

热电同调策略下冷热电联产系统的运行方案优化

齐同磊, 郑莆燕, 仇中柱, 应雨龙

(上海电力大学 能源与机械工程学院, 上海 200120)

摘要: 针对某综合社区的可调回热燃气轮机冷热电联产系统(CCHP), 应用 Ebsilon 软件搭建了系统仿真模型, 研究在热电同调运行策略下, 以年净运行收益为目标的联产系统优化运行问题。研究表明: 在不引入分产设备和储能设备的前提下, 通过调节燃气轮机回热度和燃气轮机发电量, 可以实现联产系统的热电同调; 对于确定的燃气轮机联产系统, 热电同调的范围是有限的; 研究的 CCHP 系统在给定的市场条件下, 热电同调运行策略与以热定电运行策略相比, 全年净运行收益提高了 5.23%。

关键词: 冷热电联产系统; 可调回热燃气轮机; 热电同调; 以热定电; 经济性

中图分类号: TK123 文献标识码: B DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2021.06.017

[引用本文格式] 齐同磊, 郑莆燕, 仇中柱, 等. 热电同调策略下冷热电联产系统的运行方案优化[J]. 热能动力工程, 2021, 36(6): 112-118. QI Tong-lei, ZHENG Pu-yan, QIU Zhong-zhu, et al. Research on optimal operation scheme of CCHP system with dual-gas turbines under different operation strategies[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(6): 112-118.

Research on Optimal Operation Scheme of CCHP System with Dual-Gas Turbines under Different Operation strategies

QI Tong-lei, ZHENG Pu-yan, QIU Zhong-zhu, YING Yu-long

(College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai, China, Post Code: 200120)

Abstract: A simulation model for a CCHP system with adjustable heat recovery gas turbine of a comprehensive community was established by Ebsilon software, and the optimal operation of the CCHP system with the goal of annual net operating income was studied under the operation strategy of Thermoelectric Ratio Adjustable. The research results show that, without separate production equipment and energy storage equipment, the CCHP system can realize the Thermoelectric Ratio Adjustable operation strategy by adjusting the gas turbine heat recovery and the gas turbine power generation. Under the given market conditions, the annual net operation income under the operation strategy of Simultaneous Thermo-Electric Regulation is 5.23% higher than that with the operation strategy of Heat Following.

Key words: CCHP system, adjustable heat recovery gas turbine, thermoelectric ratio adjustable, heat following, economic

收稿日期: 2020-10-16; 修订日期: 2020-11-16

基金项目: 国家自然科学基金(51806135); 上海市“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目(20DZ1205002)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(51806135); Science and Technology Commission of Shanghai Municipality(20DZ1205002)

作者简介: 齐同磊(1995-), 男, 山东潍坊人, 上海电力大学硕士研究生.

通讯作者: 郑莆燕(1972-), 女, 福建莆田人, 上海电力大学副教授.

引言

分布式冷热电联供技术使用天然气等清洁燃料驱动原动机发电,在烟气出口加入烟气型溴化锂制冷机和烟水换热器等烟气余热利用设备为用户供冷供热,实现能源的梯级利用。合理的配置能使系统的设计效率达到 90% 以上^[1]。在设计工况下运行时,分布式冷热电联供系统比常规分产系统节省化石燃料 30% 以上,为用户带来相当大的经济利益和环境利益^[2]。但系统在运行时往往会偏离设计工况,导致设备处于低负荷工作状态,系统运行经济性较低^[3]。冷热电联产系统运行的经济利益在很大程度上取决于合理的运行策略和不同负荷下适合的运行方案^[4]。找到适合的运行策略和各种负荷下的最佳运行方案具有重要意义。

以电定热和以热定电是分布式冷热电联供系统中应用比较广泛的运行策略。很多研究者都基于这两个运行策略对 CCHP 系统的运行优化进行研究。文献[5-6]基于以电定热运行策略分别对给定的 CCHP 系统制定运行方案。文献[7-8]基于以热定电的策略提出了 CCHP 系统的运行方案。文献[9-11]对以电定热和以热定电进行对比研究,分别得到不同的系统在不同运行策略下的优化方案。

