

纯电动汽车复合储能系统及其控制策略

周美兰, 赵靖纹, 赵立萍

(哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 针对目前电动汽车由于蓄电池寿命和续航里程短导致其不能普及的现状, 加入超级电容和 DC/DC 变换器构成复合储能系统, 分析了汽车的运行状态, 提出了一种改进的逻辑门限控制方法对复合储能系统进行能量控制。利用 AVL CRUISE 软件建立了整车模型, 对能量控制策略进行了城市工况下的仿真验证。以 48 V 5 kW 的直流无刷电机及其控制器 HPC300 为载体, 搭建了复合储能单元和其控制系统, 仿真和实验结果表明该复合储能系统及其控制策略能够避免蓄电池的大电流输出和冲击, 提高蓄电池的使用寿命和汽车的续航里程。

关键词: 电动汽车; 复合储能; 控制策略; 超级电容

DOI: 10.15938/j.jhust.2018.03.014

中图分类号: TM91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2018)03-0079-07

Compound Energy Storage System and Energy Management Strategy for Electric Vehicles

ZHOU Mei-lan, ZHAO Jing-wen, ZHAO Li-ping

(School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: At present, the electric vehicles cannot be universal because of their short batteries life and driving range. An ultra-capacitor and a DC/DC converter were added to the pure electric vehicles constituting the compound energy storage system. Analyzing the operating state of vehicles, an improved logic threshold control method is proposed for controlling compound energy storage system. The whole vehicle model is established by using AVL CRUISE software, and the energy management strategy is simulated under urban condition. With the Brushless Direct Current Motor in 48 V and 5 kW and its controller HPC300 as the carrier, the compound energy storage system and its energy management system were built. The simulation and experimental results show that the compound energy storage system and its energy management strategy can avoid the input and output of high current of batteries, improve the life of batteries and the driving range of electric vehicles.

Keywords: electric vehicle; compound energy storage; control strategy; ultra-capacitor

收稿日期: 2016-07-02

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(E201302, E201451).

作者简介: 赵靖纹(1993—), 女, 硕士研究生;

赵立萍(1990—), 女, 助理工程师.

通信作者: 周美兰(1962—), 女, 博士, 教授, 硕士研究生导师, E-mail: zhoumeilan001@163.com.

0 引言

在工业化飞速发展的今天,汽车作为人们必不可少的交通工具,电动汽车已经成为其主要的发展趋势。当前,造成电动汽车无法广泛普及的重要原因就是电动汽车续航里程短和动力电池寿命短^[1-2]。蓄电池具有高能量密度,但是由于不能承受瞬时大电流充放电,单一的蓄电池无法满足汽车性能的需求,因此提出了蓄电池、超级电容和双向DC/DC变换器相结合的复合储能系统。超级电容具有高功率密度和长循环寿命,和蓄电池进行互补,能够延长续航里程,提高蓄电池的使用寿命^[3-4]。国内外的学者对复合储能做了大量的研究,Toufik Azib 等对燃料电池车采用了蓄电池和超级电容作为辅助储能装置,仿真证明复合储能装置效率很高^[5];A. Khaligh 等针对混合动力汽车和插入式混合动力汽车提出了一种先进的能量存储拓扑结构^[6];J. P. Trovão 等提出了一种综合能量管理系统,并与纯电池电动汽车进行比较,仿真证明多级能量管理的有效性且其可以降低功率容量^[7]。胡建军等提出了基于电流和速度约束的模糊控制策略,并对复合储能装置参数进行了优化,仿真证明能有效减少蓄电池的输出电流^[8];王琪等针对混合动力汽车复合储能系统提出一种自适应滤波功率分配控制策略并进行了参数优化,实验证明有效降低了蓄电池电流的幅值及波动范围^[9-10];吉林大学也对电动汽车复合储能做了大量的研究并进行了参数优化^[13]。

基于以上对于车载复合储能系统的研究,为了进一步提高电动汽车的动态性能,延长蓄电池的使用寿命,采用复合储能系统作为电动汽车的储能装置,分析电动汽车的运行状态,并提出了一种改进的逻辑门限值控制策略,对复合储能系统能进行能量分配,利用仿真和实验进一步验证其合理性及有效性。

1 复合储能系统

1.1 复合储能系统结构

复合储能系统结构如图1所示。

将超级电容与双向DC/DC变换器串联,再与蓄电池并联连接电机控制器,可以通过双向DC/DC变换器实现对超级电容和蓄电池输入输出功率的控

制。超级电容的工作电压略低于蓄电池的电压,二者共同驱动电机时,超级电容连接在双向DC/DC变换器的低压侧,蓄电池连接双向DC/DC变换器的高压侧,复合储能系统的拓扑结构如图2所示。通过控制蓄电池回路的开关S1和双向DC/DC变换器的工作模式,来确定蓄电池和超级电容参与供电情况。

