

机组变负荷工况下热工控制系统适应性优化研究

周磊磊

阳城国际发电有限责任公司 山西 晋城 048100

摘要: 本文聚焦火电机组变负荷工况下热工控制系统适应性优化。分析了变负荷工况特性,包括典型场景与对关键参数的影响;阐述热工控制系统面临的适应性挑战,如协调控制系统非线性、汽温控制迟滞超调等;介绍了建模与仿真平台搭建;最后提出基于增益调度、动态前馈、预测控制及模糊自适应的控制策略优化方案,以提升系统适应性与控制性能,保障机组安全经济运行。

关键词: 火电机组;变负荷;热工控制;自适应控制;负荷响应

引言: 在电力系统运行中,火电机组变负荷运行是保障供需平衡的关键模式。随着电网负荷的复杂多变,机组面临计划内、突发性、周期性等多种变负荷场景,且变负荷时主蒸汽参数、锅炉与汽轮机侧参数等波动显著,影响运行安全与经济。同时,热工控制系统在变负荷工况下存在协调控制非线性、汽温控制迟滞超调等适应性挑战。因此,开展热工控制系统适应性优化研究具有重要意义。

1 机组变负荷工况特性分析

1.1 典型变负荷运行场景

机组变负荷运行是保障电力系统供需平衡的核心模式,典型场景分三类。计划内变负荷场景,依据电网调度指令执行,负荷变化速率平缓,多为1%-2%额定负荷/分钟,像日常峰谷调节、计划内负荷增减等。此场景下机组运行参数波动小,能提前预判与调整参数。突发性变负荷场景,多因电网故障、负荷突变等突发状况引发,负荷变化又快又大,最高超3%额定负荷/分钟,如相邻机组跳闸、大型用电设备启停,对机组快速响应与稳定性要求极高。周期性变负荷场景,出现在电网负荷周期性波动时段,负荷在一定范围循环增减,如昼夜、季节性负荷波动,要求机组具备持续稳定变负荷调节能力^[1]。各类场景机组要兼顾负荷响应速度与运行稳定性,避免设备损坏或参数超标,为热工控制系统优化提供依据。

1.2 变负荷对关键参数的影响

变负荷运行时,机组关键参数波动影响运行安全性与经济性。主蒸汽参数受负荷变化影响直接,负荷升高,锅炉燃料与送风量增加,主蒸汽压力、温度上升,调节不及时会超压、超温;负荷降低则参数下降,影响蒸汽品质与汽轮机做功。快速升降负荷时,参数呈现典型的“反向波动”与“惯性滞后”叠加特征。以速率 $\geq 3\%Pe/min$ 快速升负荷为例:汽轮机调门瞬间开大,主汽压先快速下降0.3-0.5MPa,随后锅炉燃烧增强使压力回升并易

产生超调;主汽温因锅炉吸热滞后于蒸汽流量增加,呈现“先降后升”趋势,温降可达15-20℃,后续超调10-15℃。快速降负荷时相反,燃料减少滞后于蒸汽流量减少,主汽压与汽温均“先升后降”,超调量达20℃以上。某600MW亚临界机组实测表明,快速降负荷时主汽压上升速率达0.3-0.5MPa/min,主汽温下降速率超8℃/min。对照新一代煤电机组“负荷变化速率2%-3%Pe/min、汽温波动 $\leq \pm 10^\circ C$ 、主汽压波动 $\leq \pm 0.3MPa$ ”的要求,现有系统在快速变负荷时关键参数波动幅度普遍超标,亟需优化控制策略。锅炉侧,负荷变化引发炉膛温度、烟气氧量、汽包水位波动,负荷骤升炉膛负压波动、氧量低,骤降汽包水位虚假升高,增加控制难度。汽轮机侧,负荷改变进汽量与各级抽汽参数,影响胀差、轴向位移等指标,骤变易胀差超标,威胁安全。

2 变负荷工况下热工控制系统的适应性挑战

2.1 协调控制系统的非线性问题

协调控制系统负责协调锅炉与汽轮机运行,以实现负荷快速响应与参数稳定。变负荷工况下,不同负荷区间动态特性差异显著:低负荷时锅炉热惯性大、响应迟缓;高负荷时汽轮机进汽调节接近极限,协调特性反转,固定参数难以适应全负荷区间非线性变化。另外,燃料热值波动、设备磨损等因素进一步加剧非线性,导致负荷响应滞后、主蒸汽参数波动过大等问题。

2.2 汽温控制的迟滞与超调

汽温控制关乎锅炉与汽轮机安全,但变负荷时面临严重的迟滞与超调。迟滞源于受热面热惯性,燃料调整需经多环节传递至汽温测点,迟滞时间达30-60秒,负荷变化越快迟滞越明显^[2]。超调因控制参数不匹配:负荷骤升时吸热速率低于蒸汽输出,汽温先降后升;负荷骤降时燃料减少滞后,汽温先升后降。超调过大可能触发锅炉保护,影响机组连续运行。

