

深度调峰下多种供热改造耦合的容量配置优化研究

杨坤¹, 耿杰¹, 刘迪², 叶学民²

(1. 内蒙古霍煤鸿骏铝电有限责任公司电力分公司, 内蒙古 通辽 029200;

2. 华北电力大学 河北省低碳高效发电技术重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要:为促进风能、太阳能等清洁能源的消纳,燃煤机组不断参与深度调峰,急需对热电联产机组进行灵活性改造。针对某660 MW纯凝机组,建立了中间抽汽供热仿真模型,在此基础上构建配置电锅炉供热(方案1)、吸收式热泵供热(方案2)以及电锅炉和吸收式热泵联合供热(方案3)3种方案。采用带精英策略的快速非支配排序的遗传(NSGA-II)算法和优劣解距离(TOPSIS)法对方案3的容量配置进行优化,并深入分析不同方案下的热电解耦能力和热经济性。结果表明:相比于吸收式热泵供热,电锅炉供热能够极大提高机组的灵活性能力,但其热经济性较差;联合使用电锅炉和吸收式热泵既能有效提升机组的热电解耦能力,又能均衡系统的热经济性,该联合方案最小电负荷可降至30.37 MW,灵活性能力显著提升。

关键词:深度调峰;热电解耦;灵活性改造;容量配置

中图分类号:TM621

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.09.015

[引用本文格式] 杨坤,耿杰,刘迪,等.深度调峰下多种供热改造耦合的容量配置优化研究[J].热能动力工程,2024,39(9):123-133. YANG Kun, GENG Jie, LIU Di, et al. Optimization of capacity allocation for coupling of various heat supply transformations under deep peak regulation[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(9):123-133.

Optimization of Capacity Allocation for Coupling of Various Heat Supply Transformations under Deep Peak Regulation

YANG Kun¹, GENG Jie¹, LIU Di², YE Xuemin²

(1. Electric Power Branch, Inner Mongolia HMMJ Aluminum Electricity Co., Ltd., Tongliao, China, Post Code: 029200;

2. Hebei Key Laboratory of Low Carbon and High Efficiency Power Generation Technology, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003)

Abstract: In order to promote the absorption of clean energy such as wind energy and solar energy, coal-fired units continued to participate in deep peak regulation, and it was urgent to carry out flexible transformation of cogeneration units. Based on the simulation model of intermediate extraction steam heating for a 660 MW pure condensing unit, three schemes of electric boiler heating (scheme 1), absorption heat pump heating (scheme 2) and combined heat supply of electric boiler and absorption heat pump (scheme 3) were proposed. The non-dominated sorting genetic algorithms-II (NSGA-II) and the technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) analysis methods were used to optimize the capacity configuration of scheme 3, and the performance of thermoelectric decoupling capacity and thermal economy under different schemes was deeply analyzed. The results show that compared with absorption heat pump heating, electric boiler heating can greatly improve the flexibility of the unit with the expense of thermal economy. The integrated configuration of electric boiler and absorption heat pump can not only effectively improve the thermoelectric decoupling capacity of the unit, but also balance the thermal economy of the system, the minimum electric load can be reduced to 30.37 MW, and the flexi-

bility is significantly improved.

Key words: deep peak regulation, thermoelectric decoupling, flexible transformation, capacity allocation

引 言

为实现“碳达峰、碳中和”目标,构建以新能源为主体的新型电力系统已成为我国能源发展的必然趋势^[1]。随着新能源发电并网量的迅速增长,传统火电机组有效运行时间逐年减少,要求其参与深度调峰。尤其在冬季供暖期,传统燃煤热电联产机组的“以热定电”模式极大地限制了机组参与调峰的灵活性,急需对其进行供热灵活性改造。供热灵活性改造是在保证供热的前提下尽可能地减少蒸汽做功,也就是将汽轮机内主蒸汽的供热份额和做功份额进行重新分配,即热电解耦^[2]。保持火电机组低负荷运行是提高其热电解耦能力的有效手段之一^[3]。

近年来,已有许多学者提出了通过增加电锅炉和吸收式热泵等设备来降低热电联产机组的最小电负荷^[4-5]。电锅炉是通过电热转化进行增热减电的设备。陈永辉等人^[6]对电锅炉型式及其容量配置进行研究,确定其最佳容量,对比加装电锅炉前后机组的性能指标和调峰能力,结果表明,随电锅炉容量的增长,电厂调峰能力不断提升。田亮等人^[7]针对某 350 MW 供热机组,分析增设电锅炉和高低旁路抽汽供热后机组的性能指标,结果表明,在相同热电负荷下高低旁路抽汽方案耗煤量略低于电锅炉方案,而在深度调峰区间,电锅炉方案的可调容量范围明显宽于高低旁路抽汽方案。

吸收式热泵是在高温热源驱动下从低温热源提取热量的装置^[8],张宇等人^[9]从灵活性和能耗特性方面对集成吸收式热泵进行综合分析,增设吸收式热泵可增大机组的热电可行域和最大热电比。章艳等人^[10]基于建立的最优容量吸收式热泵模型,将其与切缸和高背压改造进行对比分析,结果表明,热泵机组灵活性最佳。

上述研究中,针对电锅炉或吸收式热泵单独使用的研究较多,而将二者耦合使用的研究鲜有报道。一方面,配置电锅炉在提升灵活性的同时将增加煤耗率;另一方面,配置吸收式热泵并不能显著提升机组的热电解耦能力,而将二者结合使用既能提升机

组的热电解耦能力,又能在一定程度上降低机组煤耗率。本文以某 660 MW 机组为研究对象,建立了中间抽汽供热仿真模型,在此基础上构建了配置电锅炉供热(方案 1)、吸收式热泵供热(方案 2)以及电锅炉和吸收式热泵联合供热(方案 3)3 种方案。采用 NSGA-II 算法和 TOPSIS 法对方案 3 的容量配置进行优化,确定该方案的最佳容量分配组合,并从热电解耦和热经济性方面对 3 种方案进行对比分析,验证了方案 3 的优越性。

1 热力系统建模

1.1 纯凝机组热力系统模型

热力系统模型参考某 660 MW 亚临界、一次中间再热、三缸四排汽燃煤湿冷机组,给水回热系统共有 3 个高压加热器、4 个低压加热器和 1 个除氧器,汽轮机给水系统配置方式为两台 50% 锅炉最大连续蒸发量的汽动泵并联运行,驱动汽动泵正常工作,汽源采用第五段抽汽。使用 Ebsilon 软件对热力系统进行建模,机组模型以汽轮机的热平衡图为基础,以汽轮机阀门全开工况(VWO)为模型设计点,利用表 1 所示的不同热耗率验收工况(THA)下的热力性能参数构建了纯凝机组热力系统模型,如图 1 所示。模型热力性能计算的参数和假设如下:汽轮机系统中各汽缸的等熵膨胀效率高,高压缸为 0.92、中压缸为 0.93、低压缸为 0.88;回热式汽轮机的效率取 0.9;锅炉热效率为 0.95;发电机效率为 0.989。

