

基于零号高压加热器的深度调峰控制策略研究

陈欢乐¹, 归一数¹, 陈伟², 卢宏林²

(1. 上海明华电力科技有限公司, 上海 200090; 2. 淮沪电力有限公司田集第二发电厂, 安徽 淮南 232200)

摘要:为提高燃煤火电机组深度调峰脱硝装置投运率、满足电网快速调峰和调频需求,以及提升机组低负荷运行经济性,设计基于零号高压加热器的宽负荷脱硝、深度调峰和调频等控制策略,针对某660 MW机组加以实施和试验验证。试验结果表明:基于零号高压加热器的深度调峰控制功能,利用机组高压回热系统蓄能参与负荷控制,机组深调期间能够满足1% P_e /min的AGC变负荷和电网频差0.083 Hz内的一次调频响应需求;在机组深度调峰期间可增开汽轮机进汽调阀,减少节流损失,全开工况下可降低发电煤耗超过1.6 g/(kW·h);协同深度调峰期间机组快速负荷响应和脱硝烟温控制需求,能够维持脱硝入口烟温超过安全限值,实现脱硝系统安全稳定投运。

关键词:深度调峰;零号高加;燃煤火电机组;控制;节能减排

中图分类号:TK221 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.01.012

[引用本文格式]陈欢乐,归一数,陈伟,等. 基于零号高加的深度调峰控制策略研究[J]. 热能动力工程,2023,38(1):98-103. CHEN Huan-le, GUI Yi-shu, CHEN Wei, et al. Research on deep peak regulation control strategy based on No. 0 high pressure heater [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(1): 98-103.

Research on Deep Peak Regulation Control Strategy based on No. 0 High Pressure Heater

CHEN Huan-le¹, GUI Yi-shu¹, CHEN Wei², LU Hong-lin²

(1. Shanghai Minghua Electric Power Science & Technology Co., Ltd., Shanghai, China, Post Code: 200090;
2. Tianji No. 2 Power Plant, Huaihu Coal & Power Co., Ltd., Huainan, China, Post Code: 232200)

Abstract: In order to increase the commissioning rate of denitration devices of coal-fired thermal power plant during deep peak regulation, meet the needs of rapid peak regulation and frequency modulation of the power grid, and increase economic efficiency of low-load operation of units, the control strategies of wide-load denitrification, deep peak regulation and frequency modulation based on No. 0 high pressure heater were designed. Aiming at a 660 MW unit, the deep peak regulation was carried out and verified experimentally. The test results show that applying deep peak regulation control technology based on No. 0 high pressure heater and implementing a load control strategy with the energy storage of high-pressure regenerative system, the unit can meet the AGC variable load of 1% P_e /min and the primary frequency modulation response demand within the grid frequency difference of 0.083 Hz. During deep peak regulation of units, the steam turbine admission valve can be kept fully open, reducing the throttling loss and reducing the coal consumption of power generation by more than 1.6 g/(kW·h). In coordination with fast load response and denitration flue gas temperature control requirements, the denitration inlet flue gas temperature can be maintained to exceed safety limit, realizing the safe and stable operation of denitration system.

Key words: deep peak regulation, No. 0 high pressure heater, coal-fired thermal power unit, control, energy conservation and emission reduction

引 言

新能源电力存在波动大,规律性差等问题,大规模的新能源并网会对电网的供电连续性、可靠性和安全稳定性造成较大影响,大容量高参数燃煤火电机组全面参与电网深度调峰已成必然趋势^[1]。但大容量超(超)临界燃煤火电机组参与深度调峰运行,主辅设备接近安全运行边界,存在提高脱硝装置投运率、满足电网快速调峰和调频需求、低负荷运行经济性差等诸多难题^[2]。在保证燃煤火电机组深度调峰安全运行前提下,如何进一步提升机组深度调峰整体性能成为目前研究的难点。

