

DOI: 10.19666/j.rlfed.202403047

热电联产系统集成蒸汽喷射器性能分析

夏大伟¹, 张少锋¹, 李玲¹, 张步庭¹, 赵世飞²

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052;

2. 华北水利水电大学能源与动力工程学院, 河南 郑州 450045)

[摘要] 基于某典型超临界 600 MW 燃煤热电联产机组提出集成蒸汽喷射器和外置式蒸汽冷却器的新型系统。其中, 新型系统 I 通过蒸汽喷射器利用再热蒸汽回收乏汽余热; 新型系统 II 进一步集成外置式蒸汽冷却器降低混合蒸汽过热度并减少给水在锅炉的吸热量。基于 EBSILON professional 建模, 对系统在最大供热工况 (供热抽汽量 800 t/h) 和变工况进行调峰性能和热力学性能分析, 并探讨混合蒸汽压力和换热器端差对系统性能的影响。结果表明: 在最大供热工况下, 新型系统 I 和新型系统 II 的供热量较参考系统分别提高 21.59 个百分点和 14.47 个百分点, 发电效率提高 2.48 个百分点和 2.78 个百分点; 在供热量为 300 MW 时, 新型系统 I 和新型系统 II 的发电负荷调节率较参考系统提高了 6.00 个百分点和 3.91 个百分点, 发电量下限降幅达 84.75 MW 和 74.32 MW; 混合蒸汽压力由 50 kPa 提高到 85 kPa, 新型系统 I 和新型系统 II 的总效率分别提高 3.02 个百分点和 2.65 个百分点; 上端差由 1 °C 提高到 9 °C, 新型系统 I 和新型系统 II 的总效率分别降低 1.67 个百分点和 1.51 个百分点。研究结果可为燃煤热电联产机组扩大供热和深度调峰提供技术选项。

[关键词] 燃煤热电联产; 蒸汽喷射器; 余热利用; 深度调峰; 热力学性能

[引用本文格式] 夏大伟, 张少锋, 李玲, 等. 热电联产系统集成蒸汽喷射器性能分析[J]. 热力发电, 2024, 53(11): 147-154.
XIA Dawei, ZHANG Shaofeng, LI Ling, et al. Performance analysis of integrated steam injectors in cogeneration systems[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(11): 147-154.

Performance analysis of integrated steam injectors in cogeneration systems

XIA Dawei¹, ZHANG Shaofeng¹, LI Ling¹, ZHANG Buting¹, ZHAO Shifei²

(1. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China;

2. College of Energy and Power Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: Based on a typical 600 MW coal-fired cogeneration unit, novel systems with integrated steam jet and external steam cooler are proposed. In novel system I, the waste heat from exhaust steam is recovered through a steam jet, in which reheat steam is chosen as the working fluid. In novel system II, an external steam cooler is used to reduce the superheat of the mixed steam and the heat load of the boiler. Based on EBSILON professional modeling, the system is analyzed considering the peak shaving performance and thermodynamic performance under the maximum heating condition (extracted steam for heating: 800 t/h) and variable conditions. Moreover, the effects of mixed steam pressure and heat exchanger end difference on the system performance are also investigated. The results show that, under the maximum heating condition, compared with those of the reference system, the heating capacities of the novel system I and II increase by 21.59 and 14.47 percentage points, and the power generation efficiencies are increase by 2.48 and 2.78 percentage points, respectively. With the heating load of 300 MW, the power load regulation ratios of the novel system I and II improve by 6.00 and 3.91 percentage points compared with the reference system, and the lower limits of generation reduce by 84.75 MW and 74.32 MW. The gross efficiency of the novel system I and II improve by 3.02 and 2.65 percentage points, respectively, when the mixing steam pressure is increased from 50 kPa to 85 kPa. With the upper temperature difference increasing from

收稿日期: 2024-03-15

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (52206012); 国网河南省电力公司电力科学研究院 (52170223000M)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (52206012); State Grid Henan Electric Power Research Institute (52170223000M)

第一作者简介: 夏大伟 (1980), 男, 高级工程师, 主要研究方向为网源协调技术, hndl@vip.qq.com.

通信作者简介: 赵世飞 (1991), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为燃煤热电联产机组高效灵活运行技术, zhaoshifei@ncwu.edu.cn.

