面向可再生能源消纳的火电机组控制结构综合与分析

马士全 [1] 丁进良 [1]

摘 要 增加可再生能源在电网中的占比, 使能源结构更合理, 是加快能源转型、实现低碳可持续发展的有效途径. 电网中占主导地位的火电辅助消纳可再生能源的能力对提高可再生能源在电网中的占比起到重要作用. 为提高火电机组辅助消纳能力, 根据当前系统控制方案, 分析影响机组灵活性与调峰深度的因素, 包括机炉协调、局部反馈策略下的锅炉控制、系统稳态工作点的规划等. 详细阐述基于补偿方案的协调策略限制机组对具有随机性和间歇性的可再生能源的补偿能力, 局部反馈策略下的锅炉控制只是实现等效热效应的反馈, 以及非额定工况下的稳态工作点关系到辅助可再生能源消纳的能耗和排放指标等. 最后, 给出进一步的机炉动态协调控制和非额定工况下系统多目标优化等方面的研究内容.

关键词 可再生能源消纳, 机炉协调, 控制方案, 协同控制, 火电机组

引用格式 马士全, 丁进良. 面向可再生能源消纳的火电机组控制结构综合与分析. 自动化学报, 2025, **51**(11): 2412−2426

DOI 10.16383/j.aas.c230210 **CSTR** 32138.14.j.aas.c230210

Syntheses and Analyses of Control Structure for Coal-fired Power Plants Oriented to Renewable Energy Accommodation

MA Shi-Quan[1] DING Jin-Liang[1]

Abstract Increasing the proportion of renewable energy in the power grid and making the energy structure more rational is an effective way to accelerate energy transformation and achieve low-carbon and sustainable development. The dominant role of thermal power in the power grid and its ability to assist in the consumption of renewable energy play an important role in increasing the proportion of renewable energy in the grid. In order to improve the accommodation capacity of auxiliary renewable energy in thermal power units, this paper analyzes factors affecting unit flexibility and peak-shaving depth based on current control system schemes, including boiler-turbine coordination, boiler control under local feedback strategy, and the planning of system steady-state operating points. The coordination strategy based on compensation scheme limits the compensation capability of the unit for renewable energy sources with randomness and intermittency; The Boiler control under the local feedback strategy only achieves feedback of equivalent thermal effects; The steady-state operating point under non rated conditions is related to the energy consumption and emission indicators of auxiliary renewable energy consumption. Finally, further research was conducted on the dynamic coordination control of the turbine and furnace, as well as multi-objective optimization of the system under non rated operating conditions.

Key words Renewable energy accommodation, coordination of furnace and turbine, control strategy, cooperative control, coal-fired power plants

Citation Ma Shi-Quan, Ding Jin-Liang. Syntheses and analyses of control structure for coal-fired power plants oriented to renewable energy accommodation. *Acta Automatica Sinica*, 2025, **51**(11): 2412−2426

“十四五”期间, 我国以绿色低碳为目标, 力争在 2030 年前实现碳排放达峰, 2060 年实现碳中和. 碳中和即碳排放量等于碳汇量与碳信用量的总和. 为实现该目标, 电力的低碳化是先决条件. 我国火电煤炭消费占一次能源总量的一半以上, 如 2021 年为 56%. 随着可再生能源技术越来越成熟, 风力、光伏和光热等分布式、环境友好的可再生能源在整体电源中所占的比例越来越高. 完成新的能源结构调整对传统电源——火电提出挑战. 火电机组, 作为一个执行机构, 可根据电网调度方的需要作为基荷电源 (电网调度手动模式)、峰荷电源和腰荷电源 (电网调度自动模式), 如图 1 所示. 可见, 火电机组向电网提供电量的同时还提供供需平衡调节服务, 以保证供电量和供电品质. 由于分布式电源具有随机性和间歇性, 若要充分吸纳可再生能源, 电网不但要为其提供电量容量, 还要调节其带来的扰动.

收稿日期 2023-04-17 录用日期 2023-07-10
Manuscript received April 17, 2023; accepted July 10, 2023
国家自然科学基金 (61988101), 辽宁省兴辽英才计划 (XLYC2202002) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61988101) and Xinliao Talent Program of Liaoning Province (XLYC2202002)
本文责任编委 张俊
Recommended by Associate Editor ZHANG Jun
1. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室 沈阳 110819
1. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819

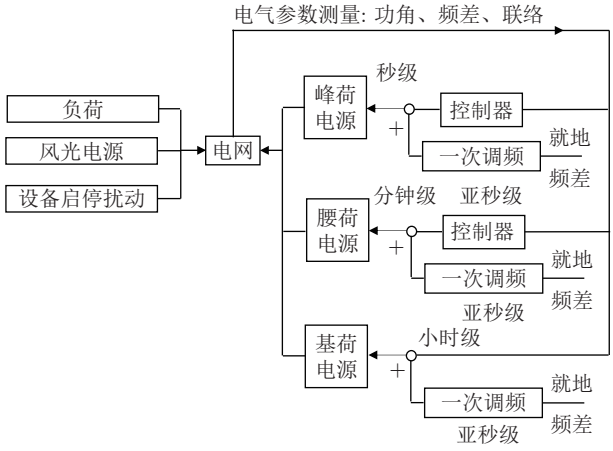

图 1　电网供需平衡示意图

Fig. 1　Schematic of supply and demand balance of power grid

由于我国当前电网平衡调节能力有限, 造成可再生能源在电力能源结构中的比例不能大幅提高 (2021 年风光发电量占比 11.7%), 迫使大规模弃风、弃光. 如 2017 年全国的弃风量高达 41.9 TWh, 局部区域弃风率达 33% 和 29%[1]. 美国有丰富的页岩气, 在提高风光可再生能源占比的同时, 增加燃气发电规模 (燃气轮机负荷变动速率快, 可以短时间启停), 以提高电网的负荷平衡能力. 而我国负荷调节性能优良的水电机组容量占比有限, 且与风光能源存在时空不匹配的矛盾 (风光资源丰富的地区为西部和北部, 而水电资源丰富的地区为南部夏秋季节). 建设大规模抽蓄储能电站只能因地制宜, 其他形式的大规模储能技术尚不成熟. 立足于我国当前电力能源结构和一次能源的现实, 应充分利用煤炭消费转型升级的机遇 (我国煤炭的储采比为 30 ~ 40 年), 发挥电力保供兜底作用、先立后破, 实现有序替代. 推进我国构建以新能源为主体的新型电力系统稳步发展的基本方略, 决定了火电机组由基荷电源向调节性电源角色的转变. 为此, 我国目前有序开放辅助电力服务市场[2], 将负荷调节能力作为市场化的资源, 由市场引导供电企业竞购. 这意味着传统火电机组收益模式由纯电量收益, 转变为电量加辅助服务收益. 对火电机组来说实质上是综合性能的竞争. 度电煤耗越低, 电量电价就越有市场竞争力. 负荷变动速率越快, 变化范围越宽, 辅助服务市场竞得的电量越多, 得到的回报也就越高. 这对火电机组的能耗、排放和控制性能提出更高的要求.

本文围绕火电机组配合消纳可再生能源问题, 通过对其控制结构进行综合与分析, 剖析影响其灵活性及调峰深度的原因, 为寻求加速系统灵活性和深化调峰深度的控制方案以及优化系统节能降耗指标提供参考. 同时, 还指出当前控制方案下配合消纳可再生能源所面临的问题, 分析火电在电力系统中供需平衡的调节作用. 最后, 指出我国火电机组控制性能的提升是配合可再生能源消纳减少储能和电力调节基础设施投资的有效手段.

本文的内容结构安排如下: 第 1 节论述火电机组的控制结构; 第 2 节对控制方案进行分析; 第 3 节和第 4 节分析了当前控制方案在当代电力系统发展中所面临的问题; 第 5 节进行总结, 并提出愿景和展望.

1　火电机组的控制结构

对火电机组的控制结构进行综合与分析是通过控制信息的构建对复杂过程控制系统的实现进行设计、分析、评价和优化的过程. 它是过程生产工艺的抽象.

1.1　递阶结构综合描述

火电机组的控制实现是平衡协调策略下局部反馈基础上的递阶结构控制[3−4], 如图 2 所示 (详细结构见附录 A 中的图 A1). 图中, s 表示拉氏变量, τ_1, τ_2, τ_3 是时间常数, 函数 $\boldsymbol{F}_i(x)$, $i = 1, 2, \cdots, 11$ 表示需要在稳态下进行标定或优化的曲线. 递阶控制是指系统中各个子系统的控制作用由具有从属关系的决策单元递阶实现[5]. 火电机组控制包括协调级、局部决策级和过程回路控制三层结构. 协调级包括锅炉主控与汽机主控两个子系统. 锅炉主控又分为燃料主控、风量控制和给水控制三个子系统. 这些子系统下又由并行运行的多台设备构成更低阶的子系统. 例如燃料主控的下一级是多台并行的磨煤机组成的制粉系统. 由下向上的角度看, 多台给水泵的给水流量形成总的给水量, 多台风机送风流量形成总的送风量, 多个磨煤机的容量风量形成制粉系统总的燃料量, 总给水量、风量和燃料量形成锅炉主控的操作变量, 用于调节压力. 同样, 汽机侧多个调阀的进汽量形成数字电液控制系统 (Digital electric hydraulic control system, DEH) 的综合参考流量, 作为汽机主控的操作变量用于调节功率. 锅炉主控的被控变量 (即压力和汽机主控的被控变量) 功率, 作为协调级的操作变量调节机组功率输出并维持合格的汽水参数. 通过这种对控制信息进行抽象的形式, 递阶传递实现信息的集中, 具有经典信息模式下集中控制的特点. 由上向下的角度看, 这种结构通过任务的分解实现大规模复杂任务的分布式解决方案, 又具有分散控制解决规模化任务的特点. 递阶结构将决策信息纵向分解, 通过变换决策变量和它的维度实现决策信息的分解传递, 直到可实现的物理过程; 将整体任务按照关联关系分为

