

350 MW 供热机组低压缸零出力试验及仿真研究

谢昌亚¹, 陈凯亮¹, 刘广会², 吴 昕¹

(1. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院(华北电力科学研究院有限责任公司), 北京 100045;

2. 京能秦皇岛热电有限公司, 河北 秦皇岛 066000)

摘 要: 低压缸零出力技术可有效实现热电联产机组热电解耦, 提升机组供热能力和调峰能力。对某 350 MW 机组低压缸零出力试验方案和试验过程进行了详细分析。试验研究显示, 在 280 t/h 供热抽汽流量下, 低压缸零出力技术可降低机组负荷 52 MW。受试验条件限制, 为获取全负荷范围内低压缸零出力工况下机组性能, 采用 Ebsilon 软件对低压缸零出力工况进行仿真计算。结果表明: 与抽凝工况相比, 低压缸零出力运行方式下, 热网抽汽量可提高 90 t/h, 相同供热量下机组负荷可降低 29%, 最小电负荷率可降至 28.5%, 在 176 MW 供热负荷下供电煤耗可降低 51.2 g/(kW·h)。

关 键 词: 低压缸零出力; Ebsilon; 供热量; 最小电负荷; 煤耗

中图分类号: TK262

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2022.07.001

[引用本文格式] 谢昌亚, 陈凯亮, 刘广会, 等. 350 MW 供热机组低压缸零出力试验及仿真研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(7): 1-9. XIE Chang-ya, CHEN Kai-liang, LIU Guang-hui, et al. Zero output test and simulation research on LP cylinder of 350 MW heat supply unit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(7): 1-9.

Zero Output Test and Simulation Research on LP Cylinder of 350 MW Heat Supply Unit

XIE Chang-ya¹, CHEN Kai-liang¹, LIU Guang-hui², WU Xin¹

(1. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. Research Institute (North China Electric Power Research Institute Co., Ltd.), Beijing, China, Post Code: 100045; 2. Jingneng Qinhuangdao Thermal Power Co., Ltd., Qinhuangdao, China, Post Code: 066000)

Abstract: The zero output technology of low pressure cylinder can effectively realize the thermoelectric decoupling of heat and power cogeneration units, and improve the heating capacity and peak shaving capacity of the units. The zero output test scheme and test process of low pressure cylinder of a 350 MW unit are analyzed in detail. The experimental study shows that the zero output technology of low pressure cylinder can reduce the unit load by 52 MW under the condition of 280 t/h heating extraction steam flow. Limited by the test conditions, in order to obtain the unit performance under the zero output condition of low-pressure cylinder within the full load range, Ebsilon software is used to simulate and calculate the zero output condition of low-pressure cylinder. The results show that compared with the condensate extraction condition, the steam extraction capacity of the heating network can be increased by 90 t/h in the zero output operation mode of the low-pressure cylinder. Under the same heating capacity, the unit load can be reduced by 29%, the minimum electric load rate can be reduced to 28.5%, and the coal consumption of power supply can be reduced by 51.2 g/(kW·h) at 176 MW heating load.

收稿日期: 2021-07-27; 修订日期: 2021-09-29

基金项目: 京能秦皇岛热电厂汽轮机低压末级流场测量研究项目(JQRD-FW-2019-051)

Fund-supported Project: Research Project of Flow Field Measurement of Low Pressure Last Stage of Steam Turbine in Jingneng Qinhuangdao Thermal Power Plant (JQRD-FW-2019-051)

作者简介: 谢昌亚(1992-), 男, 山东济宁人, 华北电力科学研究院有限责任公司工程师。

Key words: zero output of low pressure cylinder, Ebsilon, heating capacity, minimum electrical load, coal consumption

引 言

近些年我国风电、光电等新能源装机容量逐年增长,但由于风电、光电属于间歇性能源,其所占比例的增加降低了电网的调峰容量比^[1],导致某些地区弃风、弃光现象严重。为消纳日益增长的新能源发电,对火电系统的灵活性提出更高的要求。由于热电联产机组采用“以热定电”的运行模式,其灵活性更差^[2-3]。对于热电联产机组占主要装机容量的地区来说,对其进行热电解耦,改善热电联产机组的调峰性能,对提高新能源的消纳能力尤为重要^[4-5]。

在“碳达峰、碳中和”的背景下^[6],风电、光电等间歇性能源装机容量会继续增长,实现热电联产机组热电解耦是必然的发展趋势。文献[7]详述了几种不同的火电机组灵活性运行技术,作为实现热电解耦的有效技术,低压缸零出力技术因其改造成本最低、热经济性最佳、综合优势最大等特点^[8],近些年在许多机组中得到了应用。

