

电动汽车混合电源系统的自适应控制^①

黄 勇^{②*} 齐铂金^{**}

(* 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室 北京 100084)

(** 北京航空航天大学材料加工与控制系 北京 100191)

摘 要 在由双向电源变换器连接动力电池组和超级电容组形成的电动汽车混合电源系统中,实现了双向电源变换器的电源外特性设计,通过实时检测动力电池组的放电电流,实现了超级电容组的充放电状态和电流的自适应控制。建立了电源变换器外特性模型,描述了动力电池组放电电流和超级电容组充放电电流之间的定量关系。在此基础上,设计了双向电源变换器的控制电路。试验结果表明,在城市工况下,混合电源系统中动力电池组的峰值放电电流降低了 60%,这有利于提高动力电池组的使用耐久性。

关键词 电动汽车,动力电池,超级电容,双向电源变换器,自适应控制

0 引 言

电动汽车具有节能环保的特点,其研究与开发受到了广泛重视。但是,纯电动汽车较短的续驶里程和有限的动力电池组循环寿命制约了其产业化进程。试验研究表明,在城市工况下,动力电池组间歇性大电流放电是造成电池容量衰减和使用寿命短的主要原因。近年来发展的插电式混合动力电动汽车虽然可以延长电动汽车的续驶里程,但是,由于电池组容量小、荷电状态(SOC)使用范围宽,导致动力电池组放电倍率大,尤其在低 SOC 下动力电池组大倍率放电会进一步加剧动力电池组的容量衰减。因此,研究新型的电动汽车电源系统及其控制策略,降低动力电池的峰值放电电流,提高其耐久使用性能,是发展纯电动汽车和插电式混合动力汽车的关键共性技术问题,对推动电动汽车的产业化进程具有理论指导意义与应用价值。本研究是基于这种考虑开展的。

1 研究背景

研究人员已在动力电池组的基础上,将超级电容组通过双向电源变换器和动力电池组的输出端并联,构成了“动力电池-超级电容”混合电源系统。超级电容组优异的功率特性可以弥补动力电池组输出

功率的不足,降低动力电池组的峰值放电电流,提高动力电池组的耐久使用性能。“动力电池-超级电容”混合电源系统已经成为近年来电动汽车研究领域的热点。Erdinc 等^[1]基于一段历史时间内电动汽车行驶总需求功率的频域分析,将从中分离出的高频功率分量做为超级电容输出功率的给定值。这种控制策略可以在一定程度上平滑动力电池组的放电功率,但是,基于历史功率数据分析的超级电容组输出电流控制不能很好地适应当前时刻的系统功率需求。试验表明,在车辆需求功率较小时,超级电容组仍可能处于放电状态,没有实现超级电容组“峰值功率补偿”的功能。Ferreira 等^[2]根据模糊控制策略并结合超级电容组的端电压和车速等因素,给出了超级电容组的充放电电流的控制规则,该模糊控制规则虽然淡化了动力电池不准确的模型对控制策略的影响,却难以给出超级电容组输出功率和动力电池输出功率之间的定量关系,系统功率急剧增加时,依然存在超级电容组不充分放电、动力电池组峰值电流偏大等问题。

混合电源系统是目前电动汽车中采用的主流电源系统之一,其关键技术——混合电源系统输出功率和能量的控制受到了研究人员的重视并开展了相应的研究^[3-6]。在混合电源系统中,通过双向电源变换器匹配主电源和辅助电源的输出电压特性和功率

① 汽车安全与节能国家重点实验室开放基金(KF11171)和江苏省科技计划(BE2010136)资助项目。

② 男,1969 年生,博士,高级工程师;研究方向:电动汽车,混合动力系统;联系人, E-mail: huangyev@tsinghua.edu.cn
(收稿日期:2011-06-07)

特性,可以实现电源系统输出功率的自适应控制。黄勇等^[7]在燃料电池发动机和镍氢电池组组成的混合电源系统中,提出了通过双向电源变换器实现双电源输出功率混合的控制方法,建立了基于规则的双向电源变换器控制策略,根据燃料电池发动机主电源输出电压的变化,自动调节镍氢电池组辅助电源的工作模式和充放电电流,实现了混合电源系统输出功率的自适应控制,得到稳定的电源系统输出电流和电压的变化过程。实际上,辅助电源的主要作用是补偿主电源较弱的功率响应性能,提高整个电源系统的效率性能和使用耐久性。相比之下,超级电容比镍氢电池具有更好的功率特性和使用耐久性,是更加优越的辅助电源。但是,由于超级电容的比能量小,当车辆行驶功率较小时,应控制超级电容组处于充电状态,使超级电容组储备较多的能量,能够在车辆行驶功率急剧增大时具有较强的功率输出能力;当车辆行驶功率大于一定值时,应实时控制超级电容组处于放电状态,抑制动力电池组电流的增大。在这一过程中,超级电容组充放电状态切换的实时性和充放电电流的定量控制是实现“动力电池-超级电容”混合电源系统控制的关键。这是基于规则的控制策略难以做到的。本文提出了双向电源变换器电源外特性控制的方法,通过实时检测动力电池的放电电流,实现超级电容充放电状态的实时切换和充放电电流的自适应控制。

