

DOI: 10.19666/j.rlfd.202605123

适应电网调度的火电机组 AGC 与一次调频协同优化策略

俞笑闻¹, 高林¹, 王林¹, 周俊波¹, 高耀崑¹, 雷杨祥¹, 王勇虎²,
吕雨林², 李雪松², 王超³

(1. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

2. 华能铜川照金煤电有限公司, 陕西 铜川 727100;

3. 华能陇东能源有限责任公司正宁电厂, 甘肃 庆阳 745306)

[摘要] 【目的】针对新能源并网导致电网惯量削弱, 且火电机组执行自动发电控制和一次调频时频发冲突的痛点, 本文以 1000 兆瓦超超临界直流炉火电机组为对象, 提出一种模型驱动的机炉协同优化控制策略。【方法】首先, 基于物理集总汽水循环过程, 建立三阶仿射非线性动态控制模型, 并用自适应遗传算法在线辨识压力与能量转化系数等参数。其次, 在控制底层引入状态重构技术, 通过频域互补滤波提取暂态再热蒸汽流量, 利用高阶逆向反演重构入炉煤等效热值。最后, 对接考核细则, 设计涵盖提压蓄能、变增益补偿、防冲突交叉闭锁及微阶梯分解的协调控制逻辑策略矩阵。【结果】实机闭环投运表明, 降阶模型变工况预测精度优异。优化后机组一次调频合格率稳超免考线, 自动发电控制指标大幅跃升, 改善了热惯性引发的功率振荡与能量对冲。【结论】该方案兼顾计算效率与物理保真度, 开辟了百万机组依靠纯软件逻辑重构深度参与辅助服务市场的工程实操范式, 从底层突破了机炉协调响应瓶颈, 显著增强了机组对新型电力系统的支撑能力。

[关键词] 超超临界机组; 一次调频; 自动发电控制; 复合建模; 状态重构

[引用本文格式] (本段作者勿动) 作者姓名. 中文标题[J]. 热力发电, 年, 卷(期): 起始页码-终止页码. 作者姓名. 英文标题[J]. Thermal Power Generation, 年, 卷(期): 起始页码-终止页码.

Coordinated optimization strategy for agc and primary frequency regulation of thermal power units oriented to grid dispatching

Yu Xiaowen¹, Gao Lin¹, Wang Lin¹, Zhou Junbo¹, Gao Yaokui¹, Lei Yangxiang¹,
Wang Yonghu², Lü Yulin², Li Xuesong², Wang Chao³

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

2. Tongchuan Zhaojin Coal & Electricity Co., Ltd., Tongchuan 727100, China;

3. Huaneng Longdong Energy Co., Ltd., Zhengning Power Plant, Qingyang 745306, China)

Abstract: [Objective] As the accelerated transition toward modern power systems with high-penetration renewable energy integration continuously weakens the equivalent rotational inertia of the grid, 1000 MW ultra-supercritical once-through boiler thermal power units face increasingly strict dispatch performance criteria. Due to their inherent thermodynamic lag and strong non-linear characteristics, these megawatt-class units frequently encounter severe command coupling conflicts and destructive energy clashes when executing automatic generation control and primary frequency regulation instructions simultaneously. To fundamentally resolve these operational bottlenecks, this research introduces a model-driven, coordinated optimization control strategy. **[Methods]** First, adopting a hybrid modeling concept, the intricate steam-water cycle of the boiler is spatially lumped to construct a highly efficient 3rd-order affine non-linear dynamic control model. To guarantee wide-range robustness, an objective-

收稿日期: 2026-05-30 修回日期: 2026-09-10 接受日期: 2026-09-23 网络首发日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (2026CY-YBXM-739); 中国华能集团有限公司重点科技项目 (HNKJ25-H22)

Supported by: Key Science and Technology Project of China Huanneng Group Co., Ltd. (HNKJ25-H22); Key Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ25-H22)

第一作者简介: 俞笑闻 (2002), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为火电机组调频优化, yuxiaowen@tpri.com.cn.

adaptive non-dominated sorting genetic algorithm is employed to perform the online calibration of unknown dynamic parameter matrices, specifically targeting pressure conversion coefficients, energy conversion variables, and thermal time constants. Capitalizing on this reduced-order model's internal boundary constraints, state reconstruction technologies are embedded in the control layer. Specifically, the transient reheat steam flow is extracted through a frequency-domain complementary filtering network to effectively eliminate volume-induced phase delays. Concurrently, the actual equivalent coal feed rate is reverse-calculated via a high-order Butterworth band-pass inversion algorithm to successfully strip away coal transportation delays. Furthermore, aligning strictly with the latest grid auxiliary service assessment rules, a comprehensive coordinated control logic strategy matrix is configured. This matrix features active main steam pressure-raising for energy storage at deep peak-shaving loads, adaptive variable-gain compensation algorithms for small frequency deviations, cross-interlocking protection mechanisms to prevent reverse actions during large frequency deviations, and a discrete micro-step decomposition module for continuous automatic generation control ramp commands. **[Results]** Field test data gathered from an industrial unit thoroughly verify the proposed strategy's exceptional efficacy. The reduced-order mathematical model exhibits remarkable tracking fidelity under wide-range load-varying conditions, maintaining an average main steam pressure prediction error of only 3.15%. Following the control logic upgrade, the initial mechanical response delay for primary frequency regulation was compressed to 2.65 seconds. This drove the monthly primary frequency regulation qualification rate from 62.4% to a stable 81.5%, safely surpassing the penalty-exemption baseline. Simultaneously, the comprehensive automatic generation control performance index registered a leap from 0.51 to 1.18, systematically eradicating power oscillations and inverse adjustments traditionally caused by thermodynamic inertia. **[Conclusion]** Balancing computational efficiency and physical fidelity, the proposed scheme establishes a practical engineering paradigm for 1000 MW units to deeply engage in the ancillary service market through pure software logic reconfiguration. It fundamentally breaks through the response bottlenecks of boiler-turbine coordination and significantly strengthens the unit's support capability for next-generation power systems.