常规火电机组深度调峰技术研究更多的是对锅炉低负荷稳燃、宽负荷脱硝等深度调峰限制因素进行设备和系统改造方面的研究,其中增设零号/附加高压加热器(以下简称零号高加)是解决火电机组深度调峰脱硝系统烟温偏低的技术方法之一^[3]。本文以配置零号高加的火电机组为研究对象,综合考虑机组深度调峰运行经济性、脱硝投入率和调峰调频需求,合理设计基于零号高加的深度调峰控制策略,充分利用机组高压回热系统换热特性和系统蓄能,并设计相匹配的协调控制策略。在保证机组深度调峰工况下脱硝系统安全可靠投运基础上,提高机组深度调峰运行经济性和稳定性,提高机组深度调峰变负荷和调频响应性能,为同类型机组提升深度调峰灵活性和节能减排提供了一种新的方法。

1 机组概况

1.1 机组设备概况

以某典型 660 MW 超超临界机组为深度调峰控制试验研究对象。该机组锅炉采用上海锅炉厂有限公司生产的 SG-1957/28-M6005 型超超临界参数变压运行螺旋管圈直流炉、单炉膛、一次再热、采用四角切圆燃烧方式的 II 型锅炉。汽轮机为上海汽轮机有限公司生产的 N660-27/600/620 型超超临界、一次中间再热、单轴、四缸四排汽、凝汽式汽轮机。其抽汽回热系统原设计有 3 个高压加热器(GJ)、1 个除氧器(DEA)、4 个低压加热器(DJ),共 8 级回热抽汽。为解决机组深度调峰低负荷段脱硝系统烟温偏低问题,实现宽负荷脱硝投运,该机组增

设零号高加系统,即在机组原汽轮机回热系统的 1 号高加和外置式蒸汽冷却器之间增设零号高加。零号高加的抽汽从机组原补汽阀的管道中引出(高压缸第 10 级动叶后汽室),并在抽汽管道上设有抽汽调节阀,通过增加给水回热换热,减少省煤器烟气换热量,从而满足机组低负荷工况下 SCR 入口烟温的要求,改造后机组抽汽回热系统如图 1 所示。

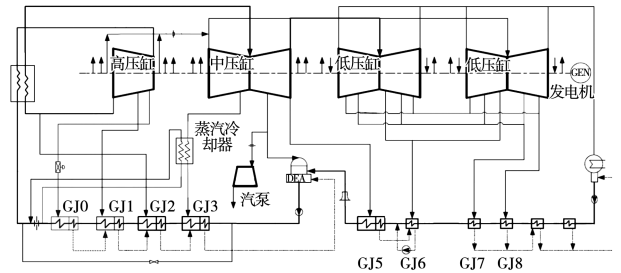


图 1 660 MW 机组抽汽回热系统图
Fig.1 Extraction regenerative system of
a 660 MW unit

1.2 零号高加系统运行方式

机组增设零号高加来解决深度调峰低负荷工况下的脱硝系统安全稳定投运问题,但会显著增加锅炉入口给水温度,存在锅炉省煤器内给水饱和和汽化风险,威胁机组深度调峰安全稳定运行^[4-5]。同时,零号高加的投运直接影响锅炉排烟温度和给水温度,影响锅炉排烟热损失和汽轮机热耗。零号高加投运后,锅炉排烟损失上升,锅炉效率下降,但汽轮机热耗率下降,对机组运行整体经济性影响取决于两者的比重^[6]。因此,零号高加系统无法采用类似其他高压加热器系统完全投运方式,需根据机组运行安全性和经济性,以及宽负荷脱硝需求进行调节。机组不同负荷工况下零号高加投/退对机组脱硝烟温和运行经济性的影响如表 1 所示。

表 1 660 MW 机组零号高加投运性能试验结果
Tab.1 Test results of No.0 high pressure heater
operation performance of a 660 MW unit

工况	SCR 烟温 提升量/℃	锅炉效率 变化量/%	汽机热耗率变化量 /kJ·(kW·h) ⁻¹	供电煤耗变化量 /g·(kW·h) ⁻¹
75% THA	17.02	-0.21	+0.54	+0.64
50% THA	25.20	-0.29	-63.37	-1.00
40% THA	19.95	-0.32	-64.63	-1.40