文献[9-12]对低压缸零出力改造案例进行了研究,分析了低压缸零出力的运行特性;文献[13]采用 Ebsilon 研究了低压缸零出力技术对机组深度调峰性能的影响;文献[14]详细分析了运行背压变化对低压缸零出力技术安全性及经济性的影响,发现适当降低机组运行背压,有利于改善机组运行的安全性并能够降低机组发电煤耗;文献[15]通过计算分析了低压缸零出力技术对供热机组灵活性的影响,结果表明,低压缸切除改造能使该机组负荷率降低至 45% 以下;文献[16]采用 Ebsilon 软件计算分析了低压缸零出力方式供热性能,结果表明,采用低压缸零出力方式供热,机组最大供热抽汽量提升 97%。

已有文献均缺乏对低压缸投退过程的详细分析,且理论计算并未与试验结果进行对比。为提高某厂 2 台超临界供热机组供热能力和机组灵活性,在基建期设计有低压缸零出力功能,本文详细制定了该厂低压缸零出力试验方案,并对试验过程进行了详细的分析;同时,采用 Ebsilon 软件对该机组低

压缸零出力工况进行了仿真计算,基于仿真结果对该机组低压缸零出力工况性能进行了分析。

1 机组简介

某厂超临界供热机组采用东方汽轮机厂生产的 CJK350/300-24.2/0.4/566/566 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。机组典型工况的主要参数如表 1 所示。该厂热网系统配备有 4 台热网循环泵、4 台热网加热器,每台机组设 2 台热网加热器,中压缸排汽下端引出 2 根抽汽管向 2 台热网加热器供汽,每台机组的 2 台热网加热器并联运行。机组设计有低压缸零出力功能,中低压连通管蝶阀(简称“BV 阀”)在解除最小开度限制后可全关;中低压连通管旁路门(以下简称“LBYCV 阀”)为电动调门,为监测低压缸退出后进入低压缸的蒸汽流量,在门后设计有孔板流量计,供热抽汽系统如图 1 所示,机组纯凝工况热力系统如图 2 所示。

表 1 典型工况主要参数

Tab. 1 Main parameters of typical working conditions

典型工况	主蒸汽流量/ t · h ⁻¹	采暖抽汽流 量/t · h ⁻¹	电负荷/ MW
THA 工况	1 075	0	350
额定采暖工况	1 236	580	299
最大采暖工况	1 266	600	304
低压缸切除	1 069	600	258

注:THA 为机组热耗率验收工况

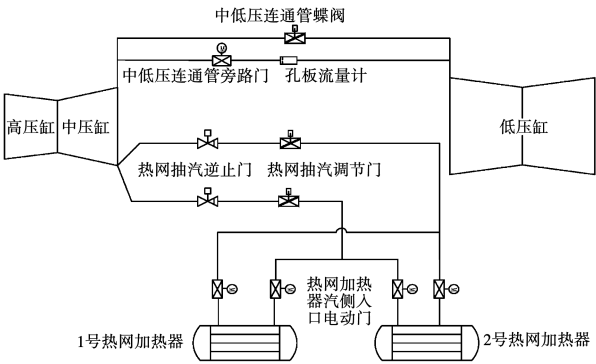


图 1 抽汽供热系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of steam extraction heating system

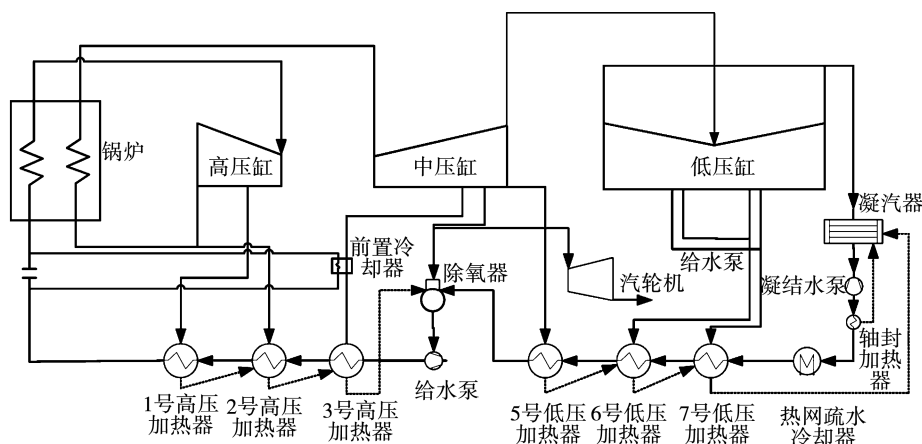


图2 机组纯凝工况热力系统图

Fig. 2 Schematic diagram of thermal system of unit under pure condensing condition

2 低压缸零出力试验方案

制定了详细的低压缸零出力试验方案,主要注意事项为:

(1) 为保证机组均匀进汽, 试验前应将机组“顺序阀”运行切换为“单阀”运行;

(2) 为确保试验过程发生意外停机情况时汽轮机本体的安全, 试验前应进行汽轮机阀门活动试验、备用润滑油泵启停试验、顶轴油泵启停试验、备用真空泵启停试验, 确认各项试验正常;

