

# 高低压旁路供热改造对机组调峰能力的影响分析

董伟<sup>1</sup>, 司派友<sup>1</sup>, 王维萌<sup>1</sup>, 张鹏<sup>2</sup>

(1. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045;

2. 华北电力科学研究院有限责任公司西安分公司, 陕西 西安 710000)

**摘要:** 针对现阶段热电联产机组供热期调峰能力不足的问题, 以某 350 MW 超临界燃煤机组为案例, 介绍了其高低压旁路供热改造方案, 并以改造后机组的实际运行数据为基础, 对改造前后机组的运行特性和调峰能力进行了详细的对比分析。结果表明: 案例机组进行高低压旁路供热改造后, 在保证机组供热期热负荷和热段再热蒸汽流速不超限的情况下, 机组电负荷调峰下限可由原来的 230.9 MW 降至 161.4 MW, 降低 30.1%; 当案例机组两个中压调节汽门关至 42% 时, 机组电负荷调峰下限可进一步降至 140.8 MW; 旁路供热蒸汽量占比可由原来的 56.3% 提高至 61.9%, 提高 5.6%, 机组的调峰能力得到进一步提高。

**关键词:** 热电联产; 高低压旁路供热; 调峰能力; 运行特性

中图分类号: TK262

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.08.021

[引用本文格式] 董伟, 司派友, 王维萌, 等. 高低压旁路供热改造对机组调峰能力的影响分析[J]. 热能动力工程, 2023, 38(8): 169-175. DONG Wei, SI Pai-you, WANG Wei-meng, et al. Analysis of the influence of HP-LP bypass heat supply reformation on unit's peak shaving capability[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(8): 169-175.

## Analysis of the Influence of HP-LP Bypass Heat Supply Reformation on Unit's Peak Shaving Capability

DONG Wei<sup>1</sup>, SI Pai-you<sup>1</sup>, WANG Wei-meng<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>2</sup>

(1. North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing, China, Post Code: 100045;

2. Xi'an Branch of North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an, China, Post Code: 710000)

**Abstract:** In view of the problem of insufficient peak shaving capacity during the heating period of the cogeneration unit at current stage, the reformation scheme of HP-LP bypass system combining with heating in a 350 MW supercritical coal-fired unit was introduced. Based on the actual operation data of the unit after the reformation, a detailed comparative analysis of the operating characteristics and peak shaving capabilities of the unit before and after the reformation was carried out. The results show that after the HP-LP bypass heat supply reformation, the lower limit of the unit's electrical load peak regulation can be reduced from 230.9 MW to 161.4 MW with a reduction of 30.1%, by ensuring the heat load of the unit during the heating period is satisfied and the flow rate of reheated steam in hot section do not exceed the limit; when the two middle pressure regulating valves of the case unit are closed to 42%, the lower limit of the unit's electrical load peak regulation can be further reduced to 140.8 MW; the proportion of bypass heating steam increases from 56.3% to 61.9% with an increase of 5.6%. The peak shaving capacity of the unit has been further improved.

**Key words:** combined heat and power generation, HP-LP bypass system combining with heating, peak shaving capability, operating characteristics

收稿日期: 2022-09-30; 修订日期: 2022-10-21

基金项目: 华北电力科学研究院青年创新项目(KJZ2022004)

Fund-supported Project: Youth Innovation Project of North China Electric Power Research Institute (KJZ2022004)

作者简介: 董伟(1990-), 男, 华北电力科学研究院安全监督中级师。

## 引言

近年来,随着风电和光伏等新能源电力在电网装机容量占比的增加,为保障电力系统安全运行,国家能源局先后下发通知,要求现存火电机组逐步进行灵活性改造,挖掘其深度调峰能力,以便提高电网对新能源消纳能力<sup>[1-4]</sup>。

对于北方热电联产机组,灵活性改造的关键点在于“热电解耦”。目前,主流的方案主要有:电极锅炉供热、增设储热罐供热、低压缸零出力和高低压旁路供热<sup>[5-6]</sup>。其中,高低压旁路供热因其热电解耦能力强、系统改造投资小、运行调整灵活等优势,得到越来越多的青睐<sup>[7-8]</sup>。

