

光伏-氢燃料电池集成供电系统设计

瞿小广,陈波,杨兴林,沈晟吉

(江苏科技大学 能源与动力学院,江苏 镇江 212100)

摘要:为满足远海岛屿的用电需求,以2 kW的稳定输出功率为目标,设计一种低成本的太阳能制氢-金属储氢-燃料电池供电系统。系统的主要部件包括:光伏发电设备、酸性电解水制氢、LaNi₅合金储氢、质子交换膜燃料电池发电等。开展了太阳能制氢-金属储氢-燃料电池集成供电系统实地测试。测试结果表明:太阳能电池板面积为70.84 m²;平均每天产氢量3.5 m³;储氢额定容量为1.8 kg;系统提供最大功率为2.5 kW的稳定电能,额定功率为2 kW。系统的设计与研制,具有较高的实际意义,为国家的海岛建设和发展作出了贡献。

关键词:多能源集成;光伏发电;燃料电池;电解水制氢;金属储氢

中图分类号:TM615 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)04-0184-04

Design of Integrated Power Supply System for Photovoltaics-hydrogen Fuel Cells

QU Xiaoguang, CHEN Bo, YANG Xinglin, SHEN Shengji

(College of Energy and Power, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

Abstract: In order to meet the demand of electricity in the far-sea island, a low cost solar hydrogen product-metal hydrogen storing-fuel cell power supply system with hinstable output power of 2 kW was designed. The main components of the system include power generation, acid electrolytic water hydrogen production, LaNi₅ alloy hydrogen storage and proton exchange membrane fuel cell power generation etc. The field test of the designed power supply system shows that the solar panel area is 70.84 m², with average daily hydrogen production as 3.5 m³, rated hydrogen storage capacity being 1.8 kg, and a maximum power of 2.5 kW stable electric energy with rated power of 2 kW generated. The system has high practical significance and has contributed to island construction and development.

Keywords: multi-energy integration; photovoltaic power generation; fuel cell; producing hydrogen by water electrolysis; metal hydrogen storage

0 引言

为了实现海上资源的进一步开发,并为海岛居民的日常生活提供可靠的能源动力,亟需提供一套有效、稳定的能源供应系统^[1]。太阳能制氢、金属储氢、燃料电池供电系统的集成运行,无需化石燃料作为驱动装置工作的能量来源,而制氢所需的原料则来源于海岛周围最容易获得且储量丰富的海水,因而能够实现海岛能量的自给自足,实现低品质能量转换、高效的能量储存和高品质的能量输出。

国外的一些学者最先对太阳能制氢-氢燃料电池多能源供电进行研究。文献[2-5]中的研究人员开展了太阳能和多种燃料电池能源集成系统研发工作,实现了较小功率下的混合发电。太阳能制氢-金属储氢-燃料电池集成供电的关键技术在于如何低成本,有效地制氢、贮氢并向高品质电能转换。目前电解水制氢主要方法为酸性或碱性电解质催化制氢。文献[6-13]围绕不同电解质、不同类型燃料电池以及贮氢方法进行了相关研究。

本文基于光伏发电、燃料电池技术,设计开发一套能够稳定输出2 kW功率的太阳能制氢-金属贮氢-燃料电池供电集成系统。系统包括:光伏发电系统、燃料电池制备、酸性电解水制氢设计与制备、金属贮氢装置设计与制备技术以及系统功能集成与电气控制。系统通过太阳能阵列把光能转换为电能并将富余的电能用于电解水制氢,氢气存储于金属储氢罐中。当太阳光资源不足时,光伏阵列产生的电能小于负载供电需求,由于氢气存储于其中一个金属储氢罐中,可启动另一个金属储氢罐为燃料电池提供氢气发电,满足负载需求。该系统的工作没有污染物和二氧化碳的排放,对外界的供给依赖低,是一种离岛能源综合利用的一体化解决方案,未来的市场利用前景十分广阔。

1 系统总体设计方案

太阳能制氢-氢燃料电池集成供电系统主要包括:1)光伏发电系统;2)燃料电池的低成本制备技术;3)酸性电解水制氢设计与制备工艺;4)金属贮氢装置设计与制备

基金项目:江苏科技大学博士科研启动费项目(1142931905)