2 “动力电池-超级电容”混合电源系统

2.1 城市工况特点

图 1 是根据国家城市道路循环工况 GB19754-2005^[8]计算得到的某公交车行驶功率的需求曲线。分析结果表明,车辆行驶的峰值功率 139kW,平均功率只有 21kW 左右。怠速时间占到总行驶时间的

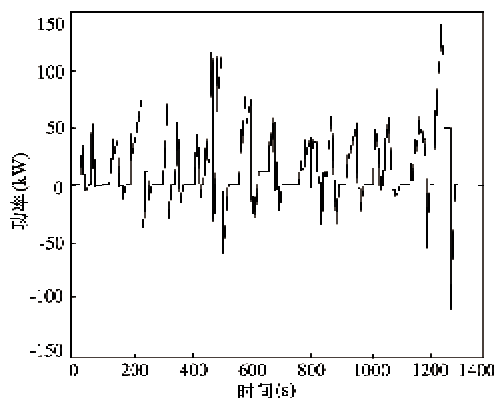


图 1 城市工况车辆行驶功率的需求曲线

29%。车辆行驶存在频繁的加减速过程。在城市工况下,车辆运行具有峰值功率高、平均功率小、怠速时间长等特点。当电动汽车采用纯动力电池组驱动时,动力电池组处于间歇性的大电流放电状态,造成严重的容量衰减。

进一步分析车辆行驶工况的时间特性,结果表明:行驶工况是由若干个不同时间长度的“加速—巡航—制动—停止”的周期性的微循环过程组成的,加速状态下车辆需求功率增加,达到最高车速时加速停止,需求功率迅速下降,进入需求功率稳定的巡航状态,制动过程可以通过电机回馈电能。在“动力电池-超级电容”混合电源系统中,对超级电容组充放电过程的控制要满足上述微循环过程的功率特性和时间特性,要求双向电源变换器具有很强的实时控制性能。

2.2 混合电源系统结构与工作原理

本文研究对象是如图 2 所示的“动力电池-超级电容”混合电源系统,双向电源变换器的高压端与动力电池组输出端相连,低压端与超级电容组输出端相连。在车辆行驶过程中,动力电池组的输出电流随着车辆行驶需求功率的增大而增大。双向电源变换器通过检测动力电池组放电电流值,自适应控制超级电容组的充放电状态和充放电电流:当需求功率增大使得动力电池组输出电流超过设定阈值时,双向电源变换器处于升压工作模式,控制超级电容组放电。随着动力电池组输出功率的增大,超级电容组放电功率迅速增加,对动力电池组输出起到功率放大器的作用。在确定的车辆行驶需求功率下,抑制了动力电池组电流的进一步增大。

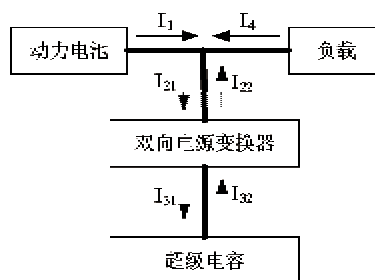


图 2 “动力电池-超级电容”混合电源系统示意图

当车辆行驶需求功率减小使得动力电池组放电电流小于设定阈值时,双向电源变换器切换进入降压工作模式,及时对超级电容组充电,使超级电容组的端电压及时恢复到较高值,能够在下一次超级电容组放电过程具有较强的功率输出能力。如果在这一过程中产生制动回馈能量,双向电源变换器的高

压端电压升高,动力电池组输出电流自适应减小,超级电容组的充电能量将优先来源于制动回馈能量。

实现上述工作原理的技术关键在于设计双向电源变换器的电源外特性,根据动力电池组的放电电流,自适应控制超级电容组的充放电状态和电流。

3 双向电源变换器的电源外特性

电源外特性描述了电源负载变化时,电源输出电流和电源端电压之间的关系,一般用“电源输出电流-电源端电压”二维曲线来描述。双向电源变换器的高压端和低压端分别连接动力电池组和超级电容组,其电源外特性相应地分为升压外特性和降压外特性,分别描述了超级电容组受控放电特性和受控充电特性,这是实现“动力电池-超级电容”混合电源自适应控制的理论依据。

