

400 kW 氢燃料电池供电保障发电车结构与功能设计

王存平¹, 李洪涛¹, 王兴越², 姜秀丽², 王 鑫²

(1. 国网北京市电力公司 电力科学研究院, 北京 100075; 2. 北京华商三优新能源科技有限公司, 北京 101106)

摘要:为减少保电工作中传统柴油发电车的污染,设计含多种发储系统的氢燃料电池发电车系统结构,利用飞轮储能作为市电和氢燃料电池的过渡电源,采用电动底盘车电池作为氢燃料电池的备用启动电源,提高整车的可靠性与环保性;提出多个氢燃料电池模块均流调整策略及发电车多源协同运行控制策略,实现了发电车的功率提升与不间断输出。研究成果支撑研制了国内外首台 400 kW 氢燃料电池发电车,测试与应用结果表明了设计方法的正确性。

关键词:氢燃料电池;不间断供电;发电车;结构及功能设计;协同运行控制

中图分类号:TM911.42 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)17-0260-06

随着经济社会发展,重要用户、重大活动对不间断供电的要求以及抢险救灾等特殊情况对应急发电的需求不断增加,车载电源在供电保障中发挥着重要作用。目前常见的不间断供电保障车为不间断电源(uninterrupted power supply, UPS)电源车^[1-2],应急发电车以柴油发电车为主。UPS 电源车响应速度快,能够在电网电压异常时为重要负荷提供不间断电源支撑^[3],但由于其不具有发电装置,UPS 电池容量有限,不能为用户提供长时间的应急供电。柴油发电车具有容量大、持续供电时间长的特点,但其响应速度慢、低温启动难度大^[4],无法实现不间断供电,同时空气污染严重、噪声大,不满足低碳环保的要求。实际保电中常将 UPS 不间断电源与柴油发电车搭配使用。

大力发展清洁能源是当今世界潮流,氢燃料电池技术受到广泛关注。日韩、欧洲的氢燃料电池技术相对成熟,已成功应用于小型电动汽车、公共交通等领域^[5]。我国近年来也在大力发展氢燃料电池技术,在电池效率提升^[6]、并网控制^[7]等技术研究方面取得一定突破,目前已实施多个示范项目^[8-11]。2019 年 6 月,我国首部《中国氢能源及燃料电池产业白皮书》发布^[12],要求加快实现氢能与燃料电池

技术创新,实现氢能及燃料电池技术在动力电源、移动电源、分布式电站等领域的示范与应用。

在移动应急电源应用方面,丰田和日本电友公司联合研发了 20 kW 的小功率氢燃料电池发电车。广东电网公司于 2018 年研制了国内首台 100 kW 氢燃料电池移动应急电源车,并在抗击台风应急供电中发挥了重要作用,这也是当时亚洲单体功率最大的氢燃料电池应急电源^[13]。目前尚没有基于多组电池模块并联的更大功率氢燃料电池供电保障发电车的研发及应用案例。

本文基于氢燃料电池及现有供电保障发电车的相关技术,设计多个氢燃料电池模块并联、多种发储系统共存的氢燃料电池发电车的系统结构,研究提出整车控制策略及工作模式,支撑研发了国内外首台 400 kW 大功率氢燃料电池发电车。

1 氢燃料电池原理及特点

氢燃料电池是一种将氢气(燃料)和氧气(空气)通过电化学反应直接转化为电能的发电装置^[14]。与普通电池不同,氢燃料电池兼具电池和发电机的特点,只要有燃料和空气不断输入,就能源源不断地产生电能。

常用的氢燃料电池按其电解质不同,可以分为

收稿日期:2023-04-10

基金项目:国网北京市电力公司科技项目(520223190031)。

作者简介:王存平(1986—),男,山西朔州人,国网北京市电力公司电力科学研究院,高级工程师,博士,研究方向为主动配电网运行与控制技术、重要用户高可靠供电保障技术;李洪涛(1975—),男,山东临沂人,国网北京市电力公司电力科学研究院,教授级高级工程师,硕士,研究方向为智能配电网技术及应用、新型电力系统建设;王兴越(1978—),男,内蒙古赤峰人,北京华商三优新能源科技有限公司,高级工程师,硕士,研究方向为配电设备智能化、智能运维、新型电力系统建设;姜秀丽(1981—),女,山东临沂人,北京华商三优新能源科技有限公司,高级工程师,研究方向为配电设备智能化、智能运维;王鑫(1994—),女,山西晋城人,北京华商三优新能源科技有限公司,工程师,研究方向为配电设备智能化、新型电力系统建设。