表 1 纯凝机组变工况设计参数

Tab. 1 Design parameters of pure condensing unit under variable working conditions

参 数	VWO	75% THA	50% THA	30% THA
发电功率/MW	701.3	495	330	198
主蒸汽压力/MPa	16.66	16.13	10.81	6.68
主蒸汽温度/℃	538	538	538	538
主蒸汽流量/kg·s ⁻¹	594.4	392.5	257.6	156.9
再热蒸汽压力/MPa	3.97	2.70	1.82	1.13
再热蒸汽温度/℃	538	538	538	538
再热蒸汽流量/kg·s ⁻¹	500.4	339.0	227.3	140.7

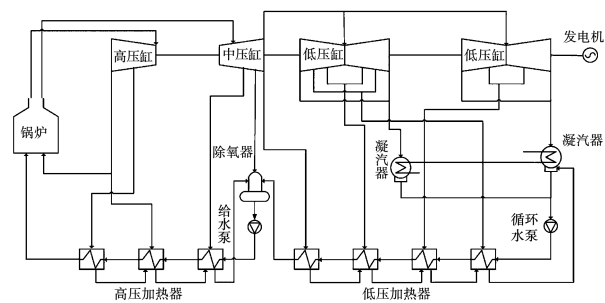


图1 纯凝机组热力系统模型

Fig.1 Thermodynamic system model of pure condensing unit

表2 机组热力参数设计值与仿真值对比

Tab.2 Comparison of design and simulation values of thermodynamic parameters of unit

参 数	VWO			75% THA			50% THA		
	设计值	模拟值	误差/%	设计值	模拟值	误差/%	设计值	模拟值	误差/%
一段抽汽压力/MPa	6.494	6.494	0	4.337	4.314	0.53	2.930	2.912	0.61
一段抽汽温度/℃	399.000	399.000	0	360.300	356.550	1.04	367.400	364.590	0.76
一段抽汽流量/kg·s ⁻¹	36.250	36.230	0.06	19.380	19.030	1.80	10.630	10.450	1.51
四段抽汽压力/MPa	1.000	1.013	-1.30	0.692	0.702	-1.45	0.471	0.476	-1.02
四段抽汽温度/℃	356.800	355.030	0.50	354.900	348.610	-1.77	364.400	358.770	1.54
四段抽汽流量/kg·s ⁻¹	13.410	13.430	-0.15	8.360	8.250	1.29	5.120	5.050	1.35
八段抽汽压力/MPa	0.060	0.061	1.17	0.044	0.045	-2.27	0.031	0.031	0
八段抽汽温度/℃	85.900	87.180	-1.49	83.100	81.520	1.90	80.100	78.600	1.88
八段抽汽流量/kg·s ⁻¹	33.490	33.850	-1.06	19.250	19.580	-1.73	10.460	10.260	1.92

以下约束条件决定中间抽汽供热系统热、电负荷范围:

$$H = H_{cu} \lambda_{cq} \tag{1}$$

$$0 \leq H_{cu} \leq H_{cu,max} \tag{2}$$

$$P_{e,min} \leq \frac{P}{1-\mu} \leq P_{e,design} \tag{3}$$

式中: H_{cu} —中间抽汽供热负荷,MW; λ_{cq} —管道换热效率,设置为98%; $H_{cu,max}$ —机组最大抽汽供热负荷,MW; μ —厂用电率,设置为5.5%^[11]; P —供电负荷,MW; $P_{e,min}$ 和 $P_{e,design}$ —机组最小供电负荷和额定供电负荷,MW。

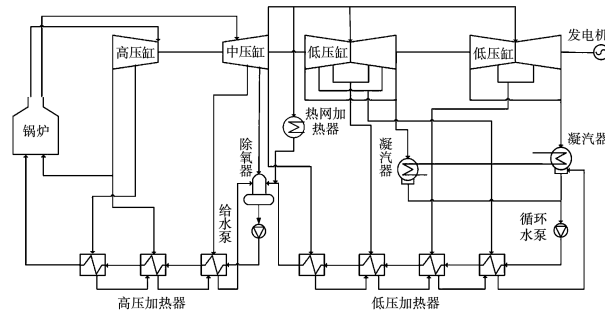


图2 中间抽汽供热方式系统模型

Fig.2 System model under intermediate steam extraction heating method

机组变负荷时各热力参数的设计值和仿真值如表2所示。两者间各参数的偏差均低于2%,表明上述所建模型的可靠性和计算精度均满足实际需要,可用于后续供热灵活性改造计算。

1.2 数学模型

1.2.1 中间抽汽供热

图2为中间抽汽供热方式系统模型,该方式主要用于工业和集中供热系统,是从汽轮机中压缸排汽连通管处打孔来进行抽汽,提供热负荷 H 。

采取工况分析、热平衡计算及确定状态参数等步骤确定各负荷下的中间抽汽状态参数。①工况分析:根据实际需求,确定不同负荷下的热负荷和电负荷需求;②热平衡计算:根据Ebsilon软件对热电联产机组进行热平衡计算,考虑抽汽流量、温度和压力的变化,以及各部件的热损失和效率,计算不同负荷下的热平衡结果;③确定状态参数:基于热平衡计算结果,确定各负荷下的抽汽状态参数,包括抽汽压力、温度、流量等。

1.2.2 配置电锅炉

方案1采用在中间抽汽供热的基础上增设电锅炉(中间抽汽+电锅炉)的供热方式,其系统模型如图3所示。通过机组输出电负荷驱动电锅炉,可降低机组的负荷率,提高机组热电解耦能力。具体运行方式为,低负荷时使用中间抽汽供热,高负荷时启动电锅炉供热。

通常电锅炉的热电转换效率 $\eta_{dgl} \geq 95\%$ ^[12],本文采用95%进行计算,热、电负荷满足以下约束条件:

$$H = H_{cu} \lambda_{cq} + H_{dgl} \tag{4}$$

$$H_{dgl} = P_{dgl} \eta_{dgl} \tag{5}$$

$$0 \leq H \leq H_{cu,max} \lambda_{cq} + W_{dgl,max} \eta_{dgl} \tag{6}$$

$$P_{e,\min} \leq \frac{P + P_{\text{dgl}}}{1 - \mu} \leq P_{e,\text{design}} \quad (7)$$

$$0 \leq P_{\text{dgl}} \leq P_{\text{dgl},\max} \quad (8)$$

式中: H_{dgl} —电锅炉输出热负荷, MW; P_{dgl} —输入电锅炉的电负荷, MW; $W_{\text{dgl},\max}$ —电锅炉最大功率, MW。

