

储能技术在冷热电三联供系统中的研究现状与应用

张德怀¹, 蒋润花², 罗向龙¹

(1. 广东工业大学 材料与能源学院, 广东 广州 510006; 2. 东莞理工学院 化学工程与能源技术学院, 广东 东莞 523808)

摘要:冷热电三联供(CCHP)系统是利用一次能源或可再生能源发电,并通过多种余热回收设备高效利用余热,建立在能源的综合梯级利用基础上的产能系统。用户负荷动态变化及可再生能源输出不稳定会导致冷热电联供系统供、需侧能量不匹配,储能技术可有效解决该问题。本文总结了CCHP系统中储能技术类型及其研究现状,阐明了CCHP系统中电能储存和热能储存技术的应用方式。指出在传统能源与可再生能源相结合、供能系统越发复杂化的能源发展态势下,系统特性、配置优化和对不同场景制定出运行策略是储能技术与CCHP集成系统未来的研究方向。

关键词:冷热电三联供;储能技术;电力储能;热力储能;冷量储能

中图分类号:TK02 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2021.12.023

[引用本文格式]张德怀,蒋润花,罗向龙. 储能技术在冷热电三联供系统中的研究现状与应用[J]. 热能动力工程,2021,36(12):157-163. ZHANG De-huai,JIANG Run-hua,LUO Xiang-long. Research status and application of energy storage technology in CCHP system [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2021,36(12):157-163.

Research Status and Application of Energy Storage Technology in CCHP System

ZHANG De-huai¹,JIANG Run-hua²,LUO Xiang-long¹

(1. School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou, China, Post Code:510006; 2. School of Chemical Engineering and Energy Technology, Dongguan University of Technology, Dongguan, China, Post Code: 523808)

Abstract: Combined cold, heat and power (CCHP) system is a production capacity system based on the comprehensive gradient utilization of energy, which uses primary energy or renewable energy to generate electricity, and utilizes waste heat efficiently through a variety of waste heat recovery devices. Because the dynamic change of user load and the unstable output of renewable energy will lead to the energy mismatch between the supply side and the demand side of the CCHP system, the introduction of energy storage technology can effectively solve this contradiction. The types and development status of energy storage technology in CCHP system are summarized, and the application modes of electric energy storage and thermal energy storage technologies in CCHP system are illuminated in this paper. It is pointed out that the system characteristic, configuration optimization and operation strategy for different scenarios are the future research directions of energy storage technology and CCHP integrated system under the energy development trends of the combination of traditional energy and renewable energy and the increasingly complex energy supply system.

收稿日期:2020-04-17; 修订日期:2021-01-13

基金项目:广东省基础与应用基础研究基金自然科学基金面上项目(2021A1515012426);广东省基础与应用基础研究基金自然科学基金青年基金项目(2020A1515110665)

Fund-supported Project: General Project of Natural Science Foundation of Guangdong Basic and Applied Basic Research Fund(2021A1515012426); Youth Fund Project of Natural Science Foundation of Guangdong Basic and Applied Basic Research Fund(2020A1515110665)

作者简介:张德怀(1993-),男,广东新会人,广东工业大学硕士研究生.

通讯作者:蒋润花(1984-),女,湖南衡阳人,东莞理工学院副教授.

Key words: combined cold, heat and power (CCHP), energy storage technology, electric energy storage, thermal energy storage, cold energy storage

引 言

面对碳达峰、碳中和能源发展格局,可再生能源使用比例将不断提高,基于能量梯级利用理念,冷热电三联供系统(Combined Cooling, Heating and Power, CCHP)^[1]整体能源利用效率较高,其作为分布式能源更灵活,提高了不同能量供应的可靠性。根据动力来源的不同,CCHP 系统可分为传统消耗化石能源型和加入可再生能源型,传统型由燃气轮机或燃料电池供电,排气用于供热、驱动吸收式制冷机制冷,而加入可再生能源型额外提供了电能和热能。由于用户所需冷、热、电负荷时时变动,可再生能源输入不稳定,使得 CCHP 系统处于供需不匹配的状态,导致系统热经济性恶化^[1]。而将储能技术与 CCHP 系统集成能有效协调冷、热、电不同形式能量之间的调度和转换,缓解供需不匹配的问题^[2]。