(3) 低压缸退出时的机组负荷应根据热网所需热负荷确定,在低压缸退出前,为消纳本机组低压缸退出后增加的抽汽量,应适当增大热网循环水流量,降低临机的供热抽汽量,并且要适当降低热网加热器的液位;

(4) BV 阀关闭后, 低压缸处于鼓风状态, 由通过 LBYCV 阀进入低压缸的蒸汽和低压缸喷水将产生的热量带走; 试验过程应尽量降低机组背压, 有利于减轻低压缸鼓风现象, 本次试验将背压维持在 5 kPa 以下:

(5) 低压缸退出后进汽流量小,在退出前应将6号低压加热器汽侧切除,5号低压加热器切至事故疏水运行方式,轴封溢流倒至凝汽器;

(6) 试验前应“将‘低压缸排汽温度低于 70℃ 联锁关闭低压缸喷水调节阀’逻辑解除, 低压缸退出过程中观察低压缸排汽温度, 投入低压缸喷水。由于机组投入低压缸喷水后, 低压缸前后两侧轴封腔

室温度会明显降低,因此在试验过程中投入低压缸喷水时应逐步缓慢开启低压缸喷水调节阀,并严密监视低压缸轴封温度、轴振、瓦振、轴位移和胀差等参数;

(7) 为减小低压缸退出对热网系统的扰动,在低压缸退出前需将机组调整至最大抽凝工况;

(8) 低压缸退出时,机组应退出“协调控制”方式(CCS),切换为“机跟随”运行方式(TF),避免负荷产生波动。

3 低压缸零出力试验过程及分析

3.1 试验过程

(1) 2021 年 03 月 20 日 01:39 机组负荷 240 MW,主蒸汽流量 920 t/h,供热抽汽压力 0.27 MPa, 低压缸进汽压力 0.08 MPa;机组解除自动发电控制 (AGC),在 CCS 方式下降负荷,并逐渐关小 BV 阀, 开大热网抽汽调门;03:08 机组调整至 175 MW 电 负荷工况下的最大抽凝工况。该工况下的主要参数 如表 2 所示。

(2) 因外部热负荷影响,在主蒸汽流量约 600 t/h 时进行低压缸退出操作,待各项参数稳定后,解除机组 CCS 控制,在 TF 方式下继续降负荷,降负荷过程中保持中低压连通管蝶阀 10% 开度、维持中排压力 0.2 MPa,并退出 6 号低压加热器抽汽,5 号低加疏水排至凝汽器,保持 6,7 号低压加热器水侧正常投运,危急疏水调阀投入自动。注意低压缸排汽温度、末级和次末级蒸汽温度变化。

表2 电负荷 175 MW 时最大抽凝工况主要参数

Tab.2 Main parameters of maximum condensate extraction condition at 175 MW electric load

参 数	数 值
主蒸汽流量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	709
汽轮机负荷/MW	175
热网抽汽流量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	280
中压缸排汽压力/MPa	0.2
低压缸入口压力/MPa	0.084
背压/kPa	4.51
BV 阀开度/%	10
LBYCV 阀开度/%	100
低压缸次末级温度/ $^{\circ}\text{C}$	38.6
低压缸末级温度/ $^{\circ}\text{C}$	37.6
低压缸排汽温度/ $^{\circ}\text{C}$	32.5

(3) 04:18 机组达到主蒸汽流量 579 t/h 对应的最大抽凝工况,各项参数稳定后进行低压缸退出操作。此时,机组主要参数如表 3 所示。

表3 主蒸汽流量 576 t/h 时最大抽凝工况主要参数

Tab.3 Main parameters of 576 t/h maximum condensate extraction condition of main steam flow

参 数	数 值
主蒸汽流量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	579
汽轮机负荷/MW	145
热网抽汽流量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	226
中压缸排汽压力/MPa	0.2
低压缸入口压力/MPa	0.078
背压/kPa	4.64
BV 阀开度/%	10
LBYCV 阀开度/%	100
低压缸次末级温度/ $^{\circ}\text{C}$	38.2
低压缸末级温度/ $^{\circ}\text{C}$	37.2
低压缸排汽温度/ $^{\circ}\text{C}$	32.2

(4) 退出低压缸。机组各项参数稳定无异常,开始退出低压缸,在数字式电液调节系统(DEH)抽汽控制画面点击退出低压缸按钮,BV 阀接到阀位指令 30 s 后减小至 0;BV 阀关至 4% 开度左右时,右侧低压缸排汽温度以较快速度开始上涨,运行人员逐渐缓慢开启低压缸喷水调阀至 40% 开度,右侧低压缸排汽温度最高上涨至 56.3 $^{\circ}\text{C}$,在减温水的作用