3.1 双向电源变换器的升压特性

如图3所示,动力电池组开路电压为 E_b ,端电压随着放电电流的增大而降低,其输出外特性表现为斜率 k_b 的下降外特性曲线 l_b ,双向电源变换器升压电路输出缓降的外特性曲线 l_d ,斜率 k_d 小于 k_b ,开路电压为 E_d 。在外特性曲线 l_b 上,电压 E_d 对应的电流设为阈值电流 I_0 。当动力电池放电电流大于 I_0 时,动力电池组端电压低于双向电源变换器升压电路的开路电压 E_d ,双向电源变换器升压电路输

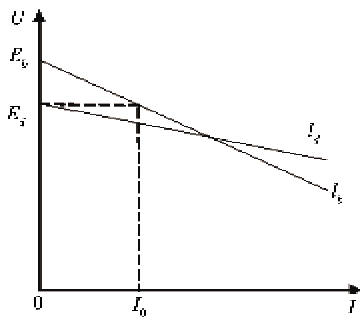


图3 双向电源变换器升压输出特性曲线

出电流、控制超级电容组放电。动力电池组、双向电源变换器和超级电容组充放电电流及方向如图2所示,对于给定的动力电池组端电压 $U(U < E_d)$,动力电池组放电电流 I_1 、双向电源变换器升压电路输出电流 I_{22} 分别满足

$$U = E_b - k_b \cdot I_1 \quad (1)$$

$$U = E_d - k_d \cdot I_{22} \quad (2)$$

在式(1)中,当 $U = E_d$ 时, $I_1 = I_0$,得到:

$$I_0 = \frac{E_b - E_d}{k_b} \quad (3)$$

进一步,由式(1)-(3),得到

$$I_{22} = \frac{k_b}{k_d} \cdot (I_1 - I_0) \quad (4)$$

当 $I_1 > I_0$ 后,随着 I_1 的增大,双向电源变换器升压电路输出电流 I_{22} 迅速增大,超级电容迅速放电。对于动力电池的输出功率,超级电容起到了功率放大器的作用,对于确定的系统功率需求,抑制了动力电池组电流的进一步增大,从而抑制了动力电池组的峰值放电电流。在双向电源变换器升压电路外特性的作用下,超级电容的放电电流自适应随着动力电池放电电流的变化而变化,从而实现混合电源系统输出功率在动力电池和超级电容之间的自适应分配。

进一步,从式(3)中看出,对于设定的升压电路外特性曲线, E_d 和 k_d 是常数。随着电池组SOC的降低,动力电池的开路电压 E_b 减小,导致阈值电流 I_0 降低,在确定的 I_1 下得到更大的 I_{22} ,进一步减小动力电池组的峰值放电电流,有利于提高动力电池组的使用耐久性。

3.2 双向电源变换器的降压特性

当动力电池组放电电流 I_1 小于 I_0 时,动力电池组在提供电机驱动电流 I_4 的同时,通过双向电源变换器给超级电容充电。双向电源变换器工作于降压电路模式,根据 I_1 的大小自适应控制超级电容的放电电流。设计超级电容充电电流为

$$I_{31} = k_c \cdot (I_0 - I_1) \quad (5)$$

其中, k_c 为大于0的比例系数,表征超级电容组的充电强度。系统需求功率越小,动力电池组输出电流 I_1 越小,通过双向电源变换器降压电路得到的对超级电容的充电电流越大,从而抑制了动力电池组输出电流的进一步减小,有助于平滑动力电池组的输出电流。

可以证明:在确定的电机驱动电流 $I_4(I_4 < I_0)$ 下,对于任意给定的 $k_c > 0$,都有唯一确定的 I_1 与之对应,并满足 $I_1 < I_0$,从而保证了双向电源变换器降压工作模式的稳定性。双向电源变换器降压电路输入端电流为

$$I_{21} = K_u \cdot k_c \cdot (I_0 - I_1) \quad (6)$$

其中, K_u 为超级电容端电压与动力电池端电压之比, $0 < K_u < 1$ 。

在电流母线上,有

$$I_1 = I_{21} + I_4 \quad (7)$$

由式(6)和式(7)得到

$$I_1 = \frac{K_u \cdot k_c \cdot I_0 + I_4}{1 + K_u \cdot k_c} \quad (8)$$

由于 $I_4 < I_0$, 所以, 对于任意给定的 $k_c > 0$, 都有 $I_1 < I_0$, 即式(5)设计的降压特性是稳定的, 从而保证了动力电池放电电流小于 I_0 时, 能够及时给超级电容组充电, 使超级电容组的端电压及时恢复到较高值, 在随后的放电过程具备较强的功率输出能力。

