

燃料电池混合动力客车整车控制策略*

曹桂军 卢兰光 李建秋 何彬 欧阳明高

(清华大学汽车安全与节能国家重点实验室 北京 100084)

摘要: 汽车能耗和排放污染问题近年来已引起广泛关注,以氢气为燃料的燃料电池汽车是实现近零排放的可行途径。在燃料电池混合动力客车中,整车经济性和燃料电池发动机的耐久性及其可靠性在很大程度上取决于整车能量管理策略的优劣。对能量混合型燃料电池城市客车基于电压控制的能量管理策略和基于电流控制的能量管理策略进行讨论,由于蓄电池输出电流对总线电压的变化敏感,使得基于电压控制的能量管理策略在实际中应用效果并不理想,而基于电流控制的能量管理策略更适合能量混合型燃料电池城市客车。基于电流控制的能量管理策略包括能量分配和动态滤波两个部分,这种策略构成能够保证燃料电池发动机平稳运行和蓄电池组的合理使用。道路试验结果表明,基于电流控制的能量管理策略很大程度改善了整车经济性和可靠性。

关键词: 混合动力汽车 能量管理 燃料电池

中图分类号: TP271

Supervisory Control Strategies for Fuel Cell Hybrid Electric Bus

CAO Guijun LU Languang LI Jianqiu HE Bin OUYANG Minggao

(State Key Laboratory of Automobile Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: The problem of vehicle energy consumption and exhaust pollution has caused wide public concern over recent years, and the use of hydrogen fuel has been repeatedly demonstrated to be a viable approach to achieving near-zero emission from fuel cell vehicle. In fuel cell hybrid electric bus, the fuel economy and the durability and reliability of fuel cell engine depend largely on the complete vehicle energy management strategy. The energy management strategy based on voltage control is compared with the energy management strategy based on current control. The comparison result shows that the latter strategy is more suitable for the energy hybrid bus, because battery current is sensitive to bus voltage variation. In order to ensure the optimal operation of fuel cell engine and battery sets, energy distribution and dynamic filtering methods are included in the energy management strategy based on current control. Finally road test results show that complete vehicle fuel economy and reliability have been greatly improved.

Key words: Hybrid electric vehicle Energy management Fuel cell

0 前言

燃料电池混合动力车辆具有实现零排放和高效的优点^[1-2],特别适合于城市客车^[3],其开发受到世界众多国家、企业和研究机构的关注。然而,燃料电池城市客车能量管理策略开发过程中需要考虑的因素众多,不仅要保证原型车动力性,降低整车的燃油消耗水平,而且要考虑燃料电池发动机的耐久性及其可靠性和蓄电池组的循环寿命,特别是目前技术条件下的燃料电池系统动态响应还不宜剧烈的问题。这些指标使整车能量管理策略开发难度加大,

需要长期的研发过程。

能量混合型燃料电池城市客车动力系统(图1)中,燃料电池+DC/DC组成的功率辅助单元和蓄电池组通过公共总线向驱动电动机供电来驱动车辆,在制动过程中系统还可以进行制动能量回收。整车控制器通过控制器局域网(Controller area network, CAN)总线与其他控制器进行通信。客车基本参数如表所示。在这种构型的燃料电池混合动力客车中,DC/DC变换器是整车控制器实施能量管理策略的执行部件,通常采用电压和电流两种控制策略。由于燃料电池和蓄电池组的输出特性不同,而两者共用两路总线,所以采用DC/DC变换器直接调节燃料电池发动机的输出特性,或者间接调节蓄电池组的输出特性,使两者协调工作,共同为电动机提供驱

* 国家高技术研究发展计划资助项目(863计划,2005AA501110)。20070526收到初稿,20071220收到修改稿

动能量^[4-5]。文献[6]通过电动机需求功率, 燃料电池和蓄电池组输出功率能力的判断来进行相应的能量分配; 文献[7]采用模糊控制方法, 以蓄电池组荷电状态(State of charge, SOC)值和蓄电池组电流为输入变量, 燃料电池电流为输出变量进行控制; 文献[8]讨论了燃料电池混合动力系统4种能量管理策略, 第4种策略以蓄电池组SOC值和电动机功率为输入, 通过模糊规则控制DC/DC输出功率。以上方法以稳态时的能量分配为重心, 兼顾动态过程的能量分配, 造成了对稳态和动态能量分配的耦合调节, 实际应用中需要大量的标定工作。

