

基于自适应滤波的燃料电池混合动力系统多能源管理策略研究^①

胡 帅^② 贲海涛^③ 赵玉兰 李正辉 魏永琪

(青岛理工大学机械与汽车工程学院 青岛 266520)

摘要 为了满足燃料电池汽车实际行驶中的高能量和高功率的要求,本文针对“燃料电池+蓄电池+超级电容”的多能源混合动力系统,比较了3种能量源的自身性能特征。为使燃料电池和蓄电池在大幅度瞬态变化的工况中遭受尽可能少的冲击,在基于滤波的能量管理策略的基础上,运用有限状态机控制滤波频率的自适应变化来保证实际运行工况下的最佳功率分配。仿真结果表明,该方法在保证系统动力性要求的同时,可以有效地减少高频变化的负载电流对燃料电池系统的冲击。

关键词 燃料电池系统; 自适应滤波; 有限状态机; 能量管理策略

0 引言

随着全球环境污染问题的日益严重以及化石能源的日渐枯竭,发展无污染可再生的新能源汽车是大势所趋。在所有的新能源汽车中,发展燃料电池汽车是一个被公认的终极目标^[1]。但是由于燃料电池启动和运行的动态响应较慢,难以满足车辆行驶过程中需求功率的快速变化,所以把燃料电池和一个或多个辅助能量源混合使用是解决这一问题的重要方法^[2]。燃料电池混合动力系统的参数匹配、能量管理策略及其各部件的性能将决定整车的动力性和经济性^[3]。其中能量管理策略研究的是如何最优地在各能量源之间分配负载电流,因此合适的能量管理策略对整车的动力性和经济性有着重大影响^[4]。能量管理策略有多种,目前被研究和应用较多的包括负载跟随控制策略、基于有限状态机优化的控制策略、基于模糊控制系统的自适应能量管理、等效氢耗优化控制、基于神经网络或动态规划的能量管理策略等^[5-8],但是这些能量管理策略要么没有充分考虑实际行驶工况大幅度瞬变的负载电流对燃料电池和蓄电池的冲击,要么过于复杂而需要大

量的计算工作。在整车能量管理策略中,应该考虑到准确性和简单性之间的折衷^[9]。

本文针对包含3种能量源混合动力系统,在基于滤波的能量管理策略^[10]的基础上,为保证实际驾驶条件下实现最佳的功率分配,提出了一种利用有限状态机控制滤波频率自适应变化的能量管理策略。在能量分配过程中,能充分发挥超级电容动态响应性好、燃料电池的比能量高和蓄电池稳定性好的特点,有利于延长和提高系统的使用寿命和性能。

1 基于自适应滤波的能量管理策略

1.1 燃料电池混合动力系统结构

许多燃料电池混合动力系统的结构已被研究和公开发表^[11-13],本文选择的拓扑图如图1所示。质子交换膜燃料电池(FC)、蓄电池(BAT)和超级电容(SC)并联在直流母线上,可通过各自的DC-DC变换器同时或单独地给牵引电机的控制器提供电能,这种混合动力系统结构在控制直流母线电压方面提供了更大的灵活性,容易实现直流母线电压在运行期间保持稳定。

^① 国家自然科学基金(51505215),山东省自然科学基金面上(ZR2019MEE089)和山东省重点研发计划(2018GGX103030)资助项目。

^② 男,1994年生,硕士生;研究方向:燃料电池混合动力系统的设计与控制;E-mail: hs_ok8@163.com

^③ 通信作者,E-mail: yunht@163.com

(收稿日期:2019-11-05)