3.3 控制电路设计

双向电源变换器主电路采用 BUCK-BOOST 电路形式, 有两个开关管分别实现降压和升压变换。电源变换器的控制电路如图 4 所示, 通过驱动电压比较电路实现升压电源外特性和降压电源外特性的自然切换。电压信号 E_b 和 E_d 分别通过电阻接到运算放大器 U_{2c} 的正负输入端, U_{2c} 输出阈值电流的给定信号 GI_0 为:

$$GI_0 = \frac{R_2}{R_1} \cdot (E_b - E_d) \quad (9)$$

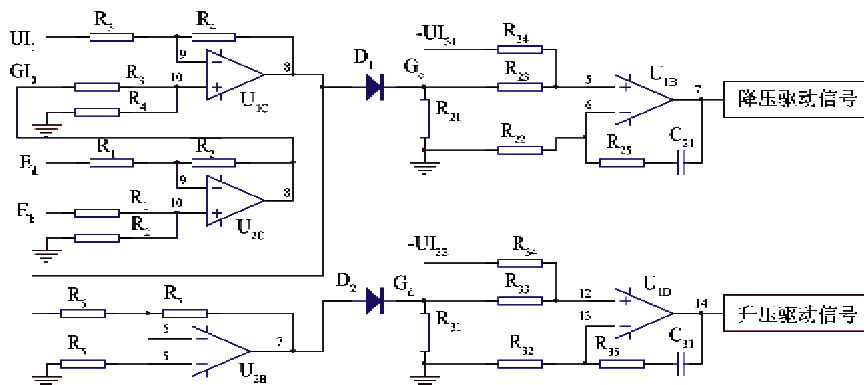


图 4 双向电源变换器控制电路原理图

4 试验与结果

4.1 试验系统

根据某车型电动公交客车动力电池组和超级电容组参数匹配的结果, 将动力电池组和超级电容组参数等比例缩小, 并按照图 2 结构建立混合电源试验系统。将图 1 所示的车辆行驶功率需求缩减至 $\frac{1}{50}$, 由美国 AV900 动力电池组充放电电源通过编程实现。采用 30Ah 的磷酸铁锂动力电池模块, 100% SOC 时的开路电压为 39.8V, 实测电池模块内阻为 30mΩ。采用 Maxwell 公司的 BCAP3000P270 型超级电容, 11 节单体构成超级电容模块, 电容量为 272F。工作电压区间为 15~29.7V。双向电源变换

比较式(9)和式(3), 可以看出, 电阻 R_1 和 R_2 的选择应满足

$$k_b = \frac{R_1}{R_2} \quad (10)$$

电流 I_0 和 I_1 的给定信号分别通过电阻接到运算放大器 U_{1c} 的正负输入端。当 I_1 小于 I_0 时, U_{1c} 输出大于 0, 二极管 D_1 导通, 运算放大器 U_{1b} 输出降压驱动信号, 实现电流 I_{31} 的闭环控制。在这一过程中, 二极管 D_2 截止, 运算放大器 U_{2b} 输出升压驱动信号为低电平, 升压电路不工作。当 I_1 大于 I_0 时, U_{1c} 输出小于 0, 通过运算放大器 U_{2b} 输出正信号, 二极管 D_2 导通, 运算放大器 U_{2b} 输出升压驱动信号, 实现电流 I_{22} 的闭环控制。在这一过程中, 二极管 D_1 截止, 运算放大器 U_{1b} 输出降压驱动信号为低电平, 降压电路不工作。在控制电路作用下, 双向电源变换器的升压和降压功能实现了互锁, 且通过驱动电压比较, 实现升压和降压工作状态的快速自然切换。

器升压和降压特性如上所述, 设定阈值电流 I_0 为 24A, $\frac{k_b}{k_d} = 10, k_c = 8$ 。此外, 开发了基于 LabVIEW 编程环境和 CAN 通讯的数据采集与处理系统, 采集超级电容电流、动力电池电流和总电流。

4.2 结果分析

截取循环工况中具有功率显著变化特征的 1234s~1304s 时间段电流波形, 如图 5 所示。从中可以看出, 当动力电池输出电流大于 24A 时, 超级电容自适应放电, 而且, 随着动力电池放电电流的增大, 超级电容放电电流急剧增大。在整个循环工况过程中, 动力电池的最大放电电流为 28.3A, 总电流最大值为 71.6A。可见, 在本文设计的混合电源系统作用下, 动力电池的峰值放电电流降低了 60%。