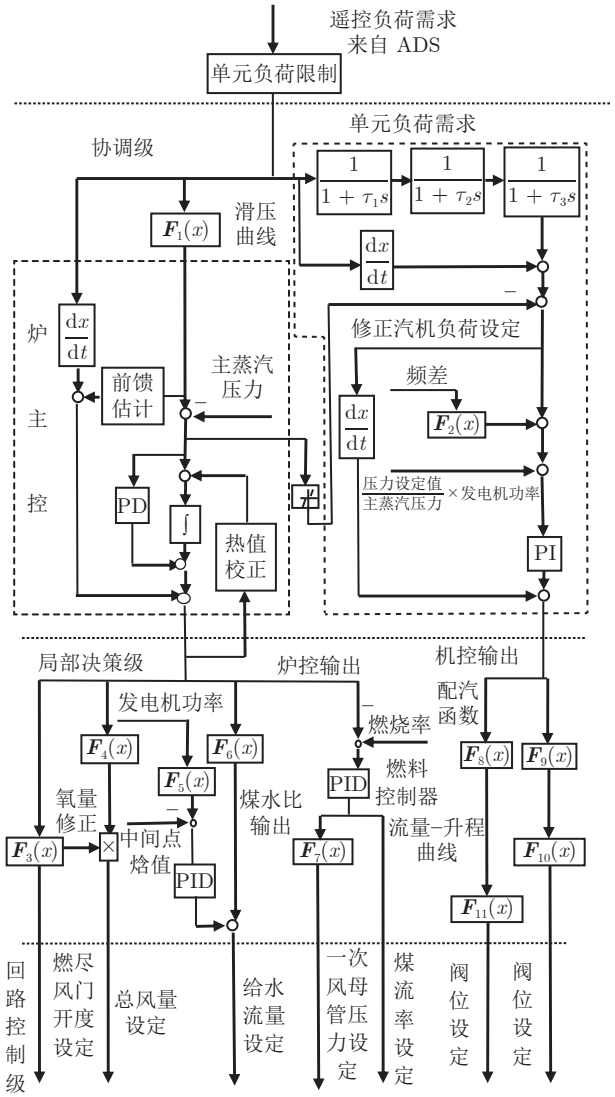

图 2 炉跟随为基础的协调控制递阶总体结构

Fig. 2 Hierarchical overall structure of coordinated control based on furnace following

几个子系统, 实现横向分解. 通过以上对决策信息的纵向分解和横向分解形成多层次多梯队的任务组织形式[6−9]. 它的每一个子任务都是由前馈、反馈、串级、单回路、动静态补偿等基本结构组成, 具体如图 3 所示. 通过合理处理多个子任务之间的关联变量, 使得多个子任务构成一个更高阶的任务, 任务逐层堆叠形成一个整体结构. 按照这种结构形式, 火电机组被抽象为电网调度的一个执行机构.

1.2 协调级实现

具体而言, 我国的大部分机组都是以炉跟随为基础的递阶结构, 如图 2 所示. 来自调度自动分配系统 (Automatic dispatch system, ADS) 的负荷需求信号的范围和变化率, 由于受当前机组设备运行状态的约束, 经过荷限制回路形成机组的负荷需求. 该需求信号经滑压曲线 $F_1(x)$ 形成炉主控的压力设定值, 并以动态前馈的形式补偿到锅炉主控的输出, 如图 2 所示. 同时, 压力设定通过热负荷估计, 形成动静态补偿直接作为锅炉主控前馈 (如图 2 和图 4

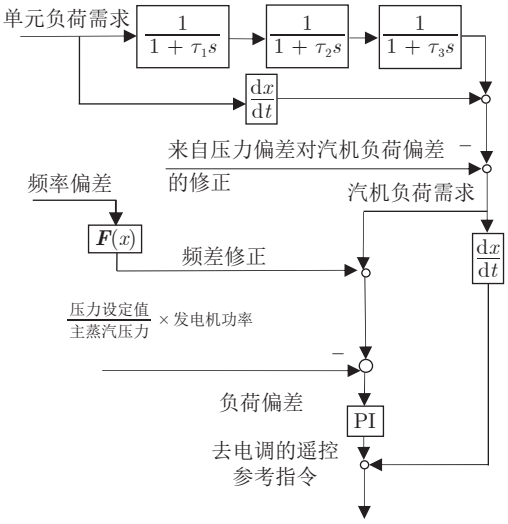

图 3 汽机负荷跟踪控制

Fig. 3 Turbine load-following control

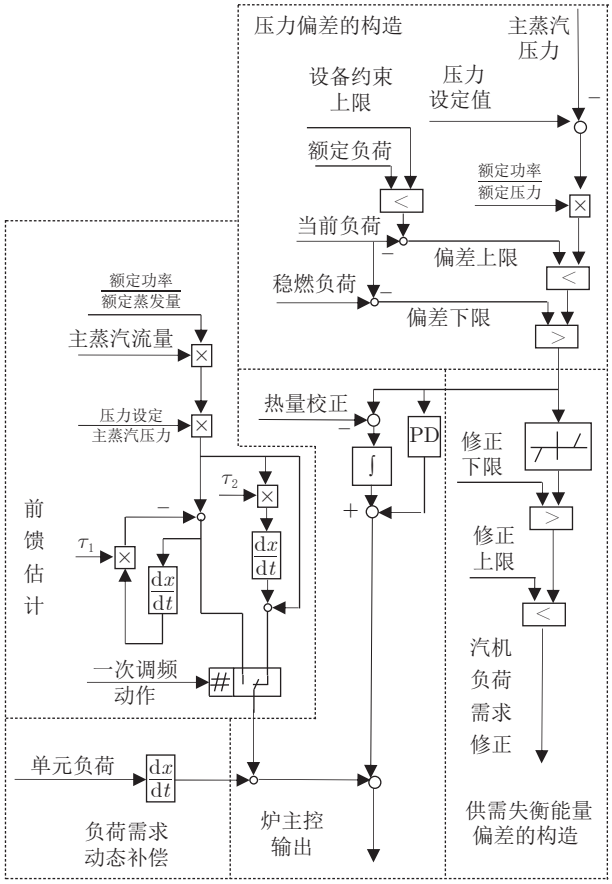

图 4 锅炉压力控制

Fig. 4 Boiler pressure control

所示). 这两种补偿形式增加了锅炉的响应速度. 炉跟随结构下, 锅炉通过燃烧控制压力, 由图 4 可知压力偏差经过额定功率/额定压力修正, 形成热负荷偏差, 构成了控制器的输入偏差. 锅炉主控在调节压力偏差的情况下, 其积分项还配合燃煤热值校正, 减少了燃煤特性变化对锅炉主控的影响. 构造的热负荷偏差是机炉协调程度的重要标志, 其偏差越大说明机炉能量供需失衡程度越大, 汽水参数偏离设计值越严重. 偏差经带有死区的非线性环节, 修正单元负荷需求形成汽机负荷需求. 这是间接能量平衡 (Indirect energy balance, IEB) 协调策略[4]的体现, 具体如图 2 和图 4 所示. 虽然汽机主控调节的是机组实际的电功率, 但这里采用压力设定与主汽压力的比值乘以实际电功率作为反馈变量是很有意义的. 此反馈变量实际上是对调门开度的预估计, 给出了调门开度的提前量, 防止其误动作, 使得功率调节更准确、机炉协调性能更好. 当主汽压力与压力设定分别稳定且相同时, 说明机炉能量供需平衡, 汽机主控的反馈恰好等于电功率, 即汽机负荷需求和单元负荷需求相等. 同样, 对于锅炉控制压力, 控制器偏差构造时的放大系数为额定功率/额定压力转化为能量的偏差. 以上体现了直接能量平衡 (Direct energy balance, DEB) 协调策略[4]. 锅炉侧的燃料输送、煤粉燃烧和传热都是大惯性环节. 为保证汽机侧同步响应负荷指令, 采用三个惯性环节对锅炉侧大惯性环节进行重构. 从上述分析可以看出, 机炉主控不但分别起到功率调节与压力调节的作用, 还对其动作的一致性起到协调的作用.

1.3　局部决策级实现

局部决策级将锅炉主控的输出指令转化为给水、给煤和送风子系统的主指令; 将汽机主控的输出通过配汽函数分配给各个进汽调门, 形成各调门的阀位指令, 是系统第二层次的实现.

由于给煤、送风和燃烧传热过程是大延迟、大惯性环节, 所以风、粉的动态协调意义并不大. 但是在负荷变动过程中, 为保证足够的过量空气系数, 使燃烧稳定、连续, 在逻辑上通过风、粉交叉限制回路, 实现升负荷时先增加风量后增加煤粉, 降负荷时先减少煤粉后减少风量. 处理煤水关系时, 锅炉主控输出经过煤水比曲线形成静态前馈, 作为给水量的基本指令. 通过调节中间点焓值, 修正给水量, 作为汽泵回路的设定值. 直流炉给水指令的构造还有其他多种形式, 也一直是研究的热点[10−16]. 送入炉膛的燃料量由燃料主控调节, 如图 2 所示. 炉主控的输出与给煤率 (给煤量经热值修正) 的差值形成燃料调节器的偏差. 燃料主控通过操作一次风压和容量风量来改变喷入炉膛的燃料量. 在燃料调节过程中, 容量风的风量对磨煤机的煤位形成扰动. 给煤调节器操作给煤速度, 维持磨煤机煤位. 来自汽机主控的输出指令通过电调的阀门管理功能实现各个进汽调门进汽量的分配. 调门进汽的分配策略根据汽机的运行状态, 通过对调门的组合方式和节流特性优化得到.