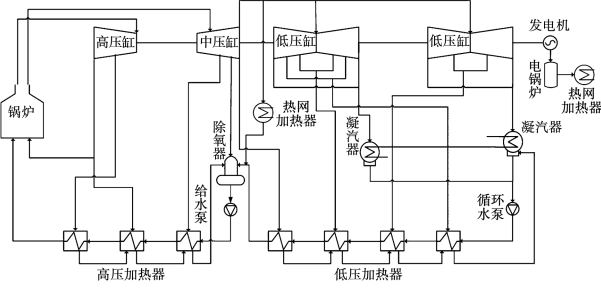


图3 中间抽汽+电锅炉供热方式系统模型

Fig.3 System model under intermediate steam extraction and electric boiler heating method

1.2.3 配置吸收式热泵

方案2采用吸收式热泵和中间抽汽联合(吸收式热泵+中间抽汽)的供热方式,其系统模型如图4所示。汽轮机中压缸排汽用于吸收式热泵驱动热源并加热热网加热器,采用两者耦合的方式吸收循环水余热,以减少冷端热量损失。具体运行方式为:低负荷时启动吸收式热泵,满载后继续使用中间抽汽供热。

为综合考虑溴化锂结晶安全裕量和优化吸收式热泵的能效比(COP),设定吸收式热泵热网出口水温为80℃,经过尖峰加热器后,水温升至100℃,热泵和尖峰加热器之间的热负荷比值 κ 为1.99,热泵的COP_{rb}设置为1.70^[13]。热、电负荷满足以下约束条件:

$$H = (H_{\text{cu}} - H_{\text{rb},\text{cu}}) \lambda_{\text{cq}} + H_{\text{rb}} \quad (9)$$

$$H_{\text{rb},\text{cu}} = \left(\frac{W_{\text{e},\text{rb}}}{\kappa} + \frac{W_{\text{e},\text{rb}}}{\text{COP}_{\text{rb}}} \right) \frac{1}{\eta_{\text{cq}}} \quad (10)$$

$$H_{\text{rb}} = W_{\text{e},\text{rb}} + \frac{W_{\text{e},\text{rb}}}{\text{COP}_{\text{rb}}} \quad (11)$$

$$0 \leq H \leq (H_{\text{cu},\max} - H_{\text{rb},\text{cu},\max}) \lambda_{\text{cq}} + H_{\text{rb},\max} \quad (12)$$

$$P_{e,\min} \leq \frac{P}{1 - \mu} \leq P_{e,\text{design}} \quad (13)$$

$$0 \leq W_{\text{e},\text{rb}} \leq W_{\text{e},\text{rb},\max} \quad (14)$$

式中: $H_{\text{rb},\text{cu}}$ 、 $H_{\text{rb},\text{cu},\max}$ —驱动吸收式热泵的中间抽汽热负荷和最大抽汽热负荷, MW; H_{rb} 、 $H_{\text{rb},\max}$ —吸收式热泵输出热负荷和最大输出热负荷, MW; $W_{\text{e},\text{rb}}$ 、 $W_{\text{e},\text{rb},\max}$ —吸收式热泵的热功率和最大热功率, MW。

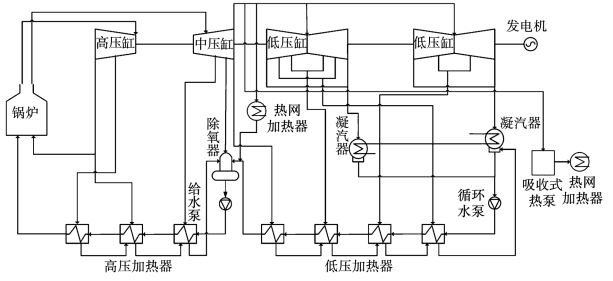


图4 中间抽汽+吸收式热泵供热方式系统模型

Fig.4 System model under intermediate steam extraction and absorption heat pump heating method

1.2.4 电锅炉和吸收式热泵联合供热

方案3采用电锅炉、吸收式热泵和中间抽汽联合(电锅炉+吸收式热泵+中间抽汽)的供热方式,其系统模型如图5所示。利用电锅炉消耗机组发电量来提高热电解耦能力,同时利用吸收式热泵来均衡机组的热经济性,在运行过程中,中间抽汽、电锅炉、吸收式热泵共同承担热负荷。具体运行方式为:低负荷即启动吸收式热泵,吸收式热泵满载后继续使用中间抽汽供热,热负荷不足时启动电锅炉补充。

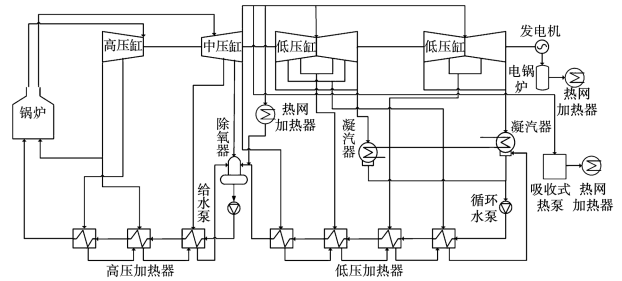


图5 中间抽汽+电锅炉+吸收式热泵供热方式系统模型

Fig.5 System model under intermediate steam extraction, electric boiler and absorption heat pump heating method

供热负荷 H 由中间抽汽、电锅炉和吸收式热泵共同提供,热、电负荷需满足以下约束条件:

$$H = (H_{\text{cu}} - H_{\text{rb},\text{cu}}) \lambda_{\text{cq}} + H_{\text{dgl}} + H_{\text{rb}} \quad (15)$$

$$0 \leq H \leq (H_{\text{cu},\max} - H_{\text{rb},\text{cu},\max}) \lambda_{\text{cq}} +$$

$$W_{\text{dgl},\max} \eta_{\text{dgl}} + H_{\text{rb},\max} \quad (16)$$

$$P_{e,\min} \leq \frac{P + P_{\text{dgl}}}{1 - \mu} \leq P_{e,\text{design}} \quad (17)$$

1.3 评价指标

对于燃煤热电联产机组,采用最大供热负荷时的热电比、标准煤耗率和能量利用率来反映该机组的热电解耦能力和热经济性,各指标计算如下:

(1) 热电比

假设3个方案中最大供热负荷 $H_{\max}$ 均为1100 MW,此时对应的电负荷表示为 P_x ,热电比 ξ 为:

$$\xi = H_{\max}/P_x \tag{18}$$

(2) 标准煤耗率

基于热量分配方法可得到发电和供热二者的热耗功率^[14]以及供热、供电效率,随后算得机组的供热标准煤耗 B_H 和发电标准煤耗 B_P ,再根据热电份额分配计算标准煤耗率 B_{av} ,具体计算如下:

$$W_{H,unit} = H_{cu} + H_{dgl} \tag{19}$$

$$\eta_H = \frac{H}{W_{H,unit}} \times 100\% \tag{20}$$

$$B_H = 3\,600/(\eta_H \cdot q_b \cdot \xi) \tag{21}$$

$$W_{P,unit} = Q_{unit} - W_{H,unit} \tag{22}$$

$$\eta_P = \frac{P}{W_{P,unit}} \times 100\% \tag{23}$$

$$B_P = 3\,600/(\eta_P \cdot q_b \cdot \xi) \tag{24}$$

$$B_{av} = \frac{H}{H+P}B_H + \frac{P}{H+P}B_P \tag{25}$$

式中: $W_{H,unit}$ 、 $W_{P,unit}$ —机组供热和发电的热耗功率, MW; Q_{unit} —锅炉输出功率, MW,可由 Ebsilon 软件计算得出; η_H 、 η_P —供热效率和供电效率; q_b —标准煤的低位发热量, $q_b=29.307\text{ kJ/g}$; ξ —锅炉效率,取93%^[15]。

(3) 能量利用率

能量利用率 η_{en} 为机组有效输出能量与锅炉输入汽轮机组能量的比值,反映机组对输入能量的利用效率,其值越高,表明机组对输入的能量利用越高效,即机组能够获得更高的热经济性。具体计算如下:

$$\eta_{en} = \frac{H+P}{Q_{unit}} \times 100\% \tag{26}$$

2 容量配置优化

2.1 目标函数

为合理优化方案3中电锅炉和吸收式热泵的容量配置,本文从灵活性能力和热经济性两方面综合考虑,选取电锅炉和吸收式热泵增加的热负荷为决策变量,最大供热负荷时的热电比和标准煤耗率为目标函数,具体优化函数如下:

$$\begin{cases} F_1 = \max \xi = f(H_{dgl}, H_{rb}) \\ F_2 = \min B_{av} = f(H_{dgl}, H_{rb}) \\ 0 \leq H_{dgl} \leq 214 \\ 0 \leq H_{rb} \leq 214 \\ H_{dgl} + H_{rb} = 214 \end{cases} \tag{27}$$

式中: F_1 —求最大热电比的目标函数; F_2 —求最小

标准煤耗率的目标函数。

2.2 优化算法

采用NSGA-II算法^[16]对电锅炉和吸收式热泵的容量进行优化。NSGA-II算法首先提出了快速非支配排序策略,这使得该算法复杂度大幅简化,极大地提升了收敛速度;其次引入精英策略(Elitist),将父子代结合,并产生下代种群,从而加快算法的执行速度和计算精度;最后采用拥挤度和拥挤度比较算子,弥补了初代遗传算法中需要手动设置参数的不足,并且利用其可对种群进行合理比较,使得解集中的种群能够均匀地分布到整个帕累托(Pareto)域,有效增强了种群的多样性和合理性。

与加权法、约束法和线性规划法等传统多目标优化方法相比,NSGA-II算法可对大规模搜索空间进行有效处理,并且具有全局搜索能力以及较强的普适性和并行性,可有效克服传统算法的不足,其具体优化过程如图6所示。

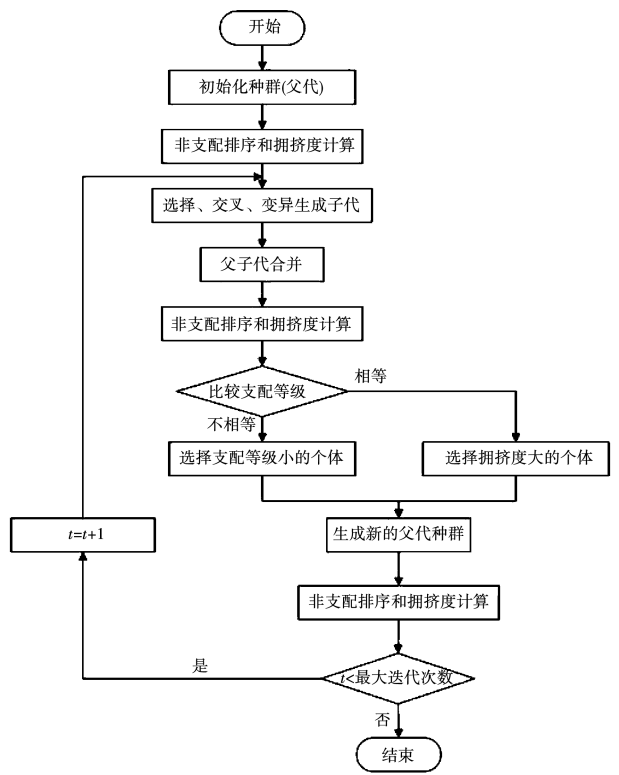


图6 NSGA-II 算法优化流程

Fig. 6 NSGA-II algorithm optimization process

2.3 优化结果

在运用NSGA-II算法对电锅炉和吸收式热泵的容量配置进行优化时,以式(27)为适应度函数,种

群规模为 300,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.1,最大迭代次数为 500,经种群个体快速非支配排序和拥挤度计算,选择交叉变异不断优化,直至寻得最优解,得到优化后的 Pareto 前沿如图 7 所示。由图 7 可知,最终得到的 Pareto 最优解,在整体上呈现为一条上凸形的曲线,并在曲线上连续、光滑地分布,表明该算法能够有效接近 Pareto 解。随着热电比的减少,标准煤耗率逐渐减少,这将导致二者在 Pareto 解集中同时达到最低。为解决该问题,采用 TOPSIS 法对这两个目标函数进行综合性评价。TOPSIS 法的原理是通过比较评价方案与最优方案、最劣方案的欧氏距离来进行排序,以此精确反映各评价方案之间的差距^[17]。

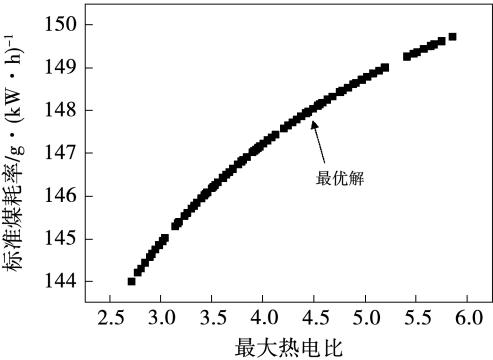


图 7 优化后的 Pareto 前沿

Fig. 7 Pareto frontier after optimization

为均衡考虑机组热电解耦能力和热经济性对容量配置的影响,在 TOPSIS 法中将热电比和标准煤耗率的权重均设置为 0.5,容量配置组合个数设置为 500。经分析得到以下最优组合(即图 7 中箭头位置),即电锅炉增加的热负荷为 166 MW,吸收式热泵增加的热负荷为 48 MW。将该组合作为方案 3 中电锅炉和吸收式热泵的容量配置,并将方案 3 与方案 1、方案 2 在热电解耦能力和热经济性方面进行对比分析。

