

DOI: 10.19666/j.rlfed.202308137

辅助燃煤机组 AGC 调节的熔盐电加热器 动态性能研究

马汀山^{1,2}, 张国龙^{2,3}, 居文平^{1,2}, 常东锋^{1,2}, 王伟^{2,3},

崔青^{1,2}, 张建元^{2,3}, 耿如意^{2,3}, 兀鹏越²

(1. 高效灵活煤电及碳捕集利用封存全国重点实验室, 北京 102209;

2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

3. 西安西热节能技术有限公司, 陕西 西安 710054)

[摘要] 燃煤机组耦合熔盐电加热器系统可大幅提升其调频调峰能力。基于 Modelica 语言建立了熔盐电加热器的动态模型并完成了试验验证, 揭示了熔盐电加热器在熔盐流量扰动和机组自动发电控制 (AGC) 负荷扰动下的动态特性。基于其动态特性提出了“前馈+PID”调节的温度控制方法, 计算分析了熔盐电加热器辅助燃煤机组 AGC 调节时的电负荷变化特性和热力参数变化特性。研究结果表明, 配置 10 MW 熔盐电加热器可使 660 MW 燃煤机组 AGC 变负荷速率提升 340%, 且所提控制方法能够维持电加热器热力参数的稳定。

[关键词] 燃煤机组; 熔盐储热; 电加热器; 动态特性; AGC 调节

[引用本文格式] 马汀山, 张国龙, 居文平, 等. 辅助燃煤机组 AGC 调节的熔盐电加热器动态性能研究[J]. 热力发电, 2024, 53(4): 84-91. MA Tingshan, ZHANG Guolong, JU Wenping, et al. Dynamic performance of molten salt electric heater with AGC regulation for auxiliary coal-fired units[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(4): 84-91.

Dynamic performance of molten salt electric heater with AGC regulation for auxiliary coal-fired units

MA Tingshan^{1,2}, ZHANG Guolong^{2,3}, JU Wenping^{1,2}, CHANG Dongfeng^{1,2}, WANG Wei^{2,3},
LUO Qing^{1,2}, ZHANG Jianyuan^{2,3}, GENG Ruyi^{2,3}, WU Pengyue²

(1. State Key Laboratory of High-Efficiency Flexible Coal Power Generation and Carbon Capture Utilization and Storage, Beijing 102209, China;

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

3. Xi'an TPRI Energy Conservation Technology Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: The coupling of coal-fired units with molten salt electric heater systems can significantly improve their frequency regulation and peak shaving capabilities. On the basis of Modelica language, a dynamic model of the molten salt electric heater is established and the experimental verification is completed, it reveals the dynamic characteristics of the molten salt electric heater under the disturbance of molten salt flow rate and unit AGC load. A temperature control method of “feedforward+PID” regulation is proposed based on its dynamic characteristics, and the characteristics of electrical load and thermal parameter changes during AGC regulation of coal-fired units assisted by molten salt electric heaters are calculated and analyzed. The results indicate that, configuring a 10 MW molten salt electric heater can increase the AGC variable load rate of a 660 MW coal-fired unit by 340%, and the proposed control method can maintain the stability of thermal parameters of the electric heater.

Key words: coal-fired unit; molten salt heat storage; electric heater; dynamic characteristics; AGC regulation

随着可再生能源大规模接入电网, 其随机性强、波动性大的特点也给电网稳定带来极大挑战。

收稿日期: 2023-08-23

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (2023-LL-QY-27)

Supported by: Key Research and Development Program of Shaanxi Province (2023-LL-QY-27)

第一作者简介: 马汀山 (1982), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为汽轮机、供热、储热技术研发与应用, matingshan@tpri.com.cn.

在我国富煤贫油少气的能源背景下,燃煤机组在未来一段时间仍是我国电力供应的最主要电源,其角色也将由传统的提供电力、电量的主体电源,逐步向电力、电量调节型电源转变^[1]。然而,从煤粉研磨到煤粉燃烧,再到水气化吸热的大延迟,严重限制了燃煤机组灵活运行能力^[2-3]。因此,燃煤机组快速响应负荷的能力亟待提高。

由于电池储能和飞轮储能具有响应速度快、精度高、控制灵活等优势,常被用于辅助燃煤机组调频。何林轩等^[4]验证了燃煤机组配置飞轮储能可有效减少电力系统频率偏差变化量。2023年4月广东台山电厂投资建设的60 MW/60 MW·h 电化学储能正式投入生产运营,期间发电机组 AGC 调节水平得到有效提升^[5]。尽管电储能技术输出精准、响应时间短,但因成本较高、容量小仍应用受限。