国内外学者对高低压旁路供热的研究主要集中在旁路供热方案的理论建模及性能分析<sup>[9-11]</sup>、不同热电解耦方案的对比分析<sup>[6,12]</sup>和旁路供热改造后控制方式的变化等方面<sup>[13-14]</sup>。然而,目前的研究主要侧重于改造方案的可行性和性能分析,较少有关注改造后机组实际运行特性变化的。实际上,机组进行高低压旁路供热改造后,运行过程中,由于高中压缸蒸汽流量偏差和再热蒸汽流量的增大,汽轮机轴系和热段再热蒸汽流速等都会发生相应的变化,而这些变化叠加起来会对改造后机组的调峰能力和供热能力产生综合影响<sup>[11,15]</sup>。因此,需结合实际运行数据对高低压旁路供热改造对机组的运行特性影响进行综合分析。

本文以某 350 MW 超临界燃煤机组为案例,首先介绍了其高低压旁路供热改造方案,根据改造后机组的实际运行数据,对旁路供热改造后汽轮机轴向推力变化、机组再热蒸汽流速变化等进行了详细分析,并对改造前后机组的调峰能力进行了对比分析;提出中压调节汽门参调方案,进一步挖掘旁路供热的调峰潜力,为同类型机组进行高低压旁路供热改造及改造后的运行优化提供了借鉴和依据。

## 1 案例机组介绍

本文所选案例机组为某典型 350 MW 超临界间接空冷燃煤供热机组,其汽轮机是由东方汽轮机厂生产的 CJK350/277-24.2/0.45/566/566 型 350 MW、超临界、一次中间再热、单轴、两缸两排汽、间

接空冷、抽汽凝汽式汽轮机。锅炉型号为 B&WB-1242/25.4-M,是北京巴布科克·威尔科克斯有限公司生产的超临界参数、一次中间再热、单炉膛、前后墙对冲燃烧方式、平衡通风、固态排渣、紧身封闭、全钢构架的 II 型直流炉。发电机为东方电气集团东方电机有限公司生产的 QFSN-350-2-20 型 350MW 水氢氢冷却汽轮发电机,采用自并励静止励磁。机组热耗率验收(Turbine Heat Acceptance, THA)工况和两个供热工况下的主要热力性能参数如表 1 所示。

表 1 案例机组热力性能表

Tab. 1 Thermal performance table of case unit

参数	THA 工况	供热	
		工况 1	工况 2
机组负荷/MW	350.0	279.0	230.9
主汽流量/t·h <sup>-1</sup>	1078.9	1182.4	959.0
主汽压力/MPa	24.2	24.2	24.2
主汽温度/℃	566.0	566.0	566.0
再热蒸汽流量/t·h <sup>-1</sup>	847.7	951.8	774.3
再热蒸汽压力/MPa	4.743	5.145	4.235
再热蒸汽温度/℃	566.0	566.0	566.0
五段抽汽压力/MPa	0.451	0.450	0.446
五段抽汽温度/℃	244.2	234.7	243.7
五抽至热网供汽量/t·h <sup>-1</sup>	0	550	400.0
供热负荷/MW	0	352.0	258.7

由表 1 可以看出,机组 THA 工况下电负荷为 350 MW,主蒸汽流量为 1 078.9 t/h,再热蒸汽流量为 847.7 t/h,额定供热工况电负荷为 279.0 MW,热负荷 352.0 MW,采暖抽汽额定压力为 0.45 MPa,额定抽汽量为 550 t/h,热网循环水设计供、回水温度为 130 和 70 ℃。根据机组冬季带热负荷情况,机组供热负荷在 258.7 MW(供热抽汽量为 400 t/h)即可基本满足周边城镇供热需求,此时机组的最小电负荷为 230.9 MW,约为设计电负荷的 66%,无法满足供热工况下机组的调峰需求。

## 2 改造方案介绍

案例机组原设计有 45% 锅炉最大连续蒸发量(Boiler Maximum Continue Rate, BMCR)容量的高低压串联旁路,主要用于机组的启动和停机,单台机组