Key words: ultra-supercritical units; primary frequency regulation; automatic generation control; hybrid modeling; state reconstruction

随着新型电力系统高比例新能源的并网, 系统的等效转动惯量与动态频率阻尼系数下滑^{错误!未找到引用源。}, 电网功率失衡易引发频率跌落或越限, 威胁供电安全^[3-5]。因此, 火电机组仍是提供基网惯量和有功补偿的“中流砥柱”, 其一次调频(primary frequency regulation, PFR)和自动发电控制(automatic generation control, AGC)的调节品质直接决定电网稳态边界^{错误!未找到引用源。}。

新版“两个细则”(辅助服务及并网运行管理实施细则)量化了火电机组 AGC 与一次调频参数的奖惩防线^{错误!未找到引用源。}; 1 000 MW 超超临界直流机组的控制特性呈现出多变量强耦合、高时延以及时变非仿射非线性特征^{错误!未找到引用源。}; AGC 与一次调频指令在分布式控制系统(distributed control system, DCS)中的叠加易引发冲突; 若侧重 AGC, 则主蒸汽压力大幅波动, 若侧重一次调频, 易导致蓄能不足, 甚至反调^{错误!未找到引用源。}。

针对上述问题, 国内外进行了多种研究。

硬件上, 主流技术路线是利用锂电池储能系统或飞轮储能构建“火储联合调频系统”, 储能模块受制于电池容量、充放电热失控风险与初建成本, 难以广泛应用^{错误!未找到引用源。}。

算法上, 模型预测控制(model predictive

control, MPC)、自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)及多变量滑模变结构控制等在离线仿真中效果显著, 这些算法普遍包含复杂的优化迭代和高阶空间状态反演过程, 受限于 DCS 性能, 难以直接适用^{错误!未找到引用源。}。

为此, 本文提出一种兼顾计算效率与物理保真度的模型驱动的机炉协同优化控制策略。首先为突破计算壁垒, 物理集总汽水循环过程, 建立三阶仿射非线性动态控制模型, 并利用自适应遗传算法在线辨识参数。其次, 应用频域互补滤波与高阶逆向反演技术, 重构暂态再热蒸汽流量与入炉煤等效热值。最后, 对接考核细则, 引入提压蓄能、变增益补偿、防冲突交叉闭锁及微阶梯分解逻辑。该策略在 1 000 MW 超超临界直流机组中完成试验, 证明了对 AGC 与一次调频的协同优化的作用。

1 机理建模与动态参数辨识

1.1 直流炉非线性降阶建模

超超临界机组结构如图 1 所示, 其内部燃烧与传热本质为复杂的三维分布参数系统, 直接求解高阶偏微分方程会导致 DCS 算力过载。因此, 本文采用集总参数法进行降阶, 将省煤器至过热器管路等效为单一控制体, 简化模型如图 2 所示。选取汽水

分离器的压力 p_m 和比焓 h_m 表征控制体的热力学状态^[19-20]。

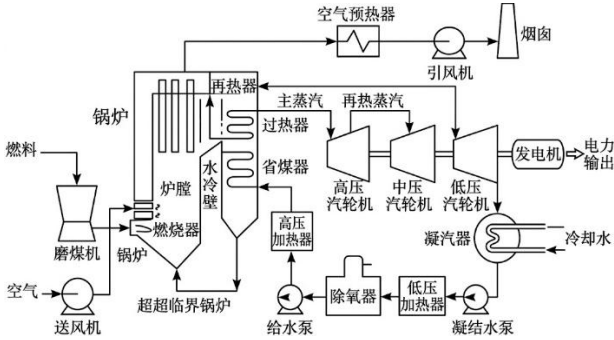


图1 超超临界机组结构

Fig.1 Structure of the ultra-supercritical unit

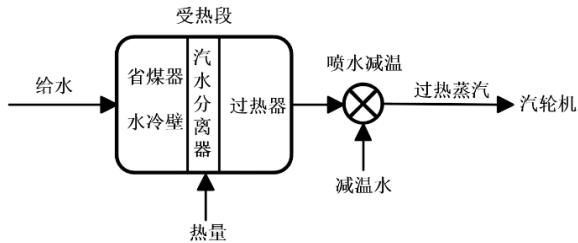


图2 锅炉简化结构

Fig.2 Simplified structure of the boiler

首先，将给煤至炉膛着火的过程等效为综合时间常数 τ 的一阶惯性环节：

$$\frac{dr_B}{dt} = \frac{u_B - r_B}{\tau} \quad (1)$$

式中： u_B 为 DCS 发出的总燃料指令； r_B 为实际转换为有效炉膛吸热的等效燃煤量。

其次，控制体内工质质量变化率等于给水与主蒸汽流量之差：

$$V_w \frac{d\rho_m}{dt} = u_{fw} - D_{st} \quad (2)$$

式中： V_w 为受热段等效容积； u_{fw} 为总给水流量； D_{st} 为主蒸汽实际流量。在一般情况下，工质密度 ρ_m 的变化可简化为仅受压力 p_m 影响的偏导。利用汽轮机高压调门在定滑压工况下的经典流量特性公式 $D_{st} = k_v p_m \mu_v$ （其中 μ_v 为调门综合开度指令），可将式 (2) 重构为：