3 热电解耦能力分析

3.1 热电可行域

为了在同一边界条件下对不同供热方案的性能进行比较,设定各供热方案中所提供热负荷的载热质状态参数一致,热网回水温度均为 40 ℃(焓值为 167.72 kJ/kg),热网供水温度为 100 ℃(焓值为

419.17 kJ/kg),热负荷 H 通过热网循环水吸热量计算:

$$H = \frac{M \cdot (h_{cs} - h_{hs})}{3\,600} \tag{28}$$

式中: M —热网水流量,t/h; h_{cs} —热网加热器出水口焓值,kJ/kg; h_{hs} —热网加热器入口水焓值,kJ/kg。

热电联产机组可行域直接反映了机组的灵活性和新能源发电消纳容量,图 8 为中间抽汽和 3 种供热方案的热电可行域对比情况。可行域表征的热电负荷区间即为机组安全运行的调节区域,对于中间抽汽供热方式,其热电调节区域为 $ABCD$ 所围成的范围,其中曲线 AB 对应锅炉最大负荷,受锅炉主蒸汽最大进汽量限制;曲线 DC 对应锅炉最小负荷,受锅炉最低稳燃蒸发量限制;曲线 BC 对应最大供热工况,受低压缸最小排汽流量限制; AD 为纯凝工况。

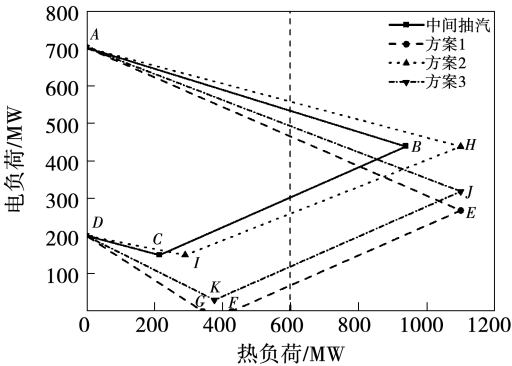


图 8 不同供热方案的热电可行域

Fig. 8 Thermoelectric feasible areas under different heating schemes

由图 8 可知,方案 1 的热电可行域为 $AEFGD$ 所围部分,其中对应锅炉满负荷和锅炉最低稳燃的最大热负荷分别为 E 点和 F 点。该方案中电锅炉的转化效率和容量分别决定了直线 EF 的倾斜程度和位置。相较于中间抽汽,方案 1 的 F 、 G 点处的电负荷为零,最大供热热电比(E 点)扩大为 4.10,机组可行域范围大幅增加。

在方案 2 中,加入吸收式热泵后,机组热电可行域扩展为 $AHID$ 区域。相较于中间抽汽,由 B 点至 H 点、由 C 点至 I 点,供热负荷均有所增加,分别提升了 17.19% 和 35%,而电负荷保持不变,同样可有效扩大热电调节范围。

在方案 3 中,热电负荷灵活调节区域为 $AJKD$ 。

相比于中间抽汽供热,方案3将最大热负荷由B点扩大到J点,最小电负荷处为K点(30.37 MW),显著扩大了热电灵活性调节能力。

3.2 工况性能

3.2.1 最小电负荷

设定主蒸汽量为564.80 t/h,图9为各供热方案下的最小电负荷对比情况。

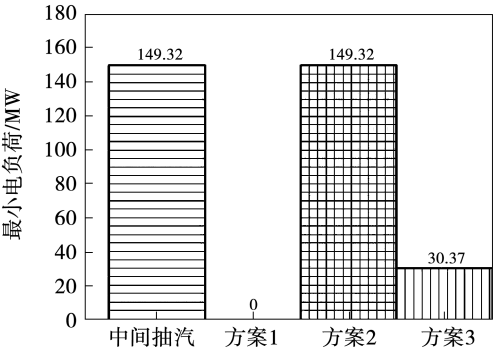


图9 不同供热方案下的最小电负荷

Fig.9 Minimum electrical load under different heating schemes

由图9可知,相比于中间抽汽供热,3种供热方案下的最小电负荷均有所减少。方案1的最小电负荷最低,可达到零供电负荷效果;方案3也可有效降低最小电负荷,提高机组的热电调节灵活性能力;而方案2并不能降低最小电负荷,未能实现真正的热电解耦。

3.2.2 最大供热热电比

最大供热热电比是指供热最大时的热电比,可体现热电联产机组的热电解耦能力,不同供热方案下的最大供热热电比结果如图10所示。由图10可知,3种供热灵活性改造方案下的最大供热热电比均高于中间抽汽供热模式。方案1的最大供热热电比最大,达到4.40;方案2的最大供热热电比有小幅提升,而方案3介于二者之间。由此可以看出,3种改造方案均可提高热电联产机组的供热灵活性,且方案1提升效果最为明显。

3.2.3 调峰容量

以供热负荷600 MW为例,比较中间抽汽供热模式与3种方案的调峰容量,即在热负荷为600 MW下机组最大电负荷与最小电负荷的差值与机组纯凝工况最大电负荷之比,以反映机组的调峰灵活性能力,结果如图11所示。

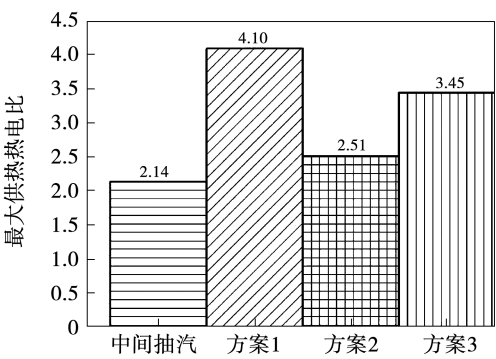


图10 不同供热方案下的最大供热热电比

Fig.10 Maximum heat to electric ratio under different heating schemes

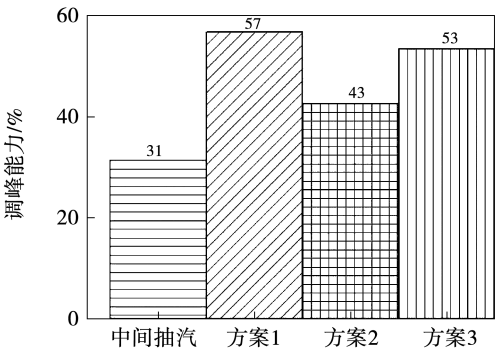


图11 600 MW下不同供热方案的调峰容量对比

Fig.11 Comparison of peak load capacity under different heating schemes at 600 MW

