

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.046

便携式氢燃料电池电源设计及输出特性优化

靳瑞清^{1a}, 刘新华^{1b}, 刘海宁², 窦仁杰³, 邱泉², 张政²

(1. 中国矿业大学 a. 信息与控制工程学院; b. 机电工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 济南大学 机械工程学院, 山东 济南 250022;

3. 骥之翼(济南)氢能科技有限公司, 山东 济南 250022)

摘 要: 针对便携式氢燃料电池使用中负载突变导致的动态响应滞后问题, 根据铝粉水解制氢原理及反应, 设计便携式氢燃料电池结构; 针对便携式氢燃料电池存在的氢气输出不稳定和电堆输出动态响应疲软问题, 分别提出铝水制氢分段 PID 控制策略和基于超级电容的电力输出缓冲电路, 并采用 Simulink 仿真和实验相结合的方法, 验证和完善便携式氢燃料电池结构设计的可行性及氢气输出和电力输出控制策略的有效性。

关键词: 质子交换膜燃料电池; 铝-水制氢; 结构设计; 控制策略; 电源输出特性优化

中图分类号: TM911 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)02-0241-07

Design and Output Characteristics Optimization of Portable Hydrogen Fuel Power Supply

JIN Ruiqing^{1a}, LIU Xinhua^{1b}, LIU Haining², DOU Renjie³, QIU Quan², ZHANG Zheng²

(1. a. School of Information and Control Engineering; b. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China;

3. Jizhiyi (Jinan) Hydrogen Energy Technology Co., Ltd., Jinan 250022, China)

Abstract: In response to the dynamic response lag problem caused by load sudden changes in the use of portable hydrogen fuel cell, a portable hydrogen fuel power structure was designed based on the principle and reaction of aluminum powder hydrolysis for hydrogen production. To address the problems of unstable hydrogen output and weak dynamic response of the power stack output in the portable hydrogen fuel power supply, a segmented PID control strategy for aluminum-water hydrogen production and a power output buffering circuit based on supercapacitors were proposed respectively. The feasibility of the designed portable hydrogen fuel cell power structure and the effectiveness of the hydrogen output and power output control strategies were verified using a combination of Simulink simulation and experiment methods.

Keywords: proton exchange membrane fuel cell; aluminum-water hydrogen production; structural design; control strategy; power output characteristic optimization

0 引言

环境污染的日益严重性和全球能源危机使得可再生能源的发展备受世界各国重视。其中, 质子交换膜燃料电池 (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) 因在效率、功率密度、排放、低温启动性等多方面具有的优异性能, 而被认为具有广阔的发展前景^[1]。为提高 PEMFC 的性能, 相关学者对质子交换膜燃料电池开展了深入广泛的研究。

马菁等^[2] 构建了逆流形式单直通道的

PEMFC 三维稳态模型, 研究了工作温度与阴极湿度双参数对 PEMFC 性能的协同影响, 获得了较高的质子交换膜电导率和较宽的功率密度调节域。王庆鑫等^[3] 研究了阴极催化层离聚物可控热解对膜电极性能与稳定性的影响。王万腾等^[4] 开展了一种在电堆不同电池单元气体扩散层设置不同梯度孔隙率的改进方案。

质子交换膜燃料电池进行反应的燃料是高纯度氢气, 而氢气的制备、存储是质子交换膜燃料电池规模化应用的先决条件和关键技术^[5]。尤其对于小功率可移动或便携式 PEMFC 发电系统, 氢气

基金项目: 山东省基金面上项目 (ZR2021ME101); 济南市“新高校 20 条”资助项目 (202228116)

第一作者简介: 靳瑞清 (2003—), 男, 江苏南京人, 本科生, 研究方向为自动化专业, 2815094495@qq.com。

通信作者简介: 刘新华 (1981—), 男, 江苏徐州人, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为智能制造等, liuxinhua@cumt.edu.cn。