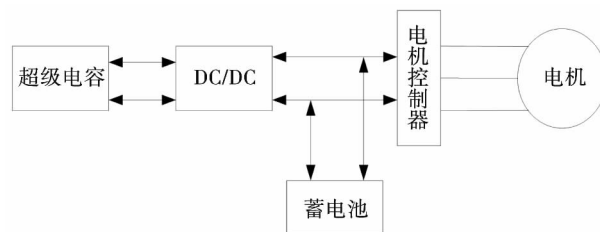


图1 复合储能系统结构

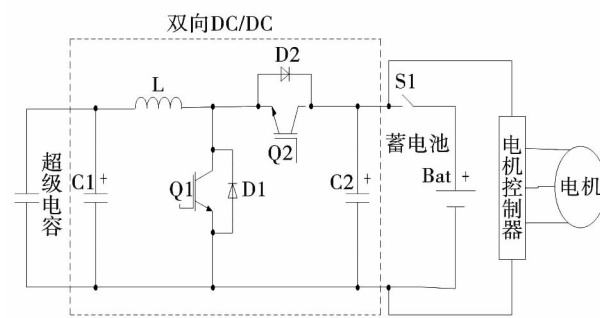


图2 复合储能系统的拓扑结构

2 复合储能系统控制策略

2.1 电动汽车运行状态分析

城市道路中,由于交通拥堵,汽车需要频繁地启停,因此需要电动机在电动状态和发电状态之间不断转换,电机工作状态的不同决定着复合储能系统中蓄电池和超级电容参与供电情况的不同。

2.1.1 电动汽车电机电动状态

当电动汽车在启动、加速或匀速行驶时,电动机为电动工作状态,将储能系统提供的电能转化为汽车所需的动能,使汽车具有良好的动态性能。

1) 电动汽车在启动及加速时,对于功率的需求比较大,采用超级电容提供瞬时大功率。超级电容给电机供电时,需要进行升压处理,此时双向DC/DC变换器工作在升压模式,同时断开S1,避免超级电容放电时给蓄电池充电。此过程复合储能系统供电原理如图3(a)所示。

2) 电动汽车匀速行驶时,对功率需求不高,所需能量较稳定且易满足,由蓄电池单独供电。此阶段超级电容不参与供电,只由蓄电池为电机提供所

需能量,此时双向 DC/DC 变换器不工作,且保持开关 S1 闭合。此过程复合储能系统供电原理如图 3 (b) 所示。

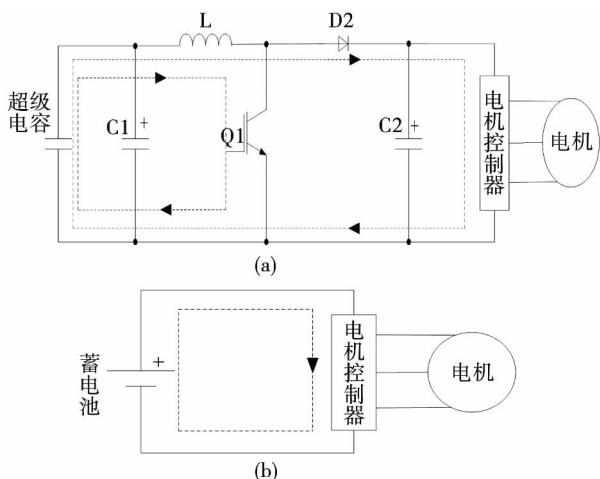


图3 复合储能系统供电情况

2.1.2 电动汽车电机发电状态

当汽车减速或停车时,电动机工作在发电状态,将机械能转化为电能,回馈到储能系统中,实现能量的充分利用。由于超级电容在复合储能系统中至关重要的作用,且其充电速度快,所以汽车产生的再生制动能量首先回馈给超级电容,如果仍有剩余回馈给蓄电池。

1) 将再生制动能量回馈给超级电容时,对超级电容进行充电,充电电流受电机回馈电流限制,双向 DC/DC 变换器工作在降压模式,开关 S1 断开。此过程能量回馈情况如图 4 所示。

2) 将再生制动能量回馈给蓄电池时,对蓄电池进行充电,保持开关 S1 闭合,保证双向 DC/DC 变换器不工作,将超级电容从能量回馈系统中断开,此时有利于提高电动汽车的行驶里程。