从机组运行的安全性和经济性考虑,零号高加采用“高退低投”的运行方式,即在 60% 以下负荷投入,60% 以上负荷切除。同时,根据机组宽负荷脱硝要求,机组负荷较高时,零号高加抽汽压力较高,调整零号高加抽汽调节阀节流降压;随着机组负荷的降低,逐步增大调节阀开度,以提高机组深度调峰低负荷段的脱硝系统烟温。

2 零号高加特性分析及试验

零号高加抽汽调阀参与调节将改变加热器抽汽流量,直接影响机组功率和给水温度,将引起回热系统和省煤器系统运行工况变化,对机组稳定运行存在一定扰动^[7]。为了解零号高加抽汽调阀开度改变后脱硝烟温和机组功率的响应特性以及相关参数可能的变化情况和安全边界,开展零号高加系统特性分析和试验。

2.1 零号高加负荷调节能力分析

零号高加配有可调整抽汽阀门,可通过抽汽调阀的快速动作改变抽汽量,抽汽量暂态变化会导致汽轮机做功能力发生改变,从而在短时间内快速改变机组功率输出。改变零号高加抽汽量快速响应负荷变化将会导致高加出口(即省煤器入口)给水温度的改变,但由于下游的锅炉省煤器金属存在巨大的蓄热,通过其对给水的放(吸)热,使得其出口水温在一定时间内基本能维持稳定,省煤器蓄热的缓冲作用可有效避免零号高加抽汽调阀动作对机组正常运行工况的扰动^[8]。因此,零号高加抽汽参与负荷调节,本质上可认为是利用了高加抽汽和省煤器的蓄热能力^[9]。

基于机组热平衡参数,理论分析和计算零号高加负荷调节能力。假设零号高加退出,零号高加抽汽流量全部回到汽轮机中完成后续所有级组的做功,并按照汽轮机热力过程曲线计算该部分蒸汽做功量,即为理论的零号高加最大功率调节能力,相关计算结果如表 2 所示。

2.2 零号高加特性试验

为了验证和分析零号高加的响应特性,在机组 40% P_e (额定负荷),50% P_e 两个低负荷工况下进行零号高加特性试验。负荷稳定工况下,机炉维持手动方式,通过快速改变零号高加抽汽调阀(零抽调阀)开度,观测机组功率、给水温度及脱硝烟温等主

要参数的响应特性。其中,50% P_e 工况的试验曲线如图 2 所示。

表 2 零号高加功率调节理论出力
Tab.2 Theoretical power of No.0 high pressure heater adjustment

工况	抽汽流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	抽汽焓/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	功率变化量/MW
75% THA	27.1	3 375.8	24.4
50% THA	21.9	3 423.7	19.7
40% THA	15.4	3 446.1	13.9

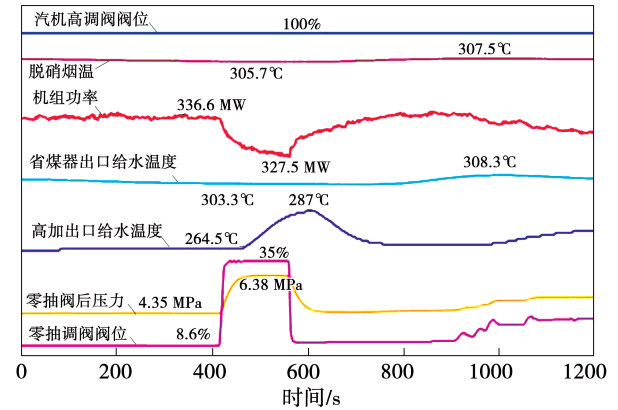


图 2 50% P_e 工况零号高加抽汽调阀特性试验曲线
Fig.2 Test curves of No.0 high pressure heater extraction valve under the condition of 50% P_e .