供应、存储容量和输出稳定性直接关系到整个发电系统的电能供应量和输出功率的稳定性。胡里清等^[6]研制了便携式 200~500 W 质子交换膜燃料电池电源系统。阮喻等^[7]开展了小型化、轻便式、模块化的 PEMFC 移动电源系统的总体设计研究,采用常压空气为氧化剂,固态可逆金属储氢器存储、供应氢气,限定氢气的流速与压力稳定性,并采用单片机为核心的控制单元以实现系统各单元的协调控制。刘明义等^[8]研制了 200 W 便携式质子交换膜燃料电池系统样机,并研究了通过储氢器的放氢吸热效应提高燃料电池堆散热效率的方案。

文献资料[9-12]表明,现有的诸多储氢、制氢方式多采用高压储氢和固态储氢等方式。相较于高压储氢和固态储氢等方式,铝粉水解制氢具有质量轻、便于携带、可根据实际需求实时制氢等优点,更适合便携式氢燃料电源的使用需求^[13]。为进一步提升铝粉水解制氢的性能,满足日益发展的社会需求,本文以铝水制氢为基础,设计了一种可用于短时应急供电的便携式氢燃料电源;同时开展了该电源的氢气输出和电力输出特性的优化,以求保证设备的运行可靠性和提高设备的使用寿命。

1 便携式氢燃料电源结构设计

1.1 PEMFC 工作原理

质子交换膜燃料电池工作原理^[14]如图 1 所示。由图 1 可知,质子交换膜燃料电池一般由 3 部分组成:阴极板、阳极板和膜电极。其中,膜电极由气体扩散层、催化剂层和质子交换层构成。

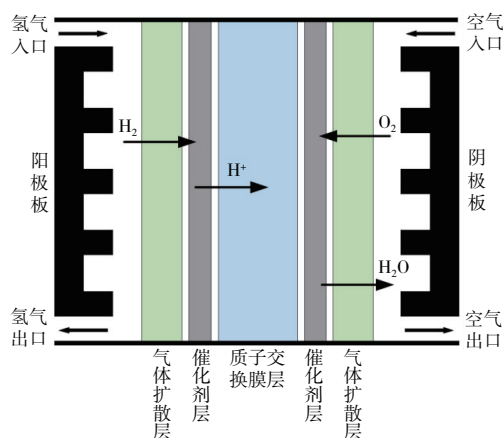


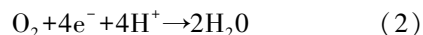
图 1 质子交换膜燃料电池工作原理示意图

氢气由氢气入口流道进入燃料电池阳极,经

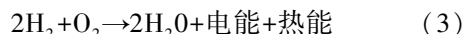
过气体扩散层和催化剂层在阳极被分解成氢离子与电子,化学反应如式(1)所示^[15]。



