

联合循环供热机组自启停 (APS) 过程中的 负荷频率协调优化控制

徐韩昭¹, 王展良¹, 冯 键¹, 高 鑫¹, 邓 杰¹, 龙卓羽¹, 王荣华^{2*}

(1. 广东惠州天然气发电有限公司, 广东 惠州 516082;

2. 南方电网电力科技股份有限公司, 广东 广州 510062)

摘要: 基于联合循环供热机组自启停 (APS) 过程, 针对单一前馈环节导致频率控制误差大的问题, 提出一种负荷频率协调优化控制方法。通过提取 APS 与 DEH 接口信号, 解析功率与频率实际值、给定值及一次调频控制量的关联, 构建含负荷频率指令运算 SAMA 图的目标函数。进一步划分调频控制边界, 优化求取前馈与反馈环节的最优传递函数, 输出边界前馈协调指令, 从而实现负荷频率的协调优化控制。优化后控制相对误差稳定在 -0.02% ~ 0.03% 之间。该方法有效提升了供热机组负荷频率控制精度与运行稳定性。

关键词: 联合循环供热机组自启停 (APS) 过程; 负荷频率; 调频控制量

中图分类号: TM712

文章编号: 1000-0682(2026)04-0110-06

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.04.019

Coordinated optimization control of load frequency during automatic start stop (APS) process of combined cycle heating unit

XU Hanzhao¹, WANG Zhanliang¹, FENG Jian¹, GAO Xin¹, DENG Jie¹, LONG Zhuoyu¹, WANG Ronghua^{2*}

(1. Guangdong Huizhou Lng Power Co., Ltd., Guangdong Huizhou 516082, China;

2. China Southern Power Grid Technology Co., Ltd., Guangdong Guangzhou 510062, China)

Abstract: Based on the automatic start - stop (APS) process of combined cycle heating units, a load frequency coordinated optimization control method is proposed to address the problem of large frequency control errors caused by a single feedforward link. By extracting APS and DEH interface signals, analyzing the correlation between power and frequency actual values, given values, and primary frequency modulation control variables, the objective function of the SAMA graph with load frequency command operation is constructed. Further divide the frequency modulation control boundary, optimize the optimal transfer function of the feedforward and feedback links, and output boundary feedforward coordination instructions to achieve coordinated optimization control of load frequency. After optimization, the relative error of the control remains stable between -0.02% and 0.03% . This method effectively improves the accuracy of load frequency control and operational stability of heating units.

Keywords: automatic start stop (APS) process of combined cycle heating unit; load frequency; methods

0 引言

联合循环供热机组是一种高效的动力生产系

统, 将燃气轮机循环与蒸汽轮机循环结合, 实现高效发电^[1]。供热机组负荷频率是机组实际输出负荷与额定负荷之间的变化关系以及这种变化与电网频

收稿日期: 2026-05-08

第一作者: 徐韩昭 (1982—), 男, 天津宝坻人, 汉族, 硕士, 工程师, 主要从事燃机发电技术, 热工控制相关技术研究。

通信作者: 王荣华 (1984—), 男, 湖南衡阳人, 汉族, 硕士学位, 中级工程师职称, 主要从事人工智能技术方向工作。

E-mail: WANGRonghua0502@163.com。

加性,当 $G_1(s)$ 始终满足输入为 $u_s = u_1 + u_2$, 输出为 $y_s = y_1 + y_2$ 的条件时,控制后的负荷频率在 $H_{j,\min}^h \sim H_{j,\max}^h$ 的控制区间内,能够满足负荷频率协调优化需求^[15]。当 $G_1(s) \neq G_2(s)$ 时, $u_2(t) = 0, t \rightarrow \infty, G_2(s)$ 为线性函数,输出 $y_2(t) = 0, t \rightarrow \infty$ 。当 $G_1(s)$ 始终满足输入为 $u_s = u_1$, 输出 $y_s = y_1$ 的条件时,控制后的负荷频率在 $H_{j,\min}^h \sim H_{j,\max}^h$ 的控制区间内,能够满足负荷频率协调优化需求,从而实现负荷频率的精准控制。

2 实验分析

在实验中,采用电厂联合循环供热机组控制 DCS 系统,运行设计的联合循环供热机组自启停 (APS) 过程中的负荷频率协调优化控制方法,通过负荷频率控制、变化控制、相对误差控制,验证该文方法的有效性。

