

文章编号: 1002-0268 (2006) 09-0121-05

燃料电池城市客车混合动力系统的自适应控制

黄 勇, 曾 帆, 陈全世, 周 强, 陈伏虎
(清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 在燃料电池发动机和镍氢电池组组成的混合动力系统中, 提出了通过一个双向电源变换器实现双电源输出功率混合的控制方法。在分析燃料电池发动机输出特性的基础上, 设计了双向电源变换器的外特性曲线, 使得镍氢电池组根据燃料电池发动机输出电压的变化, 自动调节工作模式和充、放电电流, 实现了混合动力系统输出功率的自适应控制, 得到了稳定的动力系统输出电流和电压的变化过程。

关键词: 混合动力系统; 燃料电池发动机; 双向电源变换器; 自适应控制

中图分类号: U469.72²

文献标识码: A

Adaptive Control of the Hybrid Power System in Fuel Cell City Bus

HUANG Yong, ZENG Fan, CHEN Quan-shi, ZHOU Qiang, CHEN Fu-hu

(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy Conservation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: For hybrid power system composed of a fuel cell engine and a group of Ni-H batteries, a new control method with a bi-directional power converter is proposed. On the base of analyzing the output characteristic of the fuel cell engine, an external characteristic of the bi-directional power converter is designed, making the Ni-H batteries automatically adjust their charging or discharging currents. As a result, the output power of the hybrid system is controlled adaptively, obtaining stable outputs of I-t and U-t processes of the power system.

Key words: hybrid power system; fuel cell engine; bi-directional power converter; adaptive control

0 前言

与传统的燃油汽车相比, 电动汽车具有节能、环保的优点。在全球石油资源日趋紧张、人类环保意识日益增强的今天, 电动汽车的研究与开发得到了广泛重视。其中, 以燃料电池为主要电源的城市电动客车具有能源可再生、燃料加注速度快、零污染排放和续驶里程长等综合优势, 同时, 也体现了城市公交优先的社会需求, 正在成为电动汽车领域研究与开发的重要方向。

在城市工况下, 客车的平均行驶速度不高, 但需要较好的加速性能, 要求车辆的动力系统具有较

宽的输出功率范围和较高的峰值输出功率。在燃料电池城市客车中, 为了降低燃料电池的制造成本、提高其工作效率, 可以采用燃料电池发动机和辅助动力电池组或超级电容组共同工作的多能源混合动力系统结构。开发混合动力系统的关键是实现燃料电池发动机、动力电池组或超级电容组 3 个动力源输出电压或电流参数的匹配, 以保证动力系统的总输出功率能够满足车辆行驶的要求。目前, 典型的混合动力系统结构^[1]如图 1 所示, 燃料电池、动力电池组和超级电容组的输出端分别通过 BUCK-BOOST 双向电源变换器进行电压调节, 3 个电源变换器的输出端并联, 为车辆驱动系统提供电能, 该系统基于

收稿日期: 2005-04-29

基金项目: 国家十五“863”计划电动汽车重大专项资助项目 (2005AA501100)

作者简介: 黄勇 (1969-), 男, 福建福州人, 工学博士, 研究方向为电动汽车电气系统与电磁兼容。(huangyev@mail.tsinghua.edu.cn)

车辆行驶功率的预测，通过一定的算法实现行驶功率在 3 个动力源之间的分配。这种混合动力系统不仅结构复杂，多个电源变换器的使用增加了电能变换过程的损耗；而且，通过功率预测与分配算法设定各个电源变换器的输出功率，难以满足车辆在实际工况运行情况下真实的需求功率，容易造成动力系统输出电压、功率等参数的振荡。