2　控制方案分析

图 2 结构是整个机组运行在自动状态下去掉冗杂的逻辑控制, 保留调节回路的情况下, 抽象成电网调度的一个执行机构而得到的控制信息简图. 其经抽象可表示成图 5 的形式, 与图 6 结构相同. 所以单元机组是局部反馈递阶结构. 这种结构是大系统理论中的一种基本结构[5], 其控制方案的核心思想——“分解−协调”方法是在解决大规模生产控制问题过程中产生的. 递阶结构按照反馈形式和协调方法的不同分为全局反馈关联预测结构、全局反馈关联平衡结构、局部反馈关联预测结构和局部反馈

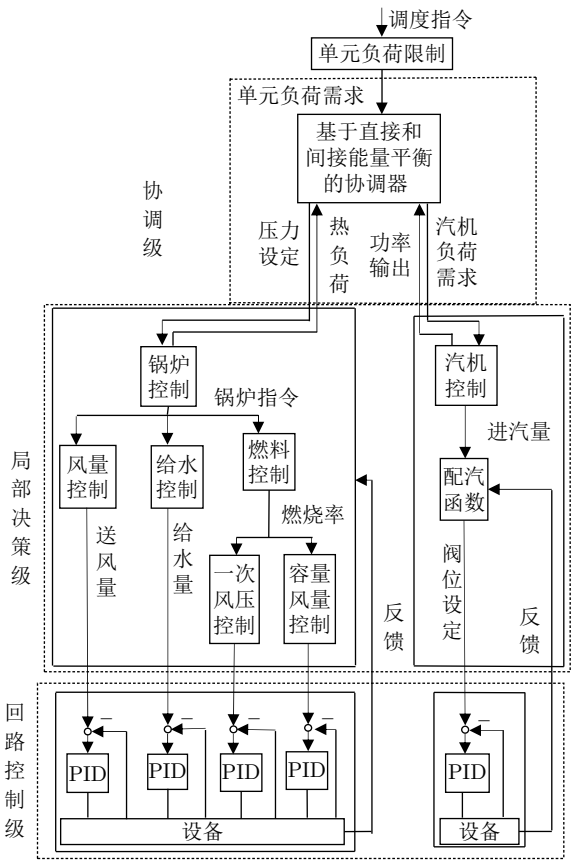

图 5　火电机组控制结构简图

Fig. 5　Simplified diagram of thermal power unit control structure

关联平衡结构[3], 如图 6 和图 7 所示.

单元机组系统的稳态模型可简化为

$$\boldsymbol{f}_1(\Delta \boldsymbol{H}, \boldsymbol{F}_l) = \boldsymbol{W} \tag{1}$$

其中, $\Delta \boldsymbol{H}$ 为理想焓降, $\boldsymbol{F}_l$ 为主蒸汽流量, $\boldsymbol{W}$ 为电功率. 对于一给定负荷 $\boldsymbol{W}$ 与两个变量关联, 其解不定. 通过汽水热力学性质引入关联变量 $\boldsymbol{P}$.

$$\boldsymbol{f}_2(\boldsymbol{P}, \Delta \boldsymbol{H}) = \boldsymbol{T} \tag{2}$$

其中, $\boldsymbol{P}$ 为主蒸汽的静压力, $\boldsymbol{T}$ 为对应主蒸汽压力下的饱和蒸汽温度. 锅炉设计时已保证热负荷在各受热面的分布, 因此温度主要考虑材料的约束, 可视为已知量. 联立式 (1) 和式 (2), 可得

$$\boldsymbol{f}_3(\boldsymbol{P}, \boldsymbol{F}_l) = \boldsymbol{W} \tag{3}$$

仍然具有不定解, 因此引入关联约束方程:

$$\boldsymbol{f}_4(\boldsymbol{P}) = \boldsymbol{W} \tag{4}$$

式 (4) 又称滑压曲线, 为负荷的函数, 具体表达形式可通过机组热耗率优化实验获得. 通过规划负荷与压力的关系获得汽水参数的稳态工作点. 在当前方案下, 机组根据具体条件的不同, 运行方式可分为多种模式, 包括基本模式 (图 8)、炉跟随模式 (图 9)、机跟随模式 (图 10)、协调模式 (图 11 和图 12).

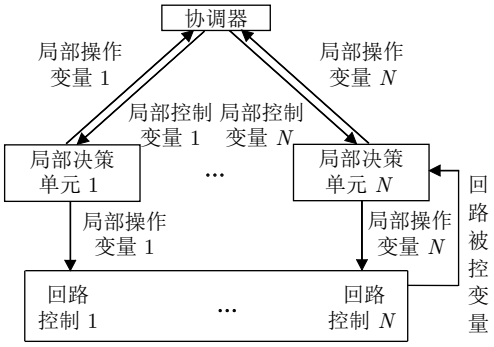

图 6 局部反馈递阶控制结构

Fig. 6 Hierarchical control structure of local feedback

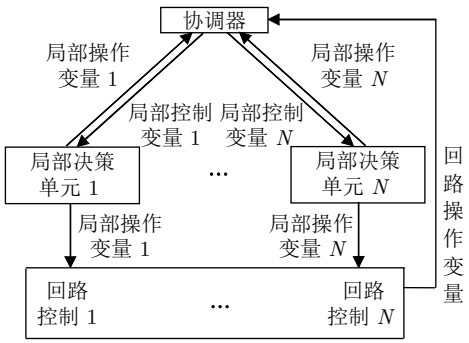

图 7 全局反馈递阶控制结构

Fig. 7 Hierarchical control structure of global feedback

其中, $\boldsymbol{P}_{\rm st}$ 表示主汽压力的额定值. 基本模式需要汽机和锅炉操作员紧密协作, 满足负荷要求的同时保证安全的汽水参数. 一般在机组启动后, 汽机主控

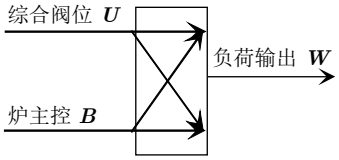

图 8 基本控制模式结构

Fig. 8 Control structure of base mode

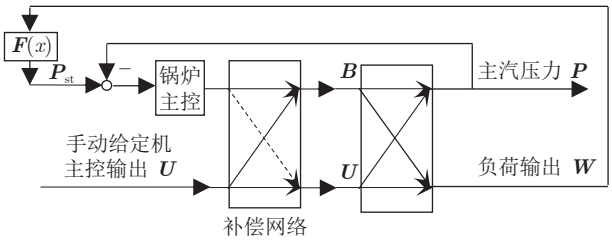

图 9 炉跟随控制模式结构

Fig. 9 Control structure of furnace following mode

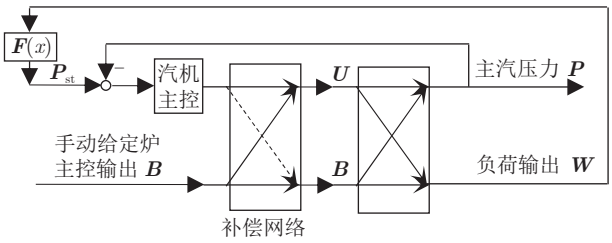

图 10 机跟随控制模式结构

Fig. 10 Control structure of turbine following mode

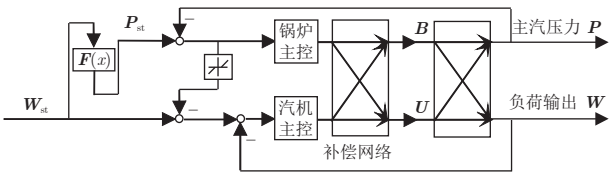

图 11 基于炉跟随的协调控制

Fig. 11 Coordinating control based on furnace following mode

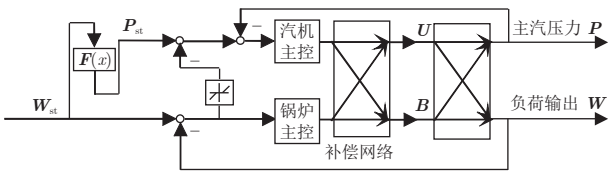

图 12 基于机跟随的协调控制

Fig. 12 Coordinating control based on turbine following mode

和锅炉主控都不能正常运行时采用. 炉跟随模式实际就是以锅炉控制压力为副调节器, 汽机控制负荷为主调节器的一个串级结构, 手动操作 DEH 的综合阀位指令. 这种方式下机组负荷变化快, 压力参数波动大, 常在协调投入前或协调投入下, 机侧辅机设备因故障退出自动时采用. 机跟随模式本质上就是以汽机控制压力为副调节器, 锅炉控制负荷为主调节器的串级结构, 只不过主控制器没有投自动. 这种方式下机组响应负荷速度较慢, 但主汽压力稳定, 能够很好地跟踪滑压曲线. 常在协调投入前或协调投入下炉侧辅机设备因故障退出自动时采用. 协调模式分为两种, 以炉跟随 (如图 11 所示) 为基础的协调模式和以机跟随 (如图 12 所示) 为基础的协调模式. 工作在协调模式的控制系统又称为 CCS (Coordinated control system). 该系统自动化水平最高, 属于全自动模式, 其分别具有相应跟随模式的特点. 我国的大部分机组采用的是以炉跟随为基础的协调模式[10]. 任意一种协调模式都是负荷设定值, 通过滑压曲线产生压力设定值. 由于汽机的响应速度快 (液压伺服阀调整蒸汽流量), 锅炉的响应速度慢 (燃烧传热过程延迟大、惯性大), 机、炉响应特性差别较大, 在变负荷过程中从一个稳态到另一个稳态的过渡时间不同. 一个处于稳态而另一个处于动态时, 会导致关联变量主汽压力偏离工作点 (稳态优化值). 例如在炉跟随为基础的协调系统中, 锅炉控制压力, 汽机跟踪负荷. 升负荷过程中, 汽机响应速度快, 负荷由于蒸汽流量的增加很快达到设定值; 锅炉响应速度慢, 燃料的化学能来不及转化为蒸汽的内能, 负荷增加依赖的是机组的蓄热, 这将导致蒸汽参数快速下降, 如果蒸汽的过热度不够, 将导致汽轮机水冲击. 降负荷过程中由于汽机调门关小, 蒸汽流量减少. 而锅炉燃料虽然也减少, 但由于传热过程惯性系数大, 蒸汽参数不能及时减小, 反而导致其急剧上升, 以至于达到安全阀的整定值. 因此, 协调好机炉关系是整个机组响应调度的基础.

由图 2 ~ 4 可知, 机炉的协调功能是在功率和压力回路的基础上, 增加动静态补偿实现的. 这实际是一个两输入两输出系统, 如图 11 和图 12 所示. 通过补偿网络解耦, 在非协调模式下, 压力回路和负荷回路相对独立; 在协调模式下, 两者在维持安全汽水参数的同时, 满足一定范围内负荷变动率的要求. 结合具体的物理参数, 通过 IEB 和 DEB 的补偿方式来实现上述功能[4]. 最直观的方式就是 IEB, 即根据主汽压力偏差, 利用非线性环节从设定值上进行补偿. 当压力回路产生较大偏差时, 通过带死区的非线性环节补偿汽机回路设定值, 减小设定值的变化幅度从而减缓汽机侧的响应速度以匹配锅炉控制回路, 即让汽机“等一等”锅炉. 在以汽机跟随为基础的协调模式中亦是如此. 当因辅机设备故障退出协调模式时, 滑压设定值由负荷经滑压曲线产生切换到由发电机出口电功率经滑压曲线产生, 压力设定值跟踪实际电负荷. 操作模式也自动切换为对应的跟随模式.