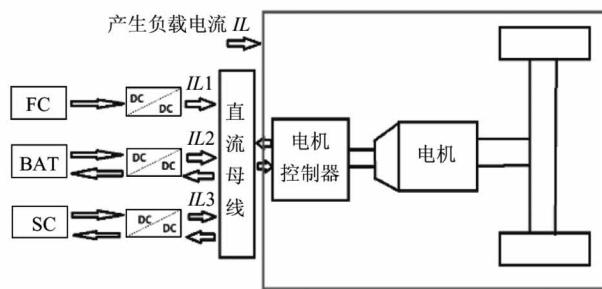


图 1 燃料电池混合动力汽车结构

1.2 3 种能量源特征

图 2 呈现了 3 种能量源的比能量和比功率的比较^[14], 可以看出氢燃料电池具有高比能量和低比功率的特点, 比能量高使其能够源源不断地提供动力, 而低比功率显著地限制了其在快速动态应用中的性能, 如启动时间长、动态响应慢等。蓄电池经过不断的发展已具有工作温度范围宽、自放电率低、比能量高等优点。然而, 尽管蓄电池技术已经取得了长足的进步, 但其充放电的频率仍然是导致电池老化的主要因素。与蓄电池相比, 超级电容具有更高的功率密度、更长的使用寿命和更短的充放电时间, 可以适应负载电流的快速变化。蓄电池和超级电容作为辅助能源可以更好地满足燃料电池混合动力汽车的动力需求^[11]。

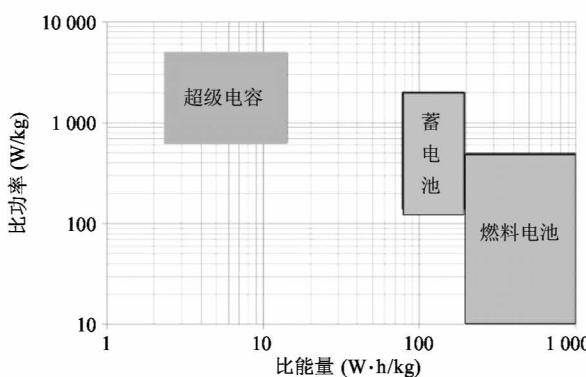


图 2 3 种动力源能量特征

1.3 基于滤波的能量管理

基于滤波的能源管理可以根据每个能源的适应频率和能量特征来分配其在运行过程中承担的负载电流。图 3 为整车负载电流分配的原理图, 可以看出基于滤波的能量管理策略通过设定 2 个滤波频率 (f_1, f_2) 将负载工况分割成 3 部分, 将低频 (low frequency, LF) 部分发送给燃料电池, 中频 (medium frequency, MF) 部分发送给蓄电池, 高频 (high frequency, HF) 部分由超级电容承担。若已知燃料电池和超级电容的比功率 (ρ^{power}) 和比能量 (ρ^{energy}), 负载电流滤波的频率参考值 f_1 和 f_2 便可由式(1)计算得出^[14]。基于滤波的能量分配策略通过使用 2 个具有不同截止频率 (f_1, f_2) 的低通滤波器, 将直流母线上的负载电流 IL 分解为 3 个不同频率的电流 $IL1, IL2$ 和 $IL3$, 以此作为燃料电池系统、蓄电池和超级电容系统输出电流的参考值^[14], 其关系式如式(2)所示。

$$f_c [\text{Hz}] = \frac{\rho^{\text{power}} [\text{W/kg}]}{\rho^{\text{energy}} [\text{J/kg}]} \quad (1)$$

$$\begin{cases} IL1 = \frac{2\pi f_1}{2\pi f_1 + S} IL \\ IL2 = \frac{2\pi f_2}{2\pi f_2 + S} (IL - IL1) \\ IL3 = IL - IL1 - IL2 \end{cases} \quad (2)$$

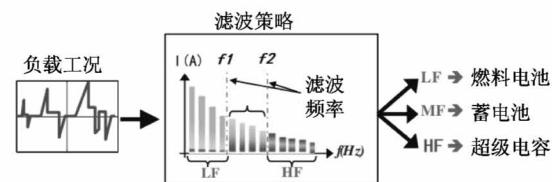


图 3 基于滤波的能量管理

1.4 自适应频率分配

由于车辆实际行驶工况会有频繁的启停和加减速, 只设定固定的滤波频率在实际驾驶条件下可能无法保证最佳的功率分配, 因此本文采用基于有限状态机控制滤波频率, 其主要原理是根据负载电流和超级电容的荷电状态 (state of charge, SOC) 来实时改变的二次滤波频率 f_2 的值, f_2 被分为低、中、高 3 个频段, 即 f_L, f_M 和 f_H 。

