

基于最优功耗的燃料电池/超级电容混合动力系统能量管理方法研究

梁汝军¹ 陈 志¹ 綦 芳¹ 燕 雨²

(1. 中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京; 2. 郑州大学电气与信息工程学院, 450001, 郑州)

摘 要 [目的]随着科技发展与我国“双碳”进程的稳步推进,氢能在城市交通中的应用也日益增加;为降低数轨电车用燃料电池/超级电容混合动力系统整体能耗,提出了一种基于最优功耗的能量管理方法。[方法]以数轨电车在不同运行状态下的功耗分布为基础,通过拟合近似的方式,并结合燃料电池系统与超级电容系统的功耗模型,联合构建了混合动力系统的瞬时功耗函数;通过对功耗函数的寻优与求解,得到燃料电池系统的最佳输出功率;基于半实物仿真平台及数轨电车的实际运行数据,验证了所提方法的在线控制能力。[结果及结论]燃料电池系统在所提方法的控制下,在复杂工况下保持了较为稳定的输出功率,且平均电氢转化效率达 54.84%,这能够有效降低数轨电车的运维成本。

关键词 燃料电池; 超级电容; 混合动力系统; 能量管理

中图分类号 TM911.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.05.006

Research on Energy Management Method of Fuel Cell and Supercapacitor Hybrid Power System Based on Optimal Power Consumption

LIANG Rujun¹, CHEN Zhi¹, QI Fang¹, YAN Yu²

(1. CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing; 2. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, 450001, Zhengzhou, China)

Abstract [Objective] With the steady advancement of technology and China's dual carbon process, the application of hydrogen energy in urban transportation is increasing. To reduce the overall energy consumption of fuel cell/supercapacitor hybrid power system for virtual-rail trams, an energy management method based on optimal power consumption is proposed. [Method] Based on the power distribution of virtual-rail trams in different operating states, an instantaneous power consumption function for the hybrid power system is jointly constructed by fitting approximation and combining the power consumption models of fuel cell systems and supercapacitor systems. By optimizing and solving the power consumption function, the optimal output power of the fuel cell system is obtained. The online control capability of the proposed method

is verified using a semi-physical simulation platform and actual operational data of the virtual-rail tram. [Result & Conclusion] Experimental results show that under the control of the proposed method, the fuel cell system maintains a stable output power under complex conditions, with an average electricity-to-hydrogen conversion efficiency of 54.84%. This can effectively reduce the operation and maintenance costs of virtual-rail trams.

Key words fuel cell; supercapacitor; hybrid power system; power management

0 引言

近年来,随着制备、运输与储存技术的飞速发展,氢能凭借其“零污染、零排放”的优点在交通领域大放异彩。国家发展和改革委员会在 2022 年印发的《氢能产业发展中长期规划》中明确指出:应推动运输工具装备低碳转型,加快氢能技术的研发和示范应用,并积极扩大氢能等新能源、清洁能源在交通领域应用。而质子交换膜燃料电池作为常温电氢转化装置,同时兼具“体积小、效率高”等诸多优势,在城市轨道交通领域极具应用价值。

在城市轨道交通领域,氢能源动力系统已有较为成熟的应用,其主要集中在市域车和以低地板为代表的一系列新型轨道交通车辆,应用前景广阔^[1]。目前,质子交换膜燃料电池的功率等级偏低,现阶段通常采用与储能单元联合的方式共同组成混合系统^[2]。在储能元件中,超级电容具有快速吸收车辆制动能量的能力,被广泛使用^[3]。

在混合动力系统中,能量控制策略是关键。在已有的众多研究成果中,针对燃料电池/超级电容器混合系统的控制策略较少,且都存在一定的局限性。文献[4]根据车辆的运行数据分析,采用基于规则的方法作为控制燃料电池或超级电容器输出的标准,然而这种方法只允许超级电容器在牵引工

