

发电厂集控运行模式下主辅设备协同控制优化策略研究

崔亮

(内蒙古鄂尔多斯煤炭有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 016064)

摘要 针对集中控制运行中主要设备与辅助设备响应不一致、相互干扰严重等状况, 建立主辅设备多输入多输出的状态空间数学模型, 提出了分层次协同控制的优化方法, 其中协调层级主要负责负荷指令的科学分配工作, 执行层级则确保风烟给水系统与主机的动态配合情况, 同时采用前馈补偿与反馈修正相结合的复合调控机制。仿真验证显示该方法能有效加快负荷响应的速度、减弱主辅设备之间的耦合影响、优化机组热效率以及调节性能。

关键词 集控运行; 主辅设备; 协同控制; 分层优化; 动态耦合

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.010

0 引言

火电机组采用集中控制运行方式借助统一监控平台对锅炉、汽轮机及相关辅助设备系统开展一体化管理, 具备信息共享度高、操作界面一致与人员配置精简等特点, 然而因主机与辅机之间存在紧密的能量与物质交互关系, 负荷指令的变动会引发风烟系统、给水系统、制粉系统等多个子系统连锁反应, 各环节动态响应特性存在差异导致时序配合失调, 进而产生相互干扰并影响整体控制效果。传统单回路控制方法难以有效协调多变量间的复杂关联, 迫切需要从全局角度出发设计协同控制优化方案以增强集中控制模式下机组整体运行效能。

1 集控运行模式下主辅设备动态耦合特性与建模

在火电机组集控系统中, 锅炉、汽轮机等主机与送风机、给水泵等辅机通过能量与物质传递紧密联系。由于各子系统响应时间差异明显——锅炉热惯性 120~200 s, 给水系统 30~60 s, 风烟系统仅 10~25 s——负荷变化时易引发压力波动、负压偏离与水位震荡等耦合问题^[1]。针对这一特性, 建立多输入多输出状态空间模型:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中, $x(t)$ 为状态向量; $u(t)$ 为控制输入向量; $y(t)$ 为输出向量; A 、 B 、 C 、 D 分别为系统矩阵、输入矩阵、输出矩阵与前馈矩阵。该模型将分散的单回路

对象整合为多变量耦合系统, 为协同控制优化提供理论基础。

2 主辅设备协同控制优化策略的分层架构与核心算法

2.1 集控框架下协调层与执行层的功能划分

分层协同控制体系将集控系统划分为协调层与执行层两个逻辑层, 各层级承担着不同控制职能。协调层作为上层决策机构, 依据电网调度指令以及机组运行状态, 制定负荷分配策略并设定各子系统参数, 其运算间隔通常是 5~10 s, 主要聚焦全局优化与多目标平衡; 执行层分布在各辅机子系统的分散控制单元, 将协调层下发的参数转化为具体的阀门开度、转速或者挡板位置指令, 运算周期一般为 50~200 ms, 侧重于快速响应与局部干扰抑制^[2]。两层通过标准化接口实现双向数据交互, 协调层专注负荷调配与能量流优化, 执行层保障各回路参数稳定。

2.2 稳态运行阶段辅机群优化配置的节能导向机制

在机组稳定运行期间, 机组负荷基本保持不变, 此时辅助设备运行方式对厂用电消耗及全厂能效起决定性作用, 节能优化策略旨在降低辅助设备系统总能耗, 在保证工艺要求的前提下确定各类辅机最佳工作状态。通过构建风机性能曲线与管网阻力特性表达式, 利用遗传算法优化辅机启停组合及转速设定值, 可使风机群功耗降低 2%~4%。给水泵组采用与上述类似策略, 按照负荷变化在汽动给水泵与电动给水泵之间进

作者简介: 崔亮(1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电力系统及其自动化。

行智能切换，在中低负荷阶段优先使用电动泵，在高负荷时则切换到汽动泵以有效降低厂用电率^[3]。辅机群优化配置的目标函数可表示为：

$$J = \min \sum_{i=1}^n P_i(Q_i, H_i, \eta_i) \quad (2)$$

式(2)中， J 为辅机群总耗功； n 为参与优化的辅机台数； P_i 为第*i*台辅机的轴功率； Q_i 为该辅机的流量； H_i 为扬程或全压； η_i 为运行效率。该目标函数在流量平衡约束与设备能力约束下求解，从而确定各台辅机的最优运行工况点。