熔盐储热近些年应用广泛,在光热发电、火电灵活性改造、用户侧储热供热等场景下,市场需求显著扩大^[6-8]。Drost 等人^[9]在1990年第一个提出了利用熔盐储热辅助燃煤机组深度调峰方案。Cao 等人^[10]设计了利用电加热熔盐的储热方式,进一步提高了熔盐储热系统耦合燃煤机组的系统灵活性。西安热工研究院有限公司承担的“与煤电耦合的熔盐储热调频调峰及安全供汽技术示范工程项目”是熔盐储热在国内乃至整个世界首次大规模工程应用于火电行业,项目投运后机组深度调峰、调频、安全供汽能力得到大幅提升^[11]。

燃煤机组和熔盐储热系统耦合方式众多,其中借助于采用熔盐电加热器加热熔盐的储能过程,不仅能实现大规模储能辅助燃煤机组深度调峰,而且在储能过程中其精准、快速、可控的功率响应能力也可以辅助燃煤机组自动发电控制(AGC)调节^[12]。简单来说,在电加热器稳定运行过程中,当电网需要降低负荷时,熔盐电加热器快速升高负荷,使机组上网功率降低;反之,当电网需要升高负荷时,熔盐电加热器快速甩掉负荷,使机组上网功率升高。但是,对熔盐电加热器来说,电气设备的快速性与热工设备的热惰性存在矛盾,如何保证其在快速变工况条件下的稳定运行成为问题的关键。

熔盐储热可应用于辅助高参数供汽机组的热电解耦,储能过程中利用电加热熔盐储存热量,辅助机组深度调峰,放热过程中高温熔盐加热除氧水产生蒸汽,补充机组供汽不足。本文将重点关注电热熔盐储能与燃煤机组耦合系统中的储能过程。先

建立了熔盐电加热器动态模型,揭示了其在电负荷扰动和熔盐流量扰动下的动态特性,并基于其动态性能提出了“前馈+PID”调节的控制方法;再计算分析了熔盐电加热器辅助燃煤机组 AGC 调节时的负荷变化特性和热力参数变化特性,验证了本文所提控制方法的有效性。

1 动态建模

1.1 电加热器结构

典型熔盐电加热器结构示意图如图1所示,其主要由接线盒、U型电加热管、壳体和支撑板组成(图1a),其中U型电加热管(图1b)从里到外依次是合金电阻丝、填充材料和金属套筒。电加热器内熔盐选用 Hitec 混合硝酸盐(53%硝酸钾+40%亚硝酸钠+7%硝酸钠),其物性参数见文献[13]。

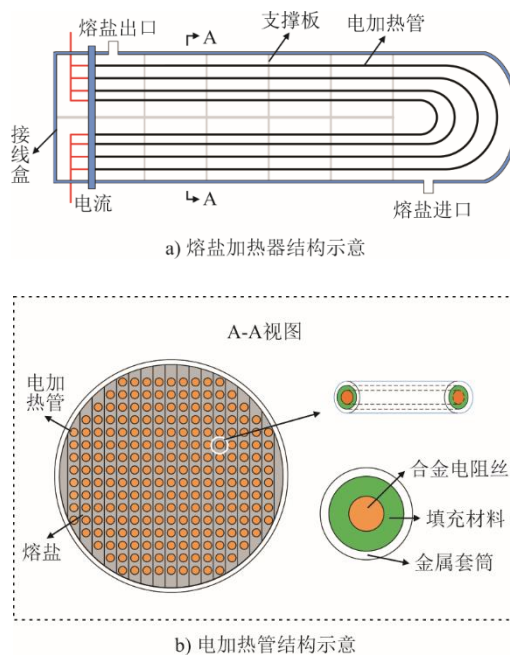


图1 熔盐电加热器结构示意图

Fig.1 Structural diagram of the molten salt electric heater

1.2 动态建模

本文使用 Modelica 语言对熔盐电加热器进行建模,该语言使用微分代数方程(DAE)的非因果模型,基于面向对象的方法、多重继承的可能性和重新声明特性导致了清晰的模型结构,避免了常用代码的重复定义^[14]。

