

基于DC/DC串联结构的氢动力系统 控制策略及运行特性研究

韩国鹏¹, 杨雨泽², 赵丽丽¹, 冯轩¹

(1. 中车唐山机车车辆有限公司, 河北 唐山 064000;

2. 大连交通大学 自动化与电气工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘要: 直流式轨道车辆采用氢燃料电池动力系统供电时, 可通过2级DC/DC系统升压满足其高母线电压要求。为了探索此类系统动态运行特性, 文章研究以100 kW级燃料电池串联2级DC/DC系统, 再采用动力电池直挂母线的方式搭建轨道车辆用氢动力供电系统, 提出了系统控制策略并搭建测试平台, 基于有轨电车线路开展了系统的动态运行试验。试验结果表明, 设置动力电池初始荷电状态在其允许工作范围40%~60%时, 完成全线路运行后均逼近于目标值45%; 在牵引和制动阶段, 最大母线电压波动范围在-4.5%~3.4%。混合动力系统在燃料电池功率变化平缓的前提下能快速响应车辆在不同运行模式下的功率需求, 能量控制策略能根据系统内不同故障类型执行预定故障处理动作, 2级DC/DC系统之间存在较大的低频电流纹波, 但电压纹波小于1.86%, 混合动力系统运行状态平稳。

关键词: 2级DC/DC; 氢燃料电池; 混合动力; 动态运行

中图分类号: U482.1; U267.9

文献标识码: A

Research on control strategy and operational characteristics of hydrogen power system based on DC/DC series structure

HAN Guopeng¹, YANG Yuze², ZHAO Lili¹, FENG Xuan¹

(1. CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan, Hebei 064000, China; 2. School of Automation and Electrical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian, Liaoning 116028, China)

Abstract: To meet the power requirements of DC-powered rail vehicles equipped with hydrogen fuel cell power systems operating at high busbar voltage conditions, the application of two-stage DC/DC converters in series can be adopted for voltage boosting. In order to explore the dynamic operational characteristics in this application, a system control strategy by building a hydrogen-powered system for rail vehicles was proposed, which was composed of 100 kW fuel cells in series with two-stage DC/DC converters, with the power cells directly connected to the busbar. Revealed in the dynamic operational test carried out with the circuit system of trams on a test bench specially established. The results show that the state of charge (SOC) of the power battery consistently approaches 45% when the initial value is preset within 40%~60% of its allowable working range, and the maximum busbar voltage fluctuations during traction and braking range between -4.5% and 3.4%. Moreover, the hybrid power system demonstrates a quick response to the varying power demands in different vehicle operating modes while the power of fuel cells varies gently. Additionally, the energy control strategy allows for preset system troubleshooting actions in response to different fault types. Despite the presence of large low-frequency current ripples between the two-stage DC/DC converters, the voltage ripple observed during testing is less than 1.86%. As a result, the hybrid power system operates smoothly throughout the whole test.

Keywords: two-stage DC/DC converters; hydrogen fuel cell; hybrid power; dynamic operation

通信作者: 韩国鹏 (1988—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事轨道车辆氢混合动力系统方面的研究; E-mail: hanguopeng22@126.com

引用格式: 韩国鹏, 杨雨泽, 赵丽丽, 等. 基于DC/DC串联结构的氢动力系统控制策略及运行特性研究[J]. 机车电传动, 2023(3): 40-49.

Citation: HAN Guopeng, YANG Yuze, ZHAO Lili, et al. Research on control strategy and operational characteristics of hydrogen power system based on DC/DC series structure[J]. Electric Drive for Locomotives, 2023(3): 40-49.

0 引言

“碳中和”的本质是将化石燃料使用、土地利用等产生的碳排放量, 与生态系统固碳量相平衡^[1-2]。为了实现碳减排, 采用风能、太阳能、氢能等清洁能源替代传统能源受到越来越多的关注^[3-5]。从统计结果看, 交通领域的碳排放约占全球能源相关碳排放量的25%^[6]。轨道车辆具有运量大、线路固定、可靠性高的特点, 被广泛应用于城市间和城市内的公共交通系统, 如高铁、地铁、轻轨等^[7], 实现清洁能源在轨道车辆应用是降低碳排放的重要途径。

从能源的特点看, 风能、太阳能具有季节性和间歇性, 其作为轨道车辆动力供电的可能性低; 氢能的能量密度大、供应稳定, 相比于传统的含碳能源具有清洁无污染的特点, 适合应用于移动设备。目前, 国内外关于氢能在轨道车辆应用开展了较多的研究, 从2000年开始, 东日本旅客铁道株式会社开始开发新能源列车, 并与日本铁路综合技术研究所共同开发了世界上第一款混合燃料电池/储能电池混合动力列车 EMU-KuMoYa E995-1^[8]; 2002年, 美国能源部、汽车项目有限责任公司和燃料电池推进协会联合研制了第一台质子交换膜燃料采矿机车原型车^[9]; 阿尔斯通公司和西门子公司生产的氢动力市域动车组 Coradia iLint 和 Mireo Plus H 自2018年开始在欧洲实现商业运营^[10]; 国内的中车唐山机车车辆有限公司和中车青岛四方机车车辆股份有限公司于2016年开发了氢燃料100%低地板有轨电车, 并开展了示范运营^[11-13]。

由于轨道车辆供电电压高, 特别是在高速或大功率的市域列车、调车机车上应用时, 燃料电池经常需要2级DC/DC系统升压才能满足DC 1 500 V母线电压要求, 因此有必要根据混合动力系统的供电拓扑确定燃料电池支路的能量输出形式, 并对系统的动态运行特性进行分析。文献[14]以一台氢混合动力铁路车辆概念设计样机为例, 分析其能源消耗和二氧化碳排放; 为了节约能源、减轻环境负担, OGAWA K等人从2001年开始研制燃料电池驱动的铁路车辆^[15]; 文献[16]分析了在通勤式铁路线路上引入氢动力燃料电池可能减少的二氧化碳排放量, 并通过选取英国的典型线路, 采用仿真方法比较了柴油多机组 (Diesel Multi Unit, DMU) 和氢动力列车的性能; 文献[17]对不同轨道上的不同动力系统进行了数值测试, 并计算了4个驱动循环的氢消耗和氢燃料电池动力系统 (Fuel Cell Power System, FCPS) 效率; 文献[18]针对燃料电池混合动力列车设计了一种基于自适应最优控制的能量管理策略, 根据离线 PMP 试验结果, 利用特定消耗曲线的凸性来提高燃油经济性; 文献[19]建立了列车牵引模型, 计算了 FCPS/电池/超级电容 (Super Capacitor, SC) 混合