配置2台热网加热器,采暖抽汽取自回热系统五段抽汽,即中压缸排汽。

案例机组当前高低压二级串联旁路,主要用于机组的启动和停机,无法满足供热的需求。经综合对比分析后采用下述改造方案对机组进行高低压旁路供热改造:(1) 更换现有高压旁路阀,更换后的高压旁路阀具备长期运行和调节的功能,其容量仍为45% BMCR(559 t/h)保持不变;(2) 高压旁路阀减温水调节阀组(减温水电动调节阀和电动隔离阀)使用现有阀门,不做更换;(3) 新增一套低压旁路减温减压阀,与原低压旁路并列布置,新增低压旁路减温减压阀仅需满足机组深度调峰供热工况的需要,具有长期连续稳定的旁路阀供热的能力,其容量为400 t/h;(4) 现有低压旁路阀组继续保留,主要用于机组的启动和停机。案例机组改造前后的热力系统如图1所示,其中虚线框及虚线部分为旁路供热改造后新增或改造的管道及设备,其余部分为案例机组原系统。

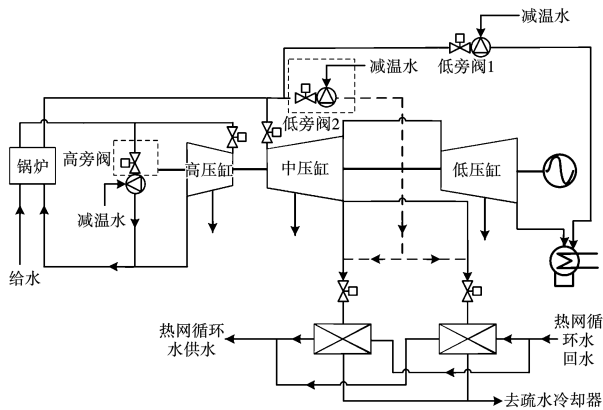


图1 案例机组高低压旁路供热改造热力系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of HP-LP bypass system combining with heating reformation of case unit's thermal system

改造后,机组的热段再热蒸汽在进入中压缸前分两路,一路经原低压旁路阀1后进入凝汽器,用于机组启停,另一路经新增低压旁路阀2减温减压后,与五段采暖抽汽汇合后去往热网加热器供热。案例机组改造后,当供热期机组向下调峰五段采暖抽汽供热量不足时,可开启高压旁路阀及低压旁路阀2向热网提高更多的蒸汽;当机组电负荷提高而热负荷不变时,五段采暖抽汽量增大,可优先逐渐关小高低压旁路供热阀,直至退出旁路供热。

### 3 改造对机组运行特性影响

#### 3.1 对汽轮机轴向推力的影响

对于高低压旁路联合供热改造方案,高压旁路蒸汽流量与低压旁路蒸汽流量的匹配方式是影响机组供热运行安全性的关键因素。当高压旁路蒸汽流量和低压旁路蒸汽流量出现不匹配时,流过高压缸和中压缸的流量也会出现偏差,这就会导致汽轮机整个轴系受力出现不平衡,从而使得转子向汽轮机侧(负向)或发电机侧(正向)移动,最终导致推力轴承受力出现不平衡、单侧推力瓦温升高<sup>[16-17]</sup>。机组改造后对高低压旁路蒸汽流量偏差对汽轮机轴系的影响进行了试验,试验过程保持机组电负荷为160 MW稳定,通过调整高低压旁路阀门开度使高低压旁路流量出现一定偏差,试验期间严密监视汽轮机的各项参数,不同流量偏差下汽轮机轴向位移及推力瓦温变化趋势如图2、图3所示,其中,高低压旁路流量偏差指低压旁路阀2前蒸汽流量和高压旁路前蒸汽流量的差值。

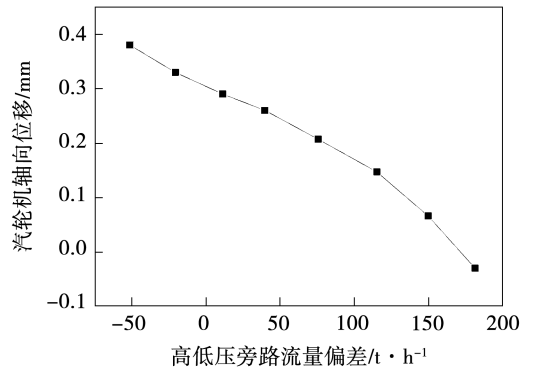


图2 不同流量偏差下汽轮机轴位移变化趋势图

Fig.2 Variation trend of steam turbine axial displacement under different flow deviations