如图11所示,供热负荷为600 MW时,3种方案下的调峰容量均高于中间抽汽模式(31%),其中,方案1和方案3的调峰容量提升显著,分别为57%和53%,方案2的调峰容量提升最小,为43%。上述结果表明,相比于中间抽汽模式的调峰容量,3种方案中方案2的提升幅度最小,可认为方案2的调峰灵活性能力最弱。

3.3 调峰能力

热电联产机组的供热负荷随电负荷的增加而增大,不同供热方案的增大速度有所差异。机组受低压缸最小流量和中间排汽温度的限制,机组电负荷存在最小值,即最低电负荷率,这一指标对应着机组的调峰能力,最低电负荷率越小表明机组的调峰能力越强^[2]。

图12为4种供热方案在不同热负荷时的最低电负荷率变化。可以看出,在相同热负荷条件下,采

用方案 1、方案 3 时,在有效降低机组电负荷的情况下机组供热能力得到提升;而采用方案 2 时,不能有效降低机组最小电负荷,只能提升机组的供热范围。具体如下:

(1) 方案 1 的最低电负荷率范围均低于中间抽汽方式的。采用中间抽汽方式供热时,电负荷率为 23% ~ 66%;采用方案 1 时,最低电负荷率可降至 0 ~ 38%。

(2) 方案 2 并不能降低机组的最低电负荷率,这是因为吸收式热泵通过中间抽汽驱动,利用相变增加机组的供热能力,而并不能降低电负荷率。

(3) 方案 3 的最低电负荷率保持在 4% ~ 38%,整体变化区域位于方案 1 之上。

(4) 随主蒸汽量的增加,方案 2 的最低电负荷率随之线性增加,显然并不能实现有效的热电解耦;而方案 1、方案 3 能够持续实现低负荷运行,热电解耦效果明显。

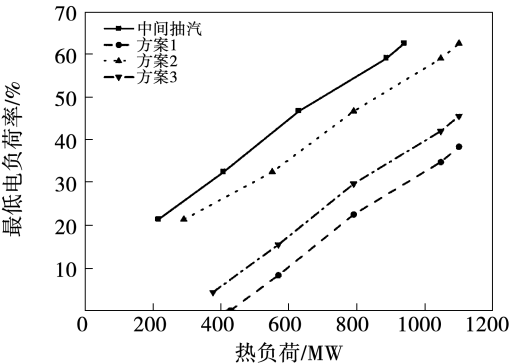


图 12 不同供热方案下的最低电负荷率变化
Fig. 12 Variation of minimum electric load rate under different heating schemes

4 热经济性分析

4.1 标准煤耗率

图 13 为不同供热方案的标准煤耗。由图 13(a)可知,C 点和 A 点分别对应中间抽汽供热方式的最小、最大电负荷,C 点和 A 点的标准煤耗率分别为 268 和 161 g/(kW·h)。最大热电比工况(B 点)的标准煤耗率为 137 g/(kW·h),锅炉最小稳燃工况(D 点)的标准煤耗为 292 g/(kW·h)。

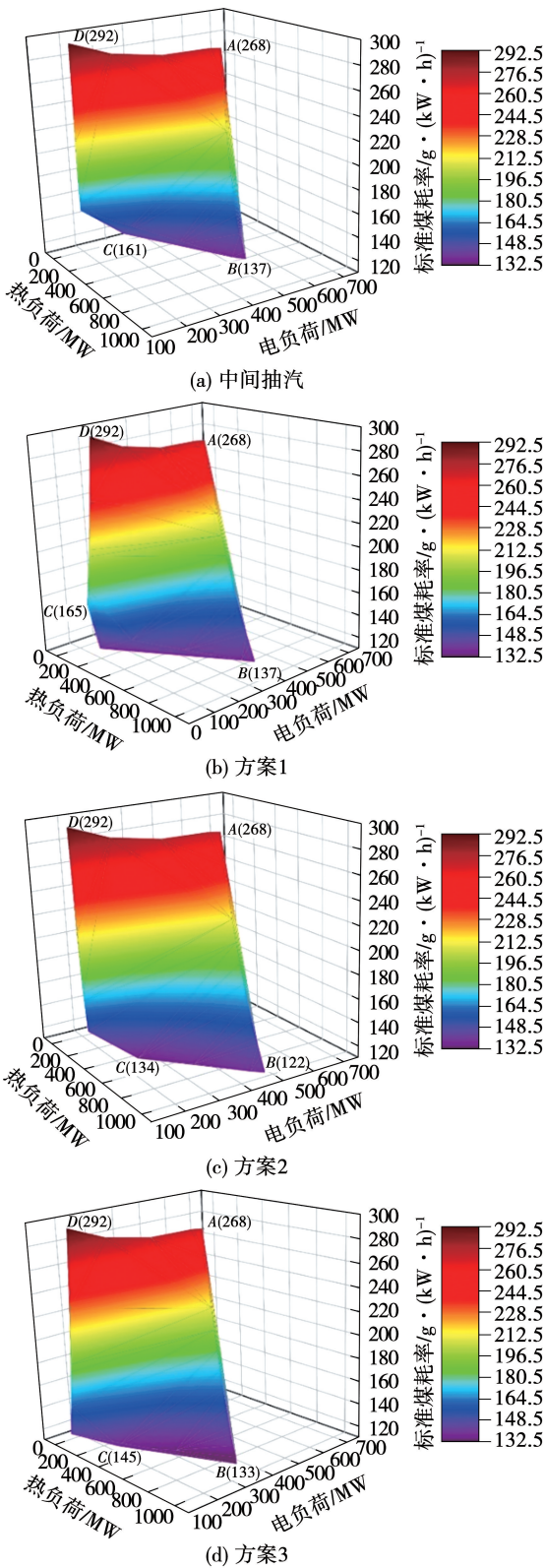


图 13 不同供热方案下的标准煤耗
Fig. 13 Standard coal consumptions under different heating schemes

由图 13(b)可知,方案 1 的最小电负荷(C 点)

的标准煤耗率为 165 g/(kW·h),相比中间抽汽供热方式,增加了 2.48%。这是因为通过电锅炉降低机组最小电负荷是电热转化,相当于高品位能量向低品位能量转化,而在电转热的过程中,仍然有 5% 的能量损耗,因此会增加机组的标准煤耗,降低热经济性。