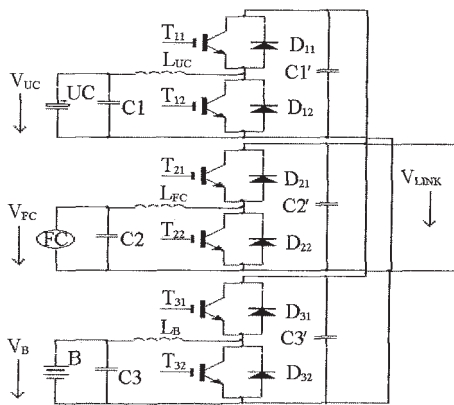


图 1 通过双向电源变换器的混合动力系统结构
Fig.1 Structure of hybrid power system through bi-directional power converter

本文以研制中的 12 m 低地板燃料电池公交车为研究对象，提出一种燃料电池发动机和镍氢电池组通过双向电源变换器实现功率混合的动力系统结构。通过分析燃料电池发动机的输出特性，设计了双向电源变换器的外特性曲线，当燃料电池发动机输出电压或电流变化时，双向电源变换器自动调节镍氢电池组的工作模式和充、放电电流，实现燃料电池和镍氢电池组输出功率的自适应混合过程，得到稳定的车辆行驶功率的变化过程。

1 燃料电池发动机的输出特性

1.1 燃料电池发动机的组成

在电动客车的混合动力系统中，采用质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 发动机，其系统简图如图 2 所示，除了燃料电池堆外，还有供氢系统、空气系统和热交换器等辅助设备。燃料电池堆由 3 个模块并联，每个模块由 500 个电池单体串联组成；在供氢系统中，高压氢气经过压力、流量调节后进入燃料电池堆；流经压气机的空气也经过压力、流量控制后进入燃料电池堆；进入燃料电池堆的气体经过去离子水增湿后，氢气和空气中的氧气发生电极反应，产生电能。燃料电池堆输出的电功率分为自耗功率和净输出功率 2 个部分，自耗功率用来驱动燃料电

池发动机内部的压气机和热交换器等辅助设备，维持燃料电池发动机的正常运转；净输出功率也称为燃料电池发动机的输出功率，是满足车辆行驶的主要能源。

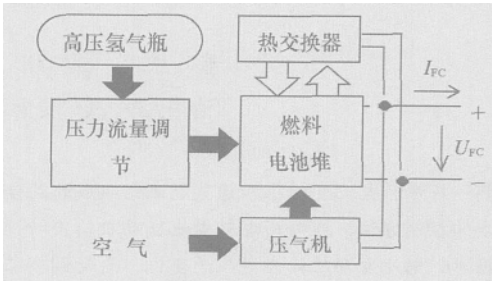
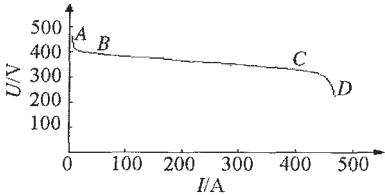


图 2 燃料电池发动机系统简图

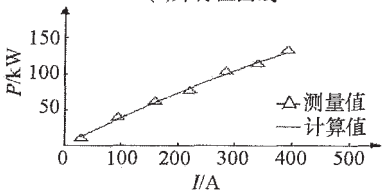
Fig.2 Sketch of fuel cell engine system

1.2 燃料电池发动机的外特性

燃料电池发动机的外特性曲线描述了其输出电压与输出电流之间的关系，是燃料电池发动机静态工作点的集合，如图 3 (a) 中 ABCD 所示，是一条下降特性曲线。除了自耗功率外，外特性曲线的下降特征和燃料电池单体的工作原理相关^[5]：AB 段电压的非线性下降主要是由燃料电池单体内部的活化电阻引起的，活化电阻随催化剂类型以及催化剂与电解质接触表面积大小的不同而不同。由于 AB 段对应的电流值较小，不会对混合动力系统的正常工作造成影响。BC 段电压的下降主要由各电池单体的内部电阻产生，这部分电阻包括燃料电池电极、膜和集流体进行电子、质子传导时产生的接触电阻。BC 段外特性基本上呈直线，输出电压随着电流的增大而减小，该段区间电流范围大，是混合动力系统中燃料电池发动机的主要工作区间。CD 段电压的急剧下降与燃料电池中反应气体的量有关，这一现象也