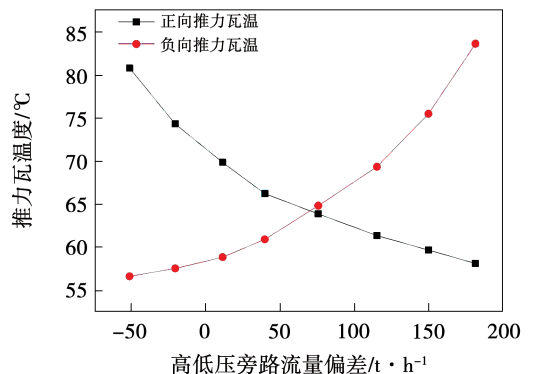


图3 不同流量偏差下汽轮机推力瓦温度变化趋势图

Fig.3 Variation trend of steam turbine thrust pad temperature under different flow deviations

由图2和图3可以看出,随着高低压旁路流量偏差的增大(即低压旁路阀2前蒸汽流量大于高旁前蒸汽),汽轮机轴向位移会逐渐减小(发电机方向为正);同时,汽轮机负向推力瓦温度会逐渐升高,正向推力瓦温度会逐渐降低,且高低压旁路流量偏差越大,轴向位移和负向推力瓦温的上升趋势越快,而正向推力瓦温会逐渐趋于平缓;这主要是由于:(1)当高低压旁路流量偏差向正向增大过程中,由低压旁路阀2流向热网加热器的蒸汽流量增大,流经中低压缸的蒸汽流量减少,而流经高压缸的蒸汽流量基本不变,故整个转子会向高压缸方向移动,因此,轴向位移减小(即向负向变化),负向推力瓦块受力会增大,正向推力瓦块受力会减小,故正向推力瓦温逐渐降低,负向推力瓦温逐渐升高;(2)反之,当高低压旁路流量偏差向负向增大(即高压旁路前蒸汽流量大于低压旁路阀2前蒸汽流量)过程中,主蒸汽通过高压旁路阀进入再热蒸汽管道的蒸汽流量增大,故主蒸汽进入高压缸的流量会有所降低;同时低压旁路阀2前蒸汽流量基本不变,故再热蒸汽进入中低压缸的流量会有所增加。因此,汽轮机转子会向发电机方向移动,轴向位移会逐渐增大,而正向的推力瓦块受力会增大,负向的推力瓦块受力会减小,故正向推力瓦温会逐渐升高,负向推力瓦温逐渐降低。

当高低压旁路流量偏差达到181.2 t/h时,汽轮机轴向位移会减小至-0.03 mm,此时负向推力瓦温已升高至83.66℃;当高低压旁路流量偏差达到-51.2 t/h时,汽轮机轴向位移会增大至0.38 mm,此时正向推力瓦温已升高至80.82℃。因此,旁路供热机组运行过程中,应严格控制高压旁路蒸汽流量与低压旁路蒸汽流量的匹配,通过对实际运行数据的分析,并结合厂家理论计算结果,运行过程中,应控制高低压旁路流量偏差在-60~190 t/h。

### 3.2 对热段再热蒸汽流速的影响

调试期间,在保证本机组对外供热量基本不变的情况下,逐渐降低机组电负荷,试验机组电负荷的调峰下限;随着机组电负荷降低,五抽至热网抽汽量会逐渐减小。通过配合同步开大高低压旁路阀增加旁路至热网供热蒸汽量,最终保证机组对外总供热蒸汽量不变。机组在不同电负荷下,旁路供热各主

要参数如表2所示。

表2 机组不同电负荷下供热相关数据汇总

Tab.2 Summary of heating-related data of case unit under different electrical loads

参数	不同工况			
机组电负荷/MW	180.5	161.4	140.0	119.3
热网总供热蒸汽量/t·h <sup>-1</sup>	326.2	330.7	322.6	299.2
高压旁路阀开度/%	7.5	9.3	16.7	17.9
高压旁路阀前蒸汽流量/t·h <sup>-1</sup>	64.7	79.3	111.5	114.0
高压旁路减温水流量/t·h <sup>-1</sup>	9.8	12.8	16.1	16.5
低压旁路阀2开度/%	10.3	12.7	22.0	22.0
低压旁路阀2前蒸汽流量/t·h <sup>-1</sup>	100.1	119.0	148.9	131.9
低压旁路2减温水流量/t·h <sup>-1</sup>	18.4	24.6	32.6	28.4
旁路供热蒸汽量/t·h <sup>-1</sup>	118.5	143.6	181.5	160.3
旁路供热蒸汽量占比/%	36.3	43.5	56.3	53.6
热段再热蒸汽压力/MPa	2.43	2.25	1.92	1.69
热段再热蒸汽温度/℃	561.4	550.3	556.2	547.5
热段再热蒸汽流速/m·s <sup>-1</sup>	66.5	68.0	75.0	74.5

