

集成太阳能辅助供热的600 MW高背压热电联产机组的运行及优化

高佳圣,徐浩东,王万权,周艳

(青岛科技大学机电工程学院,山东青岛266061)

摘要:为了解决太阳能辅助燃煤发电系统与太阳能辅助抽汽供热系统的余热损失增多问题,提出一种太阳能辅助高背压热电联产系统的优化改造方案。利用EBSILON软件采用数值模拟的方法,对改造前后机组的整体性能和改造后机组在不同发电功率、背压、热网供回水温度工况下的收益变化进行了分析,对比了改造前后机组的焓效率与经济性差异。结果表明:改造后的太阳能辅助高背压热电联产系统节煤更多,机组回收了集成太阳能产生的余热后供热能力增强;改造后的机组在低发电功率、较高背压和较低热网供回水温度时节煤更多;在低发电功率、较低背压及较高热网供回水温度时机组的供热能力更强;改造后的太阳能辅助高背压热电联产系统焓效率更高、系统的经济效益更佳。

关键词:高背压供热;太阳能;EBSILON;变工况;节能

中图分类号:TK519 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.09.019

[引用本文格式]高佳圣,徐浩东,王万权,等.集成太阳能辅助供热的600 MW高背压热电联产机组的运行及优化[J].热能动力工程,2023,38(9):158-165. GAO Jia-sheng, XU Hao-dong, WANG Wan-quan, et al. Operation and optimization of 600 MW high back pressure cogeneration unit with integrated solar assisted heating[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(9): 158-165.

Operation and Optimization of 600 MW High Back Pressure Cogeneration Unit with Integrated Solar Assisted Heating

GAO Jia-sheng, XU Hao-dong, WANG Wan-quan, ZHOU Yan

(College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, China, Post Code: 266061)

Abstract: In order to solve the problem of increasing waste heat loss of solar assisted coal-fired power generation system and solar assisted steam extraction heating system, an optimal transformation scheme of solar assisted high back pressure cogeneration system was proposed. The method of EBSILON software simulation was adopted to analyze the overall performance of the unit before and after the transformation and the change of unit income under the conditions of different generated power, back pressures and supply and return water temperatures of the heat network after the transformation, and compare the difference of unit exergy efficiency and economy before and after the transformation. The results show that the retrofitted solar assisted high back pressure cogeneration system saves more coal, and the heat supply capacity is enhanced after the unit recovers the waste heat generated by integrated solar energy; the retrofitted unit saves more coal when the power generation load is low, the back pressure is high, and the supply and return water temperatures of the heat network are low; the heat supply capacity of the unit is stronger when the power generation load is low, the back pressure is low, and the supply and return water temperatures of the heat network are high; the retrofitted solar assisted high back pressure cogeneration system has higher exergy efficiency and better economic benefits.

Key words: high back pressure heating, solar energy, EBSILON, variable working condition, energy conservation

引言

对于实现“碳达峰、碳中和”,太阳能等清洁能源的利用十分关键^[1]。澳大利亚教授 Eric Hu^[2-4]提出将太阳能与燃煤发电机组集成能够解决太阳能易波动、不稳定的缺陷,且可以增大机组的发电功率、降低机组煤耗。

在集成方案方面:文献[5]中,新型塔式太阳能辅助燃煤发电系统利用高温太阳能与低温太阳能分别加热再热蒸汽与锅炉给水,提高了系统的太阳能利用效率;文献[6]研究了蓄热系统对太阳能辅助燃煤发电系统的性能影响,发现有蓄热的集成系统在系统的生命周期评估中表现更好;文献[7]采用遗传算法对太阳能辅助发电系统的集成方式、集热面积和储热分配进行了优化,提升了系统的经济效益;文献[8]研究发现,相较于传统的热电联产系统,太阳能辅助热电联产系统的调峰能力更高,系统的灵活性更强。在评价标准方面:文献[9-10]分析了5种太阳能辅助燃煤发电系统的太阳能贡献评价方法,对1 000、600和330 MW的集成系统进行的比较研究表明,考虑能量质量和不同位置烟的不等价性的“热经济学成本法”与实验验证方法结合更适用于实际情况;文献[11]开发出一种用于计算太阳能辅助发电系统的热经济性的矩阵分布方程,简化了混合系统的性能评估计算。在系统运行优化方面:文献[12]提出太阳能辅助发电系统中有效太阳辐射强度增大时调整导热油流速可以使系统的太阳能贡献率保持较高水平的优化策略。文献[13]以年度负荷调度为目标,建立了风电场和太阳能辅助热电联产系统的双容量运行协调优化模型,用于实现系统运营收入的最大化;文献[14]根据枚举法对太阳能辅助热电联产系统的集热场面积和储热容量进行了优化,提高了系统的年净收益。

