

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2020.06.014

某亚临界锅炉综合升级改造实践及其性能分析

Comprehensive upgrading reconstruction and performance
analysis of a subcritical boiler

吴思明¹, 童家麟², 吴跃森³, 齐勇¹, 孙五一³

WU Siming¹, TONG Jialin², WU Yueseng³, QI Yong¹, SUN Wuyi³

(1. 国电浙江北仑第一发电有限公司, 浙江 宁波 315800; 2. 国网浙江省电力有限公司
电力科学研究院, 杭州 310014; 3. 杭州意能电力技术有限公司, 杭州 310014)

(1. Guodian Zhejiang Beilun No. 1 Power Generation Company Limited, Ningbo 315800, China; 2. Electric
Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Company Limited, Hangzhou 310014,
China; 3. E. Energy Technology Company Limited, Hangzhou 310014, China)

摘要:为了提高机组运行的经济性、灵活性以及满足国家环保要求,对在役高能耗、高排放的燃煤机组进行综合升级改造非常有必要。以某600 MW亚临界燃煤机组为研究对象,从改造方案、项目、效果等全方位研究此次综合升级改造,结果表明,改造后机组满足扩容至630 MW的要求,锅炉效率较改造前提高0.20~0.70百分点,供热工况下供电煤耗已低于国家能耗指标300 g/(kW·h),同时低负荷下选择性催化还原(SCR)入口烟气温度亦有较大程度改善。

关键词:综合升级改造; 锅炉效率; 供电煤耗; 燃煤机组

中图分类号:TK 227.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2020)06-0066-06

Abstract: In order to improve the economy and flexibility of units and meet environment requirements, it is necessary to upgrade and reconstruct energy-intensive and high-emission coal-fired units. Taking a 600 MW subcritical coal-fired unit as researching object, the schemes, items and effects of the comprehensive upgrading were studied. The results indicated that the unit after reconstruction met the demands of the expansion to 630 MW. Efficiency of the boiler has increased by 0.2% ~ 0.7%, roughly and the net coal consumption rate under heating operation has been below 300 g/(kW·h), the national standard. Meanwhile, the flue-gas temperature at the SCR inlet during low-load running has been improved.

Keywords: comprehensive upgrading and reconstruction; boiler efficiency; net coal consumption rate; coal-fired units

0 引言

随着国民经济的发展和国家对环境保护的要求日趋严格,燃煤机组的发展进入了一个新的时期,国家节能减排要求的不断提升、电能过剩现象日益明显、高效低能电源点的不断投入、火电机组深度调峰运行常态化等^[1],使高能耗、高排放的老式在役燃煤机组的经济运行面临新的挑战。

根据《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020年)》要求,至2020年,现役600 MW及以上机组(除空冷机组外)改造后平均供电煤耗低于300 g/(kW·h)。浙江省印发《浙江省创建国家清洁能源示范省行动计划(2016—2017年)》,要求至2017

年力争全省煤电机组平均供电煤耗低于310 g/(kW·h)。同时GB/T 13223—2011《火电厂大气污染物排放标准》要求,燃煤发电机组NO_x、SO₂、粉尘的质量浓度排放限值分别为100、50、20 mg/m³,并对重点区域规定了更严格的质量浓度排放限值。这些计划和标准的实施,从供电煤耗、运行灵活性、污染物排放等多个方面对燃煤机组提出了更高的要求,使得未达到标准的老式燃煤机组的综合升级改造迫在眉睫^[2-3]。因此,本文以某600 MW亚临界燃煤机组为研究对象,该机组自投产起已运行20余年,由于其设计采用国外20世纪70年代技术,通流设计理念和技术水平都较为落后,加之运行老化等因素^[4],使得机组的能耗水平已远低于国内同类型燃煤机组。机组于2018年进行了整体升级改造,改造后机组在降低能耗、污染物排放等方面均取得了良好的效果。

收稿日期:2019-06-11;修回日期:2019-10-11

本文重点着眼于该机组锅炉部分改造,从改造方案、项目、效果等全方位研究此次升级改造,以期与国内同类型锅炉改造提供参考。

1 研究对象概况

某电厂 #1 机组锅炉为亚临界压力、单炉膛、带辐射式再热器、强制循环、平行烟道、单汽包Ⅱ型煤粉炉,配用带中速磨煤机的直吹式制粉系统,采用四角切圆燃烧方式,平衡通风,全钢架悬吊结构,半露天布置,并配置有切向燃烧摆动煤粉燃烧器,锅炉尾部烟道布置 2 台三分仓容克式空气预热器(以下简称空预器)。