3　当前控制方案下可再生能源消纳面临的问题

3.1　基于补偿网络的协调方法限制了机组的灵活性

1) 响应调度的快速性

机组在协调工作模式下, 调度侧投入自动, 如图 1 中的机组投入自动发电控制 (Automatic generation control, AGC) 模式. 如果是区域功率偏差控制模式, 负荷指令 4 ~ 8 s 更新一次. 否则调度每 15 min 规划一次未来时刻的发电计划, 即调度指令可以提前 15 min 下达. 调度指令离当前时刻越近, 其预测越准确. 这种负荷响应的过程为“电网供需失衡–检测计算–调度”. 在局部区域内, 由于光伏或风电负荷的波动导致供需失衡, 调度通过调节火电机组的出力, 对其作出补偿. 火电机组的灵活性 (负荷变动率) 决定其能制衡分布式能源波动的能力. 目前, 我国火电机组负荷变动速率约为每分钟额定负荷的 2%. 影响响应速度的主要因素为锅炉的燃烧和传热的惯性. 当前的协调级通过动态补偿的方式[17−18] 减缓汽机调门的动作来保障安全的汽水参数. 火电机组可看作以汽机调门开度和锅炉燃烧率为输入, 以电负荷和主汽压力为输出的双入双出系统. 直流炉的给水通过煤水比值进行控制, 因此也可简化为双入双出系统, 如图 13 所示. 由上述分析可知, 当前的处理方法是将多输入多输出通过补偿网络进行一定程度的解耦, 近似转变为单输入单输出系统进行处理的. 理论上, 如果系统的数学模型已知, 如

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{W} \\ \boldsymbol{P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{G}_{11} & \boldsymbol{G}_{12} \\ \boldsymbol{G}_{21} & \boldsymbol{G}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{U} \\ \boldsymbol{B} \end{bmatrix} \tag{5}$$

则可通过串联前、反馈前、串联后补偿实现完全解耦[4], 如图 14 ~ 16 所示, 将两入两出系统转化为两个单回路, 进行控制实现. 但是系统的模型并不能精确获得. 因此, 无法按照上述解耦方法计算出解耦网络, 实现完全补偿. 为解决两个回路的耦合, 根

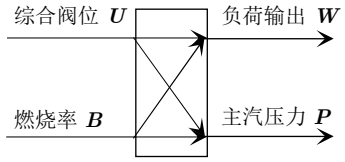

图 13 火电机组模型结构

Fig. 13 Structure of coal-fired power plants

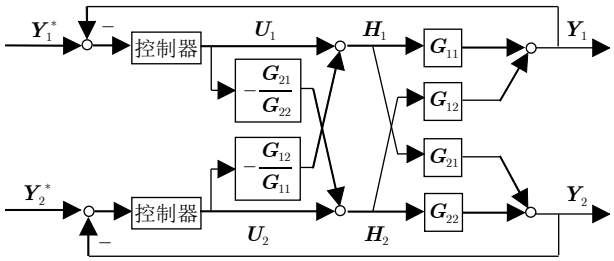

图 14 串联前补偿结构

Fig. 14 Compensation before series connection

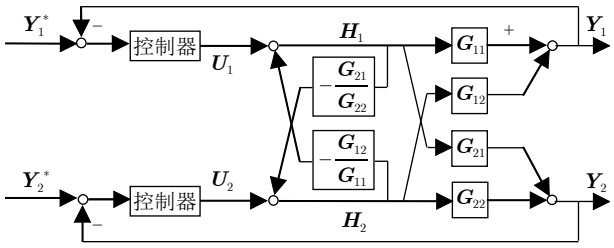

图 15 反馈前补偿结构

Fig. 15 Compensation before feedback

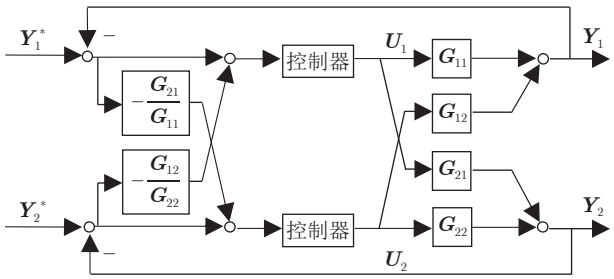

图 16 串联后补偿结构

Fig. 16 Compensation after series connection

据物理过程寻找解决方案. 例如, 在负荷变动过程中引入响应趋势相似的物理量进行双向补偿, 典型的例子有日本 Chita 电站的协调系统、Bailey-820 系统、HITACS-1000 协调系统等[4]. 或采用主汽压力偏差 (炉跟随) 和负荷偏差 (机跟随) 作为机炉协调程度的特征参数进行补偿. 例如, 引入的关联变量在机组动态补偿解耦控制中是一个表征汽机和锅炉协调工作的特征参数[4], 这种协调机制又称为 IEB 机制. 从回路设定值上, 对机炉的响应速度进行匹配. 更有甚者从能量需求平衡的角度, 寻求动态补偿的方法. 以上方法就像在控制理论中对一个高阶系统进行实现, 实现的方式可以有多种, 例如可控标准型和可观标准型等. 但寻找恰当的状态变量使其具有与生产参数有关的物理意义, 甚至能够有直接、间接测量的物理量可用于反馈是很具有现实意义的. 因此, 结合具体物理过程, 合理处理关联变量, 在复杂控制系统实现中是一项创造性的工作. 这是在不能准确获得数学模型的情况下, 退而求其次的办法. 由于无法精确获得数学模型, 只是为满足当下在较小频率下动态协调的需要而进行网络补偿. 单纯靠这种方法或补偿强度的增加无法实现完全解耦, 从而在更高频率范围内保持理想的协调效果. 因此, 在协调级实现上, 需要寻找合理的控制方法满足更高水平的机炉动态, 以增加其配合可再生能源的消纳能力.

2) 突发式负荷响应的鲁棒性

对于电网秒级时间尺度的负荷变化, 由于时间短, 导致电网检测系统来不及反应, 无法通过调度“电网供需失衡–检测计算–调度”过程实现供需平衡, 而是依靠一次调频的作用 (机组转动惯量) 缓解扰动. 机组协调性能越好, 电网局部扰动在整个电网传播的速度越快. 由整个电网机组分摊负荷扰动的速度就越快, 电网响应负荷变化越及时. 其过程为: 用电负荷短时间内大幅度变化, 导致局部机组转速变化, 依靠转动惯量来缓解外部扰动, 汽机侧调门会根据转速差调整开度, 机组出力发生变化, 依靠机组蓄热对扰动进一步缓解. 此时, 打破了机组能量供需平衡, 最终协调系统的功率恢复到一次调频动作之前. 即一次调频的出力被协调功率闭环抵消, 扰动没有被消除只是被缓解. 当电网功率供需不平衡时间足够长 (能量差额随时间越来越大) 以至于靠整个电网内所有同步机组的转动惯量来缓解时, 电网的频率就会发生变化. 电网再通过 AGC 调整各机组的出力来抵消扰动. 图 17 是炉跟随为基础的协调系统, 汽机主控参与一次调频的结构. 一次调频负荷设定值直接叠加到汽机主控闭环的设定值上, 和单元负荷需求一起, 构成汽机负荷需求的设定值. 这样调频负荷部分, 不会由于汽机功率闭环抵消. 这关系到长时段或最终一次调频的幅度, 即稳定后一次调频负荷最终由频差确定. 只要转速偏差超过一次调频死区设定值, 调频负荷就一直存在. 然而, 为增加一次调频的响应速度, 在 DEH 中, 转速差通过转速不等率曲线与调频系数相乘, 形成前馈累加到汽机主控的输出中, 直接影响调门的开