由表2可以看出:(1)随着机组电负荷的降低,五段抽汽可供至热网的蒸汽量逐渐减小,若要保证热网总供热量不变,则高低压旁路阀门需同步开大,即增大旁路供热蒸汽量,当机组电负荷由180.5 MW降至140.0 MW时,旁路供热蒸汽量由118.5 t/h增加至181.5 t/h,占热网总供热蒸汽量的比重由36.3%提升至56.3%;(2)随着旁路供热蒸汽量的增加,热段再热蒸汽管道流过蒸汽量也随之增大,这就会导致热段再热蒸汽流速逐渐增大,当机组电负荷降至140.0 MW时,在保证热网总供热蒸汽量为322.6 t/h的情况下,热段再热蒸汽流速达到75.0 m/s,已达到设计院给出的安全运行边界值;(3)当机组电负荷降至140.0 MW,由于热段再热蒸汽流速已达到安全运行边界值,若电负荷进一步降低,旁路供热蒸汽量无法进一步提高,而五段抽汽至热网供热蒸汽量又持续下降,会导致热网总供热蒸汽量逐渐降低;当机组电负荷降至119.3 MW时,在保证热段再热蒸汽流速不超过安全运行边界值的情况下,热网总供热蒸汽量会降至299.2 t/h。

### 3.3 对机组供热期调峰能力的影响

案例机组进行高低压旁路供热改造后,由于可通过旁路向热网供给一部分蒸汽,故机组在供热期

向下调峰的电负荷肯定更低。通过对机组往年冬季供热数据进行汇总分析,发现机组的最大供热负荷在 250 MW 左右,此时五段抽汽量约为 400 t/h,由于经低压旁路阀 2 减温减压后的供热蒸汽参数与五段供热蒸汽参数基本相同。可见,机组改造后只要保证五段供热抽汽量与旁路供热蒸汽量之和达到 400 t/h,即可满足周边城镇整个供热期的供热需求。经相关试验,改造前后机组供热期调峰下限相关数据如表 3 所示。

表 3 机组改造前后调峰下限相关数据汇总

Tab. 3 Summary of heating-related data of case unit's peak shaving lower limit before and after reformation

参数	改造前	改造后
机组电负荷/MW	230.9	161.4
热网总供热蒸汽量/t·h <sup>-1</sup>	400.0	400.0
五段抽汽供热蒸汽量/t·h <sup>-1</sup>	400.0	186.8
旁路供热蒸汽量/t·h <sup>-1</sup>	0	213.2
热段再热蒸汽压力/MPa	4.23	2.25
热段再热蒸汽温度/℃	566.0	550.3
热段再热蒸汽流速/m·s <sup>-1</sup>	53.0	75.0

由表 3 可以看出:(1) 改造前,在保证热网总供热蒸汽为 400 t/h 的情况下,机组电负荷向下最低可降至 230.9 MW,继续降低电负荷将无法保证五抽至热网供热蒸汽量;(2) 机组进行高低压旁路改造后,机组电负荷向下最低可降至 161.4 MW,其中,旁路供热蒸汽量为 213.2 t/h,占比达 53.3%,继续降低电负荷虽然可通过增大旁路供热蒸汽量保证机组热负荷,但热段再热蒸汽流速会超过设计院给出的安全运行边界值 75 m/s;(3) 改造前,热段再热蒸汽流速仅为 53.0 m/s,远低于设计院给出的安全运行边界值。这是因为,此时机组电负荷较高,热段再热蒸汽压力可达 4.23 MPa,蒸汽压力越高,其对应的比容就越小,相同质量流量下蒸汽的流速就越小。