#1 机组 2014 年和 2015 年主要运行指标统计见表 1。目前,机组平均负荷率在 72.00% 左右,满负荷下,锅炉效率约为 92.90%,汽轮机热耗率在 8200 kJ/(kW·h) 左右,供电煤耗(纯凝工况)在 326.0 g/(kW·h) 左右,煤耗指标已落后于远期国家能耗指标 300.0 g/(kW·h) 的要求。

表 1 #1 机组 2014 和 2015 年主要运行指标统计

Tab.1 Main operation indicators of No.1 unit in 2014 and 2015

名称	2014 年	2015 年
发电量/(GW·h)	3800.929	2886.641
供热量/TJ	1009.5	802.7
利用小时数	6334.88	4811.07
平均负荷/MW	446.3	422.4
负荷率/%	74.39	70.40
锅炉效率(100% ECR)/%	92.89	92.90
汽轮机热耗(100% THA)/ [kJ·(kW·h) ⁻¹]	8171	8200
发电厂用电率/%	4.85	5.12
供电煤耗(含供热)/ [g·(kW·h) ⁻¹]	324.57	321.29
供电煤耗(纯凝)/ [g·(kW·h) ⁻¹]	326.47	325.09

注:ECR 为锅炉经济连续出力;THA 为热耗率验收工况。

#1 机组除了供电煤耗较高外,锅炉侧还存在以下问题。

(1)低负荷时选择性催化还原(SCR)脱硝系统入口烟温偏低(负荷低于 350 MW 时低于 295℃),导致脱硝系统被迫撤出。脱硝系统撤出后锅炉出口 NO_x 排放质量浓度达到了 500 mg/m³,在冬季低负荷时 SCR 脱硝系统入口烟温更低,在负荷低于 370 MW 时 SCR 脱硝系统就有可能撤出。目前深度调峰至 40% ECR 负荷成为常态的情况下^[5],SCR 脱硝系统入口烟温偏低已严重影响 #1 机组深度调峰性能,同时也严重影响脱硝催化剂使用寿命和下游空预器安全运行。

(2)过热器、再热器两侧汽温略有偏差。这与炉膛出口烟气残余旋转和两侧受热面结渣程度不同有关^[6]。同时,满负荷下再热器减温水量偏差约 40 t/h,但低负荷下再热汽温又有欠温现象,为 520 ~ 530℃。

(3)改造前 SCR 脱硝系统入口 NO_x 质量浓度较高,满负荷下,下 5 层制粉系统投入,NO_x 质量浓度约为 307 mg/m³,若投入上 5 层制粉系统,NO_x 质量浓度则会更高。低负荷下 SCR 脱硝系统入口 NO_x 质量浓度约 400 mg/m³。

2 综合升级改造主要方案和项目

2.1 改造主要方案

此次 #1 机组改造内容包括节能、减排、优化升级、提高负荷灵活性、增容、增大供热能力等多项内容,使得机组安全性、经济性等主要指标达到国内亚临界机组先进水平,锅炉侧总体目标如下。

(1)在机组经济性方面,满负荷下锅炉效率不低于 93.20%,再热汽温由 540℃ 提升至 573℃。

(2)在降低污染物排放和提高负荷灵活性方面,各负荷下炉膛出口 NO_x 质量浓度不高于 280 mg/m³,在 30% ECR 负荷下 SCR 脱硝系统入口烟气温度高于 295℃。