况为最大供热工况^[19]。表 1 给出了参考系统在汽机热耗验收 (turbine heat acceptance, THA) 工况和最大供热工况下的主要热力学参数。最大供热工况下低压缸乏汽量减少为 THA 工况下的 29.07%。这部分乏汽损失无法进一步减少。热电联产机组的热电耦合特性也使得其在供热时负荷调节性能变差。

表 1 THA 和最大供热工况下的主要热力学参数
Tab.1 Main thermodynamic parameters under THA and maximum heating conditions

项目	THA 工况	最大供热工况
主蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	1 696.74	1 696.74
主蒸汽压力/MPa	24.20	24.20
主蒸汽温度/℃	566.00	566.00
再热蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	1 396.02	1 359.70
再热蒸汽压力/MPa	3.98	3.70
再热蒸汽温度/℃	566.00	566.00
供热抽汽流量/(t·h ⁻¹)		800.00
供热抽汽压力/MPa		0.40
供热抽汽温度/℃		254.15
供热抽汽疏水温度/℃		104.00
乏汽流量/(t·h ⁻¹)	979.72	284.79
乏汽损失/MW	649.46	251.67
供热量/MW	0	541.06
发电量/MW	600.00	461.97
蒸汽吸热量/MW	1 252.16	1 259.14
背压/kPa	4.90	4.90

1.2 集成蒸汽喷射器的热电联产系统

本文提出集成蒸汽喷射器的热电联产系统 (新型系统 I) 如图 2 所示。该系统以再热蒸汽作为工作流体, 低压缸的乏汽为被引射流体, 混合蒸汽为热网回水第 I 级加热器的热源。热网回水经第 I 级热网加热器加热后, 由第 II 级热网加热器加热到供水温度。喷射器出口混合蒸汽压力的设计值为 60 kPa。第 I 级热网加热器的上端差为 5 °C。

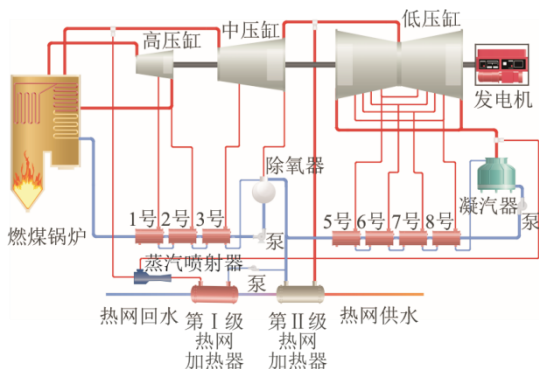


图 2 集成蒸汽喷射器热电联产系统示意 (新型系统 I)
Fig.2 Schematic diagram of a cogeneration system integrated with steam jet (novel system I)

新型系统 I 可通过回收部分乏气余热降低乏汽损失, 并提高机组供热量。同时, 利用高品位的再热蒸汽作为工作蒸汽有利于降低系统在给定供热负荷下的发电量, 提高系统的深度调峰性能。进一步考虑到再热蒸汽的温度较高, 会使混合气体的过热度较高, 从而不利于第 I 级热网加热器的高效换热, 本文提出集成蒸汽喷射器和外置式蒸汽冷却器的热电联产系统 (新型系统 II) 示意如图 3 所示。新型系统 II 利用外置式蒸汽冷却器来回收再热蒸汽的热量, 降低第 I 级热网加热器内的换热温差, 同时提高入炉给水的平均吸热温度。

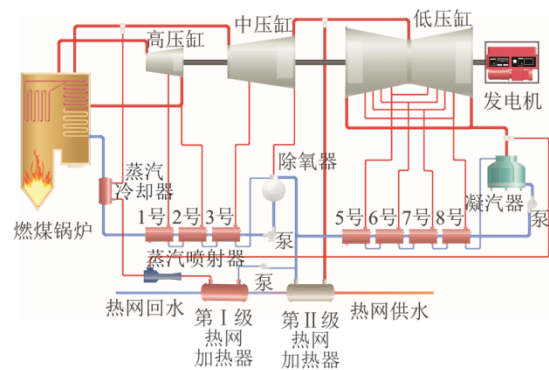


图 3 集成蒸汽喷射器和外置式蒸汽冷却器的热电联产系统示意 (新型系统 II)

Fig.3 Schematic diagram of a cogeneration system integrated with steam jet and external steam cooler (novel system II)