100%低地板有轨电车的功率输出和能耗特性, 以降低耗氢为目的, 采用遗传算法对原能源管理策略进行优化。随着环境压力的增加和基础设施的完善, 氢燃料在轨道车辆上的应用将进一步扩大。目前, 对串联2级DC/DC系统的燃料电池混合动力系统的能量控制策略及其动态运行特性的试验研究相对较少。本文基于轨道车辆用100 kW级燃料电池发电系统, 将其与2级DC/DC串联后再与动力电池组并联, 组成轨道车辆供电系统, 编制了系统控制程序, 并搭建测试平台, 基于秦皇岛有轨电车4号线的线路功率曲线对系统的动态运行特性进行试验研究, 包括车辆在不同运行工况下各能量源的功率响应分析、不同初始荷电状态 (State of Charge, SOC) 下系统供电特性分析, 以及不同故障工况下的系统响应特性分析等, 研究结果为燃料电池系统在高母线电压要求的供电场景应用提供参考。

1 混合动力系统供电拓扑及其控制策略

1.1 混合动力系统供电拓扑

本研究采用包含2级DC/DC系统的氢燃料电池混合动力系统, 其供电拓扑如图1所示。供电系统中的燃料电池通过2级DC/DC系统接入直流母线, 2套动力电池以并联的方式接入直流母线, 能量控制器对各能量源的功率输出进行控制以满足车辆功率需求。其中, 燃料电池内部由6套9SSL电堆模块串联组成, 电堆输出电压范围为DC 450~580 V, 系统净输出功率为100 kW; 一级DC/DC系统的输入电压范围为DC 50~600 V, 输出电压范围为DC 150~750 V; 二级DC/DC系统的输入电压范围为DC 50~600 V, 输出电压范围为DC 150~750 V; 动力电池采用2套钛酸锂电池, 其总容量为100 A·h, 总电量76.14 kW·h, 额定电压DC 761.4 V; 能量控制器为PLC, 支持CAN2.0和CANopen这2种通信方式。

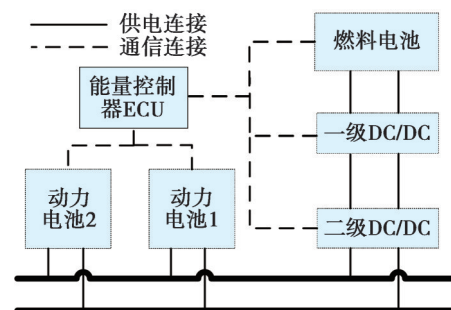


图1 含两级DC/DC的氢燃料电池混合动力系统供电拓扑
Fig. 1 Power supply topology of hydrogen fuel cell hybrid power system with two-stage DC/DC converters

1.2 控制策略

基于图1拓扑开发的控制策略如图2所示。系统上电后先进行状态判断, 根据各部件的故障情况将系统状态划分为混合供电状态 (状态0)、单动力电池供电

状态(状态1)、单燃料电池供电状态(状态2)和故障状态(状态3);在收到启动指令后,将根据系统当前的状态进入不同的供电模式;在启动过程中和系统运行期间,系统均可接收停机指令进行停机,或侦测到故障后通过状态切换程序进行故障停机;在运行过程中,若部件状态发生变化导致系统状态与启动前状态不一致,则通过状态控制程序有条件地进行状态切换,最大限度提高系统供电可靠性,并降低故障危害。本研究中将部件的故障等级划分为0级、1级和2级。其中,0级——无故障;1级——报警,需要用户关注其工作参数,但不影响运行;2级——严重故障,部件需停机保护。

下面对控制程序的各工装状态和主要控制功能进行介绍。

1) 混合供电状态

当系统处于混合供电状态时,系统部件均为正常状态,此时一级DC/DC系统设置为输出电压控制模式,

输出电压设置为DC 680 V;二级DC/DC设置为输入电流控制模式,电流设定值根据能量分配策略中的燃料电池目标功率和母线电压值确定;动力电池直挂母线,其输出功率为车辆需求功率和燃料电池输出功率的差值,不进行主动控制。本文采用的能量分配策略如图3所示。

能量分配策略以动力电池的SOC值为控制目标;SOC_max与SOC_min为厂家规定的动力电池SOC最大允许值和最小允许值,分别为60%和40%,与母线电压允许的波动范围相匹配;Pload为车辆负载功率,Pbat_max与Pbat_min分别为动力电池最大输出功率和最小输出功率,Pfc_max与Pfc_min分别为燃料电池最大输出功率和最小输出功率,Pfc_eff为燃料电池最高功率点功率。为了防止使用过程中SOC值波动超过厂家推荐值,控制程序中将SOC_max与SOC_min分别设置为55%和45%,具体策略如下:

①SOC>SOC_max。

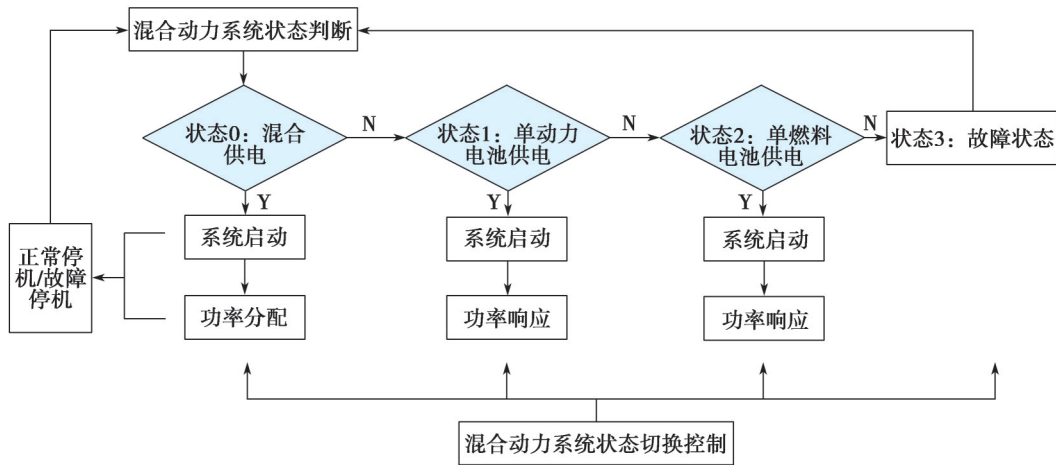


图2 能量控制策略

Fig. 2 Energy control strategy

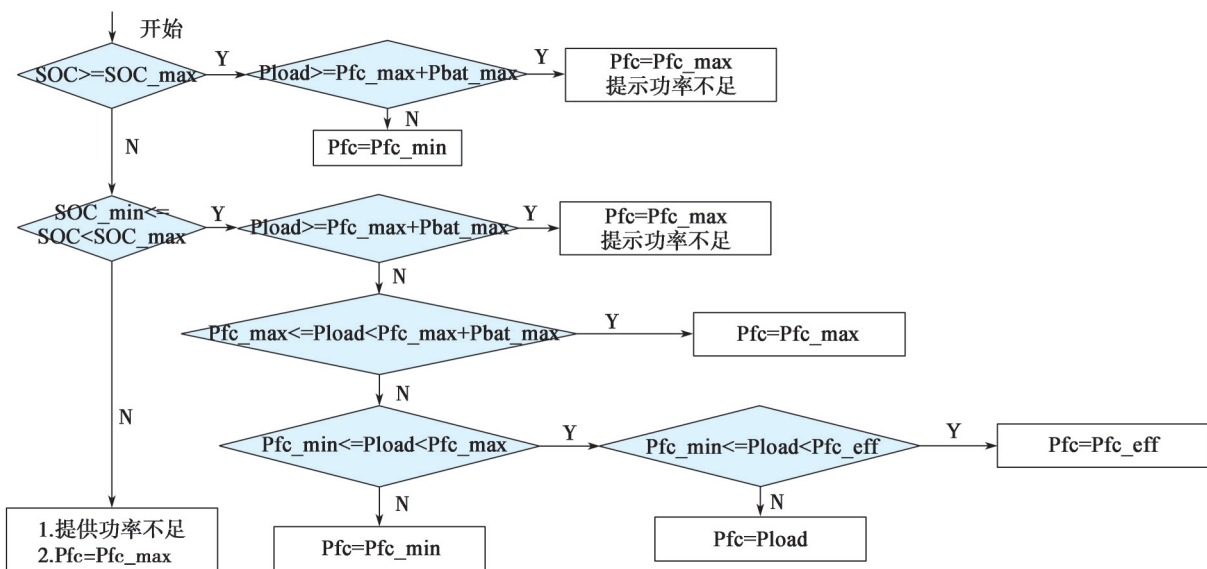


图3 能量分配策略

Fig. 3 Energy distribution strategy

若 $P_{load} > P_{bat_max} + P_{fc_max}$, 则燃料电池以 P_{fc_max} 输出, 同时提示系统功率不足; 当 $P_{fc_eff} < P_{load} < P_{fc_max} + P_{bat_max}$ 时, 燃料电池以 P_{fc_eff} 输出, 其他功率需求由动力电池满足, 以尽快降低动力电池 SOC 值; 当 $P_{load} < P_{fc_eff}$ 时, 燃料电池以 P_{fc_min} 输出, 其他功率需求由动力电池满足。

② $SOC_{min} < SOC < SOC_{max}$ 。

若 $P_{load} > P_{fc_max} + P_{bat_max}$, 则燃料电池以 P_{fc_max} 输出, 同时提示系统功率不足; 若 $P_{load} \in [P_{fc_max}, P_{fc_max} + P_{bat_max}]$, 燃料电池以 P_{fc_max} 输出; 若 $P_{load} \in [P_{fc_min}, P_{fc_max}]$, 燃料电池以 P_{load} 输出。

③ $SOC < SOC_{min}$ 。

在此种情况下, 动力电池已超出正常工作下限, 此时无论 P_{load} 如何, 燃料电池均以系统 P_{fc_max} 输出, 同时提示功率不足。

2) 单电源供电状态

单电源供电分为单动力电池供电和单燃料电池供电。在单动力电池供电状态下, 车辆储能系统满足负载功率 P_{load} 的需求, 此时会发出故障告警, 适用于车辆故障后依靠储能装置维持车辆走行的情况; 在单燃料电池供电模式下, 燃料电池的二级 DC/DC 系统设置为输出电压控制模式, 此时禁止车辆牵引投入, 燃料电池只满足车辆辅助负载功率需求, 适用于故障情况下车辆应急供电的情况。

3) 停机控制

在系统启动过程中和运行期间, 能量控制器可接收用户发送的停机指令, 进入停机状态; 或者能量控制器检测到系统出现故障, 执行故障停机程序。停机完成后系统将再次进行状态检测和判定, 等待用户发送启动指令。

4) 状态切换控制

在系统运行过程中, 若部件状态发生变化导致系统状态与启动前状态不一致, 则通过状态控制程序有条件地进行状态切换, 其控制逻辑如表1所示。

表1 状态切换程序控制逻辑

Table 1 Control logic of the state switching program

状态	状态0	状态1	状态2	状态3
状态0		直接切换	停机切换	停机
状态1	直接切换		停机切换	停机
状态2	停机切换	停机切换		停机
状态3	启动信号	启动信号	启动信号	

由表2可知, 系统状态为“状态0”时, 燃料电池发生故障后可直接切换至“状态1”; 若动力电池发生故障, 因DC/DC模式切换无法在工作状态下进行, 只能通过停机完成。系统状态为“状态2”时, 若燃料电池恢复正常, 可直接切换至“状态0”。系统状态为

“状态3”时, 若燃料电池和(或)动力电池恢复正常, 只能通过停机完成; 若系统任一能量源恢复正常, 则可通过发送启动信号启动系统。

2 试验装置和试验内容

2.1 试验装置

本研究采用的测试设备及其功能如表2所示, 试验前将被测系统与测试设备连接, 其连接方式如图4所示。

表2 测试设备

Table 2 Test device

设备名称	数量	功能
充放电设备	2	电子负载、程控电源
数据采集仪	1	采集数据、显示和记录
操作控制平台	1	模拟车辆控制器向ECU发送功率需求指令, 同时向充放电设备发送拉载指令
直流电源	2	提供DC 24 V控制供电

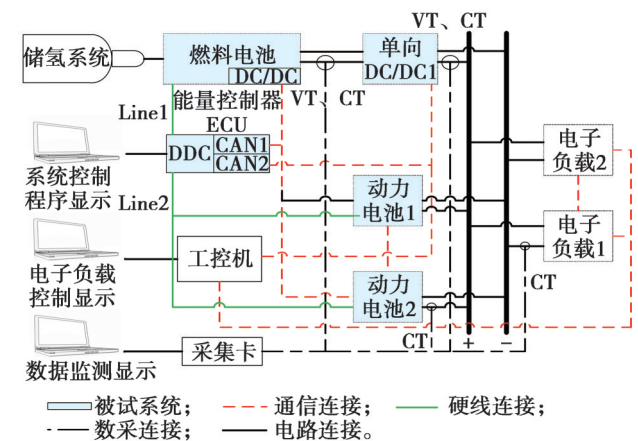


图4 试验装置连接

Fig. 4 Connection of the test bench

由图4可知, 本研究采用2套充放电设备, 每套电子负载的最大充放电功率为200 kW, 可吸收混合动力系统发出的电能, 将其反馈至电网, 或通过电网向直流母线放电, 模拟车辆的牵引/制动工况; 在二级DC/DC的输入/输出端、动力电池输出端和电子负载输入端布置了电流传感器, 在二级DC/DC的输入端和直流母线上布置了电压传感器, 用来检测试验过程中电流和电压参数, 数据采集通过数据采集仪实现; 采用工业控制计算机作为操作控制平台, 其功能有2个, 一是模拟车辆控制器向能量控制器 ECU 发送指令, 控制混合动力系统功率输出, 二是与电子负载通信, 根据工况要求发送充电/放电指令。