表 1 给出了本文选用的有限状态机控制规则, 共划分为 7 个状态来自适应的调整滤波频率 f_2 的取值。当负载电流小于 0 且超级电容 SOC 小于 0.3 时, f_2 取较小值以使超级电容回收更多频段的制动能量; 当负载电流大于 0 且超级电容 SOC 小于 0.3 时, f_2 应取较大值来减少能量的输出。其他情况与此类似, 故不再赘述。需要注意的是, 当负载电流为

0 时, 直流母线不需要各能量源的功率输出, 所以不管超级电容 SOC 的大小为多少, f_2 应取较大值来减少能量输出。

表 1 有限状态机控制规则

状态	负载电流	超级电容 SOC	f_2
1	$IL < 0$	$SOC < = 0.3$	f_L
2	$IL < 0$	$0.3 < SOC < 0.8$	f_M
3	$IL < 0$	$SOC > = 0.8$	f_H
4	$IL = 0$	/	f_H
5	$IL > 0$	$SOC < = 0.3$	f_H
6	$IL > 0$	$0.3 < SOC < 0.8$	f_M
7	$IL > 0$	$SOC > = 0.8$	f_L

2 仿真实验及结果分析

2.1 仿真工况

在实验室搭建了如图 1 所示的系统联调测试台架, 进行了模拟城市道路循环工况(urban dynamometer driving schedule, UDDS)的测试, 混合动力系统的 3 种能量源的相关参数见表 2。VCU 控制器中集成的是基于直流母线电压控制的能量管理策略, 每 100 ms 为一个采样点, 整个工况测试时长约 24 min。图 4 为直流母线负载电流, 即电机逆变器输入电流, 可以看出母线负载电流在此工况下变化非常剧烈。图 5 为超级电容 SOC 在 UDDS 工况下的变化情况。

表 2 3 种能量源相关参数

燃料电池	值
单体节数	200
额定电压	120 V
额定电流	230 A
蓄电池	值
额定能量	2 kW · h
额定电压	374 V
峰值功率	52 kW
超级电容	值
额定功率	55 kW
系统总能量	598 W · h
额定电流	250 A
峰值电流	350 A
总质量	90 kg

以上 2 个参数将作为本文提出的能量管理策略模型(见图 6)的输入。燃料电池系统输出电流、蓄电池输出电流和超级电容输出电流分别如图 7~9 所示。需要注意的是, 本文中各能量源的输出电流均指其后端 DC-DC 输出电流。