为建立模型做出以下假设:1)忽略电阻丝热阻;2)假设填充材料和金属套筒的热阻分别集中在内外壁上;3)将电流流过电阻丝产生的热量

等效为恒热流密度 (W/m^2); 4) 忽略熔盐在加热器流动中产生的压降。简化后的熔盐电加热器内部热

传递过程如图 2 所示, 基于能量守恒定律对电加热器进行能量分析, 具体情况见表 1。

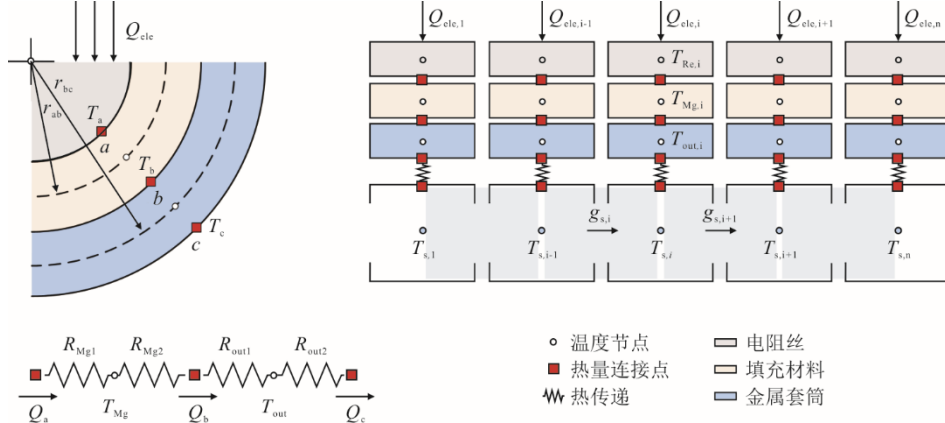


图 2 熔盐电加热器能量传递过程

Fig.2 Energy transfer process of the molten salt electric heater

表 1 熔盐电加热器部分能量传递方程

Tab.1 Partial energy transfer equations for molten salt electric heaters

项目	能量守恒	能量传递	
		内壁	外壁
电阻丝	$\frac{d(C_{Re,i}m_{Re,i}T_{Re,i})}{dt} = Q_{ele,i} - Q_{a,i}$		
填充材料	$\frac{d(C_{Mg,i}m_{Mg,i}T_{Mg,i})}{dt} = Q_{a,i} - Q_{b,i}$	$Q_{a,i} = \frac{T_{a,i} - T_{Mg,i}}{R_{Mg1,i}}$	$Q_{b,i} = \frac{T_{Mg,i} - T_{b,i}}{R_{Mg2,i}}$
金属套筒	$\frac{d(C_{out,i}m_{out,i}T_{out,i})}{dt} = Q_{b,i} - Q_{c,i}$	$Q_{b,i} = \frac{T_{b,i} - T_{out,i}}{R_{out1,i}}$	$Q_{c,i} = \frac{T_{out,i} - T_{c,i}}{R_{out2,i}}$
熔盐	$\frac{d(\rho_{s,i}V_{s,i})}{dt} = g_{s,i} - g_{s,i+1}$ $\frac{d(C_{s,i}m_{s,i}T_{s,i})}{dt} = g_{s,i}h_{s,i} - g_{s,i+1}h_{s,i+1} + Q_{c,i}$		$Q_{c,i} = \alpha_{s,i}A_{out2,i}(T_{c,i} - T_{s,i})$

注: m —质量, kg; C —比热容, $J/(kg \cdot K)$; T —温度, K; Q —单位时间内传递的热量, W; R —径向热阻, K/W ; ρ —密度, kg/m^3 ; V —体积, m^3 ; h —比焓, J/kg ; g —质量流量, kg/s ; α —对流传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; A —面积, m^2 ; Q_{ele} —单位时间电流流过电阻丝产生的热量, W; 下标 i 为离散单元, Re 为电阻丝, Mg 为填充材料, out 为金属套筒, s 为熔盐, Mg1 为填充材料内壁面, Mg2 为填充材料外壁面, out1 为金属套筒内壁面, out2 为金属套筒外壁面, a 为电阻丝和填充材料接触面, b 为填充材料和金属套筒接触面, c 为金属套筒和熔盐接触面。

考虑到本文研究对象的熔盐侧雷诺数介于 400~2 300, 选用以下经验关联式计算努塞特数^[15]:

$$\alpha_s = Nu \cdot \frac{\lambda}{D} = 1.61 \cdot \frac{\lambda}{D} \left(\frac{RePr}{l/D} \right)^{0.63} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0.32} \quad (1)$$

式中: Nu 为努塞特数; Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数; D 为特征长度, m; l 为流动长度, m; μ_f 、 μ_w 分别为熔盐和管壁温度下的熔盐粘度系数, $kg/(m \cdot s)$ 。

2 模型验证与动态特性分析

2.1 模型验证

为验证熔盐电加热器动态模型的有效性, 本文采用江苏省某 40 MW/80 MW·h 电热熔盐储热系统

中熔盐电加热器的试验测量数据进行模型验证, 其具体结构参数见表 2。

表 2 熔盐电加热器结构参数

Tab.2 Structural parameters of the molten salt electric heater

项目	数值	
壳体	直径/mm	988
	长度/m	12
	U 型电加热管根数/根	390
电阻丝	直径/mm	1
	材料	Ni80Cr20
填充材料	直径/mm	3
	材料	氧化镁 22SR
金属套筒	直径/mm	2.75
	材料	S32168

图 3 和图 4 分别展示了当熔盐流量减少 33% 和电负荷减少 40% 时，瞬态过程中熔盐电加热器内部熔盐温度和出口管壁温度的变化趋势。在各参数的变化曲线图中，试验值用实线表示；数值模拟值用短线表示。