2.2 试验内容

为了对含2级DC/DC系统的氢燃料电池混合动力

系统动态运行特性进行分析, 本文选择秦皇岛有轨电车4号线功率需求曲线, 开展了表3所示试验。

表3 试验设置

Table 3 Test setup

试验项目	试验目标
线路动态运行特性	测试混合动力系统动态运行特性, 分析各能量源的功率响应情况
不同初始SOC下系统动态运行特性	测试动力电池允许SOC工作范围内不同初始值时系统动态运行稳定性
设备突发故障时的动态响应特性	测试不同故障工况下系统故障处理策略是否正确执行, 故障发生时系统是否安全

2.3 试验方法

按照图4连接试验系统并检查无误后, 开始进行试验测试, 测试按以下步骤进行:

①被试设备和陪试设备上电, 并打开各测试设备操作软件。

②在操作控制平台中导入线路功率曲线, 并设定目标功率值发送间隔值为1 s, 暂不开启发送; 将电子负载设置为功率曲线运行模式(接收功率外部发送功率指令, 并按指令要求的数值进行拉载)。

③开启数据记录软件并进行设置, 观察并记录电压和电流数据。

④启动混合动力系统, 当系统进入运行状态后, 开启工控机的功率发送指令, 此时工控机将向电子负载发送指令控制其拉载, 同时将功率需求发送给能量控制器ECU, ECU执行能量分配策略, 控制混合动力系统输出。

⑤功率曲线运行结束后, 发送混合动力系统停机指令, 系统停机结束后, 完成该工况测试。

在各工况测试前, 先检查动力电池SOC值, 若数

值与所测工况要求不一致, 则先通过电子负载对电池进行充/放电操作, 直至在其SOC值满足要求后再开始试验测试。

3 试验结果和分析

3.1 线路动态运行特性试验

由于本试验系统为半套有轨电车载供电系统, 试验在动力电池初始SOC值为45%的条件下进行, 试验时将功率需求值降为原车的50%。车辆沿线路运行的功率需求曲线和实测功率值对比如图5所示。

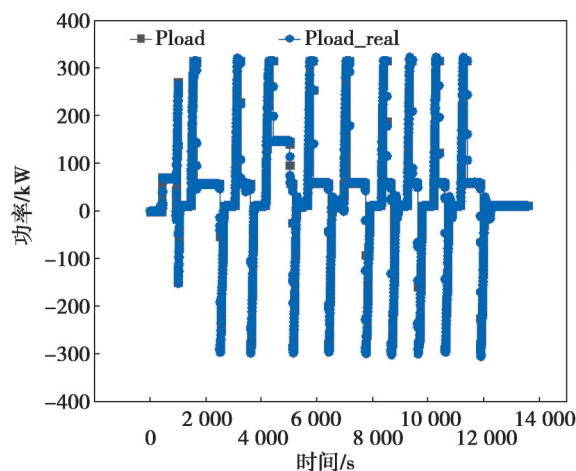


图5 车辆功率需求值和实测值对比

Fig. 5 Comparison between vehicle power demand and measured power

由图5可知, 车辆沿线路的总运行时间为14 000 s, 系统的实测功率输出Pload_real能快速响应车辆功率需求值Pload, 测试期间系统运行稳定, 未出现突然停机情况。为了更清晰地观察系统及其各能量源的功率响应情况, 截取了一段含牵引/制动过程的运行特性曲线, 结果如图6所示。

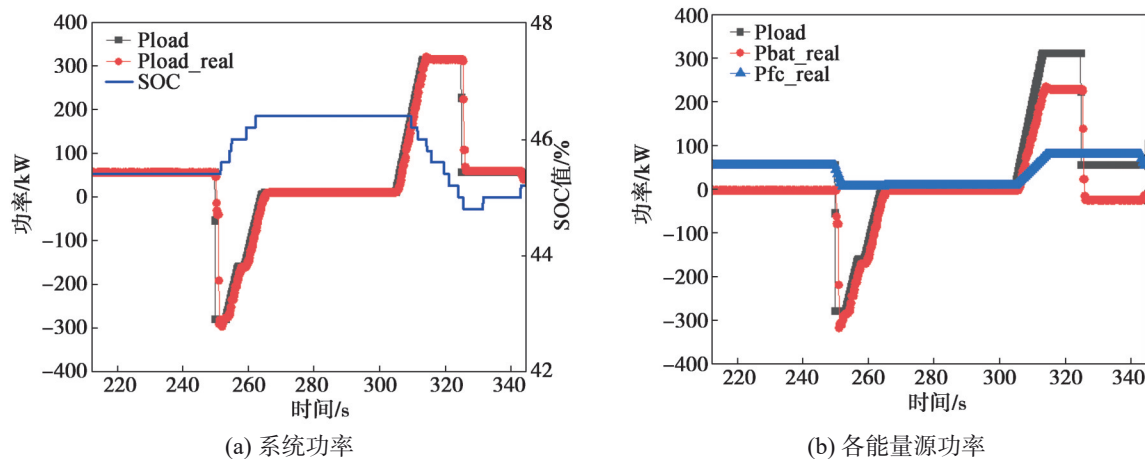


图6 系统和各能量源的功率相应情况

Fig. 6 Power responses of systems and each energy sources

由图6可知,在截取的时间段内,其中的210~250 s为惰行阶段,动力电池SOC值范围在(44.8, 46.4),根据前文介绍的能量分配策略,负载功率需求在 $[P_{fc_min}, P_{fc_max}]$ 时,由燃料电池满足系统功率需求,此时动力电池输出为0;250~265 s为制动阶段,燃料电池以最小功率输出,动力电池的充电功率为车辆制动功率和燃料电池输出功率之和,在此期间SOC值略有上升;300~325 s为牵引阶段,燃料电池按照设定的功率变化率增加功率输出,直至输出最大值85 kW,功率缺口由动力电池补充。

图7展示了从数据采集卡中获得的一级DC/DC系统和二级DC/DC系统之间的电压和电流数据。由图7可知,在系统运行过程中2级DC/DC系统之间的电压相对稳定,电压最大纹波为1.86%;电流纹波较大,最大频率不超过10 Hz。因此,2级DC/DC系统串联使用时,需对一级DC/DC系统的输出电容、输出电流范围与二级DC/DC系统的输入电容、输入电流范围进行匹配,以避免低频纹波电流造成设备损坏。

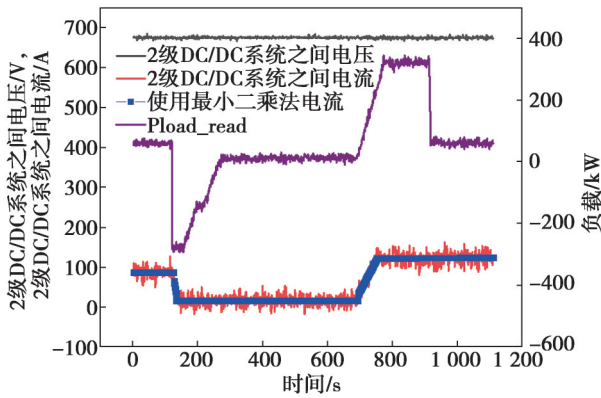
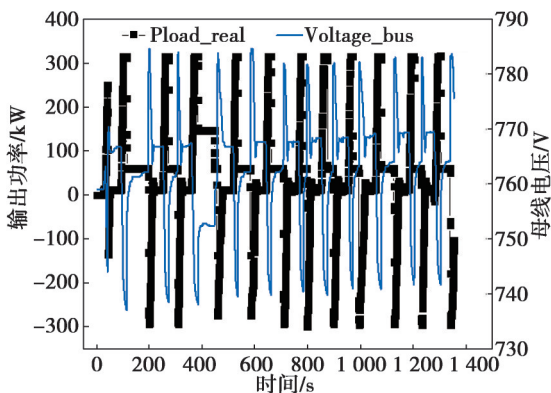