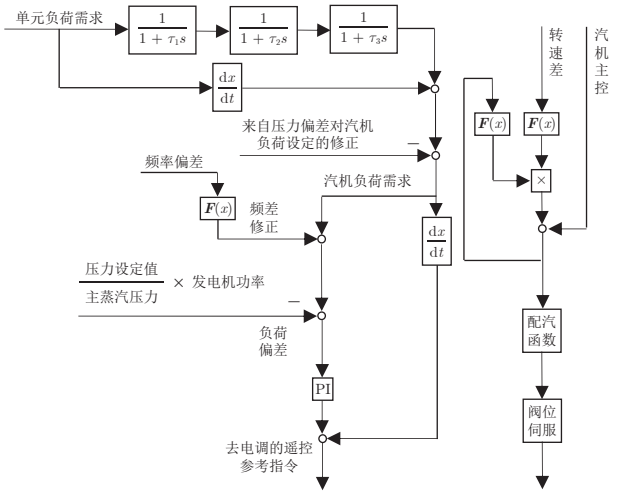

图 17　汽机主控和电调参与一次调频

Fig. 17　Primary frequency regulating of turbine master and DEH

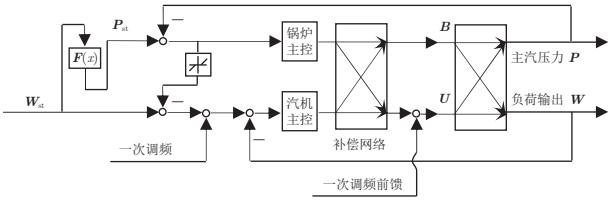

图 18　一次调频结构

Fig. 18　Structure of primary frequency regulating

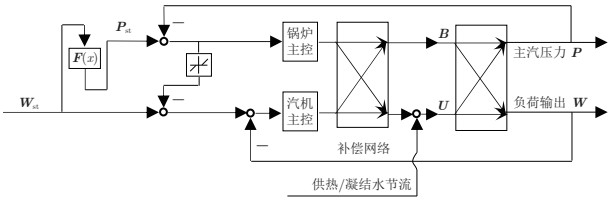

图 19　凝结水节流补偿结构

Fig. 19　Compensating structure of adjusting condensing water

度. 此时, 锅炉跟踪压力设定值. 该设定值由单元机组负荷需求经滑压曲线产生, 没有因为一次调频动作而改变. 可见, 一次调频响应的快速性主要是依赖机组的蓄热. 汽机侧依靠蓄热及时响应外部负荷的需求. 然而, 锅炉侧则因热负荷补充不及时, 导致汽水参数偏离正常值. 这相当于在汽机侧增加一个扰动, 如图 18 所示. 在相同频差下, 机组一次调频响应的能力 (当前电网要求参与一次调频机组的出力不小于 6% 额定出力) 是由补偿网络抵抗该种扰动的能力所决定的. 因为一次调频发生是随机的, 它可能发生在机组的任何负荷处, 所以相同的一次调频负荷量引起机组参数偏离程度不同. 发生在低负荷时机组参数的偏离较发生在高负荷时大, 致使补偿网络或者控制器的鲁棒性决定机组参与一次调频的幅度. 控制器的鲁棒性越强, 在一次调频动作时汽水参数偏离正常值越小, 参与一次调频的能力就越强; 相反, 其抗扰动能力越弱, 参与一次调频的能力就越弱. 分布式能源具有的随机性和间歇性增加了电网的不稳定性, 也增加了一次调频这种突发式负荷响应的概率. 因此, 处于协调级的机炉控制无论是对于 ADS 的响应速度还是对一次调频的响应幅度都起到至关重要的作用. 还有一些补偿方案, 通过调节供热蝶阀实现弹性抽汽回热或对凝结水流量进行节流来影响汽机侧抽汽量[19−20]. 这相当于在汽机侧施加前馈补偿, 增加了控制器的鲁棒性, 加快了负荷响应速度, 使汽水参数在外部扰动下不易偏离, 如图 19 所示. 但是, 这不是根本的解决办法. 未来需要从控制的角度, 研究机炉高性能的动态控制方法, 以提高负荷变动速率.

3.2　锅炉局部反馈策略影响调峰深度和变负荷时的燃烧性能

1) 等效热效应反馈原理

在图 2 所示的递阶结构中, 在稳态工况下以炉主控的输出——燃烧率作为参考规划配风和给水, 具体包括总风量、容量风量、二次风量、燃尽风量和给水量. 将上层控制器的输出指令分解为下层控制回路的设定值, 实现了决策变量的分解转换. 然而, 燃烧率是以设计煤种为参考, 将其与负荷的对应关系归一化得到. 经试验验证, 校核煤种的燃烧率与实际值的偏差在可接受范围内. 实际燃煤与设计煤种并不一定完全一致. 为消除燃煤变化造成风量、给水量与给煤量的失配, 需要从煤燃烧的热效应角度将当前燃煤转化为设计煤种, 即热值校正, 校正方案具体如图 20 所示. 炉主控输出的燃烧率与当前实际的锅炉热负荷存在偏差. 该偏差一方面通过积分修正后形成相对热值系数, 用于将当前的给煤量转化为设计煤种的当量; 另一方面转化为锅炉的主控偏差的修正值 (在 DEB 策略下, 炉主控的输入将压力偏差转化为热负荷偏差, 如图 4 所示, 这里热负荷偏差的构造消除了对燃料控制器的扰动), 修正炉主控的输出使其转为燃烧率. 随着偏差的累积, 风量和给水量也向设计煤种的规划方向修正, 使其失配程度减小. 为减小修正过程中对燃料控制器偏差的影响造成给煤量的变化, 热值校正中积分时间常数与炉主控中积分时间常数相同. 由以上分析可知, 当前锅炉燃烧控制并未实现真正的闭环控制[21−28], 而只是在热效应上通过热值校正进行等效

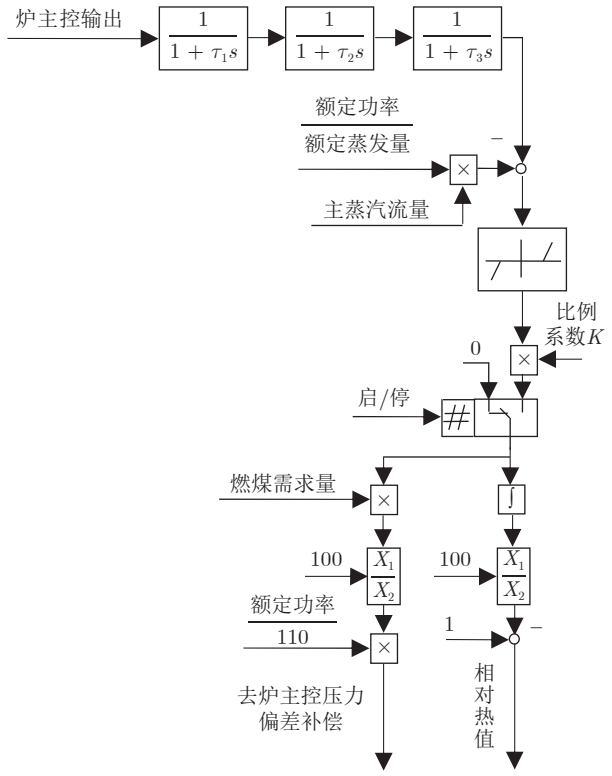

图 20 燃煤热值校正

Fig. 20 Calorific value correction of coal

处理来实现燃烧率的反馈. 随着负荷的降低, 炉膛温度也降低, 煤粉着火环境变得恶劣, 燃烧变得不稳定甚至灭火或爆燃. 由于锅炉的燃烧特性, 导致稳燃负荷存在下限. 由协调级形成的决策指令无法被局部决策级执行, 从而无法完成反馈. 这也导致锅炉最低负荷运行能力是影响调峰深度的重要因素. 锅炉最低负荷运行能力与其燃烧方式和煤种相关, 一般对冲燃烧锅炉的最低负荷范围为 20% ~ 30% MCR (Maximum continuous rating); 切圆燃烧最低为 30% MCR; W 型火焰锅炉燃烧方式最低只能达到 30% ~ 50% MCR. 锅炉低负荷下的稳燃能力是影响调峰深度的重要原因. 机组运行负荷越低, 新能源上网的空间就越大, 弃风弃光量就会越少.

不仅如此, 热值校正还关系到锅炉配风. 从控制结构图 2 来看, 燃烧率/总风量、煤流率/一次风母管压力、二次风量/炉膛风箱差压、煤流率/容量风量、燃烧率/燃尽风门开度都是规划的静态工作点. 基于此建立的燃烧率 (炉主控的输出) 与底层控制回路设定之间的模型实现了决策信息的转换和控制指令的分解. 但是这种模型只是在设计煤种情况下精度偏差在合理范围内的经验模型. 因此, 基于上述模型给出的配风关系在设计煤种以外并非最佳. 而且, 由图 20 可知, 热值校正是有条件的, 即单元负荷需求变化速度足够小, 以致于机组参数接近稳定. 可见, 在快速负荷变动过程中燃煤的热值是不能更新的, 热值的偏差导致风煤关系失配. 例如在 ACE 模式下, 机组参数可能随时变化. 为应对此缺陷, 只能对燃煤掺烧, 以确保燃煤特性的稳定.

综上可知, 从锅炉燃烧控制的反馈策略上来看, 只是通过热值校正对燃烧产生的热效应进行等效反馈. 实际上煤粉的燃烧包含着复杂的物理和化学过程. 对于其他燃烧参数没有反馈校正, 如燃烧效率、氮氧化物含量、排烟温度、炉膛火焰充满程度、各个受热面热负荷分布等, 从而无法实现控制的最优化. 因此, 寻找新的方案解决锅炉燃烧闭环控制问题是当前研究的热点.

2) 锅炉燃烧闭环控制的发展现状

在清洁低碳、安全高效的基础上, 合理地组织燃烧使热负荷在各个受热面的分布满足汽水参数的要求, 是锅炉燃烧闭环控制的最终目标. 然而, 煤粉燃烧过程复杂, 影响因素众多, 机理不清, 难以建立数学模型. 再者, 滑压运行机组工况变化过程中, 汽水回路在各个受热面的热负荷变化较大, 需操作员手动调节火焰中心的高度与其进行匹配. 例如, 随着压力的增加, 过热段吸热量占比增加. 因此, 升负荷过程中需要适当调高火焰中心, 增加过热受热面的热负荷比例. 降负荷过程中需严密监视过热蒸汽温度防止超温, 同时降低火焰中心以减少减温水用量、保证机组效率. 因此, 无论是燃烧控制还是热负荷调节, 都是根据设计人员提前规划的配风和操作人员的经验进行的. 为充分挖掘影响燃烧性能的决策信息以及合理地调整这些变量, 以达到最佳燃烧状态, 当前的研究方向主要包括[21−29]: 1) 燃烧调整实验, 通过实验修正图 2 中与燃料控制器和总风量设定相关的曲线; 2) 基于燃烧机理的建模, 用于燃烧模拟解决燃烧器的设计优化; 3) 基于检测和人工智能技术的燃烧优化. 国外结合先进的控制技术, 实现了对锅炉的优化控制. 这些控制方法大都是基于人工智能技术与控制技术的结合, 将操作员的经验转化为知识信息. 我国也在通过信息挖掘的方法获得最优操作参数方面不断努力. 国外形成的商用优化软件包括: 美国艾默生公司的 Smart Process 与 Ultramax 系统、美国 Pegasus 公司的 Power Perfecter 系统、美国 Neuco 公司的 Combustion-opt 燃烧优化系统, 以及英国 Powergen 公司的 GNOCIS PLUS 系统等. 国内包括东南大学的 BCOS-2000/2.0 系统、清华大学 OCP3 系统、北京埃普瑞电力科技有限公司引进美国技术开发的 “SOAP” 系统等. 通过图像处理技术获取反映燃烧

效率的特征参数——辐射能信息, 是基于检测技术的燃烧优化领域取得的一项关键突破. 锅炉负荷一定时, 使得辐射能最大的操作参数即最优参数. 上述突破的主要研究思路是根据燃烧机理确定特征参数, 通过检测技术获得特征参数, 进而利用智能控制算法最大化特征参数.