目前,在许多方面对太阳能辅助燃煤机组系统的研究已较为深入。但燃煤机组集成太阳能替代回热抽气或者供热抽气时会使汽轮机内做功蒸汽增多,产生更多的乏汽,使机组的余热损失增加,降低

系统的能源利用率。

本文基于 EBSILON 软件,对太阳能辅助燃煤发电机组、太阳能辅助抽气供热机组的余热资源损失情况进行了分析,提出一种太阳能辅助高背压供热系统,以优化上述系统中存在的缺陷,重点研究机组运行过程中发电功率、机组背压、供回水温度等参数变化对太阳能辅助高背压供热机组收益的影响。

1 太阳能辅助燃煤发电、抽汽供热机组性能分析

1.1 基础案例

选取某典型 600 MW 超临界燃煤发电机组作为计算的案例机组,型号为 N600-24.2/566/566。使用 EBSILON 软件对其建模后,机组系统流程如图 1 所示。案例机组的设计参数与仿真参数的对比结果如表 1 所示。机组仿真参数与设计参数的误差在 2% 以内,该模型满足计算精度要求。

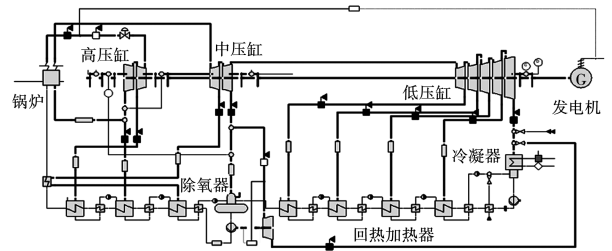


图 1 基础案例机组系统流程图

Fig. 1 Flow chart of unit system in basic case

表 1 模型验证相对误差表

Tab. 1 Relative error table of model validation

参数	设计值	仿真值	相对误差/%
发电功率/MW	600	600	0
主蒸汽温度/°C	566	566	0
主蒸汽焓/kJ·kg ⁻¹	3 396.0	3396.0	0
主蒸汽质量流量/t·h ⁻¹	1 845.7	1841.6	0.22
再热蒸汽温度/°C	566	566	0
再热蒸汽焓/kJ·kg ⁻¹	3 596.8	3592.1	0.13
等熵效率/%	49.58	49.52	0.12
乏汽温度/°C	31.0	31.0	0
乏汽焓/kJ·kg ⁻¹	2 340.9	2 335.0	0.25

1.2 方案概述

案例机组集成太阳能的 3 种方案流程如图 2 ~ 图 4 所示。方案 1, 从除氧器出口抽出部分锅炉给水被太阳能集热场加热后输回锅炉入口处; 方案 2, 从第 4 级低加后抽出部分主凝结水被太阳能集热场加热后输送回除氧器入口处; 方案 3, 将机组改造为抽汽供热式机组, 并利用太阳能辅助加热装置加热部分热网回水, 用于供热。