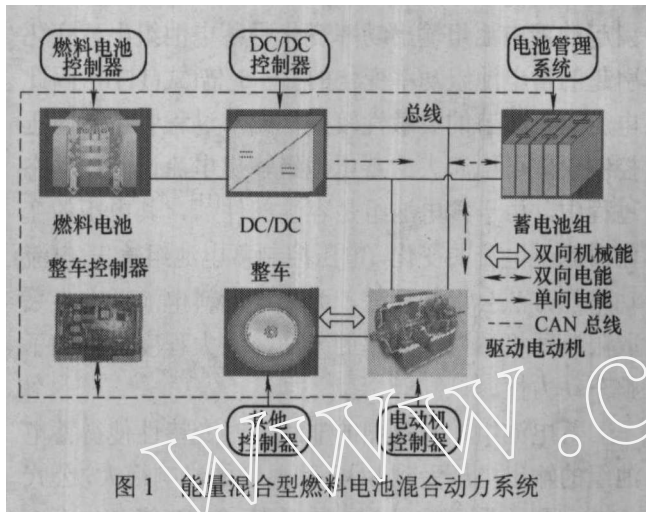


图1 能量混合型燃料电池混合动力系统

表 燃料电池混合动力客车参数

部件	参数	数值
燃料电池	额定功率 P/kW	65
	类型	铅酸电池
蓄电池组	标准电压 U/V	336
	容量 $C/(A \cdot h)$	85
DC/DC	类型	单向, 降压
	额定功率 P/kW	90
电动机	类型	三相异步
	最大功率 P_{max}/kW	120
	最高转速 $n/(r \cdot min^{-1})$	7 200
整车	整车质量 m/kg	15 000
	风阻系数 C_d	0.65

基于规则的能量管理算法的优劣很大程度上取决于人的经验。新的基于模型的控制算法也在展开研究。文献[3]中以系统功率损失最小为目标, 通过离线优化后, 得出优化曲线并通过表格形式用于实际控制; 文献[9]基于系统等效燃油消耗最小来进行系统能量管理策略优化; 文献[10]采用随机动态规划的结果设计出伪随机动态规划控制器, 可以在不同SOC和需求功率下得到次优的燃料电池目标需求功率。由于整个系统的非线性特性较强, 优化结果依然需要进行实际调整。

从工程实际出发, 基于规则的能量管理策略清晰简单且工程开发周期短, 本文所采用的能量管理

策略属于基于规则的能量管理策略范畴。针对工程开发过程中存在的实际问题, 对基于电压控制和基于电流控制的两种能量管理策略进行分析, 并对基于电流控制的能量管理算法进行改进, 取得了较好的工程结果。

本文共分为4个部分, 首先对燃料电池城市客车整车控制系统进行了介绍, 然后对基于电压控制的能量策略中存在的问题进行了描述, 对基于电流控制的能量管理策略进行详细阐述和补充, 并结合路试结果说明了该算法对整车工作性能的改善, 最后提出了整车能量管理算法的进一步工作。

1 燃料电池城市客车整车控制系统

燃料电池城市客车整车控制系统根据司机踏板信号、开关信号和各个系统子部件通过CAN总线发送的信息, 通过信号处理后, 进入到整车控制算法中, 进行司机驾驶意图解释、行车模式判断、故障检测和能量分配。图2为整车控制系统功能模块示意图, 该能量管理策略是一种基于电压控制的能量管理策略。整车模式判断模块通过对钥匙位置和燃料电池系统及DC/DC状态的判断, 决定燃料电池的启停和整车驱动方式(混合驱动, 纯电动); 驾驶意图识别模块通过对司机踏板和电动机转速的查表分析, 得出电动机的原始转矩, 与转矩修正项相加后, 得出电动机的目标转矩; 故障诊断模块根据混合动力系统中各部件的状态和环境监测数据, 及时对混合动力系统中动力部件(蓄电池组, 电动机和燃料电池发动机)功率输出进行调整, 同时发出不同级别的报警信号提醒驾驶员, 保证行车的安全性; 能量管理模块则负责执行对DC/DC控制命令的解释。