2.3 变负荷过程中主机指令与风烟给水系统的动态匹配方法

变负荷过程中主机侧燃烧率与蒸汽流量的调整将引发风烟、给水等系统产生联动反应，若各子系统的响应速度不匹配则会造成主蒸汽压力异常波动、炉膛负压不稳以及汽包水位震荡等问题。动态匹配技术的关键在于依据主机负荷的变化趋势，提前规划各辅助设备的响应路径，保证其在时间上与主机需求实现同步协调^[4]。当协调层在获取负荷增减指令后，首先根据锅炉热惯性特点确定燃料量提前投入的时机与大小，随后按照燃料—风量匹配比例同步调节送风机的转速，给水流量则按照蒸汽流量的波动情况进行跟踪调节。以一台 300 MW 亚临界机组为例，当负荷变动率为 3% Pe/min 时，燃料指令会比汽机阀门动作提前 8 ~ 12 s 发出，送风量在燃料加入后 2 ~ 4 s 内完成匹配，给水流量比蒸汽流量延迟约 5 ~ 8 s 以保障汽包水位稳定，这一情况如图 1 所示。

2.4 负荷扰动条件下前馈补偿与反馈校正的复合调节逻辑

当机组负荷出现波动情况时，单纯反馈控制响应迟缓，纯前馈控制难以处理模型误差，因此需构建复合控制策略。前馈补偿模块依据扰动信息预先调整控制量，反馈修正部分采用 PID 算法消除剩余误差及未建模干扰影响。复合调节的控制输出可表示为：

$$u(t) = K_{ff} \cdot d(t) + K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

式(3)中， $u(t)$ 为控制器输出； K_{ff} 为前馈增益； $d(t)$ 为可测扰动量； K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例、积分、微分系数； $e(t)$ 为被控参数偏差。前馈通道能够迅速应对干扰变化以抑制动态偏差最大值，反馈通道保证稳态无静差，二者相互配合可将主汽压力偏差控制在 ±0.15 MPa 范围以内，炉膛负压波动维持在 ±80 Pa 范围之内，显著改善机组在受到干扰时的调节性能^[5]。

3 协同控制优化策略的仿真测试与性能评价

3.1 仿真测试平台构建与多工况实验方案

仿真测试平台在 MATLAB/Simulink 框架下构建而成，针对某 300 MW 亚临界汽包炉机组开发出全范围动态仿真模型，此模型整合了锅炉燃烧、汽水循环、风烟流动及汽轮机调节等子系统，各模块参数均依据现场阶跃响应测试数据进行标定。平台设置协同控制与传统分散控制两种运行模式，为对比优化策略的实施成效提供分析基础。多工况实验方案涵盖稳态运行、负荷阶跃、连续变负荷以及负荷扰动四类典型场景，其中负荷阶跃试验特地设置两组变化幅度，分别是 ±5% Pe

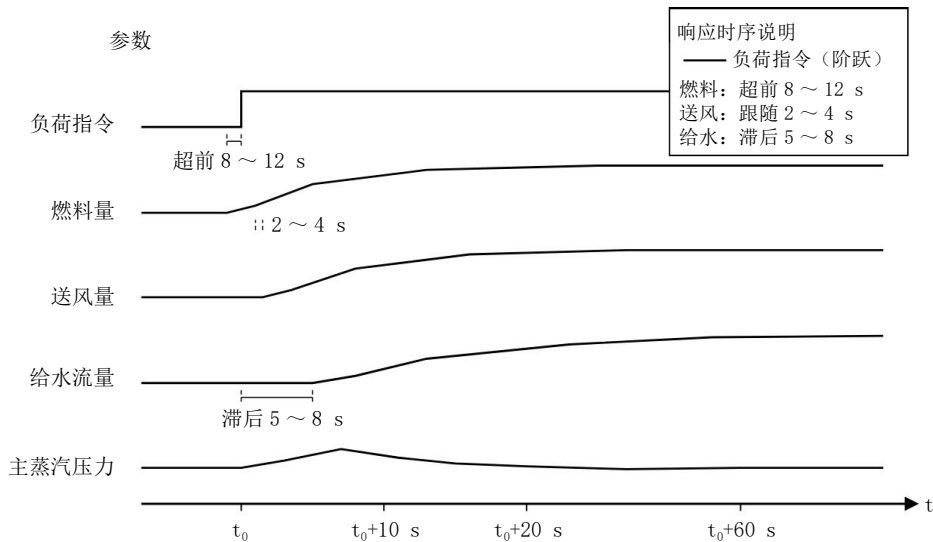


图 1 变负荷过程主辅设备动态匹配时序图

和 $\pm 10\%$ P_e , 连续变负荷试验以特定速率在负荷区间循环升降, 按 2% P_e/min 和 3% P_e/min 的速率在 $50\% \sim 90\%$ 负荷区间进行, 负荷扰动试验通过施加信号模拟波动情况, 借助外部施加阶跃与正弦干扰信号模拟电网频率波动。为确保数据具有可靠性, 各工况均重复运行 3 次后取平均值, 仿真步长设为 0.01 s 以确保数值稳定性与计算精度。