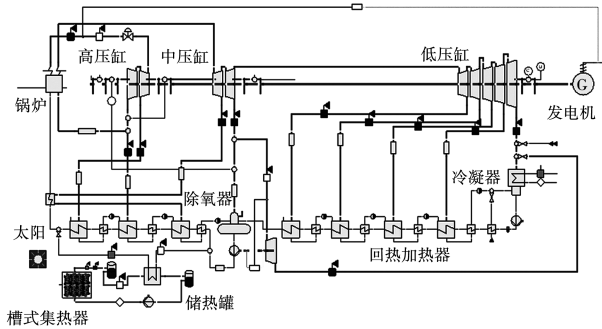


图 2 方案 1 系统流程图

Fig. 2 System flow chart in scheme I

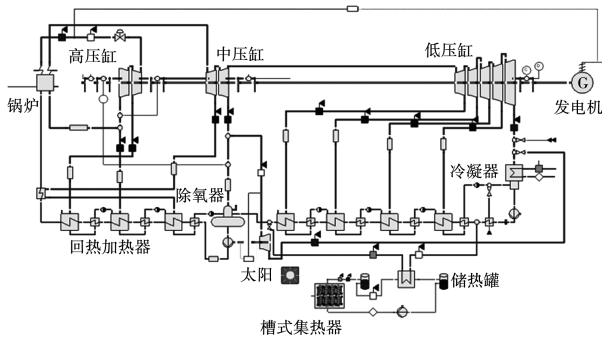


图 3 方案 2 系统流程图

Fig. 3 System flow chart in scheme II

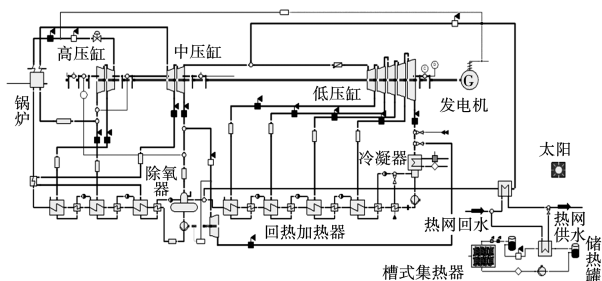


图 4 方案 3 系统流程图

Fig. 4 System flow chart in scheme III

槽式太阳能集热场的主要参数见表 2。集热器型号为 Eurotrough ET-150, 数量为 300 个, 导热油为 Therminol VP-1, 温度变化范围在 0 ~ 400 °C, 最大放热功率为 60 MW。

表 2 太阳能集热场主要参数

Tab. 2 Main parameters of solar collector field

参 数	数 值
集热器组件几何尺寸长(宽)/m	150.00(5.76)
集热器组件有效光学面积/m ²	817.43
玻璃外壳的外(内)径/m	0.120(0.115)
吸收管的外(内)径/m	0.070(0.065)
最大光学效率/%	75.00
集热器数量	300
集热器总有效光学面积/m ²	245 229.12

1.3 评价指标

节煤率 Δb 表征了集成太阳能后维持机组发电功率不变得到的收益:

$$\Delta b = \frac{0.123}{\eta_{tp,e}} - \frac{0.123}{\eta_{tp,e}^s} = b - b_h^s \quad (1)$$

式中: Δb —集成太阳能后系统的节煤率, g/(kW·h); $\eta_{tp,e}, \eta_{tp,e}^s$ —集成太阳能前后系统的发电热效率, %; b, b_h^s —集成太阳能前后系统发电的标准煤耗率, g/(kW·h)。

机组集成太阳能后的冷源损失增加量计算式为:

$$\Delta q = \frac{(M_c - M_{ch}) \times (h_c - h'_c)}{3\ 600} \quad (2)$$

$$\Delta q_s = \Delta q' - \Delta q \quad (3)$$

式中: Δq_s —集成太阳能后冷源损失增加量, MW; $\Delta q, \Delta q'$ —集成太阳能前后机组的冷源损失, MW; M_c, M_{ch} —低压缸排汽的质量流量和供热乏汽的质量流量, t/h; h_c, h'_c —低压缸排汽焓值和低压缸排汽压力下的饱和水焓值, kJ/kg。

烟代表了系统能量中 有用能的部分, 总烟转换效率可以用来衡量系统烟的利用程度, 计算式为:

$$\eta_{ex,t} = \frac{E_e + E_h}{E_b + E_s} \quad (4)$$

式中: $\eta_{ex,t}$ —系统的总烟转换效率, %; E_e, E_h —机组的发电输出烟和供热输出烟, MW; E_b, E_s —机组的锅炉输入烟和太阳能输入烟, MW。

光电、热电转换焓效率可以表征太阳能的焓利用程度,计算式为:

$$\eta_{ex,s} = \frac{P_{e,s}}{E_s} \quad (5)$$

$$\eta_{ex,h} = \frac{P_{h,s}}{E_s} \quad (6)$$

式中: $\eta_{ex,s}$ 、 $\eta_{ex,h}$ —光电、热电转换焓效率,% ; $P_{e,s}$ —集成太阳能前后机组的发电功率差值,MW ; $P_{h,s}$ —机组集成太阳能前后热网水所得到的焓的差值,MW。