第一作者简介:瞿小广(2000—),男,江西南昌人,本科,研究方向为新能源混合发电系统研发。

技术;5)系统功能集成与电气控制技术。

光伏阵列在进行光-电能量转换过程中,光伏阵列进线通过接线盒并线后进入控制器。存在以下两种情况:

a)太阳光资源丰富时,光伏阵列产生的电能超过用户需求,用户负载所需电能直接由光伏发电承担,并将富余的电能用于电解水制氢,氢气存储于金属储氢罐中;

b)太阳光资源不足时,光伏阵列产生的电能小于负载供电需求,由于氢气存储于其中一个金属储氢罐中,可启动另一个金属储氢罐为燃料电池提供氢气发电,满足负载需求。

从控制器输出的电,用于直流负载时,则直接连接直流负载,用于交流负载需要逆变器。逆变器把直流电源逆变为 AC220 V 频率 50 Hz±2% 交流电,供给交流负载。如图 1 所示。

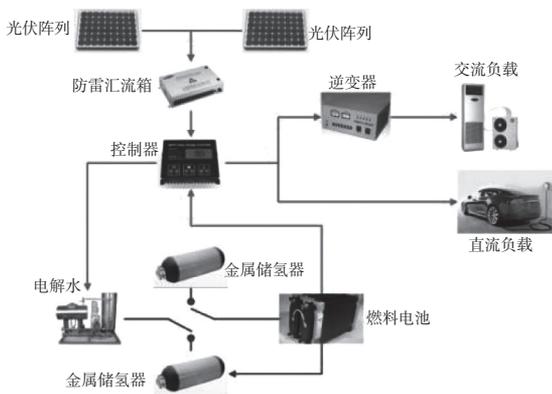


图 1 太阳能制氢-金属氢化物储氢-氢燃料电池集成供电方案

2 系统各模块设计

2.1 光伏发电系统设计参数

某地年水平面辐射量为 135 kcal/cm², 方阵面上的辐射量为 148.5 kcal/cm²。通过对等效日照峰值数、电池组件串联数、日负载耗电量及总充电电流等参数的计算,光伏发电系统的设计参数如表 1 所示。

表 1 光伏发电系统设计参数

总容量/ kWh	单元阵列 功率/ kW	单元阵列 数量	单元阵列 尺寸/m	电池板 数量	电池阵列 输出组合
12	2	6	4.8×3.24	48	2×24

2.2 质子交换膜燃料电池制备

质子交换膜燃料电池中,膜电极是其运行中化学能转换为电能的场所。膜电极的制备方法可大致分为两类:气体扩散层负载法(GDE)和膜负载法(CCM)。图 2 给出了两种制备方法得到的燃料电池性能。对比两种方法可知,CCM 法远好于 GDE 法。

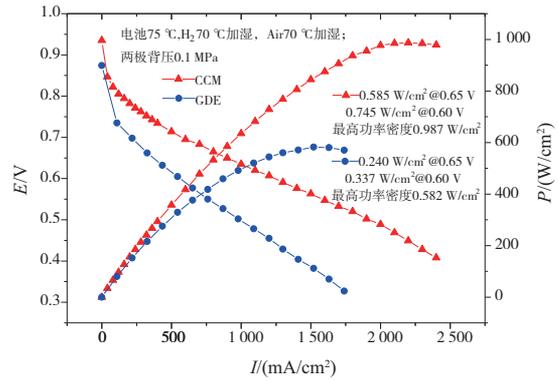


图 2 CCM 法和 GDE 法燃料电池性能对比

系统需提供 2 kW 的稳定电能,由于逆变器的效率、线路损失、温度的影响、电池性能的衰减等,因而需要配置 3 kW 燃料电池系统。整个系统包括:燃料电池堆、风扇、电子控制板、DC/DC 以及电磁阀,3 kW 的额定功率。针对 3 kW 的设计要求,通过小电堆测试,建立了 40 层的燃料电池电堆,如图 3 所示,其发电功率为 3 050 W,达到了设计目标。