2.1 获取实验数据

在电厂联合循环供热机组控制 DCS 系统中,采用控制箱、阀门等元件,获取供热机组自启停状态的控制信号,供热机组实验场景如图 3 所示。

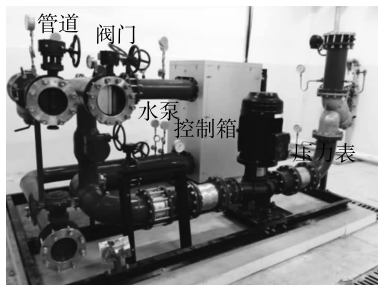


图 3 供热机组实验场景图

如图 3 所示,在供热机组实验场景中,选用 Gas turbine 模块,连接 VTU GT - library 数据库,设计联合循环供热机组的主要参数,如表 2 所示。

表 2 联合循环主要设计参数表

类别	参数	类别	参数
燃机透平初温/℃	1124	燃烧室压损/%	3.5
压气机压比	12.75	燃机排气压损/%	1.32
压气机标准流量/(kg/s)	421	机械损失/%	1
燃机透平排气温度/℃	544.7	发电机损失/%	1
燃气轮机出功/MW	132	燃烧室热损失/%	0.5
联合循环出功/MW	201	转速/(r/min)	3000
燃气轮机效率/%	33.89	高压蒸汽压力/MPa	6.1
联合循环效率/%	57.58	高压蒸汽温度/℃	521
压气机进气压损/%	0.61	蒸汽轮机出力/MW	68

如表 2 所示,联合循环供热机组的发电负荷为

193.2 MW,在 APS 自启停条件下,分析负荷频率的控制效果。

2.2 联合循环供热机组负荷频率控制分析

将联合循环供热机组自启停 APS 过程中,分为冷态、温态、热态、极热态等启停状态。不同状态下的机组负荷频率控制结果,如图 4 所示。

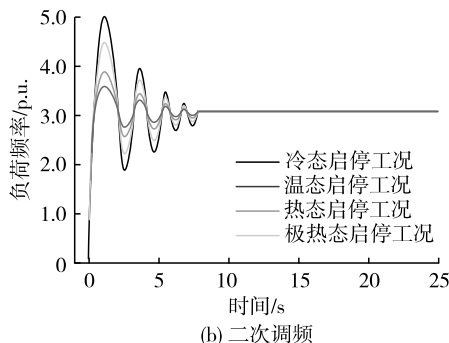
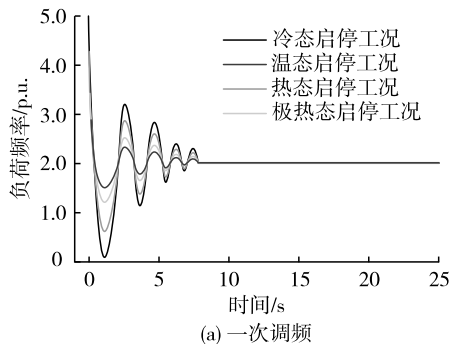
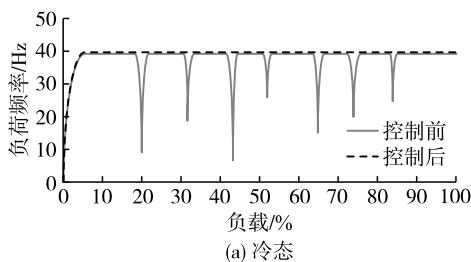


图 4 联合循环供热机组负荷频率控制结果图

如图 4 所示,在一次调频与二次调频的协同作用下,联合循环供热机组在冷态、温态、热态及极热态等不同启停工况下,其负荷频率响应均表现出良好的收敛特性。具体而言,各工况下的负荷及频率在控制系统投入后约 10 s 内迅速趋于稳定,波动幅度显著减小,未出现明显的超调或振荡现象。这表明,该文所设计的负荷频率协调优化控制方法能够适应机组在不同启停状态下的动态特性变化,具备快速响应与平稳调节能力,负荷频率协调控制效果良好。