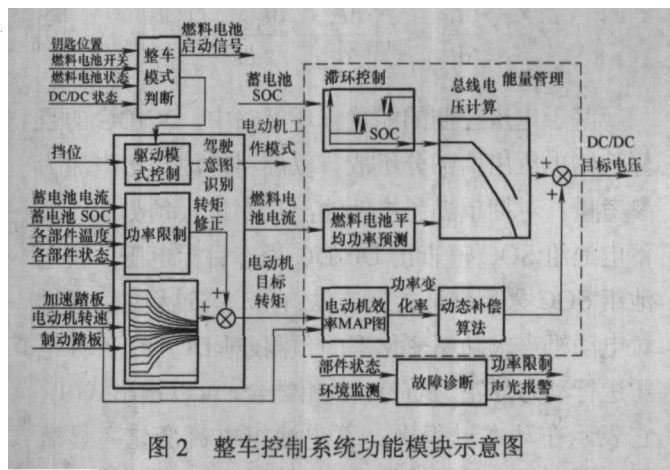


图2 整车控制系统功能模块示意图

2 基于电压控制的能量管理策略

在基于电压控制的能量管理策略(图2)中, 根据

一定的规则来进行能量分配^[3-6]。式(1)~(4)给出了蓄电池组功率与电动机需求功率和 DC/DC 输出功率的稳态关系。本质上讲, 稳态下对三者之间能量的分配可以简化成三者电流之间的分配, 见式(5), 但蓄电池组的输出电流不能直接调整, 只能依靠对总线电压的调整来调节蓄电池组的输出电流

$$P_{\text{bat}} = P_{\text{mi}} - P_{\text{DC/DC}} \quad (1)$$

$$P_{\text{mi}} = U_t I_{\text{mi}} \quad (2)$$

$$P_{\text{bat}} = U_t I_b \quad (3)$$

$$P_{\text{DC/DC}} = U_t I_{\text{DC/DC}} \quad (4)$$

$$I_b = I_{\text{mi}} - I_{\text{DC/DC}} \quad (5)$$

$$U_t = K_0 - R_b I_b - K_1 / S_c - K_2 S_c + K_3 \ln S_c + K_4 \ln(1 - S_c) \quad (6)$$

式中 $P_{\text{mi}}, I_{\text{mi}}$ ——电动机需求功率与输入电流

P_{bat}, I_b ——蓄电池组功率与蓄电池组电流

$P_{\text{DC/DC}}, I_{\text{DC/DC}}$ ——DC/DC 输出功率与电流

U_t ——蓄电池组终端电压或总线电压

R_b ——蓄电池组内部阻值

S_c ——蓄电池组荷电状态

K_0, \dots, K_4 ——待标定系数

式(6)给出了蓄电池组端电压和输出电流之间的关系。它是一种简化电化学方程, 由 PLETT 在 2002 年得出, 文献[11]曾经对这个方程进行过系数标定。如果对式(6)进行化简, 可得出铅酸蓄电池组建模时常用的 Rint 模型。从式(6)看出, 蓄电池组输出电压和电流有近似线性的关系

$$\frac{dP_{\text{bat}}}{dt} = \frac{dP_{\text{mi}}}{dt} - \frac{dP_{\text{DC/DC}}}{dt} \quad (7)$$

$$I_{\text{mi}} = I_{\text{DC/DC}} + I_b \quad (8)$$

$$U_t \frac{dI_b}{dt} = U_t \left(\frac{dI_{\text{mi}}}{dt} - \frac{dI_{\text{DC/DC}}}{dt} \right) \quad (9)$$

基于电压控制的能量管理策略中, DC/DC 的目标控制电压由两部分组成。以燃料电池输出电流为参考量, 对期望燃料电池输出功率进行预测, 结合蓄电池组 SOC 值查出 DC/DC 稳态目标电压, 蓄电池组 SOC 采用滞环控制方法; 在动态过程中, 通过对电动机需求功率变化率的预测, 对 DC/DC 目标电压进行动态修正。式(7)、(8)相结合, 可以推出式(9), 它表示在动态过程中, 蓄电池组电流变化率显著影响着燃料电池发动机功率变化率。理论上讲, 在电压控制能量管理策略中, 通过快速调节总线电压, 也可使蓄电池组输出电流很快变化, 以减小 DC/DC 输出电流的变化率, 从而避免燃料电池发动机出现

