

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.12.017

PEMFC 热电联供系统设计与性能研究

段书祺, 王昌建

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:在保证发电效率的前提下,文章设计并搭建一种可直接利用带有废热的冷却水进行热回收的新型质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)热电联供系统,并测试电堆实际运行时的动态响应与输出性能以及 PEMFC 热电联供系统的热效率与电效率。结果表明:PEMFC 电堆可以稳定输出功率并且动态响应迅速;随着电堆输出功率的增加,系统电效率下降,系统热效率和系统总效率增加;与 PEMFC 单独发电时的系统效率相比,热电联供模式下系统总效率最高可达 85.47%,提升了 38.06%,大幅提高了能源利用率。

关键词:氢能;质子交换膜燃料电池(PEMFC);热电联供;动态响应;效率分析

中图分类号:TK919 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)12-1693-06

Design and performance study of PEMFC cogeneration system

DUAN Shuqi, WANG Changjian

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: On the premise of ensuring the power efficiency, this paper designs and builds a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) cogeneration system which can directly use the cooling water with waste heat for heat recovery. The dynamic response and output performance of the stack in actual operation, as well as the thermal and electrical efficiency of the PEMFC cogeneration system were tested. It is found that the power output of the stack is stable and the dynamic response is rapid. With the increase of the stack power, the electrical efficiency of the system decreases, while the thermal efficiency and total efficiency of the system increase. The total efficiency of the cogeneration system can reach up to 85.47%, which is 38.06% higher than that of PEMFC cell, thus greatly improving the energy utilization rate.

Key words: hydrogen energy; proton exchange membrane fuel cell (PEMFC); cogeneration; dynamic response; efficiency analysis

0 引言

近几年来,质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)因其清洁、高效的特点被大众所推崇。目前 PEMFC 的应用范围已经覆盖应急电源、分布式电源以及交通运输动力电源等多个领域^[1-2]。

燃料电池通过氢气与空气发生的电化学反应,将化学能转化为高品质电能,相较于传统的内燃机有更高的转换效率。然而在燃料电池的运行过程中,有一部分化学能会转化为低品质热能^[3]。为了保证电堆的正常运行,这部分热量需要被实时排出,如果将电堆产热收集起来用于满足用户的热需求,实现热电联供,那么系统总效率最高可

收稿日期:2023-03-03;修回日期:2023-04-11

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFB4001003)

作者简介:段书祺(1998—),女,安徽淮南人,合肥工业大学硕士生;

王昌建(1975—),男,四川仁寿人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: chjwang@hfut.edu.cn.

被提升至 90%^[4]。

文献[5-6]基于热水温度设计了燃料电池热电联供系统的热管理方案,并通过模拟仿真发现该系统可以产电 10.6 kW·h,产热 14 kW·h;文献[7]对 60 kW 的热电联供系统进行模拟仿真,发现系统冬季的最大理论效率为 0.896 1,夏季为 0.907 1;文献[8]设计出一种新的余热回收系统并测试了系统的稳定性,发现系统总效率可达 81%;文献[9]开发了一种基于高温 PEMFC 热电联产系统的热力学、动力学和几何模型,并通过参数研究分析了热电联产系统的综合设计和运行模式,发现该系统最大热效率可达 55.46%;文献[10]提出一种新的热电联供系统方案,并设计

出不同工作模式下系统的控制策略,并验证该系统最高效率可达 95%。

上述燃料电池热电联供系统主要利用板式换热器或散热器实现电堆的热管理工作。本文基于上述研究对热回收系统进行创新,设计并搭建出一种 PEMFC 热电联供实验系统,并通过实验研究分析系统的动态性能与效率。