质子交换膜燃料电池 (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)、碱性燃料电池 (alkaline fuel cell, AFC) 和磷酸燃料电池 (phosphoric acid fuel cell, PAFC)。其中 PEMFC 效率高、能量密度高、启动速度快、环保性能好^[15], 在零排放交通动力和小型发电应用方面具有广阔前景。因此基于 PEMFC 的氢燃料电池发电车进行研究。

相比传统的柴油发电机组, 氢燃料电池具有体积小、效率高、无污染、噪声低、安全性好等优势。国产某品牌氢燃料电池与传统的柴油发电机组的体积对比见表 1。

表 1 氢燃料电池与柴油发电机组的体积对比

功率/kN	体积(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	
	柴油发电机组	氢燃料电池
100	2 280×855×1 300	1 355×860×900
200	3 000×1 060×1 900	1 355×860×1 800

2 氢燃料电池发电车系统设计

基于 UPS 发电车系统结构, 设计由多个氢燃料电池模块并联、多种发储系统共存的 400 kW 氢燃料电池供电保障发电车系统结构, 主要由氢燃料电池系统、DC/DC 变换器、UPS 系统、储能系统、储氢系统及监控系统等部分组成, 如图 1 所示。氢燃料电池系统与储能系统一起并联, 与 UPS 系统的直流母线相连接。

2.1 氢燃料电池系统

目前国内外氢燃料电池单体电堆功率普遍不超过 100 kW。本文采用模块化设计, 便于安装维护与散热, 由 4 组额定功率为 100 kW 的 PEMFC 氢燃料电池模块并联组成, 燃料电池输出直流电压范围为 240~360 V。每个电池模块均配置一个 DC/

DC 直流变换器。氢燃料电池系统结构如图 2 所示。

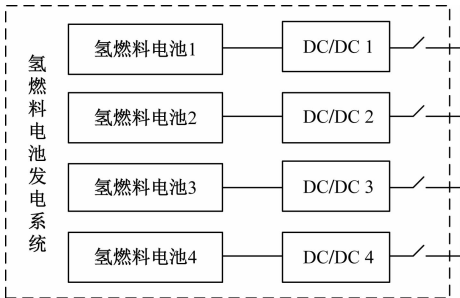


图 2 氢燃料电池系统结构示意图

2.2 DC/DC 直流变换器

将燃料电池产生的可变电电压变换至与 UPS 直流母线电压相匹配。其额定输出电压为 540 V, 且可根据负载情况灵活调整: 当负载需要的电流大于 DC/DC 变换器输出电流时, DC/DC 变换器输出电压会自动跌到与 UPS 电池(飞轮)相同, 让飞轮也输出一部分电流以满足负载的需要; 当 DC/DC 变换器输出电流满足负载要求时, DC/DC 变换器输出电压会恢复到额定值, 同时飞轮不对外输出电流。

2.3 储能系统

氢燃料电池启动需要 10~20 s, 在市电中断后、氢燃料电池启动之前, 通过连接于 UPS 直流母线的储能系统为负载供电。目前常用的储能装置有化学电池、超级电容和飞轮。3 种储能装置的主要性能对比见表 2。

氢燃料电池启动前需要储能系统供电时间不长, 但需要在短时间内提供较大功率。这正是飞轮的优势所在。因此选择飞轮作为市电与氢燃料电池的短暂过渡电源。飞轮充放电速度快, 可以快速

