，聚焦于机组适应性分析、燃烧优化、汽轮机参数控制、环保协同、设备防护、经济性评估及综合策略制定。结果表明，通过科学优化燃烧稳定性、精确控制汽轮机运行参数、动态协同环保指标、强化关键设备防护，并量化经济性模型，可显著提升机组在低负荷工况下的运行稳定性、设备安全性及环保合规性，同时优化发电成本与调峰收益。这些策略为电网灵活性提供了可靠支撑，并为同类机组实践提供了理论框架。未来需结合智能控制技术，开发自适应调峰系统，推动燃煤机组向高灵活性资源转型。

参考文献：

- [1] 舒印彪,张丽英,张运洲,王耀华,鲁刚,元博,夏鹏.我国电力碳达峰、碳中和路径研究[J].中国工程科学,2021,23(6):1-14.
- [2] 负保记,张恩硕,张国,马柯翔,张斌.考虑综合需求响应与“双碳”机制的综合能源系统优化运行[J].电力系统保护与控制,2022,50(22):11-19.
- [3] 贾志军,范伟,任少君,等.600MW亚临界机组长时间深度调峰燃烧稳定性研究[J].发电技术,2024,45(02):216-225.
- [4] 张斌,王光磊,刘晓玲,等.某600MW亚临界机组20%深度调峰技术方案应用探讨[J].山东工业技术,2024,(02):19-25.
- [5] 梅跃飞.600MW超临界机组深度调峰协调控制策略[J].中国高新科技,2023,(19):105-107.

史浩 1993.05 男,汉族 河北省保定市 大学本科 助理工程师 研究方向:600MW亚临界机组火电厂集控运行