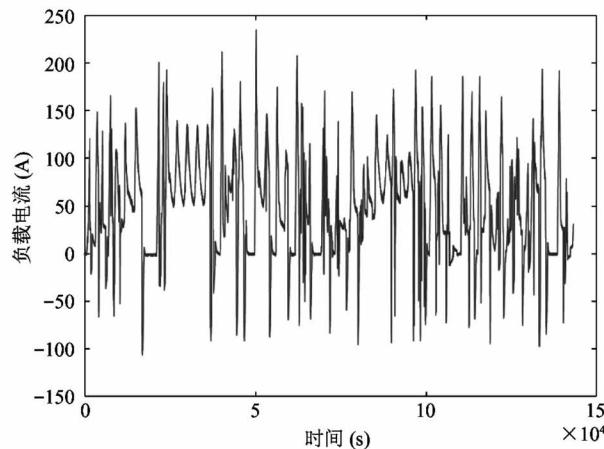


图 4 直流母线负载电流

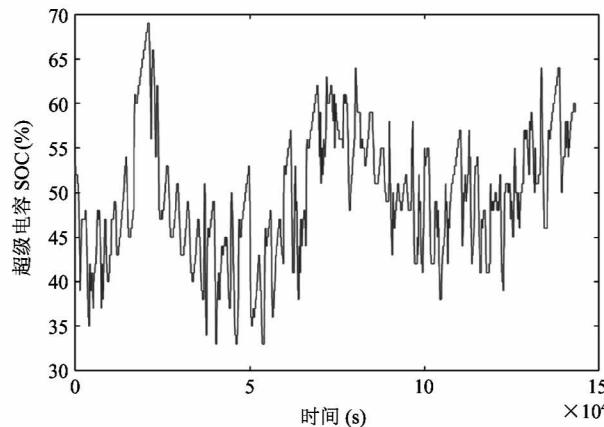


图 5 超级电容 SOC

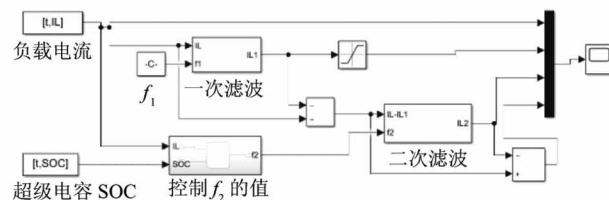


图 6 基于自适应滤波能量管理仿真模型

2.2 建模仿真及结果分析

在 Matlab/Simulink 平台上, 根据表 1 所示的有限状态机控制规则, 建立了控制策略模型如图 6 所

示。为确定滤波频率 f_1 、 f_2 的值,首先利用式(1)计算出滤波频率参考值,然后对模型不断仿真调试并根据动力系统匹配的需要来选取,本文模型仿真参数见表3。实验室台架测试的数据中的电机控制器输入电流(总负载电流)和循环工况测试过程中的超级电容SOC为控制策略模型的输入,使用离线SOC数据主要是为了与实验所采用的控制策略作比较,即在相同的运行情况下,比较并分析3种能量源工作情况,为后续模型的优化以及为其嵌入到整车控制单元中做准备。最后,实验和仿真的负载电流分配结果如图7~10所示。

表3 模型仿真的参数值

滤波频率	取值
f_1	0.0006 Hz
f_L	0.001 Hz
f_M	0.01 Hz
f_H	0.1 Hz

图7为台架联调测试的燃料电池系统输出电流和优化后的输出电流的对比,可以看出在台架联调测试采用的能量管理策略控制下,燃料电池系统被迫响应剧烈的负载变化,燃料电池输出电流会频繁地从最低允许输出电流20 A迅速上升到84 A,大幅度频繁的拉载将对燃料电池造成很大损害,减少使用寿命。与之相反,优化后的燃料电池输出电流相对较小且变化斜率较缓,大大减少了高频负载对燃料电池的冲击,这表明提出的控制策略能很好地利用蓄电池和超级电容的能量输出。

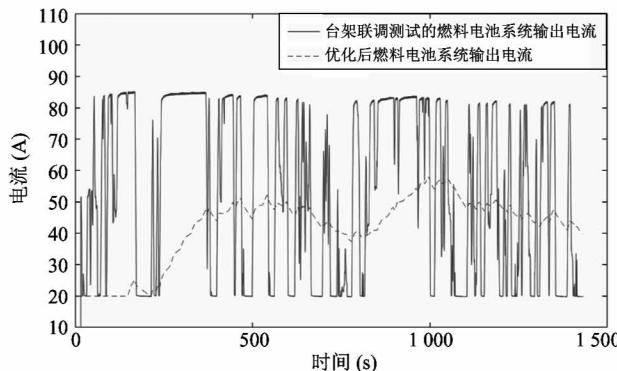


图7 燃料电池系统输出电流

图8为蓄电池输出电流,可以看出优化后的蓄电池输出电流的频率要小得多,避免了快充快放对蓄电池的寿命造成的损害。同时,优化后的蓄电池的输出电流较大表明其承担了部分燃料电池系统的输出电流。