$$\frac{dp_m}{dt} = c_0 r_B - c_1 \mu_v p_m + c_2 u_{fw} \quad (3)$$

管壁及流体总内能的变化等于炉膛辐射热量与进出工质焓流差，可将金属温度变化近似映射为流体比焓的动态响应，并舍弃无关的耦合项，得出比焓的状态方程：

$$\frac{dh_m}{dt} = d_1 r_B - d_2 u_{fw} \quad (4)$$

为直接控制负荷响应，必须最终输出机组有功功率 N 。汽轮机的实际功率是进入汽缸的蒸汽流量与蒸汽做功焓降之积，可简化为与主汽流量 D_{st} 和机前蒸汽比焓 h_m 相关的非线性代数方程，并叠加高、中低压缸做功的容积时间常数进行动态平滑：

$$N = k_t \cdot (c_3 \mu_v p_m + c_4 h_m) \cdot \frac{1}{1 + T_t s} \quad (5)$$

式中： k_t 为汽机做功效率折算系数； T_t 为表征汽机转子及气室容积效应的综合时间常数。

至此，一个以燃料 u_B 、给水 u_{fw} 和调门开度 μ_v 为主输入，以有功功率 N 和主汽压 p_m 为输出的机炉多变量非线性控制模型构建完成。该模型打通了火力发电的物理链路，契合 DCS 的控制需求。

1.2 多目标自适应遗传算法参数标定

由于动态参数 $\Theta = [c_0, c_1, c_2, d_1, d_2, \tau, T_t]$ 难以测算，且负荷大幅滑降时，水冷壁与过热器的吸热比例会发生严重偏移，人工试凑无法保证鲁棒性。为此，本文采用带精英保留策略的多目标自适应遗传算法（non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II）进行参数在线辨识与寻优^{错误！未找到引用源。}。

在 AGC 考核中，调节精度指标 (K_2) 对机组的稳态静差极为敏感，因此，本文将适应度函数 $F_{fitness}$ 升级为对稳态静差惩罚最为严厉的误差绝对值时间积分（integral of time-weighted absolute error, ITAE）准则。以主蒸汽压力 p_{st} 与有功功率 N 的预测偏差极小化为收敛目标，并在误差项上乘以时间权重变量 t ：

$$F_{fitness} = \min \sum_{t=0}^T (\omega_1 |p_{st_sim}(t) - p_{st_real}(t)| \cdot t + \omega_2 |N_{sim}(t) - N_{real}(t)| \cdot t) \quad (6)$$

式中： ω_1 和 ω_2 为平衡量纲差异与惩罚权重的系数。ITAE 准则利用时间权重放大跟调后期的残余偏差，迫使算法种群精准向零稳态误差方向收敛。

经演化计算，获取某 1000MW 机组的动态特征参数为： $c_0 = 1.82 \times 10^2$ ， $c_1 = 1.05 \times 10^6$ ， $c_2 = 5.94 \times 10^4$ ， $d_1 = 5.08 \times 10^2$ ， $d_2 = 2.98 \times 10^3$ ， $\tau = 17.5s$ ， $T_t = 10.2s$ 。该参数矩阵在保障物理保真度的前提下，为后续控制器设计奠定了基础。

2 控制底层状态重构技术引入

为实现高品质前馈与前瞻性控制，本文在控制

逻辑底层引入状态重构技术, 在线观测机组的“暂态能量变化量”。

2.1 基于频域互补滤波的再热蒸汽流量提取

再热器冷段一般没有节流热耗, 而一次调频动作开始时高压调门快速开闭, 再热器容积产生气室效应, 进入中低压缸的实际流量比主蒸汽流量有 6~8 s 的纯时滞。若采用定比例推算策略, 极易引发振荡失稳。

为消除该容积时滞, 本文设计了基于频域互补滤波 (complementary filtering) 的重构网络:

在低频稳态通道, 基于回热系统高压加热器的矩阵热平衡原理, 并滤波处理抽汽温度与压力的测量噪声, 解算获得具有高稳态精度的再热流量基准值 D_{r_steady} 。

在高频稳态通道, 引入中压缸机前压力 p_{re} 与调节阀级温度 T_{re} , 基于弗留格尔 (Flügel) 公式计算出调门开度变化的瞬态流量表征值 $D_{r_dynamic}$:

$$D_{r_dynamic} = K_{flügel} \frac{\sqrt{p_{re}^2 - p_{re_out}^2}}{\sqrt{T_{re}}} \quad (7)$$

两者分别通过时间常数相同 (T_f) 的低通和高通滤波器后, 在加法器中交融:

$$D_{r_final}(s) = \frac{1}{1+T_f s} D_{r_steady}(s) + \frac{T_f s}{1+T_f s} D_{r_dynamic}(s) \quad (8)$$

式(8)中, 高低通滤波器增益之和在全频域内恒为 1, 最终输出的暂态再热蒸汽流量 D_{r_final} , 既保留了瞬态波形的敏捷无迟滞突跳, 又确保了长周期下的稳态抗漂移精度。

综上所述, 基于频域互补滤波的再热蒸汽流量提取的基本逻辑如图 3 所示。

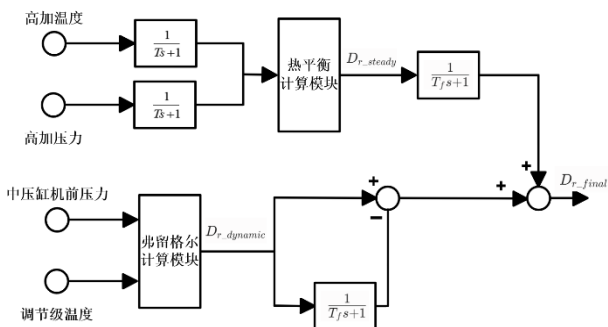


图 3 基于频域互补滤波的再热蒸汽流量提取
Fig.3 Reheat steam flow extraction based on frequency-domain complementary filtering