储能技术按其储存能量类型不同,可分为电能储存(Electric Energy Storage, EES)和热能储存(Thermal Energy Storage, TES)^[3]。本文概述了各种储能技术的特点,阐述了 CCHP 系统中储能技术的研究及应用方式,指出在传统能源与可再生能源相结合、供能系统越发复杂化的能源发展形势下,分析系统特性、优化配置、针对其所处场景制定运行策略以提高系统性能,是储能技术与 CCHP 集成系统未来的研究方向。

1 CCHP 系统中的电能储存技术

常见的电能储存技术有抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能、超导磁储能、超级电容储能、电解水制氢储能和电池储能^[4]等。其中,压缩空气储能、电池储能和氢储能因其容量较大且可控、布置灵活的特点均适用于与 CCHP 系统集成。

1.1 压缩空气储能

压缩空气储能(Compressed Air Energy Storage, CAES)^[5]是指利用压气机将空气压缩并储存在储气洞穴或高压容器内,需要释能时再将高压空气通入透平发电。

从燃料利用上,压缩空气储能可分为传统补燃型及新式带储热装置的非补燃型,如先进绝热压缩空气储能(Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage, AA-CAES)、深冷液化空气储能(Liquid Air Energy Storage, LAES)和超临界压缩空气储能(Supercritical Compressed Air Energy Storage, SC-CAES)等非补燃型技术^[6]。4 种技术的性能比较如表 1 所示。传统 CAES 压缩过程产生的热量直接排放到环境中,而在膨胀阶段则需要补燃以提高透平进气口温度,提高输出功率;而新型 CAES 则通过回收压缩热来提高透平进气口温度。

在 CAES 与传统 CCHP 系统集成研究方面,文献[7-8]通过利用 CAES 存储、释放电能,解决燃气轮机在非设计工况运行时效率低下的问题,对系统进行优化,并进行了热力学性能分析。

表 1 3 种 CAES 与 LAES 系统性能比较

Tab. 1 Performance comparison of three kinds of CAES and LAES systems

储能方式	系统效率/%	体积能量密度/W · h · L ⁻¹	功率/MW	寿命/a	优点	缺点
传统 CAES	40 ~ 55	2 ~ 6	110 ~ 290	20 ~ 40	技术成熟	效率较低
AA-CAES	50 ~ 70	2 ~ 6	110 ~ 290	20 ~ 40	效率较高	系统复杂
SC-CAES	50 ~ 70	60 ~ 120	0.3 ~ 2.5	20 ~ 40	效率较高、储能密度大	系统复杂
LAES	25 ~ 50	60 ~ 120	110 ~ 290	20 ~ 40	储能密度大	效率较低、系统复杂

1.2 电池储能

储能领域应用的电池^[9]目前发展较为成熟的有铅酸电池、锂离子电池、钠硫电池和液流电池,4

种电池储能性能如表 2 所示。其中,铅酸电池因其循环寿命短、比能低等缺点限制了其在储能应用上的发展。锂离子电池现有技术体系已十分成熟,其

中磷酸铁锂电池由于价格较低、寿命长等优点,适用于大规模储能。钠硫电池^[10]的比能较大,理论值可达 $760 \text{ W} \cdot \text{h}/\text{kg}$,但需要高温运行。液流电池中,全钒液流电池(VBR)发展得较为成熟,而液流电池的结构特点可令其自身实现容量、功率的相互独立^[11]。

在与 CCHP 系统集成方面,电池与加入可再生能源的 CCHP 系统研究得较多,Michael Lippert 等

人^[12]将锂离子电池与可再生能源等组成新型 CCHP 系统,并对系统安全性和控制策略的技术经济性进行分析。Shin'ya Obara 等人^[13]对钠硫电池耦合可再生能源的 CCHP 微网系统进行建模,并对其运行方法和成本进行研究。Tathagata Sarkar 等人^[14]将光伏、风能、生物质能和全钒液流电池组成微电网,为偏远农村地区供电,分析其经济可行性。