3) 锅炉缺少全负荷段自动给水方案

超临界直流锅炉在 40% ~ 45% MCR 范围内要进行运行模式的转换, 目前还没有全负荷范围内的给水自动控制方案. 分离器干态运行时, 中间点焓值用于修正给水流量设定 (此时汽水分离器已没有水位或汽水分界面不明显), 其控制结构如图 2 所示. 分离器湿态运行时, 给水流量跟踪分离器水位 (由于蒸汽静压力波动, 中间点蒸汽的湿度不容易判断, 所以焓值不能确定). 造成跟踪模式切换的最根本的原因是, 从亚临界到超临界蒸汽的湿度不容易确定. 升降负荷时, 靠运行人员手动进行运行模式的切换. 该过程蒸汽参数变化剧烈, 蒸汽过热度不够或锅炉局部受热面干烧 (小于锅炉最小给水流量) 的风险变大. 现有经过改造升级的自动转换方案, 也是人为判断, 启动转态, 通过顺控替代手动切换过程. 转态过程需要一段时间 (十几分钟或几十分钟), 负荷不能连续变化. 当机组响应自动调峰指令时, 一天之内需要多次、长时段运行在低负荷阶段, 经历多次转态. 如果调度负荷指令在干湿态负荷转换中间, 汽水状态不易判断, 机组运行状态无法监控, 安全运行风险增加.

如果单纯从控制方案入手, 保留原有运行模式则需要严格控制煤水比例, 这需要准确地测量或评估出燃煤的热值 (燃煤热值偏差在 20% 以内). 当前的热值校正方案反应较慢 (热值校正中积分时间常数过长, 积分周期为 8 000 s), 需要在稳态下花费数小时. 纵然是实时评估, 燃料输送、燃烧、传热等惯性延时也在分钟级. 如果根据前几分钟的燃烧来作为当前燃煤热值预报的话, 当前热值方案需将稳态下热负荷与炉主控输出偏差更改为一个评估周期内热量 (热负荷积分) 与炉主控能量输出 (炉主控输出积分) 的偏差. 这样通过准确控制燃烧热负荷与给水流量实现转态过程中变煤水比控制.

如果在超临界状态, 锅炉给水跟踪中间点焓值, 负荷降到 45% 后仍不转入亚临界状态则会因为给水流量过低导致小于最小锅炉给水流量, 容易造成锅炉局部干烧. 从热力学系统工艺出发, 可通过蒸汽注入式换热技术减少省煤器出口给水欠焓, 提高平均吸热温度, 增加水冷壁内汽水循环倍率, 使得机组在低负荷下仍然运行在超临界状态, 方案如图 21 所示. 省煤器出口处增加射流换热器将主蒸汽注入给水中进行回热, 提高锅炉入口给水焓值. 在负荷降至 50% 左右启动增压泵和换热器再循环泵, 射流器出口焓值控制器投自动. 射流器出口焓值在此参数附近变化剧烈, 控制器投运后保证给水焓值在临界焓值以上. 水冷壁下集箱处为密度均匀的超临界流体, 水冷壁各管的流量分配均匀, 保证水循环的安全.

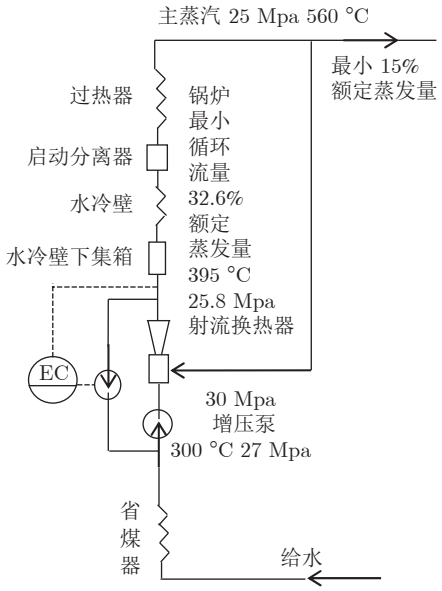

图 21　回热减小水冷壁入口欠焓

Fig. 21　Reduction of subcooling at the water wall inlet by regeneration

3.3　非额定工况下稳态工作点的偏离增加了可再生能源消纳的能耗和排放成本

随着越来越多高参数、大容量机组成为电网的骨干电源和分布式可再生能源的增加, 电网负荷的峰谷差会越来越大. 新能源的消纳致使机组承担部分负荷和调峰运行的时间增多, 因此对其运行的经济性和负荷适应性提出更高的要求. 电网普遍要求燃煤机组负荷调整范围不低于额定出力的 50%, 这就大大偏离了其额定工况, 这是因为火电机组最佳经济运行工况一般在 85% ~ 95% 负荷区间. 由于工作点的重置或一次调频动作造成的扰动都是在工作点附近的波动或多个工作点之间的切换, 因此非额定且大尺度工况变化情况下, 需要对整个系统的稳态工作点进行合理的规划以满足更好的经济性. 系统控制结构图 2 中的函数 $\boldsymbol{F}_i(x)$, $i = 1, 2, \cdots, 11$ 都是需要在稳态下进行标定或优化的曲线, 包括燃烧率/总风量、燃烧率/给水量、煤流率/一次风母管压力、二次风量/炉膛风箱差压、煤流率/容量风

风量、燃烧率/燃尽风门开度、发电机功率/中间点焓值、负荷/压力、配汽函数. 除上文提到的燃烧配风外, 最主要的就是负荷/压力曲线. 它是对机组汽水参数的规划, 直接影响热工转换效率.

额定压力下, 机组带部分负荷是通过调节阀节流实现进汽面积的改变. 阀芯的节流可视为等焓节流过程. 蒸汽温度和压力下降, 熵增加, 高压缸相对内效率降低. 由于节流造成温度的降低, 无冷源损失, 熵增加, 导致再热过程中吸热量增加, 这也就是为什么参数越高工质平均吸热温度越高, 机组热力循环效率越高的原因. 但是汽机的绝对热效率是相对热效率与热力循环效率的乘积. 相对内效率降低、热力循环效率升高, 所以要获得最高的汽机效率需要一个合适的压力参数. 该参数使得热力循环效率的增加对绝对效率的影响, 恰好等于内效率降低对其的影响, 在两者之间获得一个平衡. 这里内效率的降低是由于调阀的节流造成的. 即使相同的负荷/压力曲线, 配汽方式不同, 调阀节流损失也不同. 所以滑压优化, 并不单纯是规划压力与负荷的关系, 还和阀门管理有关. 按照进汽面积改变方式的不同, 汽轮机配汽方式可分为节流调节和喷嘴调节. 当多个调阀动作一致并保持相同阀位开度时, 此状态即为节流调节方式, 称为单阀模式. 汽机全周进汽, 本体受力平衡, 叶片受热均匀, 转子热应力小, 负荷变动灵活, 但节流损失大. 汽机部分调阀处于全开, 部分调阀处于全关位置, 变负荷过程中全靠定温下锅炉蒸发量的改变影响汽压, 从而改变负荷, 称为纯滑压方式. 在低负荷或高负荷处机组的经济性不好. 若多个调阀按一定的重叠度配合, 形成具有线性阀位–流量特性的联合阀门开度, 则称为顺阀模式. 此模式下汽机无法实现全周进汽, 属于喷嘴调节与节流调节相结合的复合调节模式. 通过合理规划阀序与重叠度, 可在较宽工况范围内兼顾机组运行的经济性与灵活性. 然而滑压参数的确定不能只考虑汽轮机的效率和热力循环效率, 还要综合考虑给水泵的功耗、背压、炉水动力的安全性、机组参与一次调频和 AGC 的能力 (通过调阀的节流特性保证汽水蓄热能量以提高机组响应负荷的快速性). 目前滑压优化采用热耗分析法, 只把能耗作为单一优化目标, 然后通过实验兼顾其他性能指标. 实际上这是一个相互冲突的多目标优化问题, 比如负荷的响应速度和机组的能耗指标是相互冲突的. 从机理上难以建立整个系统的优化模型. 然而实际运行中可以获得大量稳态数据, 基于数据挖掘的方法是可能的探索路径. 基于数据挖掘的优化方法在其他行业早有应用案例, 如选矿过程[30−31]. 在新能源消纳需求下, 需要合理规划机组非额定运行状态下汽水稳态工作点, 从而降低消纳的能耗成本.

新能源的消纳导致机组出力大幅度变动, 排烟温度低于对应额定负荷时的温度, 氨易与烟气中的硫反应生成氨的硫化物——硫酸铵或硫酸氢氨. 这些氨的硫化物容易附着在催化剂表面, 甚至堵塞催化剂活性物的微孔, 使催化剂失活, 导致烟气中的氮氧化物排放量高[32−38]. 为加强脱硝效果, 常增加喷氨量以提升氨气在烟气中的比例来强化其与氮氧化物发生反应. 这一方面增加了脱硝的成本同时生成的硫化物附着在空预器的表面, 加速设备的腐蚀; 另一方面中低负荷时, 由图 2 中的容量风/煤流率曲线可知, 一次风煤比额定负荷时高, 甚至达到 30%. 这将导致煤粉氧量充足, 燃烧反应剧烈, 增加了热力型氮氧化物的产生. 低负荷时, 一次风量增加意味着托底风和燃尽风量减少, 这将大大减弱空气分级程度, 破坏低氮燃烧的条件, 增加氮氧化物的生成. 在低负荷下燃烧增加氮氧化物生成的同时, 也减少了氮氧化物的还原, 导致其排放量增加. 当前的解决方案都是从工艺设备的角度进行, 例如对省煤器进行分级布置、增加省煤器旁路、增加烟气旁路等. 若从控制方案角度出发可在低负荷下将脱硝入口烟气温度作为一个控制变量, 在尽量减小与受热面汽温控制耦合的情况下, 将火焰中心高度作为操作变量, 始终保持排烟温度在催化剂适宜的范围内. 那么图 2 控制结构中锅炉的燃烧控制就需要重新设计.

综上可知, 火电机组对风电和光伏电源进行补偿时, 出力会大幅度波动导致机组长时间工作在偏离额定参数的工况下, 就需要对图 2 控制方案中的稳态工作点进行重新规划以满足更好的经济和排放指标.

4 火电在电力系统中供需平衡调节作用

电能是一种不可大规模存储的二次能源. 在电力系统中, 供电与用电是同时进行的, 而且供需是平衡的. 其中, 频率是有功功率 (出力) 平衡的表征参数, 我国交流电频率为 50 Hz. 频率可通过自动发电控制 AGC 维持恒定. 电压是无功功率输出平衡的表征参数, 可通过自动电压控制 (Automatic voltage control, AVC) 调节励磁来维持.