1.4 各方案模拟结果分析

设定方案 1、方案 2 的发电功率为 600 MW,方案 3 的发电功率为 500 MW,供热功率为 500 MW,3 种方案的太阳能输入功率都为 60 MW。利用 EBSILON 软件对 3 种方案进行模拟分析,其计算结果如表 3 所示。从表 3 可以看出,3 种方案的发电标准煤耗率与未集成太阳能的常规机组相比均有所降低,冷源损失均有所增加。原因在于,方案 1、2 中使用太阳能加热锅炉给水和主凝结水,机组的回热抽

汽量降低,汽轮机内蒸汽流量增多,而发电功率保持不变,从而降低了机组的发电煤耗,增加了冷源损失;方案 3 中使用太阳能加热部分热网回水,承担了部分热负荷,减少了高温供热抽汽流量,低压缸进汽流量增多,发电功率不变,发电煤耗降低,乏汽增多,冷源损失变大。高压回热抽汽的参数比低压回热抽汽高,所以方案 1 的节煤率比方案 2 高,方案 1 的冷源损失增加值也更多。方案 3 中集成太阳能后机组的高温供热抽汽流量降低,但其减少的量低于方案 1 中的高压回热抽汽减少量,所以方案 3 的低压缸进汽量更少,机组产生的乏汽更少,机组的冷源损失增加量也更低。方案 3 做抽汽供热改造后机组发电功率降低,煤耗减少,集成太阳能使高温供热抽汽流量下降后机组的煤耗进一步减少,所以方案 3 的节煤率高于方案 1。总的来看,在太阳能输入功率相同的情况下,方案 3 即太阳能辅助抽汽供热机组表现最佳,但此方案中机组的冷源损失仍有所增多,造成余热资源浪费。

表 3 3 种方案模拟计算结果

Tab. 3 Simulation calculation results of three schemes

方案	太阳能输入 功率/MW	发电功率/ MW	供热功率/ MW	发电热 效率/%	发电标准煤 耗率/ $g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$	节煤率/ $g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$	冷源损失/ MW	冷源损失增加 量/MW
常规火电机组	0	600	0	46.10	266.81	0	691.030	0
方案 1	60	600	0	47.51	258.89	7.75	713.311	22.281
方案 2	60	600	0	46.38	265.20	1.44	744.102	53.072
常规抽汽供热机组	0	500	500	57.16	215.19	0	366.574	0
方案 3	60	500	500	59.98	205.07	10.12	385.454	18.879

2 太阳能辅助高背压供热机组性能研究

2.1 系统流程

太阳能辅助高背压供热机组的改造采用文献 [15-16] 中所提供的方法,在方案 3 中机组的最后一级低压缸进汽口前安装液压蝶阀,用以切断该级进汽,从而使该机组上一级低压缸排汽达到规定的高背压供热抽汽的参数要求,用以供热;另一方面,通过设置冷却蒸汽旁路的方式,带走该级低压缸转子由于旋转产生的热量,使机组保持安全运行。改造后机组的背压调节范围达到了 34~54 kPa,供热乏汽在热网凝汽器内加热热网回水。改造后的太阳

能辅助高背压供热系统流程如图 5 所示。在此流程中,热网回水首先进入热网凝汽器,被供热乏汽一次加热,随后再进入原方案 3 中的热网加热器,被高温供热抽汽进一步加热至供热所需温度。抽取部分被供热乏汽一次加热后的热网水,由太阳能辅助加热系统将其加热至相同的供热温度,再与热网加热器出口的热网供水合并到一处进行供热。

2.2 系统模拟分析

2.2.1 整体分析

设置机组的供热功率为 500 MW,发电功率为 500 MW,太阳能输入功率为 60 MW,背压为 0.042 MPa,热网回水温度 49 ℃,供水温度 90 ℃。计算了

没有集成太阳能的高背压供热机组的数据,将其与太阳能辅助高背压供热机组的计算结果做对比,如表 4 所示。从表 4 可以看出,太阳能辅助高背压供热机组的供热功率增加了 38.505 MW,这是因为在太阳能辅助高背压供热机组中,太阳能替代了部分

