

基于自适应特性的燃料电池客车能量管理策略研究

王丙虎¹, 陈振国¹, 刘康¹, 王琳¹, 吴光平^{1,2}

(1. 中通客车股份有限公司, 山东 聊城 252000; 2. 中北大学, 山西 太原 030051)

摘要:为提高燃料电池客车经济性,本文分别开发一种基于自适应功率跟随的多挡位滞环控制技术和一种自适应功率预测的动力电池 SOC 高位均衡技术的燃料电池整车电-电混合能量管理控制策略。将该控制策略应用于中通 12 m 燃料电池旅游客车,其百公里氢耗最低可至 5.2 kg,节能效果明显。

关键词:燃料电池客车; 自适应特性; 能量管理策略

中图分类号:U461.8

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2023)05-0001-05

Study on Energy Management Strategy of Fuel Cell Bus Based on Self-adaptive Characteristics

WANG Binghu¹, CHEN Zhenguo¹, LIU Kang¹, WANG Lin¹, WU Guangping^{1,2}

(1. Zhongtong Bus Co., Ltd., Liaocheng 252000, China; 2. North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To improve the economy of fuel cell buses, this paper develops a control strategy of electric-electric hybrid energy management for fuel cell vehicles based on self-adaptive power-following multi-stage hysteresis control technology and a self-adaptive power prediction high-level equalization technology for power cell SOC. The control strategy applied to Zhongtong 12 m fuel cell bus and its hydrogen consumption can be as low as 5.2 kg per 100 km which the energy-saving effect is obvious.

Key words: fuel cell bus; self-adaptive characteristic; energy management strategy

目前燃料电池客车多为电-电混合动力系统,即动力电池与燃料电池共同作为能量源给电动机驱动车辆运行。在燃料电池车辆运行过程中,燃料电池系统响应整车功率需求,动力电池根据整车实际需求功率对燃料电池响应的功率进行削峰填谷:即当整车需求功率大于燃料电池系统运行功率时,动力电池补充额外的功率差值用于整车驱动,而当整车需求功率小于燃料电池系统运行功率时,动力电池吸收燃料电池系统释放的多余功率。整车良好的能量管理策略既要保证整车经济性最优,又要兼顾燃料电池与动力电池的使用寿命^[1-4]。

目前,燃料电池整车实际使用的能量管理控制策略既无法保证燃料电池与动力电池功率分配最优,也无法将功率分配对燃料电池及动力电池使用寿命的

影响最小化。因此,本文提出一种基于自适应功率跟随的多挡位滞环控制技术和一种自适应功率预测的动力电池 SOC 高位均衡技术的燃料电池整车电-电混合能量管理控制策略,并将该控制策略在中通某批量燃料电池客车上应用验证。

1 燃料电池整车能量管理策略现状

目前,电-电混合燃料电池整车能量管理策略主要有基于规则的能量管理策略和基于优化的能量管理策略。其中基于规则的又可以分为基于确定性规则和基于模糊规则,前者包括恒温器式控制、功率跟随控制、混合控制策略、状态机等,后者包括模糊控制等^[5-7];基于优化的又可以分为实时优化和全局优化,前者包括等效燃油消耗最小算法、神经网络、模型

收稿日期:2023-06-24。

第一作者:王丙虎(1991—),男,硕士;工程师;主要从事燃料电池整车技术开发工作。E-mail:13863516315@163.com。

预测控制算法^[8-10]等,后者包括动态规划、线性规划、遗传算法、粒子群算法等。

优化型控制策略需提前预知工况,使用优化控制算法,通过求解不同约束条件下目标函数的极值来获取系统最优解。全局优化型策略计算时间长,且存在维数灾难无法在线应用等不足^[11];实时优化型策略对工况的适应性一般,很难保证汽车在各种工况下都能达到最优效果。

规则型能量管理策略是依据设计人员的专业知识、系统的试验结果或者数学模型而设计出的一组基本控制规则,然后基于该规则来确定燃料电池和其他能量源的功率分配。基于规则的能量管理因具有较高的可靠性且易于实现而被广泛地应用于混合动力汽车^[12]。