(3)在增容方面,机组铭牌出力达到 630 MW。

(4)在增大供热能力方面,新增供热能力 120 t/h,一方面可以满足机组停备用较多时的供热需求,另一方面可以进一步降低机组供电煤耗。

2.2 改造主要项目

2.2.1 冷灰斗总体下移改造

由于现有锅炉的炉膛结构尺寸偏小、热负荷偏高,为满足低氮燃烧器改造、降低 NO_x 排放质量浓度、降低飞灰含碳量、降低炉膛热负荷、改善炉膛的结渣状况,根据现有的炉膛结构布置情况,结合炉膛底部出渣设备的改造,将炉膛冷灰斗下降 2.00 m,燃烧器也同步下移,即炉膛水冷壁向下延伸 2.00 m,这也是国内首台冷灰斗总体下移改造项目。冷灰斗总体下移改造示意图如图 1 所示。这样一方面可以增加炉膛高度,使得煤粉颗粒在炉内停留时间延长,提高了煤粉的燃尽率;另一方面,加长了还原区长度,降低了炉膛出口 NO_x 质量浓度。改造后,由于炉膛容积增大,炉膛容积热负荷由 102.1 kW/m³ 下降至 97.9 kW/m³,炉膛的结渣状况有所改善,同时燃烧器截面热负荷未降低,保证了机组的低负荷稳燃能力。由图 1 可知,锅炉前炉膛需沿从冷灰斗上方约 2.50 m 标高处截断(截断处的标高约为 21.02 m),将冷灰斗整体降低 2.00 m,在非加固

位置新增 2.00 m 水冷壁管与原断面管排对接;考虑冷灰斗整体下移吊装过程中吊点等加固位置受力较大,在加固装置拆除后对加固区域水冷壁进行整体更换,从而使炉膛高度增加 2.00 m。此次冷灰斗总体下移改造的成功,为现有燃煤锅炉有效增加炉膛高度提供了一个新的改造方向。

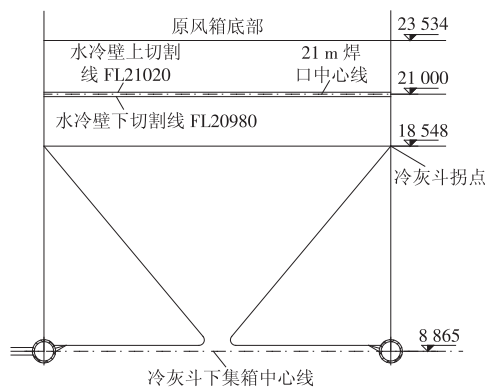


图 1 冷灰斗总体下移改造示意

Fig. 1 Overall downward movement of the cold ash bucket

2.2.2 低氮燃烧相关设备改造

由于原有低氮燃烧器性能已不能满足锅炉现阶段排放的要求,此次改造中将原有燃烧器更换为上海锅炉厂新型的 LNCFS 垂直浓淡燃烧器,LNCFS 垂直浓淡燃烧器在降低 NO_x 质量浓度排放的同时,也可提高锅炉低负荷稳燃能力和燃烧效率。同时,在原分离燃尽风的上方新增一层分离燃尽风喷口,改造后分离燃尽风占总风量的 30% 左右,这样燃尽风较之前有更佳的穿透深度和覆盖广度。

2.2.3 再热器受热面改造

为了提高再热汽温度,需要对再热器受热面进行改造。原墙式再热器受热面全部布置在炉膛上部前墙水冷壁管子上,共由 270 根 $\phi 63$ mm 管子并联组成。在此基础上,在炉膛上部的侧墙水冷壁上增加侧墙再热器,两侧墙各增加 132 根 $\phi 60$ mm 管子,增加侧墙再热器进出口集箱和连接管道。墙式再热

器改造前后数据对比见表 2,改造后再热器管屏较改造前增加约 1 m,由于墙式再热器与水冷壁管在制造厂内就已组装成一体,因此在墙式再热器改造的同时对相应的水冷壁管和钢架平台也进行了改造。

高温再热器和低温再热器受热面原布置在炉膛出口折焰角上部和锅炉水平烟道内,原高温再热器共 760 根 $\phi 63$ mm 的管子,低温再热器共 760 根 $\phi 70$ mm 的管子,改造时在高温再热器和低温再热器之间增加中间混合集箱,同时增加高温再热器的受热面面积,两级再热器改造前后数据对比见表 3。根据现有参数进行核算:再热汽温提升后,机组出力可增加 5%,即可满足机组铭牌出力达到 630 MW 的要求。

表 2 墙式再热器改造前后数据对比

Tab. 2 Comparison of data before and after wall reheater transformation

墙式再热器	改造前	改造后
材质	SA-213T22	12Cr1MoVG
管子规格/mm	$\phi 63$	$\phi 60$
纵向排数	270	534
受热面积/ m^2	300	690