由图 13(c)可知,方案 2 的最大热电比(B 点)的标准煤耗率为 122 g/(kW·h),比中间抽汽最大热电比工况(图 13(a)中的 B 点)降低 10.95%。而且,最小电负荷(C 点)的标准煤耗率为 134 g/(kW·h),相较于中间抽汽降低了 16.77%。方案 2 在不降低热负荷的情况下煤耗较低的原因:一方面,吸收式热泵主要利用的是中间抽汽热能,从而降低对电能的需求;另一方面,高 COP(1.70)条件下能够完全回收循环水余热,循环过程相对高效,能够更充分地利用能源,降低能量损失。

由图 13(d)可知,方案 3 的最大供热热电比(B 点)的标准煤耗为 133 g/(kW·h),比方案 1 降低了 2.92%。方案 3 煤耗较低的原因:虽然电锅炉参与供热会增加能量耗损,但吸收式热泵的高效循环能弥补能量损耗,提高能量利用效率,进一步减少煤耗。此外,方案 3 的最小电负荷(C 点)的标准煤耗率为 145 g/(kW·h),相比于方案 1 的最小电负荷(图 13(a)中 C 点)下降了 12.12%。

综上所述,与中间抽汽相比,方案 2、方案 3 最大热电比的标准煤耗分别由 137 g/(kW·h)降低至 122 和 133 g/(kW·h),而方案 1 基本无变化;方案 2、方案 3 最小电负荷的标准煤耗分别由 161 g/(kW·h)降低至 134 和 145 g/(kW·h),而方案 1 最小电负荷的标准煤耗增加至 165 g/(kW·h)。总的来说,方案 1 在热经济性方面表现不佳,而方案 2、方案 3 可提高机组的热经济性。

4.2 能量利用率

图 14 为不同供热方案下的能量利用率。由图 14(a)可知,中间抽汽供热方式的最大(A 点)和最小电负荷(C 点)对应的能量利用率分别为 45.9% 和 76.3%。最大热电比工况(B 点)的热耗率为 90.0%,锅炉最小稳燃工况(D 点)的能量利用率为 42.1%。随供热功率的增加,即 A 点增加至 B 点,机组的能量利用率从 45.9% 升高至 90.0%。

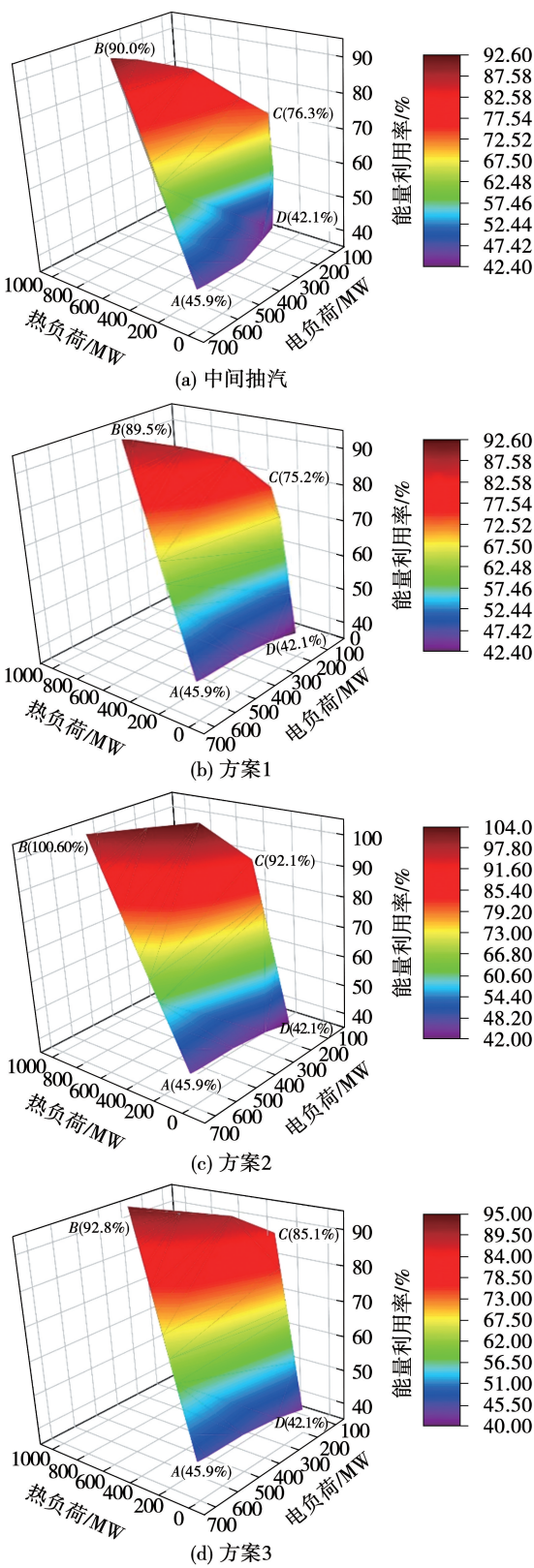


图 14 不同供热方案下的能量利用率

Fig. 14 Energy utilization under different heating schemes

由图 14(b)可知,方案 1 最大热电比工况(B 点)的能量利用率为 89.5%,较中间抽汽方式减

少了 0.5%,而最小电负荷(*C*点)的能量利用率为 75.2%,相比于中间抽汽方式降低了 1.1%,其主要原因是电锅炉电热转化过程中存在少量的损耗,导致能量利用率小幅下降。

由图 14(c)可知,方案 2 最大热电比(*B*点)的能量利用率为 100.6%,比中间抽汽供热方式最大热电比提高了 10.6%,而最小电负荷(*C*点)的能量利用率为 92.1%,相比于中间抽汽供热方式最小电负荷提高了 15.8%。由此可知,提升吸收式热泵的 COP 以及额定功率可提高机组的能量利用率。

如图 14(d)可知,方案 3 最大热电比(*B*点)的能量利用率为 92.8%,比中间抽汽方式和方案 1 分别提升了 2.8%和 3.3%,而最小电负荷(*C*点)的能量利用率为 85.1%,相比于中间抽汽方式和方案 1 分别增加了 8.8%和 10.6%。显然,相比单独使用电锅炉,吸收式热泵的参与明显提升了机组的能量利用率,对机组热经济性起到了积极的作用。

综上所述,在最大热电比工况下,与中间抽汽供热方式相比,方案 2、方案 3 的能量利用率分别由 90.0%增加至 100.6%和 92.8%,而方案 1 能量利用率降低至 89.5%;方案 2、方案 3 最小电负荷工况下的能量利用率分别由 76.3%增加至 92.1%和 85.1%,而方案 1 能量利用率降低至 74.5%。由此可见,单独使用电锅炉明显降低热电联产机组的热经济性,而布置吸收式热泵能够削弱电锅炉对热经济性的降低作用,在一定程度上提高机组的能量利用率。