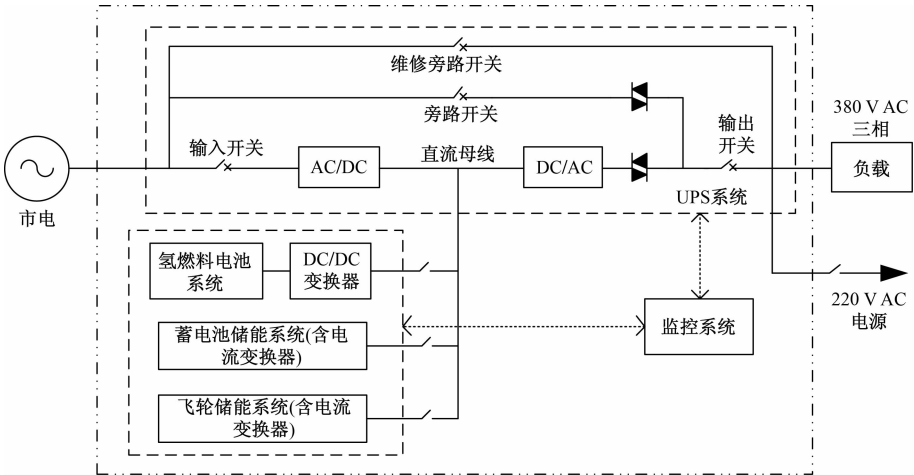


图 1 氢燃料电池发电车系统结构示意图

表 2 3 种储能装置的主要性能对比

性能参数	化学电池	超级电容	飞轮
效率/%	85	90	90
比能量/[$(\text{W}\cdot\text{h})\cdot\text{kg}^{-1}$]	10~200	5~30	5~100
比功率	低	高	高
循环寿命	中	长	长
放电时间	数小时	数秒	数十秒

响应市电电压及负荷波动,可减少冲击性负荷对氢燃料电池的影响,延长电池寿命。

另外,发电车选用纯电动底盘车,配有蓄电池储能系统。在“应急发电”时,利用蓄电池储能系统启动氢燃料电池,无须再单独配置启动电源,充分利用了发电车自身资源,节省了整车成本和空间。同时发电车可随时为底盘车电池充电,增加发电车行程灵活性,也实现了整车的清洁环保。

2.4 储氢系统

用于储存氢燃料电池所需要的氢气,由 14 个 35 MPa、140 L 的高压碳纤维气瓶、安装框架、管路等组成,安装于发电车的顶部。供氢系统设置单向电磁阀、压力传感器等。

2.5 监控系统

采用标准 Modbus 规约通信,用于实现对整车各部分的信号采集、三遥、保护、告警等功能。主要包括氢燃料电池发电系统启停机控制、飞轮启停控制、DC/DC 变压器及 UPS 系统的输出控制、各种工作模式的切换控制等。

氢燃料电池发电车系统主要参数见表 3。

3 氢燃料电池发电车功能设计

3.1 整车供电策略

氢燃料电池发电车具有氢燃料电池、飞轮、底盘车蓄电池 3 种发电及储能系统,利用多源互补特性^[16],设计了氢燃料电池发电车多源协同运行控制策略以及氢燃料电池模块均流调整控制策略^[17]。

3.1.1 多源协同运行控制策略

应用底盘车蓄电池为氢燃料电池系统提供应急启动电源,采用飞轮储能系统响应市电异常及快速的负荷波动,保障发电车的不间断输出与稳定运行。

当检测到市电中断或电压暂降时,控制系统立即启动氢燃料电池发电系统,同时控制飞轮储能系统为负载进行不间断供电,若飞轮储能系统能量不足(乘余电量 SoC<30%),则控制底盘车蓄电池为负载供电。

表 3 氢燃料电池发电车系统主要参数

系统组成	参数	参数值
氢燃料电池系统	额定功率/kW	4×100
	输出电压范围/V	240~360
	输出电流范围/A	0~550
	动态加/卸载响应速率/($\text{A}\cdot\text{s}^{-1}$)	≥80
	冷启动时间/s	≤20
DC/DC 直流变换器	热启动时间/s	≤10
	输出额定功率/kW	120×4
	输出额定电压/V	540
	输入电压范围/V	170~450
	输入最大电流/A	560
UPS 系统	效率	≥0.94
	额定输出功率/kW	400
	输入电压范围/V	340~460
	输入频率范围/Hz	46~65
	输出电压/V	3×380/400/415
飞轮储能系统	输出频率/Hz	50
	逆变器效率	≥0.96
	额定功率/kW	≥400
	最大能量存储/($\text{kW}\cdot\text{s}$)	≥6 000
	额定转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	≥30 000
	不间断供电功能/s	≥15(额定载荷) ≥30(50%额定载荷)
	输入电压/V	400~600

