

汽轮机组深度调峰性能优化方法

王景林

中电投蒙东能源集团有限公司通辽发电总厂 内蒙古 通辽 028000

摘 要: 深度调峰是指通过调整汽轮机运行状态, 应对可再生能源发电波动性带来的电网负荷变化。随着风电、光伏等可再生能源占比提升, 电网需具备更强的调峰能力以解决弃风弃光问题。采用燃烧器配风优化、煤粉浓度分布调整及配煤方案改进, 构建低负荷燃烧体系, 解决锅炉燃烧震荡问题。应用动态调节机制和喷水减温策略, 提升主/再热蒸汽温度控制精度, 保障低负荷工况蒸汽参数稳定。

关键词: 汽轮机组; 深度调峰; 性能优化

开发磨煤机燃料控制系统的低负荷自适应调节算法, 增强辅机设备响应能力。建立通流计算模型优化抽汽参数迭代精度。应用超低背压技术, 结合真空系统改造降低低压缸进汽量, 兼顾空冷系统防冻安全与调峰需求。

1 汽轮机组深度调峰性能优化目标与意义

1.1 优化目标。拓展调峰负荷下限。将机组稳定运行负荷下限从传统70%额定负荷延伸至20%-30%区间, 提升电网低谷时段调节裕量。增强动态响应能力。实现 $\pm 10\%Pe/min$ 变负荷速率目标, 提高AGC指令跟踪精度, 满足高比例新能源电网的频率调节需求。突破热电耦合界限。针对供热机组, 通过低压缸切缸、储热系统集成等技术, 使发电出力可降至供热需求的30%以下。延长设备服役寿命。优化低负荷工况下的金属部件热应力分布, 控制频繁变负荷造成的疲劳损耗, 降低非计划停运风险。实现政策合规收益。满足国家能源局对纯凝机组 $\leq 30\%$ 额定负荷、热电联产机组 $\leq 40\%$ 额定负荷的灵活性改造要求, 获取调峰补偿收益。

1.2 核心意义。保障电网稳定性。通过保持火电机组低负荷在线运行, 避免频繁启停对电网造成的冲击, 缓解特高压闭锁等极端工况下的频率波动。促进新能源高效消纳。释放20%-40%的调峰容量空间, 支撑年均新增2亿千瓦以上可再生能源并网, 实现新能源利用率 $\geq 90\%$ 的消纳目标。提升经济性竞争力。降低中低负荷供电煤耗 $1.5-2.5g/kWh$, 减少燃料成本。通过调峰辅助服务补偿机制, 增加15%-20%的额外收益。推动技术革新。催生低负荷稳燃燃烧器、动态加速控制算法等关键技术突破, 形成“燃烧优化-结构强化-智能控制”三级技术体系。助力碳中和进程。

2 汽轮机组燃烧优化技术

2.1 燃烧控制策略优化。分级燃烧技术。采用燃料/空气分阶段供给模式, 形成富燃料区与贫燃料区的差

异化燃烧环境, 抑制氮氧化物(NO_x)生成, 同时提升燃烧效率。结合缸内直喷技术, 减少燃油在进气道中的损失, 实现燃料利用率提升5%-8%。富氧燃烧技术。通过注入高纯度氧气(氧浓度 $\geq 30\%$)提高火焰温度至 $1600^\circ C$ 以上, 促进燃料充分燃烧, 降低不完全燃烧损失15%以上。动态调节机制。应用智能分段喷射技术, 根据负荷变化实时调节喷油压力(可达250MPa)和时序, 减少爆震现象, 增强燃烧稳定性。

2.2 燃料与空气管理。燃料雾化技术。采用气助雾化、微孔雾化等先进方式, 将燃油颗粒直径控制在 $10-50\mu m$ 范围, 提升燃烧速度30%。废气再循环(EGR)。通过30%-40%废气回流量降低燃烧温度至 $1400^\circ C$ 以下, 减少 NO_x 排放40%-60%。空气预热系统。应用空气预热器将进气温度提升至 $450^\circ C$ 以上, 配合涡轮增压器提高进气压力至0.3MPa, 优化燃烧效率。