## 4 中压调节汽门参调方案

### 4.1 对供热蒸汽量的影响

由第 3 节分析可知,虽然机组在降低电负荷时可通过增大高低压旁路开度以保证热网总的供热蒸汽量,但低负荷下旁路供热蒸汽量的增加往往受到

热段再热蒸汽流速的限制。这是因为,机组进行高低压旁路供热改造后,热段再热蒸汽一部分通过低压旁路阀 2 去往热网加热器供热,故在电负荷相同的情况下,热段再热蒸汽流量会有所增加,而正常运行中中压调节汽门一般是保持全开的,故电负荷相同,热段再热蒸汽压力和温度也基本相同;在相同的蒸汽参数下,热段蒸汽管道通流量增大必然会导致其流速也有所升高。若在机组电负荷降低时,通过逐步关小两个中压调节汽门以提高热段再热蒸汽压力,降低蒸汽流速,则可在确保热段蒸汽流速不超过安全边界的情况下,进一步增大高低压旁路至热网供热蒸汽量。由于本机组中压调节汽门未进行改造,不具备长期稳定调节的功能,试验过程中暂将中调门最小开度限制在 40% 以上。中压调节汽门参调前后机组旁路供热的主要参数如表 4 所示。

表 4 中压调节汽门参调前后机组供热主要数据对比

Tab. 4 Comparison of main heating data of the unit before and after middle pressure regulating valve adjustment

参数	不参调		参调	
	140.0	119.3	140.8	120.7
机组电负荷/MW	140.0	119.3	140.8	120.7
热网总供热蒸汽量/t·h <sup>-1</sup>	322.6	299.2	406.3	352.1
中调门开度/%	100.0	100.0	42.0	42.0
高压旁路阀开度/%	16.7	17.9	20.6	19.9
高压旁路阀前蒸汽流量/t·h <sup>-1</sup>	111.5	114.0	171.3	134.5
高压旁路减温水流量/t·h <sup>-1</sup>	16.1	16.5	23.8	19.1
低压旁路阀 2 开度/%	22.0	22.0	25.9	25.8
低压旁路阀 2 前蒸汽流量/t·h <sup>-1</sup>	148.9	131.9	202.8	174.5
低压旁路 2 减温水流量/t·h <sup>-1</sup>	32.6	28.4	48.7	41.0
旁路供热蒸汽量/t·h <sup>-1</sup>	181.5	160.3	251.5	215.5
旁路供热蒸汽量占比/%	56.3	53.6	61.9	61.2
热段再热蒸汽压力/MPa	1.92	1.69	2.20	1.85
热段再热蒸汽温度/℃	556.2	547.5	559.5	553.7
热段再热蒸汽流速/m·s <sup>-1</sup>	75.0	74.5	75.0	75.0

由表 4 可以看出:(1) 在机组电负荷相同的情况下,通过关小中压调节汽门可提高热段再热蒸汽压力,从而在旁路供热蒸汽量不变的情况下有效降低热段再热蒸汽流速;机组电负荷为 140 MW 时,中压调节汽门关小至 42.0%,热段再热蒸汽压力可由 1.92 MPa 提高至 2.20 MPa;机组电负荷为 120 MW 时,中压调节汽门关小至 42.0%,热段再热蒸汽压

力可由 1.69 MPa 提高至 1.85 MPa; (2) 由于中压调节汽门关小后热段再热蒸汽流速有所降低, 故在机组电负荷不变的情况下, 旁路供热蒸汽量可在一定程度上增加; 以再热蒸汽流速不超过 75 m/s 为边界条件, 机组电负荷为 140 MW 时, 中调门参调后旁路供热蒸汽量可由原来的 181.5 t/h 增加至 251.5 t/h, 增加 38.6%; 机组电负荷为 120 MW 时, 中压调节汽门参调后旁路供热蒸汽量可由原来的 160.3 t/h 增加至 215.5 t/h, 增加 34.4%; (3) 中压调节汽门参调后, 在机组电负荷不变的情况下, 热网总供热蒸汽量会有所增加, 这主要得益于旁路供热蒸汽量的增加, 机组电负荷为 140 MW 时, 中压调节汽门参调后热网总供热蒸汽量由 322.6 t/h 增加至 406.3 t/h, 其中旁路供热蒸汽量占比由原来的 56.3% 提高至 61.9%, 提高 5.6%; 机组电负荷为 120 MW 时, 中压调节汽门参调后热网总供热蒸汽量由 299.2 t/h 增加至 352.1 t/h, 其中旁路供热蒸汽量占比由原来的 53.6% 提高至 61.2%, 提高 7.6%。