氧气经过空气入口流道进入阴极层,再经过气体扩散层进入催化剂层,与氢离子和电子发生反应生成水并释放热量,化学反应如式(2)所示。



以上化学反应式表明,质子交换膜内部化学反应的实质是氧气与氢气的氧化还原反应,总反应式如式(3)所示。



1.2 便携式氢燃料电源整体组成

基于铝粉水解制氢设计的便携式氢燃料电源整体结构包括水箱、注水泵、反应容器、调压阀、电磁阀、控制器、DC/DC 转换器和风冷电堆,如图 2 所示。

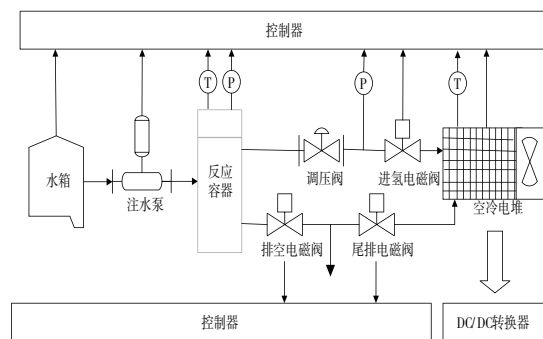


图 2 便携式氢燃料电源组成框图

反应容器中放有一定的铝粉,注水泵将水箱中的水缓慢注入反应容器,铝粉和水接触后发生水解反应释放氢气,氢气经过调压阀后稳定在一个较低的压力,再通入电堆发电。

为监测便携式氢燃料电源的工作状态,保证电堆正常工作,在反应容器内部安装了温度传感器和压力传感器;电堆内部安装了温度传感器,电堆氢气入口安装有压力传感器。以上传感器信号均接入控制器,控制器根据电堆温度传感器调节散热风扇的转速,实现电堆温度的恒温控制;根据反应容器压力调节注水泵的注水频率,控制反应容器的压力。

1.3 反应容器结构特点

反应容器结构主要由端盖、滤网、注水管和反应腔体构成,如图 3 所示。其中,端盖上安装有泄压阀和出氢接口;滤网用于过滤氢气,防止反应器中的铝粉及其反应物进入氢气管路和电堆;注

水管安装于反应容器底部,且不同高度位置均开有出水口,防止反应物堵塞出水口。

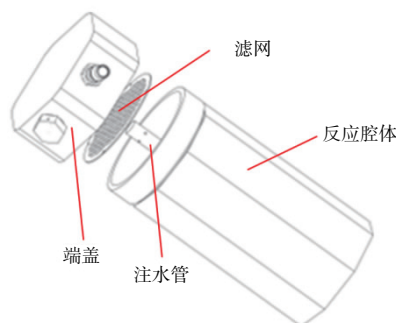


图3 反应容器结构示意图

2 铝水制氢输出特性及控制策略

2.1 铝水制氢原理及氢气输出特点

铝具有较高的反应活性,暴露于空气中的铝表面会立即形成一层致密的氧化膜,从而阻止铝水反应的进行^[16]。常用的方法是在铝粉中加入金属元素、金属氧化物和金属氯化物等添加剂。这些添加剂的加入可显著增强铝与水的反应,破坏铝表面的氧化膜^[17],实现铝与水在常温常压环境下的完全反应。

为了解铝水制氢中的氢气释放量和注水量之间的关系,通过铝水制氢反应容器内的压力测试实验进行了间接验证。实验过程为:反应容器中加入定量的铝粉,采用注射器逐次加入等量的水并观察记录反应容器内的压力变化。铝水制氢反应容器内的压力变化如图4所示。

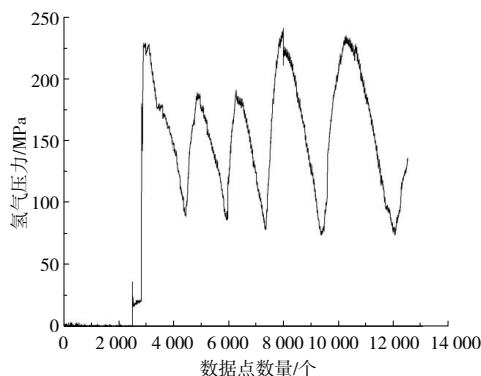


图4 铝水制氢反应容器内的压力变化

从图4中可以看出,初次加入水后,极短时间内产生的大量氢气使得反应容器内的压力快速升高;由于反应物的阻碍和铝粉的减少,后续再注入等量的水时,反应容器内的压力变化均不如初次

反应剧烈。

2.2 铝水制氢分段PID控制

针对铝粉在反应容器中的水解释氢非线性问题^[18],提出了一种分段式控制防止方法,将整个反应周期分为“反应前”、“反应中”和“反应后”3段。铝水制氢分段控制流程如图5所示。