但是在以热定电和以电定热的运行策略下,会产生多余的电能或热能,这就造成系统供能与用户需求不匹配^[12]。文献[13-14]在所研究系统中引入分产设备,将系统的多余电能转换为用户所需的热能;文献[15]引入储能,但是这两类方法都需要增加设备投入,而且电空调、电锅炉和燃气锅炉等分产设备的引入会削弱 CCHP 系统的优势。

回热燃气轮机的出现,为 CCHP 系统的运行调节提供了更多的可能:可以通过回热度和负荷进行调节。文献[16]研究表明,通过改变燃气轮机回热度调节负荷,可以提高设备的利用率和系统的发电效率,在经济效益和能源利用方面具有明显优势。

本文基于热电同调的运行策略,在不引入其他设备的条件下,针对可调回热燃气轮机分布式冷热电联供系统的优化运行问题进行研究。运用 Ebsilon 软件搭建了某 CCHP 系统模型,通过变工况模拟计算,探讨该运行策略下的运行方案。

1 案例与建模

1.1 系统结构

所研究的 CCHP 系统为某综合社区供能,原有一台英国宝曼公司生产的 TG80 燃气轮机压比为 4.5,温比为 4。由于社区规模扩大,现已不能满足社区负荷需求。因此,Bowman 的燃气轮机逐渐退出国内市场,选择 Capstone 生产的压比为 3.2,温比为 4 的 C30 燃气轮机进行扩容。

该 CCHP 系统结构如图 1 所示,由燃气轮机(GT)、烟水型溴化锂制冷机(AC)和烟水换热器(HE)组成,设备的组合方式为一拖一,即一台 GT 后面接一台 AC 和一台 HE。工作过程为:GT 消耗天然气发电,GT 排烟驱动 AC 和 HE,供应用户所需的冷热负荷和生活热水负荷。

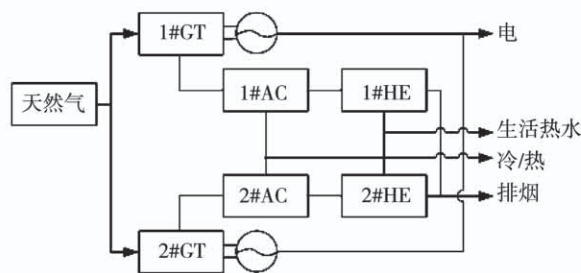


图 1 双燃气轮机冷热电联供系统结构简图

Fig. 1 Work process of the CCHP system with dual-GTs

1.2 运行策略

图 2 给出了该社区用户全年三个典型季节(夏季、过度季和冬季)的用能变化。夏季主要负荷为电负荷、冷负荷和生活热水负荷,冬季主要负荷为电负荷、热负荷和生活热水负荷,过渡季由于不需要进行供冷、供热,主要负荷只有电负荷和生活热水负荷。

热电同调的运行策略是指 CCHP 系统在供能时,不借助分产和储能设备,仅依靠燃气轮机发电量和回热度的调节,在满足用户电负荷的前提下还可以满足用户热负荷,同时最大化降低系统余热损失。

由此可知,CCHP 系统的运行工况可能存在以下几个工况:

工况 1:用户耗电量小于等于系统最小发电量,用户余热需求也小于等于燃气轮机能提供的最小余热,表明燃气轮机即使在完全回热状态下也能满足用户需求,所以燃气轮机处于最小发电状态,回热