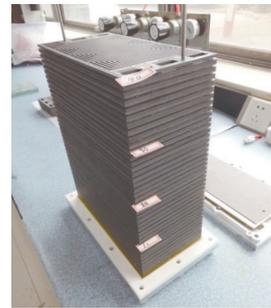


图 3 40 层的燃料电池电堆

2.3 酸性电解水制氢系统设计与制备

酸性电解水制氢系统主要包括酸性电解水催化剂的制备、酸性电解水电极制备、酸性电解水热压塑封技术等。图 4 为酸性电解槽装置。将 12 个电解槽以串联的方式连接,组成酸性电解水装置,总活化面积 1 200 cm²。当电流密度为 1 A/cm², 单个电解槽的电压约 2 V, 总计产氢量 0.5 m³/h, 4 h 可产生 2 m³ 氢气。

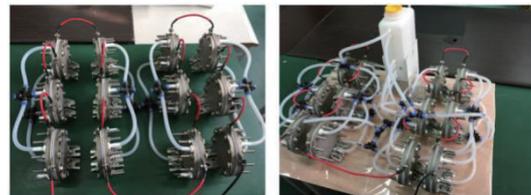


图 4 酸性电解槽装置组装

2.4 金属贮氢装置设计与制备

采用吸放氢动态性能良好的 LaNi₅ 作为贮氢材料,建立 Sieverts 式贮氢性能测试系统并对样品的贮氢性能进行测试,测试系统如图 5 所示。测试环境温度 28 °C 恒温,

测试温度由 AI-808P 型人工智能温度控制器控制,控制精度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$,温度范围为 $0^{\circ}\text{C} \sim 1000^{\circ}\text{C}$ 。压力变化由大氢库和小氢库中相应的压力传感器分别监测,其监测范围分别为 $0 \sim 0.5 \text{ MPa}$ 和 $0 \sim 20 \text{ MPa}$ 。采用 AI-706M 型巡检仪采集反应温度及压力变化的数据并传送到计算机进行记录。

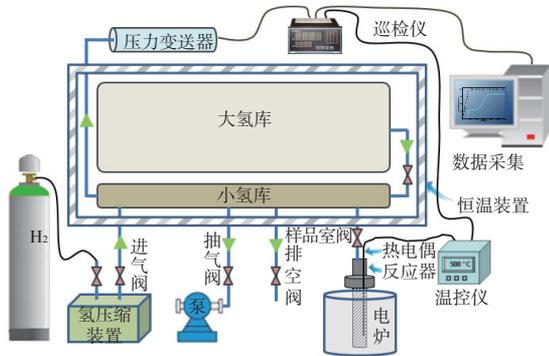


图5 Sieverts 式储氢性能测试仪示意图

储氢装置设计要求:氢气输出时纯度 $\geq 99.99\%$; 25°C 输出时氢压 $\geq 0.25 \text{ MPa}$, 60°C 输出时氢压 $\geq 0.50 \text{ MPa}$ 。图6为 15 Nm^3 固态储氢装置的实物照片。



图6 固态储氢装置照片

2.5 系统功能集成与电气控制技术

因太阳能制氢-金属贮氢-燃料电池系统的组成较为复杂,各子系统的参数匹配设计及智能控制逻辑,将是系统集成中的一个核心关键难题。同时如何在满足负载需求的情况下,最大程度地降低发电系统的造价成本以及根据负载的需求对不同的子系统进行匹配设计,形成一体化的、有效协同的、高智能化的、低成本的产品,将是本系统另一个核心关键难题。

电控系统安装柜主要用于安装本设计所用到的电器部件,如逆变器、DC/DC 变换器、控制模块、显示模块等。本柜体将众多电器模块集成到一体,使电控系统小型化、集成化、可视化、智能化,且降低成本,方便管理。图7为太阳能制氢-金属贮氢-燃料电池系统控制总成,安装柜的三维模型图如图8所示。