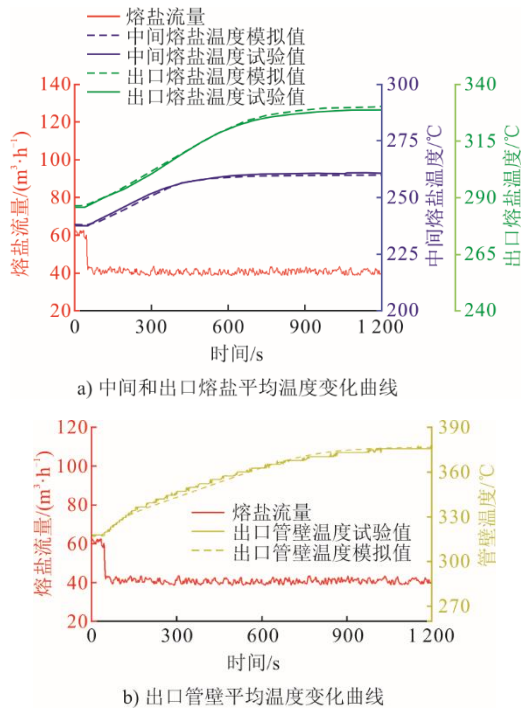


图 3 熔盐流量扰动下内部温度变化曲线
Fig.3 The internal temperature variation curve under molten salt flow disturbance

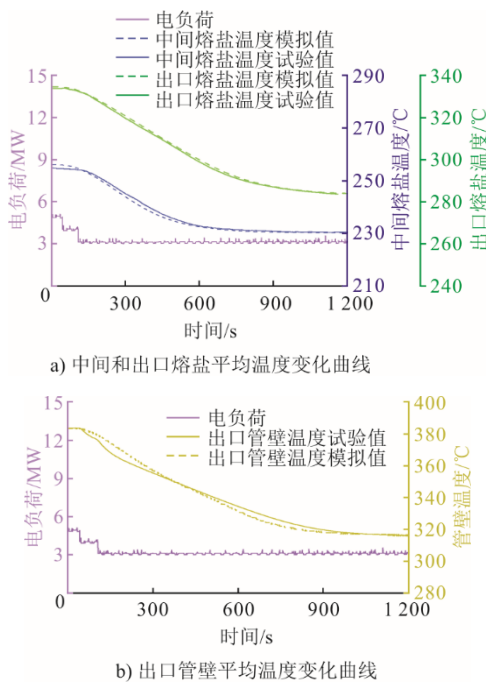


图 4 电负荷扰动下内部温度变化曲线
Fig.4 The internal temperature variation curve under electrical load disturbance

由图 3 和图 4 可知，当扰动发生时，各主要参数的模拟值与试验值变化趋势基本相同，最大相对误差在 3% 以内，能够满足工程应用和研究分析的精度要求。

2.2 阶跃扰动下动态特性分析

由于熔盐电加热器在辅助燃煤机组 AGC 调节时，其电负荷和熔盐流量会频繁快速波动，而阶跃扰动是获得其动态特性的有效手段，故对此进行了计算分析。

以熔盐入口温度 203 °C、出口温度 384 °C、电负荷 5 MW 为设计工况，在第 200 s 时分别进行了电负荷阶跃增加 20% 和熔盐流量阶跃增加 20% 的边界扰动，观察电加热器入口段（距入口 4 m 处）、中间段（距入口 8 m 处）和出口段（距入口 12 m 处）熔盐及管壁平均温度的变化趋势。

2.2.1 电负荷阶跃扰动

图 5 为电负荷阶跃扰动内部温度变化规律。由图 5 可知：由于电加热管热量由内向外传递，所以在电负荷阶跃增加时管壁温度迅速升高，熔盐温度伴随着管壁温度的升高而缓慢升高，但同一位置处熔盐和管壁近乎同时达到稳定状态；在熔盐流动方向上，各位置熔盐温度和管壁温度同时发生变化，但距离入口段越远动态响应时间越长，在扰动发生 1 217 s 后电加热器整体达到稳定状态。

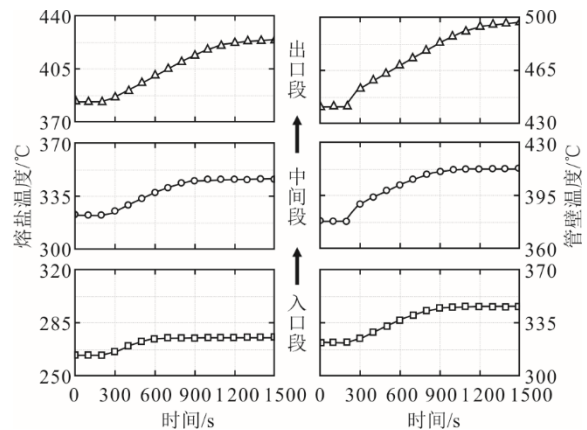


图 5 电负荷阶跃扰动内部温度变化规律
Fig.5 The internal temperature variation law of electrical load step disturbance