表 2 4 种电池储能性能比较

Tab.2 Comparison of energy storage performances of four kinds of batteries

储能方式	储能效率/%	质量能量密度/ $\text{W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$	功率等级/MW	循环寿命/次	优点	缺点
铅酸电池	70 ~ 90	30 ~ 50	<100	500 ~ 1 000	技术成熟、成本低	储能密度低、寿命短、自放电大、重金属污染
锂离子电池	90 ~ 98	75 ~ 200	<100	2 500 ~ 5 000	储能密度高、寿命长、自放电小	成本较高、安全性较差
钠硫电池	70 ~ 90	150 ~ 240	<100	>4 500	充放电效率高、寿命长、成本较低	工作温度高、安全性差
全钒液流电池	65 ~ 80	10 ~ 40	<100	>12 000	功率与容量相互独立、寿命长、安全性高、无自放电现象	储能密度较低、充放电效率不高

1.3 氢储能

氢气作为二次能源,其燃烧产物仅为水,是最为理想的能源载体,而电解水制氢则是氢储能技术的基础。在各种电解水制氢技术中^[15],碱性电解水(Alkaline Electrolyzed water, ALE)技术最为成熟,但效率较低;固体聚合物/质子交换膜电解(Solid Polymer Electrolysis, SPE/ Proton Exchange Membrane Electrolysis, PEME)技术效率较高,装置结构紧凑,但成本较高;而固体氧化物电解(Solid Oxide Electrolysis Cell, SOEC)技术的工作温度在 $800 \sim 1\,000 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间,实验室条件下转化效率接近 100% ,但目前尚处于研究阶段。

相对于传统消耗化石能源的 CCHP 系统,电解水制氢技术更适合与以可再生能源为动力源的 CCHP 系统集成,构成电、热、冷、气多能互补综合能源系统。文献[16-18]利用碱性电解槽、质子交换膜电解槽和固体氧化物电解槽与可再生能源设备构成新型 CCHP 系统,并对系统进行热力性能、规划优化等研究。

2 CCHP 系统中的热能储存技术

2.1 显热储能

显热储能是利用材料的温差进行热能储存和释放技术。在低温蓄热(冷)上,常用水作为介质,而熔融盐作为中高温蓄热介质,具有成本低、储热密度高、安全性好等优点,且可以通过改变熔融盐混合物组分比例调节其熔点,使其工作在不同的温区。利用熔融盐储存传统 CCHP 系统烟气余热的研究较少,而与太阳能集热构成新型 CCHP 系统的研究较多。Amir 等人^[19]利用熔融盐储存太阳能,构建新型 CCHP 系统,对其建模并进行多目标优化。

2.2 潜热储能

潜热储能也称相变储能,是利用相变材料(PCM)特性实现热能储存和释放的技术。相变储能材料单位蓄热量大、工作温度波动小、安全性好,但导热系数较低^[20]。

相变储能的储能密度大,适用于以分布式为特点的传统 CCHP 系统余热收集,Hamid 等人^[21]利用

相变材料储存 CCHP 系统排气余热,建立系统模型并优化,对其热力学性能及经济性进行分析。常用的冰蓄冷技术可归类到相变蓄冷范畴。相比水蓄冷,冰蓄冷可提供 0℃ 以下的温度,蓄冷密度较大,但系统复杂,占地面积更大。

2.3 热化学储能^[22]

热化学储能基于化学可逆反应原理,实现热能

的储存和释放。相对于前两者,热化学储能目前仍处于研究阶段,三者的具体性能比较如表 3 所示。热化学储能方法可分为浓度差储热、化学吸附储热及化学反应储热^[23]。在热化学储能与 CCHP 系统集成方面,文献^[24-25]将氨络合物作为储热(冷)装置,与以光伏为动力源的 CCHP 系统集成并建模,评估系统的 3 种运行模式,并分析其技术经济性。

表 3 3 种热能储存方式性能比较

Tab. 3 Performance comparison of three kinds of thermal energy storage methods

储能方式	类型	质量能量密度	工作温度/℃	优点	缺点
显热储能	水	4.19 kJ/(kg·K)	35~150	成本低、系统简单	储能密度小
	熔融盐	0.5~1.5 kJ/(kg·K)	150~550	储能密度大、稳定性好	导热性较差
潜热储能	冰	334.7 kJ/kg	0	储能密度较大	系统复杂、占地面积大
	相变材料	50~300 kJ/kg	低温 < 100	储能密度大、工作温度恒定	导热系数较小,可能出现相分离、过冷现象
			中温 100~250		
高温 > 250					
热化学储能	浓度差	65~440 kJ/kg	30~150	储能密度高,可在环境温度下储存	系统复杂、成本较高、整体效率较低
	化学吸附	500~2 000 kJ/kg	0~150		
	化学反应	100~3 000 kJ/kg	200~1 500		