目前,燃料电池汽车电-电混合动力系统实际应用的能量管理策略主要有燃料电池恒功率策略和燃料电池功率跟随策略两种。燃料电池恒功率策略中,当 SOC 较低时,燃料电池以高功率工作;当 SOC 较高时,燃料电池以低功率工作。该策略中燃料电池功率仅与动力电池 SOC 高低相关,而与整车驱动功率无关,燃料电池功率相对稳定,由动力电池跟随驱动功率变化,动力电池参与程度相对较高。功率跟随策略中,燃料电池跟随整车驱动功率变化,功率波动幅度较大,且变载频繁;动力电池仅用于补充燃料电池功率的不足和进行能量回收,动力电池参与程度相对较低。

本文对恒功率控制策略进行深入研究,以提高燃料电池寿命、动力电池寿命、整车经济性为原则,分别开发一种基于自适应功率跟随的多挡位滞环控制技术和一种自适应功率预测的动力电池 SOC 高位均衡技术的燃料电池整车电-电混合能量管理控制策略,以解决目前无自适应特性的恒功率控制策略无法保证整车经济性优、燃料电池寿命及动力电池寿命长的难题。

2 自适应特性电-电混合能量管理控制策略

2.1 多挡位滞环控制技术

如图1所示,动力电池 SOC 划分区间为 0~90%,

挡位划分数量根据每个挡位 SOC 区间的大小 N 决定 ($N \geq 8$),假设起始 SOC 区间为 $\text{SOC} \leq M\%$ 。本文以九挡位为例, $N=10, M=10$,即划分的 SOC 区间分别为 $10\% < \text{SOC} \leq 20\%$ 、 $20\% < \text{SOC} \leq 30\%$ …… $70\% < \text{SOC} \leq 80\%$,直到 $80\% < \text{SOC} \leq 90\%$,则划分区间结束。功率请求根据 SOC 区间以功率 A 步调进行变化, $A \geq 5$ (九挡的 $A=8$ 或 6)。假设燃料电池系统额定功率为 B (单位为 kW),最大请求功率 $C=72$, C 规定为燃料电池系统额定功率的 80% (单位为 kW),以九挡位为例,则 $\text{SOC} \leq 10\%$ 最小动力电池 SOC 所在的区间对应的请求功率点为 72。依此类推,则 $10\% < \text{SOC} \leq 20\%$ 、 $20\% < \text{SOC} \leq 30\%$ …… $70\% < \text{SOC} \leq 80\%$ 对应的功率请求点分别为 64, 56……16,直到 $80\% < \text{SOC} \leq 90\%$ 达到最小请求功率点 $D=10$ 。

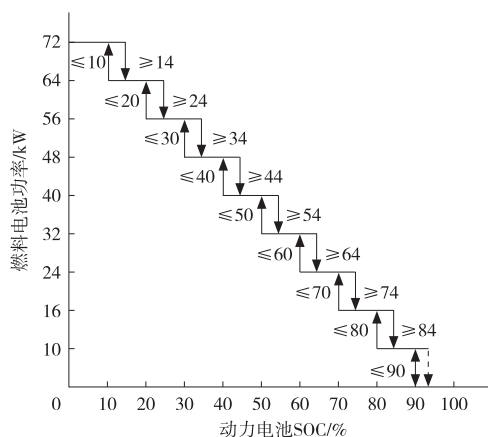


图1 九挡位滞环控制策略

在车辆实际运行过程中,为防止燃料电池系统功率频繁变载,存在滞环动力电池 SOC 区间为 $F\%$, $F \geq 4$ (九挡位的 $F=4$),即 $10\% < \text{SOC} \leq 20\%$ 区间内整车对燃料电池系统请求功率 (64 kW) 大于整车工况平均功率需求导致动力电池 SOC 逐步上升至 $20\% < \text{SOC} \leq 30\%$,对应的请求功率点依旧保持为 64,直到 $\text{SOC} > 24\%$ 时,即 SOC 区间为 $24\% < \text{SOC} \leq 30\%$ 时,对应的燃料电池系统请求功率点才会变为 56。假如 56 小于整车工况平均功率需求, SOC 会逐步下降。当 $\text{SOC} < 24\%$ 时,对应的请求功率点依旧保持为 56,直到 $\text{SOC} < 20\%$ 时,对应的请求功率点才会变为 64。