3.2 负荷阶跃响应速度与超调量的对比分析

负荷阶跃响应试验重点评估机组从初始稳定状态过渡到新稳定状态时动态特性, 主要考察响应速度、超调幅度以及调节时间等方面指标, 试验选取 $\pm 5\%$ P_e 与 $\pm 10\%$ P_e 四种工况, 对主蒸汽压力、实际负荷等核心参数的动态变化特征进行监测。测试数据表明, 协同控制策略在各类工况下都呈现出更优的响应特性, 体现为响应速度有所提升且超调量有所降低, 这得益于协调层对燃料与风量的预先控制以及前馈补偿对耦合扰动的有效抑制。在负荷下降工况当中, 该策略仍然保持着良好的跟踪效果, 调节时间相比传统方法缩短了 $22\% \sim 25\%$, 以 $+10\%$ P_e 工况为例, 协同控制策略响应时间为 48 s 、压力超调量 0.13 MPa 、调节时间 85 s , 而传统控制分别为 65 s 、 0.22 MPa 、 112 s , 性能提升显著。

3.3 主辅设备间耦合干扰抑制能力的量化表征

主辅设备间的耦合干扰主要体现为某子系统操作变量变化引起其他被控参数的波动, 其抑制效果通过耦合干扰抑制比进行量化评估。在燃料量阶跃扰动测试中, 采用协同控制策略使汽包水位最大偏差降至 20 mm 、炉膛负压偏差降至 70 Pa , 较传统控制提升约 45% 。进一步开展供水流量的阶跃扰动测试工作, 主蒸汽压力的扰动传递增益降低约 38% , 这表明协调层的解耦补偿手段可有效隔离扰动在各回路间相互影响, 在送风量出现突变的试验中, 过热蒸汽温度波动范围从传统控制的 $\pm 9\text{ }^\circ\text{C}$ 缩小到协同控制的 $\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$, 进一步证实复合调节逻辑在抑制多变量耦合干扰上具有显著效果。

3.4 机组热耗率与调节品质的综合效益评估

机组热耗率与调节品质是评判协同控制策略整体性能的关键标准, 热力性能测试选取 70% 、 80% 、 90% 三种典型工况开展, 各工况稳定运行半小时后记录数据并求取均值。测试数据表明, 协同控制策略在所有工况下都能够同时提升能耗指标与控制性能, 辅机系统优化配置带来的厂用电下降与主辅系统协同运行增强的稳定性产生了协同增益, 这为机组经济性运行与负荷灵活调节奠定了坚实的基础。表 1 给出了综合效益评估的主要结果。

表 1 机组热耗率与调节品质综合评估

负荷水平	控制策略	热耗率 / ($\text{kJ} \cdot \text{kWh}^{-1}$)	厂用电率 / %	压力 IAE / ($\text{MPa} \cdot \text{s}$)	水位 IAE / ($\text{mm} \cdot \text{s}$)
70% P_e	协同控制	8 486	5.15	13.2	88
	传统控制	8 558	5.38	22.5	148
80% P_e	协同控制	8 425	4.98	11.5	75
	传统控制	8 492	5.22	19.8	130
90% P_e	协同控制	8 378	4.85	10.2	68
	传统控制	8 438	5.08	17.5	112

4 结束语

分层协同控制优化策略通过明确协调层与执行层职责分工, 确保负荷指令在主辅设备间的高效传递与动态平衡, 稳定运行阶段辅助机组群遵循节能原则实现优化配置, 负荷变化过程中风烟及给水系统根据主机需求实时调整运行参数, 负荷扰动条件下前馈补偿与反馈校正机制的协同作用有效抑制了设备间的耦合干扰。仿真结果显示, 该策略在响应速度、抗扰动能力及热耗率优化方面表现良好, 不同工况下可显著提升主辅设备协调性能, 该成果为集控运行模式下机组控制性能改进提供了理论依据与算法支持, 也为更复杂多变量耦合系统的协同控制研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] 孙勇. 满负荷工况下 1000 MW 多机组间协调优化控制方法 [J]. 电工技术, 2026(01):198-200.
- [2] 刘吉臻, 王庆华, 张效宁, 等. 支撑我国能源转型的灵活燃煤发电新技术: 燃煤耦合储能系统及智能控制系统 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17):6855-6883.
- [3] 洪文荣. 加强电厂集控运行与机组协调控制探析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2022(29):1-3.
- [4] 许文强. 电厂集控运行与机组协调控制应用 [J]. 中国高科技, 2021(09):98-99.
- [5] 胡正. 火电厂机组集控运行技术管理 [J]. 技术与市场, 2021, 28(01):112-113.