剧烈的功率波动

$$\frac{\Delta U_t}{\Delta I_b} = -R_b \quad (10)$$

$$\frac{dP_{\text{bat}}}{dU_t} / \frac{dP_{\text{bat}}}{dI_b} = \frac{dI_b}{dU_t} = -\frac{1}{R_b} \quad (11)$$

然而, 实际中基于电压控制策略并不理想。式(10)中, 稳态时蓄电池组电压变化和电流变化之间的关系近似成正比, 试验车上采用的铅酸蓄电池组的放电内阻在正常使用中, SOC 在 0.3~0.9 范围内, 不超过 0.2 Ω , 充电内阻也小于 0.4 Ω 。电压变化引起的蓄电池组输出功率变化是蓄电池组电流变化引起的蓄电池组功率变化的 3~5 倍(式(11)), 因此电压控制调节的灵敏性较高, 调节过程中小的电压控制误差可引起大的蓄电池组输出电流误差; 动态过程中, 由于蓄电池组是容性部件^[11], 其电压的变化滞后于电流的变化, 电压控制蓄电池组输出(电流)功率的方法会增加误差。为减小燃料电池动态, 采取限制司机油门变化率的方法, 很大程度上影响了整车动力性。

蓄电池组本身强烈的非线性时变特性使得蓄电池组的输出电压受到 SOC 和温度的影响很大, 公式(6)中可以看到蓄电池组端电压随 SOC 值变化而变化, 同时蓄电池组 SOC 值难于精确估计。所以 DC/DC 控制电压目标值也很难精确给定。

基于电压控制策略来控制 DC/DC 的方法, 本质上是使蓄电池组主要工作在低频带, 而燃料电池发动机满足整车高频功率需求, 如突然加速状况等。基于电压控制的能量管理策略不利于燃料电池发动机的工作性能优化和保护, 需要进行改进。

3 基于电流控制的新型能量管理策略

3.1 基于电流控制的稳态能量管理策略

基于电流控制的新能量管理策略中, 整车模式判断、司机驾驶意图解释和故障诊断三个模块与电压控制策略基本相同, 只是在能量管理模块上有较大差异, 如图 3 所示。

能量管理模块中根据踏板输入和当前车速, 预测电动机目标转矩, 计算电动机的功率需求, 并结合蓄电池组的 SOC 值来决定下一控制周期蓄电池组功率输出和燃料电池功率输出。蓄电池组稳态输出功率分配可参考文献[8]中第三种方法。本策略中采用基于 SOC 的蓄电池组输出功率预测方法, 见图 4。

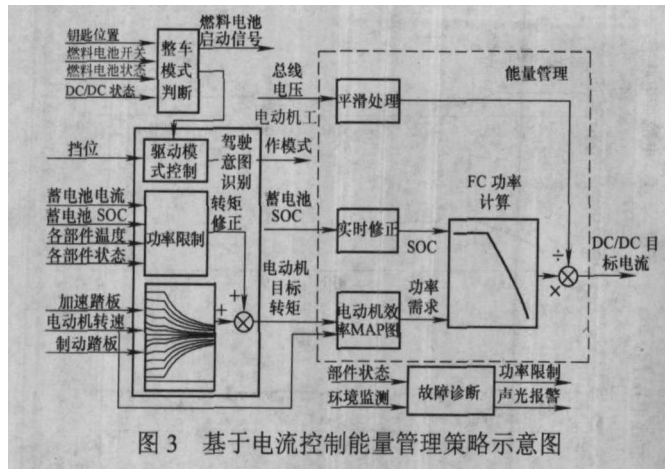


图3 基于电流控制能量管理策略示意图

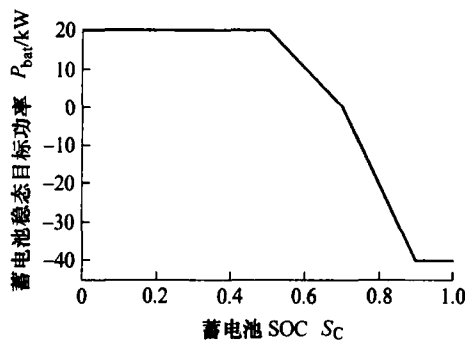


图4 基于SOC值的蓄电池组输出功率预测曲线

在基于电流控制的能量管理策略中，分配给燃料电池的输出功率，除以总线电压，即DC/DC需要输出的目标电流。见式(12)、(13)

$$P_{DC/DC} = P_{mi} - P_{bat}(S_c) \quad (12)$$

$$I_{DC/DC} = P_{DC/DC} / U_t \quad (13)$$

$$I_{DC/DC} = I_{mi} - I_b \quad (14)$$

$$U_t \frac{dI_{DC/DC}}{dt} = U_t \left(\frac{dI_{mi}}{dt} - \frac{dI_b}{dt} \right) \quad (15)$$