图7 数据采集卡实测数值

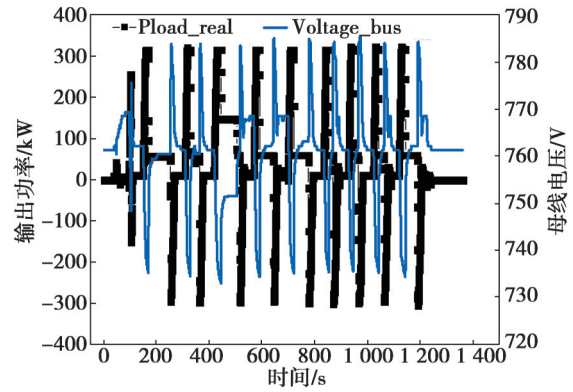
Fig. 7 Data acquisition card measured value

3.2 不同初始SOC下系统动态运行特性试验

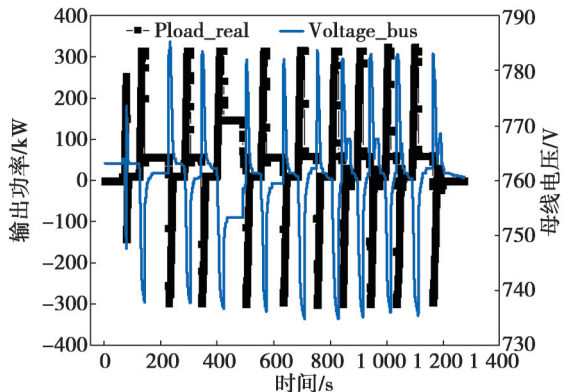
试验分别在动力电池初始SOC值为40%、45%、50%、55%、60%下进行,其中40%与60%分别为动力电池SOC值的下限值和上限值。不同初始SOC值下系统对外输出功率及其母线电压的变化情况如图8所示。



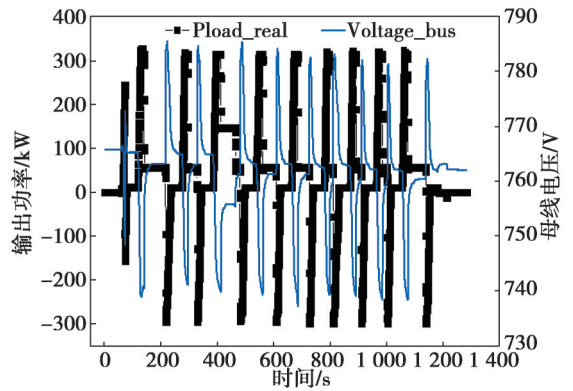
(a) 输出功率及其母线电压(初始SOC值为40%)



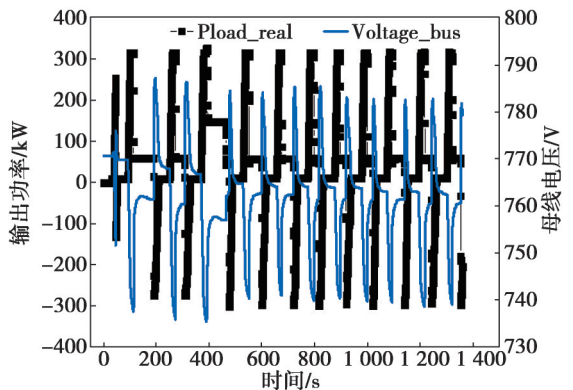
(b) 输出功率及其母线电压(初始SOC值为45%)



(c) 输出功率及其母线电压(初始SOC值为50%)



(d) 输出功率及其母线电压(初始SOC值为55%)



(e) 输出功率及其母线电压(初始SOC值为60%)

图8 实测功率与母线电压波动情况

Fig. 8 Fluctuations of measured power and busbar voltage

由图8可知,在车辆牵引和制动的初始阶段,由于负载功率变化较快,母线电压会短时偏离平均值:在

牵引初始阶段母线电压突降，而在制动初始阶段母线电压突增，所有工况下母线电压最大波动范围在733~787 V，波动率在-4.5%~3.4%（以初始SOC值对应的电压值计算），远小于牵引系统要求的波动区间（600~1200 V），动力电池直挂母线的削峰填谷作用明显，有助于提高系统的供电稳定性。

不同初始SOC值下系统SOC值变化情况如图9所示。

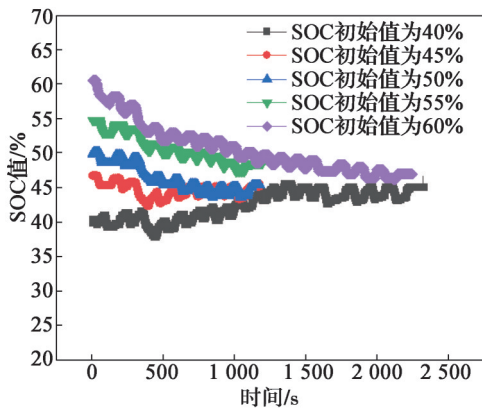


图9 SOC值变化情况

Fig. 9 Variations of SOC values

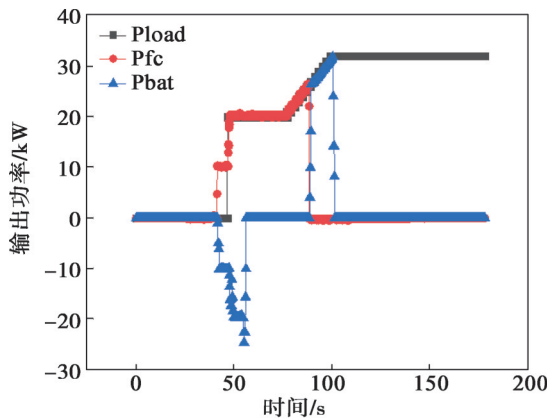
试验时将动力电池SOC的2个极限值（40%和60%）

测试时间进一步拉长，可以看到，在不同的初始SOC值下，随着运行时间拉长，动力电池SOC值均收敛于45%附近，距45%越远的值达到收敛值的时间越长。根据前文介绍，本控制策略中动力电池的SOC值下降到45%以下时，混合动力系统将在满足车辆需求功率的基础上优先给动力电池充电；SOC值在55%以上时会优先消耗动力电池，而在45%~55%时，则两者共同出力。本试验中系统的最大需求功率在300 kW以上，功率占比中动力电池所占比例较大，动力电池的SOC值将收敛至45%附近，控制目标和试验结果保持一致。