况输出,仅对特定的系统适用;文献[5-7]将 ECMS (等效氢耗算法)成功应用于混合动力系统,但该方法中存在大量人为主观参数,且其功率-氢耗曲线采用线性函数拟合,导致了等效氢耗法不能用于控制大功率燃料电池系统;文献[8]提出了一种基于等效能耗的在线优化方法,但该方法需要牵引系统实时提供需求功率的具体数值,具有一定的局限性,故仅能在特定的动力系统中应用。

基于上述能量管理方法所存在的短板,本文提出了一种计及车辆运行状态的最优氢耗方法。该方法基于系统氢耗模型与车辆的运行状态,通过对系统氢耗分析,得到不同运行状态下混合动力系统的最优功率分配方式。最后,本文利用半实物仿真平台,基于采集到的车辆实际运行数据,对所提出的方法进行了验证。

1 混合动力系统及其拓扑结构

1.1 燃料电池系统效率模型

对于燃料电池系统效率 η_{FC} 的计算,本文采用了基于实际测量中氢的低热值的计算方法:

$$\eta_{FC} = \frac{P_{FC}}{m_{H_2} L_{HV}} \quad (1)$$

式中:

L_{HV} ——氢的低热值;

m_{H_2} ——燃料电池系统每秒消耗的氢气质量;

P_{FC} ——燃料电池的输出功率。

根据氢罐压力的变化可以计算出 m_{H_2} :

$$m_{H_2} = \frac{nMV}{RT} \left[\frac{p(i+1)}{Z(i+1)} - \frac{p(i)}{Z(i)} \right] \quad (2)$$

式中:

i ——时刻;

n ——储氢罐个数;

M ——氢气的摩尔质量,取 $M = 2 \text{ g/mol}$;

V ——氢罐容积;

R ——气体常数;

p ——氢气的压力,由压力传感器测得;

Z ——当温度为 T 、压力为 p 时的气体压缩系数,其值可由查表求得。

经实际测量,燃料电池系统的能耗曲线分别如图 1 所示。

为进一步提升拟合的准确度,在图 1 中采用二次函数作为拟合的基函数:

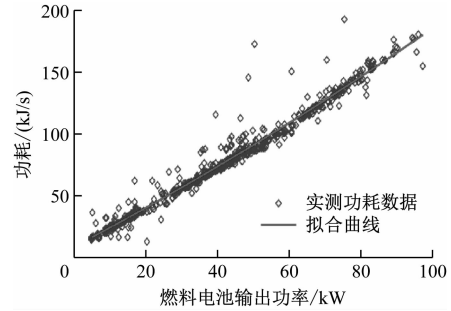


图 1 燃料电池系统功耗及拟合曲线

Fig. 1 Power consumption and fitting curves of fuel battery system

$$Q_{FC} = d_1 P_{FC}^2 + d_2 P_{FC} + d_3 \quad (3)$$

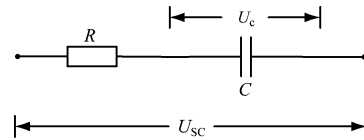
式中:

d_1, d_2, d_3 ——拟合系数,其取值分别为 5.067×10^{-6} 、1.506 和 4 849。

经过实际计算,相关性系数可达 0.965 3。

1.2 超级电容系统效率模型

考虑到实际应用中以功率为最优控制目标,本文的充放电模型基于恒功率充放电建立。超级电容简化等效电路如图 2 所示。



注: R 为超级电容器的内阻; C 为超级电容器的电容; U_{sc} 为超级电容端子电压; U_c 为理想电容端子电压。

图 2 超级电容简化等效电路图

Fig. 2 Simplified equivalent circuit diagram of supercapacitors

根据 RC (电阻-电容) 模型,超级电容的功耗 Q_{sc} 模型如下:

$$Q_{sc} = P_{sc}^2 \frac{R}{U_{sc}^2} + P_{sc} \quad (4)$$

式中:

P_{sc} ——超级电容器的充电或放电功率。

其中, R 在本文中取值为 $5.67 \times 10^{-2} \Omega$ 。故基于式(4)可以得到 SC (超级电容功耗) 模型。

2 最优功耗法

基于典型的车辆工况,车辆的运行一般可分为牵引、惰行及制动 3 种工况。本节基于上述 3 种工况,分别对各状态下母线需求功率进行分析,再根据分析结果对全工况下的功耗函数进行优化求解,得出混合动力系统的最优功率分配。

2.1 系统功耗函数及其优化

如图3所示,根据混合动力系统的拓扑结构,需要对燃料电池系统的输出功率进行控制。

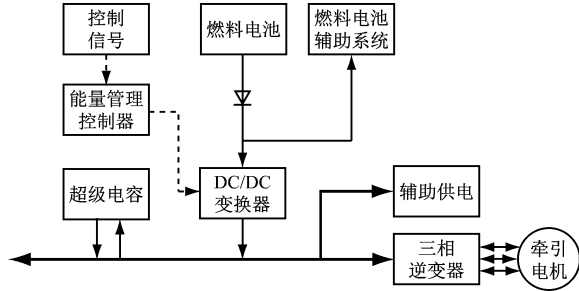


图3 混合动力系统拓扑图

Fig. 3 Diagram of hybrid power system topology

本文根据式(3)和式(4),并引入等效能耗因子 k ,进一步得到以燃料电池净输出功率 P_{FC} 的混合动力系统母线的功耗函数:

$$Q_{bus} = Q_{FC} + kQ_{SC} = \left(d_1 + \frac{kR}{U_{SC}^2} \right) P_{FC}^2 + \left(d_2 - k - \frac{2kP_{req}R}{U_{SC}^2} \right) P_{FC} + d_3 + \frac{kP_{req}^2 R}{U_{SC}^2} \quad (5)$$

通过对式(5)的 P_{FC} 变量求偏导,可以得到在不同需求功率下,燃料电池的最优输出功率:

$$P_{FCopt} = \frac{2kP_{req}R + U_{SC}^2(k - b)}{2(aU_{SC}^2 + kR)} \quad (6)$$

2.2 控制参数的选取

由于需求功率受到司机驾驶习惯与路况等多因素的影响,使得式(6)中需求功率的数值难以直接获得。本节基于不同运行状态下需求功率的分布情况,对需求功率进行估算。

在牵引状态下,车辆的需求功率往往会随着速度的增加而增加。本文基于已有的列车运行数据,通过分析牵引状态下需求功率随速度的变化情况,基于数据拟合的方法,对需求功率实现估算。牵引状态下需求功率的分布情况及其拟合曲线如图4所示。

图4的拟合曲线的函数表达式如下:

$$P_{tra}(v) = e_1 v^2 + e_2 v + e_3 \quad (7)$$

式中:

e_1, e_2, e_3 ——取值为 $-41.51, 8648$ 和 2.267×10^4 。

同理,在制动状态下,亦可通过函数拟合的方法获得需求功率的拟合曲线,如图5所示。

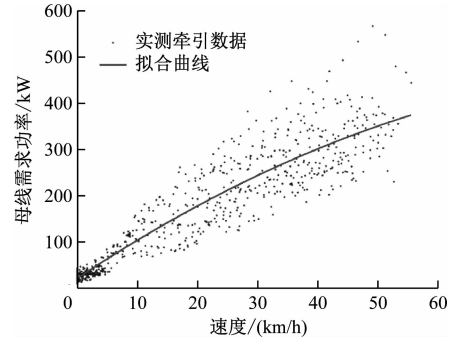


图4 牵引状态下母线需求功率分布及其拟合曲线

Fig. 4 Distribution and fitting curve of busbar demand power under traction state