试验过程中通过调节零号高加抽汽调阀开度,可有效改变高加抽汽流量,改变机组功率输出。其中,50% THA 负荷工况功率输出可改变 10 MW 左右,40% THA 功率输出可改变 5 MW 左右(零号高加抽汽调阀有效行程大致为 10% ~ 40%)。对比发现,实测的零号高加调频能力要低于表 2 中的理论计算值。分析原因:一方面,各负荷段零号高加正常投运时,出于省煤器运行安全和机组运行经济性考虑,抽汽调门通常维持一定的节流度,实际的最大抽汽变化量要低于抽汽流量设计值;另一方面,未考虑外置式蒸汽冷却器和各级抽汽之间的互相影响,即零号高加抽汽减少的流量不会全部到后续级组做功,而会对其他加热器的抽汽流量产生影响,部分抵消零号高加切除而增加的负荷量。考虑到零号高加抽汽调阀调整的灵活性和快速性,其 1% ~ 2% 额定负荷的变负荷能力,可作为低负荷工况机组负荷调节的有效手段。

同时,零号高加抽汽调阀快速动作改变抽汽流量会引起高加出口给水温度的大幅变化。试验中零号高加抽汽调阀由 8.6% 快开至 35%,即使有外置式蒸汽冷却器的缓冲作用,其高加出口给水温度仍从 264.5 ℃ 上升至 287 ℃。但经过省煤器庞大的金属蓄热作为缓冲,省煤器出口给水温度和脱硝系统入口烟温变化存在较大的惯性,且波动大为减弱,确保了机组调节系统中给水控制和脱硝控制的正常工作,零号高加抽汽调阀短时间的扰动不会影响锅炉系统的安全运行。

3 零号高加深度调峰控制策略

零号高加抽汽调阀快速动作不可避免会对机组正常运行产生一定的扰动影响,且消耗机组蓄能^[10]。为减少零号高加参与深度调峰调节对机组安全稳定运行的影响,根据零号高加抽汽调阀的调节特性,合理设计基于零号高加的深度调峰控制策略,充分利用机组高压回热系统换热特性和系统蓄能,并设计相匹配的协调控制策略,在保证机组深度调峰工况下脱硝系统安全可靠投运基础上提高机组深度调峰运行经济性和稳定性、提高机组深度调峰变负荷和调频响应性能。

3.1 零号高加宽负荷脱硝控制策略

基于给水温度与脱硝系统入口烟温间的对应关系和动态响应特性,综合考虑宽负荷脱硝烟温控制的快速性和有效性,设计通过调节给水温度(零号高加抽汽压力)实现对脱硝系统入口烟温的初步控制。同时,设计烟温低修正回路,当机组实际运行过程中偏离设定工况,脱硝系统入口烟温偏低时,可通过修正零号高加抽汽压力设定值来进一步提升烟温,实现深度调峰过程中始终保证脱硝系统入口烟温满足脱硝系统高效安全投运要求。

3.2 汽轮机主蒸汽进汽调阀控制策略

该 660 MW 超超临界机组常规负荷段汽轮机采用全周进汽、节流调节方式,不同负荷工况和不同汽轮机进汽调阀开度下的机组发电煤耗如图 3 所示。从中可知,随着汽轮机进汽调阀开度逐渐增加,进汽节流损失减少,机组运行经济性提升。同时,随着机组负荷工况降低,汽轮机进汽调阀开度增加对机组运行经济性的影响增加,50% P_e 工况汽轮机进

汽调阀全开较常规节流工况可降低机组发电煤耗 1.6 g/(kW·h) 左右,是 100% P_e 工况发电煤耗降低的两倍。因此,在深度调峰工况,通过增开汽轮机进汽调阀具有更大的节能空间。据此,深度调峰工况下设计汽轮机进汽调阀采用高阀位甚至全开运行方式,机组借助零号高加和锅炉负荷调节能力,来保证深度调峰工况下的机组负荷调节灵活性。设计两种深度调峰工况下增开汽轮机进汽调阀控制方式:(1) 在已有炉跟机协调控制方式(CBF)基础上,通过降低深度调峰工况下对应的滑压定值实现;(2) 设计以机跟炉协调控制方式(CTF)为基础的汽机进汽调阀全开经济运行方式,通过降低深度调峰工况对应的滑压定值,维持汽机进汽调阀全开。