3 储能技术与 CCHP 系统集成应用方式

3.1 电能储存技术应用于 CCHP 系统

电能储存技术与 CCHP 系统集成的研究较多,如热力性能、配置优化、运行策略等方面,但其集成应用方式大体与图 1 一致。当系统输出功率高于用户电负荷需求时,剩余电能储存于电能储存装置中;当系统输出功率低于用户电负荷需求时,电能储存装置放电;当负荷需求与输出功率平衡时,电能储存装置不工作。电能储存装置的加入可减少传统 CCHP 机组变工况运行时间。而对以可再生能源作为动力源的 CCHP 系统而言,系统电力输出的波动性将得到抑制,进而提高系统性能,使系统运行更加灵活。

在各类电能储存技术中,电池因其发展较为成熟,在储能应用上市场占比较大。其中,锂离子电池因其容量大、效率高、耐用性好等优点成为电能储能单元的首选。但锂离子电池价格较高,在大规模储能上成本较高,而在住宅用微型 CCHP 系统等小规模储能场景较为适用,K. Darcovich 等人^[26]利用内燃机、光伏和锂离子电池等构筑一套住宅用微型

CCHP 系统,对加拿大渥太华当地住户供电、供热、供冷。

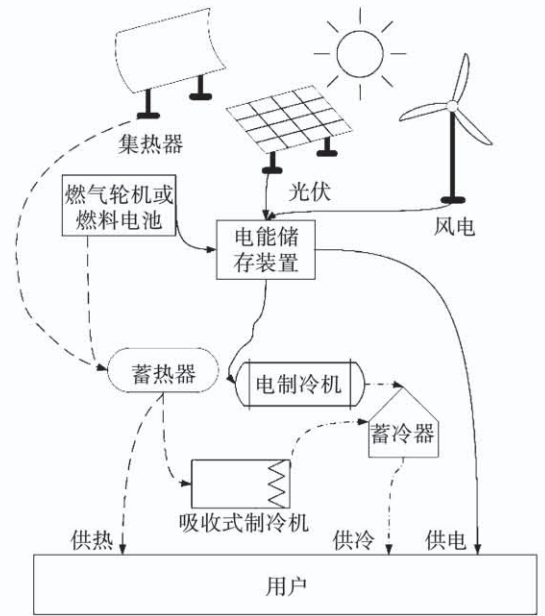


图 1 储能装置应用于 CCHP 系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of energy storage device applied in CCHP system

与其他电能储存技术不同的是,CAES 可回收

压缩热及透平出口能量,同时提供电能、热量和冷量,当以可再生能源为动力源时,CAES 可单独构成 CCHP 系统,如图 2 所示。张远等人^[27]建立了一种基于先进压缩空气储能(AA—CAES)技术的冷热电联产系统,系统透平出口的气体温度较低,蓄热器储存的热量可用于供热,或返还给进入透平前的高压空气,提高机组的出力。

供热、供冷并非 CAES 的主要作用,考虑到冷热电三联供的需求,CAES 可与独立的 CCHP 系统组合,其压气机由 CCHP 系统驱动,CCHP 系统以微型燃气轮机或燃料电池等作为原动机。考虑到进一步

提高组合系统的出力,CCHP 系统可加入太阳能用于 CAES 高压空气的加热。杨承等人^[28]提出一种整合了太阳能和压缩空气储能的燃气轮机 CCHP 系统,利用太阳能热量预热高压空气和供热,以提高系统的能效;CCHP 系统燃气轮机出口温度一般高于 CAES 压缩热的回收温度,可用于加热 CAES 透平进气口温度。Runhua Jiang 等人^[8]提出一套整合了燃气轮机、吸收式制冷机与 CAES 等设备的新型 CCHP 系统,利用燃气轮机烟气预热高压空气,提高 CAES 透平出力,并回收 CAES 压缩热用于供热,吸收式制冷机由烟气驱动。