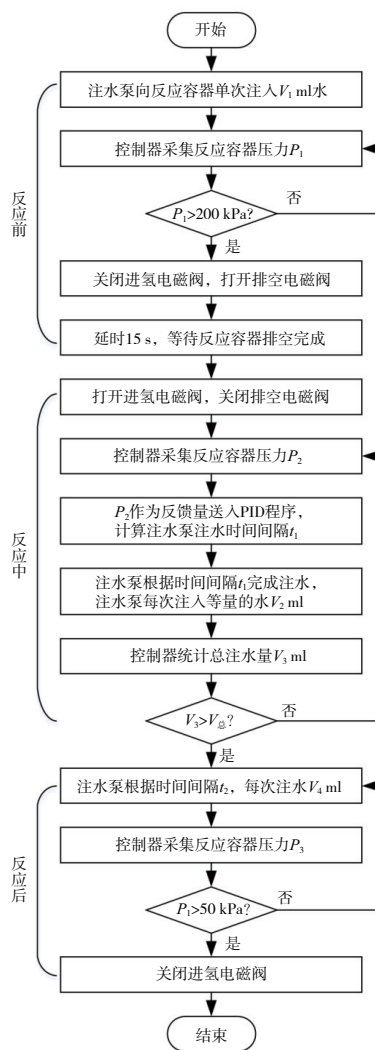


图5 铝水制氢分段控制流程图

“反应前”为反应容器的排空阶段。反应容器装入铝粉后,容器中充满空气,要对反应容器进行排空。在“反应前”阶段,注水泵一次性向反应容器注入 V_1 ml水,水量要根据铝粉质量确定。注水完成后由控制器监测反应容器压力变化,当反应容器压力大于400 kPa时,电堆进氢电磁阀关闭,排空电磁阀打开,并延时60~70 s,等待反应容器排空完成。

“反应中”为便携式氢燃料电池电源正常运行阶段。控制器中集成了PID控制算法,以反应容器

压力为反馈信号,实现注水泵注水周期的自动控制,注水泵单次注水量相同。控制器统计反应容器中被注入的总水量,若已注入的水量超过与加入铝粉量反应所需的实际水量,则“反应中”阶段结束。

“反应后”阶段是为了使反应容器中水的含量略大于铝粉实际能够消耗的量,保证铝粉彻底反应,直至反应容器压力小于 100 kPa 不能保证电堆的正常运行,“反应后”阶段结束。

3 电源输出特性及优化方法

3.1 负载变化对电堆输出的影响

氢燃料电池是一种电化学能量转换器,电堆输出响应的快慢由电化学反应速率决定^[19]。电堆产生电流的速率可由单位时间的电流密度体现。根据法拉第定律,电流密度与转移电荷和单位面积的反应物消耗成正比,电流密度 i 可表示为

$$i = n_F j \quad (4)$$

式中: n_F 为转移电荷 ($C \cdot \text{mol}^{-1}$); j 为单位面积的反应物通量 ($\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)。

当便携式氢燃料电源的外部负载突然大幅度增大时,电堆对氢气的消耗量会在短时间内大幅度增加,而铝水制氢的特点是很难保证氢气的及时供应,尤其随着反应的进行,反应物逐渐增多,铝粉逐渐减少,氢气的释放会逐渐变得缓慢。

电堆运行过程中一旦出现氢气不能满足电堆消耗的情形就会出现电堆气体饥饿^[20]问题,长时间的氢气供应不足会对电堆造成严重的损伤,比如电堆反极、碳腐蚀和催化剂脱落等^[21]。

3.2 电堆输出动态响应优化设计

为消除便携式氢燃料电源外部负载突然增加可能导致的电堆气体饥饿现象,采用超级电容组队电堆输出进行缓冲,整体技术方案如图 6 所示。在电堆的输出端并联超级电容组^[22];同时,电堆输出端串联有电流防反二极管,防止超级电容组的电流倒灌入电堆。

相比较于传统储能电池,超级电容具备可快速充放电、可靠性高和工作温度范围宽等优点。一般单体超级电容的电压在 3 V 左右。为适配电堆电压,需要多个单体超级电容串联,串联后超级电容组的电压为单体电压之和,容量为每个单体超级电容的倒数和^[23],如式(5)所示。