热网加热器的高温供热抽汽,供热抽汽流量减小,机组低压缸进汽量增多,导致机组的乏汽量增多。这部分增多的乏汽被热网凝汽器收集起来用于加热热网回水,使太阳能辅助高背压供热机组的供热功率有所增加。

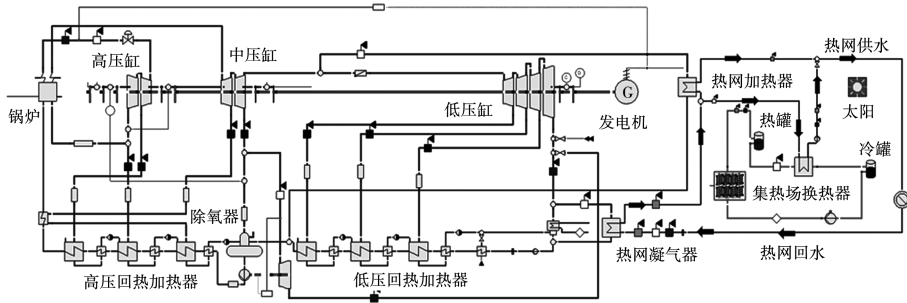


图 5 太阳能辅助高背压供热系统流程

Fig. 5 Flow chart of solar assisted high back pressure heating system

与高背压供热机组相比,太阳能辅助高背压供热机组的冷源损失没有变多,没有产生更多的余热资源浪费。与方案 3 相比,太阳能辅助高背压供热机组的发电热效率更高,发电标准煤耗率更低,节煤率更高,机组效益提升。

温度的几种工况,模拟分析了机组在不同运行工况下的运行效益变化规律。

表 4 3 种机组计算结果对比

Tab. 4 Comparison of simulation calculation results of three units

参 数	方案 3	太阳能辅助高背压供热	高背压供热
太阳能功率/MW	60	60	60
发电功率/MW	500	500	500
供热功率/MW	500	538.243	500
冷源损失/MW	385.454	306.640	306.640
供热抽汽流量/ $t \cdot h^{-1}$	615.174	218.858	281.201
供热乏汽流量/ $t \cdot h^{-1}$	0	512.952	476.609
发电热效率/%	59.98	66.26	61.38
发电煤耗率/ $g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$	205.07	185.63	200.39
节煤率/ $g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$	10.12	29.56	14.8
供热量增加值/MW	0	38.505	0

设定太阳能辅助高背压供热机组的背压为 0.042 MPa,热网供回水温度为 49 ~ 90 °C,太阳能输入功率为 60 MW。机组发电功率变化对机组收益的影响,如图 6 所示。随着太阳能辅助高背压供热机组发电功率的增加,机组的节煤率和供热量增加值都逐渐降低。这是由于随机组发电功率增加,热网加热器进出口供热抽汽的焓差变小,机组所需的供热抽汽流量增多,煤耗增加,节煤率下降;机组供热抽汽流量增大导致低压缸进汽变少,热网凝汽器收集的乏汽量减少,机组供热量的增加值减小。

2.2.2 系统变参数特性分析

在热电联产机组的运行过程中,有时需要合理切换机组的运行工况以满足实际需求。对于太阳能辅助高背压供热机组,机组的运行工况发生改变对其运行效益的影响无法预测,因此针对太阳能辅助高背压供热机组的不同发电功率、背压、热网供回水

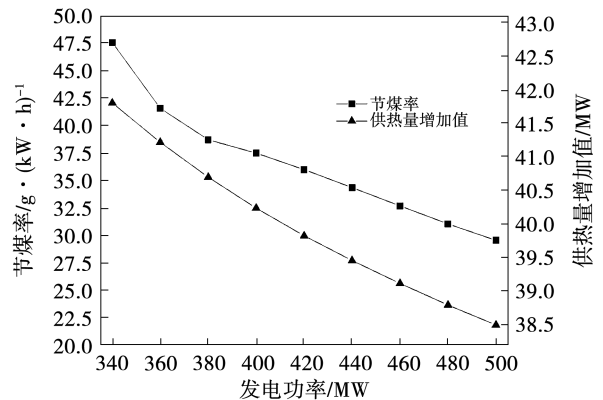


图 6 不同发电功率下机组节煤率与供热量增加值的变化

Fig. 6 Change of unit coal saving rate and heat supply increment under different generated power