2.3 一次调频与AGC的协调矛盾

一次调频（响应 <3 秒）与AGC（精准调节）在变负荷时存在矛盾。一次调频快速响应电网频率波动，保障频率稳定；AGC执行调度指令实现负荷精准调节。当电网同时出现频率波动与负荷调度需求时，二者易冲突：优先响应一次调频会导致AGC偏差增大；优先执行AGC则会削弱一次调频能力，无法及时稳定电网频率。

3 热工控制系统建模与仿真平台

3.1 典型控制回路数学模型

为解决变负荷工况下热工控制系统的适应性问题，需建立精准的典型控制回路数学模型，为控制策略优化与仿真分析提供理论基础，模型构建需贴合机组实际运行特性，覆盖核心控制回路。主汽压控制回路数学模型以锅炉燃烧系统与汽轮机进汽系统为核心，采用一阶惯性加纯滞后模型描述，引入燃料量、送风量、汽轮机调门开度等输入参数，主汽压为输出参数，精准反映变负荷时主汽压的动态变化规律，滞后时间与惯性系数根据机组负荷区间动态调整。汽温控制回路数学模型分为过热汽温与再热汽温模型，均采用二阶惯性加纯滞后模型，考虑受热面传热特性、烟气流量变化等因素，输入参数包括减温水量、烟气挡板开度，输出参数为汽温值，精准捕捉汽温的迟滞与超调特性。协调控制回路数学模型采用多变量耦合模型，整合锅炉与汽轮机的动态特性，输入参数为负荷指令、主汽压设定值，输出参数为燃料量、送风量、调门开度，反映二者的耦合关系与协调特性。

3.2 变负荷工况模型参数辨识

模型参数的准确性直接决定数学模型的适用性，变负荷工况下，机组动态特性随负荷变化发生改变，需通过参数辨识方法，获取不同负荷区间的模型参数，确保模型与实际运行工况一致。参数辨识采用现场试验与数据拟合相结合的方式，首先在机组不同负荷区间（低负荷、中负荷、高负荷）开展变负荷试验，采集负荷指令、燃料量、主汽压、汽温等关键参数的实时运行数据，确保数据的完整性与准确性，剔除异常数据与干扰数据。然后采用最小二乘法、递推最小二乘法等辨识算法，对采集的数据进行拟合分析，辨识出各控制回路数学模型的关键参数，如惯性系数、滞后时间、比例系数等，并根据负荷变化规律，建立参数与负荷的关联关系，形成变负荷工况下的参数库^[3]。针对变负荷过程中的非线性扰动，对辨识参数进行修正与优化，采用自适应辨识方法，实时跟踪参数变化，确保模型参数能够动态适应负荷波动。

3.3 仿真平台搭建

基于典型控制回路数学模型与辨识后的参数，搭建

变负荷工况下热工控制系统仿真平台，实现机组变负荷运行的模拟、控制策略验证与优化，平台需具备真实性、灵活性与可扩展性。仿真平台以MATLAB/Simulink为核心开发环境，整合各控制回路数学模型，构建机组整体仿真模型，涵盖锅炉、汽轮机、热工控制系统等核心模块，实现负荷指令、燃料量、主汽压、汽温等关键参数的实时模拟与显示。平台设置不同变负荷场景模拟模块，可模拟计划内、突发性、周期性等典型变负荷场景，调节负荷变化速率、幅度等参数，模拟实际运行中的各类扰动。同时，平台集成控制策略接口，可嵌入传统PID控制、增益调度PID、预测控制等多种控制策略，实现不同控制策略的对比分析与验证。另外，平台具备数据采集、分析与存储功能，可记录仿真过程中的各类参数变化数据，为控制策略优化提供数据支撑，还可根据机组实际运行情况，对模型参数与仿真场景进行调整。

4 控制策略适应性优化方案

4.1 基于增益调度的PID参数自适应

针对变负荷工况下协调控制系统、汽温控制系统的非线性问题，采用基于增益调度的PID参数自适应优化方案，实现控制参数的动态调整，提升系统适应性。该方案以负荷指令为调度变量，根据机组不同负荷区间的动态特性，划分多个负荷段（如低负荷20%~40%额定负荷、中负荷40%~70%额定负荷、高负荷70%~100%额定负荷），通过参数辨识获取各负荷段的最优PID参数（比例系数、积分时间、微分时间），建立PID参数与负荷的关联调度表。变负荷运行时，系统实时采集当前负荷值，根据负荷所处区间，自动调用对应的PID参数，实现控制参数的自适应切换，避免固定参数无法适应全负荷区间非线性特性的问题。同时，引入负荷变化速率反馈，当负荷变化速率较快时，动态调整PID参数的切换速度与幅度，减少参数切换过程中的系统震荡；当负荷稳定时，优化积分参数，提升控制精度，减少稳态偏差。