度等于 1,系统排烟温度高于设计值,余电上网。

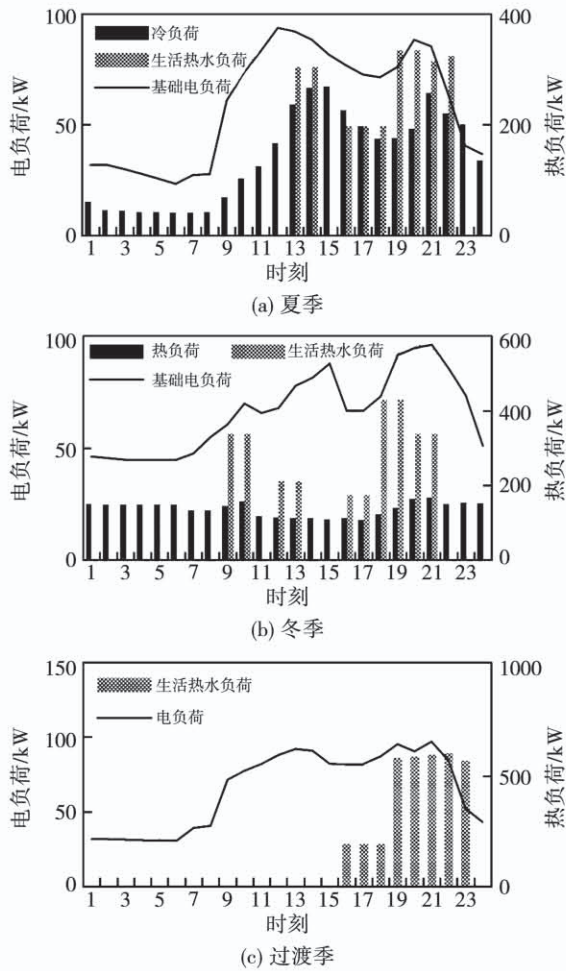


图2 典型日逐时用能情况

Fig. 2 Hourly energy consumption in typical day

工况 2:用户耗电量小于等于系统最小发电量,用户余热需求介于燃气轮机能提供的最小余热量和最大余热量之间,表明燃气轮机在完全回热状态下无法满足用户需求,所以燃气轮机处于最小发电状态,回热度介于 0 到 1 之间,系统排烟温度等于设计值,余电上网。

工况 3:用户耗电量介于系统最大发电量和最小发电量之间,用户余热需求小于等于此时燃气轮机能提供的最小余热量,表明燃气轮机即使在完全回热状态下也能满足用户热需求,所以燃气轮机发电全部提供给用户,回热度等于 1,系统排烟温度高于设计值。

工况 4:用户耗电量介于系统最大和最小发电量之间,用户余热需求介于燃气轮机能提供的最小余热量和最大余热量之间,燃气轮机通过调节回热

状态可以满足用户热需求,所以燃气轮机发电全部提供给用户,回热度介于 0 到 1 之间,系统排烟温度等于设计值。

1.3 建模及验证

对该社区燃气轮机系统进行 Ebsilon 软件建模,如图 3 所示。选取系统的设计工况与变工况(夏季的 6 时与 18 时、冬季的 6 时与 18 时和过渡季的 20 时与 22 时)的几个时间进行误差计算,得出空气流量、燃气流量和排烟温度的模拟计算结果,与实际值相比误差均在 0.7% 以内,这表明使用 Ebsilon 搭建燃气轮机 CCHP 系统模型的方法是可行的。

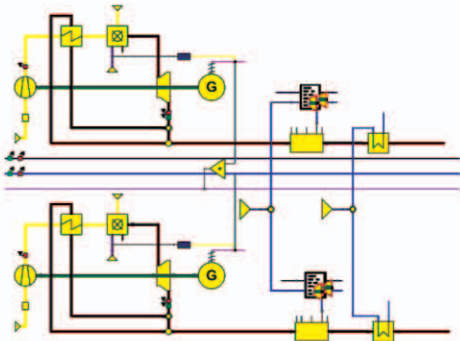


图3 双燃气轮机冷热电联供系统模型

Fig. 3 The module of the CCHP system with dual-GTs

2 运行优化建模

2.1 优化目标

在满足用户热负荷的条件下,以最大化运行净收益 P 为目标,确定运行方案,则目标函数为:

$$P = \sum_{t=1}^{24} \{ P_{c/h,t}(t) + P_{hw,t}(t) + P_{e,t}(t) - C_{ng,t}(t) \} \quad (1)$$