2.2 利用高阶逆向反演重构入炉煤等效热值

实际入炉煤发热量的频繁波动, 易导致协调控制失稳。由于制粉系统的慢响应特性, 热值变化引发的主汽压偏离时滞较大, 导致反馈滞后。

本文利用三阶模型解算的汽水侧有效吸热量, 并结合基于沿程换热系数标定的热损耗模型, 反演出炉膛内瞬时释放的总热量 Q_{in} 。将包含制粉系统多阶热惯性与长时纯时滞环节抽象为串联的一阶惯性与纯时滞环节 $W(s)$:

$$W(s) = e^{-\tau_d s} / [(1+T_1 s)(1+T_2 s)] \quad (9)$$

$W^{-1}(s)$ 包含了大于分母阶数的纯高阶微分项 (如 $T_1 T_2 s^2$), 属于典型的“非因果系统”。在电厂充斥着电磁干扰和传感器高频噪声的环境下, 直接对其求导易引发微分发散 (derivative explosion) 错误!未找到引用源。

为实现在 DCS 上的数学适定性, 本文在重构通道中串联了一个高阶巴特沃斯 (Butterworth) 低通滤波器进行平滑改造:

$$Q_{coal_actual}(s) = Q_{in}(s) \cdot W^{-1}(s) \cdot \frac{1}{(1+T_c s)^3} \quad (10)$$

本文将逆向滤波时间常数选为 8 s, 以抑制高频噪声放大。用反演所得的炉膛瞬时热量除以给煤机即时指令量, 重构出当前入炉煤的低位发热量, 将其用作燃料主控的超前自适应偏置, 让风煤配比系统在机前压力实质性波动前作出响应, 弱化了煤质劣变对 AGC 跟踪精度的影响。

综上所述, 利用高阶逆向反演重构入炉等效煤量逻辑如图 4 所示。

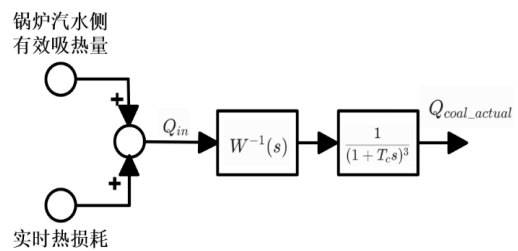


图 4 利用高阶逆向反演重构入炉煤等效热值
Fig.4 Reconstruction of equivalent heating value of entering coal based on high-order inversion

3 协调控制逻辑策略矩阵设计

对接“两个细则”的考核标准, 在机组 DCS 底层重塑了协调控制逻辑策略矩阵, 如图 5 所示。

3.1 极低负荷区间主动提压蓄能策略

针对深度调峰区间 (30%~40%额定负荷) 系统蓄能匮乏、难以满足初期功率贡献率考核的痛点,

引入非线性“主动提压蓄能”映射函数:

$$P_{ref_new} = P_{ref_base} + \Delta P \cdot e^{-\lambda(N-N_{min})^2} \quad (11)$$

式中: N 为机组有功负荷; N_{min} 为深调极限负荷基准点; ΔP 为电厂据设备安全裕度设定的极限提压增量(通常选取 0.8~1.2 MPa); 指数衰减因子 λ 用于控制提压作用随负荷升高的平滑退出速率, 防止高负荷时发生超压爆管。该函数通过主动建立极低负荷区的高压差, 提前预留节流裕度, 为调频响应提供能量支撑。

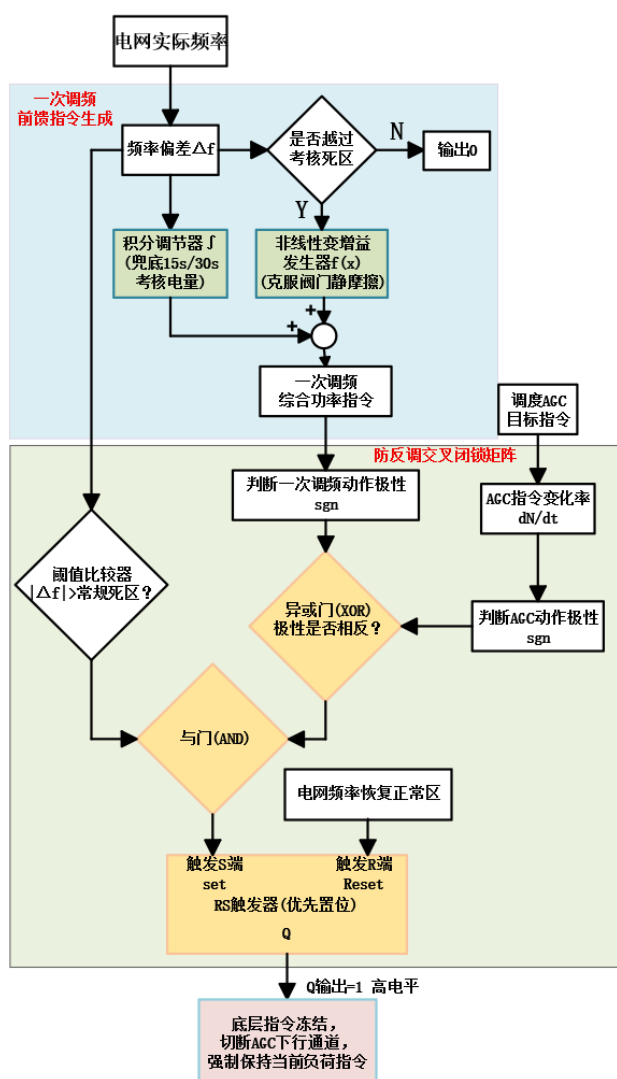


图5 契合“两个细则”的防冲突与精细化协同逻辑组态图
Fig.5 Configuration diagram of anti-conflict and refined coordinated logic conforming to the “Two Detailed Rules”