2.2.2 熔盐流量阶跃扰动

图 6 为熔盐流量阶跃扰动内部温度变化规律。由图 6 可知：由于熔盐流量增加，熔盐和管壁间对流传热量增加，管壁温度呈现下降趋势；由于传热量增加比例没有熔盐流量增加比例大，熔盐温度也

呈现下降趋势；与电负荷扰动一致，距离入口段越远动态响应时间越长，在扰动发生 1 028 s 后电加热器整体达到稳定状态。

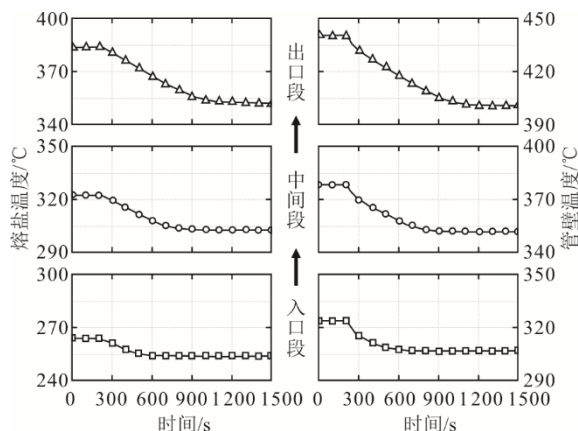


图 6 熔盐流量阶跃扰动内部温度变化规律
Fig.6 The internal temperature variation law of step disturbance of molten salt flow rate

2.3 控制方法制定

从电加热器的动态特性研究中可以看出，加热器出口熔盐温度动态响应时间最长、热惯性最大，因此其参数稳定、不大幅波动是电加热器平稳运行的关键。考虑到其接入燃煤机组辅助 AGC 调节时电负荷将频繁波动，本文以熔盐流量为控制量，并采用前馈+PID 的控制方式，以实现电加热器出口熔盐温度稳定的控制目标，具体如图 7 所示。在稳态工况下，根据式(2)，熔盐进出口热量的变化等于电负荷，熔盐流量与电负荷可通过系数 x 进行匹配，所以选择电负荷作为前馈控制器的导前信号。

$$M = g_s C_s \Delta T_s = x g_s \quad (2)$$

式中： M 为电负荷，MW； ΔT_s 为电加热器进出口熔盐温度差，K； x 为比例系数。

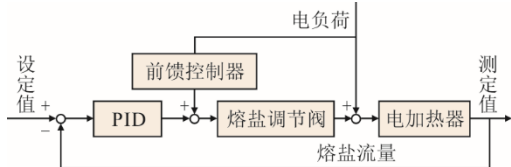


图 7 熔盐电加热器出口熔盐温度控制方法
Fig.7 Method for controlling the temperature of molten salt at the outlet of a molten salt electric heater

3 燃煤机组 AGC 调节工况下动态特性

3.1 耦合方式

熔盐电加热器与燃煤机组的接线方式和调控原理如图 8 所示。电加热器经调功器 (PCS)、变压器接入厂用电母线，通过改变电加热器用电负荷间

接调整了机组的上网功率，进而达到辅助燃煤机组快速 AGC 调节的目的。

与常用的电池储能、飞轮储能调控原理略有不同，熔盐电加热器的功率给定主要包含基础负荷和调频负荷 2 部分。其中，基础负荷由外部给定，不受 AGC 指令变化的影响，而机组需要在 AGC 指令的基础上增加基础负荷的出力，保证上网功率（忽略厂用电）和 AGC 指令一致；调频负荷则按照电网指令和上网功率的偏差来决定出力大小，当 AGC 指令降低时，电加热器快速升高负荷，使得机组上网功率降低，反之，电加热器快速甩掉负荷，使得机组上网功率升高。具体熔盐电加热器指令的计算方法如图 9 所示。

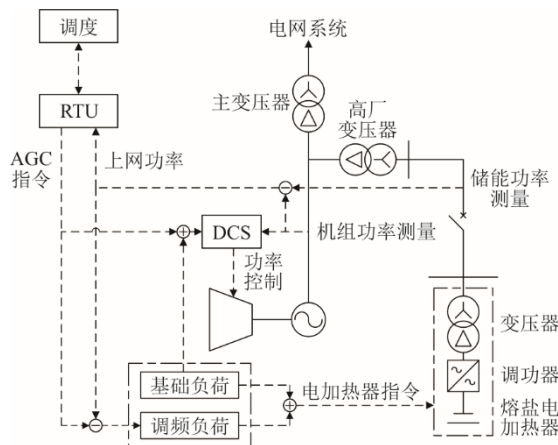


图 8 电加热器和燃煤机组接线方式和调控原理
Fig.8 Wiring method and control principle of the electric heaters and coal-fired units