1 系统构成及实验方案

PEMFC 热电联供系统结构如图 1 所示,主要由电堆、供气系统和热管理系统组成。系统核心是一个由 3 片单电池串联而成的商业化 PEMFC 电堆。

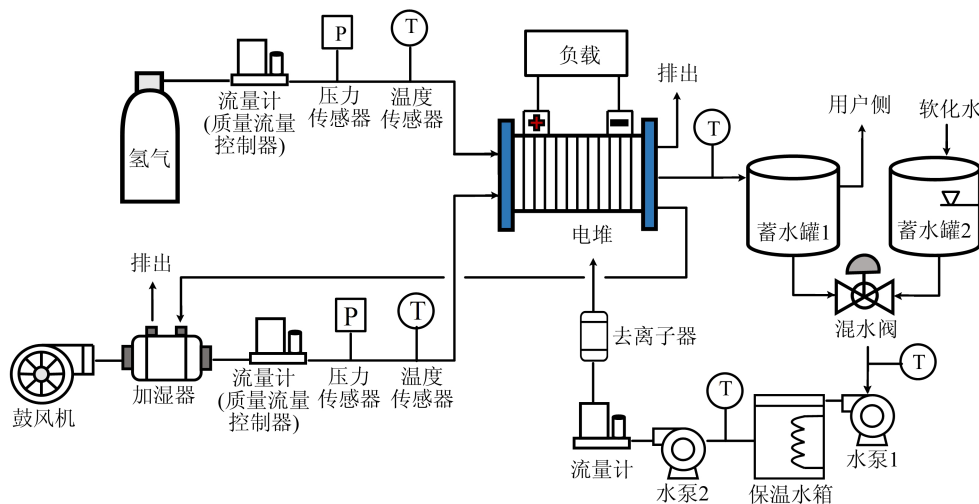


图 1 PEMFC 热电联供系统结构

供气系统将反应气体送入电堆进行电化学反应,产生电能与热能。热管理系统将电堆运行中产生的废热带走并再利用,为用户提供生活热水。直流可调负载以恒定电流的模式模拟家用电器。为了获取电堆内部的温度,将 4 个 K 型热电偶依次插入电堆的第 5~第 6 片、第 12~第 13 片、第 18~第 19 片、第 24~第 25 片单电池的端板中间,所有实验参数均由信息采集模块输送至电脑端记录以供后续分析。

1.1 供气系统

供气系统主要为 PEMFC 电堆提供足够的燃料,由氢气管路和空气管路组成。

氢气管路由质量流量控制器、压力传感器、温度传感器构成。由于氢气的爆炸极限极宽,考虑系统的安全性,气路电磁阀均采用防爆型。氢气出气管路设置时间继电器,将未完全反应的氢气脉冲排放至室外。

空气管路由鼓风机、膜加湿器、质量流量控制器、压力传感器和温度传感器构成。在电堆反应过程中,氧气与氢离子在阴极侧生成大量的水,这部分水会被未反应完的空气带出电堆,将电堆排出的空气送入膜加湿器中加湿未反应的空气后再排至室外,以此完成废气的再利用。

1.2 热管理系统

PEMFC 的水热管理是影响电堆性能的重要因素^[11],因此热管理系统的主要设计需求是在保证电堆处于正常工作状态的前提下,高效地回收利用电堆产生的废热。

图 1 中,热管理系统由蓄水罐、混水阀、变频水泵、保温水箱、流量计和去离子器组成。冷却水将电堆产生的热量带走后以热水的形式被储存在蓄水罐 1。随着电堆功率的增加,电堆产热相应增加,在冷却水流量和流速恒定的情况下,流入蓄水罐 1 中的冷却水温度逐渐增加,最终达到用户所

需的生活热水温度,满足用户热需求。

为了维持电堆的正常运行,冷却水的进水温度需低于电堆运行温度。以蓄水罐 1 作为热水端,蓄水罐 2 作为冷水端,混水阀通过调节冷热水进水量控制出水温度。同时蓄水罐 2 内安装液位传感器,当水位过低时自动补水。由于 PEMFC 具有最佳工作温度,电堆低于最佳工作温度时,电堆性能将会下降^[12],因此保温水箱内置加热棒,控制电堆进水温度恒定。为了防止冷却水电导率过高导致运行时双极板发生击穿事故,冷却水送入电堆之前由去离子器再处理,以保证实验的安全性。