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots + \frac{1}{C_n} \quad (5)$$

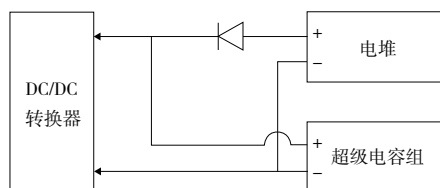


图 6 电堆输出动态响应优化框图

超级电容组的充放电时间可通过电容的时间常数进行计算,如式(6)所示。超级电容充电时,经过一个时间常数,电容组的电压可达到电源电压的 63%;超级电容放电时,经过一个时间常数,电容组的电压下降至电源电压的 37%。

$$\tau = RC \quad (6)$$

式中: τ 为时间常数; R 为电量电阻; C 为电路电容。

3.3 “理想二极管”电路设计

传统二极管虽然可以实现电流的单向流动,但内阻较大,且大电流工作条件下会产生较高的压降,以及大量的热量损耗。为改善以上问题,采用 LM76700 构成的“理想二极管”电路,使用 NMOS 代替传统二极管,如图 7 所示。由于 NMOS 的内阻远小于传统二极管,因此该电路正常工作时具备更低的压降和热量。

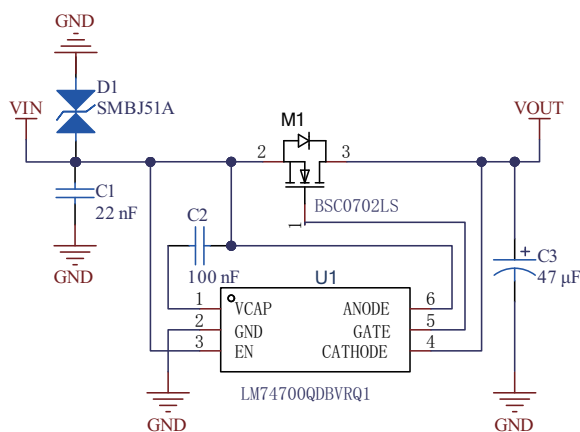


图 7 “理想二极管”电路图

4 Simulink 系统仿真

4.1 电堆 Simulink 模型

Simulink 模型库中集成了 PEMFC 模型,如图 8 所示。通过相应的参数设置即可完成 PEMFC 模型的搭建^[24],其中可设置的模型参数包括:电堆

节数、电堆电压、电堆电流、运行效率、空气流量和空气压力等。

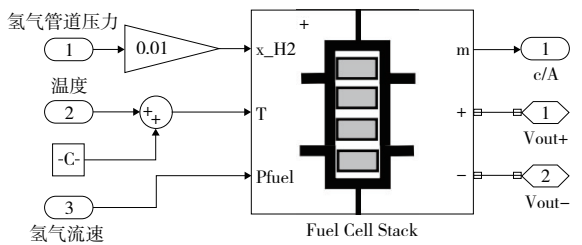


图 8 PEMFC 模型

4.2 电堆输出特性仿真

基于 Simulink 模型库自身集成的 PEMFC 模型,完成了电堆输出特性仿真模型的搭建,如图 9 所示。

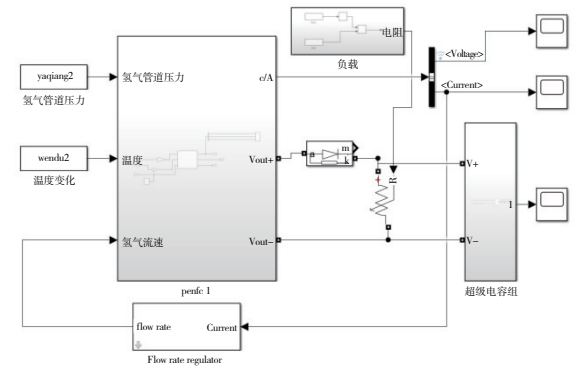


图 9 电堆输出特性仿真模型

该模型组集成了超级电容组,电容值容值设定为 3F,通过可调电阻实现电堆的变载,分别对电堆有无超级电容组的工况进行仿真,仿真结果如图 10 所示。

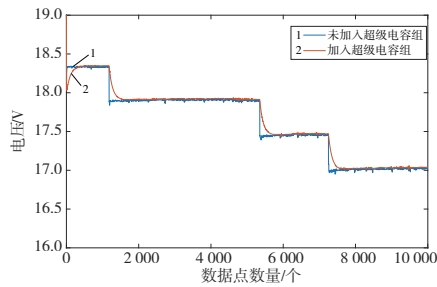