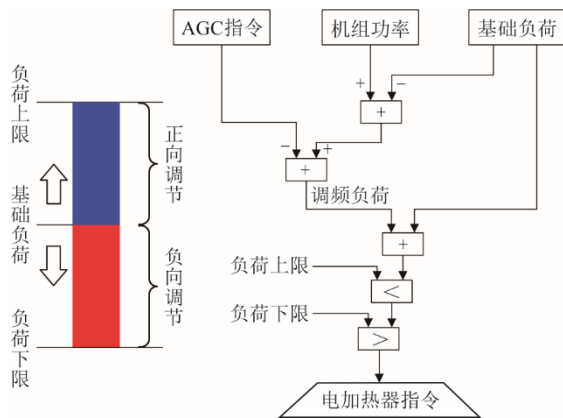


图 9 熔盐电加热器指令计算方法
Fig.9 Calculation method for command of the molten salt electric heater

3.2 案例分析

本文以某超（超）临界 660 MW 机组为计算案例，模拟研究了在配置 10 MW 熔盐电加热器前后机组的负荷变化特性，分析电加热器在辅助调频过

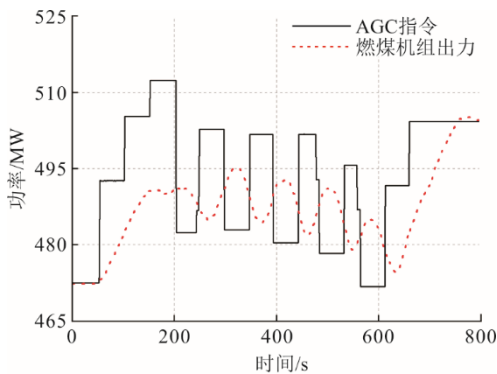
程中关键热力参数的变化趋势。

3.2.1 负荷变化特性

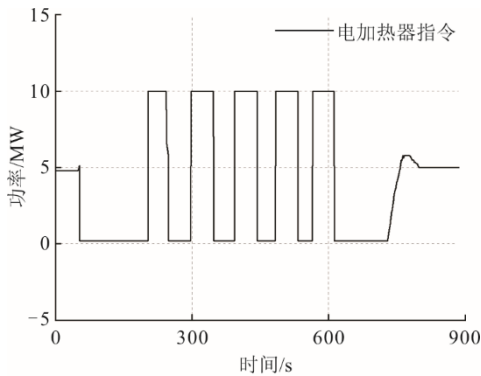
图 10a)为该机组在实际响应 AGC 指令过程中负荷随时间的变化曲线。由图 10a)可以看出,在 800 s 的调节时间里燃煤机组多次出现超调、反调的情况,整体 AGC 性能较差。配置 10 MW 熔盐电加热器之后,采用图 8 中的调控策略,设置 5 MW 为基础负荷,并根据图 9 所描述的计算方法得出了图 10b)所示的熔盐电加热器指令,进而获得了图 10c)所示的机组出力和耦合系统出力随时间的变化曲线。由图 10b)可以看出,基于图 8 的调控策略熔盐电加热器能够根据 AGC 指令和上网功率偏差快速调节出力。同时,由图 10c)可以看出,燃煤机组配置熔盐电加热器后其 AGC 跟随能力得到提高,并一定程度上改善机组超调、反调问题。

进一步对比计算 AGC 调节过程中燃煤机组单独响应时和耦合系统共同响应时的变负荷速率。我国电力行业标准《火力发电厂自动发电控制性能测试验收规程》中定义了燃煤发电机组 AGC 调节时的变负荷速率,计算公式如下^[16]:

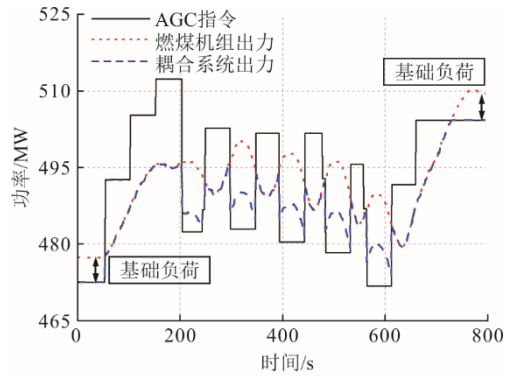
$$v = \frac{M(t_2) - M(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (3)$$



a) 燃煤机组单独响应AGC指令时出力变化曲线



b) 耦合系统响应AGC指令时电加热器指令



c) 耦合系统响应AGC指令时出力变化曲线

图 10 机组单独响应和耦合系统共同响应时负荷变化曲线
Fig.10 The load variation curves when the unit responds separately and the coupled system responds together