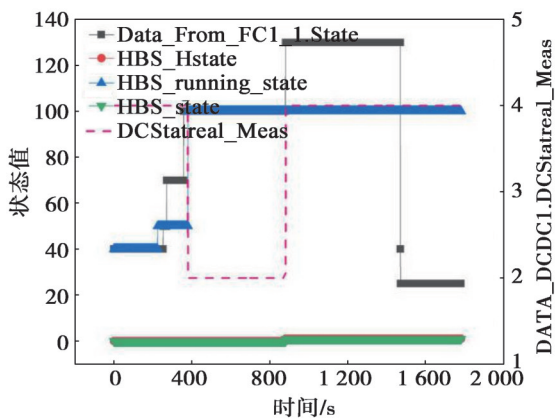
3.3 设备突发故障时的动态响应特性试验

3.3.1 燃料电池故障

本试验模拟运行过程中燃料电池突然出现二级故障后系统的响应情况。根据能量控制策略，设备出现二级及以上故障时将进行停机保护。测试前修改控制程序，在能量控制软件中设置1个屏蔽变量，该变量置位后将屏蔽能量控制器向燃料电池发送的生命信号，导致燃料电池报出通信故障，该故障等级为2级。测试时先让混合动力系统按车辆功率曲线运行，然后分别在小功率牵引工况和制动过程中手动置位屏蔽变量，试验结果如图10和图11所示。



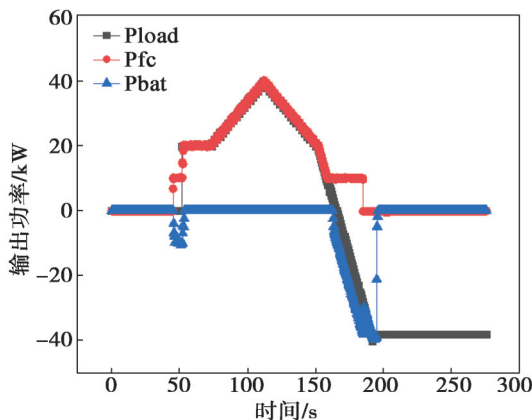
(a) 输出功率



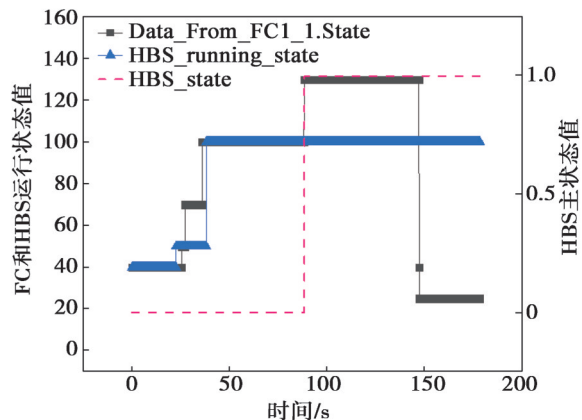
(b) 状态变量

图10 牵引过程中燃料电池故障

Fig. 10 Fuel cell fault during traction



(a) 输出功率



(b) 状态变量

图11 制动过程中燃料电池故障

Fig. 11 Fuel cell fault during braking

从图 10(a)和图 11(a)可以看出, 在牵引工况下, 燃料电池突然切除母线后, 动力电池迅速补充本该由燃料电池输出的功率, 从而使整个混合动力系统对外输出功率仍能迅速响应负载功率需求; 在制动工况, 燃料电池突然切除母线后, 动力电池的充电功率由原来的制动功率和燃料电池最小功率突然降为制动功率, 系统切换过程平稳。从图 10(b)和图 11(b)可以看出, 发生此类故障时, 表征燃料电池状态的变量“Data_From_FC1_1”从运行状态值“100”变为故障状态值“130”; 系统主状态“HBS_state”值从“0”变为“1”, 进入单动力电池供电模式; 表征混合动力系统状态的变量“HBS_running_state”始终保持运行状态值“100”。

3.3.2 DC/DC故障

本试验模拟运行过程中燃料电池二级DC/DC系统突然出现二级故障后系统的响应情况。测试前修改控制程序, 在能量控制软件中设置1个屏蔽变量, 该变量置位后将屏蔽能量控制器向二级DC/DC系统发送的生命信号, 导致二级DC/DC系统报出通信故障, 该故障

等级为2级。测试时先让混合动力系统按车辆功率曲线运行, 然后分别在小功率牵引工况和制动过程中手动置位屏蔽变量, 试验结果如图 12和图 13所示。

由图 12和图 13可以看出, 在牵引工况, 2级DC/DC系统突然故障后, 燃料电池随之切除在母线上的输出功率, 动力电池迅速补充本该由燃料电池输出的功率, 从而使整个混合动力系统对外输出功率仍能迅速响应负载功率需求; 在制动工况, 燃料电池支路突然切除在母线上的输出功率后, 动力电池的充电功率由原来的制动功率和燃料电池最小功率突然降为制动功率。发生此故障时系统状态量的变化和混合动力系统的表现, 与燃料电池出现二级故障类似, 系统均由混合供电状态进入单动力电池供电状态, 切换过程比较平稳。

3.3.3 动力电池故障

本试验模拟运行过程中动力电池突然出现二级故障后系统的响应情况。测试前修改控制程序, 在能量控制软件中设置1个屏蔽变量, 该变量置位后将屏蔽能量控制器向动力电池发送的生命信号, 导致动力电池