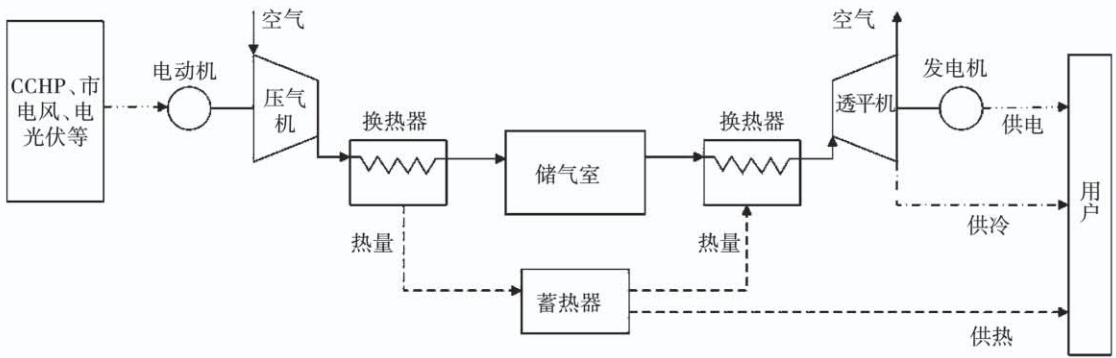


图 2 CAES 与 CCHP 系统新型耦合应用方式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of new coupling application mode of CAES and CCHP systems

当集成系统接入外部电网时,考虑到分时电价等因素,储能装置可在夜间储存谷价电,并在用电高峰时段释放。利用峰电与谷电的电价差,有效提高系统的经济性,对大电网起到削峰填谷的作用。

3.2 热能储存技术应用于 CCHP 系统

在传统 CCHP 系统中余热来源于燃气轮机烟气和套缸水,通常用水作为蓄热介质。但水作为蓄热介质的储存温度较低,而燃气轮机烟气的温度通常较高,当用户需要高温供热时可用熔融盐作为蓄热介质。基于能量梯级利用原理,烟气进入熔盐罐换热器,与低温熔融盐进行一次热交换,换热后的烟气可进入气水换热器与低温水进行二次热交换,提高余热的利用效率。熔盐罐放热时,通过控制与熔融盐进行热交换的工质流量,可以灵活调节供热温度。在 CCHP 系统余热储存方面,王江江等人^[29]研究了一种内燃机冷热电联产系统,该系统加入了热水箱和熔盐罐,分别与夹套水和烟气余热能级相适应,并建立热力学模型,提出了两种运行策略来协调储热

罐的运行。

近些年,相变储能发展越加成熟,已经开始进入市场应用阶段。与显热储能相比,相变材料具有较高的储能密度,这使得其在建筑用 CCHP 系统余热回收等规模较小的领域应用越来越具有吸引力。Zhang Yin 等人^[30]利用相变材料与建筑用 CCHP 系统相结合,回收燃气轮机排气余热,以提高系统热性能。

在热能储存技术与可再生能源驱动 CCHP 系统集成应用上,主要利用水或导热油收集太阳能对外供热,驱动吸收式制冷机。考虑到以 CAES 为电能的储存装置时,蓄热装置储存的太阳能除用于供热和制冷,还可用于提高透平进气口温度,提高系统输出效率。Cheng Yang 等人^[31]提出一种整合了 CAES 与导热油蓄热装置的新型 CCHP 系统,其中导热油储存的太阳能热量可用于预热 CAES 透平进气口高压空气,并可用于供热,以提高系统能效。

考虑到蓄冷需求,常用水作为蓄冷介质将

CCHP 系统制冷机组提供的多余冷量储存起来。在 CCHP 蓄冷方面, Khan 等人^[32]提出了可行性研究, 将 CCHP 系统与水蓄冷集成, 其中吸收式制冷机提供的冷量经换热器储存到蓄水箱中, 而且该储能系统可在蓄冷和蓄热两种工作状态间转换, 灵活性较好。

传统 CCHP 系统为了应对供热或供冷能力小于热或冷负荷需求的情况, 常加锅炉、电冷水机组以补足负荷缺口。而在系统中加入热能储存装置则可减少供热、制冷机组的装机容量, 提高 CCHP 系统的灵活性, 降低运行成本, 但初始投入成本可能会增加。考虑到分时电价情况, 利用谷电蓄冷, 可进一步提高系统的经济性。