本控制技术的自适应特性体现在多挡位中“多”

的存在,使整车无论运行在何种工况,都能自适应地找到其运行工况下整车平均需求功率所对应的燃料电池运行功率点,这是另外一种形式的自适应功率跟随。自适应特性使动力电池 SOC 保持较小的吞吐量,达到降低整车能量转化损耗,提高燃料电池及动力电池寿命的目的。

2.2 动力电池 SOC 高位均衡控制技术

如图 2 所示,动力电池 SOC 为动力电池荷电状态,当 $SOC < SOC_1$ 时,整车向燃料电池系统请求的功率为预设的燃料电池系统的额定功率 P_1 。当 $SOC_1 \leq SOC < SOC_3$ 时,整车向燃料电池系统请求的功率为预设的整车平均需求功率 P_2 。当 $SOC_3 \leq SOC < SOC_4$ 时,整车向燃料电池系统请求的功率为预设的燃料电池系统的高效率点对应的功率 P_3 。当 $SOC \geq SOC_4$ 时,整车向燃料电池系统请求的功率为 0。本控制技术的自适应特性体现在: P_2 为整车在某段时间内的平均需求功率,其根据不同运行工况实时变化,自适应特性使动力电池 SOC 始终维持在所预计的动力电池 SOC_1 高位点处,为防止整车对燃料电池系统请求功率频繁变化, $SOC_1 \sim SOC_2$ 为滞环区间,滞环区间原理如 2.1 节中所述。

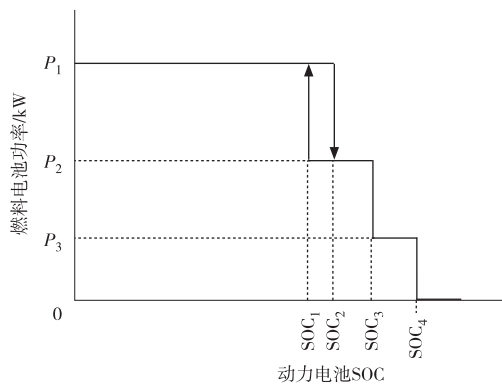


图 2 动力电池 SOC 高位均衡技术控制策略

3 电-电混合能量管理控制策略试验验证

3.1 试验对象

多挡位滞环控制技术与动力电池 SOC 高位均衡控制技术试验方案对象均为中通 12 m 燃料电池旅游客车,车辆参数见表 1。

表 1 燃料电池旅游客车参数

参数	数值
整备质量/kg	13 000
满载质量/kg	17 500
电机额定/最大转速/($r \cdot \min^{-1}$)	1 630/3 000
电机额定/最大扭矩/ $N \cdot m$	1 260/2 800
电机额定/最大功率/kW	215/350
燃料电池额定功率/kW	80
动力电池电量/ $kW \cdot h$	105.28
供氢系统参数	385 L $\times$ 4
滚动半径/m	0.465
最大车速/($km \cdot h^{-1}$)	100
最大爬坡度/%	≥ 15
0~50 km/h 加速时间/s	≤ 15

3.2 试验方案

3.2.1 多挡位滞环控制技术试验方案

多挡位滞环控制技术验证方法为:设置 5 组对比试验,将动力电池 SOC 按 2.1 节中的方法分别平均划分为三、五、七、九、十一等若干区间,燃料电池系统在每个动力电池 SOC 区间内恒功率运行,功率的大小按照燃料电池额定功率比例划分,动力电池 SOC 越大,燃料电池运行功率越小。同时,为防止燃料电池系统功率频繁变载,存在滞环动力电池 SOC 区间,其各挡位 M 、 C 、 D 、 N 、 A 、 F 值的设置见表 2。