图 22 是电网负荷供需平衡调节类比图. 基荷电源调度的时间尺度为小时级或几十分钟; 投入 AGC 模式的电源调度的尺度为分钟级, ACE 模式

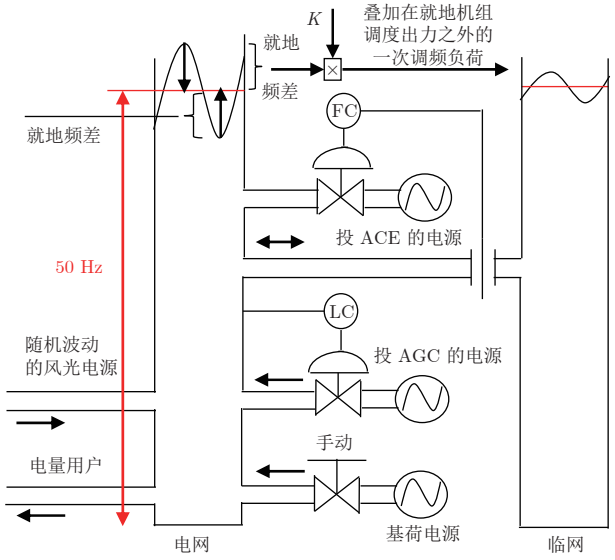

图 22　电网负荷供需平衡调节类比

Fig. 22　Analogy of load-supply balance regulation in power grids

的电源为秒级; 一次调频对负荷的响应为亚秒级. 负荷响应过程为: 电网中的大负荷设备启停或风光电源大幅度 (小的负荷变化对于电网来说不足以引起频率变化即频率仪表测不到) 快速变化打破电网供需平衡, 引起局部频率偏离. 当机组检测到就地频率偏差超过一次调频动作死区时, 即触发一次调频动作. 按照频差的大小, 机侧和炉侧分别增减燃料和阀门开度. 但是此时机组功率与调度指令出现偏差, 最终一次调频负荷会由 CCS 协调的功率闭环调节抵消. 因此, 一次调频是有差调节, 不能补偿电网供需不平衡, 它只能缓解扰动 (将功率的瞬时变化转变为机组转速缓慢的变化, 而且一直变化). 随着时间的积累, 这种功率不平衡转化为网内所有旋转机组转动动能的变化. 由于电网内所有机组是同步的, 电网检测到频率的变化就会通过二次调频 AGC (自动发电控制) 进行功率反馈调节, 此时才发挥火电机组功率调节作用.

由此可见, 一次调频只是缓解电网瞬时功率的不平衡, 即将电功率的冲击式扰动转化为电网参数舒缓的变化. 这正是电网中转动惯量存在的意义. AGC 即二次调频发挥闭环调节作用.

电网的这种自动调节机制一方面要补偿用户电功率的变化, 例如设备的启停, 另一方面还要克服由风光等不稳定的一次能源带来的扰动. 随着越来越多的风光电源上网, 电网的调节资源越来越不足, 以至于这种调节资源成为商品. 近年来我国加快飞轮、压缩空气、电化学储能、抽水蓄能电站、蒸汽燃气联合循环机组等基础设施的投资以增加电网的灵活性调节资源, 并有序开放电力辅助服务市场, 引导社会资本为风光等可再生能源保驾护航. 目前, 我国已有 33 个省级行政区共 6 大区域 (华北、华东、华中、东北、西北、西南) 形成统一的辅助服务规则体系. 电力企业和电量用户通过协商、集中竞价、挂牌方式, 在实时交易前确定交易量和价格作为调度的基准计划. 实时交易时, 根据交易量和辅助服务费确定各自的电量和电价. 在此背景下, 我国火电机组的性能, 包括最小出力、负荷变动速率 (爬坡率)、冷热态启动时间, 相对于欧洲大比例吸收可再生能源的火电机组综合性能尚有提高空间, 如表 1 所示.

表 1　性能参数对比

Table 1　Comparison of performance parameters

参数	中国 (硬煤/褐煤)	欧洲 (硬煤/褐煤)	单位
负荷变动速率	2/1.5	6/4	%/min
最小出力	35/50	20/40	%
冷态启动时间	8/12	4/6	h
热态启动时间	4	2	h

5　总结与展望

根据火电机组控制方案, 本文分析其在辅助消纳可再生能源过程中面临的两个关键问题.

在协调控制层面, 机组动态响应能力存在明显不足. 由于燃烧、传热过程具有大惯性特性, 当前控制方案将机炉系统解耦为两个响应特性差异显著的单回路, 仅通过抑制汽机快速响应来匹配锅炉慢过程, 导致整体负荷响应速率受限 (目前不超过额定负荷的 2%/min), 且未能充分利用调度系统提供的 15 min 前瞻性负荷预测信息.

在锅炉控制层面, 局部反馈与运行优化存在显著短板. 现有控制仅采用等效热效应反馈, 尚未实现真正的闭环控制, 更未达到优化控制水平. 这导致缺乏在低负荷工况下同时满足燃烧稳定、效率优良和排放达标的控制方案, 也缺少覆盖全负荷范围的给水控制策略. 同时, 由于调峰机组长期运行在非额定工况, 系统稳态工作点未能得到有效优化, 从而增加了新能源消纳的能耗与排放成本.

随着电力辅助服务市场的逐步开放, 我国煤电机组既面临技术升级压力, 也处在发挥保障作用的关键时期. 未来需要通过提升机组协调控制水平和锅炉控制性能, 稳步提高可再生能源占比, 降低碳排放强度, 为实现碳中和目标以及制造强国战略提供支撑.

附录 A

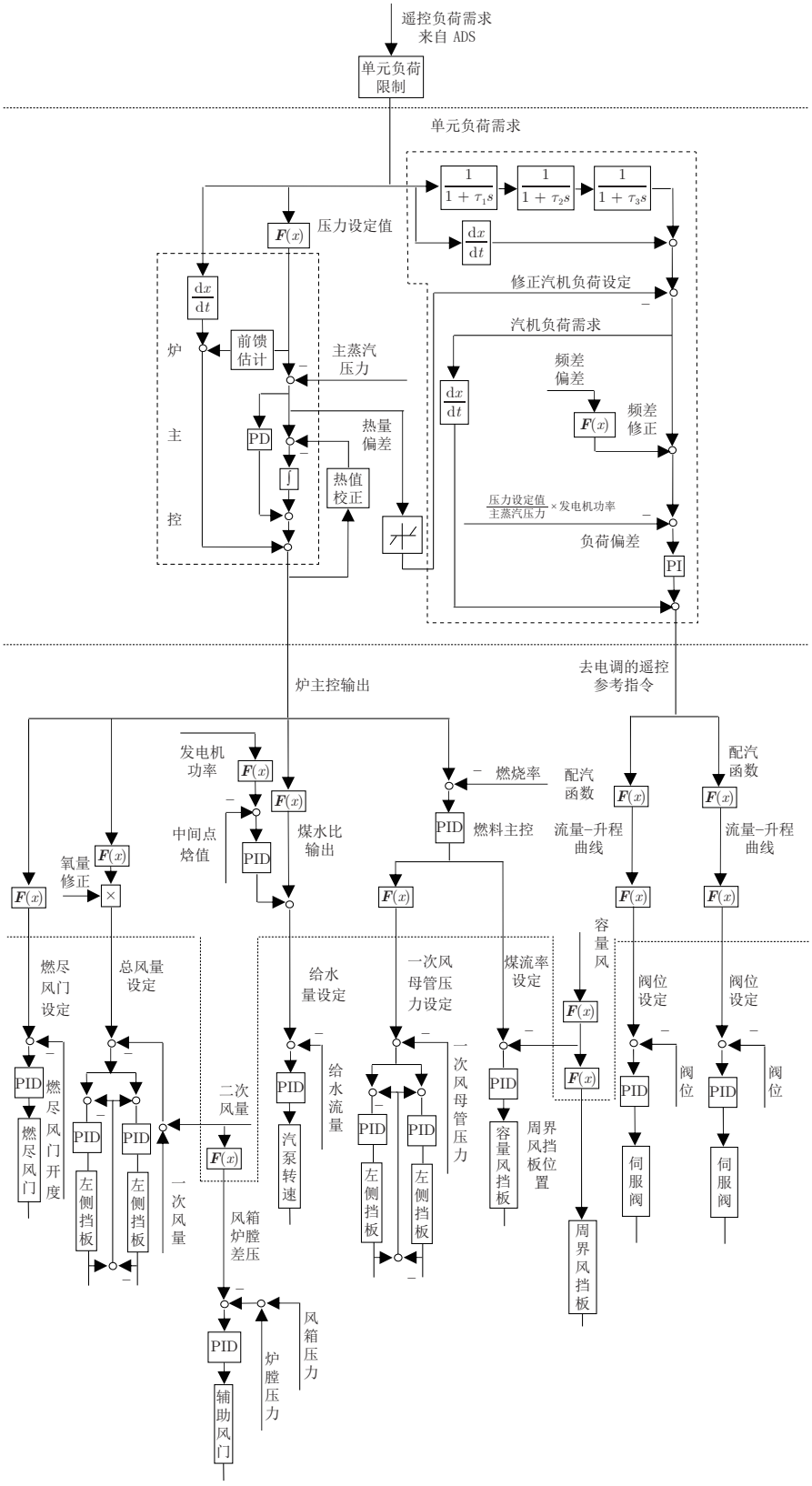

图 A1 炉跟随为基础的协调控制递阶详细结构

Fig. A1 Detailed hierarchical structure of coordinated control based on furnace following

References

1 Li Xing-Mei, Zhong Zhi-Ming, Yan Jie. Flexibility reformation planning of thermal power units with large-scale integration of wind power. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, **43**(3): 51−57
(李星梅, 钟志鸣, 阎洁. 大规模风电接入下的火电机组灵活性改造规划. 电力系统自动化, 2019, **43**(3): 51−57)

2 Shi Y, Li C, Song L Z, Zhu C P, Fu Y L, He Y Q. Peak shaving auxiliary service market model with multi-type power participation. In: Proceedings of the International Conference on Power System Technology (POWERCON). Haikou, China: IEEE, 2021. 684−689

3 Li Ren-Hou, Shao Fu-Qing. *Hierarchical and Decentralized Control of Large Systems*. Xi′an: Xi′an Jiaotong University Press, 1986.
(李人厚, 邵福庆. 大系统的递阶与分散控制. 西安: 西安交通大学出版社, 1986.)