2.2.4 分级省煤器改造

为了提高脱硝系统投入率,综合锅炉各负荷下的烟气温度和脱硝设备要求的工作烟温范围,考虑将 #1 锅炉 SCR 脱硝系统入口烟气温度提高约 20 $^{\circ}\text{C}$ 。综合比较分级省煤器、省煤器烟气旁路、省煤器给水旁路、增设 #0 高压加热器提高 SCR 脱硝系统入口烟气温度的几种方案,为保证低负荷下的锅炉运行经济性,确定将分级省煤器改造作为此次改造方案^[7]。在改造中,将旧省煤器与前后包墙同时更换,新省煤器面积根据计算做重新调整,具体更换范围如图 2 所示。同时,在 SCR 脱硝系统后增设一定量的省煤器受热面,通过减少 SCR 脱硝系统前省煤器的吸热量,以达到提高 SCR 脱硝系统入口温度的目的。

表 3 两级再热器改造前后数据对比

Tab. 3 Comparison of data before and after the two-stage reheater transformation

项目	改造前		改造后	
	高温再热器	低温再热器	高温再热器	低温再热器
材质	TP-304	SA-250T11	SA213-Super304 SB SA213-T92	12Cr1MoVG
管子规格/mm	$\phi 63$	$\phi 70$	$\phi 63$	$\phi 63$
横向排数	38	76	50	76
节距/m	508	254	381	254
每排管子数	20	10	16	12
总管子数	760	760	800	912

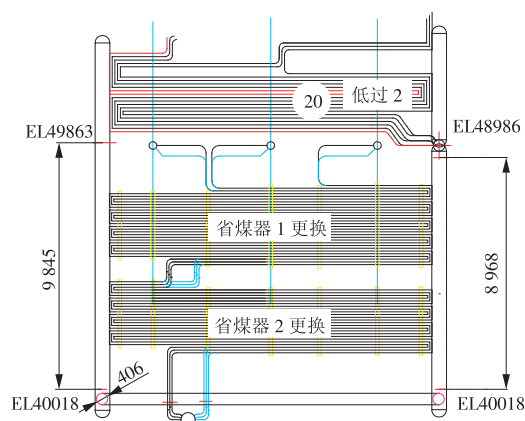


图2 原有省煤器更换范围

Fig.2 Replacement range of the original economizers

2.2.5 供热系统改造

原#1机组供热量为再热冷段抽汽量80 t/h,在目前机组负荷率较低、停备用较多的情况下,难以满足系统供热要求。因此,在本次综合升级改造中,新增再热热段抽汽量120 t/h,抽汽点选在中压联合汽门(以下简称中联门)前。由于低负荷时再热蒸汽压力较低,可能不能满足热用户要求,则可配合中联门开度进行适度调压以满足热用户需要。

3 改造效果评价

3.1 经济性评价

改造前、后锅炉效率比较是评价此次综合升级改造效果的重要指标,如图3所示。由图3可知,综合升级改造后3个负荷下锅炉效率均比改造前提高0.20~0.70个百分点,这与炉膛高度增加后,煤粉颗粒在炉内停留时间延长,煤粉燃尽率有所提高有关。值得注意的是,改造后在50% ECR负荷下锅炉效率比改造前有了较为明显的提高,达到了0.67个百分点,这与综合升级改造后增加了分级省煤器有关,在低负荷保证SCR脱硝系统入口烟温的前提下,烟气流经脱硝装置后,余热可以被后一级省煤器利用,从而降低了空预器入口烟气温度,减少了排烟损失,这从另一个侧面说明在深度调峰已成为常态的形势下,分级省煤器改造有利于保证锅炉低负荷下的效率。新增分级省煤器后,锅炉负荷从50% ECR下降至40% ECR时,效率仅下降0.32个百分点,下降幅度低于未进行此类改造的国内同类型锅炉^[8]。

改造后机组煤耗能否低于300.0 g/(kW·h)是评价此次改造的另一重要指标。根据考核试验结果,计算供热和未计算供热工况下3个负荷下供电煤耗比较如图4所示。由图可知,若不计算供热,3个负荷下的供电煤耗均略高于国家能耗指标300.0 g/(kW·h),且随着负荷的下降,供电煤耗呈上升趋势。若参考文献[9]中的供热机组供电煤耗