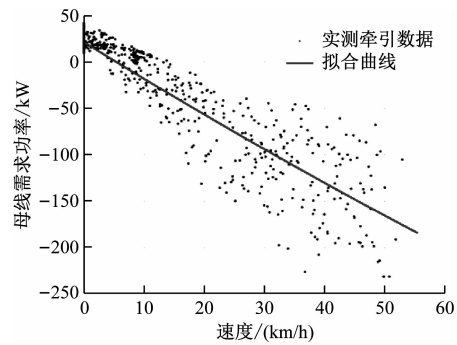


图5 制动状态下母线需求功率分布及其拟合曲线

Fig. 5 Distribution and fitting curve of busbar demand power under braking state

图5的拟合曲线的函数表达式如下:

$$P_{bra}(v) = h_1 v^2 + h_2 v + h_3 \quad (8)$$

式中:

h_1, h_2, h_3 ——取值为 $5.355, -4011$ 和 2.155×10^4 。

在惰行状态下,车辆处于滑行状态,需求功率主要由车辆中的辅助负载构成。经实际测算,车辆在惰行状态下的需求功率一般在 15 kW 。此外,为了防止超级电容在长时间惰行过程中出现过充或过放的情况,本文还在式(6)的基础上进一步引入了电压平衡系数 g ,其计算公式如下:

$$g = 1 + \frac{U_0^2 - U_{SC}^2}{U_{SCmax}^2 - U_{SCmin}^2} \quad (9)$$

式中:

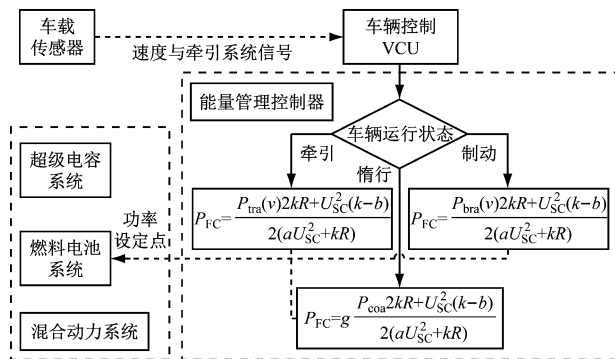
U_0 ——电压平衡点,在本文取值为 580 V ;

$U_{SC,max}$ 和 $U_{SC,min}$ ——超级电容的最大与最小电压,本文中取值分别为 750 V 和 300 V 。

综上,当超级电容的电压低于平衡点时,平衡系数大于1,会增加燃料电池系统输出,减缓超级电容SOC(剩余电量)的降低趋势;反之,则降低燃料

电池输出,减缓 SOC 的增加趋势,从而防止超级电容出现过充或过放现象。

在实时检测车辆运行工况和系统参数的情况下,最优能耗方法的控制流程如图 6 所示。其中,车辆的运行状态将根据车辆的挡位信号具体判定,具体包括大于 0、等于 0 以及小于 0,分别对应车辆的牵引、惰行以及制动状态。



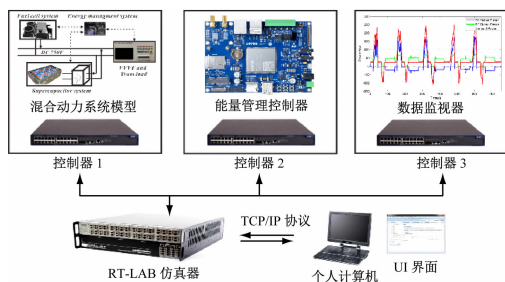
注: P_{coa} 为车辆怠速功率。

图 6 最优能耗方法控制流程图

Fig. 6 Flowchart of optimal energy consumption method control

3 试验验证与结果分析

为了验证该方法的响应能力和实际控制效果,本文利用 RT-LAB(软件半实物仿真)平台对该方法进行了验证。RT-LAB 平台结构如图 7 所示。



注: TCP/IP 为传输控制协议/互联网协议; UI 为用户界面。

图 7 RT-LAB 软件平台的结构截图

Fig. 7 Screenshot of RT-LAB platform structure

由图 7 可知:能量管理模块主要由 DSP(数字信号处理芯片)及其辅助电路组成,燃料电池混合动力系统则通过仿真模型的形式储存于 RT-LAB 软件的仿真器中。其中,电压电流的模拟信号通过 DSP 控制板上的模数转换单元采集,控制信号则通过 DSP 的 SPI(串行外设接口)通信接口与仿真器相连。其输入参数主要包括数轨电车运行时的需求功率和车辆的运行速度。RT-LAB 软件平台测试