设定太阳能辅助高背压供热机组的发电功率为500 MW,热网供回水温度为49~90℃,太阳能输入功率为60 MW。机组背压发生变化对机组收益的影响,如图7所示。从图7可以看出,太阳能辅助高背压供热机组的背压升高时,机组的节煤率有所上升,供热量增加值呈下降趋势。随着机组背压升高,供热乏汽温度也随之升高。为保证合理的换热温差,热网回水被供热乏汽加热后的温度变高,热网水被供热抽汽与太阳能辅助加热系统侧加热的温差变小。此时太阳能加热的热网水流量增大,供热抽汽流量降低,供热抽汽流量减少,使机组节煤率升高;因为热网回水经过热网凝汽器前后的温差变大,吸热量增大,所以供热乏汽能够加热的热网回水流量减少,机组供热量增加值降低。

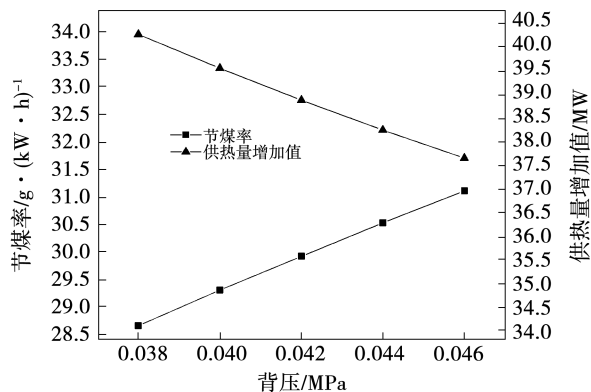


图7 不同背压下机组节煤率与供热量增加值的变化

Fig. 7 Change of unit coal saving rate and heat supply increment under different back pressures

随着供暖季的深入,热网供回水温度不断升高。设定太阳能辅助高背压供热机组的发电功率为500 MW,背压为0.042 MPa,太阳能输入功率为60 MW。热网供回水温度变化对机组收益产生的影响如图8所示。从图8可以看出,随热网供回水温度升高,太阳能辅助高背压供热机组的节煤率下降,机组的供热量增加值逐渐增大。在此过程中,太阳能辅助加热系统进出口热网水的温差变大,太阳能辅助加热系统输入功率不变,流经太阳能辅助加热系统的热网水变少,因此热网加热器进出口的热网水温差变大、需要的供热抽汽流量变多,机组节煤率降低;随热网供回水温度升高,热网凝汽器进出口热网水的温差变小,热网凝汽器可以加热的热网回水

流量增多,因此太阳能辅助高背压供热机组的供热量增加值变大。

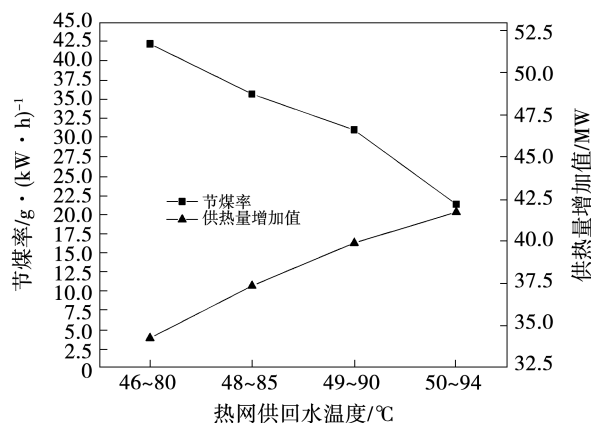


图8 不同热网供回水温度下机组节煤率与供热量增加值的变化

Fig. 8 Change of unit coal saving rate and heat supply increment under different supply and return water temperatures of heat network

2.2.3 焓分析

对抽汽供热机组、太阳能辅助抽汽供热机组以及太阳能辅助高背压供热机组进行了焓分析,结果列于表5。集成前后锅炉的输入焓保持一致,太阳能输入焓为27.82 MW。通过对比发现,由于机组背压的升高,导致乏汽的温度提高,太阳能辅助高背压供热机组的凝汽器焓损要高于太阳能辅助抽汽供热机组。