基于电流控制的能量管理策略中，通过直接控制DC/DC输出电流 $I_{DC/DC}$ ，达到稳态时的能量分配(式(14))；动态时直接调节燃料电池功率输出变化率(式(15))。电流控制策略的本质在于保护燃料电池发动机，由蓄电池组来承担电动机输入的高频功率需求。

3.2 基于电流控制的动态能量管理策略

车辆动态过程中，燃料电池发动机的动态响应特性和蓄电池组的动态响应特性需要仔细考虑，以优化混合动力系统的控制效果。由于蓄电池组SOC值在短时间动态过程中变化不大，因此基于图4查出的蓄电池组输出功率在动态过程中基本不发生变化，蓄电池组输出电流变化较小。这样从式(12)、(13)计算得到的 $I_{DC/DC}$ 会随电动机输入电流 I_{mi} 剧烈变化，式(15)中计算出的DC/DC输出电流的变化率很大。

燃料电池发动机依靠氢气和空气中的氧气在燃料电池中反应产生电能。压气机出口的空气经过增

湿后直接进入燃料电池堆中。在动态加载过程中，压气机的动态特性与电化学反应相比较为缓慢，造成空气过量比系数降低，引起局部缺氧。同时使得质子交换膜两侧反应压力处于不平衡状态；水管理系统也要及时响应燃料电池的动态过程，防止质子交换膜两侧出现水淹现象；动态过程中燃料电池堆驱动附件的寄生功率也会显著增加^[12-14]。因此必须对燃料电池发动机的动态过程进行合理的限制。

蓄电池组输出功率变化的时间常数一般来说小于燃料电池组的动态变化时间常数^[15]，由蓄电池组短时间内响应电动机需求功率的变化更为理想。因此，决定对动态过程中DC/DC输出目标电流 $I_{DC/DC}$ 进行动态滤波处理。

基于普通低阶滤波器，采用双线性变换^[16]，得到

$$I_{DC/DC_dc}(k) = I_{DC/DC_dc}(k-1) + \frac{[I_{DC/DC_sc}(k) - I_{DC/DC_dc}(k-1)] \frac{T_s}{T_f} \left(1 - \frac{T_s}{2T_f} \right)}{T_f} \quad (16)$$

$$I_{DC/DC_dc}(k) = I_{DC/DC}(k-1) + \frac{[I_{DC/DC_sc}(k) - I_{DC/DC}(k-1)] \frac{T_s}{T_f} \left(1 - \frac{T_s}{2T_f} \right)}{T_f} \quad (17)$$

式中 I_{DC/DC_dc} ——滤波后的DC/DC目标电流

I_{DC/DC_sc} ——滤波前的DC/DC目标电流

$I_{DC/DC}$ ——DC/DC输出电流的实际值

T_s ——控制周期

T_f ——滤波时间常数

考虑动态过程中DC/DC需要对目标指令进行反馈控制，目标值 $I_{DC/DC_dc}(k-1)$ 和DC/DC实际输出电流值 $I_{DC/DC}(k-1)$ 之间会有差异，而式(16)中没有考虑这一DC/DC响应特性的差异，会造成DC/DC控制误差累积到DC/DC控制电流目标值 $I_{DC/DC_dc}(k-1)$ 中。因此，对式(16)进行调整，以DC/DC实际输出电流值代替目标值对下一周期目标电流滤波，如式(17)所示。在动态过程中，燃料电池发动机输出功率的限制曲线为20 kW/s。对式(17)进行仿真可知，通过调整滤波时间常数 T_f ，得到期望的燃料电池动态输出电流的变化。