图 10 电堆输出特性仿真结果

由图 10 可以看出,加入超级电容组后,当电堆载荷发生变化时,电堆电压减小缓慢,对电堆电压的输出具有缓冲作用(本刊为黑白印刷,相关问题请咨询作者)。

5 实验验证

根据便携式氢燃料电源结构,研制了 100 W 的便携式氢燃料电源原理样机,样机实物如图 11 所示。该原理样机采用阴极开放式空冷电堆,电堆参数如表 1 所示。

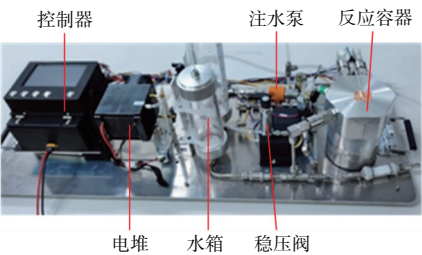


图 11 便携式氢燃料电源原理样机

表 1 空冷电堆参数

参数	数值
电堆节数	24
开路电压/V	20
额定电压/V	12
额定电流/A	15
工作温度/℃	-5~40

5.1 铝水制氢输出控制实验

采用分段 PID 控制策略对铝水制氢的反应过程进行控制,程序中 PID 设置的反应容器目标压力为 180 kPa,整体控制效果如图 12 所示,铝水反应的反应物如图 13 所示。从图 12 中可以看出,由于“反应前”的粉量充足,注水之后的反应容器内部压力迅速上升,等待排空完成进入“反应中”阶段。整个“反应中”阶段,虽然反应容器内部压力处于波动状态,但整体压力均值稳定在 170 kPa 附近。随着反应的进行,铝粉逐渐减少且反应物对水形成了较大阻碍,注水量逐渐增多,直至进入“反应后”阶段,反应容器内的压力逐渐下降。

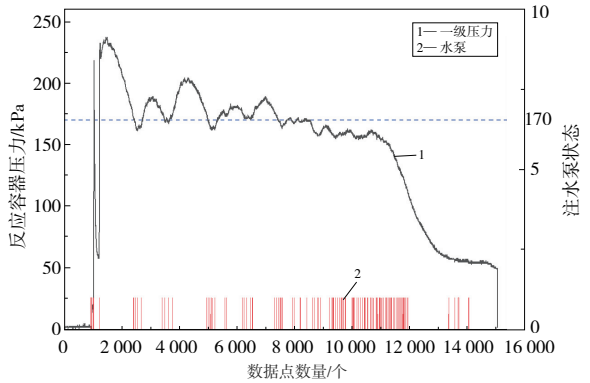


图 12 铝水制氢 PID 控制效果



图 13 铝水反应的反应物

5.2 电堆输出缓冲实验

用于提高便携式氢燃料电源输出电压稳定性的超级电容组如图 14 所示。该超级电容组由 8 个超级电容单体串联组成,总容值 3.75 F,总输出电压 24 V,高于电堆的开路电压。在超级电容组的输出端串联有“理想二极管”,用于防止电流反向流入电堆。



图 14 超级电容组

超级电容组采用的单体超级电容具体型号为 CXP-3R0306R,具体参数表 2 所示。

表 2 单体超级电容参数

参数	数值
额定电压/V	3
容值/F	30
最大电流/A	23.6
直流等效电阻/ Ω	0.03
尺寸 $D \times L$ /mm	16 $\times$ 30