表 2 各挡位参数明细

挡位	$M/\%$	C/kW	D/kW	$N/\%$	A/kW	$F/\%$
三	10	72	10	40	24	20
五	10	72	10	20	16/14	10
七	10	72	10	13/15	10/11	5
九	10	72	10	10	8/6	4
十一	10	72	10	8	5/6/7	4

3.2.2 动力电池 SOC 高位均衡控制技术试验方案

动力电池 SOC 高位均衡技术如 2.2 节所述,其中, SOC_1 为 70%, SOC_2 为 72%, SOC_3 为 80%, SOC_4 为 84%。 P_1 为 80 kW, P_2 的确定方法见表 3,以 T 为周期,这里周期 T 确定为每个 C-WTVC 循环工况的运行时间 1 800 s。 $T_1 = T_2 = T_3 = T_4$,每个周期采集一

次从整车上电时刻到当前时间整车的平均需求功率作为下一个 T 的整车向燃料电池系统的请求功率 P_2 , 即 T_2 周期内整车向燃料电池系统的请求功率为 T_1 周期内整车的平均需求功率 P_{T_1} , T_3 周期内整车向燃料电池系统的请求功率为 T_1 和 T_2 两个周期内整车的平均需求功率 $P_{T_1+T_2}$, 其中初始周期 T_1 整车向燃料电池系统的请求功率设定值为 P_0 , P_0 设置遵循燃料电池系统运行高效率的原则, 此辆车 $P_0 = 40 \text{ kW}$ 。 P_3 的确定方法由燃料电池单体电压及燃料电池系统的效率曲线确定, 此辆车 P_3 为 16 kW 。需要注意的是: 在车辆实际运行过程中, T 的确定方法为车辆每循环一次路线的时间, 理想状态下 T 相同。

表 3 P_2 确定方法表格说明

周期	请求功率	平均需求功率
T_1	P_0	P_{T_1}
T_2	P_{T_1}	$P_{T_1+T_2}$
T_3	$P_{T_1+T_2}$	$P_{T_1+T_2+T_3}$
T_4	$P_{T_1+T_2+T_3}$	$P_{T_1+T_2+T_3+T_4}$

3.3 试验工况与数据采集

多挡位滞环控制技术及动力电池 SOC 高位均衡控制技术试验在中通客车转鼓试验室验证, 采用 C-WTVC 工况, 每个试验进行 6 个工况, 用 CANalyzer 提取整车 CAN 数据, 每组工况保存一组数据。在采集到的数据中提取起始压力、终止压力、起始温度、终止温度、起始 SOC、终止 SOC、起始里程、终止里程等数据作为整车氢耗的计算依据。

3.4 试验数据分析

3.4.1 多挡位滞环试验控制技术试验数据分析

整车氢耗根据所提取的数据以 GB/T 35178—2017^[13] 质量压力法为依据进行计算。另外, 根据提取的数据对每个挡位整个试验周期内的动力电池 SOC 变化区间及范围、功率变化次数进行了统计, 统计结果见表 4。

从表 4 可以看出, 三挡位到九挡位动力电池 SOC 范围变化依次减小, 十一挡位 SOC 范围反而增大, 原因可能是动力电池 SOC 区间挡位设置得太多, 整车实际试验过程中难免持续性需求功率较大, 整车向燃

料电池系统请求的功率点与整车需求功率有较大偏差, 功率点变载较多。七挡位百公里氢耗最低, 主要原因是动力电池 SOC 变化范围小且整个试验运行周期燃料电池运行功率无变化。三挡位和十一挡位氢耗较大, 三挡位氢耗高可能主要受 SOC 范围变化大的影响, 电-电转换损耗增加, 功率点变化造成的影响次之; 十一挡位氢耗高可能主要受功率点变化的影响, 燃料电池系统氢气使用效率低。五挡位比三挡位氢耗低, 主要是受 SOC 变化范围的影响。九挡位比十一挡位氢耗低, 主要是受 SOC 变化范围和功率点变化次数的综合影响。

表 4 多挡位滞环试验数据统计表

挡位	SOC 变化区间/%	SOC 变化极差/%	功率 变化次数	百公里 氢耗/kg
三	49.71~70.90	21.19	3	5.82
五	48.27~61.21	12.94	4	5.45
七	47.47~54.99	7.52	0	5.24
九	39.94~46.03	6.09	9	5.44
十一	40.55~52.14	11.59	11	6.03