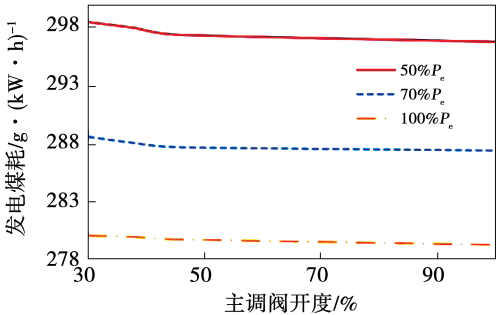


图 3 不同负荷工况汽轮机进汽调阀开度对应发电煤耗曲线

Fig. 3 Power generation coal consumption rate curves corresponding to admission valve opening of steam turbine under different load conditions

3.3 零号高加调峰和调频控制策略

实现零号高加参与深度调峰和调频控制的关键是,如何在保证机组脱硝系统安全可靠投运和机组安全稳定运行的前提下,让控制零号高加抽汽压力的抽汽调阀同时去响应机组负荷指令和调频指令的变化。为此,需要对机组高压回热系统的控制策略进行整体优化。在零号高加抽汽调阀控制抽汽压力的功能上,嵌入对机组负荷指令和调频指令的响应逻辑。当给水温度和脱硝烟温正常时,抽汽调阀响应负荷变化。如果发生脱硝烟温偏低或者给水温度高影响省煤器运行安全,则抽汽调阀闭锁负荷调节功能,确保给水温度不失控和机组安全运行。同时,需对高加系统正常疏水、危急疏水的控制逻辑进行优化,以实现高加水位在零号高加抽汽调阀大幅波

动时的平稳控制,避免危急输水阀门开启和高加保护动作。

零号高加负荷调节的主要作用是提高变负荷初期和一次调频动作时的负荷响应速度,用以改善锅炉侧燃烧率滞后而产生的负荷响应延时。但机组最终的负荷输出和蓄能补充仍然取决于锅炉燃烧率的变化。因此,为提高机组负荷响应能力和稳定运行能力,需要对变负荷和一次调频过程中的锅炉燃烧率控制策略进行优化调整。优化的内容主要有:

- (1) 合理调整锅炉煤水主控指令,实现变负荷和大频差发生时给水和煤量根据指令准确动作和匹配;
- (2) 优化给水控制,兼顾负荷响应和零号高加抽汽调节对锅炉汽温的扰动影响,在负荷变化速度和分离器出口温度波动幅度两者之间寻找平衡点;
- (3) 在锅炉煤水指令上增加智能化的超调指令和大频差超调指令,对超调量基于多种因素进行修正,超调复位不是简单根据负荷指令是否变化结束或调频过程结束,而是综合考虑锅炉和回热系统的蓄能变化情况。基于零号高加的调峰和调频控制系统如图 4 所示。

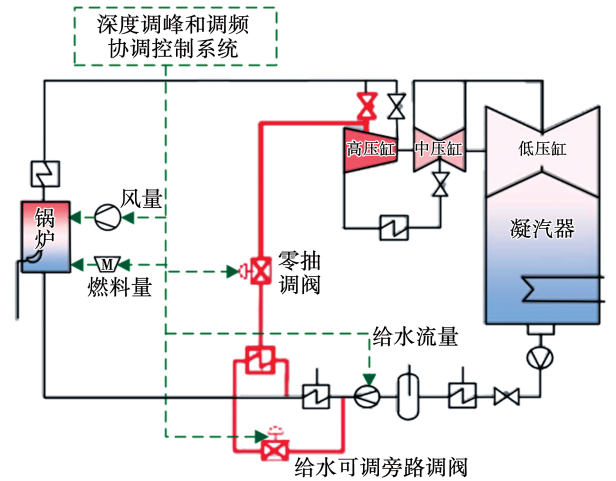


图 4 零号高加调峰和调频控制系统

Fig. 4 Control system of peak regulation and frequency modulation based on No. 0 high pressure heater

3.4 省煤器安全监测控制策略

基于零号高加实施宽负荷脱硝烟温控制和调峰调频控制,可有效提升脱硝系统入口烟温和调峰调频性能,但也存在省煤器内给水饱和和汽化风险,威胁机组深度调峰安全稳定运行^[7-8]。为了实施零号高