1.3 实验方案

1) 实验开始前先检查管路气密性并测试冷却水电导率,确保实验安全性。

2) 通过质量流量控制器设定氢气、空气流量,氢气经过减压阀调节压力后送入电堆阳极侧,空气由可调转速的鼓风机提供,经过加湿后输入电堆阴极侧。

3) 打开混水阀,设定冷却水进水温度,同时设定水泵转速,控制冷却水流量。

4) 使电堆空载运行一段时间,观察单电池电压。待单电池电压达到稳定后,打开电子负载,以固定负载电流运行电堆,观察电堆能否正常运行,如果电堆 5 min 之内可稳定运行,那么增加 30 A 负载电流继续运行电堆。

5) 当电堆功率或单电池电压出现明显下降趋势时关闭负载,停止输送气体,并继续运行热管理系统为电堆散热至室温后关闭,结束实验。

2 运行结果及分析

作为热电联供系统的核心,电堆的输出特性是影响整个系统热电效率的关键。为了保证所设计的 PEMFC 热电联供系统运行时 PEMFC 电堆能够稳定输出电功率,满足用户的电需求和热需求,进行系统运行时的电堆输出性能测试。

2.1 动态响应特性

2.1.1 稳态性能

PEMFC 电堆的稳态输出特性如图 2 所示,图 2 中曲线显示了热电联供系统运行时电堆的输出功率与输出电压随负载电流的变化。

从图 2 可以看出:随着负载电流的增加,电堆的输出功率稳定增加,能够有效满足用户用电需求;电堆输出电压在负载电流增大时逐步下降,但下降趋势随之变缓。

电压下降的主要原因是电堆在运行时会产生 3 种无法避免的损耗,即活化损失、欧姆损失和浓差损失。随着电流的增加,电压的损耗增加,因此电压持续下降。在电流加载初期,因为电堆内发生电化学反应,电堆活化损失增加,所以电压最初出现较为明显的下降;随着负载电流的增加,欧姆损失成为引导电压下降的主要因素;此时由于运行时间的增加和电流的增加,电堆的产水增加,质子交换膜湿润,水化程度较好,质子交换膜的离子阻抗降低,欧姆损失逐渐减小,因此电堆电压的下降趋势减缓^[13]。

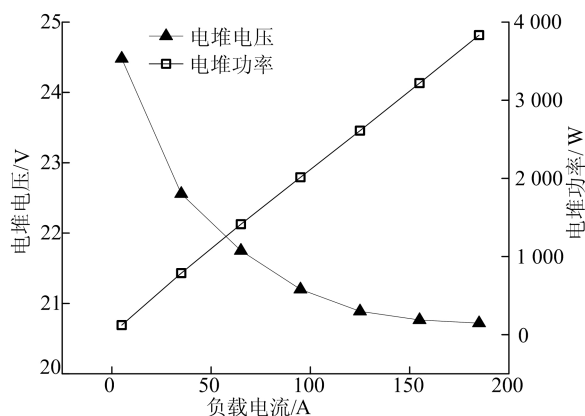


图 2 PEMFC 电堆稳态输出特性

2.1.2 动态性能

在进行 PEMFC 电堆的启停、加载等操作时,电堆的动态输出特性能够体现出电堆的响应速度和适应能力,也能够从侧面体现出测试系统的可行性。PEMFC 电堆的动态输出特性如图 3 所示。