4 Liu Ji-Zhen. *Coordinated Control and Full Process Control of Water Supply*. Beijing: Water Resources and Electric Power Publishing House, 1995.
(刘吉臻. 协调控制与给水全程控制. 北京: 水利电力出版社, 1995.)

5 Tu Xu-Yan. *Large System Control Theory*. Beijing: National Defense Industry Press, 1994.
(涂序彦. 大系统控制论. 北京: 国防工业出版社, 1994.)

6 Sandell N, Varaiya P, Athans M, Safonov M. Survey of decentralized control methods for large scale systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1978, **23**(2): 108−128

7 Roberts P D. Hierarchical control and decomposition of a chemical plant. *International Journal of Systems Science*, 1979, **10**(2): 207−223

8 Arkun Y, Stephanopoulos G. Tudies in the synthesis of control structures for chemical processes. Part V: Design of steady-state optimizing control structures for integrated chemical plants. *AIChE Journal*, 1981, **27**(5): 779−793

9 Bailey F N, Malinowski K B. Problems in the design of multilayer, multiechelon control structures. *IFAC Proceedings Volumes*, 1977, **10**(6): 31−38

10 Li X N, Zhang L Q. Research based on the mid-point enthalpy of supercritical unit feed-water control circuit. *Advanced Materials Research*, 2011, **354−355**: 344−349

11 Qiu S L, Song R F, Wang Z, Wang X T, Zhu B Y, Qi Z Y, et al. Research and application of Automatic Procedure Start up and shut down of ultra supercritical thermal power unit based on enthalpy control. In: Proceedings of the 9th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC). Chongqing, China: IEEE, 2020. 280−284

12 Huang Y X, Yao R W, Liu X C, Lin S Y, Zhang W D. A reinforcement learning method for intermediate point enthalpy control in super-critical power unit. In: Proceedings of the Chinese Automation Congress (CAC). Xi′an, China: IEEE, 2018. 651−654

13 Pan F P, Zhu Y Q, Zhang X. Full process control strategy of fuel based on water-coal ratio of ultra supercritical units. In: Proceedings of the International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC). Ningbo, China: IEEE, 2011. 3750−3753

14 Wang Yu-Qing, Dong Chuan-Min, Zheng Ya-Guang, Zhang Hai-Ping, Miao Guang-Xiang. Supercritical unit full range feedwater control system based on intermediate point enthalpy correction. *Boiler Technology*, 2010, **41**(3): 11−15
(王玉清, 董传敏, 郑亚光, 张海萍, 苗广祥. 基于中间点焓值校正的超临界机组给水全程控制. 锅炉技术, 2010, **41**(3): 11−15)

15 Wang Pi-Zhou, Gu Jun-Jie, Qin Da-Fei, Cao Xiao-Wei. Analysis of the two feed water control system of 600 MW supercritical once-through boiler. *Electric Power Science and Engineering*, 2013, **29**(4): 64−69
(王丕洲, 谷俊杰, 秦达飞, 曹晓威. 600 MW 超临界直流锅炉两种给水控制系统分析. 电力科学与工程, 2013, **29**(4): 64−69)

16 Gu Jun-Jie, Qin Da-Fei, Cao Xiao-Wei, Wang Pi-Zhou, Li Wei, Chen Shun-Qing. A control method based on gain-switching for intermediate point temperature of supercritical pressure boiler. *Proceedings of the CSEE*, 2014, **34**(14): 2274−2280
(谷俊杰, 秦达飞, 曹晓威, 王丕洲, 李伟, 陈顺青. 超临界锅炉中间点温度增益切换控制方法. 中国电机工程学报, 2014, **34**(14): 2274−2280)

17 Qin Zhi-Ming, Zhang Luan-Ying, Gu Jun-Jie. Research and design on the coordinate control system of a once-through boiler unit. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2016, **36**(1): 16−21
(秦志明, 张栾英, 谷俊杰. 直流锅炉单元机组协调控制系统的研究与设计. 动力工程学报, 2016, **36**(1): 16−21)

18 Zhang Qiu-Sheng, Liang Hua, Hu Xiao-Hua, Li Sheng-Guang, Liu Xiao. Two kinds of typical coordinated control systems in ultra-supercritical units. *Electric Power*, 2011, **44**(10): 74−79
(张秋生, 梁华, 胡晓花, 李生光, 刘潇. 超超临界机组的两种典型协调控制方案. 中国电力, 2011, **44**(10): 74−79)

19 Liu Ji-Zhen, Wang Yao-Han, Zeng De-Liang, Chen Yan-Qiao. An AGC control method of thermal unit based on condensate throttling. *Proceedings of the CSEE*, 2017, **37**(23): 6918−6925
(刘吉臻, 王耀函, 曾德良, 陈彦桥. 基于凝结水节流的火电机组AGC控制优化方法. 中国电机工程学报, 2017, **37**(23): 6918−6925)

20 Wang Wei, Sun Yang, Liu Ji-Zhen, Jing Si-Tong. Load-change control strategy for combined heat and power units adapted to rapid frequency regulation of power grid. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, **42**(21): 63−69
(王玮, 孙阳, 刘吉臻, 井思桐. 适应电网快速调频的热电联产机组新型变负荷控制策略. 电力系统自动化, 2018, **42**(21): 63−69)

21 Buche D, Stoll P, Dornberger R, Koumoutsakos P. Multiobjective evolutionary algorithm for the optimization of noisy combustion processes. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 2002, **32**(4): 460−473

22 Song Z, Kusiak A. Constraint-based control of boiler efficiency: A data-mining approach. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2007, **3**(1): 73−83

23 Ito F, Fujimoto K, Kurihara N, Nishimura A, Kobayashi K, Sema T. A combustion monitoring and evaluation system for large utility boilers. *IEEE Power Engineering Review*, 1984, **PER-4**(5): 25−26

24 Li K, Thompson S. A cascaded neural network and its application to modelling power plant pollutant emission. In: Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). Hefei, China: IEEE, 2000. 992−997

25 Zhao S N, Fang Q Y, Yin C G, Wei T S, Wang H J, Zhang C, et al. New fuel air control strategy for reducing NO_x emissions from corner-fired utility boilers at medium-low loads. *Energy-Fuels*, 2017, **31**(7): 6689−6699

26 Zhang Xin, Chen Long. Numerical simulation of burning characteristics and structural optimization design of the high speed combustor of pulverized coal. *Clean Coal Technology*, 2020, **26**(2): 66−72
(张鑫, 陈隆. 高速煤粉燃烧器内燃烧特性数值模拟及结构优化. 洁净煤技术, 2020, **26**(2): 66−72)

27 Wang Dong-Feng, Liu Qian, Han Pu, Zhao Wen-Jie. Combustion optimization in power station based on big data-driven case-matching. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, **37**(2): 420−428
(王东风, 刘千, 韩璞, 赵文杰. 基于大数据驱动案例匹配的电站锅炉燃烧优化. 仪器仪表学报, 2016, **37**(2): 420−428)

28 Booth R C, Roland W B. Neural network-based combustion optimization reduces NO_x emissions while improving performance. In: Proceedings of the IEEE Industry Applications on Dynamic Modeling Control Applications for Industry Workshop. Van-

couver, Canada: IEEE, 1998. 1−6

29 Gu Y P, Zhao W J, Wu Z S. Online adaptive least squares support vector machine and its application in utility boiler combustion optimization systems. *Journal of Process Control*, 2011, **21**(7): 1040−1048

30 Ding J L, Liu C X, Wen M, Chai T Y. Case-based decision making model for supervisory control of ore roasting process. In: Proceedings of the 5th International Composium on Neural Networks. Beijing, China: Springer, 2008. 148−157

31 Ding J L, Chen Q, Chai T Y, Wang H, Su C Y. Data mining based feedback regulation in operation of hematite ore mineral processing plant. In: Proceedings of the American Control Conference. St. Louis, USA: IEEE, 2009. 907−912

32 Kuang M, Li Z Q, Wang Z H, Jing X J, Liu C L, Zhu Q Y, et al. Combustion and NO_x emission characteristics with respect to staged-air damper opening in a 600 MW_e down-fired pulverized-coal furnace under deep-air-staging conditions. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(1): 837−844

33 Zhou H, Mo G Y, Si D B, Cen K F. Numerical simulation of the NO_x emissions in a 1000 MW tangentially fired pulverized-coal boiler: Influence of the multi-group arrangement of the separated over fire air. *Energy and Fuels*, 2011, **25**(5): 2004−2012

34 Park H Y, Faulkner M, Turrell M D, Stopford P J, Kang D S. Coupled fluid dynamics and whole plant simulation of coal combustion in a tangentially-fired boiler. *Fuel*, 2010, **89**(8): 2001−2010

35 Miller J A, Bowman C T. Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1989, **15**(4): 287−338

36 Szecowka L, Poskart M. Techniques to limit NO_X emissions. *Advanced Combustion and Aerothermal Technologies: Environmental Protection and Pollution Reductions*. Dordrecht: Springer, 2007. 47−54

37 Hill S C, Smoot L D. Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2000, **26**(4−6): 417−458

38 de Soete G G. Overall reaction rates of NO and N_2 formation from fuel nitrogen. *Symposium (International) on Combustion*, 1975, **15**(1): 1093−1102

马士全 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室博士研究生. 2011年获得吉林化工学院学士学位. 2014年获得东北电力大学硕士学位. 主要研究方向为微机测控系统、复杂工业过程优化与控制.
E-mail: msq_scholar_ex@163.com
(**MA Shi-Quan** Ph.D. candidate at the State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industry, Northeastern University. He received his bachelor degree from Jilin Institute of Chemical Technology in 2011 and master degree from Northeastern Dianli University in 2014. His research interest covers microcomputer measurement and control system, optimization and control for complex industrial process systems.)

丁进良 东北大学教授. 主要研究方向为生产全流程运行优化, 智能优化和工业智能及应用. 本文通信作者.
E-mail: jlding@mail.neu.edu.cn
(**DING Jin-Liang** Professor at Northeastern University. His research interest covers optimization of the whole production process, intelligent optimization, and industrial artificial intelligence and applications. Corresponding author of this paper.)