式中: $P_{c/h,t}(t)$ —冷售热收益,万元; $P_{hw,t}(t)$ —售生活热水收益,万元; $P_{e,t}(t)$ —售电收益,万元; $C_{ng,t}(t)$ —购天然气费用,万元; t —时刻。

2.2 约束条件

系统约束包括系统中各设备的运行约束,如燃气轮机、溴化锂制冷机和烟水换热器的负荷率约束,同时还需考虑能量平衡约束和管道温度约束。

考虑所采用运行策略的特殊性,该系统引入燃气轮机回热度 X_n 的约束,即

$$0 \leq X_n \leq 1 \quad (2)$$

同时,系统逐时供能需满足用户各项需求,系统逐时发电量应满足用户逐时电负荷,即

$$\sum G_n(t) = E_c(t) \quad (3)$$

式中: $\sum G_n(t)$ —系统逐时发电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; $E_c(t)$ —用户逐时耗电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

系统每个时刻提供的余热量等于用户逐时所需余热量,即

$$\sum Q_n(t) = \text{WH}_c(t) \quad (4)$$

式中: $\sum Q_n(t)$ —供余热量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; $\text{WH}_c(t)$ —余热需求, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

2.3 优化模型与方法

综合优化目标以及约束条件,可得到热电同调运行策略下的优化模型:

$$\begin{cases} P = \sum_{t=1}^{24} (P_{c/h,t}(t) + P_{hw,t}(t) + P_{e,t}(t) - C_{ng,t}(t)) \\ G_{n,\min} \leq G_n(t) \leq G_{n,\max} \\ D_{cn,\min} \leq D_{cn}(t) \leq D_{cn,\max} \\ D_{hn,\min} \leq D_{hn}(t) \leq D_{hn,\max} \\ D_{hwn,\min} \leq D_{wn}(t) \leq D_{wn,\max} \\ 0 \leq X_n \leq 1 \\ \sum G_n(t) = E_c(t) \\ \sum Q_n(t) = \text{WH}_c(t) \\ T_{s1} \geq 170 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_{s2} \geq 90 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

式中: G —燃气轮机发电功率, kW ; D —余热利用设备(AC 和 HW)供能量, kW ; n —同类型设备中的第 n 台设备; c —溴化锂制冷机的制冷; h —溴化锂制冷机的制热; hw —烟水换热器供生活热水; T_{s1} —溴化锂制冷机出口烟温, $^\circ\text{C}$; T_{s2} —烟水换热器出口烟温, $^\circ\text{C}$ 。

Ebsilon 软件的优化组件自带遗传算法,应用该算法对上述模型进行求解,可获得最优运行方案。从而确定两台燃气轮机的发电量、回热度和能量转化设备的能流分配,实现能源供应在不同机组间的合理分配。

3 优化结果及分析

对求得的最优运行方案进行经济计算。设定全年 365 d,夏季 96 d,冬季 110 d,过渡季 159 d,天然气价格取 $2.077 \text{ 元}/\text{m}^3$ ^[17],与用户协议冷价格为

$167.140 \text{ 元}/\text{GJ}$,热价格为 $163.650 \text{ 元}/\text{GJ}$,用户购电价采用分时电价。机组发电上网售电价^[18]为 $0.878 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