2 系统建模和评价指标

2.1 系统建模介绍

本文选用 EBSILON Professional 作为建模平台^[20], 针对新型系统 II 搭建的模型如图 4 所示。主要假设有: 1) 锅炉的变工况运行模式为“定压-滑压-定压”, 流量与压力的关系根据汽轮机热力特性书设定; 2) 在非设计工况运行时, 汽轮机排汽压力、回热加热器的上下端差、泵的效率、管道压损等均为定值; 3) 锅炉和发电机效率分别设定为 93% 和 99%; 4) 忽略汽轮机的机械损失和散热损失; 5) 变工况时, 汽轮机压力和流量的关系遵循弗留格尔公式; 6) 蒸汽冷却器温升过高会使省煤器存在给水汽化风险, 因此需要相应的温度控制。本文研究暂不考虑该温度控制。在上述假设下, 软件模拟的结果与热力特性书中各工况的相对误差范围为 -0.39%~0.24%。证明建模有较高的精度, 可用于下文的计算分析。

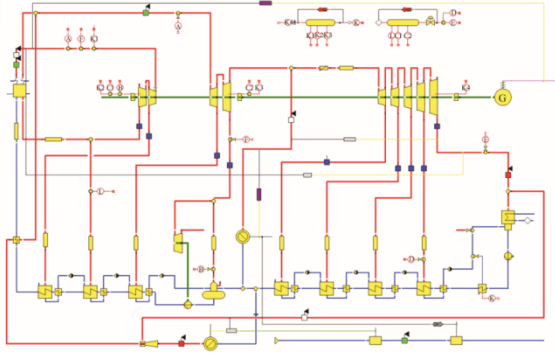


图4 基于EBSILON Professional平台的系统模型示意
Fig.4 Schematic diagram of the system model based on the EBSILON Professional platform

2.2 评价指标

本文分别对蒸汽喷射器的性能、热网水加热过程的热力学性能、调峰性能以及系统整体热力学性能进行分析讨论。

蒸汽喷射器的引射系数 μ 可表示为^[21]:

$$\mu = \frac{m_E}{m_R} \quad (1)$$

式中: m_E 和 m_R 分别为被引射流体(乏汽)和工作流体(再热蒸汽)的质量流量, t/h。

换热过程可采用能质系数 λ (energy quality coefficient)和换热过程焓效率 η_{ex} 来进行评价。其中,能质系数 λ 为换热过程中介质焓变化量 ΔE 与能量变化量 ΔQ 的比值,表示为:

$$\lambda = \frac{\Delta E}{\Delta Q} \quad (2)$$

对于蒸汽,能质系数 λ_s 可近似表示为^[22]:

$$\lambda_s = 1 - \frac{T_0}{T_s} \quad (3)$$

式中: T_0 和 T_s 分别为环境温度和蒸汽的饱和温度, K。

对于热网水,能质系数 λ_w 可表示为^[23]:

$$\lambda_w = 1 - \frac{T_0}{T_{out} - T_{in}} \ln \frac{T_{out}}{T_{in}} \quad (4)$$

式中: T_{out} 和 T_{in} 分别为热网水的出口和进口温度, K。

换热过程焓效率 η_{ex} 可被表示为:

$$\eta_{ex} = \frac{\lambda_w}{\lambda_s} \times 100\% \quad (5)$$

热电联产机组的调峰能力可用发电负荷调节率 ω 来表示:

$$\omega = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{THA}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: P_{max} 、 P_{min} 和 P_{THA} 分别为机组在供热工况时的最大发电量、最小发电量和THA工况下的发电量, MW。

热电联产系统的总效率 η_g 可由下式获得:

$$\eta_g = \frac{P_g + Q_g}{Q_b} \times 100\% \quad (7)$$

式中: P_g 为机组的发电量, MW; Q_g 和 Q_b 分别为机组的供热量和锅炉消耗的燃煤热量, MW。

热电联产系统的发电效率 η_e 可表示为^[24]:

$$\eta_e = \frac{P_g}{Q_b - Q_g / \eta_b} \times 100\% \quad (8)$$

式中: η_b 为锅炉效率,取93%。

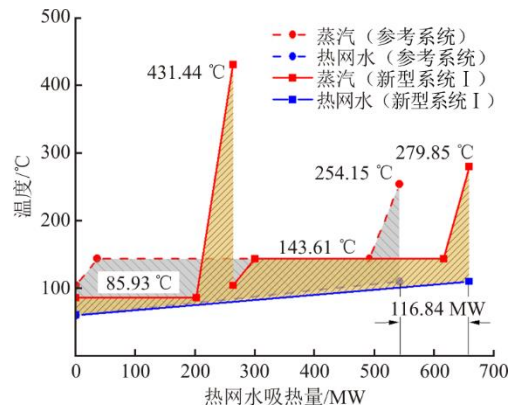
则相应的发电标准煤耗率 b 可表示为:

$$b = \frac{122.8}{\eta_e} \quad (9)$$

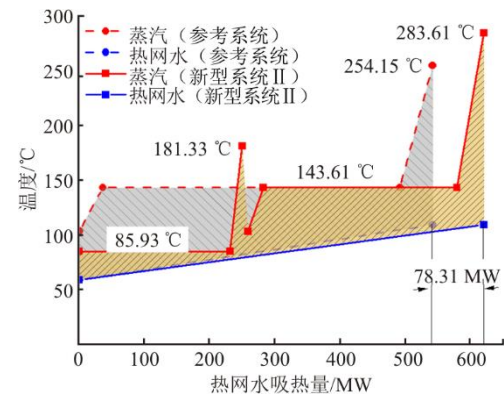
3 结果与讨论

3.1 最大供热工况热力学性能

图5给出了最大供热工况下3个系统热网水加热过程的温度-换热量($T-Q$)关系。新型系统I和新型系统II在第I级加热器中的换热平均温差低于参考系统。但在第I级加热器中,新型系统I的蒸汽过热度为345.52℃,远高于新型系统II(95.41℃)。



a) 新型系统 I



b) 新型系统 II

图5 热网水加热过程 $T-Q$ 图
Fig.5 $T-Q$ diagram of water heating process in the heating network

表 2 给出了换热过程热力学性能对比。新型系统 II 的热端总能质系数 λ_{hot} 最低,为 0.31,换热过程总焓效率 $\eta_{ex,gross}$ 为 76.37%,较参考系统和新型系统 I 分别高 9.13 个百分点和 4.46 百分点。

表 2 换热过程热力学性能对比
Tab.2 Thermodynamic performance comparison of the heating processes

项目	参考系统	新型系统 I	新型系统 II
λ_{hot}	0.35	0.33	0.31
λ_{cold}	0.24	0.24	0.24
$\eta_{ex,I}/\%$		70.04	83.34
$\eta_{ex,II}/\%$		73.00	72.91
$\eta_{ex,gross}/\%$	67.24	71.91	76.37

表 3 给出了 3 个系统整体热力学性能对比。新型系统 I 和新型系统 II 的供热量较参考系统分别提升 21.59% 和 14.47%,发电量则较参考系统分别降低 39.27 MW 和 44.01 MW。由于集成外置式蒸汽冷却器,新型系统 II 的锅炉吸热量比参考系统和新型系统 I 分别减少 14.98 MW 和 44.62 MW。新型系统 I 和新型系统 II 的总效率较原系统分别高 3.90 个百分点和 3.71 百分点,发电效率分别高 2.48 个百分点和 2.78 百分点。

表 3 最大供热工况下热力学性能对比
Tab.3 Thermodynamic performance comparison under maximum heating conditions

项目	参考系统	新型系统 I	新型系统 II
蒸汽吸热量/MW	1 259.14	1 288.78	1 240.16
第 I 级加热器换热量/MW		274.46	258.38
第 II 级加热器换热量/MW		383.43	360.98
供热量/MW	541.06	657.89	619.36
发电量/MW	461.97	422.70	417.96
给水温度/ $^{\circ}\text{C}$	279.23	273.16	295.17
总效率/ $\%$	74.08	77.98	77.79
发电效率/ $\%$	59.83	62.31	62.61
发电标准煤耗率/ $(\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1})$	205.25	197.08	196.12

表 4 给出了最大供热工况下 2 个新型系统的蒸汽喷射器性能对比。因为新型系统 II 中增加了外置式蒸汽冷却器,导致其工作蒸汽温度比新型系统 I 低,使得其引射系数降低 0.003 3。由于第 I 级热网水加热器上端差一样,2 个系统混合蒸汽在供热过程占比均为 41.72%。在引射系数不变的情况下,新型系统 II 的工作流体和引射流体的流量均会增加。新型系统 II 的乏汽回收比例为 29.58%,较新型系统 I 提高 3.23 百分点。

表 4 蒸汽喷射器性能对比
Tab.4 Performance comparison of steam jets

项目	新型系统 I	新型系统 II
乏气回收比例/ $\%$	26.35	29.58
引射流体流量/ $(\text{t}\cdot\text{h}^{-1})$	75.04	84.24
工作流体压力/MPa	3.03	2.94
工作流体温度/ $^{\circ}\text{C}$	566.00	282.77
工作流体流量/ $(\text{t}\cdot\text{h}^{-1})$	256.01	290.70
混合蒸汽压力/kPa	60	60
混合蒸汽流量/ $(\text{t}\cdot\text{h}^{-1})$	331.05	374.94
引射系数	0.293 1	0.289 8
混合蒸汽供热占比/ $\%$	41.72	41.72