为检验超级电容组改善负载变化对便携式氢燃料电源输出电压稳定性的有效性,开展了 3 种条件下的电堆输出电压对比实验:氢瓶直连电堆方式、无超级电容组的铝粉水解制氢方式和有超级电容组的铝粉水解制氢方式,其中,电源负载由 0~100 W 的突变由电子负载控制。

电堆输出电压与负载变化的关系曲线如图 15

所示。

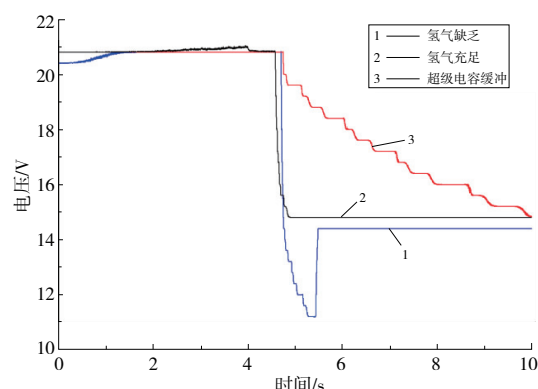


图 15 电堆输出电压与负载变化的关系

由图 15 可以发现,采用氢瓶直接连接电堆,即保证氢气充足,电堆输出电压快速下降至 14.5 V,电堆输出电压没有明显的跌落。

采用铝粉水解制氢的方式对电堆进行氢气供应,在没有加入超级电容组进行缓冲的条件下,当负载由 0 W 突变到 100 W 时,电堆的输出电压会跌落到 11 V,低于电堆的额定电压;随着水解反应的进行,氢气量增大,因此电堆的输出电压恢复正常。

在电堆的输出端并联超级电容组,仍然采用铝粉水解制氢的方式,当负载由 0 W 突变到 100 W 时,电堆输出电压逐渐下降到 14.5 V,但是没有出现由于负载突然增大导致电堆输出电压大幅度跌落的情形。

6 结语

针对便携式氢燃料电源使用过程中的氢气输出不稳定和电堆输出动态响应疲软问题,研制了便携式氢燃料电源结构的原理样机,并开展了便携式氢燃料电源输出特性的优化以及试验验证研究。主要工作与结论有:

1) 根据铝粉水解制氢原理及反应,研制了便携式氢燃料电源结构的原理样机;

2) 开发了铝水制氢的分段 PID 控制方法,实现了常温常压环境下铝与水的完全反应;

3) 采用超级电容组方法,有效控制了电堆输出电压跌落,实现了良好的缓冲作用。试验对比结果表明:负载突然上升的瞬间,超级电容能接替电堆输出,提高便携式氢燃料电源的动态响应,能有效防止出现电堆饥饿现象,延长电堆使用寿命。

参考文献:

- [1] 李建林,李光辉,郭丽军,等.“十四五”规划下氢能应用技术现状综述及前景展望[J]. 电气应用,2021,40(6):10-16.
- [2] 马菁,马强,王俊杰,等. 温度和阴极湿度对质子交换膜燃料电池的影响[J]. 西北工业大学学报,2023,41(6):1162-1169.
- [3] 王庆鑫,崔勇,李蕴琪,等. Fe-N-C 阴极催化层离聚物可控热解对膜电极性能与稳定性的影响研究[J]. 化学学报,2023,81(10):1350-1356.
- [4] 王万腾,李楠,白雪宜,等. 气体扩散层分层设计对 PEMFC 电堆性能影响研究[J]. 汽车工程,2023,45(9):1720-1727.
- [5] 沈承,宁涛. 燃料电池用氢气燃料的制备和存储技术的研究现状[J]. 能源工程,2011,31(1):1-7.
- [6] 胡里清,周利容,李拯,等. 便携式 200W 至 500W 质子交换膜燃料电池电源系统研制[J]. 电化学,2002,8(2):182-185.
- [7] 阮喻,沈卫东,杜明磊,等. 便携式 PEMFC 移动电源系统的设计与研究[J]. 电源技术,2004,28(3):141-145.
- [8] 刘明义,蒋利军,黄倬,等. 便携式质子交换膜燃料电池系统集成研究[J]. 电源技术,2006,30(6):446-449.
- [9] 刘晓杰,刘峻,韩文杰,等. 储氢技术研究进展及挑战与机遇[J]. 现代化工,2025,45(8):79-84,89.
- [10] 张岩,王旭升,林羲,等. 新型氢储运技术发展及应用现状[J]. 科技导报,2025,43(7):67-78.
- [11] 丁国华,方鸽. 储氢技术的研究进展与未来展望[J]. 上海节能,2025(1):90-93.
- [12] 童亮,余豪华,毛佰一,等. 金属氢化物储氢研究新进展[J]. 华中师范大学学报(自然科学版),2025,59(1):33-45.
- [13] 刘光明,解东来. 铝水反应制氢技术研发进展[J]. 电源技术,2011,35(1):109-112.
- [14] 杨代军,卢奕睿,明平文,等. 质子交换膜燃料电池原理及耐久性[M]. 化学工业出版社,2023.
- [15] 谭凯峰. 自增湿空冷型 PEMFC 电压均衡性研究及故障分析[D]. 成都:西南交通大学,2019.
- [16] 周勇,姬雄帅,李航,等. 铝基材料水解制氢技术研究进展[J]. 中国材料进展,2024,43(5):429-439.
- [17] 赵阳,叶康,孙汉乔,等. 铝基复合材料制氢性能与安全性研究[J]. 汽车工程,2022,44(5):730-735.
- [18] 郭戈. 铝基合金的水反应研究[D]. 武汉:华中科技大学,2018.
- [19] FUZATO G H F, DE AGUIAR C R, FAGUNDES T A, et al. Droop K-sharing function for energy management of DC microgrids[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, 2021, 2(3): 257-266.
- [20] 董文雅,潘建欣,郭伟. 质子交换膜燃料电池电堆阳极饥饿反极的研究[J]. 高等学校化学学报,2024,45(2):41-47.
- [21] 陈丽丽,曾东荣,刘锋. 质子交换膜燃料电池电堆故障研究[J]. 广东化工,2022,49(21):35-37.
- [22] 袁赫. 基于 50W 级燃料电池的电源管理系统设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022.
- [23] 王金双,马宪伟,董力文,等. 基于燃料电池的离网住宅混合可再生能源电力系统能源管理系统优化[J]. 电工电能新技术,2024,43(2):47-55.
- [24] 王绍辰,王颖帆,王博. 质子交换膜燃料电池的建模方法及仿真应用[J]. 大众用电,2024,39(2):50-51.

收稿日期:2024-03-28

(上接第 139 页)

- [18] 刘银龙,付衍琛,闻洁,等. 螺旋管式空气-空气换热器的设计和实验研究[J]. 推进技术,2021,42(5):1087-1093.
- [19] 于铭哲,李健,李祥,等. 超燃冲压发动机冷却与发电一体化系统性能优化[J]. 热力发电,2025,54(11):32-41.
- [20] 徐熠熠,胡建新,苗训,等. 超燃冲压发动机热防护技术及点阵结构应用[J]. 空天技术,2024(4):24-42.
- [21] 浦航,王金兆,尚妍,等. 轻量化主动热防护结构设计技术现状与发展趋势[J]. 航空动力,2024(3):70-73.
- [22] 李文杰. 运载火箭热分离热环境及热防护研究[J]. 中国设备工程,2024(2):258-260.
- [23] 孙智强,吕东,朱凯笛,等. 基于陶瓷基复合材料铠甲的涡轮导叶热防护研究[J]. 推进技术,2024,45(2):148-155.

收稿日期:2024-01-24