图 4~图 6 给出了热电同调运行策略下燃气轮机冷热电联供系统的夏季、冬季和过渡季优化运行情况。

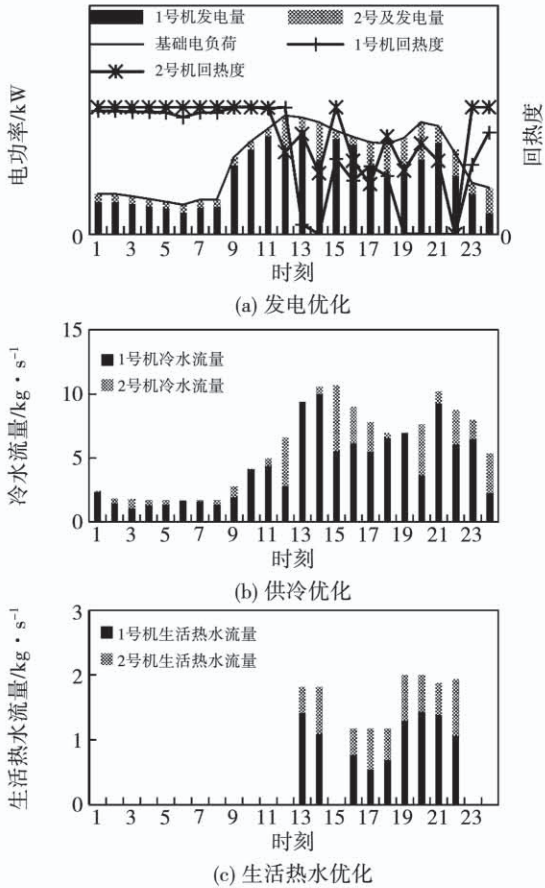


图 4 夏季逐时优化运行情况

Fig. 4 Hourly optimize operation in summer

由图 4 可知,在 1~11 时和 24 时,系统在满足用户电负荷的情况下,燃气轮机回热度 X 均高于 0.9。这是由于当时用户热需求较低,燃气轮机在高回热度的状态下,虽然排烟温度低,但余热依然可以满足用户的所有需求。同时,因回热度处于高水平状态,燃气的消耗量很小。从 11 时开始,用户的热需求增长迅速,电负荷升高。此时,燃气轮机以高回热度的方式运行,将无法用户的热需求,故燃气轮机的回热度 X 降到 0.65 以下以提高机组的余热输出。15~18 时,用户热需求降低,燃气轮机回热度提升。18 时之后为用热高峰期,1 号机回热度降为 0。

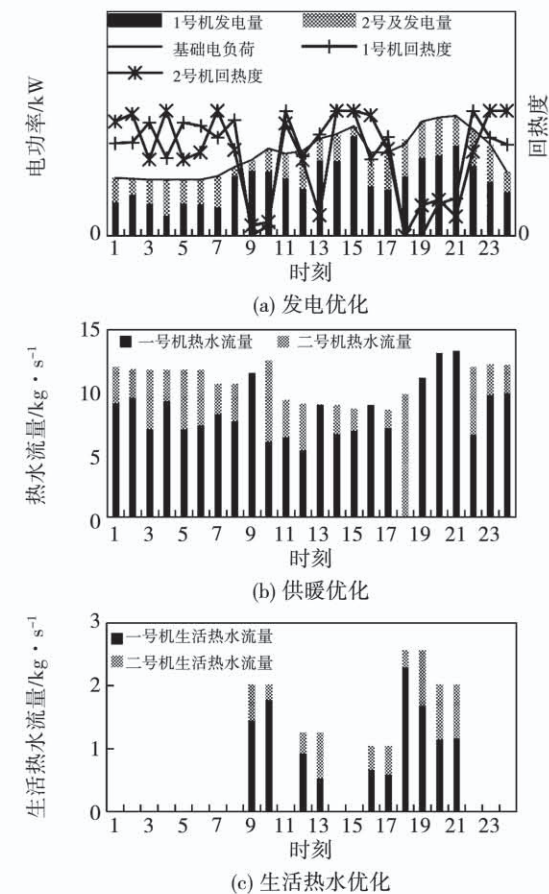


图5 冬季逐时优化运行情况

Fig.5 Hourly optimize operation in winter

由图5可知,冬季因为用户热需求和电负荷均较高,导致燃气轮机的回热度也相对较高,大部分时间在0.6以上。仅在9~10时和18~22时,用户生活热水需求剧增,导致燃气轮机回热度降到0.3以下。