由于太阳能辅助高背压供热机组使用一部分乏汽进行供热,蒸汽与热网水直接的换热温差减小,能量传递方式更合理,所以其热网部分焓损远低于太阳能辅助抽汽供热机组。

太阳能辅助抽汽供热机组由于使用太阳能加热热网水,乏汽随着供热抽汽减少而增多,造成凝汽器焓损增多。且太阳能加热系统也产生了一部分焓损,所以系统的总焓损比抽汽供热机组要多。

太阳能辅助高背压供热机组的总焓损最低,总焓转换效率最高。太阳能辅助抽汽供热机组的光电转换焓效率可达70.55%。太阳能辅助高背压供热机组在发电和供热两方面都获得了收益,光电转换焓效率可达32.75%,热电转换焓效率可达36.92%。

表 5 各系统烟参数对比

Tab. 5 Comparison of exergy parameters of each system

参 数	抽汽供热	太阳能辅助	太阳能辅助高
	机组	抽汽供热机组	背压供热机组
锅炉输入烟/MW	828.9	828.9	828.9
太阳能输入烟/MW	-	27.82	27.82
发电输出烟/MW	508.553	528.180	543.339
供热输出烟/MW	100.95	100.95	111.22
发电机烟损/MW	7.431	7.717	7.939
汽轮机烟损/MW	34.781	35.435	30.154
回热器烟损/MW	9.263	9.256	8.6
凝汽器烟损/MW	38.38	42.47	76.502
热网烟损/MW	107.099	110.296	56.55
厂用电/MW	22.443	22.443	22.443
总烟损/MW	219.397	227.845	202.396
总烟转换效率/%	73.45	73.40	76.38
光电转换烟效率/%	-	70.55	32.75
热电转换烟效率/%	-	-	36.92

表 7 高背压改造投资估算表

Tab. 7 Investment estimation table of high back pressure reconstruction

项 目	成本/元·kW ⁻¹	费用/万元
建筑工程费	16	800
设备购置费	208	10 400
安装工程费	69	3 450
其他费用	30	1 500
合计	-	16 150

表 8 两种集成方案运行收益对比

Tab. 8 Comparison of operating income between two integration schemes

参 数	太阳能辅助抽汽	太阳能辅助高背压
	供热机组	供热系统
总投资/万元	59 463.1581	75 613.1581
收益/万元·h ⁻¹	1.96	2.83
投资回收期/a	10.49	9.28

3 经济性分析

对太阳能辅助抽汽供热机组和太阳能辅助高背压供热机组的建设成本与收益进行分析。根据文献[17],煤炭价格为550元/t,太阳能供热热价约为0.280元/(kW·h),热电联产机组供热热价为0.087元/(kW·h)。经计算,太阳能辅助高背压供热系统初期总投资约为75 613.158 1万元,机组运行1 h可以获得2.83万元收益,比太阳能辅助抽汽供热机组高0.87万元,供热季为4个月,投资回收期为9.28 a,机组经济效益较好。各项建设成本估算结果见表6~表8。

表 6 太阳能集热场投资估算表

Tab. 6 Investment estimation table of solar collector field

项 目	成本/元·m ⁻²	费用/万元
集热器场及支架费用	1 034	25 356.692 0
占地费	288	7 062.598 7
建筑费	379	9 294.183 7
安装费	233	5 713.838 5
导热油系统	135	3 310.593 1
储热换热系统	200	4 904.582 4
其他费用	155.8	3 820.669 7
合计	-	59 463.158 1

4 结 论

以600 MW超临界火电机组为基准,对太阳能辅助燃煤发电系统(方案1和2)、太阳能辅助抽汽供热系统(方案3)和太阳能辅助高背压供热系统进行了计算、分析,得出结论:

(1) 太阳能辅助燃煤发电机组与太阳能辅助抽汽供热机组的煤耗都有所降低,但也都产生了更多的冷源损失。3种方案中在太阳能输入功率一致时太阳能辅助抽汽供热机组表现较好。