2.3 负荷频率变化协调优化控制分析

采用前馈 + 反馈控制的方式,将系统负荷稳定在 193.2 MW 左右,分析冷态、温态、热态条件的负荷频率变化控制情况,如图 5 所示。



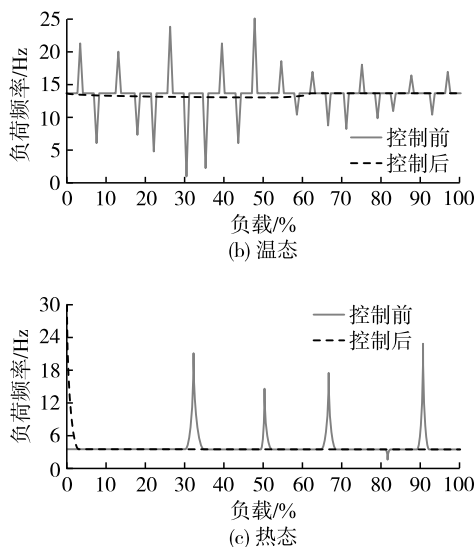


图5 负荷频率协调优化控制结果图

如图5所示,其中子图(a)(b)(c)分别对应冷态、温态、热态三种典型启停工况下的负荷频率变化曲线。在未施加该文控制方法之前,各工况下的负荷频率均存在明显的异常波动,表现为幅值起伏较大、波动频繁且无规律,严重影响了供热机组的运行稳定性与输出电能质量。而在引入该文所设计的负荷频率协调优化控制方法之后,上述三种工况下的负荷频率曲线均呈现出良好的收敛特性,波动幅度显著减小,频率在较短时间内趋于设定值附近并保持平稳状态。这一对比结果表明,该文方法能够有效抑制不同启停工况下的负荷频率波动,满足联合循环供热机组在自启停过程中对负荷频率协调优化的控制需求。

2.4 负荷频率协调优化控制误差分析

采用燃机相对出功、排气温度、排气流量、功率、余热锅炉负荷、蒸汽轮机出力等指标,分析不同自启停工况的热力性能,如表3所示。

表3 自启停工况热力性能表

名称	冷态	温态	热态	极热态
燃机相对出功/%	100	90	80	60
燃机排气温度/℃	542.47	559.44	554.17	593.00
燃机排气流量/(t/h)	1526.40	1345.47	1329.54	1007.65
燃机功率/MW	132.99	118.01	117.25	70.76
余热锅炉热负荷/MW	195.03	181.11	178.05	148.44
蒸汽轮机出力/MW	63.51	60.24	57.87	46.98

如表3所示,在热力性能参数已知的条件下,对负荷频率协调优化控制误差进行分析,如图6所示。

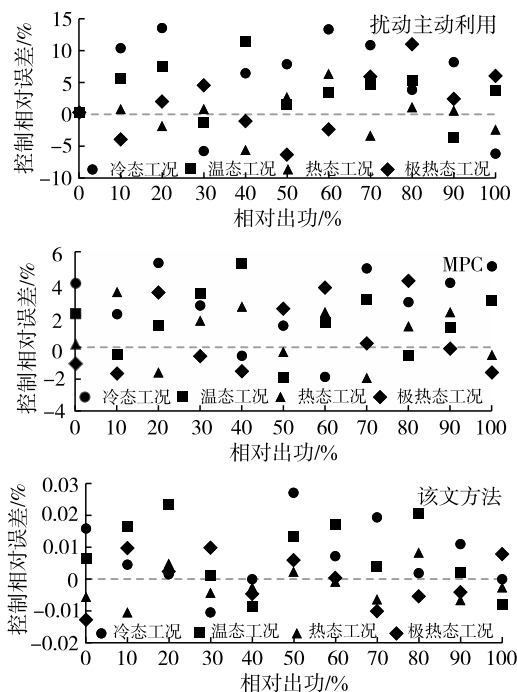


图6 负荷频率协调优化控制误差结果图

如图6所示,采用前馈控制,根据预先设定的负荷-频率特性,检测到电网调度的负荷需求变化信号时,立即向供热机组发出控制指令,快速调整机组的出力,使机组能够更迅速地跟踪负荷变化,减少频率偏差。在控制结果中,控制相对误差在 -0.02% ~ 0.03% 的范围内变化,能够满足负荷频率协调优化控制需求。由此可见,使用该文设计的方法,通过合理设计前馈控制策略,结合反馈控制,改善整个负荷频率协调优化控制过程的性能,对于供热机组的稳定运行具有重要作用。

3 结束语

针对联合循环供热机组在自启停(APS)过程中因单一前馈环节导致负荷频率控制指令响应不足、相对误差偏大的问题,提出了一种基于前馈-反馈协调优化的负荷频率控制方法。该方法通过提取APS与DEH接口信号,确定一次调频控制量,结合SAMA图构建目标函数并划分调频控制边界,进而求解前馈与反馈环节的最优传递函数,生成APS边界协调控制指令。实验结果表明,在冷态、温态、热态及极热态等多种启停工况下,该方法能够在10 s内使负荷频率趋于稳定,控制相对误差保持在 -0.02% ~ 0.03% 之间,有效抑制了负荷频率的异常波动。该文方法为实现联合循环供热机组在自启停过程中的安全、稳定、高效运行提供了可靠的技术支撑。

参考文献:

- [1] 贺继盛,段维伊,肖 晶,等. V2G 模式下电动汽车充电负荷频率响应控制研究[J]. 电子设计工程,2026,34(2):150-153+158.
 - [2] 孙阳,孟懿帆,赵顺毅,等. 基于扰动主动利用的孤岛微电网双模模型预测负荷频率控制[J]. 动力工程学报,2025,45(12):2180-2188+2218.
 - [3] 汪沛,袁方,余意,等. 基于 MPC 的风电接入下电力系统负荷频率控制[J]. 武汉大学学报(工学版),2025,58(12):1927-1936.
 - [4] 张艳,符家骐. 基于 IDE 算法的互联电力系统负荷频率控制[J]. 武汉大学学报(工学版),2025,58(08):1266-1274.
 - [5] 满林坤,吴珂鸣,迟成,等. 计及储能随机接入退出行为的互联电网自适应负荷频率控制策略[J]. 中国电力,2025,58(09):164-174.
 - [6] 李英,王金平,刁怀佳,等. 基于正余弦优化算法的两区域多电源互联电力系统负荷频率控制[J]. 热能动力工程,2025,40(05):141-149.
 - [7] 刘冠宇,刘永慧. 非周期 DoS 攻击下多区域互联电力系统的负荷频率控制[J]. 电力科学与技术学报,2025,40(06):23-31.
 - [8] 王喜军,王伟,李寅松,等. 考虑源-荷-储可调度资源的新能源配电网负荷频率控制策略[J]. 可再生能源,2025,43(11):1537-1546.
 - [9] 翟正亮,严怀成,陈世明,等. 时变时滞电力系统负荷频率控制的稳定性分析[J]. 控制理论与应用,2026,43(03):501-508.
 - [10] 邹玉意,陈勇,刘越智,等. 基于 Q 学习的源荷扰动下交直流微电网负荷频率控制方法[J]. 西南大学学报(自然科学版),2025,47(05):188-198.
 - [11] 赵晶晶,王涵,杨斐翔,等. 基于数据驱动的时滞非线性电力系统负荷频率控制[J]. 电力自动化设备,2025,45(10):210-216.
 - [12] 吴向权,骆应东. 基于 RL-MPC 算法的含风电互联电网负荷频率控制研究[J]. 水利水电技术(中英文),2025,56(S1):921-927.
 - [13] 张磊光,陈海涛,吴赋章,等. 基于可学习模型预测控制的含风电多微网频率控制方法[J]. 智慧电力,2024,52(10):49-55+87.
 - [14] 张岩,卜旭辉,陈宗遥. 控制器动态线性化互联电力系统数据驱动负荷频率控制[J]. 控制理论与应用,2025,42(09):1818-1826.
 - [15] 刘宝伟,邹宽胜,张兆军,等. 基于混沌自适应正余弦算法的负荷频率自抗扰控制[J]. 现代电子技术,2024,47(24):97-104.

(上接第 109 页)

5.2 展望

以黑体测温获取的正压温度大数据为基础,优化热风炉正压自适应智能燃烧控制模型,实现空燃比自动优化、换炉时机精准判断,进一步提高风温、降低煤气消耗。同时将该技术推广应用至高炉本体、正压焦炉、热风管道等正压气密高温设备,推动炼铁工序全流程正压工况智能化测温与安全绿色升级。

参考文献:

- [1] 董万鹏. 高炉风口回旋区热态模拟装置图像监测及测温研究[D]. 重庆:重庆大学,2023.
 - [2] 孙晓曦,高敏,余鹏举,等. 工业用接触式测温技术综述[J]. 电子世界,2021(23):23-24.
 - [3] 陈伟孟,苏明义. 黑体测温仪与黑体辐射定律[J]. 物理教师,2021,42(04):72-73+82.
 - [4] 韩昌林,郭金朋,陆洲. 非接触式智能测温研究[J]. 电
 - 2025,25(07):2504-2512.
 - [9] 郑建忠,刘用权,陈克武. 黑体空腔式钢水连续测温系统的校验[J]. 中国仪器仪表,2025(03):32-36.
 - [10] 魏晓伟. 热风炉红外测温监测系统的应用[J]. 设备管理与维修,2021(15):144-146.

脑知识与技术,2024,20(13):124-126+131.

- [5] 王成亮,李嘉伟,王晓晖,等. 辐射加热环境下的非接触测温误差评价技术[J]. 强度与环境,2026,53(01): 25-31.
- [6] 李哲龙,焦炉燃烧室自动测温系统 V1.0. 湖南省,湖南瑞菱科技有限公司,2022-05-06.
- [7] 付攀文,林光辉,孟皓,等. 基于黑体的测温技术在热回收焦炉中的应用[J]. 工业仪表与自动化装置,2025(06):102-105.
- [8] 周杰,孟梓樵,蔡宇武,等. 红外测温技术在不同防火门耐火性能中的动态测温研究[J]. 安全与环境学报,2025,25(07):2504-2512.
- [9] 郑建忠,刘用权,陈克武. 黑体空腔式钢水连续测温系统的校验[J]. 中国仪器仪表,2025(03):32-36.
- [10] 魏晓伟. 热风炉红外测温监测系统的应用[J]. 设备管理与维修,2021(15):144-146.