由图6可知,过渡季用户仅在16~23时有生活热水需求,为了提供足够的余热输出,燃气轮机回热度降低至0.4以下。在其他时段燃气轮机仅满足用户电需求,回热度为1。在16~18时,用户余热需求低于系统最大输出余热的20%,2号机通常处于最小发电状态,由1号机调节用户电负荷波动。在

19~23时,用户余热需求高于系统最大输出余热的20%,1号机分配的电负荷较少,2号机发电量增加。

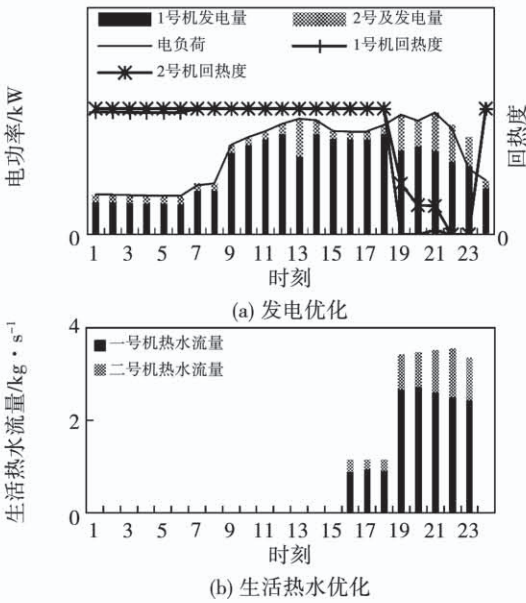


图6 过渡季逐时优化情况

Fig.6 Hourly optimize operation in transition season

由3个典型季节运行优化可以看出,燃气轮机发电功率及回热度随用户热电负荷的变化而合理调节。在绝大多数情况下,系统和用户之间电能、冷热供应可以自平衡,CCHP系统实现热电同调的目的。由于在夏季22时和冬季22、23时用户余热负荷过高,系统需提高发电来增加余热供应,此时系统发电量高于用户负荷。由于在冬季1~16时用户无热需求,此时系统有余热散失到环境中。

表1给出了以热定电和热电同调策略下各典型季节燃气轮机发电及燃气的消耗情况。从中看出,以热定电策略下全年发电总量比热电同调策略少,但天然气消耗却比热电同调策略多,这是由于热电同调策略下提高了燃气轮机回热度,降低了天然气消耗量。

表1 以热定电和热电同调策略下系统发电和购天然气情况

Tab.1 Power generation and natural gas consumption of the system with different strategies

季节	以热定电				热电同调			
	总发电/kW	1号机/kW	2号机/kW	购天然气/m ³	总发电/kW	1号机/kW	2号机/kW	购天然气/m ³
夏季	214 977.47	182 721.47	32 256.00	119 406.04	135 608.48	105 799.68	29 808.80	80 442.20
过渡季	82 554.65	70 395.44	12 159.20	62 610.73	253 261.02	209 332.93	43 928.09	126 569.09
冬季	198 275.46	176 000.00	22 275.46	125 017.00	174 440.94	117 544.93	56 896.01	95 027.33
全年	495 807.58	429 116.91	66 690.66	307 033.77	563 310.44	432 677.54	130 632.90	302 038.62

系统全年净运行收益的优化结果表明,采用以热定电运行策略的系统全年净运行收益为77.86万元,采用热电同调运行策略的系统全年净运行收益为81.93万元。热电同调的运行策略要比以热定电运行策略全年净运行收益提高5.23%。

4 结 论

搭建了某社区双类型燃气轮机冷热电联产系统模型,基于热电同调原则,使用遗传算法求解了该模型在该策略下24小时的运行优化方案,通过分析得出以下结论:

(1) 使用 Ebsilon 软件搭建了双燃气轮机 CCHP 系统,基于设备变工况的模拟,实现了对该系统的整体变工况的建模与仿真,进而对系统的运行方案进行优化。

(2) 在不引入分产设备和储能设备的前提下,通过调节燃气轮机回热度和发电量,可在满足用户冷热需求的同时满足用户电负荷需求,实现 CCHP 系统的热电同调。

(3) 不同季节典型日的优化结果表明,针对本文的研究对象,在大部分工况下,采用热电同调运行策略的系统排放到环境中的余热没有增加,但少数工况下也会出现余热或发电冗余的现象。原因在于少数工况下,供能侧与用户侧热负荷比不匹配,这需要在设计过程中对原动机的型号、台套数进行优化。

(4) 在给定的市场条件下,针对本文的研究对象,热电同调的运行策略略优于以热定电的运行策略,全年净运行收益提高了5.23%。

参考文献:

- [1] FU L, ZHAO X L, ZHANG S G, et al. Laboratory research on combined cooling, heating and power (CCHP) systems [J]. Energy Conversion and Management, 2008, 50(4): 977-982.
- [2] SEO H, SUNG J, OH S D, et al. Economic optimization of a cogeneration system for apartment houses in Korea [J]. Energy & Buildings, 2007, 40(6): 961-967.
- [3] 刘丽红, 袁益超, 刘聿拯. 分布式供能的现状与发展 [J]. 热力发电, 2006, 35(8): 4-7.
- LIU Li-hong, YUAN Yi-chao, LIU Yu-zheng. Status-quo and development of decentralized energy supply [J]. Thermal Power Generation, 2006, 35(8): 4-7.
- [4] PIACENTINO A, CARDONA F. An original multi-objective criterion for the design of small-scale polygeneration systems based on realistic operating conditions [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(17): 2391-2404.
- [5] WU Jing-yi, WANG Jia-long, LI Sheng. Multi-objective optimal operation strategy study of micro-CCHP system [J]. Energy, 2012, 48(1): 472-483.
- [6] FUMO N, CHAMRA L M. Analysis of combined cooling, heating, and power systems based on source primary energy consumption [J]. Applied Energy, 2010, 87(6): 2023-2030.
- [7] LIU Ming-xi, SHI Yang, FANG Fang. A new operation strategy for CCHP systems with hybrid chillers [J]. Applied Energy, 2012, 95: 164-173.
- [8] LIU Ming-xi, SHI Yang, FANG Fang. Optimal power flow and PGU capacity of CCHP systems using a matrix modeling approach [J]. Applied Energy, 2013, 102: 794-802.
- [9] 蒋润花, 杨晓西, 杨敏林, 等. 冷热电联供系统运行方式性能优化分析 [J]. 工程热物理学报, 2013, 34(10): 1818-1822.
- JIANG Run-hua, YANG Xiao-xi, YANG Min-lin, et al. The optimal analysis of CCHP operating modes' performance [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(10): 1818-1822.
- [10] 任洪波, 吴 琼, 任建兴. 基于需求侧视角的天然气分布式热电联产系统节能效益研究 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4430-4438.
- REN Hong-bo, WU Qiong, REN Jian-xing. Energy performance assessment of combined heat and power system based on demand-side viewpoint [J]. Proceedings of the CSEE, 2015; 35(17): 4430-4438.
- [11] 王 莉, 曾顺奇, 黄晓彤, 等. 多能互补的分布式供能系统的超结构模型及运行策略优化设计 [J]. 热能动力工程, 2020, 35(8): 9-17.
- WANG Li, ZENG Shun-qi, HUANG Xiao-tong, et al. Superstructure model and optimization design of operation strategy for distributed energy system with multiple complementary energy [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(8): 9-17.
- [12] TICHI S G, ARDEHALI M M, NAZARI M E. Examination of energy price policies in Iran for optimal configuration of CHP and CCHP systems based on particle swarm optimization algorithm [J]. Energy Policy, 2010, 38(10): 6240-6250.
- [13] 高雅洁, 田 琦, 穆天龙, 等. 基于供需热电比耦合的酒店分布式能源系统优化 [J]. 暖通空调, 2018, 48(12): 32-36.
- GAO Ya-jie, TIAN Qi, MU Tian-long, et al. Optimization of hotel distributed energy system based on supply and demand thermoelectric ratio [J]. Heating Ventilating Air Conditioning, 2018, 48