3.2 变工况热力学性能

图 6 给出了 3 个系统的热电负荷特性区间对比。由图 6 可知,当供热量为 300 MW 时,新型系统 I 和新型系统 II 的发电负荷调节率比参考系统分别提高 6.00 个百分点和 3.91 百分点。当供热量由 100 MW 提高到 500 MW,新型系统 I 的发电量下限较参考系统降幅由 12.60 MW 提高到了 84.75 MW,新型系统 II 的发电量下限较参考系统降幅由 9.79 MW 提高到了 74.32 MW。图 7 给出了供热量为 300 MW 时,3 个系统热力学性能对比。

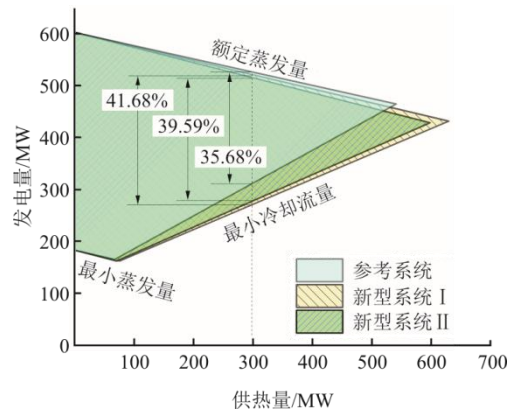


图 6 3 个系统的热电负荷特性
Fig.6 Heat-power load regulation characteristics of the above three systems

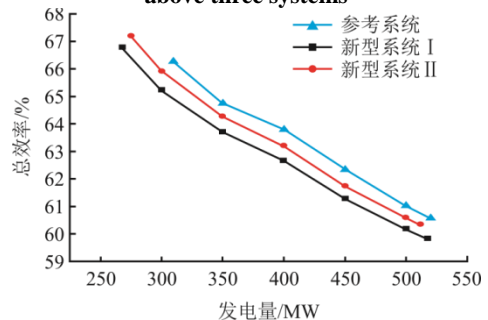


图 7 不同发电量的热力学性能对比
Fig.7 Thermodynamic performance comparison for different power loads

由图7可知,在3个系统都能满足热电需求时,参考系统的总效率最高,新型系统I的总效率最低。运行时优先考虑参考系统的运行方式,当其无法满足需要的较低发电量时,优先选择新型系统II,当新型系统II无法降至所需发电量时,再选择新型系统I。

图8给出了在最大供热工况下,负荷率(主蒸汽蒸发量)变化对3个系统的热力学性能影响。由图8可知,随着负荷率的下降,3个系统的最大供热能力和对应的发电量都随之下降。此外,当负荷率由100%降到30%时,参考系统、新型系统I和新型系统II的发电标准煤耗率分别提高了95.05、97.69、97.80 g/(kW·h)。

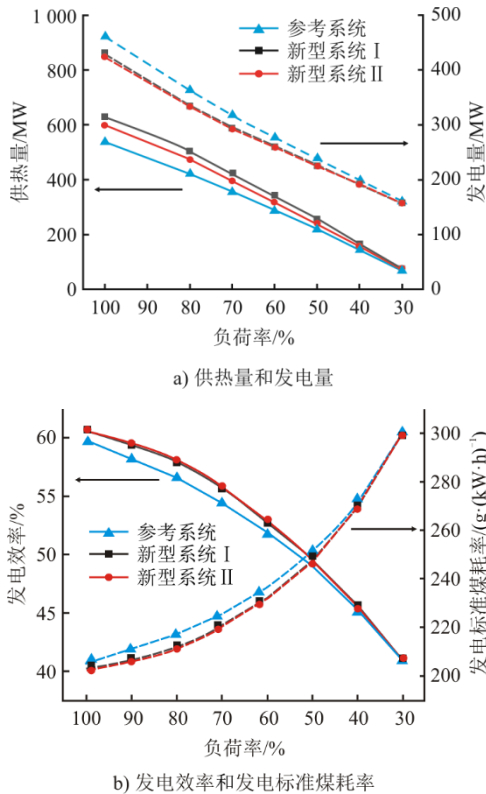


图8 负荷率变化对系统热力学性能影响

Fig.8 Effects of load ratio on thermodynamic performance of the systems

3.3 关键参数对系统热力学性能影响

图9给出了在最大供热工况下,喷射器混合蒸汽压力对热力学性能影响。由图9可知:当混合蒸汽压力由50 kPa提高到85 kPa时,新型系统的第I级加热器供热占比提高27.59%,新型系统I和新型系统II的引射系数分别降低0.0220和0.0238;新型系统I和新型系统II供热量增幅分别为95.79 MW和54.61 MW,发电量降幅分别为30.15 MW和31.88 MW。总效率分