下降至 30 $^{\circ}\text{C}$ 左右并保持稳定,随后逐渐关闭低压缸喷水调阀至 27% 开度;低压缸切除运行过程中,低压缸末级和次末级蒸汽温度逐渐缓慢上涨,低压缸退出过程主要参数变化如图 3 所示。低压缸退出后,低压缸两侧 3 号瓦和 4 号瓦振动、机组轴位移、机组胀差及瓦温等没有明显变化,且均在安全范围内;冷却旁路孔板流量计前后差压超过孔板设计量程,分散控制系统(DCS)画面显示的流量无法反映低压缸实际进汽流量;低压缸退出后,冷却蒸汽流量应保持在 30 t/h 左右,根据弗留格尔公式近似计算,低压缸进汽压力应维持在 25 kPa 左右。低压缸退出后机组主要参数如表 4 所示。

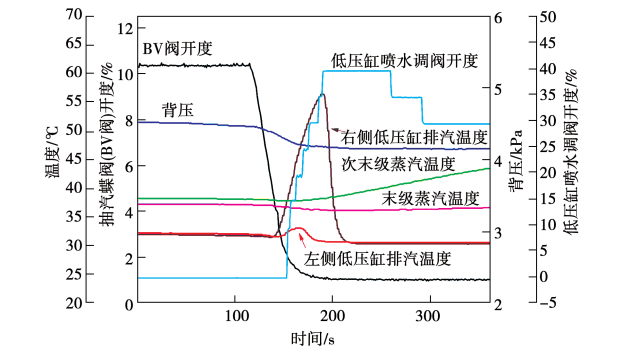


图3 低压缸退出过程主要参数变化

Fig.3 Changes of main parameters in removal process of low pressure cylinder

表4 低压缸退出后主要参数

Tab.4 Main parameters after LP cylinder removal

参 数	数 值
主蒸汽流量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	571
汽轮机负荷/MW	127
热网抽汽流量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	304
中压缸排汽压力/MPa	0.26
低压缸入口压力/MPa	0.027
背压/kPa	4.11
BV 阀开度/%	0
LBYCV 阀开度/%	100
低压缸次末级温度/ $^{\circ}\text{C}$	56.7
低压缸末级温度/ $^{\circ}\text{C}$	49.1
低压缸排汽温度/ $^{\circ}\text{C}$	30.2

(5) 变负荷试验。低压缸退出后,在 TF 方式下以主蒸汽流量每变化 50 t/h 为 1 个工况点,手动改变锅炉总煤量进行变负荷试验。负荷变化过程中配

合调节热网抽汽调阀维持中压缸排汽压力稳定,监视低压缸进汽压力、中压缸排汽温度、低压缸排汽温度、低压缸末级蒸汽温度及次末级蒸汽温度变化。避免因负荷过低导致锅炉燃烧恶化而造成机组停机的风险,最低试验负荷控制主蒸汽流量不低于 500 t/h,同时由于用户所需热负荷较小,将主蒸汽流量上限控制在 750 t/h,故变负荷试验主蒸汽流量变化范围在 500 ~ 750 t/h 之间。负荷变化过程中各主要参数如表 5 所示。

表 5 变负荷试验主要参数

Tab.5 Main parameters of variable load test

主蒸汽流量/ t · h ⁻¹	汽轮机负 荷/MW	热网抽汽流 量/t · h ⁻¹	总煤量/t
500	113	262	76
550	123	280	83
600	138	299	89
650	150	350	100
700	163	382	104
750	173	427	116

表 6 参数对比

Tab.6 Parameter comparison

工 况	主蒸汽流 量/t · h ⁻¹	汽轮机 负荷/MW	热网抽汽流 量/t · h ⁻¹	主汽压 力/MPa	主汽温 度/℃	再热压 力/MPa	再热温 度/℃	背压/kPa	BV 阀 开度/%
最大抽凝工况	709	175	280	19.1	566	2.78	565	4.51	10
低压缸零出力工况	548	123	280	16.0	569	2.19	562	4.36	0