- (12): 32–36.
- [14] 王志光,杨希刚,王玉璋,等. 多能耦合的冷热电联供系统策略分析和优化设计[J]. 热能动力工程, 2019, 34(7): 9–14, 44.
- WANG Zhi-guang, YANG Xi-gang, WANG Yu-zhang, et al. Strategy Analysis and Optimization Design of Multi-Energy Coupling CCHP System[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(7): 9–14, 44.
- [15] ZHENG C Y, WU J Y, ZHAI X Q. et al. A novel thermal storage strategy for CCHP system based on energy demands and state of storage tank[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2017, 85: 117–129.
- [16] 苏文斌,杨 博. 基于回热燃气轮机的 CHP 循环性能建模与优化[J]. 装备制造技术, 2019(6): 45–49.
- SU Wen-bin, YANG Bo. CHP cycle performance modelling and optimization based on regenerative gas turbine[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2019(6): 45–49.
- [17] 上海市发展和改革委员会. 关于优化调整本市天然气发电上网电价机制有关事项的通知[EB/OL]. (2016–01–06) [2019–10–09] <http://fgw.sh.gov.cn/cxxxgk/20190716/0025–36391.html>.
- [18] 上海市发展和改革委员会. 上海市物价局关于实施煤电价格联动调整的通知[EB/OL]. (2016–01–06) [2019–10–09] <http://fgw.sh.gov.cn/cxxxgk/20160106/0025–20806.html>.

(刘 颖 编辑)

(上接第 99 页)

- [8] 李敏霞,马一太,李丽新,等. 带膨胀机的二氧化碳跨临界循环水源热泵系统运行特性实验研究[J]. 太阳能学报, 2005, 26(3): 343–348.
- LI Min-xia, MA Yi-tai, LI Li-xin, et al. Experimental study of performance characteristics on carbon dioxide trans-critical cycle with an expander water source heat pump[J]. Acta Energaie Solaris Sonica, 2005, 26(3): 343–348.
- [9] 姜云涛,马一太,刘和成,等. 高效换热的 CO₂ 水源热泵系统的实验研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(7): 1125–1129.
- JIANG Yun-tao, MA Yi-tai, LIU He-cheng, et al. Experimental study of CO₂ water source heat pump using highly effective heat exchangers [J]. Acta Energaie Solaris Sonica, 2014, 35(7): 1125–1129.
- [10] 张振迎,王洪利,李敏霞,等. 跨临界 CO₂ 蒸气压缩–引射制冷循环的性能分析[J]. 低温与超导, 2014, 42(9): 55–59.
- ZHANG Zhen-ying, WANG Hong-li, LI Min-xia, et al. Performance of ejector expansion transcritical CO₂ vapor compression refrigeration cycle[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2014, 42(9): 55–59.
- [11] FANG L, ECKHARD A G. Study of ejector efficiencies in refrigeration cycles[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 52(2): 360–370.
- [12] 彦启森,石文星,田长兴,等. 空气调节用制冷技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- YAN Qi-sen, SHI Weng-xing, TIAN Chang-xing, et al. Refrigeration technology for air conditioning[M]. Beijing: China Architecture Publishing and Media Co., Ltd., 2010.
- [13] 赵荣义,范存养,薛殿华,等. 空气调节[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.
- ZHAO Rong-yi, FAN Cun-yang, XUE Dian-hua, et al. Air conditioning[M]. Beijing: China Architecture Publishing and Media Co., Ltd., 2009.
- [14] ZHANG Zhen-ying, MA Yi-tai, WANG Hong-li, et al. Theoretical evaluation on effect of internal heat exchanger in ejector expansion transcritical CO₂ refrigeration cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 50(1): 932–938.

(孙嘉忆 编辑)