2.3 污染物协同控制。 NO_x 抑制: 采用低 NO_x 燃烧器+蒸汽喷射技术, 实现排放值 $\leq 25mg/Nm^3$ 。颗粒物控制: 引入重烃燃料预处理系统, 结合二次空气供给将PM排放降低50%以上。CO减排: 通过延长滞留时间($\geq 0.5s$)和优化气流分布, 确保CO排放 $\leq 50mg/Nm^3$ 。

2.4 智能控制技术应用。CFD与AI融合优化。基于大涡模拟(LES)构建燃烧数字孪生体, 通过实时数据训练神经网络模型, 动态修正燃烧参数。智能监测系统。部署温度/压力传感器阵列, 实时反馈燃烧室工况, 实现故障预警准确率 $\geq 95\%$ 。自适应控制算法。开发增益调度控制器, 根据负荷波动自动调节燃料/空气配比, 稳定燃烧效率偏差 $\leq 0.5\%$ 。

3 汽轮机组汽温调控策略

3.1 基础调节策略。烟气侧调控。通过调整燃烧强度(燃料量增减 $\pm 5\%$ 范围)和火焰中心位置(改变磨煤机运行组合), 控制炉膛出口烟温波动不超过 $\pm 20^\circ C$ 。运用

二次风配风优化（上排二次风开度增加15%-25%），抑制主汽温波动幅度 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ 。采用煤粉细度控制（R90值维持在18-22%），减少燃烧滞后对汽温的影响。蒸汽侧调控。建立三级减温水联动机制，保持减温器开度 $\geq 7\%$ 的动态调节裕度，避免全关导致的汽温失控。采用过热度闭环控制（目标值 $\pm 0.5\%$ ），通过给水流量修正（调节精度 $\pm 3\text{t/h}$ ）稳定主汽温。部署汽水分离器动态调节（响应时间 $\leq 5\text{s}$ ），抑制低负荷工况下汽温突变。

3.2 智能优化技术。预测控制系统。构建基于大涡模拟的数字孪生体，提前30秒预测汽温变化趋势（预测精度 $\geq 90\%$ ）。开发状态观测器（采样周期0.5s），实时修正PID参数（ $K_p/K_i/K_d$ 动态调整范围 $\pm 15\%$ ）。多变量协调控制。建立燃烧-汽温-给水三联控模型，实现负荷变化时汽温波动 $\leq \pm 3^{\circ}\text{C}$ （相比传统控制提升50%）。部署自适应前馈补偿算法，在磨煤机切换工况下自动补偿热量损失（补偿效率 $\geq 85\%$ ）。

3.3 典型调控参数。稳态控制精度：主汽温偏差 $\leq \pm 3^{\circ}\text{C}$ ，再热汽温偏差 $\leq \pm 5^{\circ}\text{C}$ 。动态响应速度：变负荷工况下汽温恢复时间 ≤ 5 分钟。安全保护阈值：壁温超温报警值 $\leq$ 材料许用温度 20°C ，主汽温超限保护动作延迟 ≤ 3 秒。

3.4 特殊工况处理。滑停操作。提前进行锅炉吹灰（降低排烟温度 $10\text{-}15^{\circ}\text{C}$ ），优先通过减弱燃烧（总燃料量降幅 $\geq 25\%$ ）降低汽温，避免过度依赖减温水。采用分阶段撤油策略（单次撤油量 $\leq 10\%$ ），控制汽温降速 $\leq 1.5^{\circ}\text{C/min}$ 。启动防超温。实施梯度升温控制（升温速率 $\leq 2^{\circ}\text{C/min}$ ），结合蒸汽流量调节（保持 $\geq 30\%$ 额定流量），降低受热面热冲击风险。