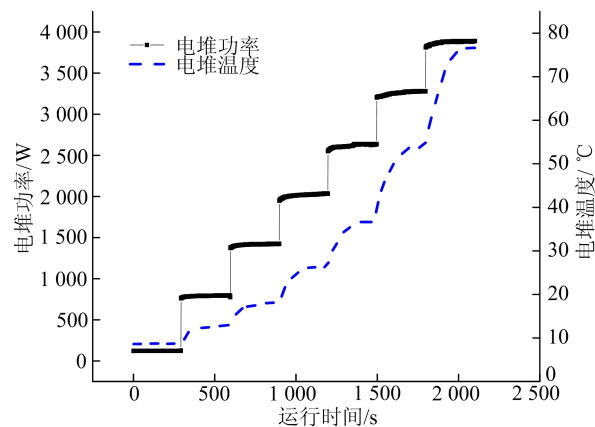


图 3 PEMFC 电堆动态输出特性

从图 3 可以看出,当负载电流阶跃增加时,电堆的输出功率随之增加,并在运行一段时间后达

到一个稳定输出值,可以认为此时电堆内部处于当前参数下的最佳状态。

从电堆内部温度可以看出:每个负载电流下电堆都有一个最佳的运行温度,在此温度下电堆输出功率也逐渐稳定;随着电流的增加,电堆内部温度的上升趋势加快,内部温度趋于稳定的时长和电堆输出功率达到稳定的时长逐渐增加。这是由于温度的升高使质子交换膜的电导率增加,电堆内部的电化学反应更加激烈,电化学极化和欧姆极化降低,同时电堆产热、产水的速率加快,冷却水带走热量的速率逐渐小于电堆产热的速率,因此电堆达到水热平衡状态,能够稳定输出性能的时长增加^[14]。

2.2 单电池电压

PEMFC 电堆的单电池输出电压变化如图 4 所示。

从图 4 可以看出,在电堆加载电流的瞬间,单电池电压均会出现断崖式下降,之后逐渐增加,这种现象被称为电压下冲现象。

为了进一步探究下冲现象的原因,引入参数电压均匀性 C_v ,定义式如下:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{V_i - \bar{V}}{V_c}\right)^2}{N}} \times 100\% \quad (1)$$

其中: N 为电池片数; V_c 为单电池电压。 C_v 越低证明电堆的均匀性越好。

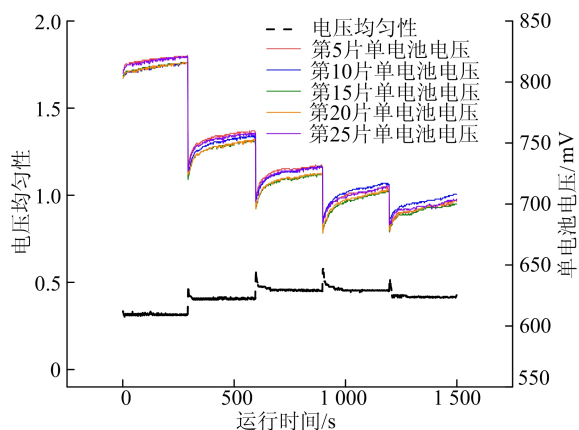


图 4 PEMFC 电堆的单电池电压

由图 4 可知:在低电流时,随着运行时间的增加,单电池的电压均匀性逐步增加,但增幅却在缓慢减小;随着运行时间的增加,负载电流增大,电压均匀性下降,这种变化与单电池电压的下冲值呈现出一致性。这是由于随着运行时间的增加,内部的反应更加高效,电堆的性能提升,电压的下

冲值也逐渐减少。

从电压均匀性变化曲线还可以看出,在运行期间,每次瞬间加载时,由于电压的下冲现象,电压均匀性会突然增加,但在一段时间之后,电压均匀性会逐渐下降并达到一个稳定值。这也证明了每次电流加载之后,电堆内部的电压分布较均匀,说明此 PEMFC 热电联供系统可以保证电堆稳定高效运行。

2.3 热电效率

PEMFC 热电联供系统的热效率和电效率是评价系统性能的重要指标,当系统热效率高时,整个系统的能源利用率也会更高。结合实验结果,可以对系统的热效率、电效率以及系统总效率进行计算分析。