3.2 变增益补偿与防冲突交叉闭锁机制

如图5所示, 在一次调频前馈通道的执行层面上, 本文设计了3个模块。

1) 越死区变增益冲量补偿: 微小频差下, 常规线性指令极其微弱, 难以克服调门静摩擦力^{错误!未找到}

引用源。因此, 引入抛物线型变增益发生器 $f(x)$, 在越死区瞬间输出高幅值冲量击穿阀门死区。同时并联积分调节器($\int$)实时补偿动作初期的功率积分差额, 保障前 15 s 和 30 s 积分电量达标。

2) 防反调布尔交叉闭锁逻辑: “机组跟 AGC 减负荷指令下坡时, 电网频率跌落需一次调频加负荷”是常见的考核情景。为此, 本文设计了布尔交叉闭锁逻辑方程 L_{lock} :

$$L_{lock} = \left[\text{sgn}\left(\frac{dN_{AGC}}{dt}\right) \oplus \text{sgn}(\Delta f) \right] \wedge (|\Delta f| > f_{deadband}) \quad (12)$$

式中, $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数, 用于判断指令升降极性。当 AGC 指令斜率极性与电网要求的动作极性发生异或 ($\oplus$, 即方向相反), 且频差超越死区 $f_{deadband}$ 时, 鉴别矩阵后端的与门 (AND) 瞬间导通。此信号立刻置位 RS 触发器 ($L_{lock}=1$), 冻结 AGC 指令, 并锁存当前的负荷基准出力。将机组控制权交给一次调频, 规避了机炉内部热能的对冲内耗。

3) 凝结水节流变频极限协同: 为克服热量释放的惯性迟延, 在一次调频动作初期, 若检测到有功功率显著欠补偿, DCS 立即联动干预低压凝结水系统, 通过瞬时压降凝结水泵变频器指令(降频幅度可达 5~10 Hz), 骤减管网水流量, 截断部分通向低压加热器的抽汽。该逻辑可在 5~8 s 内挤出约 1.5%Pe (15 MW) 的纯有功增量, 实现机侧对网侧的无耗煤极限功率支援。

3.3 AGC 斜坡指令微阶梯分解策略

对于 1 000 MW 机组, 网调下发的 AGC 连续爬坡指令斜率往往高达 15 MW/min。长时间的燃料灌入, 极易导致炉膛内的水动力传热失衡, 引发超调发散与低频功率振荡, 影响调节精度指标。为此, 本文引入零阶保持器 (zero-order hold, ZOH) 离散化分解策略, 对连续 AGC 指令进行微阶梯重构:

$$N_{AGC_Micro}(k) = N_{AGC}(k-1) + \min\left[\frac{dN}{dt}\Big|_{limit} \cdot T_{sample}, \Delta N_{step}\right] \quad (13)$$

该算法将 AGC 的连续斜坡指令按固定的离散时间片 T_{sample} (如每 10 s 至 20 s 执行一次采样-保持) 与步进限幅 ΔN_{step} 进行转换, 使锅炉水动力循环在每个微周期内都具有短暂的热力平衡恢复时间, 从而抑制热量过冲, 降低稳态调节精度的偏差。

4 数字仿真与现场闭环试验分析

为验证所提协同优化策略的工程实效, 在某单

机容量为 1 000 MW 的超超临界机组上实施了长时间的闭环在线投运,并依据西北电网考核规范进行提取测算。

4.1 降阶模型及控制策略动态特性仿真验证

在将算法植入 DCS 前,利用 1.2 节基于 NSGA-II 算法得出的机组参数矩阵,在 MATLAB/Simulink 平台上搭建了三阶仿射非线性动态控制模型,并执行了阶跃扰动仿真测试,结果如图 6 所示。

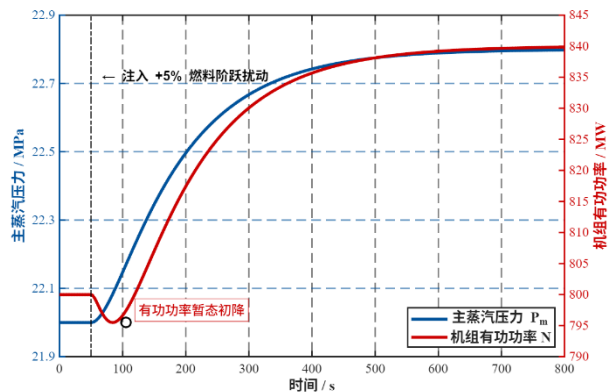


图 6 三阶机理模型在阶跃扰动下的数字仿真波形图

Fig.6 Digital simulation waveforms of the 3rd-order mechanistic model under step disturbance

如图 6 所示,在仿真时间 $t=50s$ 处,人为向系统注入一个+5%的瞬态燃料指令模拟扰动。观察曲线可知:主蒸汽压力呈现出带有明显纯时滞的一阶大惯性爬升趋势,体现了制粉系统的机械与热力延迟;有功功率在加煤瞬间不升反降,几秒后才缓慢爬升,而实际上,在加煤初期,水冷壁吸热导致内部工质比容膨胀,系统在短时间内吸收并挤占了管网内部的蓄能与主蒸汽流量,导致送往汽轮机做功的实际蒸汽量瞬态减少。

数值仿真与现场实际基本符合,证明了模型的物理保真度。调取机组历史数据进行复核:在 600MW 至 1000MW 广域滑压变负荷工况下,基于该模型反演的主蒸汽压力动态预测相对误差平均仅为 3.15%,满足 DCS 应用的精度门槛。