从图5中可以看出，实车调试中不平稳的DC/DC目标输出电流未经滤波前变化非常剧烈，而滤波后的目标电流动态过程有所减轻，滤波时间常数对DC/DC输出电流影响很明显。

相对于基于两个或者多个输入参数，例如需求功率和蓄电池组SOC值来确定燃料电池输出的能量分配策略^[8]，这种以单变量SOC值决定稳态能量分配，而以滤波决定动态能量分配的方法，将能量

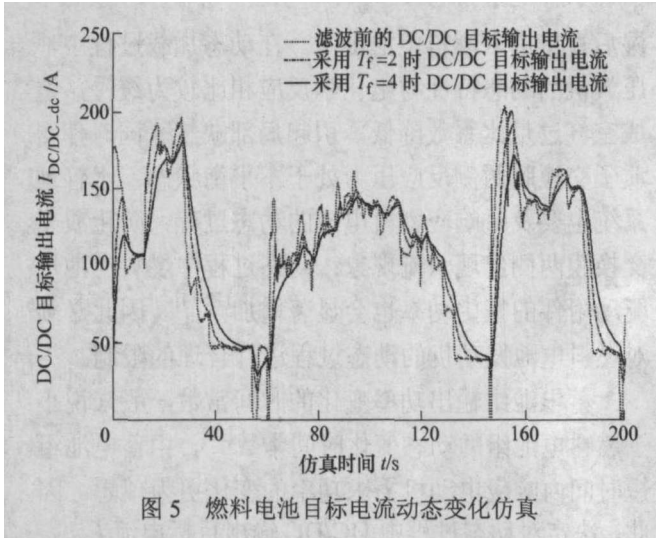


图 5 燃料电池目标电流动态变化仿真

分配的稳态和动态控制解耦，便于在工程中快速实现，且能够准确调节滤波参数，实现燃料电池工作稳态和动态工作的优化；同时，为保证整车动力性，要对基于 SOC 值的蓄电池组稳态能量输出预测(图 4)进行仔细调试，使蓄电池组 SOC 保持在 0.5~0.9 区间，在车辆蓄电池组的使用寿命期内，整车动力性不出现严重下降。

4 路试试验结果对比分析

在实车调试中，选择同样的车辆载荷状态和试验路线，对基于电压控制的能量管理策略和基于电流控制的能量管理策略进行了道路试验。本文选取的试验结果来自实车采集数据，其中蓄电池组 SOC 值保持在 0.61~0.64 之间，可以认为基本恒定。车速选择两个加速减速试验进行对比，且不考虑制动能量回馈。

图 6 显示了基于电压控制能量管理策略的试验结果。在该种控制下，DC/DC 输出电流跟随电动机输入电流的高频变化，而蓄电池组则无法在加速或者减速过程中对电动机电流变化进行补偿。所以 DC/DC 输出电流变化很大，不利于燃料电池发动机安全运行。当 DC/DC 输出电流过大时，需要降低总线电压，让蓄电池组输出更多的功率，但电压调节的敏感性使蓄电池组突然输出很大电流，而 DC/DC 系统则无法输出电流；此时小幅度增加母线电压，又会使燃料电池突然发生大功率输出，故燃料电池输出功率变化率非常大。参见 800~850 s 间电流变化曲线，在 807 s 时，总线电压从 340 V 降低到 320 V 时，蓄电池电流从 70 A 增加到 280 A，而 DC/DC 输出电流则从 200 A 降低到 50 A；在 811 s 时，调整总线电压从 319 V 到 331 V，DC/DC 电流突然从 0 增加到 174 A，燃料电池输出功率变化率为 57.6 kW/s。这对燃料电池的正常工作是不利的。