热效率被定义为冷却水从电堆中回收利用的热量 Q_{rc} 与反应物产生的化学能 Q_{H_2} 之间的比值,计算公式为:

$$\epsilon_T = \frac{Q_{rc}}{Q_{H_2}} = \frac{WC_P \Delta T}{n_{H_2} \Delta h} \quad (2)$$

其中: W 为电堆中循环冷却水的流量; C_P 为循环冷却水的比热容; ΔT 为电堆内循环冷却水进出口的温度差; n_{H_2} 为耗氢量; Δh 为氢气的低位热值。

系统的电效率则被定义为电堆输出功率与反应物所产生的化学能之间的比值,其计算公式如下:

$$\epsilon_E = \frac{P}{Q_{H_2}} = \frac{I_{st} U_{st}}{n_{H_2} \Delta h} \quad (3)$$

其中: I_{st} 为负载电流; U_{st} 为电堆输出电压。

热电联供系统的总效率 ϵ 是热效率与电效率的总和,即

$$\epsilon = \epsilon_T + \epsilon_E \quad (4)$$

本文 PEMFC 热电联供系统的电功率、回收热量以及系统总产能如图 5 所示。

PEMFC 热电联供系统的热效率与电效率如图 6 所示。

从图 5、图 6 可以看出,随着负载电流的增加,电堆产热和冷却水回收的热量也相应增加,因此系统的热效率呈现上升趋势,而电池的转换率即电堆的电效率处于下降趋势。这是由于随着负载电流的增大,电堆所产生的化学能更多以热能的形式离开电堆,而电堆功率的变化程度小于电堆产能的增值,因此整体的电效率呈现下降趋势。

从图 6 可以看出,在电堆运行后期,系统的热效率和电效率均趋于稳定,其中热效率可以达到

38.87%,电效率则稳定在 46.60%。

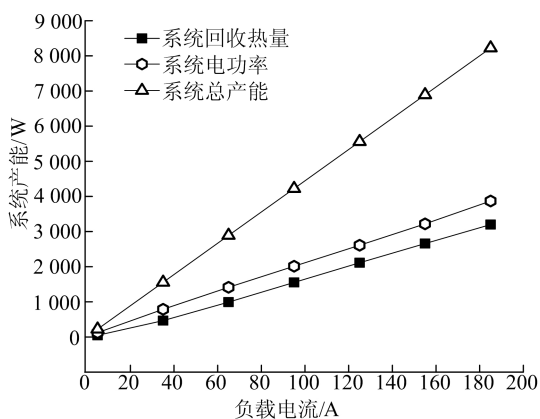


图 5 PEMFC 热电联供系统产能

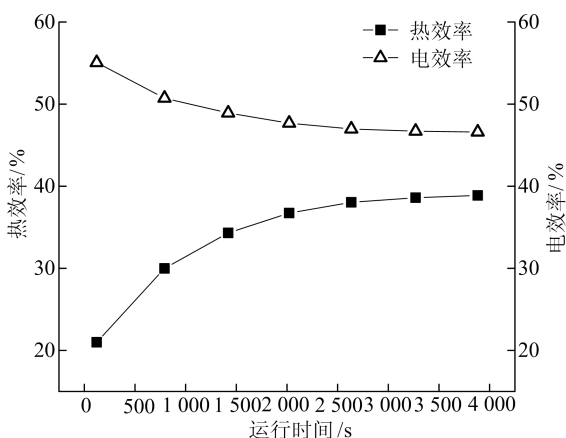


图 6 PEMFC 热电联供系统的热效率和电效率

为了进一步探究系统效率,将热电联供系统效率与 PEMFC 单独供电的效率进行对比。其中 PEMFC 的理论效率 η 通常被定义为 PEMFC 产生的电能与氢气燃烧热值之间的比值,计算公式为:

$$\eta = u_f \frac{V_c}{1.25} \quad (5)$$

其中, u_f 为 PEMFC 的实际利用率。

PEMFC 单独供电的效率 η 与 PEMFC 热电联供系统总效率 ϵ 随负载电流的变化情况如图 7 所示。

从图 7 可以看出,随着电流的增大,PEMFC 的理论效率从 56.01% 逐步下降至 47.41%。从图 4 PEMFC 的单电池电压曲线可以看出,引起这一变化的主要原因是单电池电压的下降,而这种损耗是不可避免的。从图 7 还可以看出,将电堆产生的废热回收利用实现热电联产时,系统的总效率随着负载电流的增加而增加,在测试的最大电流下,系统总效率达到 85.47%。与 PEMFC 单独供电相比,热电联供系统整体的效率得以大

幅提升。

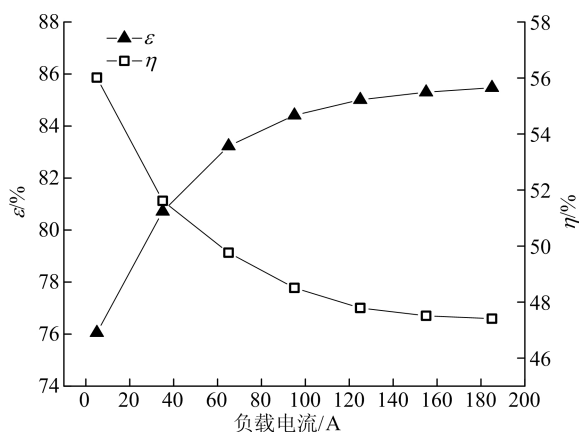


图 7 PEMFC 单独供电效率与热电联供系统效率

3 结 论

1) 本文针对水冷型 PEMFC 的热回收系统,设计并搭建出一种可直接利用冷却水进行热回收的 PEMFC 热电联供系统。

2) 对所设计的 PEMFC 热电联供系统进行了动态响应测试,分析了电堆的输出功率、电堆电压以及单电池均匀性。电堆的输出功率可稳定在 3.8 kW,电堆电压随着电流的增大而减小,但最终会达到稳定值,单电池电压均匀性较好。实验结果证明,PEMFC 热电联供系统动态响应迅速,能够维持电池稳定运行。

3) 分析了该 PEMFC 热电联供实验系统的热效率和电效率,结果表明,随着电堆功率的增加,电堆的热效率增加,电效率下降,但最终会维持在一个稳定的状态,系统整体的效率最高可以达到 85.47%。

4) 对比了 PEMFC 单独供电效率与热电联供系统效率,结果表明,PEMFC 的理论效率由 56.01% 下降至 47.41%,与之相比 PEMFC 热电联供系统总效率提升了 38.06%,能源利用率得到有效提高。

[参 考 文 献]

[1] NIAKOLAS D K, DALETOS M, NEOPHYTIDES S G, et al. Fuel cells are a commercially viable alternative for the production of “clean” energy[J]. *Ambio*, 2016, 45: 32-37.

[2] WANG Y, CHEN K S, MISHLER J, et al. A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: technology, applications, and needs on fundamental research[J]. *Applied Energy*, 2011, 88: 981-1007.

(下转第 1703 页)

研究区在 2017、2018 年降水入渗补给总量增加;水均衡量增加,与原先相比,增幅分别为 1.98%、2.01%。研究结果对增加该地区地下水资源量及改善地下水超采问题具有一定的参考价值。

[参 考 文 献]