(2) 太阳能辅助高背压供热机组可以有效回收机组因集成太阳能而产生的额外的冷源损失用以供热,使机组的供热量获得明显提升的同时提高机组的节煤率。机组的节煤率在低发电功率、高背压、低热网供回水温度工况时获得明显提升,机组的供热量增加值在低发电功率、低背压、高热网供回水温度工况时较高。

(3) 太阳能辅助高背压供热机组与太阳能辅助抽汽供热机组的烟损产生在机组的不同位置,太阳能辅助高背压供热机组的烟效率更高。

(4) 太阳能辅助高背压供热机组项目的投资回收期为9.28 a,相比于太阳能辅助抽汽供热机组其运行收益更高、回收成本更快。

参考文献:

- [1] 姜红丽,刘羽茜,冯一铭,等. 碳达峰、碳中和背景下“十四五”时期发电技术趋势分析[J]. 发电技术,2022,43(1):54-64.
JIANG Hong-li, LIU Yu-xi, FENG Yi-ming, et al. Analysis of power generation technology trend in 14th five-year plan under the background of carbon peak and carbon neutrality [J]. Power Generation Technology, 2022, 43(1): 54-64.
- [2] QIN J, HU E. The impact of solar radiation on the annual net solar to power efficiency of a solar aided power generation plant with twelve possible "configuration-operation" combinations [J]. Energy Procedia, 2017, 105:149-154.
- [3] QIN J Y, HU E, NATHAN G J, et al. Concentrating or non-concentrating solar collectors for solar aided power generation [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 152:281-290.
- [4] ZHOU L, LI Y, HU E, et al. Comparison in net solar efficiency between the use of concentrating and non-concentrating solar collectors in solar aided power generation systems [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 75:685-691.
- [5] JIANG Y, DUAN L, YANG M, et al. Performance analysis of tower solar aided coal-fired power plant with thermal energy storage [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 206:118101.
- [6] ZHAI R, LI C, CHEN Y, et al. Life cycle assessment of solar aided coal-fired power system with and without heat storage [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 111:453-465.
- [7] ZHAI R, ZHAO M, LI C, et al. Improved optimization study of integration strategies in solar aided coal-fired power generation system [J]. International Journal of Photoenergy, 2015, 2015:1-8.
- [8] DING Z, HOU H, DUAN L, et al. Simulation study on a novel solar aided combined heat and power system for heat-power decoupling [J]. Energy, 2021, 220:119689.
- [9] ZHU Y, ZHAI R, ZHAO M, et al. Analysis of solar contribution evaluation method in solar aided coal-fired power plants [J]. Energy Procedia, 2014, 61:1610-1613.
- [10] ZHU Y, ZHAI R, ZHAO M, et al. Evaluation methods of solar contribution in solar aided coal-fired power generation system [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 102:209-216.
- [11] FENG L, CHEN H, ZHOU Y, et al. The development of a thermo-economic evaluation method for solar aided power generation [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 116:112-119.
- [12] ZHAI R, ZHAO M, TAN K, et al. Optimizing operation of a solar-aided coal-fired power system based on the solar contribution evaluation method [J]. Applied Energy, 2015, 146:328-334.
- [13] DING Z, HOU H, DUAN L, et al. Study on the capacity-operation collaborative optimization for multi-source complementary cogeneration system [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 250:114920.
- [14] DING Z, HOU H, DUAN L, et al. Performance analysis and capacity optimization of a solar aided coal-fired combined heat and power system [J]. Energy, 2022, 239:122141.
- [15] 赵雨秋. 具备切缸特性机组的供热系统仿真建模研究[D]. 保定:华北电力大学,2021.
ZHAO Yu-qiu. Research on simulation modeling of heating system in cylinder cutting characteristics unit [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2021.
- [16] 刘 文. 供热机组切缸特性仿真试验及控制策略研究[D]. 保定:华北电力大学,2021.
LIU Wen. Study on simulation test and control strategy of heating unit with cylinder cutting characteristics [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2021.
- [17] 周璐璐,王 军,邴旖旎,等. 太阳能辅助的燃煤机组经济性分析[J]. 太阳能学报,2021,42(10):105-110.
ZHOU Lu-lu, WANG Jun, BING Yi-ni, et al. Economic analysis of solar energy aided coal-fired power system [J]. Acta Energetica Sinica, 2021, 42(10):105-110.

(丛 敏 编辑)