#### 4.2 对机组调峰能力的影响

中压调节汽门参调后机组在相同的电负荷下供热蒸汽量进一步增加, 则机组在供热期的电负荷调峰下限可进一步降低。仍然以热网总供热蒸汽量 400 t/h 为供热期热负荷需求标准, 经相关试验, 机组在改造前后、中压调节汽门参调前后机组供热期电负荷的调峰能力对比如图 4 所示。

由图 4 可知: (1) 机组进行高低压旁路供热改造后, 在中压调节汽门不参调的情况下, 机组电负荷调峰下限可由 230.9 MW 降至 161.4 MW, 调峰能力得到大幅提升; (2) 中压调节汽门参调可通过提高热段再热蒸汽压力进一步挖掘旁路供热潜力; 当两个中压调节汽门最低关至 42% 时, 在保证热负荷不变的情况下, 机组电负荷调峰下限可进一步降至 140.8 MW, 热段再热蒸汽流速超限同样是限制机组电负荷进一步降低的主要因素; (3) 中压调节汽门参调对机组供热期调峰下限的影响较为显著, 由于本机组中压调节汽门未进行改造, 不具备长期稳定调节的功能, 试验过程中基于机组运行安全考虑将中压调节汽门最小开度限制在 42%, 若后期对中压调节汽门进行改造后, 可继续关小中压调节汽门以进一步降低机组供热期最小电负荷。

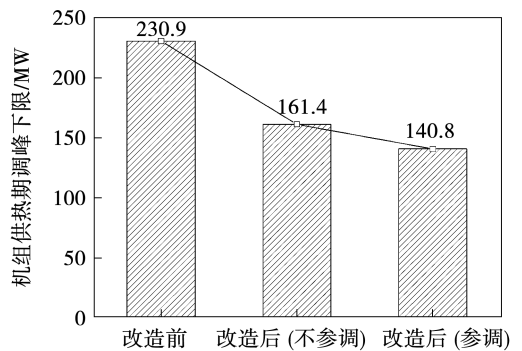


图 4 改造前后机组供热期调峰能力对比

Fig. 4 Comparison of peak shaving capacities of unit in heating period before and after reformation

## 5 结论

针对目前热电联产机组供热期调峰能力不足的问题, 本文以某 350 MW 超临界燃煤机组为案例, 介绍了其高低压旁路供热改造方案, 并以改造后机组的实际运行数据为基础, 对改造前后机组的运行特性和调峰能力进行了详细的对比分析, 研究结果表明:

(1) 机组进行高低压旁路供热改造后, 运行过程中应严格控制高、低旁蒸汽流量偏差在  $-60 \sim 190$  t/h 范围内, 以保证汽轮机轴系稳定; 改造后, 在保证机组供热期热负荷的情况下, 机组电负荷调峰下限可由原来的 230.9 MW 降至 161.4 MW, 降低 30.1%;

(2) 中压调节汽门参调可通过提高热段再热蒸汽压力进一步挖掘旁路供热潜力, 当案例机组两个中压调节汽门最低关至 42% 时, 机组电负荷调峰下限可进一步降至 140.8 MW, 这主要得益于旁路供热蒸汽量的增加;

(3) 中压调节汽门参调对机组供热期调峰下限的影响较为显著, 若想继续降低机组供热期调峰下限, 可考虑对中压调节汽门进行改造, 使具备长期稳定调节的功能, 以进一步提高热段再热蒸汽压力, 挖掘高低压旁路供热潜力。

#### 参考文献:

[1] 王相宇, 任洪波, 吴琼, 等. 面向碳中和的多源异质全可再生能源系统优化规划方法研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(7): 136-145.