- [1] 王文. 城市雨水资源化利用分析[J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(4):100-101,105.
- [2] 赵虎,母传伟. 推广雨水集用促进可持续发展[J]. 中国科技信息, 2014(5):44-45.
- [3] 王思思,张丹明. 澳大利亚水敏感城市设计及启示[J]. 中国给水排水, 2010, 26(20):64-68.
- [4] 乔晓罡,李文静. 从一些国家雨水利用情况谈我国的雨水利用[C]//“建设资源节约型、环境友好型社会”高层论坛论文集. 西安:西安地图出版社, 2007:239-242.
- [5] 郑兴,周孝德,计冰昕. 德国的雨水管理及其技术措施[J]. 中国给水排水, 2005, 21(2):104-106.
- [6] 李鸿敬,刘洪海,李明. 国外城市雨洪利用的发展现状[J]. 中国高新技术, 2013(14):75-76.
- [7] 车伍,吕放放,李俊奇,等. 发达国家典型雨洪管理体系及启示[J]. 中国给水排水, 2009, 25(20):12-17.
- [8] 赵婧. 基于雨水收集利用的海绵校园构建[J]. 皮革制作与环保科技, 2021, 2(19):91-92.
- [9] 董潇君,赵廷,红西北. 校园雨水收集利用的可行性研究[J]. 建筑节能, 2020, 48(12):132-136.
- [10] 马箐,沙晓军,徐向阳,等. 基于 SWMM 模型的低影响开发对城市住宅区非点源污染负荷的控制效果模拟[J]. 水电能源科学, 2015, 33(9):53-57,52.
- [11] 周延,余敦先,夏军,等. 基于水文水动力模型的 LID 措施对城市内涝风险的影响研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(11):1090-1101.
- [12] 麦叶鹏,黄国. 如解河海等基于 Hydrus-1D 模型的 LID 措施雨水径流控制效应研究[J]. 水利学报, 2022, 53(7):811-822.
- [3] 张兴梅,赵玺灵,段常贵. 质子交换膜燃料电池系统性能模拟[J]. 煤气与热力, 2009, 29(3):31-35.
- [4] SILVEIRA J L, GOMES L A. Fuel cell cogeneration system: a case of technoeconomic analysis[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 1999, 3(2):233-242.
- [5] 李晓嫣,陈维荣,刘志祥,等. 家用燃料电池热电联供系统的建模与仿真[J]. 电源技术, 2014, 38(12):2274-2277.
- [6] 李晓嫣,陈维荣,刘志祥,等. 基于热水温度的家庭 PEMFC-CHP 系统运行策略研究[J]. 电源技术, 2015, 39(3):491-493,501.
- [7] ZHANG Y Y, YU Q C, CAO G Y, et al. Research on a simulated 60 kW PEMFC cogeneration system for domestic application[J]. Journal of Zhejiang University(SCIENCE A), 2006, 7(3):450-457.
- [8] HWANG J J, ZOU M L. Development of a proton exchange membrane fuel cell cogeneration system[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195:2579-2585.
- [9] ARSALIS A, NIELSEN M P, SREN K K. Modeling and parametric study of a 1 kW e HT-PEMFC-based residential micro-CHP system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(8):5010-5020.
- [10] 辛英超,由蕤,杨秉润. PEM 燃料电池热电联供系统控制[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2019, 36(3):218-223.
- [11] PENG M, CHEN L, ZHANG R, et al. Improvement of thermal and water management of air-cooled polymer electrolyte membrane fuel cells by adding porous media into the cathode gas channel[J]. Electrochimica Acta, 2022, 412:140-154.
- [12] ZHAO C, XING S, LIU W, et al. Comprehensive anode parameter study for an open-cathode PEMFC[J]. Energy and Fuels, 2020, 34(6):7582-7590.
- [13] 汪殿龙,王梓鉴,杨代军,等. 质子交换膜燃料电池活化性能快速分析方法[J]. 电池, 2022, 52(2):139-143.
- [14] 赵兴强. 水冷型质子交换膜燃料电池热管理系统研究[D]. 成都:西南交通大学, 2015.

(责任编辑 吴 亮)

(责任编辑 胡亚敏)

(上接第 1697 页)