加抽汽安全控制,并对运行人员提供及时有效地指导,建立基于省煤器实时进出口参数的零号高加安全抽汽阀位在线计算模型,并将其作为零号高加抽汽调阀控制过程中的安全阀限,避免零号高加参与烟温控制或响应负荷变化而影响省煤器系统的安全稳定运行。

4 应用情况及效果

以该 660 MW 超超临界机组为例,该机组深度调峰工况下投运了 CTF 为基础的汽机高压调门全开经济运行方式,并实施基于零号高加的深度调峰控制系统。图 5 和图 6 分别是在 42% P_e 工况进行模拟转速偏差 -5 r/min (-0.083 3 Hz) 试验曲线和 40% ~ 50% P_e 负荷区间按照 1% P_e /min 变负荷设定速率参与电网自动发电控制 (AGC) 的变负荷运行曲线。

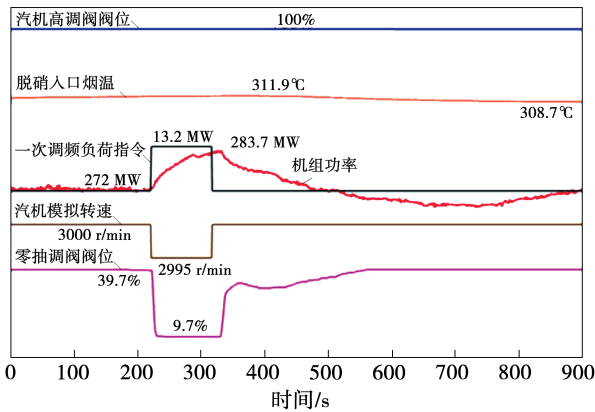
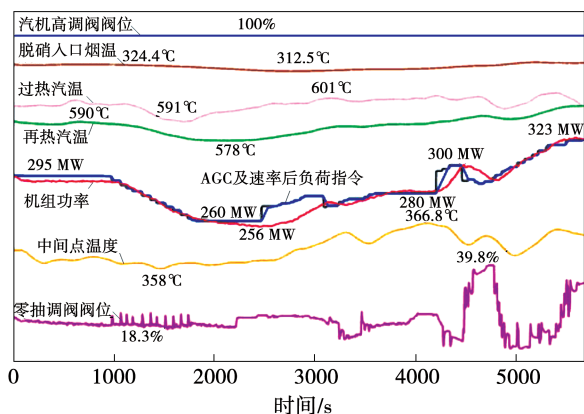


图 5 42% P_e 工况模拟转速偏差 -5 r/min 一次调频试验曲线

Fig. 5 Response curves of primary frequency modulation test with the simulating rotation speed deviation of -5 r/min under the condition of 42% P_e

从图 5 和图 6 可知,采用基于零号高加的调峰和调频控制方式,可使机组在维持汽轮机高压进汽调门全开经济运行方式下具备深度调峰 AGC 和一次调频能力,满足电网深度调峰中小频差工况下的调频需求和快速 AGC 变负荷需求。同时,深度调峰和调频快速变负荷过程中,脱硝系统入口烟温始终维持 310℃ 以上,满足脱硝安全投运要求,并保证省煤器出口给水温度具有一定的欠饱和度,保证机组安全稳定运行。

图 6 50%~40% P_e 工况 AGC 变负荷曲线Fig. 6 Response curves of AGC variable load between 50% P_e and 40% P_e

5 结 论

综合考虑火电机组深度调峰工况下的运行经济性、脱硝投入率和调峰调频需求,研究设计基于零号高加的深度调峰相关控制策略,充分利用机组高压回热系统换热特性和系统蓄能,设计相应的智能协调控制策略,实现回热系统蓄能快速补偿和锅炉系统平稳控制,在保证深度调峰工况下脱硝系统安全可靠投运基础上提高机组深度调峰变负荷和一次调频响应性能,并提高机组深度调峰运行经济性和稳定性。试验研究表明:

(1) 基于零号高加,利用机组高压回热系统蓄能参与负荷控制,机组深度调峰能够满足 1% P_e/min 的 AGC 变负荷和电网频差 0.083 Hz 内的一次调频响应需求;