式中： v 为变负荷速率， $\%P_e/\text{min}$ ； $M(t)$ 为 t 时刻机组负荷， $\%P_e$ ； t_1 为负荷变化至 AGC 负荷指令目标变化幅度 90% 的时刻， min ； t_2 为负荷变化至 AGC 负荷指令目标变化幅度 10% 的时刻， min 。

根据式(3)计算出在 800 s 的时间内共计 14 次 AGC 指令下机组的变负荷速率,结果如图 11 所示。由图 11 可知:耦合系统的变负荷速率相较于燃煤机组单独调节得到明显提升,且能够满足电网要求的 $1.5\%P_e/\text{min}$;整体来看,燃煤机组配置 10 MW 熔盐电加热器后,AGC 平均变负荷速率从 $0.59\%P_e/\text{min}$ 提升至 $2.01\%P_e/\text{min}$,提升了 340%。同时,从第 1—3 次响应 AGC 指令过程中可以看出,燃煤机组配置熔盐电加热器后更适合连续正反向交叉调节工况,不适合连续单方向调节工况。

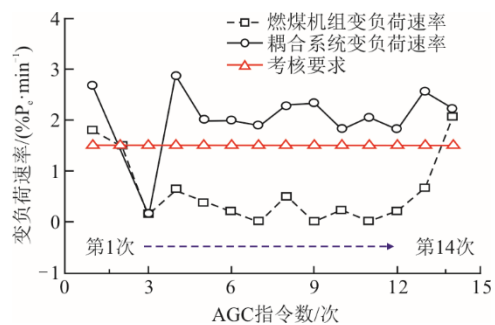


图 11 机组单独响应和耦合系统共同响应时变负荷速率
Fig.11 The time-varying load rate when the unit responds individually and with the coupled system

3.2.2 热力参数变化特性

熔盐电加热器在辅助燃煤机组 AGC 调节过程中,采用图 7 所述的温度控制方法,模拟得出内部熔盐温度与管壁温度的变化趋势如图 12 所示。由图 12 中可以看出:出口熔盐温度的设定值为 $384\text{ }^\circ\text{C}$,前

馈+PID 的控制方式使电加热器出口熔盐温度的变化量被限制在 8 °C 以内, 出口管壁温度的变化量被限制在 40 °C 以内, 能够保证热力参数的稳定, 验证了控制策略的有效性; 同时可以看出, 电加热器入口段、中间段温度变化趋势与出口温度变化趋势基本一致, 但入口段温度波动时间更长, 主要是因为控制器参数是根据出口温度动态特性来指定的。

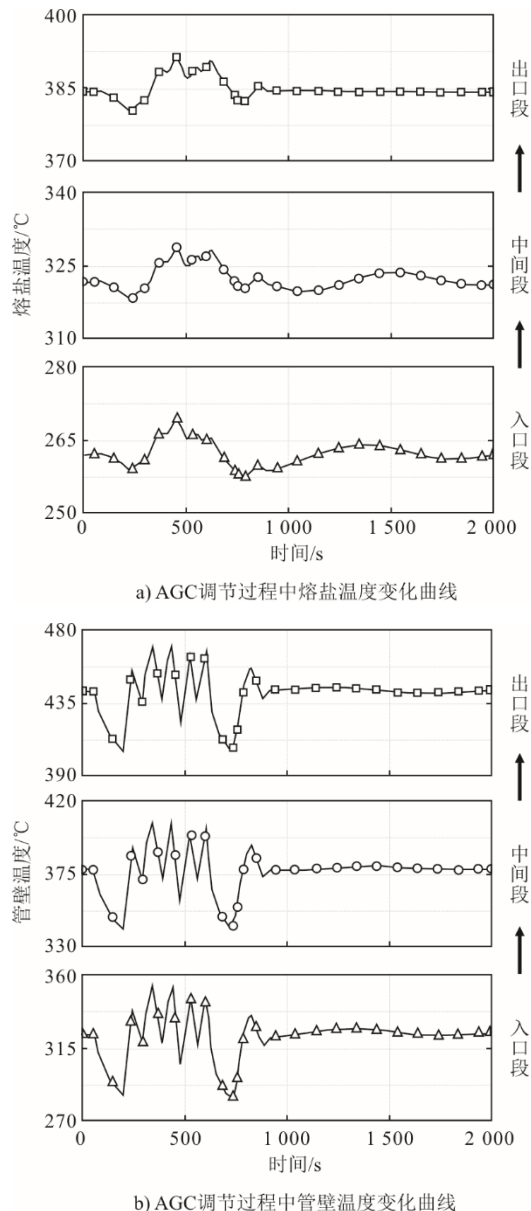


图 12 电加热器响应 AGC 指令过程中内部温度变化趋势
Fig.12 The trends of internal temperature changes during the response of the electric heater to AGC commands