当氢燃料电池模块正常启动、输出电压达到 250 V 时,控制 DC/DC 变换器输出至额定电压 540 V,此时转由氢燃料电池发电系统为负载供电。控制流程如图 3 所示。

氢燃料电池与飞轮储能系统的协同运行控制原理如图 4 所示。

3.1.2 氢燃料电池模块均流调整控制策略

氢燃料电池发电系统由 4 个氢燃料电池模块并联构成,每个电池模块的功率是 100 W。控制系统根据实际负载大小,决定投入运行的电池模块数量。为保证各并联电池模块工作性能的稳定,进一步提出了多个氢燃料电池模块的均流调整控制策略。当实际投运的氢燃料电池模块在两个以上时,实时检测各电池模块配套 DC/DC 变换器的输出电流,并计算平均输出电流,据此控制各电池模块的输出电流,使各模块输出电流保持一致。控制策略流程如图 5 所示。

3.2 发电车的 4 种工作模式

基于上述供电策略,氢燃料电池发电车具有以下 4 种工作模式:

1)优化市电。市电正常时,市电经过发电车的 UPS 整流逆变系统,为负载提供优质电能。当市电受到干扰波形失真时,其通过氢燃料电池发电车的整流逆变系统转化成可靠、稳定、纯净的优质电供

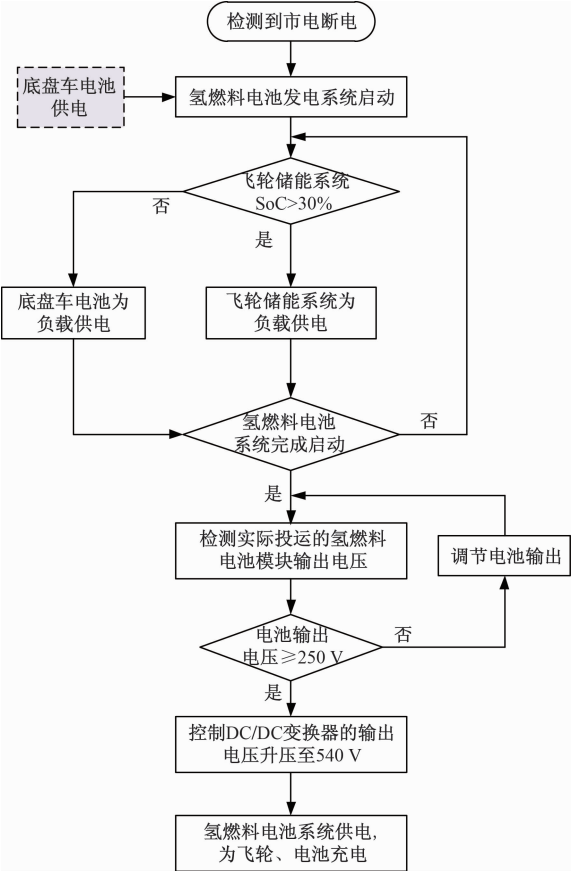


图 3 氢燃料电池发电车多源协同运行控制流程

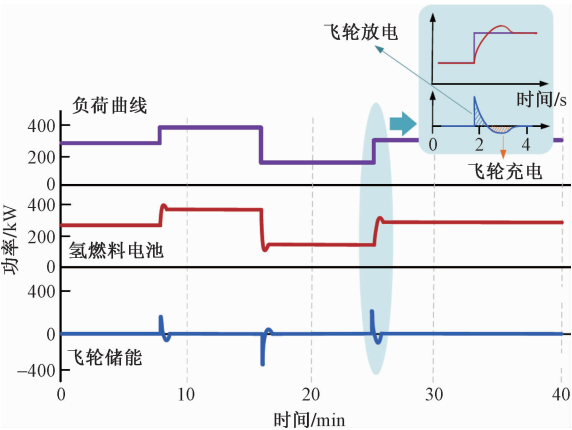


图 4 协同运行控制原理示意图

给负载,同时为储能系统充电。

2)不间断供电。市电中断或电压暂降时,储能系统放电,保证负载正常运行,同时启动氢燃料电池发电系统。氢燃料电池发电系统启动后,接替储能系统为负载供电,实现用户不间断用电,并为储能系统充电。