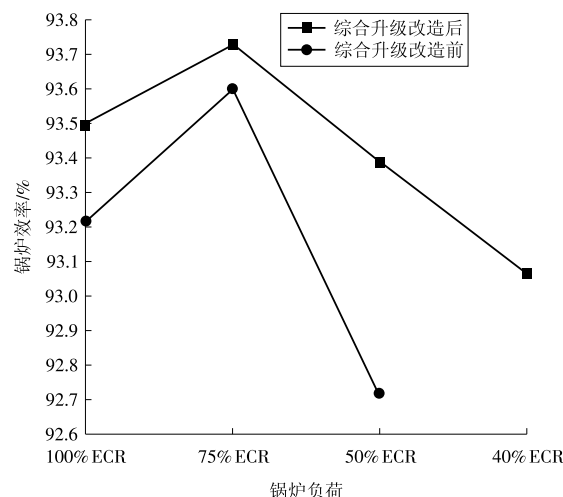


图3 综合升级改造前后锅炉效率比较

Fig.3 Comparison of boiler efficiency before and after comprehensive upgrade

计算方法,采用热电分摊比的计算方法对供热工况下的供电煤耗进行计算,按供热热量冷段再热抽汽80 t/h、热段再热抽汽120 t/h计,3个负荷下供电煤耗可分别下降11.3、16.3、21.0 g/(kW·h),已低于300.0 g/(kW·h)的能耗指标。

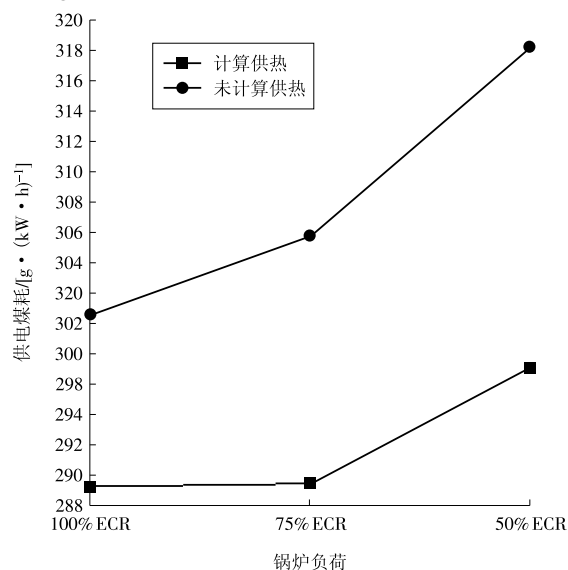


图4 计算供热和未计算供热工况下3个负荷下供电煤耗比较

Fig.4 Comparison of net coal consumption rates under three loads

3.2 NO_x质量浓度排放和SCR脱硝系统投入

随着近年来国家对燃煤机组环保要求的不断提高^[10-12],锅炉各负荷下的环保设备,特别是SCR脱硝系统的稳定运行和炉膛出口NO_x质量浓度亦是考量机组综合升级改造效果的又一重要指标。改造前、后NO_x质量浓度排放和SCR脱硝系统进口烟气温度比较见表4。

由表4可知,改造前后SCR脱硝系统入口烟气

表 4 改造前后 NO_x 排放和 SCR 进口烟气温度比较

Tab. 4 Comparison of nitrogen oxide emissions and flue gas temperature at SCR inlet before and after transformation

项目	综合升级改造前			综合升级改造后			
	100% ECR	75% ECR	50% ECR	100% ECR	75% ECR	50% ECR	40% ECR
SCR 脱硝系统入口烟气 NO _x 质量浓度/(mg·m ⁻³)	307.0	338.0	387.0	239.0	240.0	268.0	342.0
SCR 脱硝系统出口烟气 NO _x 质量浓度/(mg·m ⁻³)	20.8	23.3	37.1	13.8	21.1	24.3	13.1
SCR 脱硝系统入口烟气温度/℃	351	324	296	373	356	317	314