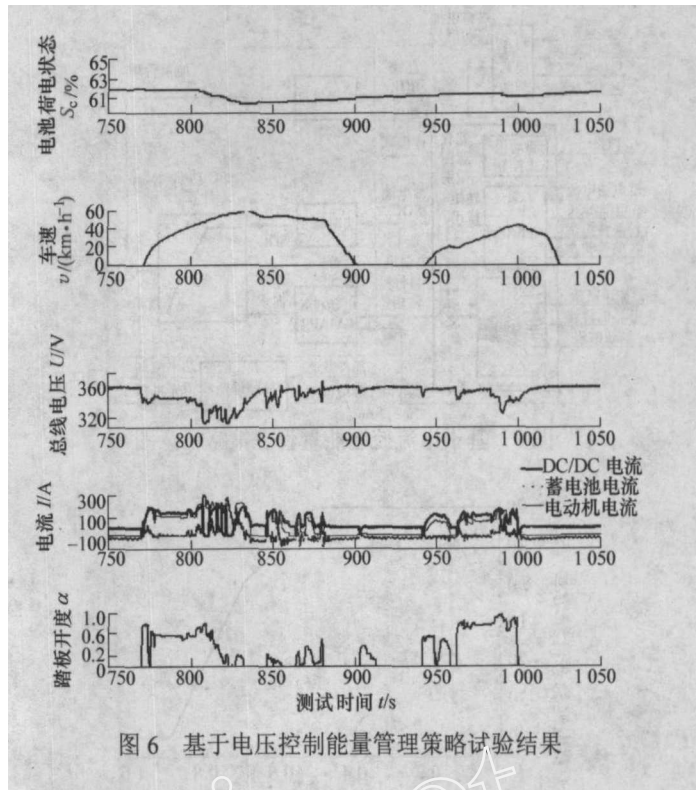


图 6 基于电压控制能量管理策略试验结果

图 7 显示了基于电流控制的能量管理策略试验结果。可以看出 DC/DC 在动态过程中输出电流平缓变化，而蓄电池组电流有效补充动态过程中电动机的输入电流变化，在满足电动机功率需求同时，改善了燃料电池发动机效率和运行安全性；同时在稳态过程中，根据图 4 制定的分配规则，蓄电池组消耗能量会被燃料电池发动机及时补充。驱动系统的高频动态功率主要由蓄电池组来承担，而燃料电池发动机工作平稳，无剧烈的功率波动现象。参照 1 750~1 775 s 间电流变化。

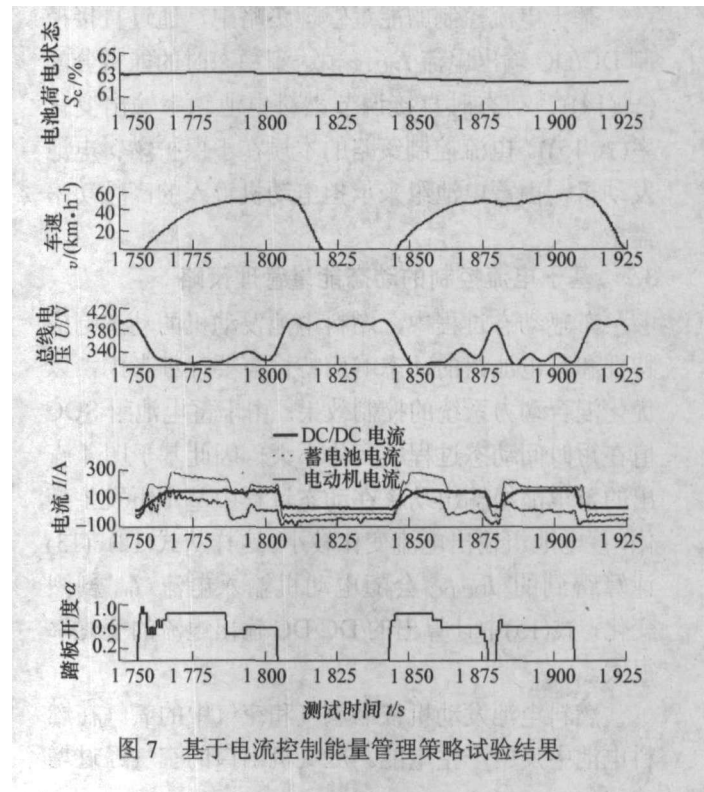


图 7 基于电流控制能量管理策略试验结果

5 结论

(1) 通过对燃料电池混合动力系统基于电压控制和基于电流控制两种能量管理策略的分析, 认为基于电流控制的能量管理策略在能量型混合动力系统上更具有潜力。

(2) 开发了基于电流控制的能量管理策略, 结果表明, 该种策略能有效保护燃料电池发动机, 同时兼顾能蓄电池组功能, 整车燃油经济性和系统安全性都有显著提高。

(3) 对氢消耗量的统计显示, 在固定路线考核情况下, 基于电压控制的能量管理策略平均耗氢量为 7.5 kg/100 km; 而基于电流控制的能量管理策略平均耗氢量为 6.5 kg/100 km(1.3 万 km 考核中前 0.4 万 km 数据)。该型客车已经安全运行 4.2 万 km。