3)应急发电。无法依靠电网送电或作为冷备用的情况下,通过底盘车蓄电池启动氢燃料电池发

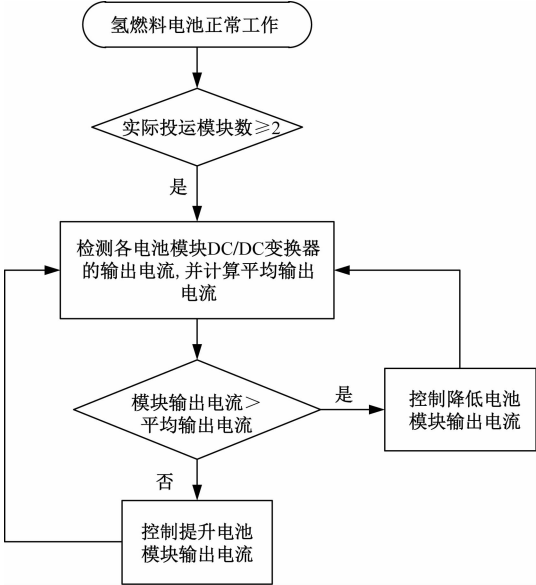


图 5 多个氢燃料电池模块均流调整控制策略流程

电系统。氢燃料电池发电系统启动后,为负载供电,同时为飞轮储能系统和底盘车电池充电。

4)不停电检修。当市电供电时,若发电车 UPS 系统(或逆变器)出现故障(如输出过压、过流),转换为旁路供电模式,由市电直接为负载供电,对发电车进行检修。

4 试验与应用

研制的氢燃料电池发电车实物照片如图 6 所示,其与其他发电车的技术指标对比见表 4。

4.1 试验验证

对氢燃料电池发电车的不间断供电功能进行测试。市电取自车间内 380 V 三相电源,负载接 60 kW 电暖气阻性负载。开始时,市电经氢燃料电池发电车的 UPS 系统为负载供电,UPS 逆变器跟踪市电的频率与相位,同时市电经 UPS 整流器为飞轮充电储能。



图 6 氢燃料电池发电车照片

表 4 发电车技术指标对比

技术指标	柴油机发电车	铅酸电池 UPS 发电车	研制的氢燃料电池发电车
发电功率	可达 MW 级	约 200 kW	400 kW
污染物	气体污染、难闻	生产与处理过程含重金属污染	无污染
噪声	强噪声, >80 dB	无	50~70 dB
工作环境温度	-10~50 ℃	-10~25 ℃	-35~50 ℃
核心温度	>800 ℃	约 50 ℃	约 80 ℃
振动	强振动	无	无
电压稳定性	不太稳定	非常稳定	非常稳定
效率	低	高	高
启动时间	分钟级	瞬时	<20 s
不间断供电	否	是	是
带载速率	—	—	>500 A/s
单次运行时间	6~8 h	约 2 h	约 4 h

在 41 s 左右时切断市电,207 s 左右时恢复市电,观察记录氢燃料电池发电车在市电中断情况下的输出性能,以验证其不间断供电功能。另外,在氢燃料电池发电过程中,在 192 s 左右时,人工控制断开氢燃料电池输出回路,观察记录飞轮的输出电流,以验证在氢燃料电池意外故障情况下飞轮的响应速度及运行性能。

采用功率分析仪分别记录市电电压 u_1 、输出电压(负载电压) u_2 、直流母线电压 u_3 的有效值曲线,如图 7(a)所示;记录市电电流 i_1 、输出电流(负载电流) i_2 、飞轮电流 i_{dc1} 、氢燃料电池电流 i_{dc2} 的有效值曲线,如图 7(b)所示。