别提高3.02个百分点和2.65个百分点,发电效率分别提高2.36个百分点和2.33个百分点。

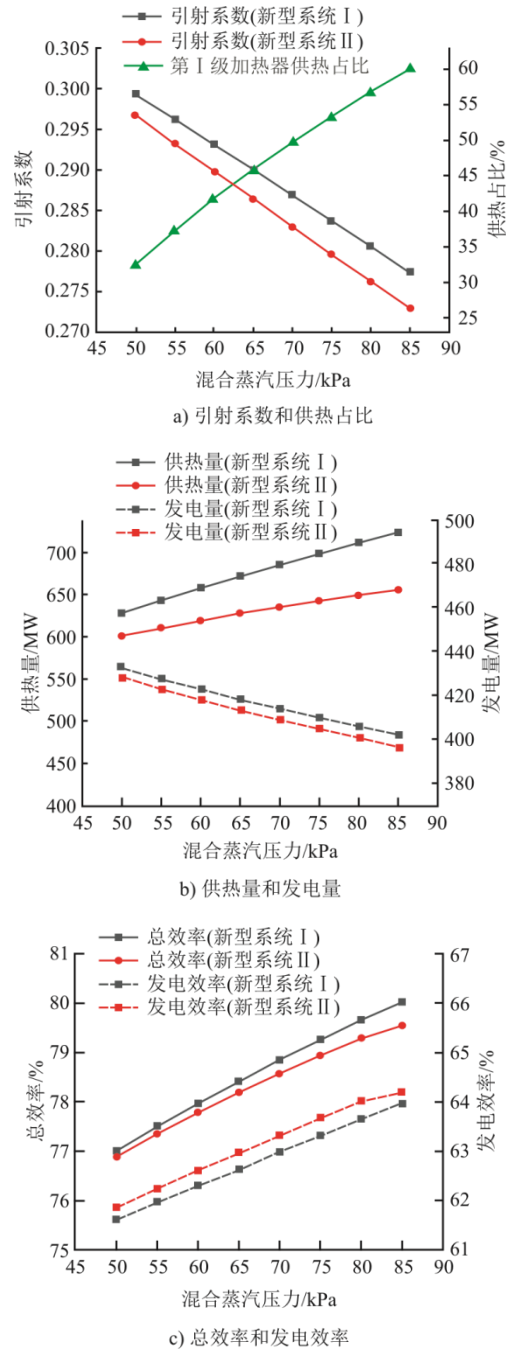


图9 喷射器混合蒸汽压力对热力学性能影响

Fig.9 Effects of mixing pressure of the steam jet on thermodynamic performance of the system

图10给出了在最大供热工况下,第I级加热器上端差对3个系统的热力学性能影响。由图10可知,随着第I级加热器上端差的提高,新型系统的最大供热能力下降,对应的发电量提高。此时,新型系统I和新型系统II的总效率和发电效率均下降。其中总效率分别降低1.67个百分点和1.51百分

点,发电效率分别降低 1.24 个百分点和 1.32 百分点。

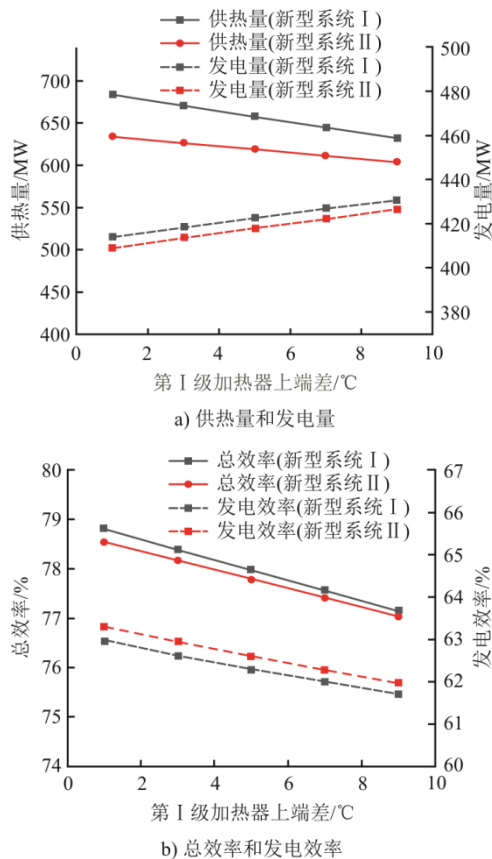


图 10 第 I 级加热器上端差对热力学性能影响

Fig.10 Effects of the upper temperature difference of stage I heater on thermodynamic performance of the system