4.2 一次调频综合合格率的跃升分析

为直观展示防冲突矩阵的动作实效,从 DCS 历史趋势站中截取了如图 7 所示的波形图。

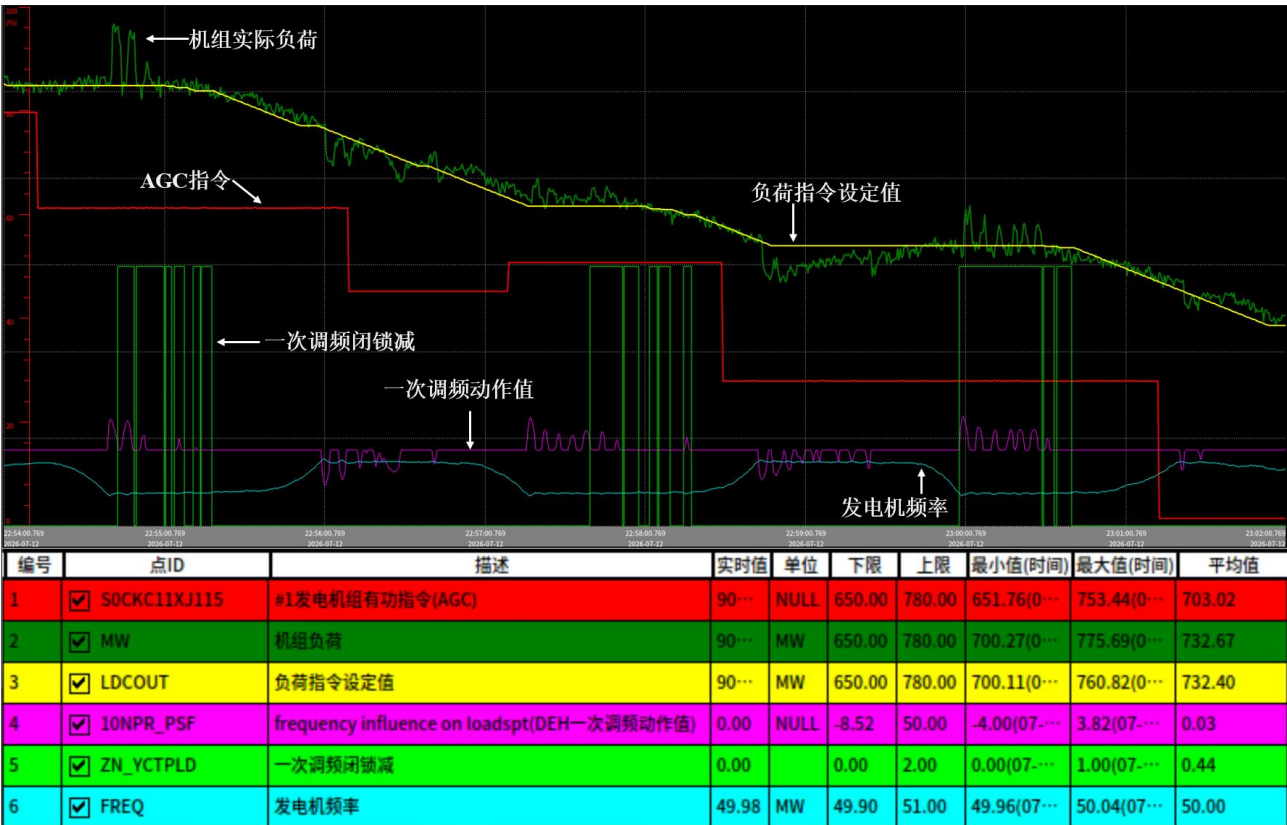


图 7 常规频差扰动下机组防反调闭锁逻辑瞬态波形

Fig.7 Transient waveforms of anti-regulation interlocking logic for the unit under conventional frequency difference disturbance

图 7 显示,一次调频发出加负荷指令时 AGC 正发出降负荷指令,控制逻辑触发了一次调频闭锁

减信号，闭锁了负荷指令的下降，遏制了反调。

在优化策略运行期间，随机抽取控制策略升级前后各 30 个因电网频率波动触发的调频动作记录进行指标核算，其量化对比结果如表 1 所示。

表 1 一次调频核心考核指标优化前后对比

Tab.1 Comparison of core assessment indicators for primary frequency regulation before and after optimization

调频核心考核维度	优化前平均表现	优化后平均表现	改善幅度	西北网调考核底线
动作响应迟滞时间/s	4.25	2.65	缩短 1.60s	≤ 3.0s
15 s 响应指数(I_{15})	0.65	0.95	提升 46.1%	≥ 0.90
30 s 响应指数(I_{30})	0.81	1.04	提升 28.4%	≥ 1.00
实际调频积分电量占比	68.2%	90.6%	提升 32.8%	≥ 90%
月度平均动作合格率	65.4%	81.2%	提升 15.8%	≥ 70% (免考线)

数据表明，策略升级前机组受机械摩擦死区与

系统热惯性掣肘，初始动作响应时延长达 4.25 s，此外， I_{15} 与积分电量严重欠补偿，导致月度平均动作合格率仅 65.4%，长期在 70% 的红线之下。

而在全面投运本文设计的变增益非线性冲量补偿、频域状态重构前馈与凝结水极限协同之后，机组动作迟滞被压缩至 2.65 s，满足网调的基本要求。各阶段响应指数在优化后稳健达标，实际调频积分电量占比上升至 90.6%。机组的月度平均一次调频合格率提升至 81.2% 的高位，跨过了免考基准线，有效地解决了该项考核的高额罚分问题。

4.3 AGC 跟踪品质与经济性转化

“两个细则”给出了决定电厂辅助服务收益的参数矩阵，即 AGC 综合性能指标 (K_p)，该指标由负荷调节速率 (K_1)、调节精度 (K_2) 和响应时间 (K_3) 综合映射得出的。

AGC 指令微阶梯分解策略与入炉煤等效热值逆向反演前馈，有效改善了“盲目猛加猛减长斜坡”的粗放控制模式。从 DCS 调取的实测波形直观印证了优化效果，如图 8 所示。



图 8 AGC 斜坡指令微阶梯分解策略作用下的负荷跟调趋势

Fig.8 Load tracking trend under the micro-step decomposition strategy for AGC long ramp command