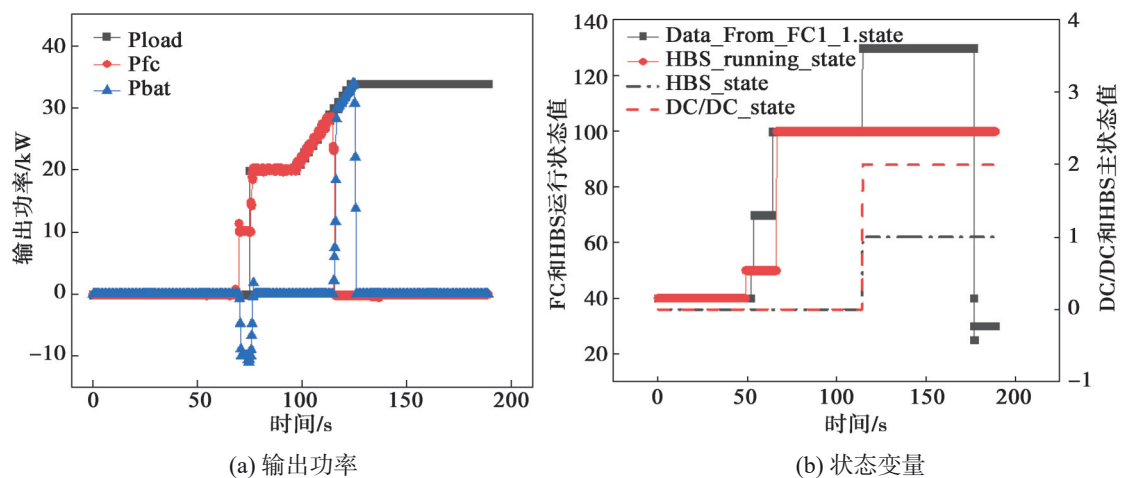


图 12 牵引过程中DC/DC故障

Fig. 12 DC/DC fault during traction

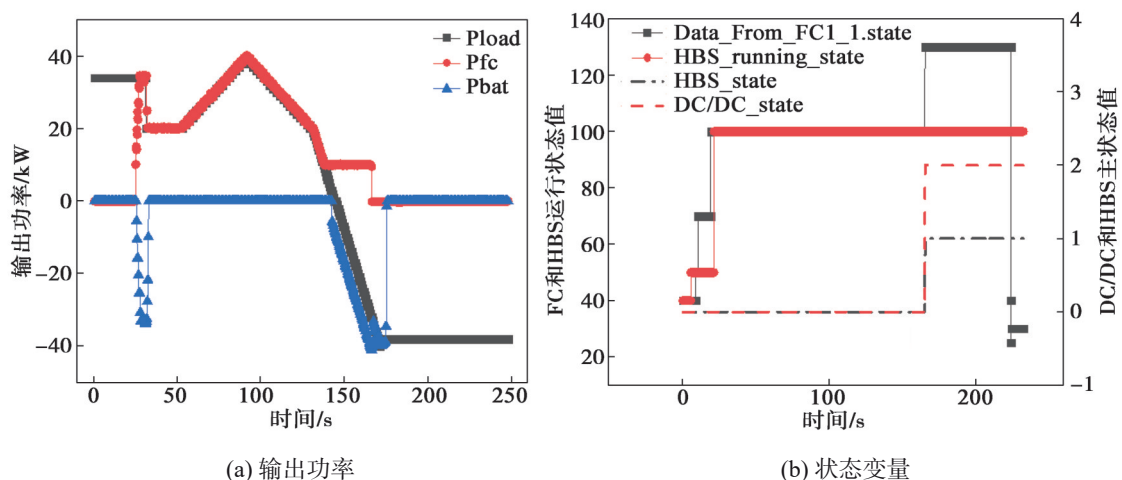
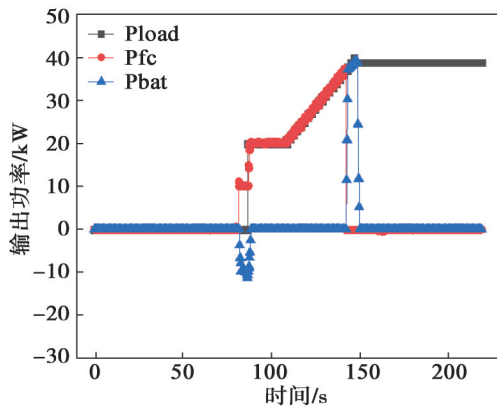


图 13 制动过程中DC/DC故障

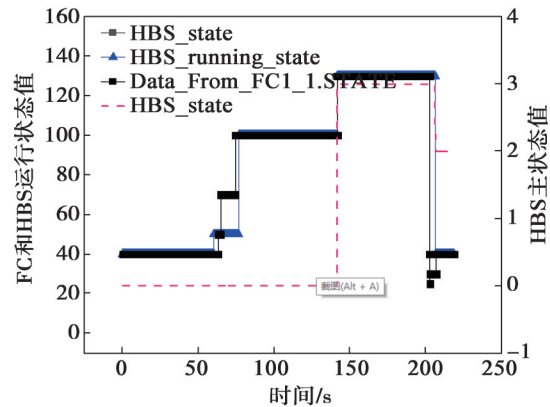
Fig. 13 DC/DC fault during braking

报出通信故障, 该故障等级为 2 级。测试时先让混合动力系统按车辆功率曲线运行, 然后分别在小功率牵引

工况和制动过程中手动置位屏蔽变量, 试验结果如图 14 和图 15 所示。



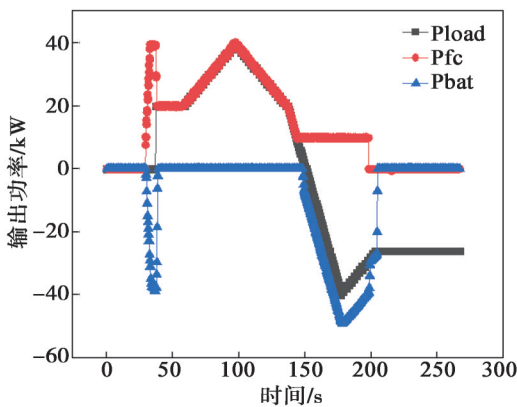
(a) 输出功率



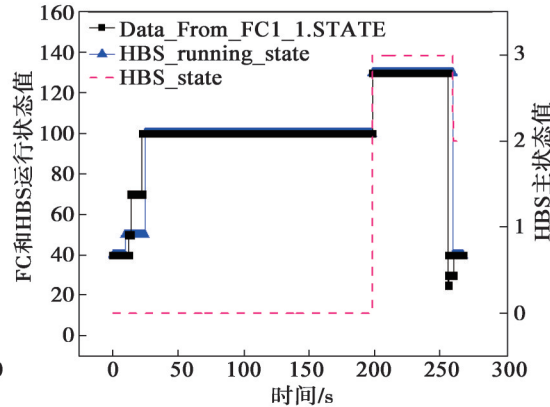
(b) 状态变量

图 14 牵引过程中动力电池故障

Fig. 14 Battery fault during traction



(a) 输出功率



(b) 状态变量

图 15 制动过程中动力电池故障

Fig. 15 Battery fault during braking

由图 14 和图 15 可以看出, 在牵引和制动工况下, 当动力电池出现二级故障后, 表征混合动力系统状态的变量“HBS_running_state”从运行值“100”变为故障值“130”, 系统进入故障停机过程, 顺序执行二级 DC/DC 系统关机、燃料电池关机、动力电池接触器断开, 试验结果符合程序设定要求。需要说明的是, 由于动力电池在此拓扑中对维持系统稳定至关重要, 即使动力电池发生二级故障也未直接将其切除在母线上的输出功率, 而是在燃料电池支路关机后再断开接动力电池接触器, 保证设备安全。

4 结论

本文以 100 kW 级燃料电池串联 2 级 DC/DC 系统, 再采用动力电池直挂母线的轨道车辆用氢动力系统为研究对象, 开发了能量控制策略, 并基于有轨电线路开展了系统动态运行试验, 所得结论如下:

①基于燃料电池串联 2 级 DC/DC 系统, 并采用动力电池直挂母线的供电拓扑, 将混合动力系统的工作

状态划分为“混合供电状态 0”、“单动力电池供电状态 1”、“单燃料电池供电状态 2”、“故障状态 3”, 制定了系统启动、运行、状态切换、能量分配策略等, 可最大程度发挥混合动力系统的供电稳定性。

②搭建了混合动力系统测试平台, 以秦皇岛有轨电车 4 号线的功率曲线作为系统需求功率, 在动力电池可用 SOC 的范围内进行了多组动态运行测试, 结果表明: 混合动力系统能够快速响应车辆在牵引、制动、惰行、怠速等各种工况的功率需求; 燃料电池、动力电池之间的功率分配与能量分配策略中的预设保持一致; 在 40%~60% 的初始 SOC 范围内, 随着运行时间的延长, 动力电池的 SOC 均能收敛到预设的收敛值 45%, 母线电压波动范围在 733~787 V; 稳态时, 2 个 DC/DC 系统之间的电压相对稳定, 最大电压纹波为 1.86%。但电流纹波较大, 最大频率低于 10 Hz, 使用 2 级 DC/DC 变换器时需要注意电气匹配。

③通过修改混合动力系统控制程序, 分别对运行过程中燃料电池、2 级 DC/DC 系统和动力电池出现“二级故障”时的响应情况进行了测试。结果表明: 燃

料电池或2级DC/DC系统出现故障后,系统能快速从“混合供电状态0”切换至“单动力电池供电状态1”,未出现对外输出功率突变;当动力电池出现故障后,系统执行停机过程,并在燃料电池支路设备全部停机后将动力电池从母线上切除,在保证系统安全的基础上最大限度地提高了供电可靠性。

参考文献:

- [1] ROGELJ J, SCHAEFFER M, MEINSHAUSEN M, et al. Zero emission targets as long-term global goals for climate protection[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(10): 105007.
- [2] MASSON-DELMOTTE Valérie, ZHAI Panmao, HANS-OTTO Pörtner, et al. Global warming of 1.5 °C[Z]. Switzerland: IPCC, 2019.
- [3] 骆永伟, 朱亮, 王向飞, 等. 电解水制氢催化剂的研究与发展[J]. *金属功能材料*, 2021, 28(3): 58-66.
LUO Yongwei, ZHU Liang, WANG Xiangfei, et al. Research and development of electrolytic water hydrogen production catalyst[J]. *Metallic Functional Materials*, 2021, 28(3): 58-66.
- [4] 孙闫, 夏长高, 尹必峰, 等. 燃料电池电动汽车的能量管理[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2022, 52(9): 2130-2138.
SUN Yan, XIA Changgao, YIN Bifeng, et al. Energy management strategy of fuel cell electric vehicles[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2022, 52(9): 2130-2138.
- [5] 马梓璇, 张昱瞳, 颜胜, 等. 一种基于太阳能的氢燃料电池汽车自产氢供应系统[J]. *应用能源技术*, 2021(6): 47-49.
MA Zixuan, ZHANG Yutong, YAN Sheng, et al. A self-produced hydrogen supply system for hydrogen fuel cell vehicles based on solar energy[J]. *Applied Energy Technology*, 2021(6): 47-49.
- [6] International Energy Agency. Global energy & CO₂ status report 2019[R/OL]. [2019-03-01] [2023-02-18]. <https://www.ica.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019>.
- [7] COOMBE D, FISHER P, HOFFRICHTER A, et al. Development and design of a narrow-gauge hydrogen-hybrid locomotive[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2016, 230(1): 181-192.
- [8] KAWASAKI J, TAKEDA S, FURUTA R. Development of the fuel cell hybrid railcar[J]. *Japanese Railway Engineering*, 2008, 48(1): 6-8.
- [9] 樊运新, 龙源, 江大发, 等. 新能源混合动力机车发展现状及关键技术综述[J]. *电力机车与城轨车辆*, 2023, 46(1): 1-11.
FAN Yunxin, LONG Yuan, JIANG Dafa, et al. Overview of development status and key technologies of new energy hybrid electric locomotive[J]. *Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles*, 2023, 46(1): 1-11.
- [10] 梁建英, 刘玉文, 李克雷. 氢能在轨道交通领域的应用及前景[C]//国际清洁能源论坛(澳门). 2017国际清洁能源论坛论文集. 澳门: 国际清洁能源论坛(澳门), 2017: 276-293.
- [11] LIANG Jianying, LIU Yuwen, LI Kelei. The application and prospects of hydrogen energy in the field of rail transit[C]//International Forum for Clean Energy (Macao). *Proceedings of the 2017 International Clean Energy Forum*. Macao: International Forum for Clean Energy (Macao), 2017: 276-293.
- [12] 刘楠, 李明高, 郭爱, 等. 基于价值损耗的燃料电池混合动力能量管理策略评价[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(2): 281-288.
LIU Nan, LI Minggao, GUO Ai, et al. Evaluation of energy management strategy based on value loss of fuel cell hybrid system[J]. *Acta Energiac Solaris Sinica*, 2021, 42(2): 281-288.
- [13] 孙应东, 郭爱, 刘楠, 等. 有轨电车用燃料电池系统效率研究[J]. *可再生能源*, 2021, 39(1): 95-100.
SUN Yingdong, GUO Ai, LIU Nan, et al. Efficiency analysis of fuel cell for the tram[J]. *Renewable Energy Resources*, 2021, 39(1): 95-100.
- [14] 张军龙. 氢能源在城市轨道交通行业的应用及发展[J]. *城市建设理论研究(电子版)*, 2018(1): 162-164.
ZHANG Junlong. Application and development of hydrogen energy in urban rail transit industry[J]. *Theoretical Research in Urban Construction (Electronic Version)*, 2018(1): 162-164.
- [15] DIN T, HILLMANSEN S. Energy consumption and carbon dioxide emissions analysis for a concept design of a hydrogen hybrid railway vehicle[J]. *IET Electrical Systems in Transportation*, 2018, 8(2): 112-121.
- [16] OGAWA K, YAMAMOTO T, HASEGAWA H, et al. Development of the fuel-cell/battery hybrid railway vehicle[C]//IEEE. 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Dearborn: IEEE, 2009: 1730-1735.
- [17] MEEGAHAWATTE D, HILLMANSEN S, ROBERTS C, et al. Analysis of a fuel cell hybrid commuter railway vehicle[J]. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(23): 7829-7837.
- [18] FRAGIACOMO P, PIRAINO F. Fuel cell hybrid powertrains for use in Southern Italian railways[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(51): 27930-27946.
- [19] PENG Hujun, LI Jianxiang, LÖWENSTEIN L, et al. A scalable, causal, adaptive energy management strategy based on optimal control theory for a fuel cell hybrid railway vehicle[J]. *Applied Energy*, 2020, 267: 114987.
- [20] LI Minggao, LI Ming, HAN Guopeng, et al. Optimization analysis of the energy management strategy of the new energy hybrid 100% low-floor tramcar using a genetic algorithm[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(7): 1144.