5 结 论

(1) 在热电解耦方面,方案 1 所设置的电锅炉容量理论上能消纳所有剩余电负荷,可使得机组的最小电负荷为零,灵活性能力提升显著;方案 2 虽然能提高机组的供热能力,但不能降低机组的最小电负荷,未能有效实现机组的热电解耦;而将二者结合的方案 3,最大供热热电比增加至 3.45,最小电负荷可降至 30.37 MW,灵活性提升效果仅次于方案 1,同样能有效提高机组的热电解耦能力,从而消纳更多的新能源发电。

(2) 在热经济性方面,相比于中间抽汽供热,方案 1 最小电负荷下标准煤耗增加了 2.48%,能量利

用率降低了 1.1%;而方案 2、方案 3 最小电负荷下标准煤耗分别降低了 16.77%和 12.12%,降低系统能耗的能力显著。由此可知,单独使用电锅炉供热显然会降低系统的热经济性,而吸收式热泵供热的高效循环过程能提高能量利用效率,进一步降低系统能耗。

(3) 将电锅炉和吸收式热泵结合使用既能提高系统热电解耦能力,又能有效降低系统能耗,上述研究可为机组参与深度调峰时供热能力不足的问题提供参考。考虑到该方案并未涉及汽轮机自身的改造措施,还可与光轴改造、高低压旁路联合改造协同运行。

参考文献:

[1] 卓振宇,张 宁,谢小荣,等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.

[2] 庞春风,张德利,李祥勇,等. 基于 Ebsilon 的供热机组灵活性改造研究[J]. 汽轮机技术, 2023, 65(2): 127-130.
PANG Chunfeng, ZHANG Deli, LI Xiangyong, et al. Research on flexibility modification of heating unit based on Ebsilon[J]. Turbine Technology, 2023, 65(2): 127-130.

[3] SUN Y, XU C, XIN T, et al. A comprehensive analysis of a thermal energy storage concept based on low-rank coal pre-drying for reducing the minimum load of coal-fired power plants[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 156: 77-90.

[4] 谭 晶,蔡 莹,罗 微,等. 考虑供热机组与电锅炉互动的热电协调调度方法[J]. 电气自动化, 2018, 40(2): 63-65, 69.
TAN Jing, CAI Ying, LUO Wei, et al. Heat-electricity coordinated scheduling method considering the heat-supply unit and electric boiler[J]. Electrical Automation, 2018, 40(2): 63-65, 69.

[5] 高耀岩,曾德良,平博宇,等. 吸收式热泵供热机组安全区的计算[J]. 热力发电, 2020, 49(2): 58-64.
GAO Yaokui, ZENG Deliang, PING Boyu, et al. Calculation of safe operation area for CHP units with absorption heat pump[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(2): 58-64.

[6] 陈永辉,李志强,蒋志庆,等. 基于电锅炉的火电机组灵活性改造技术研究[J]. 热能动力工程, 2020, 35(1): 261-266.
CHEN Yonghui, LI Zhiqiang, JIANG Zhiqing, et al. Research on flexible transformation technology of thermal power unit based on e-

lectric boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2020,35(1):261-266.

[7] 田 亮,汪 可. 低压缸零出力条件下电锅炉和高低旁路抽汽供热的经济性与灵活性分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2023,50(6):85-92.

TIAN Liang,WANG Ke. Economic and flexibility analysis of electric boiler and HP-LP bypass steam extraction heating under zero-output condition of low pressure cylinder[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2023, 50(6):85-92.

[8] 王兴国,蒋奎振,韩中合,等. 配置溴化锂吸收式热泵的供热机组热电关系模拟分析[J]. 热力发电,2018,47(8):79-84.

WANG Xingguo,JIANG Kuizhen,HAN Zhonghe, et al. Thermoelectric relationship of a heat supply unit equipped with LiBr absorption heat pump[J]. Thermal Power Generation,2018,47(8):79-84.

[9] 张 宇,张 利,王 坤,等. 热电联产机组集成吸收式热泵的热电解耦与能耗特性理论研究[J]. 汽轮机技术,2020,62(2):116,143-146.

ZHANG Yu,ZHANG Li,WANG Kun, et al. Theoretical study on heat-electricity decoupling and energy consumption characteristics of combined heat and power plant by integrating absorption heat pump[J]. Turbine Technology,2020,62(2):116,143-146.

[10] 章 艳,周运虎,王一泽,等. 含吸收式热泵的高能效热电厂优化运行研究[J]. 电网技术,2023,47(2):698-710.

ZHANG Yan,ZHOU Yunhu,WANG Yize, et al. Optimal operation of high energy efficiency combined heat power plant with absorption heat pump[J]. Power System Technology,2023,47(2):698-710.

[11] 吴国潮. 燃煤热值对锅炉经济性影响的分析研究[J]. 中国电力,2015,48(9):43-48.

WU Guochao. Effects of coal calorific value on economical efficiency of coal-fired power plants[J]. Electric Power, 2015, 48(9):43-48.

[12] 王振浩,杨 璐,田春光,等. 考虑风电消纳的风电-电储能-蓄热式电锅炉联合系统能量优化[J]. 中国电机工程学报,2017,37(S1):137-143.

WANG Zhenhao,YANG Lu,TIAN Chunguang, et al. Energy optimization for combined system of wind-electric energy storage-regenerative electric boiler considering wind consumption[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(S1):137-143.

[13] 王金星,郝 剑,刘 畅,等. 抽凝机组热电联产系统中扩大大热负荷比的灵活性研究[J]. 热力发电,2020,49(12):41-50.

WANG Jinxing,HAO Jian,LIU Chang, et al. Enlargement of heat-electricity ratio for flexibility operation in a large-scale extraction condensing turbine system[J]. Thermal Power Generation,2020, 49(12):41-50.

[14] 张利平,张晓杰,刘 帅. 330 MW 机组供热改造的研究分析[J]. 汽轮机技术,2018,60(6):464-466,470.

ZHANG Liping,ZHANG Xiaojie,LIU Shuai. Research and analysis of heat supply modification of 330 MW unit[J]. Turbine Technology,2018,60(6):464-466,470.

[15] 牛鹏坤,洪 辉,王炜哲. 基于改进遗传算法的电站锅炉效率优化[J]. 热能动力工程,2020,35(3):111-115.

NIU Pengkun,HONG Hui,WANG Weizhe. Optimization of boiler combustion efficiency based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(3):111-115.

[16] DEB K,PRATAP A,AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA- II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2002,6(2):182-197.

[17] 魏 乐,李思莹. 基于加权模糊 TOPSIS 和灰色关联度的风电场选址研究[J]. 可再生能源,2019,37(12):1869-1874.

WEI Le,LI Siying. Site selection for wind power plants based on weighted fuzzy TOPSIS and grey correlation degree[J]. Renewable Energy Resources,2019,37(12):1869-1874.

(王治红 编辑)