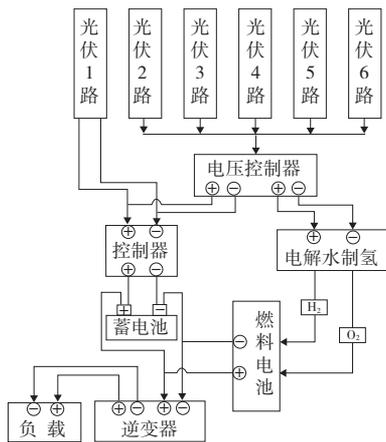
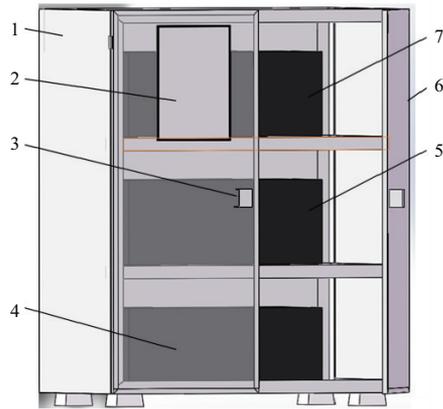


图7 太阳能制氢-金属贮氢-燃料电池系统控制总成



1-柜体; 2-触摸屏; 3-把手; 4-逆变器; 5-DC/DC变换器; 6-柜门; 7-控制模块。

图8 安装柜的三维模型图

3 系统测试

太阳能制氢-金属氢化物储氢-氢燃料电池集成供电原理样机系统如图9所示。对该系统开展测试。测试目标为:光伏发电系统每天 $\geq 15 \text{ kWh}$; 平均每天产氢气为 3 m^3 ; 平均每天产氧气为 1.5 m^3 , 氢气纯度 99.999% , 金属储氢器储氢容量 $\geq 20 \text{ Nm}^3$, 燃料电池额定功率 $\geq 3 \text{ kW}$, 纯净淡水最大生成速率为 1500 g/h , 系统提供最大功率为 2.5 kW 的稳定电能, 系统额定功率为 2 kW , 生活用纯净淡水额定生成速率为 1200 g/h 。



图9 太阳能制氢-金属氢化物储氢-氢燃料电池集成供电原理样机系统

测试主件包括:光伏组件48块、控制器1台、逆变器1台、电压控制柜1台、金属储氢器1台、制氢设备1台、储氢设备1台。测试结果如表2所示。由测试结果可知,该系统符合预定设计目标,且占地面积较小。

表2 太阳能制氢-金属氢化物储氢-氢燃料电池集成供电原理样机系统测试结果

序号	检验项目	技术条件	实测结果
1	光伏系统太阳能电池面积(轮廓采光表面积)/m ²	—	70.84
2	光伏单组件最大功率/W	该输出值对应的日辐照度 $G=1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$, >250 W	256
3	光伏组件总功率/kW	该输出值对应的日辐照度 $G=1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$,	12.3
4	光伏发电系统/kWh	日太阳辐照量 $H \geq 8\ \text{MJ}/\text{m}^2$, 12 kW, 带负载实际运行条件下测试3天,取平均电能输出量,每天 $\geq 15\ \text{kWh}$	24.5
5	金属储氢器储氢容量/(Nm ³ /kg)	以40 SLM 流量可持续放氢($\geq 20\ \text{Nm}^3$)	21.7/1.93
6	氢气纯度/%	99.999	99.999
7	平均每天产氢气/m ³	日太阳辐照量 $H \geq 8\ \text{MJ}/\text{m}^2$, >3 m ³	3.5
8	平均每天产氧气/m ³	日太阳辐照量 $H \geq 8\ \text{MJ}/\text{m}^2$, >1.5 m ³	1.75
9	燃料电池额定功率/kW	充足气源 $\geq 3\ \text{kW}$	3.3
10	纯净淡水最大生成速率/(g/h)	燃料电池输出功率3 kW, >1 500 g/h	1 560
11	生活用纯净淡水额定生成速率/(g/h)	燃料电池输出功率2.5 kW, >1 200 g/h	1 280
12	系统提供最大功率为的稳定电能/kW	日太阳辐照量 $H \geq 8\ \text{MJ}/\text{m}^2$, >3 kW	3