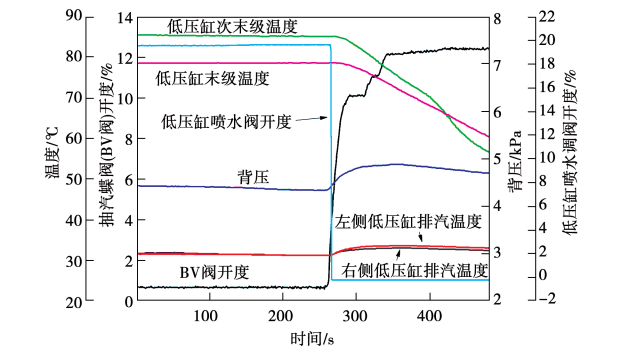


图 4 低压缸投入过程主要参数变化曲线

Fig.4 Changing curves of main parameters during LP cylinder intervention

可以看出,在保证机组采暖抽汽量为 280 t/h 时,与最大抽凝工况相比,低压缸零出力技术能使机组负荷降低 52 MW,可有效提升机组的运行灵活

(6) 低压缸投入。在低压缸零出力工况下,主蒸汽流量 550 t/h 对应的热网抽汽量与最大抽凝工况下主蒸汽流量 709 t/h 对应的抽汽量大致相同,均为 280 t/h,为对同一供热负荷下切缸工况与最大抽凝工况进行对比,在主蒸汽流量 550 t/h 下稳定运行30 min,随后进行低压缸投入操作。在低压缸投入之前,适当关小热网抽汽调阀提高中排压力,降低热网加热器液位。锅炉、汽轮机、热网及回热系统参数稳定,在 DEH 抽汽控制画面点击投入低压缸按钮,30 s后 BV 阀开至最小开度 10%,关闭低压缸喷水,手动逐渐开大 BV 阀,关小热网抽汽调阀,恢复 5 ~ 7 号低压加热器正常方式运行,汽轮机由零出力工况切换至抽凝工况。低压缸投入过程中主要参数变化曲线如图 4 所示。

3.2 低压缸零出力工况与最大抽凝工况对比

热网抽汽流量同为 280 t/h 时,对最大抽凝工况和低压缸零出力工况主要参数进行对比如表 6 所示。

性、改善机组调峰性能并提高机组对新能源的消纳能力。

4 仿真计算

受现场条件限制,并没有进行锅炉最低稳燃工况至额定工况全负荷范围内的低压缸零出力试验。采用 Ebsilon 软件对 2 号机组低压缸零出力全负荷工况进行建模仿真,并基于仿真结果对其性能进行分析。

4.1 纯凝工况仿真

对 2 号机组热力系统基于 THA 工况的热平衡,采用 Ebsilon 软件进行热力系统建模。

采用变工况仿真对比方法计算校验模型精度。采用 THA 工况热平衡数据建立模型,进行部分负荷

工况的模型参数验证,通过给定部分负荷工况时的主蒸汽流量,计算模型输出功率并与设计数据进行对比,如表 7 所示。

表 7 功率对比
Tab. 7 Power comparison

工 况	设计功率/MW	计算功率/MW	相对误差/%
THA	350.017	350.452	0.12
75% THA	262.527	262.898	0.14
50% THA	175.024	169.862	-2.9

由表 7 看出,50% THA 工况下计算功率与设计功率的相对误差最大,为 -2.9%,所建立的模型精度满足工程计算需求。

4.2 低压缸零出力工况仿真及性能分析

4.2.1 仿真与试验对比

基于机组纯凝工况所建模型,进行了低压缸零出力工况的模型搭建。结合 2 号机组低压缸零出力试验情况,设定低压缸进汽流量为 30 t/h,进汽压力为 27 kPa。搭建模型如图 5 所示。

选取主汽流量 500,650 及 750 t/h 3 个工况,对仿真计算值与试验值进行对比,仿真过程中保持主蒸汽流量及背压与试验保持一致,计算发电机输出功率、热网抽汽流量等重要参数,结果如表 8 所示。从表中可以看出,仿真参数与试验参数存在一定的偏差,分析认为该偏差主要是实际设备运行工况的偏差。

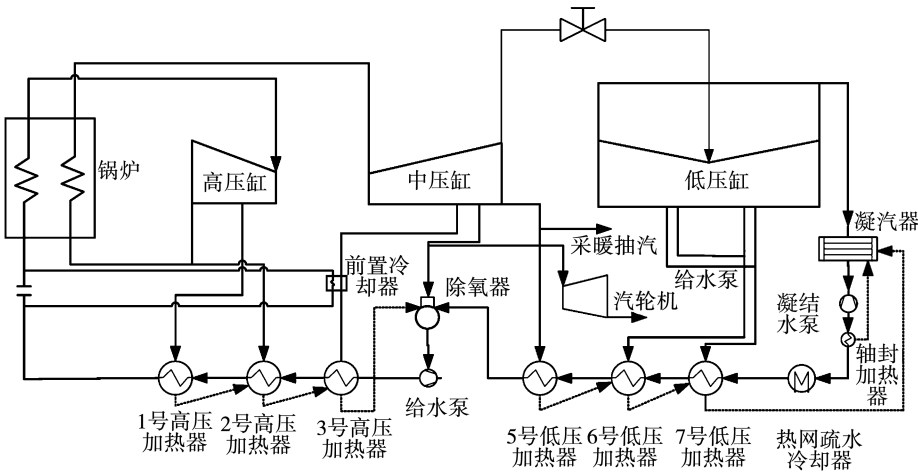


图 5 低压缸零出力工况机组仿真模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of unit simulation model under zero output condition of low pressure cylinder

表 8 机组重要参数仿真值与试验值对比

Tab. 8 Comparison between simulation and test values of important parameters of the unit

