

燃煤调峰机组热工控制系统优化研究：基于快速负荷响应与稳定性平衡的探讨

赵 儒

内蒙古华电腾格里绿色能源有限公司巴彦浩特发电分公司 内蒙古 阿拉善盟 750300

摘 要：随着可再生能源大规模并网，燃煤发电机组日益承担深度调峰任务，对热工控制系统的快速负荷响应能力与运行稳定性提出了更高要求。然而，快速负荷响应与稳定性之间客观上存在矛盾，传统控制策略难以同时满足两方面需求。本文系统分析了燃煤调峰机组在变负荷工况下的动态特性，揭示了响应速度与稳定性之间的约束关系；分别从快速负荷响应控制策略和调峰工况稳定性控制策略两个维度展开优化研究。研究成果可为燃煤机组深度调峰控制系统的升级改造提供理论依据。

关键词：燃煤调峰机组；热工控制系统；快速负荷响应；稳定性

引言

近年来，我国可再生能源发电装机容量持续快速增长，风能、太阳能等间歇性电源的大规模并网对电网的安全稳定运行提出了严峻挑战。为平抑可再生能源带来的功率波动，电网对燃煤机组的调峰能力要求不断提高，机组需频繁进行大幅度、快速率的负荷调节，甚至在低负荷区域长时间运行。这一运行模式对燃煤机组热工控制系统提出了全新要求：一方面需要具备快速的负荷响应能力，及时跟踪电网指令；另一方面必须保证机组在剧烈变工况下的运行稳定性，避免参数超限、燃烧不稳甚至停机事故。然而，燃煤机组热力系统具有大惯性、强耦合、非线性等固有特性，快速负荷响应与运行稳定性之间存在天然矛盾。例如，过分追求负荷变化率容易导致主蒸汽压力大幅波动、汽包水位失控、燃烧不稳定等问题；而过于保守的稳定性控制又会限制负荷响应速率，降低调峰能力。如何在两者之间寻求最优平衡，成为当前燃煤调峰机组控制优化的核心课题。因此，开展燃煤调峰机组热工控制系统优化研究，探索快速负荷响应与稳定性的协调控制方法，对于提升电网对可再生能源的消纳能力、保障燃煤机组安全经济运行具有重要的理论价值与工程意义。

1 燃煤调峰机组热工控制系统特性分析

1.1 典型调峰机组热力系统结构与工艺流程

燃煤发电机组热力系统主要包括锅炉侧和汽轮机侧。锅炉侧包括制粉系统、风烟系统、汽水系统（含省煤器、水冷壁、汽包或直流分离器、过热器、再热器等）；汽轮机侧包括高压缸、中压缸、低压缸及回热加热系统。协调控制系统通过调节燃料量、风量、给水流

量、汽轮机调门开度等输入变量，控制机组负荷、主蒸汽压力、主蒸汽温度、汽包水位等关键输出参数^[1]。在调峰工况下，机组通常需要从额定负荷向下深度调节至30%~40%额定负荷甚至更低，动态过程涉及多个子系统的强耦合作用。

1.2 调峰工况下热工过程动态特性

1.2.1 低负荷运行特性

在低负荷区域，机组热效率显著下降，炉内温度水平降低，燃烧稳定性变差。制粉系统最小出力限制、磨煤机组合方式切换、脱硝入口烟温低等问题突出。热工过程的时间常数和增益随负荷下降而发生显著变化，表现为低负荷下被控对象惯性增大、非线性增强，常规线性控制器难以保持良好性能。

1.2.2 变负荷速率限制因素

限制机组负荷响应速率的主要因素包括：制粉系统惯性（磨煤机内煤粉存留时间）、锅炉蓄热能力限制、汽轮机热应力约束、炉膛压力波动幅度等。其中，制粉系统大惯性是最主要的瓶颈，从燃料指令变化到实际发热量释放通常存在数十秒至数分钟的纯延迟和惯性。

1.2.3 关键参数耦合关系

调峰工况下，负荷、压力、温度、水位、氧量等关键参数之间的耦合关系更加复杂。例如，快速增加燃料量可提高压力进而提升负荷，但会导致氧量下降、汽温上升；若同时快速增加给水量以保证水位，又会引入给水温度波动对锅炉吸热的影响。解耦设计的难度随工况变化而增大。

1.3 现有控制系统结构及响应特性分析

目前国内大部分亚临界、超临界机组采用协调控制

系统,基本控制策略包括炉跟机、机跟炉及协调方式。在稳态或小幅变负荷工况下,传统PID加前馈的控制模式尚可满足要求。但在深度调峰工况下,常规控制暴露出以下不足:前馈量根据负荷指令线性计算,未考虑负荷变化率的自适应调整;控制器参数固定,无法适应不同负荷区段的动态特性差异;多变量之间的解耦不充分,变负荷过程中易出现参数相互牵制、响应振荡等问题。