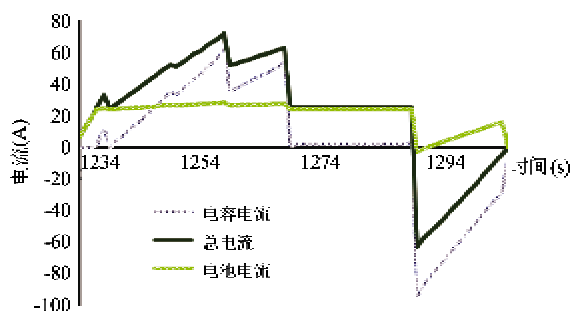


图5 混合电源系统的电流波形

从1294s开始的制动过程中,由于系统需求功率降低,动力电池放电电流减小,制动回馈能量通过双向电源变换器对超级电容充电。随着制动回馈功率的减小,动力电池放电电流逐渐增加,加速对超级电容的充电过程,使超级电容端电压恢复接近到额定电压值,从而满足下一个工况微循环的放电要求。持续的循环工况试验表明,具有功率自适应控制的混合电源系统使超级电容具有“快充快放”的功率型特点,能够适应城市循环工况功率剧烈变化的要求。

对双向电源变换器的动态响应性能试验表明:当混合电源系统负载功率从1.5kW阶跃变化到0.5kW时,双向电源变换器从升压工作模式切换到降压工作模式的响应时间为7.8ms,能够满足负载功率在动力电池和超级电容间自适应分配的要求。

5 结论

提出并实现了双向电源变换器的电源外特性,自适应控制动力电池和超级电容的功率混合。当动

力电池组放电电流大于阈值电流时,超级电容组处于放电状态且放电电流随着动力电池组放电电流的增大而增大;当动力电池组放电电流小于阈值电流时,超级电容组处于充电状态。设计了双向电源变换器的控制电路,实现了电源变换器升压和降压工作状态的柔性切换。试验结果表明:在电源变换器外特性作用下,动力电池峰值放电电流得到了抑制,动力电池峰值电流减小60%。

参考文献

- [1] Erdinc O, Vural B, Uzunoglu M. A wavelet-fuzzy logic based energy management strategy for a fuel cell/battery/ultra-capacitor hybrid vehicular power system. *Journal of Power Sources*, 2009, 194(1): 369-380
- [2] Ferreira A A, Pomilio J A, Spiazzi G, et al. Energy management fuzzy logic supervisory for electric vehicle power supplies system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2008, 23(1): 107-115
- [3] Faggioli E, Rena P, Danel V, et al. Supercapacitors for the energy management of electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 1999, 84(2): 261-269
- [4] Li C, Liu G. Optimal fuzzy power control and management of fuel cell/battery hybrid vehicles. *Journal of Power Sources*, 2009, 192(2): 525-533
- [5] Uzunoglu M, Alam M S. Modeling and analysis of an FC/UC hybrid vehicular power system using a novel-wavelet-based load sharing algorithm. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008, 23(1): 263-272
- [6] Blackwelder M J, Dougal R A. Power coordination in a fuel cell-battery hybrid power source using commercial power controller circuits. *Journal of Power Sources*, 2004, 134(1): 139-147
- [7] 黄勇,曾帆,陈全世等. 燃料电池城市客车混合动力系统的自适应控制. *公路交通科技*, 2006, 23(9): 121-125
- [8] GB19754-2005: 重型混合动力电动汽车能量消耗量试验方法, 2005

Adaptive control of a hybrid power system in electric vehicles

Huang Yong*, Qi Bojin**

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

(** Department of Material Processing and Control Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191)

Abstract

The external characteristics of the bi-directional power converter were designed for an electric vehicle's hybrid power system in which an ultra-capacitor group is connected to a power battery group via the converter. Based on the measurement of the discharging current of the battery group, both of the working mode and the current of the ultra-capacitor were adaptively controlled. The model of the external characteristics of the bi-directional power converter was founded, revealing the quantitative relation between the battery current and the ultra-capacitor current. Then, the control circuit of the bi-directional power converter was developed. The results of the experiments showed that the peak current of the battery in this hybrid power system was 60% lower than that of the system current, which is advantageous to enhancing the battery life time.

Key words: electric vehicle, power battery, ultra-capacitor, bi-directional power converter, adaptive control