(a) 外特性曲线



(b) 功率特性曲线

图 3 燃料电池发动机的外特性和功率特性曲线

Fig.3 Curves of external characteristics and power characteristics of fuel cell engine

称为浓差极化,是燃料电池超过其额定工作点后,在反应界面上反应气体供应不足造成的,浓差极化现象在 PEMFC 的阴极反应区尤为严重。在混合动力系统中,应该避免燃料电池发动机的工作点进入 CD 段。

燃料电池发动机的控制单元通过实时控制反应气体的压力、温度和质子交换膜的湿度,其外特性曲线具有较好的参数稳定性;同时,在现有的控制技术条件下,燃料电池发动机的输出功率变化率可以达到 $50 \text{ kW/s}^{[3]}$,具有较高的功率响应速度。这是燃料电池发动机能够和辅助动力电池组实现功率混合、并且在电动汽车上得到应用的前提条件。

1.3 燃料电池发动机的功率特性

为了描述燃料电池发动机的输出功率特性,只针对图3中BC段外特性进行如下简化。

$$U_{fc} = U_0 - I_{fc} \times R, \quad (1)$$

式中, U_{fc} 为燃料电池发动机的输出端电压, V; U_0 为由 BC 段特性拟合的空载电压, 拟合值为 402.5 V ; I_{fc} 为燃料电池发动机的输出电流, A; R 为燃料电池发动机的等效内阻, 拟合值为 $0.184 \text{ } \Omega$

在公式(1)中, U_0 和 R 都不随电流变化, 燃料电池发动机的净输出功率 P 为

$$P = I_{fc} \times U_0 - I_{fc}^2 \times R. \quad (2)$$

在 BC 段外特性范围内, 根据公式(2)计算出的功率特性曲线与通过试验数据得到的功率点具有很好的拟合效果, 如图3(b)所示。从图3中可以看出, 燃料电池发动机净输出功率随着输出电流的增大而增大, 当输出电流从 30 A 增加到 393 A 时, 输出功率从 12 kW 增加到 130 kW , 同时, 燃料电池发动机的端电压从 397 V 减小到 330 V 。

2 燃料电池混合动力系统

2.1 车辆的动力性要求

根据车辆的动力性计算, 满载质量为 18 t 的燃料电池城市客车, 为了达到速度 $0 \sim 50 \text{ km/h}$ 加速时间小于 30 s 的指标, 要求动力系统的最大输出功率为 180 kW 。车辆的驱动电机采用三相交流感应电机, 当电机的电路参数不变时, 在一定转速下, 电机的电磁转矩与定子电压的平方成正比, 驱动系统的设计结果要求, 为了提供足够的转矩以满足车辆的动力性能指标, 要求电机调速器的输入直流电压不低于 330 V 。

在上述的燃料电池发动机中, 输出端电压随着

输出功率的增大而减小, 当输出电压降到 330 V 时, 输出功率只有 130 kW 左右, 不能满足车辆动力性的要求。因此, 在燃料电池发动机的基础上, 增加镍氢动力电池组, 组成混合动力系统, 使动力系统的输出功率和输出电压同时满足驱动电机和车辆动力性的要求。

2.2 混合动力系统结构

混合动力系统结构如图4所示。交流感应电机的额定功率为 120 kW 、最大输出功率为 180 kW ; 燃料电池发动机额定功率为 100 kW 、最大使用功率为 130 kW , 其输出电压直接接到电机调速器的直流输入端, 该电压称为总线电压; 同时, 辅助电池组采用标称电压 192 V 、容量 80 Ah 的镍氢电池组, 其输出端通过双向电源变换器接到总线电压上, 构成燃料电池发动机与镍氢动力电池组通过双向电源变换器实现功率混合的动力系统结构。该系统只采用一个双向电源变换器, 系统的能量转换效率高。