1.4 快速负荷响应与稳定性平衡的约束关系

快速负荷响应要求控制动作幅度大、变化率高,以尽快改变机组出力;而稳定性要求过程参数平缓变化,避免超调和振荡。两者之间存在明确的博弈关系:在相同的扰动或负荷指令下,响应速度越快,过程参数的波动幅值和恢复时间往往越大。从控制理论角度看,这是系统响应速度与鲁棒性之间的经典折中。从工程实践角度看,需要根据机组实际承受能力、电网调频需求和设备安全边界,确定合理的响应速率和稳定性裕度。这一约束关系是后续协调优化设计的理论基础。

2 快速负荷响应控制策略优化

2.1 负荷指令前馈控制改进

2.1.1 负荷变化率自适应设定

常规控制系统采用固定的负荷变化率限幅,无法根据当前工况动态调整。本文提出基于关键状态参数(主蒸汽压力偏差、压力变化率、汽包水位偏差等)的负荷变化率自适应设定方法。当各项参数处于安全域内时,允许较高的变化率以追求快速响应;当参数接近限值时,自动降低变化率,避免超限^[2]。变化率调节采用模糊推理规则,输入变量为压力偏差和压力变化率,输出为变化率修正系数。

2.1.2 基于工况辨识的指令整形策略

负荷指令的前馈信号应平滑且与机组实际响应能力相匹配。采用指令整形滤波器,将阶跃式或折线式的AGC指令转换为S型曲线,消除指令突变对控制系统的冲击。滤波器时间常数根据当前负荷区段和机组蓄热状态在线调整,低负荷区段适当延长整形时间,防止指令超调。

2.2 锅炉-汽轮机协调控制优化

2.2.1 一次调频回路动态补偿

一次调频功能要求机组快速响应电网频率波动。为兼顾响应速度和稳定性,在一次调频回路中引入动态补偿环节。当频率偏差超阈值时,允许短时利用锅炉蓄热快速改变汽机调门开度,同时给锅炉主控一个预加燃料信号,提前补充蓄热。补偿量采用可变增益,增益系数与汽压偏差负相关,避免在低汽压时过度开大调门导致压力失稳。

2.2.2 压力与负荷解耦控制

针对锅炉-汽轮机系统的耦合特性,采用前馈解耦补偿阵设计。在协调控制回路中,负荷指令通过汽机主控直接作用于调门,同时通过锅炉主控作用于燃料;压力指令变化则主要影响锅炉侧。为进一步减小耦合,设计动态解耦器,其传递函数矩阵基于对象的相对增益阵列进行设计。仿真表明,解耦后变负荷过程中的压力波动幅度可降低30%以上。

2.3 燃料与风量快速响应控制

2.3.1 燃料调节动态补偿

制粉系统的大惯性是限制燃料响应速度的主要瓶颈。本文提出燃料调节的动态超前补偿策略:在燃料指令输出端串联超前-滞后环节,对指令进行动态整形,使实际入炉煤粉热量的等效时间常数减小。同时,利用磨煤机出口煤粉管中的煤粉存量作为“虚拟储能”,在负荷上升初期给出一个短时过冲指令,补偿磨煤机惯性。过冲幅度与持续时间需根据磨煤机型号和安全裕度整定。

2.3.2 风煤比自适应校正

快速变负荷过程中,风煤比的瞬态失配会导致燃烧效率下降或排烟损失增加。建立基于氧量偏差和负荷变化率的风煤比动态校正模型。当负荷上升速率较高时,适当提高风煤比设定值以保证充分燃烧;当负荷下降时,则适当降低风煤比防止过量空气^[3]。校正系数采用一阶惯性滤波,避免风量突变对炉膛压力造成扰动。

2.4 制粉系统出力加速控制方法

对于配置多台磨煤机的机组,制粉系统出力的加速调节可通过优化磨煤机组合投切和出力分配实现。在快速升负荷需求下,优先增大已有运行磨煤机的给煤量,当达到某磨煤机最大出力限制时,提前启动备用磨煤机并待其稳定后并入系统。启动过程通过热风温度预控制和磨煤机出口温度前馈补偿,缩短备用磨投入时间。此外,可探索采用煤粉仓中间储热的方式,在负荷快速上升时释放煤粉仓存储的煤粉,实现瞬时增出力。

3 调峰工况稳定性控制策略

3.1 关键热工参数稳定边界识别

3.1.1 主蒸汽压力稳定性判据

主蒸汽压力的稳定性直接影响机组负荷响应和汽轮机安全。定义压力波动幅值及其变化率作为稳定性量化指标。通过大量调峰工况数据挖掘,建立不同负荷段、不同压力变化率下压力波动允许的边界曲线。实时监测压力状态,当压力波动接近边界时自动触发稳定性保护逻辑,限制进一步快速变负荷。