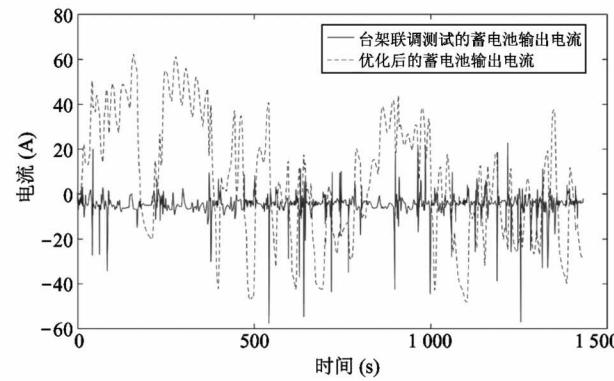


图8 蓄电池输出电流

图9为超级电容输出电流,可以看出优化后的超级电容输出电流保持了快充快放的特性,同时其输出电流峰值较大表明降低了燃料电池系统的负载电流,这将有利于降低燃料电池尺寸和成本。

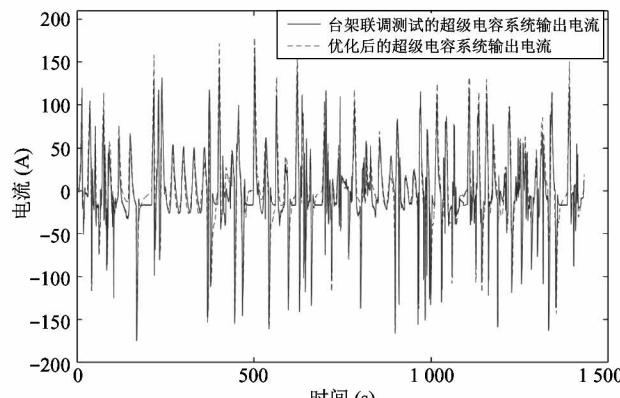


图9 超级电容输出电流

图10为超级电容分别在自适应滤波和固定滤波频率分配策略下的对比,2种策略唯一不同之处在于,后者的 f_2 被固定为0.01 Hz($=f_M$)。可以看出,在自适应滤波频率分配策略下,由于滤波频率 f_2 可以根据负载电流和超级电容SOC实时变化,超级电容输出电流可以更快地响应母线负载电流快速变化,这就意味着蓄电池遭受更少的冲击。

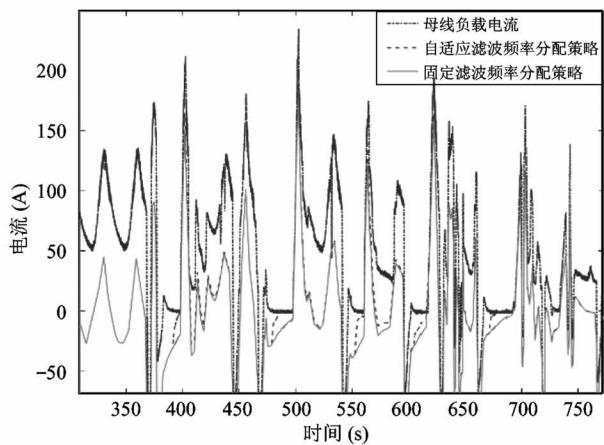


图 10 在 2 种不同能量管理策略下超级电容输出电流

3 结 论

针对燃料电池多能源混合动力系统,本文提出了一种基于自适应滤波的能量管理策略,通过 2 次滤波将负载电流划分成低、中、高 3 种频段的电流在不同的能量源之间分配。同时,利用有限状态机控制滤波频率的自适应变化来保证实际运行工况下的最佳功率分配。在 Matlab/Simulink 平台上搭建控制策略模型并利用已在实验室联调台架上的实测数据进行仿真分析。仿真结果表明,经自适应滤波能量管理策略优化后,燃料电池系统主要承担低频的功率输出,避免了被瞬间大幅度地拉载,有利于燃料电池寿命的延长。蓄电池和超级电容输出电流的增加减轻了燃料电池系统的负担,超级电容承担了高频变化的负载电流,减少了高频功率对系统的冲击。最后,与固定滤波频率分配策略相比,本文提出的能量分配策略由于滤波频率 f_2 可以根据负载电流和超级电容 SOC 实时变化,超级电容输出电流可以更快地响应负载电流的快速变化。