3.4.2 动力电池 SOC 高位均衡控制技术试验数据分析

动力电池整个试验周期内动力电池 SOC 变化及燃料电池系统功率变化如图 3 所示, 整个试验周期内除了初始周期燃料电池运行功率为 40 kW , 其余周期燃料电池系统的运行功率无变化, 维持在 44 kW , 动力电池 SOC 变化极差为 5% , 保持了较低的吞吐量。经计算, 该试验周期内, 燃料电池百公里氢耗为 5.2 kg , 相对于多挡位滞环控制技术持续降低, 极大地提高了整车经济性。

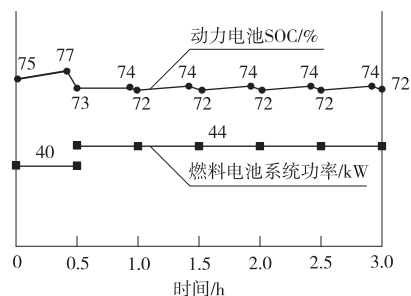


图 3 动力电池 SOC 及燃料电池系统功率变化图

4 结束语

多挡位滞环控制技术在一定程度上能够提高整车的经济性,但动力电池 SOC 划分挡位及功率点的数量与整车氢耗并没有直接的成正比关系,挡位越多,氢耗可能会更高。针对电-电混合能量管理控制策略,燃料电池整车节能的关键是找到整车平均需求功率点,这既能保证动力电池 SOC 变化区间极差最小,减少能量转化损耗,又能防止燃料电池系统功率的频繁变载。动力电池 SOC 高位均衡控制技术极大地发挥了其整车平均需求功率预测的自适应特性,在提高整车经济性的同时,减少了燃料电池功率变载及动力电池吞吐量,提高了动力电池及燃料电池的使用寿命。

参考文献:

- [1] 元勇伟,许思传,万玉. 燃料电池汽车动力总成方案分析[J]. 电源技术, 2017, 47(1): 165-168.
- [2] 蒋永琛. 增程式电动客车能量管理控制策略研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [3] 王旭峰. 燃料电池混合动力机车建模及能量管理策略研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [4] 张来云. 增程式燃料电池汽车动力系统匹配及能量管理策略研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2016.
- [5] 朱东彬,王喜洋,李艳文. 混合动力电动汽车能量管理策略研究进展[J]. 机械设计与制造, 2020(3): 293-296.
- [6] 牛继高,徐春华,牛丹彤,等. 增程式电动汽车规则型能量管理策略对比[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 266-272.
- [7] 程飞,赵韩,尹安东,等. 插电式并联混合动力汽车模糊控制策略设计与仿真[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2015(9): 1159-1164.
- [8] ZHANG Shou, XIONG Rui, SUN Fengchun. Model predictive control for power management in a plug management in a plug-in hybrid electric vehicle with a hybrid energy storage system[J]. Applied Energy, 2017(185): 1654-1662.
- [9] 林歆悠,孙冬野. 基于 ECMS 混联式混合动力客车工况识别控制策略[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 39(10): 43-49.
- [10] PÉREZ L V, BOSSIO G R, MOITRE D, et al. Optimization of power management in an hybrid electric vehicle using dynamic programming[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2006, 73(1): 244-254.
- [11] 彭靖宇. 智能网联插电式混合动力汽车协同优化能量管理策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [12] 陈景夫. 面向动力电池衰减的增程式电动客车能量管理策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
- [13] 全国汽车标准化技术委员会. 燃料电池电动汽车氢气消耗量测量方法: GB/T 35178—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 7.

◆ 广告目次

中车时代电动汽车股份有限公司	(封面)	太原泰立机电新技术有限公司	(前插一)
厦门金龙旅行车有限公司	(封二)	中通客车股份有限公司	(前插二)
《客车技术与研究》理事会名录	(封三)	公益广告	(后插一)
期刊信息	(封底)	厦门金龙联合汽车工业有限公司	(后插二)