4 结论及展望

(1) 本文从电力储能与热力储能两个方面, 分别介绍了现今各类适用于 CCHP 系统的储能技术及其研究现状, 并讨论了将电力储能与热力储能技术应用于 CCHP 系统中的具体情况。储能技术的运用可有效提升 CCHP 系统的运行性能, 但各类储能设备的加入使得集成系统的复杂度上升, 增加了规划难度。因此, 集成系统的规划不当将可能导致其部分性能下降。

(2) 为了避免上述情况的发生, 需要在设计集成系统时建立其运行模型, 分析系统特性, 优化配置, 并针对不同场景制定出运行策略, 以协调 CCHP 系统能量供需平衡, 使系统达到一次能源消耗、总成本、碳排放等多种指标的最优化。随着碳达峰、碳中和的政策推进, 传统能源与可再生能源相结合, 供能系统越发复杂化的能源发展情况下, 系统特性、配置优化和对不同场景制定出运行策略是储能技术与 CCHP 集成系统未来研究发展的重要方向。

参考文献:

- [1] WU D W, WANG R Z. Combined cooling, heating and power: a review[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2006, 32(5): 459-495.
- [2] 冯志兵, 金红光. 燃气轮机冷热电联产系统与蓄能变工况特性[J]. 中国电机工程学报, 2006(4): 25-30.
FENG Zhi-bing, JIN Hong-guang. Off design characteristics of CCHP system and energy storage system of gas turbine[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2006(4): 25-30.
- [3] LUO Xing, WANG Ji-hong, DOONER M, et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation[J]. Applied Energy, 2015, 137: 511-536.
- [4] CHEN Hai-sheng, CONG T N, YANG Wei, et al. Progress in electrical energy storage system: a critical review[J]. Progress in Natural Science, 2008, 19(3): 291-312.
- [5] 陈海生, 刘金超, 郭欢, 等. 压缩空气储能技术原理[J]. 储能科学与技术, 2013, 2(2): 146-151.
CHEN Hai-sheng, LIU Jin-chao, GUO Huan, et al. Principle of compressed air energy storage technology[J]. Energy Storage Science and Technology, 2013, 2(2): 146-151.
- [6] WANG Ji-dai, LU Kun-peng, MA Lan, et al. Overview of compressed air energy storage and technology development[J]. Energies, 2017, 10(7): 991-1012.
- [7] HE Feng-juan, XU Yu-jie, ZHANG Xin-jing, et al. Hybrid CCHP system combined with compressed air energy storage[J]. International Journal of Energy Research, 2015, 39: 1807-1818.
- [8] JIANG Run-hua, YIN Hui-bin, YANG Min-lin, et al. Thermodynamic model development and performance analysis of a novel combined cooling, heating and power system integrated with tri-generative compressed air energy storage[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 168: 49-59.
- [9] 蒋凯, 李浩秒, 李威, 等. 几类面向电网的储能电池介绍[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 47-53.
JIANG Kai, LI Hao-miao, LI Wei, et al. Introduction of several types of energy storage batteries for power grid[J]. Power system automation, 2013, 37(1): 47-53.
- [10] DEEPAK K, SATISH K R, SUMAN B K, et al. Progress and prospects of sodium-sulfur batteries: a review[J]. Solid State Ionics, 2017, 312: 8-16.
- [11] ADAM Z W, MATTHEW M M, JEREMY P M, et al. Redox flow batteries: a review[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2011, 41(10): 1137-1164.
- [12] MICHAEL L. Li-ion energy storage takes microgrids to the next level[J]. Renewable Energy Focus, 2016, 17(4): 159-161.
- [13] SHINYA O, YUTA M, JORGE M. Economic efficiency of a renewable energy independent microgrid with energy storage by a sodium-sulfur battery or organic chemical hydride[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(21): 8888-8902.
- [14] TATHAGATA S, ANKUR B, HIRANMAY S, et al. Optimal design and implementation of solar PV-wind-biogas-VRFB storage integrated smart hybrid microgrid for ensuring zero loss of power supply probability[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 191: 102-118.
- [15] LAGUNA B M A. Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells: a review[J]. Journal of Power