功率混合型动力系统的关键技术是设计双向电源变换器的输出特性, 使得电源变换器的输出参数跟随燃料电池发动机工作点的变化而变化, 实现两个动力源输出参数的自适应匹配, 得到稳定的功率混合过程。本文的设计思想是: 在燃料电池发动机的输出功率从 100 kW 增加到 130 kW 的过程中, 要求电源变换器的输出功率从 0 增加到 50 kW , 从而保证电机驱动系统的输入功率从 100 kW 增加到 180 kW 。在这一过程中, 总线电压平滑地从 350 V 变化到 330 V 。另一方面, 当车辆行驶功率较小、燃料电池发动机输出电压较高时, 总线电压通过双向电源变换器的降压作用, 对镍氢电池组充电。

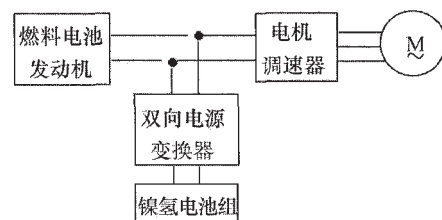


图4 混合动力系统结构示意图

Fig.4 Structure of hybrid power system

3 混合动力系统的自适应控制

3.1 双向电源变换器结构

双向电源变换器采用 BUCK-BOOST 复合电路结构, 如图5所示。在 BOOST 工作模式下, 镍氢电池组端电压 U_b , 总线电压 U_b , U_b 通过升压电感 L 、开关管 T_2 的升压变换经二极管 D_1 接到总线电压, 和燃

料电池发动机实现功率混合。在 BUCK 工作模式下, 总线电压 U_b 通过开关管 T_1 的斩波降压经电感 L 、电容 C_2 的滤波作用输出 U_1 对镍氢电池组进行充电, 二极管 D_2 在降压过程中实现输出电流的续流作用。

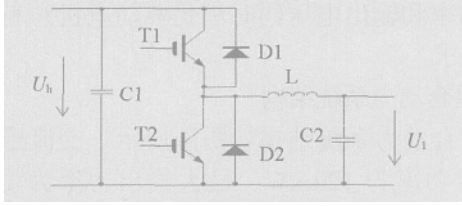


图 5 双向电源变换器的电路结构

Fig.5 Circuit of bi-directional power converter

通过设计合理的 RCD 吸收网络和开关频率, 降低了功率开关管的损耗功率, 提高了电源变换器的能量转换效率。图 6 是电源变换器能量转换效率随输出功率的变化曲线。从图 6 中可以看出, 能量转换效率在 92% 以上, 当输出额定功率 50 kW 时, 能量转换效率为 96%。

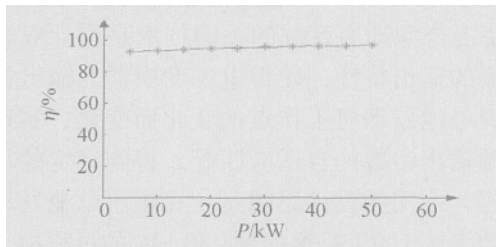


图 6 能量转换效率曲线

Fig.6 Curve of energy conversion efficiency

3.2 双向电源变换器的升压特性

双向电源变换器的升压特性如图 7(a)所示, 是电压缓降特性与恒流特性的复合电源特性。缓降电压特性段可以描述为

$$U=350-0.1316I, \quad (3)$$

相应的输出功率特性为

$$P=350I-0.1316I^2. \quad (4)$$

随着电压的降低, 输出功率增大; 当电压下降到 330 V 时, 输出功率达到最大值 50 kW, 之后, 电源变换器的输出进入恒流特性, 设定电流值是 152 A。设置恒流特性是为了保护电源变换器和镍氢电池组的安全工作。