4 结 论

为提高热电联产机组供热能力和负荷调节能力,以某超临界 600 MW 燃煤热电联产机组为例,提出集成蒸汽喷射器和外置式蒸汽冷却器的新型系统,对机组在最大供热工况和变工况性能以及关键参数的影响进行分析,得到如下结论。

1) 新型系统 I 和新型系统 II 较参考系统最大供热量提高,对应发电量下降,总效率和发电效率提高。在最大供热工况下,新型系统 I 和新型系统 II 供热量较参考系统分别提高 21.59 个百分点和 14.47 百分点,发电量分别降低 39.27 MW 和 44.01 MW。总效率较原系统分别高 3.90 个百分点和 3.71 百分点,发电效率分别高 2.48 个百分点和 2.78 百分点。

2) 新型系统 I 和新型系统 II 较参考系统发电负荷调节能力提高,尤其是发电量下限降幅较大。当供热量由 100 MW 提高到 500 MW 时,新型系统 I 的发电量下限较参考系统降幅由 12.60 MW 提高到 84.75 MW,新型系统 II 的发电量下限较参考系统降

幅由 9.79 MW 提高到 74.32 MW。

3) 蒸汽喷射器混合蒸汽压力的提高会使新型系统乏汽回收量提高,第 I 级加热器上端差会使新型系统乏汽回收量降低。混合蒸汽压力由 50 kPa 提高到 85 kPa,新型系统 I 和新型系统 II 的总效率分别提高 3.02 个百分点和 2.65 百分点;上端差由 1 °C 提高到 9 °C,新型系统 I 和 II 的总效率分别降低 1.67 个百分点和 1.51 百分点。

[参考文献]

- [1] 国家发展改革委,国家能源局.关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见[EB/OL].(2023-07-15)[2024-03-10]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202202/t20220210_1314511.html. National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Opinions on improving institutional mechanisms and policy measures for green and low-carbon energy transition[EB/OL]. (2023-07-15) [2024-03-10]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202202/t20220210_1314511.html.
- [2] 王玮,孙阳,井思桐.热电联产机组热电转换与耦合特性分析[J].工程热物理学报,2019,40(9):1976-1980. WANG Wei, SUN Yang, JING Sitong. Analysis on the heat-power conversion and coupling characteristics of combined heat and power units[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(9): 1976-1980.
- [3] 钱白云,王义函,刘伟,等.自备电厂热电联产方案及其特性分析[J].热力发电,2023,52(5):145-153. QIAN Baiyun, WANG Yihan, LIU Wei, et al. Characteristic analysis and decoupling scheme of thermoelectric decoupling based on factory-owned power plant[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(5): 145-153.
- [4] 李明皓,白永岗,鲁晓宇,等.基于调度需求的多机组耦合电锅炉优化配置及运行分析[J].热力发电,2023,52(2):126-135. LI Minghao, BAI Yonggang, LU Xiaoyu, et al. Analysis on configuration optimization and operation of multi-unit coupled electric boilers based on dispatch requirements[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(2): 126-135.
- [5] 杨凯旋,熊涌盛,刘明,等.抽汽-高背压-热泵耦合供热系统运行优化[J].工程热物理学报,2023,44(6):1459-1464. YANG Kaixuan, XIONG Yongsheng, LIU Ming, et al. Operation optimization of heat and power cogeneration system coupled with extraction unit, high back pressure unit and heat pump[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(6): 1459-1464.
- [6] 曹丽华,丁皓轩,葛维春,等.热电联产机组储热罐最佳容量的确定方法[J].太阳能学报,2021,42(2):61-67. CAO Lihua, DING Haoxuan, GE Weichun, et al. Optimal operation strategy of heat storage tank in chp unit based on genetic algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(2): 61-67.
- [7] 曹丽华,丁皓轩,葛维春,等.基于遗传算法的热电机组储热罐最优运行策略[J].中国电机工程学报,2020,40(11):3574-3583. CAO Lihua, DING Haoxuan, GE Weichun, et al. Optimal operation strategy of heat storage tank in CHP