输入数据如图 8 所示。

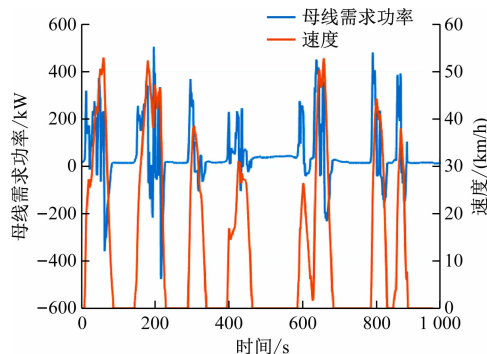


图 8 RT-LAB 软件平台测试输入数据

Fig. 8 Input of RT-LAB platform

经过实际测试,混合动力系统输出功率如图 9 所示。

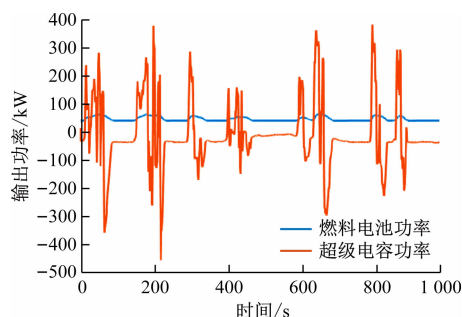


图 9 混合动力系统输出功率曲线

Fig. 9 Output power curves of hybrid power system

车辆的母线电压与燃料电池系统的效率曲线分别如图 10 和图 11 所示。

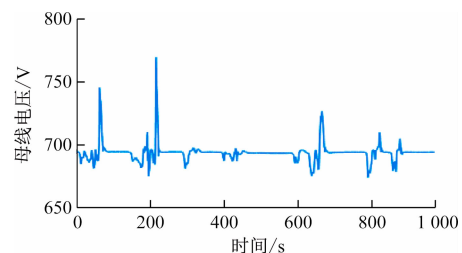


图 10 直流母线电压

Fig. 10 DC busbar voltage

基于图 8 所示的输入参数,考虑到数轨电车是在道路上行驶,因此工况较为复杂且功率波动较大,频繁的起停与加减速过程会给混合动力系统的稳定性与燃料电池系统的使用寿命带来很大挑战。然而,在图 9 中,基于本文所提出的控制方法,燃料电池系统的输出功率较为平滑,未出现较大的波动,因此有利于延长动力系统的使用寿命。该方法不会随着需求功率的波动而出现较大的波动,且燃

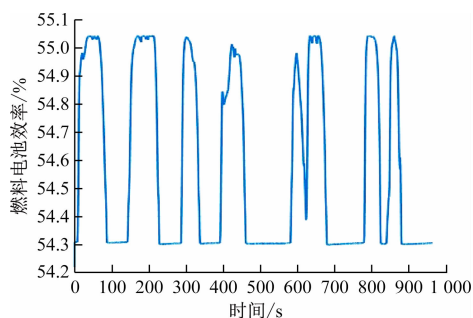


图11 燃料电池效率曲线

Fig. 11 Efficiency curve of fuel cell system

料电池功率普遍维持在燃料电池最佳效率区间,使得燃料电池在提升燃料经济性的同时,防止了恶劣工况对燃料电池寿命的不利影响。经计算,如图11所示燃料电池的平均效率达到54.84%。由图10可知,母线电压被设置为690 V,当车辆处于牵引状态时,由于负载升高而出现了电压下降的情况;而当制动时,由于母线需要吸收来自牵引系统的制动能量,母线电压升高;电压波动均在合理范围以内。