根据公式(1)~(4), 得到混合动力系统在总线电压为 330~350 V 时的总输出功率为

$$P=4840U-13.01U^2, \quad (5)$$

功率随总线电压的变化率为

$$\frac{dP}{dU}=4840-26.02U. \quad (6)$$

当总线电压处于 330~350 V 范围时, $\frac{dP}{dU} < 0$,

功率随总线电压的下降呈单调增大的趋势。因此, 对于任意的车辆行驶功率, 对应着确定的总线电压值和燃料电池、电源变换器的稳定工作点, 保证了动力系统工作的稳定性。

3.3 双向电源变换器的降压特性

对于 60 Ah、标称电压 192 V 的镍氢电池组, 设计最大充电电流为 60 A、最高充电电压为 220 V。相应地, 双向电源变换器的降压特性如图 7(b)所示, 由缓降电压特性段和恒流特性段组成。空载电压 220 V, 拐点电压 192 V, 最大充电电流 60 A, 最大充电功率为 11.5 kW。

当镍氢电池组的荷电状态(SOC)较低、端电压小于 192 V 时, 降压电路工作在恒流段, 实现 60 A 充电; 当电池组端电压高于 192 V 后, 降压电路工作在缓降电压段, 充电电流随着电池组端电压的升高而逐渐减小, 保证电池组充电过程的安全。

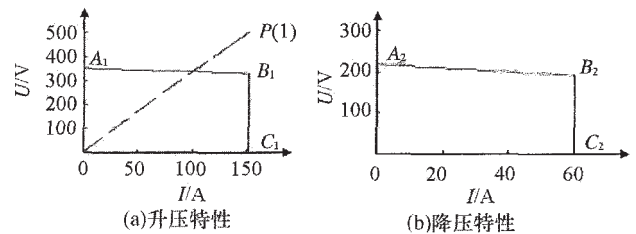


图 7 双向电源变换器的输出特性

Fig.7 Output characteristics of bi-directional power converter

3.4 双向电源变换器的工作模式

根据总线电压的变化, 结合上述的电源变换器升压和降压特性, 双向电源变换器主要有以下 3 种工作模式。

(1) 电池组放电的混合工作模式: 当总线电压小于 360 V 时, 启动双向电源变换器的升压电路, 输出空载电压 350 V。当总线电压保持在 350 V 以上时, 升压电路中二极管 D_1 处于截止状态, 电源变换器没有输出电流; 当燃料电池发动机输出功率进一步增大、使得总线电压小于 350 V 时, 升压电路开始输出电流, 并且跟随总线电压的进一步变化, 自适应调节输出电流的大小, 使得电源变换器输出功率随着燃料电池发动机输出功率的增大而增大。

(2) 纯燃料电池发动机工作模式: 随着车辆行驶功率的减小, 总线电压大于 350 V、即电源变换器升压电路的空载电压时, 升压电路自动停止输出电流; 当总线电压进一步大于 360 V 时, 关断升压电路。系统回到纯燃料电池发动机工作模式。

(3) 电池组充电的混合工作模式: 当总线电压大于 380 V 时, 说明车辆行驶的需求功率较小, 理论

计算值为 47.5 kW。启动双向电源变换器的降压电路。在降压特性作用下,根据电池组的端电压,充电电流自适应变化。当电池组端电压大于 192 V 时,充电电流逐渐减小。当充电电流小于 5 A 时,说明电池的 SOC 较大,关断降压电路。这种混合工作模式利用燃料电池发动机实现车载充电,与纯电动汽车需要专用充电设备和较长充电时间相比,车辆的使用效率得到了提高。

在混合工作模式中,采用电池组放电优先的控制方法。只要总线电压小于 360 V,终止电池组充电工作模式,进入电池组放电工作模式,在放电过程中,进行最小放电电压限制,当电池组放电电压低至 150 V 时,不再增加放电功率,保证电池组放电过程的安全性。