由图 7 可见,在 41 s 市电断电时,飞轮瞬间释能放电,经逆变器转换成交流电供给负载,使得输出电压有效值 U_{rms2} 维持在 230 V(单相),电流有效值 I_{rms2} 维持在 90 A,同时启动氢燃料电池。经过约 15 s 的时间,氢燃料电池完全启动,飞轮停止放电,此时氢燃料电池输出电流,向负载供电,维持 U_{rms2} 和 I_{rms2} 保持不变,同时向飞轮充电储能。在 192 s 的时候,断开氢燃料电池输出回路,此时飞轮亦能够瞬间释能放电,维持负载电压电流 U_{rms2} 和 I_{rms2} 保持不变。在 207 s 市电恢复供电后,飞轮停止放电,此时由市电为负载供电并向飞轮充电储能,维持 U_{rms2} 和 I_{rms2} 保持不变。

试验结果显示,在市电断电及恢复供电时,氢燃料发电车均能够维持输出电压与电流稳定,实现对负载(重要用户)的不间断供电。飞轮储能系统响应迅速,在市电断电及氢燃料电池意外掉电情况下,均能够迅速输出电流,保证不间断供电并为氢燃料电池发电系统启动提供保障。

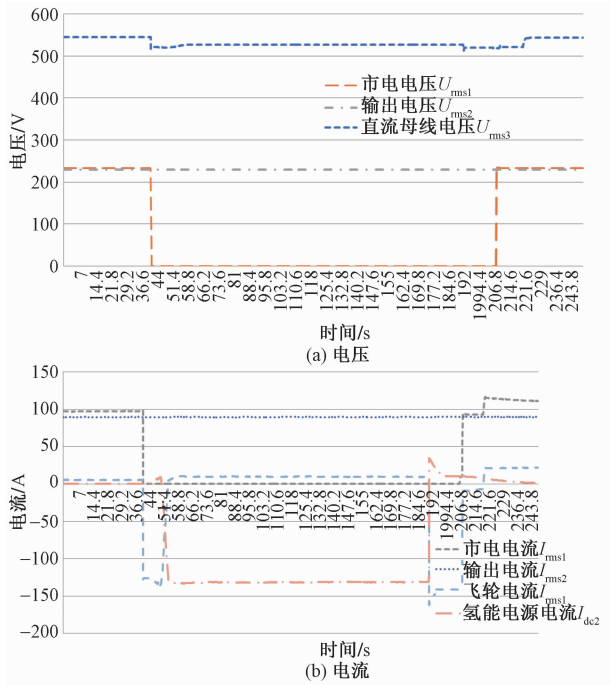


图 7 电压、电流试验曲线

4.2 现场应用

目前,该氢燃料电池发电车已成功应用于北京延庆冬奥赛区及国家速滑馆的应急供电保障中,实现了场馆负荷的绿色应急供电。

人民日报、北京日报等多家媒体对此进行报道。2021 年 9 月 30 日人民日报海外版报道^[18]: 9 月 29 日,国网北京市电力公司在国家速滑馆举行冬奥测试赛供电保障应急演练,由该公司自主研发的国内首台大容量在线并网式氢燃料电池发电车亮相。这种发电车具备不间断供电和应急发电功能,可在场馆临时供电设备出现故障时提供优质可靠的绿色电源。氢能源发电车可在-40~50 ℃的环境中运行,满载后可发电 2 h,同时支持在线加氢。

图 8 为氢燃料电池发电车在北京冬奥会期间,为国家速滑馆临电设施供电保障的照片。



图 8 氢燃料电池发电车现场应用照片

5 结语

将氢燃料电池应用于供电保障发电车中,提出

了氢燃料电池发电车的结构及功能设计方法。亮点及创新点如下:

1)氢燃料电池发电车主要由氢燃料电池系统、UPS 系统、飞轮储能系统、监控系统及纯电动底盘车等部分组成,实现了整车节能环保。

2)氢燃料电池系统由 4 个 100 kW 的电池模块并联组成,提出了多个电池模块的均流调整控制策略,并提出了发电车多源协同运行控制策略,实现了发电车的功率提升与不间断输出。

3)运用本文的方法支撑研制了国内外首套 400 kW 的大功率氢燃料电池发电车,测试及应用结果表明氢燃料电池发电车输出性能稳定。

氢燃料电池发电车可作为“柴油发电车+UPS 电池车”模式的替代产品,能够为重要负荷提供长时间的不间断供电,具有重大意义与社会价值,应用前景非常广阔。

参考文献

[1] 李博翌. 大容量应急不间断(UPS)电源车承载平台设计优化及仿真分析[D]. 兰州:兰州理工大学,2019.