4 结语

1) 针对远海岛屿较难提供稳定电能的现状,本文从太阳能发电出发,引入电解水制氢、金属贮氢、燃料电池等新能源技术,提出了一种太阳能制氢-金属贮氢-燃料电池集成供电系统方案。该系统从原理上能够实现海岛能量的自给自足、低品质能量转换、高效的能量储存和高品质的能量输出。

2) 基于2 kW的设计目标,开展了光伏发电系统设计,酸性电解水制氢系统设计与制备,金属贮氢装置设计与制备以及系统功能集成与电气控制方式设计,实现了相应模块的功能。

3) 基于各设计模块,建立了太阳能制氢-金属贮氢-燃料电池集成供电系统样机,并开展了发电效率、发电功率、产氢、贮氢、淡水生成等指标的测试,测试结果满足既定目标,为今后产业化提供了依据。

参考文献:

- [1] 程杨阳,屈莉莉,汪心怡. 海洋科技创新与蓝色经济发展协同效应的研究综述[J]. 海洋开发与管理,2021,38(2):24-29.
- [2] ALOTAIBI Z S, KHONKAR H I, ALAMOUDI A O, et al. Current status and future perspectives for localizing the solar photovoltaic industry in the Kingdom of Saudi Arabia[J]. Energy Transitions, 2020,4(1):1-9.
- [3] MEHRJERDI H. Off-grid solar powered charging station for electric and hydrogen vehicles including fuel cell and hydrogen storage [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(23):11574-11583.
- [4] HASSAN A A, EL HABROUK M, DEGHEIDIE S. Renewable energy for robots and robots for renewable energy - a review[J]. Robotica,2020,38(9):1576-1604.
- [5] THOMAS J M, EDWARDS P P, DOBSON P J, et al. Decarbonising energy: the developing international activity in hydrogen technologies and fuel cells [J]. Journal of Energy

Chemistry,2020,51:405-415.

- [6] ZHANG Y H, HUANG G, YUAN Z M, et al. Electrochemical hydrogen storage behaviors of as-cast and spun RE-Mg-Ni-Co-Al-based AB₂-type alloys applied to Ni-MH battery[J]. Rare Metals,2020,39(2):181-192.
- [7] SARASWAT J, ALDAHMAH B, ALOMAR S Y, et al. Synergistic antimicrobial activity of N - methyl substituted pyrrolidinium-based ionic liquids and melittin against Gram-positive and Gram-negative bacteria[J]. Applied Microbiology and Biotechnology,2020,104(24):10465-10479.
- [8] ZHANG B S, XU W W, LU Z Y, et al. Recent progress on carbonaceous material engineering for electrochemical hydrogen peroxide generation[J]. Transactions of Tianjin University,2020, 26(3):188-196.
- [9] HERLINA, ZULFIKAR M A, BUCHARI. Electron transfer in electro-oxidation of amoxicillin using platinum electrode and platinum modified cobalt electrodes [J]. Key Engineering Materials,2021,874:155-164.
- [10] ZHANG CK, YU H M, LI Y K, et al. Supported noble metals on hydrogen-treated TiO₂ nanotube arrays as highly ordered electrodes for fuel cells[J]. ChemSusChem,2013,6(4):659-666.
- [11] TIAN Z Q, LIM S H, POH C K, et al. A highly order-structured membrane electrode assembly with vertically aligned carbon nanotubes for ultra-low Pt loading PEM fuel cells [J]. Advanced Energy Materials,2011,1(6):1205-1214.
- [12] RONCAGLIA F, ROMAGNOLI M, INCUDINI S, et al. Graphite-epoxy composites for fuel-cell bipolar plates: wet vs dry mixing and role of the design of experiment in the optimization of molding parameters [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2021,46(5):4407-4416.
- [13] HAXHIU A, CHAN R, KANERVA S, et al. A system level approach to estimate maximum load steps that can be applied on a fuel cell powered marine DC system [J]. Energy Reports, 2021,7:888-895.

收稿日期:2021-04-26