另外,从理论上讲,这种混合动力系统结构能够实现驱动电机的制动能量回馈、给动力电池组充电,但是,制动回馈的瞬时功率控制和效率问题是比较复杂的,有待于进一步研究。

4 试验与结果

根据图 3 所示的系统结构,建立了相应的试验台架,采用直流发电机做为驱动电机的负载,输出的直流电经过逆变回馈电网。模拟车辆加速过程得到的总线电流、电压和功率以及燃料电池发动机和双向电源变换器的输出电流、功率曲线如图 8 所示。从中可以看出:当总线电压高于 350 V 时,只有燃料电池发动机提供总线电流,如图中 I_1 所示;当总

线电压低于 350 V 时,镍氢电池组通过双向电源变换器输出电流 I_2 ,随着总线电压的降低,混合动力系统总输出功率增大,在整个过程中,电压、电流变化平稳,系统稳定运行。

5 结论

(1) 提出了一种燃料电池发动机和镍氢电池组通过双向电源变换器实现功率混合的动力系统,系统结构简单,能量转换效率高。

(2) 设计了一种电源变换器升压特性,使镍氢电池组的放电功率跟随燃料电池发动机输出功率自适应变化,实现了混合动力系统输出功率的自适应控制。

(3) 实现了动力电池组的车载充电功能,不需要额外的充电系统。

参考文献:

- [1] DI NAPOLI, F CRESCIMBINI, A LIDOZZI, et al. Design and testing of a fuel cell powered propulsion system supported by a hybrid UC-battery storage[J]. SAE, 2004, (1): 1303.
- [2] DROLIA ABHISHEK, JOSE PHILIP, MOHAN NED. An approach to connect ultracapacitor to fuel cell powered electric vehicle and emulating fuel cell electrical characteristics using switched mode converter [C]//The 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2003, 1: 897- 901.
- [3] MARCHESONI M, VACCA C. A new dc-dc converter structure for power flow management in fuel-cell electric vehicles with energy storage systems [C]//IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference. 2004, 1: 683- 689.
- [4] PUKRUSHPAN JAY T, STEFANOPOULOU ANNA G, PENG HUEI. Modeling and control for PEM fuel cell stack system [C]// Proceedings of the American Control Conference. 2002, 4: 3 117- 3 122.
- [5] 黄倬,屠海令,张冀强,等. 质子交换膜燃料电池的研究开发与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [6] HUI LI, FANG Z PENG, JACK S LAWLER, A natural ZVS high-power bi-directional dc-dc converter with minimum number of device [C]//Proceedings of the Conference of IEEE Industry Applications. 2001, 3: 1 874- 1 881.
- [7] SCHUPBACH R M, BALDA J C. New energy-storage unit for heavy-duty vehicles encompassing cold-weather starting [C]// Proceedings of the 35th IEEE annual Power Electronics Specialists Conference. 2004, 4: 2 786- 2 791.
- [8] JIANG ZHENHUA, DOUGAL ROGER A. Synergetic control of power converters for pulse current charging of advanced batteries from a fuel cell source[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(4): 1 140- 1 150.

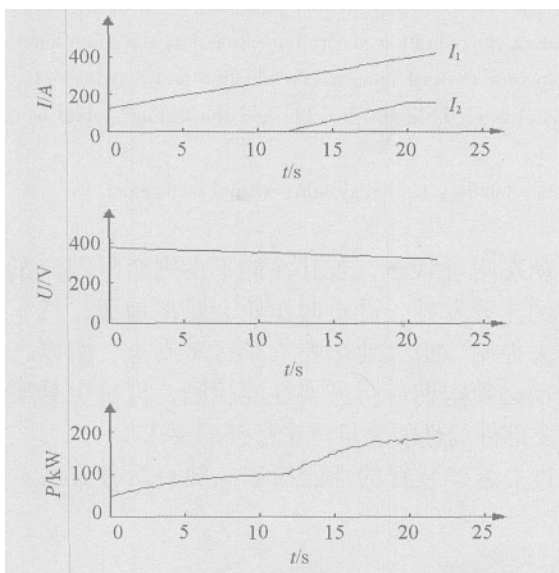


图 8 车辆加速过程总线电流、电压、功率波形

Fig.8 Waveforms of bus current, voltage and power during vehicle speedup process