WANG Xiang-yu, REN Hong-bo, WU Qiong, et al. Research on optimal planning method of multi-source heterogeneous all-renewable

- energy system facing carbon neutrality[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(7): 136-145.
- [2] 刘纯, 屈姬贤, 石文辉. 基于随机生产模拟的新能源消纳能力评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3134-3143.  
LIU Chun, QU Ji-xian, SHI Wen-hui. Evaluating method of ability of accommodating renewable energy based on probabilistic production simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3134-3143.
- [3] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.  
ZHANG Zhi-gang, KANG Chong-qing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [4] 侯玉婷, 李晓博, 刘畅, 等. 火电机组灵活性改造形势及技术应用[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 8-13.  
HOU Yu-ting, LI Xiao-bo, LIU Chang, et al. Flexibility reform situation and technical application of thermal power units[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 8-13.
- [5] 高宽, 鲍文龙, 丁阳俊. 大型汽轮机组深度调峰时抽汽供热的经济性分析[J]. 热能动力工程, 2020, 35(9): 16-21.  
GAO Kuan, BAO Wen-long, DING Yang-jun. Economical analysis for a large-sized unit of steam extraction under deep regulating load[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(9): 16-21.
- [6] 谭增强, 王一坤, 牛拥军, 等. 双碳目标下煤电深度调峰及调频技术研究进展[J]. 热能动力工程, 2022, 37(8): 1-8.  
TAN Zeng-qiang, WANG Yi-kun, NIU Yong-jun, et al. Research progress of deep peak regulation and frequency modulation technology for coal-fired power plant under double-carbon targets[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(8): 1-8.
- [7] 王占洲, 曹丽华, 司和勇. 汽轮机低压缸旁路供热的电出力调节能力分析[J]. 汽轮机技术, 2021, 63(4): 297-299, 302.  
WANG Zhan-zhou, CAO Li-hua, SI He-yong. Analysis on power output regulation ability of steam turbine of low pressure cylinder bypass heating[J]. Turbine Technology, 2021, 63(4): 297-299, 302.
- [8] 周国强, 赵树龙. 汽轮机高、低压旁路联合供热应用研究[J]. 东北电力技术, 2019, 40(11): 1-4.  
ZHOU Guo-qiang, ZHAO Shu-long. Application of HP-LP bypass system combining with heating technology[J]. Northeast Electric Power Technology, 2019, 40(11): 1-4.
- [9] 黄嘉骊, 刘永林, 付亦葳, 等. 200 MW 机组蒸汽旁路热电解耦能力评估[J]. 热力发电, 2018, 47(10): 90-95.  
HUANG Jia-si, LIU Yong-lin, FU Yi-wei, et al. Thermo-electricity decoupling capacity evaluation of steam bypass for a 200 MW power unit[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(10): 90-95.
- [10] 陈晓利, 高继录, 郑飞, 等. 多种深度调峰模式对火电机组性能影响分析[J]. 热能动力工程, 2020, 35(12): 26-30.  
CHEN Xiao-li, GAO Ji-lu, ZHENG Fei, et al. Comparative analysis of various deep peak regulation modes for thermal power units[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(12): 26-30.
- [11] 薛朝因, 杨荣祖, 王汀, 等. 汽轮机高低旁路联合供热在超临界 350 MW 机组上的应用[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 101-105.  
XUE Zhao-nan, YANG Rong-zu, WANG Ting, et al. Application of turbine HP-LP bypass system combining with heating in supercritical 350 MW unit[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 101-105.
- [12] 章艳, 吕泉, 李杨, 等. 四种热电厂电热解耦改造方案的运行灵活性剖析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 164-172.  
ZHANG Yan, LYU Quan, LI Yang, et al. Analysis on operation flexibility of combined heat and power plant with four improved power-heat decoupling schemes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 164-172.
- [13] 高耀岩. 火电机组灵活运行控制关键技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.  
GAO Yao-kui. Research on key technologies of flexible operation control of thermal power units[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [14] 刘畅, 耿林霄, 王珩, 等. 高低旁路联合供热改造控制策略研究[J]. 热力发电, 2020, 49(11): 126-132.  
LIU Chang, GENG Lin-xiao, WANG Heng, et al. Control strategy in transformation of high and low pressure bypass combined heat supply[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(11): 126-132.
- [15] 王占洲, 曹丽华, 董恩伏, 等. 基于旁路系统提升热机组风电消纳能力研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(1): 317-323.  
WANG Zhan-zhou, CAO Li-hua, DONG En-fu, et al. Improving wind power accommodation of combined heat and power plant based on bypass system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(1): 317-323.
- [16] 李建刚. 汽轮机设备及运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.  
LI Jian-gang. Steam turbine equipment and operation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [17] 洪辉. 灵活运行工况下汽轮机转子结构强度与损伤分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.  
HONG Hui. Structural intensity and damage analysis of steam turbine rotor under flexible operating condition[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.