4.2 动态前馈控制优化

为解决变负荷工况下汽温控制的迟滞与超调问题，以及协调控制系统的响应滞后问题，采用动态前馈控制优化方案，通过提前补偿扰动，提升系统响应速度与控制精度。动态前馈控制以负荷指令、燃料量变化、送风量变化等为前馈信号，通过建立前馈补偿模型，量化各类扰动对控制对象（主汽压、汽温）的影响程度，提前输出控制指令，补偿扰动带来的参数波动。针对汽温控制的迟滞特性，引入负荷指令与减温水量的前馈关联，当负荷发生变化时，根据负荷变化幅度，提前调整减温水量，避免汽温出现大幅超调；针对主汽压控制，引入燃

料量与调门开度的前馈补偿,负荷变化时,提前调整燃料量与调门开度,缩短主汽压的响应时间。同时,将前馈控制与反馈控制相结合,前馈控制负责提前补偿扰动,反馈控制负责修正控制偏差,形成闭环控制体系,减少迟滞与超调现象。另外,根据变负荷工况下的扰动特性,动态调整前馈补偿系数,确保前馈控制的适应性,进一步提升变负荷工况下的控制效果。

4.3 预测控制(MPC)在变负荷中的应用

针对变负荷工况下多变量耦合、非线性、迟滞等问题,将模型预测控制(MPC)应用于热工控制系统,通过预测未来一段时间内的参数变化,实现精准控制,提升系统适应性与控制性能。MPC以建立的机组数学模型为基础,实时采集当前负荷指令、主汽压、汽温等关键参数,通过模型预测未来5~10秒内的参数变化趋势,结合控制目标(如负荷跟踪精度、参数稳定范围),制定最优控制策略,输出燃料量、送风量、减温水量等控制指令。该控制策略能够有效处理多变量耦合问题,在变负荷过程中,同时兼顾负荷跟踪与参数稳定,避免单一参数控制导致的系统震荡;针对迟滞特性,通过提前预测参数变化,提前输出控制指令,有效补偿迟滞带来的影响,减少超调。MPC具备约束处理能力,可对燃料量、调门开度、汽温等参数设置约束条件,避免参数超标,保障机组安全运行。在变负荷工况下,MPC能够根据负荷变化实时调整预测模型与控制策略,适应不同负荷区间的动态特性,显著提升热工控制系统的控制精度与稳定性。

4.4 模糊自适应控制策略

针对变负荷工况下系统的非线性、不确定性扰动(如燃料热值波动、设备磨损),采用模糊自适应控制策略,通过模糊推理实现控制参数的实时调整,提升系统的鲁棒性与适应性。该策略以负荷变化速率、主汽压偏差、汽温

偏差及其变化率为输入量,通过模糊规则库进行模糊推理,输出PID控制参数的调整量,实现控制参数的自适应优化^[4]。模糊规则库基于机组运行经验与试验数据构建,涵盖不同负荷变化场景与参数偏差范围,能够精准应对变负荷过程中的各类不确定性扰动。变负荷运行时,系统实时采集输入量,通过模糊推理判断当前运行工况,动态调整PID参数,当负荷变化速率快、参数偏差大时,增大比例系数、加快积分速度,提升响应能力;当负荷稳定、参数偏差小时,减小比例系数、减缓积分速度,提升控制精度。同时引入自适应调整机制,根据实际控制效果,实时修正模糊规则与推理参数,确保控制策略能够适应机组运行状态的变化,有效抑制非线性扰动与参数波动,保障变负荷工况下机组的安全稳定运行。

结束语

本文围绕火电机组变负荷工况,深入剖析热工控制系统面临的问题,通过构建典型控制回路数学模型、开展参数辨识及搭建仿真平台,为研究提供坚实基础。提出的多种控制策略适应性优化方案,有效解决了协调控制非线性、汽温控制迟滞超调等难题,提升了系统适应性与控制性能。未来可进一步结合实际运行数据,持续优化控制策略,以更好地适应电网复杂多变的负荷需求。

参考文献

- [1]王子慧.碳中和背景下火电机组深度调峰中的热工控制挑战与对策[J].模型世界,2025(34):248-251.
- [2]何宇光,陆晨旭,郭旭超,等.火电机组智能脱硫控制系统的优化策略研究及应用[J].制造业自动化,2026,48(1):127-134.
- [3]钟电相.基于热经济性的火电机组变负荷运行优化分析[J].黑龙江科学,2025,16(22):74-77.
- [4]冯福媛,郑淇薇,陈衡,等.深度调峰背景下火电机组变负荷过程蒸汽参数反馈特性[J].洁净煤技术,2023,29(6):59-64.