(2) 借助零号高加和锅炉负荷调节能力,深度调峰工况下可进一步增开汽轮机高压进汽调阀,减少节流损失,提升机组深度调峰运行经济性。汽轮机高压进汽调阀全开工况下,可降低深度调峰发电煤耗超过 1.6 g/(kW·h);

(3) 深度调峰期间协同机组快速负荷响应和脱硝烟温控制需求,并实施省煤器安全监测,能够维持脱硝入口烟温超过 310 °C,实现深度调峰期间脱硝系统安全稳定投运,并保证省煤器系统的安全运行。

参考文献:

[1] 王树东,吕为智. 深度调峰形势下燃煤机组的价值量化评估[J]. 动力工程学报,2020,40(9):701-706.
WANG Shu-dong, LYU Wei-zhi. Quantitative valuation of coal-fired units under deep peak regulation conditions[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2020,40(9):701-706.

[2] 靳旺宗. 660 MW 超临界燃煤机组调峰对经济性及环保的影响研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2017.
JIN Wang-zong. Research on the influence of economy and environmental protection about the peak shaving depth operation for a 660 MW supercritical coal-fired power unit [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2017.

[3] 蒋晓峰,陶有宏,陶 丽,等. 零号高加式宽负荷脱硝技术节能解析[J]. 动力工程学报,2020,40(10):832-837.
JIANG Xiao-feng, TAO You-hong, TAO Li, et al. Energy saving analysis of wide load denitration technology with No. 0 HP heater [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(10):832-837.

[4] 张彦鹏,郑 威,韩 悦,等. 零号高压加热器应用现状及其对机组性能影响[J]. 山东电力技术,2018,45(3):53-56.
ZHANG Yan-peng, ZHENG Wei, HAN Yue, et al. Application status of No. 0 high pressure heater and its influence on unit performance[J]. Shandong Electric Power, 2018, 45(3):53-56.

[5] 余海鹏,康剑南,包伟伟. 1 000 MW 高效宽负荷率超超临界机组给水温度的优化研究[J]. 浙江电力,2017,36(9):67-70.
YU Hai-peng, KANG Jian-nan, BAO Wei-wei. Optimization of feed-water temperature for a 1 000 MW ultra-supercritical unit with high efficiency and wide load[J]. Zhejiang Electric Power, 2017, 36(9):67-70.

[6] 李 涛,陈 坤,辛志波,等. 超超临界 1 000 MW 机组零号高压加热器宽负荷回热技术[J]. 热力发电,2018,47(5):111-117.
LI Tao, CHEN Kun, XIN Zhi-bo, et al. Wide-load regenerative technology of No. 0 high-pressure heater in an ultra supercritical 1 000 MW unit [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5):111-117.

[7] 苏雪刚,卢雨坤,马亮亮,等. 大型超超临界火力发电机组增设零号高压给水加热器的研究[J]. 锅炉制造,2016(4):50-53.
SU Xue-gang, LU Li-kun, MA Liang-liang, et al. Research on adding No. 0 high-pressure heater to ultra supercritical unit [J]. Boiler Manufacturing, 2016(4):50-53.

[8] 沈建峰. 基于零号高压加热器的一次调频技术研究及应用[J]. 汽轮机技术,2021,63(1):53-56.
SHEN Jian-feng. Research and application of primary frequency modulation technology based on No. 0 high pressure heater [J]. Turbine Technology, 2021, 63(1):53-56.

[9] 杜洋洋,冯伟忠. 基于弹性回热技术的调频性能研究[J]. 华东电力,2014,42(9):1944-1949.
DU Yang-yang, FENG Wei-zhong. Research of properties of frequency regulation based on the flexible extraction technology [J]. East China Electric Power, 2014, 42(9):1944-1949.

[10] 常东锋,付亦威,王 伟,等. 1 000 MW 机组增设零号高压加热器经济性分析及运行优化[J]. 热力发电,2018,47(12):17-21.
CHANG Dong-feng, FU Yi-wei, WANG Wei, et al. Economic analysis and operational optimization of adding extra high pressure heater for a 1 000 MW unit [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(12):17-21.