- unit based on genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3574-3583.
- [8] 吕泉, 陈天佑, 王海霞, 等. 含储热的电力系统电热综合调度模型[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 79-85.
LYU Quan, CHEN Tianyou, WANG Haixia, et al. Integrated electric-thermal scheduling model for power systems with heat storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 79-85.
- [9] 吕泉, 陈天佑, 王海霞, 等. 配置储热后热电机组调峰能力分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 34-41.
LYU Quan, CHEN Tianyou, WANG Haixia, et al. Analysis of the peaking capacity of a cogeneration unit after the configuration of heat storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 34-41.
- [10] 陆树银, 刘浩晨, 顾煜炯, 等. 大型热电联产机组供热改造分析[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(5): 1182-1189.
LU Shuyin, LIU Haochen, GU Yujiong, et al. Thermodynamic analysis of heating reformation of large-scale CHP[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(5): 1182-1189.
- [11] 杨绪青, 余真珠, 杨肖虎, 等. 压缩空气储能与吸收式热泵循环集成的热电联产系统[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(1): 362-369.
YANG Xuqing, YU Zhenzhu, YANG Xiaohu, et al. Combined heating and power system coupled with compressed air energy storage and absorption heat pump cycle[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(1): 362-369.
- [12] TAN Z M, FENG X, WANG Y F. Performance comparison of different heat pumps in low-temperature waste heat recovery[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 152: 111634.
- [13] 张钧泰, 刘明, 种道彤, 等. 集成蒸汽喷射器的热电解耦系统全工况性能分析[J]. 动力工程学报, 2021, 41(8): 692-699.
ZHANG Juntao, LIU Ming, CHONG Daotong, et al. Performance analysis of a heat-power decoupling system integrated with steam ejectors in the full condition range[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(8): 692-699.
- [14] 刘荣堂, 王宇, 范佩佩, 等. 集成蒸汽喷射器的热电协同系统全工况性能分析[J]. 动力工程学报, 2023, 43(1): 56-64.
LIU Rongtang, WANG Yu, FAN Peipei, et al. Performance analysis of a heat-power synergy system integrated with steam ejectors under the full working condition[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(1): 56-64.
- [15] ZHANG Y J, XIONG N, GE Z H, et al. A novel cascade heating system for waste heat recovery in the combined heat and power plant integrating with the steam jet pump[J]. Applied Energy, 2020, 278: 115690.
- [16] 孙博昭, 岳爽, 王春波, 等. 350 MW 超临界机组可调式蒸汽喷射器工业供热性能数值模拟研究及试验验证[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2021, 48(3): 98-107.
SUN Bozhao, YUE Shuang, WANG Chunbo, et al. Numerical simulation and test verification on industrial heating performance of adjustable steam ejector in 350 MW supercritical unit[J]. Journal of North China Electric Power University, 2021, 48(3): 98-107.
- [17] 孙博昭, 王春波, 李松, 等. 350 MW 超临界机组可调式蒸汽喷射器工业供热系统热电联产性能分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2022, 49(6): 36-44.
SUN Bozhao, WANG Chunbo, LI Song, et al. Performance analysis of cogeneration of industrial heating system with adjustable steam ejector for 350 MW supercritical unit[J]. Journal of North China Electric Power University, 2022, 49(6): 36-44.
- [18] LIU M M, LIU M, WANG Y, et al. Thermodynamic optimization of coal-fired combined heat and power (CHP) systems integrated with steam ejectors to achieve heat-power decoupling[J]. Energy, 2021, 229: 120707.
- [19] 魏德, 席新铭, 李健, 等. 耦合喷射器的高背压机组变工况特性研究[J]. 热力发电, 2023, 52(5): 107-114.
WEI De, XI Xinming, LI Jian, et al. Study on off-design characteristics of high back pressure unit coupled with ejector[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(5): 107-114.
- [20] ZHAO S F, WANG W S, GE Z H. Thermodynamic, operational, and techno-economic analysis of the cascade heating system with a double-unit[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 226: 113558.
- [21] FARSHI L G, KHALILI S. Thermoeconomic analysis of a new ejector boosted hybrid heat pump (EBHP) and comparison with three conventional types of heat pumps[J]. Energy, 2019, 170: 619-635.
- [22] LI Y, AN H L, LI W T, et al. Thermodynamic, energy consumption and economic analyses of the novel cogeneration heating system based on condensed waste heat recovery[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 177: 671-681.
- [23] YANG B, JIANG Y, FU L, et al. Modular simulation of cogeneration system based on absorption heat exchange (Co-ah)[J]. Energy, 2018, 153: 369-386.
- [24] ZHAO S F, GE Z H, SUN J, et al. Comparative study of flexibility enhancement technologies for the coal-fired combined heat and power plant[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 184: 15-23.

(责任编辑 邓玲惠)