主汽流量/t · h ⁻¹		背压/kPa		发电机功率/MW		热网抽汽流量/t · h ⁻¹	
试验值	仿真值	试验值	仿真值	试验值	仿真值	试验值	仿真值
500	500	4.5	4.5	113	124	262	317
600	600	4.5	4.5	150	159	350	403
750	750	4.5	4.5	173	184	427	447

4.2.2 供热及调峰能力仿真分析

分别设定主蒸汽流量为额定蒸汽流量 1 075 t/h和低负荷稳燃流量 380 t/h,对低压缸零出力方式最大供热负荷工况和低压缸零出力方式最小电负荷工况进行仿真计算,仿真结果如表 9 所示。

表 9 最大供热负荷及最小电负荷仿真值

Tab. 9 Simulation values of maximum heating load and minimum electric load

工 况	主蒸汽流量/ t · h ⁻¹	电负荷/ MW	热网抽汽流 量/t · h ⁻¹
最大供热负荷	1 075	253.2	639.8
最小电负荷	380	99.7	249

(1) 最大供热负荷

采用低压缸零出力运行方式后,与同型抽凝机组相比,热网抽汽流量增大 90 t/h,机组的供热能力显著提高,同时机组电负荷降低 30 MW。

(2) 最小电负荷

采用低压缸零出力方式后,机组最小电负荷可降至99.7 MW,为额定出力的 28.5%,同时可以提供 249 t/h 的供热抽汽量。采用低压缸零出力后,机组的最小电负荷显著减小,深度调峰能力增强。

4.2.3 边界工况仿真分析

(1) 不同负荷下最大供热能力

以机组额定功率(TRL)主蒸汽流量为最大主汽流量,进行常规抽凝方式的仿真计算。图 6 为各主汽流量下机组常规抽凝方式与低压缸零出力方式的最大供热抽汽量对比结果。采用常规抽凝方式运行时,机组最大采暖抽汽量为 576 t/h。以低压缸零出力最小电负荷工况下的供热量为供热下边界,得到采用低压缸零出力方式运行时采暖抽汽流量近乎随主蒸汽流量呈等比例变化。从图中可以看出,对比常规抽凝工况,低压缸零出力方式在供热抽汽量及允许供热运行范围均有明显提升,在主汽流量 1 165 t/h 工况条件下,供热抽汽量增大 107 t/h,相对增幅 19%;在主汽流量 380 t/h 时,仍能提供 249 t/h 采暖抽汽,保证较高供热负荷。相比于常规抽凝方式,相同供热量下的机组负荷降低 29%,与试验结果比较接近。

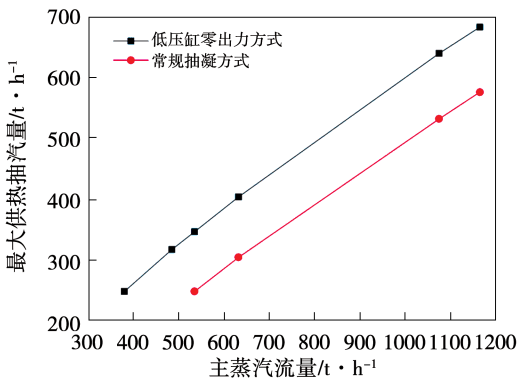


图 6 不同运行方式下最大供热能力

Fig.6 Maximum heating capacity in different operation modes

(2) 最小电负荷率

机组投入低压缸零出力方式运行,在极大提升供热能力的同时有效降低了电负荷,有利于参与深度调峰,获取调峰辅助收益。图 7 为机组在不同供热负荷时的最小电负荷率。可以得出,采用该方式供热运行,机组具备极强的调峰能力,在保障锅炉安全运行的条件下,最小电负荷率可降至 28.5%;不仅如此,机组可在较宽的供热负荷区域,具备享受调峰收益的能力。

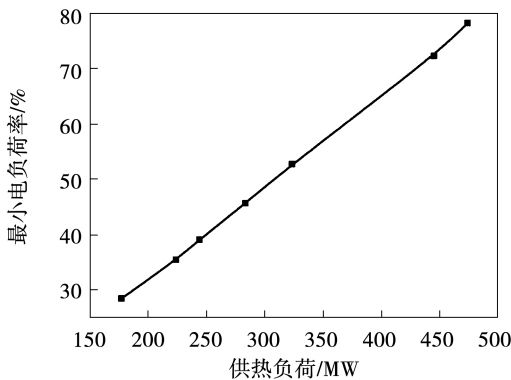


图 7 不同供热负荷下最小电负荷率

Fig.7 Minimum electric load rate at different heating loads

(3) 最低供电煤耗

相比于纯凝工况,机组对外供热将有效减少排汽冷源损失,提高能量利用效率,供电煤耗也将大幅降低。低压缸零出力工况相比常规抽凝工况,其冷源损失极少,具有更高的能量利用效率。不同供热负荷下低压缸零出力方式供热的最低供电煤耗如图 8 所示。从图中可以看出,最小供电煤耗随供热负荷增大呈下降趋势,整体煤耗保持在 165 ~ 185 g/(kW · h) 区间内。