[2] 伍衡,尹华杰,宁宇,等. UPS 电源车在重大活动保供中的应用[J]. 电工技术,2016,(3):8,22.

[3] 戴彦文,于艾清. 新型储能式 UPS 系统及其控制方法[J]. 电力电子技术,2020,56(1):64-68.

[4] 陶宇航,朱辉,何岩岩. 柴油应急发电车低温启动失效分析及改进方法[J]. 电气技术,2020,21(9):99-102,107.

[5] 付甜甜. 电动汽车用氢燃料电池发展综述[J]. 电源技术,2017,41(4):651-653.

[6] 赵金国,郭恒. 氢燃料电池氢气利用率提升策略研究[J]. 太阳能学报,2022,43(8):510-516.

[7] 徐靖,赵霞,罗映红. 氢燃料电池并入微电网的改进虚拟同步机控制[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(22):165-172.

[8] 仲蕊. 氢燃料大功率电池应用接入佳境[N]. 中国能源报,2023-03-06(17).

[9] HE X, WANG F, WALLINGTON T J, et al. Well-to-wheels emissions, costs, and feedstock potentials for light-duty hydrogen fuel cell vehicles in China in 2017 and 2030 [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 137:110477.

[10] 殷卓成,王贺,段文益,等. 氢燃料电池汽车关键技术研究现状与前景分析[J]. 现代化工,2022,42(10):18-23.

[11] 袁野. 新能源电池在北京冬奥会绿色体育运动中的影响[J]. 电池,2022,52(5):605-606.

[12] 操秀英.《中国氢能源及燃料电池产业白皮书》发布我国氢能发展路线图确定[N]. 科技日报,2019-06-27(1).

[13] 云浮供电. 国内首台大功率氢燃料电池移动应急电源抗击台风山竹[EB/OL]. (2018-09-18) [2022-06-01]. <https://news.bjx.com.cn/html/20180918/928835.shtml>.

[14] 黄国勇. 氢能与燃料电池[M]. 北京:中国石化出版社,2020:93-99.

[15] 张可健,曲大为,兰洪星,等. 基于 MATLAB /Simulink 的氢燃料电池系统建模与仿真[J]. 科学技术与工程,2021,21(13):5380-5386.

[16] 高佳,肖迎群. 风、光、燃、储多源互补微电网的日优化运行[J]. 科学技术与工程,2019,19(15):136-142.

[17] 王存平,李洪涛,王兴越,等. 发电车电池系统的控制方法及发电车电池系统:202110502523. 6[P]. 2022-09-02.

[18] 贺勇. 绿色氢能助力冬奥[N]. 人民日报海外版,2021-09-30(2).

Structure and Function Design of 400 kW Hydrogen Fuel Cell Power Supply Guarantee Generator Vehicle

WANG Cunping¹, LI Hongtao¹, WANG Xingyue², JIANG Xiuli², WANG Xin²

(1. State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China;
2. Beijing Huashang Sanyou New Energy Technology Co., Ltd, Beijing 101106, China)

Abstract: In order to reduce the pollution caused by the use of traditional diesel generator vehicles, a hydrogen fuel cell generator vehicle system structure with multiple power generation and storage systems was designed. The flywheel energy storage system was used as the transitional power supply of the mains electricity and hydrogen fuel cell system, and the electric chassis battery was used as the backup starting power supply of hydrogen fuel cell system, improving the reliability and environmental protection of the vehicle. The control strategies of current sharing adjustment of multiple hydrogen fuel cell modules and multi-source coordinated operation of hydrogen fuel cell generator vehicle were proposed, achieving power improvement and uninterrupted output of the generator vehicle. Based on the study results, the first 400 kW hydrogen fuel cell generator vehicle at home and abroad was developed. The test and apply results show that the design methods proposed are correct.

Keywords: hydrogen fuel cell;uninterrupted power supply;power generation vehicle;structure and function design;coordinated operation control