4 结 论

本文建立了熔盐电加热器动态模型并完成了试验验证, 揭示了其在电负荷扰动和熔盐流量扰动下的动态特性, 基于其动态性能提出了“前馈+PID”

调节的控制方法, 并计算分析了电加热器辅助燃煤机组 AGC 调节时的负荷变化特性和热力参数变化特性, 得到以下结论。

1) 采用熔盐电加热器储能方式能够显著提升燃煤机组 AGC 调节性能, 配置 10 MW 熔盐电加热器可使机组 AGC 变负荷速率提升 340%。

2) 采用“电负荷前馈+PID”的控制方法, 使得电加热器出口熔盐温度和管壁温度的变化量分别被限制在 8 °C 和 40 °C 以内, 验证了控制策略的有效性。

[参 考 文 献]

- [1] 帅永, 赵斌, 蒋东方, 等. 中国燃煤高效清洁发电技术现状与展望[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 1-10.
SHUAI Yong, ZHAO Bin, JIANG Dongfang, et al. Status and prospect of coal-fired high efficiency and clean power generation technology in China[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 1-10.
- [2] GUO Y, YU D. The influence of interconnection of electric power system on load characteristic and frequency regulation[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 1(70): 23-29.
- [3] WANG W, LI L, LONG D T, et al. Improved boiler-turbine coordinated control of 1 000 MW power units by introducing condensate throttling[J]. Journal of Process Control, 2017, 50: 11-18.
- [4] 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): 1679-1686.
HE Linxuan, LI Wenyan. 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): 1679-1686.
- [5] 中国新闻网. 国内燃煤电厂最大电化学储能项目投运 [EB/OL]. (2023-04-21) [2023-08-13]. <http://www.china-news.com.cn/cj/2023/0421/9994162.shtml>.
China News Network. The largest electrochemical energy storage project in domestic coal-fired power plants has been put into operation[EB/OL]. (2023-04-21) [2023-08-13]. <http://www.chinanews.com.cn/cj/2023/0421/9994162.shtml>.
- [6] FENG P H, ZHAO B C, WANG R Z. Thermophysical heat storage for cooling, heating, and power generation: A review[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 166: 114728.
- [7] GIL A, MEDRANO M, MARTORELL I, et al. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1: concepts, materials and modellization[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(1): 31-55.
- [8] BASHIR M A, GIOVANNELLI A, AMBER K P, et al. High-temperature phase change materials for short-term thermal energy storage in the solar receiver: selection and analysis[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 30: 101496.

- [9] DROST M K, SOMASUNDARAM S, BROWN D R, et al. Thermal energy storage for coal-fired power generation[R]. Richland, WA (USA): Pacific Northwest Lab., 1990: 1.
- [10] CAO R, LU Y, YU D, et al. A novel approach to improving load flexibility of coal-fired power plant by integrating high temperature thermal energy storage through additional thermodynamic cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 173: 115225.
- [11] 新华网. 全球首套煤电机组耦合熔盐储热示范工程在靖投运[EB/OL]. (2022-12-20) [2023-08-13]. http://js.news.cn/2022-12/20/c_1129221190.htm.
Xinhua Network. The world's first coal-fired power unit coupled molten salt heat storage demonstration project has been put into operation in Jing [EB/OL]. (2022-12-20) [2023-08-13]. http://js.news.cn/2022-12/20/c_1129221190.htm.
- [12] 王伟, 常东锋, 许朋江, 等. 基于熔融盐储热的调频调峰安全供热系统及其工作方法: CN113324276B[P]. 2023-04-07[2023-07-30].
WANG Wei, CHANG Dongfeng, XU Pengjiang, et al. Frequency modulation and peak shaving safety hydronics based on molten salt heat storage and its working method: CN113324276B[P]. 2023-04-07[2023-07-30].
- [13] 韩燕, 吴玉庭, 马重芳. 混合硝酸盐热物性对比分析[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(6): 1224-1229.
HAN Yan, WU Yuting, MA Chongfang. Comparative analysis of thermophysical properties of mixed nitrates[J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(6): 1224-1229.
- [14] ELMQVIST H, MATTSSON S. Modelica-the next generation modeling language-an international design effort[C]//Proceedings of the First World Congress of System Simulation. 1997: 1.
- [15] HE S Q, LU J F, DING J, et al. Convective heat transfer of molten salt outside the tube bundle of heat exchanger[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 59: 9-14.
- [16] 火力发电厂自动发电控制性能测试验收规程: DL/T 1210—2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 1.
Code for acceptance of automatic power generation control performance testing in thermal power plants: DL/T 1210—2013[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2013: 1.

(责任编辑 邓玲惠)