参 考 文 献

- [1] 倪红军,吕帅帅,陈青青,等. 氢电混合燃料电池汽车动力系统研究进展 [J]. 电源技术, 2015, 39(4): 855-856
- [2] 陈龙,王晓亮,盘朝奉,等. 燃料电池混合动力车能量管理策略研究 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2014, 33(1): 149-152
- [3] 贲海涛,徐煜超,曹爱霞,等. 燃料电池叉车动力系统结构设计与参数匹配 [J]. 济南大学学报(自然科学版), 2018, 32(1): 1-6
- [4] 张炳力,赵韩,吴迪,等. 基于小波变换的燃料电池混合动力系统多能源管理策略研究 [J]. 汽车工程, 2008, 30(10): 914-917
- [5] 赵荣海,王军政. 基于模糊控制的燃料电池混合动力系统能量管理研究 [J]. 上海汽车, 2018(2): 3-8
- [6] 周圣哲,朱磊,齐元豪,等. 燃料电池汽车运用有限状态机优化能量管理系统的研究 [J]. 电器与能效管理技术, 2018(19): 31-36
- [7] 徐陈锋. 基于自适应模糊策略的燃料电池车混合动力系统控制 [D]. 杭州:浙江大学控制科学与工程学院, 2017:16-20
- [8] Chen J, Song Q. A decentralized dynamic load power allocation strategy for fuel cell/supercapacitor-based APU of large more electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(2): 865-875
- [9] Carignano M, Roda V, Costa-Castello R, et al. Assessment of energy management in a fuel cell/battery hybrid vehicle [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 16110-16122
- [10] Azib T, Larouci C, Chaibet A, et al. Online energy management strategy of a hybrid fuel cell/battery/ultracapacitor vehicular power system [J]. *IEEE Transactions on Electrical & Electronic Engineering*, 2015, 9(5): 548-554
- [11] Lv X, Qu Y, Wang Y, et al. A comprehensive review on hybrid power system for PEMFC-HEV: issues and strategies [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 171: 1273-1291
- [12] 秦孔建,高大威,卢青春,等. 燃料电池汽车混合动力系统构型研究 [J]. 汽车技术, 2005(4): 24-27
- [13] 雷霄,戴朝华,陈维荣,等. 基于 ADVISOR 的燃料电池混合动力机车建模与仿真 [J]. 电源技术, 2015, 39(12): 2643-2646
- [14] Snoussi J, Ben Elghali S, Benbouzid M, et al. Auto-adaptive filtering-based energy management strategy for fuel cell hybrid electric vehicles [J]. *Energies*, 2018, 11(8): 2118-2129

Study on multi-energy management strategy of fuel cell hybrid power system based on adaptive filtering

Hu Shuai, Yun Haitao, Zhao Yulan, Li Zhenghui, Wei Yongqi

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520)

Abstract

In order to meet the high energy and high power requirements of fuel cell vehicles in actual driving, this paper compares the performance characteristics of the 3 energy sources including proton exchange membrane fuel cell (PEMFC), the battery and the super capacitor (SC). To make fuel cells and batteries suffer as few shocks as possible from large transient changes of load current in practical operating conditions, energy management strategy based on adaptive filtering is presented. The finite state machine is used to control the adaptive change of the filtering frequency to ensure the optimal power distribution. The simulation results show that the proposed method can effectively reduce the impact of high-frequency changing load current on the fuel cell system while meeting the system power requirements.

Key words: fuel cell system, adaptive filtering, finite state machine, energy management strategy