4 汽轮机组喷水减温控制策略

4.1 系统组成与原理。减温装置类型。多孔式喷头：采用高雾化精度设计（喷孔直径 $\leq 2\text{mm}$ ），喷水速度 $\geq 10\text{m/s}$ ，实现减温水瞬时汽化。笛形管式：通过环形分布喷孔（数量 ≥ 8 孔/圈）形成均匀雾化场，有效缩短蒸汽降温行程。水质保障机制。凝汽式机组直接采用给水（电导率 $\leq 0.2\mu\text{S/cm}$ ），中高压机组配置自制冷凝水系统（纯度 $\geq 99.9\%$ ）。设置三级过滤器（过滤精度 $\leq 50\mu\text{m}$ ），防止喷孔堵塞。分层控制原则。一级减温：承担70%-80%调节量，控制低过出口温度 $\leq 415^{\circ}\text{C}$ 。二级减温：作为精调手段，维持屏过出口温度 $\leq 461^{\circ}\text{C}$ ，两级减温水量偏差 $\leq 10\%$ 。安全约束条件。最低负荷限制： $< 10\%$ 额定负荷时禁止投用减温水。温度过热度保护：喷水后蒸汽温度必须高于当前压力下饱和温度 15°C 。

4.2 调节精度与安全控制。精度对比优势。喷水减温响应时间 < 5 秒，调节精度达 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，显著优于烟气挡板调节（滞后 ≥ 30 秒，精度 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ）。防过调措施。采用“收敛型”调节算法，减温水量波动幅度逐次衰减30%-50%。设置汽包水位联锁保护，防止单次调门动作幅度 $> 20\%$ 引发水位震荡。

5 如何提升汽轮机组汽温控制精度

5.1 分层调控策略优化。减温水精细分层控制。执行「粗调+精调」模式：一级减温承担70%-80%调节量，将低过出口温度控制在 $\leq 415^{\circ}\text{C}$ ；二级减温作为补充，维持屏过出口温度 $\leq 461^{\circ}\text{C}$ ，两级水量偏差 $\leq 10\%$ 。开发前馈-反馈协同算法，提前5-10秒预判负荷变化（预测精度 $\geq 85\%$ ），实现水量波动幅度衰减30%-50%。烟气侧联动调节。采用摆动式燃烧器（倾角 $\pm 15^{\circ}$ 范围调节），动态调整炉膛火焰中心位置，同步配合二次风配风优化（上排二次风开度提升15%-25%），控制主汽温波动 $\leq \pm 5^{\circ}\text{C}$ 。部署烟气再循环系统（再循环量10%-20%），增强对流受热面传热效率，降低汽温调节滞后时间30%-50%。动态修正机制。引入状态观测器（采样周期0.5秒）实时修正PID参数，实现 $K_p/K_i/K_d$ 动态调整幅度 $\pm 15\%$ 。建立「收敛型」调节逻辑，在汽温偏离目标值时逐次缩小调节步长，防止过调。

5.2 关键设备优化。减温器升级。采用笛形管式结构（环形分布 ≥ 8 喷孔/圈），喷水速度 $\geq 10\text{m/s}$ ，雾化颗粒直径 $\leq 50\mu\text{m}$ ，缩短蒸汽降温行程30%。部署三级过滤系统（过滤精度 $\leq 50\mu\text{m}$ ），防止喷孔堵塞导致的调节失效。受热面改造。应用NiCoCrAlY热障涂层，降低管壁温度梯度 200°C 以上，减少热应力引发的汽温突变。优化蛇形管布局，延长蒸汽滞留时间 ≥ 0.5 秒，提高传热均匀性。

5.3 监测预警强化。多参数耦合监测。部署壁温/压力传感器阵列（采样频率 $\geq 10\text{Hz}$ ），实时监控300+测点状态，故障预警准确率 $\geq 95\%$ 。建立汽温-水位联锁保护机制，强制限制单次减温水量波动 $> 20\%$ 的危险操作。安全约束条件。设定最低负荷阈值（ $\geq 10\%$ 额定负荷）才允许启用减温水。强制维持蒸汽过热度 $\geq 15^{\circ}\text{C}$ ，防止喷水后蒸汽带液。

6 汽轮机组系统升级与改造方法

6.1 通流部分效率提升。汽封系统改造。采用蜂窝式汽封替代传统齿形汽封，轴向间隙可缩小0.1-0.3mm，降低漏气损失40%-60%。部署全三元气动设计技术，优化动/静叶型线，使高压缸效率提升5%-8%。新型叶型应用。引入弯扭联合成型叶片，减少二次流损失，中压缸