- Sources,2011,203:4-16.
- [16] SEVGI E,EMIN A,ARIF H. Performance assessment of a biogas fuelled molten carbonate fuel cell-thermophotovoltaic cell-thermally regenerative electrochemical cycle-absorption refrigerator-alkaline electrolyzer for multigenerational applications[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44 (42): 23741-23749.
- [17] LIU Jin-hui,XU Zhan-bo,WU Jiang, et al. Optimal planning of distributed hydrogen-based multi-energy systems[J]. Applied Energy,2021,281:116107.
- [18] SHARIATZADEH O J,REFAHI A H,ABOLHASSANI S S, et al. Modeling and optimization of a novel solar chimney cogeneration power plant combined with solid oxide electrolysis / fuel cell[J]. Energy Conversion and Management,2015,105:423-432.
- [19] AMIR H K,POURIA A. Multi-objective techno-economic optimization of a solar based integrated energy system using various optimization methods[J]. Energy Conversion and Management,2019,196:196-210.
- [20] KINGA P,KRZYSZTOF P. Phase change materials for thermal energy storage [J]. Progress in Materials Science, 2014, 65: 67-123.
- [21] HAMID R A,HOSSEIN P. Multi-objective optimization and exergoeconomic analysis of a continuous solar-driven system with PCM for power,cooling and freshwater production[J]. Energy Conversion and Management,2020,211:112761.
- [22] 冷光辉,曹惠,彭浩,等. 储热材料研究现状及发展趋势[J]. 储能科学与技术,2017,6(5):1058-1075.
- LENG Guang-hui,CAO Hui,PENG Hao, et al. Research status and development trend of heat storage materials[J]. Energy Storage Science and Technology,2017,6(5):1058-1075.
- [23] 闫霆,王文欢,王程遥. 化学储热技术的研究现状及进展[J]. 化工进展,2018,37(12):4586-4595.
- YAN Ting,WANG Wen-huan,WANG Cheng-yao. Research status and progress of chemical heat storage technology[J]. Progress in Chemical Industry,2018,37(12):4586-4595.
- [24] LI T X,WANG R Z,YAN T, et al. Integrated energy storage and energy upgrade, combined cooling and heating supply, and waste heat recovery with solid-gas thermochemical sorption heat transformer [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014,76:237-246.
- [25] FRANCO F,DRISS S,PASCAL O, et al. Mechanical compressor-driven thermochemical storage for cooling applications in tropical insular regions: concept and efficiency analysis[J]. Applied Energy,2018,219:240-255.
- [26] DARCOVICH K,KENNEY B,MACNEIL D D, et al. Control strategies and cycling demands for Li-ion storage batteries in residential micro-cogeneration systems [J]. Applied Energy, 2015, 141: 32-41.
- [27] 张远,杨科,李雪梅,等. 基于先进绝热压缩空气储能的冷热电联产系统[J]. 工程热物理学报,2013,34(11):1991-1996.
- ZHANG Yuan,YANG Ke,LI Xue-mei, et al. CCHP system based on advanced adiabatic compressed air energy storage[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2013,34(11):1991-1996.
- [28] YANG Cheng,WANG Xu-sheng,HUANG Man-man , et al. Design and simulation of gas turbine-based CCHP combined with solar and compressed air energy storage in a hotel building[J]. Energy and Buildings,2017,153:412-420.
- [29] WANG Jiang-jiang,XIE Xin-qi,LU Yan-chao , et al. Thermodynamic performance analysis and comparison of a combined cooling heating and power system integrated with two types of thermal energy storage[J]. Applied Energy,2018,219:114-122.
- [30] ZHANG Yin,WEI Zhi-yuan,WANG Xin, et al. Optimal phase change temperature for BCHP system with PCM-TES based on energy storage effectiveness [J]. Procedia Engineering, 2017, 205:533-539.
- [31] YANG Cheng,WANG Xu-sheng,HUANG Man-man , et al. Design and simulation of gas turbine-based CCHP combined with solar and compressed air energy storage in a hotel building[J]. Energy and Buildings,2017,153:412-420.
- [32] KHAN K H,RASUL M G,KHAN M M K. Energy conservation in buildings: cogeneration and cogeneration coupled with thermal energy storage[J]. Applied Energy,2004,77(1):15-34.

(王治红 编辑)