中 NO_x 质量浓度随着负荷降低而上升,这与低负荷时大幅提高炉膛氧量等因素有关,因为更高的氧含量促进了燃料型 NO_x 的生成,并且抑制了 NO_x 的还原,但 SCR 脱硝系统出口烟气中 NO_x 质量浓度并不高,均在 40 mg/m³ 内,说明脱硝效率良好。值得注意的是,改造后 SCR 脱硝系统入口烟气 NO_x 质量浓度较改造前有了明显下降,这与燃烧器下移、还原区长度增加及低氮燃烧器改造有关,还原区长度的增加和低氮燃烧效果的改善提高了分级燃烧的效果,有利于主燃烧区生成的 NO_x 还原。这为锅炉未进行增加炉膛高度改造的前提下,有效降低 NO_x 质量浓度排放提供了一个新的改造思路。锅炉增设分级省煤器后,40% ECR 负荷下 SCR 脱硝系统入口烟气温度可保持在 314℃ 左右,高于 SCR 脱硝系统设计保证烟气温度 295℃,较改造前低负荷下 SCR 脱硝系统入口烟气温度有了较大程度改善,改造前 50% ECR 负荷下 SCR 脱硝系统入口烟气温度就已接近于 295℃,说明分级省煤器改造后锅炉运行的灵活性亦有了较大程度提高。

4 结束语

某亚临界 600 MW 机组整体综合升级改造项目经过冷灰斗总体下移、再热器受热面改造、分级省煤器改造、供热系统改造等项目后,使得机组安全性、经济性等主要指标达到国内亚临界机组先进水平。项目投产后,机组增容 5%,锅炉效率较改造前提高约 0.20~0.70 百分点,供电煤耗较改造前亦有了大幅下降,供热工况下供电煤耗已低于国家能耗指标 300 g/(kW·h),炉膛出口 NO_x 亦有了一定程度下降,同时低负荷下 SCR 脱硝系统入口烟气温度也有了较大程度改善,满足了深度调峰下 SCR 脱硝系统投运要求,提高了机组调峰的灵活性,改造取得了良好的效果。

参考文献:

[1] 饶宇飞,王凯文,李晓萌,等. 大规模外网受电及新能源接入下河南电网调峰形势评估[J]. 电网与清洁能源,

2017,33(4):105-112.

RAO Yufei, WANG Kaiwen, LI Xiaomeng, et al. Assessment on peak regulation of Henan Grid with large-scale power injection from external grids and new energy integration[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(4): 105-112.

[2] 谢大幸,石永锋,郝建刚,等. 600 MW 等级亚临界机组跨代升级改造技术应用研究[J]. 发电与空调, 2015, 36(6): 23-26.

XIE Daxing, SHI Yongfeng, HAO Jiangang, et al. Application of dross-generation upgrade reconstruction technology in the 600 MW subcritical unit[J]. Power Generation & Air Condition, 2015, 36(6): 23-26.

[3] 何健康,郑彩平. 国产 300 MW 机组综合升级改造的实践[J]. 广东电力, 2013, 26(7): 93-96.

HE Jiankang, ZHENG Caiping. Practice of comprehensive upgrading and reconstruction of domestic 300 MW unit[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(7): 93-96.

[4] 常征,张振华,赵文波,等. 亚临界机组提升参数与跨代升级改造方案比较[J]. 发电与空调, 2017, 38(1): 21-24.

CHANG Zheng, ZHANG Zhenghua, ZHAO Wenbo, et al. Upgrade scheme comparison between parameter-increase and cross-generation for subcritical units, 2017, 38(1): 21-24.

[5] 林俐,邹兰青,周鹏,等. 规模风电并网条件下火电机组深度调峰的多角度经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 21-17.

LIN Li, ZOU Lanqing, ZHOU Peng, et al. Multi-angle economic analysis on deep peak regulation of thermal power units with large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 21-17.

[6] 党黎军,杨辉,应文忠,等. 600 MW 超超临界锅炉再热汽温偏低问题分析及技术改造[J]. 动力工程学报, 2017, 37(4): 261-266.

DANG Lijun, YANG Hui, YING Wenzhong, et al. Analysis and technical retrofit on low reheat steam temperature of a 660 MW ultra-supercritical boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2017, 37(4): 261-266.

[7] 徐昶,徐良,胡杰,等. 600 MW 火电机组提高 SCR 入口烟温方案研究[J]. 锅炉技术, 2015, 46(1): 61-64.

XU Chang, XU liang, HU jie, et al. Research on improving the temperature of SCR entrance gas in 600 MW thermal power units[J]. Boiler Technology, 2015, 46(1): 61-64.