级效率提高3%-5%。应用自带围带阻尼结构,降低振动幅度 $\geq 30\%$ 。

6.2 智能控制系统升级。电液联控改造。采用低压透平油纯电调系统(采样周期 $\leq 50\text{ms}$),油动机迟缓率从4-5mm优化至 $\leq 1\text{mm}$ 。部署PLC+DCS双冗余架构,实现阀门开度控制误差 $\leq 0.5\%$ 。数字化平台建设。构建电能质量监测模块,集成300+测点数据(电压/电流/谐波等),实现异常工况预警响应时间 $\leq 3\text{s}$ 。开发燃烧-汽温-给水联动模型,动态负荷工况下汽温恢复时间缩短至 $\leq 3\text{分钟}$ 。

6.3 材料与防腐优化。新型材料应用。高温段采用NiCoCrAlY涂层(耐温 $\geq 650^\circ\text{C}$),降低蠕变速率 $\geq 50\%$ 。低温段应用陶瓷基复合材料,抗腐蚀性能提升3倍。防腐处理。蒸汽管道外壁喷涂聚氨酯泡沫(厚度 $\geq 50\text{mm}$)+铝箔反射层,热损失减少30%。埋地管道采用3PE防腐结构(剥离强度 $\geq 70\text{N/cm}$),寿命延长至25年。

6.4 辅助系统升级。油压控制。部署自动补气装置(压力控制精度 $\pm 0.05\text{MPa}$),油压波动 $\leq \pm 2\%$ 。集成软启动器实现油泵平稳启停(电流冲击降低60%)。冷却系统改造。循环水系统加装变频装置,夏季工况节电率 $\geq 40\%$ 。

7 汽轮机组协同作战与安全保障措施

7.1 系统协同运行机制。主-辅系统联动控制。主控系统(DEH)与供油/冷却系统建立联锁逻辑,油压波动 $\geq \pm 5\%$ 时自动触发调节阀补偿动作。燃烧系统与汽温控制联动,采用摆动式燃烧器(倾角调节精度 $\pm 0.5^\circ$)协同二次风配风优化(开度偏差 $\leq 5\%$),主汽温波动控制在 $\pm 3^\circ\text{C}$ 。数字孪生预测模型。集成300+测点数据构建三维

动态仿真模型,提前30秒预警真空恶化/轴振超标等异常工况,响应准确率达到92%。

7.2 应急协同处置方案。停炉不停机模式。锅炉灭火后维持发电机运行,通过储能系统持续供汽(持续时间 $\geq 15\text{分钟}$),快速恢复阶段主汽温降速 $\leq 2^\circ\text{C/min}$ 。联动关闭抽汽逆止阀(动作时间 $\leq 0.3\text{s}$),防止冷汽倒灌导致转子应力突变。防进水保护体系。设置三级拦截:主汽门快速关闭($\leq 0.15\text{s}$)+疏水阀联锁开启(延迟 $\leq 2\text{s}$)+加热器水位双重监测。

7.3 技术保障手段。控制优化。部署电液联控系统(EH油压控制精度 $\pm 0.05\text{MPa}$),阀门定位误差 $\leq 0.5\%$ 。应用动态PID算法,负荷变化时主汽压力恢复时间 $\leq 90\text{s}$ 。监测强化。采用光纤测温技术(分辨率 0.1°C)实时监控转子表面温度梯度。建立金属壁温偏差预警模型(温差阈值 $\leq 50^\circ\text{C}$),触发后自动降负荷至安全区间。

7.4 人员协同规范。操作授权制度:关键操作(如超速试验)需双人确认+值长授权。应急演练机制:每季度开展汽轮机进水/轴瓦烧损等场景实战演练,故障处置响应达标率 $\geq 98\%$ 。当前技术发展方向聚焦数字孪生与强化学习融合,目标实现故障预判准确率提升至95%以上。

总之,当前技术发展方向聚焦于数字孪生驱动的预测性喷水控制,通过融合CFD流场模拟与机器学习算法,实现全工况减温水量动态最优分配。

参考文献

- [1]方韵.关于汽轮机组深度调峰性能优化方法.2021.
- [2]曾丽萍.浅谈汽轮机组深度调峰性能优化方法探讨.2023.