(4) 进一步的工作将对稳态能量管理策略进行优化, 进行基于模型的滤波常数优化设计, 使整体燃油经济性提高, 同时开展基于工况的优化算法在实车上的应用研究。

参 考 文 献

- [1] AHLUWALIA R K, WANG X, ROUSSEAU A, et al. Fuel economy of hydrogen fuel cell vehicles[J]. *Journal of Power Source*, 2004, 130: 192-201.
- [2] AHLUWALIA R K, WANG X, ROUSSEAU A. Fuel economy of hybrid fuel-cell vehicles[J]. *Journal of Power Source*, 2005, 152: 233-244.
- [3] YOKOYAMA Tatsuaki, NAGANUMA Yoshiaki, KURIYAMA Katsushi, et al. Development of fuel-cell hybrid bus [R]. SAE Paper, 2003-01-0417.
- [4] 陈超. 燃料电池城市客车整车控制器软件设计[D]. 北京: 清华大学, 2006.
CHEN Chao. Software design of vehicle control unit of fuel-cell city bus[D]. Beijing: Tsinghua University, 2006.
- [5] 何彬. 串联式混合动力汽车能量管理及其动态控制研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.
HE Bin. Energy management and dynamic control of series hybrid vehicle[D]. Beijing: Tsinghua University, 2006.
- [6] GAO Y, EHSANI M. Systematic design of fuel cell powered hybrid vehicle drive train[C]//IEEE Int. Electric Machines and Drives Conf., June 17-20, 2001, Cambridge, MA, USA. New York: IEEE Press, 2001: 604-611.
- [7] AHN H S, LEE N S. Power distribution control law for FCHEV—a fuzzy logic-based approach[C]//Int. Conf. on Control and Automation, June 26-29, 2005, Budapest, Hungary. New York: IEEE Press, 2005: 486-490.
- [8] 卢兰光, 何彬, 欧阳明高. 燃料电池城市客车能量分配算法研究[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(12): 8-12.
LU Languang, HE Bin, OUYANG Minggao. Energy management strategies for fuel cell hybrid electric vehicle [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(12): 8-12.
- [9] PAGANELLI G, GUEZENNEC Y, RIZZONI G. Optimizing control strategy for hybrid fuel cell vehicle[R]. SAE Paper, 2002-01-0102.
- [10] KIM M J, PENG Hui. Combined control/plant optimization of fuel cell hybrid vehicles[C]//Proc. of the American Control Conf., June 14-16, 2006, Minneapolis, Minnesota, USA. New York: IEEE Press, 2006: 496-501.
- [11] 林成涛. 电动汽车用镍氢电池组的建模与管理技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
LIN Chengtao. Research on the modeling and management of nickel metal hydride battery packs for electric vehicles[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.
- [12] 胡呈清, 夏建伟, 傅明竹, 等. 运行参数的动态控制对 100 kW 燃料电池系统效率及稳定性的影响[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(12): 48-53.
HU Liqing, XIA Jianwei, FU Mingzhu, et al. Influence of dynamic controlling the operation parameters on 100KW fuel cell power system efficiency and performance stability[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(12): 48-53.
- [13] PUKRUSHPAN J T, STEFANOPOULOU A G, PENG Hui. Control of fuel cell power systems. Principles, modeling, analysis and feedback design[M]. London: Springer, 2004.
- [14] 包成. 车用质子交换膜燃料电池建模方法与控制技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
BAO Cheng. Modeling and control of vehicular PEM fuel cell systems[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.
- [15] NASIRI A, RIMMALAPUDI V S, EMADI A, et al. Active control of hybrid fuel cell-battery system[C]//Power Electronics and Motion Control Conference, August 14-16, 2004, Xi'an, China. New York: IEEE Press, 2004: 491-496.
- [16] 胡广书. 数字信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
HU Guangshu. Digital signal processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

作者简介: 曹桂军, 博士研究生。主要研究方向为串联式混合动力系统功率辅助单元控制。

E-mail: cgj04@mails.tsinghua.edu.cn