- [8] 章良利,李敏,周晓蒙,等. 深度调峰下燃煤机组运行方式对能耗的影响[J]. 中国电力,2017,50(7):85-89.
ZHANG Liangli, LI Min, ZHOU Xiaomeng, et al. Impact of the running modes of coal-fired units on energy consumption in in-depth peak load cycling[J]. Electric Power, 2017, 50(7):85-89.
- [9] 张陆,陈健. 供热供电煤耗的计算方法[J]. 热力发电, 2001(1):22-23.
ZHANG Lu, CHENG Jian. Calculation method of coal consumption rate for heat and electricity supply[J]. Thermal Power Generation, 2001(1):22-23.
- [10] 李海浩,李会军,高明朗. 600 MW 燃煤机组并网前投入脱硝系统的技术实践[J]. 华电技术,2018,40(10):63-64,68.
LI Haihao, LI Hujun, GAO Minglang. Technical practice of denitration system for 600 MW coal-fired unit before grid-connection[J]. Huadian Technology, 2001(1):22-23.
- [11] 关祥丰,焦裕龙,吴小明. 2 × 670 MW 火电机组脱硝全工况改造分析及应用[J]. 华电技术,2017,39(1):68-

(上接第65页)33(2):37-39.

- [7] 郑涛,赵彦杰,金颖,等. 晶闸管控制变压器式可控高抗本体保护方案[J]. 电网技术,2014,38(9):2538-2543.
ZHANG Tao, ZHAO Yanjie, JIN Ying, et al. Research on protection scheme for thyristor controlled transformer controllable shunt reactor[J]. Power System Technology, 2014, 38(9):2538-2543.
- [8] 郑涛,赵彦杰,金颖. 特高压磁控式并联电抗器保护配置方案及其性能分析[J]. 电网技术,2014,38(5):1396-1401.
ZHANG Tao, ZHAO Yanjie, JIN Ying. Research on protective configuration for a UHV magnetically controlled shunt reactor[J]. Power System Technology, 2014, 38(5):1396-1401.
- [9] 陈松林,王志鸿,郑玉平,等. 新型微机电抗器保护的研制与开发[J]. 电力系统自动化,2003,27(24):70-73.
CHEN Songlin, WANG Zhihong, ZHENG Yuping, et al. Research and development of a new digital shunt reactor protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24):70-73.
- [10] 刘小华,黄彦全,李晓玉,等. 应用谐波电流比的并联电抗器补偿装置电抗器匝间短路保护[J]. 电力系统及其

70,72.

- GUAN Yufeng, JIAO Yulong, WU Xiaoming. 2 × 670 MW thermal power station denitration system overall working conditions improvement analysis and application[J]. Huadian Technology, 2017, 39(1):68-70,72.
- [12] 曲立涛,李超,于红梅,等. 燃煤机组深度调峰对环保设施的影响分析及对策[J]. 东北电力技术,2016,37(10):38-44.
QU Litao, LI Chao, YU Hongmei, et al. Impact analysis and countermeasures on coal fired units in-depth peak regulation of environmental protection facilities[J]. Northeast Electric Power Technology, 2016, 37(10):38-44.

(本文责编:齐琳)

作者简介:

吴思明(1985—),男,浙江宁波人,工程师,工程硕士,从事火电厂锅炉本体优化和节能减排方面的工作(E-mail:173399706@qq.com)。

自动化学报,2016,28(7):112-116.

LIU Xiaohua, HUANG Yanquan, LI Xiaoyu, et al. Protection of reactor on shunt capacitance compensator against inter-turn fault based on harmonic current ratio[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2016, 28(7):112-116.

(本文责编:陆华)

作者简介:

行武(1988—),男,陕西渭南人,工程师,工学硕士,从事电力系统继电保护的研究工作(E-mail:wu-xing@sac-china.com)。

郭晓(1982—),男,山东淄博人,正高级工程师,工学硕士,从事电力系统继电保护的研究工作(E-mail:xiao-guo@sac-china.com)。

王哲(1990—),男,江苏南京人,工程师,工学硕士,从事电力系统继电保护的研究工作(E-mail:zhe-wang@sac-china.com)。

史博伦(1992—),男,河南许昌人,工程师,工学硕士,从事电力系统继电保护的研究工作(E-mail:bolun-shi@sac-china.com)。