图 8 显示，机组在一小时内由满负荷降至 300 MW 深调区间，在执行连续大斜坡爬坡工况时，机组实发功率平滑地逼近负荷指令目标轨迹，全程无

明显超调。验证了微阶梯分解对平抑低频振荡、提升调节精度的有效性。

本文在 50%~100%额定负荷区间内开展了多次

AGC 指令跟踪试验, 所得数据见表 2。

由表 2 可知, 实施优化策略后, 机组的调节速率 (K_1)、精度 (K_2) 与响应时间 (K_3) 三大核心指标均获得了跨越式改善, K_p 综合乘数由 0.662 跃升至 0.935。

表 2 AGC 调节性能指标优化前后对比
Tab.2 Comparison of AGC regulation performance indicators before and after optimization

AGC 调节特征模式	负荷调节速率 K_1	负荷调节精度 K_2	初始响应时间 K_3	综合性能指标 K_p
原传统出厂控制策略	0.95	0.83	0.84	0.662
协同优化策略	1.07	0.92	0.95	0.935
全运行工况相对变化	+12.63%	+10.84%	+13.10%	+41.24%

4.4 整体经济收益分析

优化前, 机组月考核罚扣高达数十万元, 月综合调频净收益往往仅有数万元, 处在盈亏安全红线边缘。

优化后, 各项考核分数大幅降低, 且凭借着 AGC 综合性能指标 K_p 提高至 0.935 的显著提升, 以及 81.2% 的一次调频月度平均动作合格率, 机组补偿分数有效提升。

在机组运行状况和网调指令均无重大变化的前提下, 对比优化前后的数据可知: 在引入优化前, 该电厂 AGC 与一次调频综合净收益共计 -614.68 分; 优化后, 净收益上升至 427.10 分, 有效印证了本文所提火电机组 AGC 与一次调频协同控制方案的优化效果。

5 结论

新型电力系统中新能源高频扰动对机组调节能力提出了严峻挑战, 为应对此问题, 本文以 AGC 与一次调频的协同优化为目标, 立足于 1 000 MW 超超临界机组深层的非线性热力学机理, 紧扣“两个细则”的考核规则, 提出了一套涵盖物理降阶建模、信号前馈状态观测器设计与底层逻辑控制矩阵协同重塑的系统性优化解决方案。具体结论如下:

模型结构轻量化与状态重构技术落地: 本文构建的三阶仿射非线性动态机理控制模型预测误差仅 3.15%, 兼顾了效率与物理保真度; 引入频域互补滤波与逆向反演技术, 有效剥离克服了系统非因果求逆发散隐患, 提前捕捉气室容积相移与制粉迟延, 为系统提供了无迟滞的前馈基准, 抑制了负荷

低频振荡。

底层控制逻辑的协同解耦: 深度对接“两个细则”, 在 DCS 底层重构了机炉协同优化控制矩阵。实施深调区间主动提压蓄能、小频差变增益补偿、AGC 微阶梯分解及交叉闭锁机制, 从根源上缓解了 AGC 与一次调频之间的能量博弈矛盾, 在确保机组运行安全边界的前提下强化了控制响应的敏捷性。

策略应用的高转化效益: 实机长期闭环投运的量化考核数据表明, 机组各项调频指标均取得了质的进步, 一次调频合格率跃升至 81.2%, AGC 综合指标 K_p 提升至 0.935。本方案以零硬件投资的轻量化算法升级, 实现了机组对电网的安全支撑能力显著提高, 为火电深度参与辅助服务市场的降本增效路径提供了技术范式。

[参考文献]

- [1] 蒋健. 新能源大规模并网背景下火电机组一次调频技术综述及展望[J]. 锅炉技术, 2024, 55(6): 37.
Jiang J. Overview and prospect of primary frequency modulation technology for thermal power units in the context of large-scale grid connection of renewable energy[J]. Boiler Technology, 2024, 55(6): 37.
- [2] 徐子韬, 王志昊, 张宁, 等. 面向多时间尺度的新型电力系统电力电量平衡方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(2): 15.
Xu Z T, Wang Z H, Zhang N, et al. Research on power quantity balance method of new power systems considering different time scales[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(2): 15.
- [3] 任晓辰. 火电机组一次调频和 AGC 原因与优化分析[J]. 集成电路应用, 2021, 38(3): 116.
Ren X C. Analysis of primary frequency regulation optimization and AGC cause for thermal power units[J]. Application of IC, 2021, 38(3): 116.
- [4] 高贺. 600MW 燃煤机组灵活变负荷控制策略研究[J]. 东北电力技术, 2025, 46(3): 17.
GAO H. Research on flexible load variation control strategy for 600MW coal-fired power unit[J]. Northeast Electric Power Technology, 2025, 46(3): 17.
- [5] 傅彬. 火电机组深度调峰控制策略优化[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2025, 30(2): 75.
Fu B. Optimization of deep peak regulation control strategies for thermal power units[J]. Journal of Anhui Electrical Engineering Professional Technique College, 2025, 30(2): 75.
- [6] 李志军, 沙千理, 严新荣, 等. 数据驱动的火电机组二次调频特性建模方法[J]. 浙江电力, 2025, 44(1): 15.
Li Z J, Sha Q L, Yan X R, et al. A data-driven modeling method for secondary frequency regulation characteristic of thermal power units[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(1): 15.
- [7] 章晓彤, 侯鑫. 基于“两个细则”下火力发电厂的 AGC 与一次调频优化[J]. 上海节能, 2024(8): 1357.
Zhang X T, Hou X. AGC and primary frequency modulation optimization of thermal power plants based on the "two detailed rules"[J]. Shanghai Energy Saving, 2024(8): 1357.
- [8] 全晓东, 顾永红, 黄诚毅, 等. 基于模糊 PID 的电力系统二次调频控制策略[J]. 农村电气化, 2025(6): 12.