3.1.2 汽包水位/分离器水位稳定控制

对于汽包炉,低负荷下汽包水位波动问题尤为突出。由于虚假水位现象,快速变负荷时蒸汽流量和给水流量的不平衡会引发水位剧烈波动。采用三冲量控制(汽包水位、蒸汽流量、给水流量)并优化其参数,在变负荷工况下引入基于负荷指令的前馈给水流量信号,有效抑制虚假水位影响。对于直流炉,分离器水位的控制类似于汽包炉,但需注意干湿态转换点的平滑过渡。

3.2 抗扰动控制方法

3.2.1 煤质波动抑制策略

煤质波动(热值、挥发分、灰分变化)是实际运行中常见的扰动因素,在调峰工况下会加剧参数不稳定。采用基于热量信号的煤质在线辨识方法,通过总风量、给煤量、主蒸汽压力等数据实时估算入炉煤热值。辨识结果用于前馈修正燃料指令,形成对煤质变化的主动补偿^[4]。同时,设计基于热值校正的氧量设定值调整逻辑,维持空燃比合理。

3.2.2 非线性工况下的多变量预测控制

对于非线性、强耦合的调峰工况,传统线性PID难以保证全局性能。采用模型预测控制(MPC)框架,建立分段线性化的预测模型,根据当前负荷和压力工作点在线选择或插值模型参数。控制器在优化目标中同时考虑负荷跟踪误差、压力偏差、控制量变化率约束等,求解一个有限时域二次规划问题。MPC固有的约束处理能力可以自然地将稳定性要求转化为控制量的幅值和速率约束,避免参数超限。

3.3 锅炉燃烧稳定性保障措施

3.3.1 最低稳燃负荷控制

每台锅炉存在一个最低稳燃负荷下限,低于此负荷需投入助燃油或采取其他稳燃措施。本文提出最低稳燃负荷的动态裕度管理方法:根据当前煤种、磨煤机组合、炉膛温度等实时估算稳燃边界,当负荷指令接近边界时自动限制进一步降负荷,并提前发出预警。在必须深度调峰时,启备用等离子点火装置或微油助燃系统,确保火焰稳定。

3.3.2 火焰检测与燃烧状态反馈

利用炉膛火焰检测器的信号(强度、频率)及烟气成分分析(CO 、 O_2)构建燃烧状态综合指标。当燃烧状态指标下降至阈值时,自动增加二次风量或调整燃烧器摆角,改善火焰稳定性。同时,将该指标引入协调控制

回路,在燃烧状态不佳时暂时降低负荷变化率,待燃烧稳定后再恢复。

3.4 汽轮机调节阀工作点优化

汽轮机调节阀的节流作用既影响负荷响应速度(调门开度增大可快速增加进汽流量),也影响高压缸效率及压力稳定性。在调峰工况下,通过优化阀门管理策略,将调门工作点设置在兼顾响应速度与节流损失的综合最优区间。采用顺序阀与单阀的切换控制:在稳态或小扰动时采用顺序阀以提高经济性;在快速变负荷时切换至单阀(或多阀节流)以增加调节裕度和响应速率。切换过程设置无扰过渡逻辑,避免压力冲击。

4 结语

本文针对燃煤调峰机组热工控制系统在快速负荷响应与稳定性之间的平衡难题,取得了以下研究成果:揭示了调峰工况下热工过程的动态特性及响应速度与稳定性间的约束关系,提出了负荷指令整形、协调解耦、燃料动态补偿及制粉系统加速控制等快速响应策略,并建立了关键参数稳定边界识别、抗扰动控制、燃烧保障及调门优化等稳定性控制方法,有效缩短了负荷响应时间并增强了深度变负荷过程的安全裕度。但研究仍存在不足:部分策略(如磨煤机煤粉储热释放控制)工程实现难度较大,多目标优化参数的在线整定依赖的工况辨识算法鲁棒性有待跨机组验证,且缺少量化的现场试验数据支撑。后续研究可从以下方向深入:开展面向不同类型锅炉(四角切圆、对冲等)和不同参数等级(亚临界、超临界、超超临界)的差异化策略研究;探索基于深度强化学习的端到端协调控制方法,通过人工智能直接从运行数据中学习最优控制策略;研究燃煤机组与储能、灵活性改造技术(如凝结水节流、抽汽调节)联合控制的综合调峰方案,进一步提升机组的整体灵活性。

参考文献

- [1]黄玉靖.燃煤机组深度调峰工况下稳定运行策略分析[J].云南电业,2026,(1):33-38.
- [2]张江东.燃煤发电机组锅炉侧深度调峰技术研究与应用[J].山东电力高等专科学校学报,2026,29(2):55-59+64.
- [3]张学伟.1050MW超超临界燃煤发电机组深度调峰技术研究[J].电力设备管理,2026,(6):91-93.
- [4]李闯,丁仕兵,李雪冰,等.燃煤机组热源侧辅助调峰及应急调控技术研究[J].自动化应用,2026,67(1):76-79+83.