同时,由于采用了超级电容直挂母线的拓扑结构,超级电容的充放电相应速率得到有力提升,能够起到良好地削峰填谷的作用。超级电容SOC波动情况如图12所示。

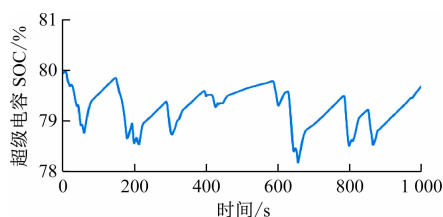


图12 超级电容SOC波动情况

Fig. 12 Supercapacitor SOC fluctuation situation

在图12中,由于电压平衡系数的加入,SOC的整体波动基本维持在设定点附近。而SOC在合理区间内的波动,也有利于数轨电车的平稳运行。

4 结语

本文针对数轨电车用燃料电池混合动力系统,提出了一种基于最优功耗的能量管理方法。该方法通过对燃料电池与超级电容系统的建模与功耗分布研究,以函数求解寻优的方式,得到了混合动力系统的功率分配方案,实现了对燃料电池系统输出的优化控制。此外,本文在寻优结果的基础上,进一步提出了电压平衡系数,该系数能够有效地调节混合动力系统的输出,防止超级电容出现过充或

过放现象,进而确保车辆在运行过程中的稳定。

通过RT-LAB软件半实物仿真平台的测试,该方法在数轨电车复杂的运行工况下,燃料电池不仅波动较小,且能够保持约54.84%的平均效率,降低了数轨电车的运维成本。

参考文献

- [1] 蔡芳,崔周森,张弛,等. 数字轨道胶轮电车氢燃料电池混合动力系统设计与运用[J]. 机车电传动,2023(3):57.
QI Fang, CUI Zhousen, ZHANG Chi, et al. Design and application of hydrogen fuel cell hybrid system for digital rail vehicle[J]. Electric Drive for locomotives, 2023(3):57.
- [2] XU L, OUYANG M, LI J, et al. Application of Pontryagin's Minimal Principle to the energy management strategy of plugin fuel cell electric vehicles[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(24): 10104.
- [3] 陈维荣,燕雨,李奇. 基于状态机的燃料电池混合动力系统控制策略[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(4): 663.
CHEN Weirong, YAN Yu, LI Qi. Control strategy based on state machine for fuel cell hybrid power system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(4): 663.
- [4] YAN Y, LI Q, CHEN W, et al. Optimal energy management and control in multimode equivalent energy consumption of fuel cell/supercapacitor of hybrid electric tram[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 6065.
- [5] RODATZ P, PAGANELLI G, SCIARRETTA A, et al. Optimal power management of an experimental fuel cell/supercapacitor-powered hybrid vehicle[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(1): 41.
- [6] ZHANG W, LI J, XU L, et al. Optimization for a fuel cell/battery/capacity tram with equivalent consumption minimization strategy[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 134: 59.
- [7] 张国瑞,李奇,韩莹,等. 基于运行模式和动态混合度的燃料电池混合动力有轨电车等效氢耗最小化能量管理方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6905.
ZHANG Guorui, LI Qi, HAN Ying, et al. Study on equivalent consumption minimization strategy based on operation mode and DDOH for fuel cell hybrid tramway[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6905.
- [8] YAN Y, LI Q, CHEN W, et al. Hierarchical management control based on equivalent fitting circle and equivalent energy consumption method for multiple fuel cells hybrid power system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020(99):1.

· 收稿日期:2023-10-23 修回日期:2023-12-13 出版日期:2024-05-10

Received:2023-10-23 Revised:2023-12-13 Published:2024-05-10

· 第一作者:梁汝军,正高级工程师,liangruijun@126.com

通信作者:蔡芳,正高级工程师,qifang11155@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取CC BY-NC-ND协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license