机组常规抽凝方式运行,在锅炉最大蒸发量及最大抽汽流量工况时的供电煤耗为 197 g/(kW · h),供热抽汽量 248 t/h 时,此时最低供电煤耗为 233 g/(kW · h)。表 10 为相同供热抽汽量条件下低压缸零出力方式与常规抽凝方式的热电参数对比。同在近 176 MW 供热负荷下,常规抽凝方式下的主汽流量为 535 t/h,最小电负荷为139.7 MW,低压缸零出力方式下的主汽流量为 380 t/h,最小电负

荷仅为 99.7 MW, 相比常规抽凝方式分别降低 155 t/h 及 40 MW, 计算得出供电煤耗可降低 51.2 g/(kW·h)。数据表明, 低压缸零出力方式供热下机组的供电煤耗将大幅度降低。

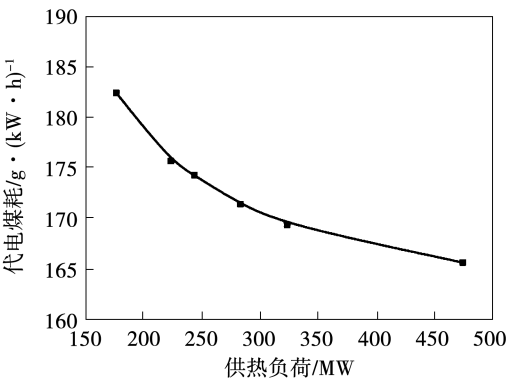


图 8 不同供热负荷下供电煤耗

Fig. 8 Coal consumption of power supply at different heating loads

表 10 不同运行方式最低供电煤耗对比

Tab. 10 Comparison of the minimum coal consumption of power supply in different operation modes

运行方式	主汽流量/ t·h ⁻¹	最大供热 负荷/MW	最小电负 荷/MW	供电煤耗/ g·(kW·h) ⁻¹
常规抽凝	535	176	139.7	233.6
低压缸 零出力	380	176	99.7	182.4

5 结 论

对某 350 MW 超临界供热机组低压缸零出力试验方案、试验过程进行了详细的分析, 研究了同一供热负荷下, 与最大抽凝工况相比, 低压缸零出力工况对电负荷的降低程度; 采用 Ebsilon 软件对全负荷范围下低压缸零出力工况进行了仿真计算, 基于仿真结果, 对该机组低压缸零出力工况的性能进行了分析, 得到结论:

(1) 在热网抽汽流量同为 280 t/h 时, 低压缸零出力工况与最大抽凝工况相比, 机组电负荷可降低 52 MW;

(2) 低压缸零出力工况可显著提升机组的供热能力, 降低机组的电负荷。以 THA 工况主汽流量进

行计算, 与抽凝工况相比, 热网抽汽量可提高 90 t/h; 相同供热量下, 机组负荷可降低 29%, 在保障锅炉安全运行的条件下, 最小电负荷率可降至 28.5%。同时, 供电煤耗显著下降, 在 176 MW 供热负荷下, 煤耗可降低 51.2 g/(kW·h)。

需要注意的是, 在进行深度调峰改造之前, 为保证机组运行安全稳定, 一般设置机组负荷下限为锅炉额定蒸发量的 50% 左右; 本文仿真范围是在锅炉最低稳燃负荷 380 t/h 至额定负荷之间, 并不能说明目前机组能在 50% 负荷以下长期稳定运行; 但仿真计算结果为理论上的计算值, 可为机组后续改造提供方向。建议机组可进行锅炉燃烧器、脱硝装置和机组协调控制等方面的改造优化, 从而实现低负荷稳定运行, 叠加低压缸零出力技术, 可最大限度拓宽机组运行负荷范围, 享受调峰收益。

参考文献:

[1] 鄂志君, 张 利, 杨帮宇, 等. 低压缸零出力实现热电联产机组热电解耦与节能的理论研究[J]. 汽轮机技术, 2019, 61(5): 383-386, 391.
E Zhi-jun, ZHANG Li, YANG Bang-yu, et al. Theoretical study on heat-electricity decoupling and energy saving of low-pressure cylinder zero output renovation of heat and power cogeneration units [J]. Turbine Technology, 2019, 61(5): 383-386, 391.

[2] 宋崇明, 田雪沁, 徐 彤, 等. 配置蓄热装置对火电机组一次调频性能影响[J]. 中国电力, 2020, 53(2): 125-133.
SONG Chong-ming, TIAN Xue-qin, XU Tong, et al. Effect of heat storage device on primary frequency regulation capacity of thermal power unit[J]. Electric Power, 2020, 53(2): 125-133.