- Quan X D, Gu Y H, Huang C Y, et al. Secondary frequency regulation control strategy for power system based on fuzzy PID[J]. Rural Electrification, 2025(6): 12.
- [9] 潘国传, 王保富, 龚苏平, 等. 330MW 供热机组 AGC 和一次调频控制策略分析及优化[J]. 中国设备工程, 2023(24): 135.
- Pan G C, Wang B F, Gong S P, et al. Analysis and optimization of AGC and primary frequency regulation control strategy for 330MW heating units[J]. China Plant Engineering, 2023(24): 135.
- [10] 张斌. 1000MW 超超临界火电机组一次调频控制与优化[J]. 应用能源技术, 2023(9): 34.
- ZHANG B. Primary frequency regulation control and optimization of 1000MW ultra-supercritical thermal power unit[J]. Applied Energy Technology, 2023(9): 34.
- [11] 孙晓亮, 韩增涛, 汪浩然, 等. 浅谈一次调频系统在电力系统中的作用与未来的发展趋势[J]. 电子元器件与信息技术, 2023, 7(6): 90.
- Sun X L, Han Z T, Wang H R, et al. The role and future development trend of primary frequency regulation system in power system[J]. Electronic Component and Information Technology, 2023, 7(6): 90.
- [12] 樊志明. 火电机组一次调频和二次调频优化研究[J]. 自动化应用, 2022(11): 142.
- Fan Z M. Study on optimization of primary frequency modulation and secondary frequency modulation of thermal power units[J]. Automation Application, 2022(11): 142.
- [13] 袁春峰, 刘锴慧, 张帆, 等. 火电机组一次调频技术研究进展综述[J]. 南方能源建设, 2022, 9(3): 1.
- Yuan C F, Liu K H, Zhang F, et al. Review on the research progress of primary frequency modulation technology for thermal power units[J]. Southern Energy Construction, 2022, 9(3): 1.
- [14] 韩英昆, 刘卫明, 杨朋威, 等. 火电机组 AGC-R 模式下一次调频负荷振荡发散典型问题分析处理[J]. 电站系统工程, 2018, 34(2): 64.
- Han Y K, Liu W M, Yang P W, et al. Analysis of typical problem of primary frequency regulation load oscillation in AGC-R mode of thermal power generation unit[J]. Power System Engineering, 2018, 34(2): 64.
- [15] 王浩然, 刘怀照, 沈志广, 等. 辅助火电机组调频的储能控制技术应用及实践[J]. 电器与能效管理技术, 2025(4): 71.
- Wang H R, Liu H Z, Shen Z G, et al. Application and practice of energy storage control technology for assisting thermal unit frequency regulation[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2025(4): 71.
- [16] 顾庆雯, 周勇, 李春峰. 火电机组 AGC 调频性能指标参数研究[J]. 电气技术与经济, 2024(12): 7.
- Gu Q W, Zhou Y, Li C F. Research on parameters of AGC frequency regulation performance indicators of thermal power units[J]. Electrical Equipment and Economy, 2024(12): 7.
- [17] 何林轩, 李文艳. 飞轮储能辅助火电机组一次调频过程仿真分析[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(5): 1679.
- He L X, Li W Y. Simulation of the primary frequency modulation process of thermal power units with the auxiliary of flywheel energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1679.
- [18] 谢志佳, 王佳蕊, 李德鑫, 等. 储能系统参与电力系统调频经济性评估研究[J]. 电器与能效管理技术, 2020(5): 14.
- Xie Z J, Wang J R, Li D X, et al. Economy evaluation of energy storage system participating in power system frequency modulation[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(5): 14.
- [19] 赵永亮, 张利, 刘明, 等. 660MW 燃煤机组热力系统构型调整对一次调频性能的影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 3587.
- Zhao Y L, Zhang L, Liu M, et al. Effects of regulating thermal system configuration for 660MW coal-fired power units on the performance of primary frequency control[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3587.
- [20] 梁银林, 张小波, 翟璇. 数据驱动的汽轮机健康状态管理技术综述[J]. 浙江电力, 2021, 40(4): 120.
- Liang Y L, Zhang X B, Zhai X. A review of data-driven health management technology of steam turbine[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(4): 120.
- [21] 张彪, 岳良, 李鲁. 燃煤机组宽负荷运行一次调频精准控制的仿真研究[J]. 湖北电力, 2021, 45(3): 110.
- Zhang B, Yue L, Li L. Precise control of PFM for coal-fired units with wide load operation[J]. Hubei Electric Power, 2021, 45(3): 110.
- [22] 凌晨. 超超临界二次再热机组一次调频性能优化[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- Ling C. Primary frequency control performance optimization for ultra-supercritical double-reheat unit[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [23] 王小龙. 浅谈大朝山电站一次调频与 AGC 协同控制参数优化方法[J]. 中国设备工程, 2023(17): 137.
- Wang X L. Optimization method of parameters for primary frequency regulation and AGC coordinated control in Dachaoshan hydropower station[J]. China Plant Engineering, 2023(17): 137.
- [24] 宋少群, 熊嘉丽, 张伟骏, 等. 电化学储能参与调频市场的贡献评估方法[J]. 中国电力, 2023, 56(1): 87.
- Song S Q, Xiong J L, Zhang W J, et al. A method to evaluate the contribution of electrochemical energy storage participating in frequency regulation market[J]. Electric Power, 2023, 56(1): 87.
- [25] 蔡卫江, 杨小龙, 汤德海, 等. 阳江 400MW 特大型抽水蓄能机组调速系统设计及现场试验[J]. 水电与抽水蓄能, 2023, 9(4): 76.
- Cai W J, Yang X L, Tang D H, et al. Design and test of speed governing system for Yangjiang 400MW super-large pumped storage units[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2023, 9(4): 76.

(责任编辑 李园)