[3] 徐 浩, 李华强. 火电机组灵活性改造规划及运行综合随机优化模型[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 177-189.
XU Hao, LI Hua-qiang. Planning and operation stochastic optimization model of power systems considering the flexibility reformation [J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 177-189.

[4] 陈建国, 谢争先, 付怀仁, 等. 300 MW 机组汽轮机低压缸零出力技术[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 106-110.
CHEN Jian-guo, XIE Zheng-xian, FU Huai-ren, et al. Zero output technology of the low-pressure cylinder of 300 MW unit turbine [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 106-110.

[5] 韩 立, 郭 涛. 350 MW 供热机组低压缸零出力经济运行研究[J]. 节能技术, 2019, 37(1): 61-63, 85.

- HAN Li, GUO Tao. Economic operation optimization research on zero output of low pressure cylinder of 350 MW heat supply unit [J]. Energy Conservation Technology, 2019, 37(1): 61–63, 85.
- [6] 余碧莹, 赵光普, 安润颖, 等. 碳中和目标下中国碳排放路径研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2021, 23(2): 17–24.
- YU Bi-ying, ZHAO Guang-pu, AN Run-ying, et al. Research on China's CO₂ emission pathway under carbon neutral target[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Science Edition), 2021, 23(2): 17–24.
- [7] 牟春华, 居文平, 黄嘉骊, 等. 火电机组灵活性运行技术综述与展望[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 7–13.
- MU Chun-hua, JU Wen-ping, HUANG Jia-si, et al. Review and prospect of technologies of enhancing the flexibility of thermal power units[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 7–13.
- [8] 居文平, 吕凯, 马汀山, 等. 供热机组热电解耦技术对比[J]. 热力发电, 2018, 47(9): 119–125.
- JU Wen-ping, LYU Kai, MA Ting-shan, et al. Comparison of thermo-electric decoupling techniques for heating units[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(9): 119–125.
- [9] 刘勇, 刘涛, 李鹏. 330 MW 东方汽轮机低压缸零出力改造案例研究[J]. 机电工程技术, 2019, 48(9): 237–242.
- LIU Yong, LIU Tao, LI Peng. Case analysis of low pressure cylinder zero output retrofit of 300 MW oriental steam turbine[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2019, 48(9): 237–242.
- [10] 朱熹, 谢明江, 黄建强, 等. 汽轮机低压缸零出力供热技术研究[J]. 机械工程师, 2019, 341(11): 123–124, 127.
- ZHU Xi, XIE Ming-jiang, HUANG Jian-qiang, et al. Research on LP zero output technology of steam turbine[J]. Mechanical Engineer, 2019, 341(11): 123–124, 127.
- [11] 靳永亮, 柏海峥, 何文. 330 MW 切除低压缸进汽改造控制方案优化[J]. 河北电力技术, 2019, 38(2): 50–53.
- JIN Yong-liang, BAI Hai-zheng, HE Wen. Intake improvement control scheme optimization of 330 MW excision low pressure cylinder[J]. Hebei Electric Power, 2019, 38(2): 50–53.
- [12] 史卫刚, 李军辉. 330 MW 机组低压缸零出力改造及热电特性分析[J]. 河北电力技术, 2020, 39(2): 63–66.
- SHI Wei-gang, LI Jun-hui. Reformation and thermoelectric characteristics analysis of zero output of 330 MW unit low pressure cylinder[J]. Hebei Electric Power, 2020, 39(2): 63–66.
- [13] 杨海生, 张拓, 唐广通, 等. 低压缸零出力技术对供热机组深度调峰性能影响及调峰补偿标准探讨[J]. 热能动力工程, 2020, 35(6): 268–273.
- YANG Hai-sheng, ZHANG Tuo, TANG Guang-tong, et al. Influence of zero-output technology of low-pressure cylinder on deep peak regulation performance of heating unit and compensation standard for peak regulation[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(6): 268–273.
- [14] 王建勋. 运行背压变化对低压缸零出力技术安全性及经济性的影响分析[J]. 化工进展, 2020, 39(S1): 90–94.
- WANG Jian-xun. Analysis on influence of variation of operating back pressure on safety and economy of zero output technology of low-pressure cylinder[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(S1): 90–94.
- [15] 张猛, 刘鑫屏. 350 MW 供热机组低压缸切除改造灵活性提升分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2019, 46(3): 77–83.
- ZHANG Meng, LIU Xin-ping. Flexibility improvement in heating units through low-pressure cylinder excision of 350 MW heating unit[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2019, 46(3): 77–83.
- [16] 刘双白, 张晶, 吴昕, 等. 320 MW 机组低压缸零出力性能分析及应用研究[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 213–220.
- LIU Shuang-bai, ZHANG Jing, WU Xin, et al. Performance analysis and application research of low-pressure cylinder zero output technology on 320 MW Unit[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 213–220.

(丛敏编辑)