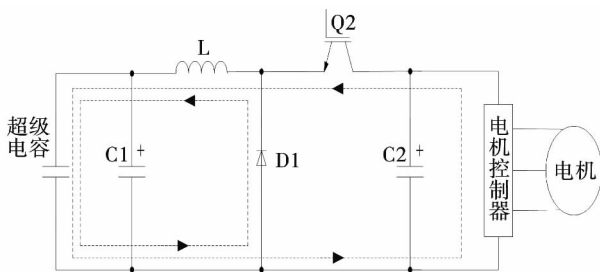


图4 汽车制动能量回馈

2.2 复合储能系统控制策略的设计

目前,车载复合储能系统能量控制策略最为普遍的是逻辑门限值控制策略,由于超级电容的荷电状态 SOC (state of charge) 与电压构成简单的函数关系,因此逻辑门限值本质上是设定超级电容的电压

的上下阈值。超级电容 SOC 门限值的选取,要考虑到超级电容带动电机时的工作电压及其容量,超级电容的 SOC 值呈简单函数关系,超级电容存储的能量 E 与端电压 U 和容量 C 的关系满足如下关系式 (1):

$$E = \frac{1}{2}CU^2 \quad (1)$$

当超级电容端电压为额定电压的 60% 时,其存储的能量仅为额定容量的 36%,此时超级电容能量较低,因此设定超级电容 SOC 最低限值为 0.6,为了给超级电容存储空间留有裕量,其 SOC 上限值设为 0.95。

所用的复合储能系统能量控制策略为改进的逻辑门限控制方法,从汽车加速、匀速和制动三种运行状态分析能量管理策略:

1) 汽车深度加速 (acceleration > 0.45) 运行,当加速信号达到 acceleration > 0.45 时,根据超级电容能量状态,能量管理方法分为以下两种: ① 超级电容的端电压大于额定电压 60% 时,此时超级电容能量在设定的下限值以上,能够满足汽车的行驶需求,由超级电容单独为电机提供所需功率 P_1 ,避免蓄电池大电流输出,同时可避免复合储能系统在超级电容和蓄电池同时供电时,出现一方能量下降而另一方能量上升的情况。此时, $P_1 = P_{sc}$, P_{sc} 为超级电容输出功率。② 超级电容的端电压小于额定电压的 60% 时,超级电容的能量不足,为保证汽车行驶的安全性,此时电机需求功率需要由蓄电池完全提供,功率关系式为 $P_1 = P_{bat}$, P_{bat} 为蓄电池提供的功率。

2) 汽车匀速 (acceleration = 0) 运行以及汽车轻度加速 (acceleration < 0.45) 时,相对深加速行驶状态,此时电机所需驱动电流变化较小,不会给蓄电池带来较大的冲击。为保证汽车深加速或爬坡时超级电容的能量,由蓄电池单独为电机提供能量,功率关系式为 $P_1 = P_{bat}$ 。

3) 汽车减速或刹车 (acceleration < 0) 时,电机工作在发电状态,对复合储能系统进行充电,由于制动能量较少,为保证超级电容在下次启动、加速或爬坡时能够良好地驱动电机,优先由超级电容对制动能量进行吸收,超级电容容量达到设定的上限值 0.95 后,如果制动能量还有剩余则继续给蓄电池充电。

综上,文中所用复合储能系统能量管理改进的逻辑门限策略规则如图 5 所示。

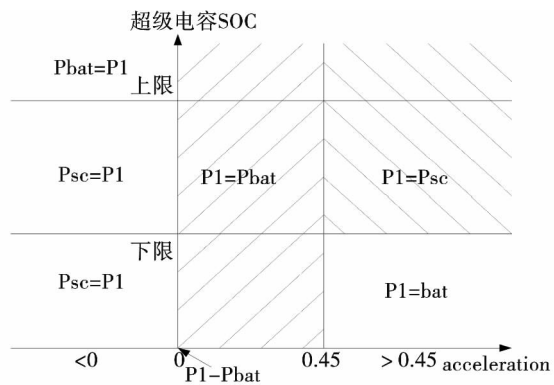


图5 改进的逻辑门限策略规则

3 基于 CRUISE 的复合储能系统能量管理策略仿真与分析

在 AVL CRUISE 软件上搭建复合能源电动汽车模型,将超级电容和 DC/DC 变换器串联后和蓄电池并联接入直流母线。整车基本参数如表 1 所示,输入参数后,进行电气信号连接和机械信号连接,建立能量控制策略进行整车仿真。

表1 整车基本参数

整车质量 / kg	满载质量 / kg	迎风面积 / m ²	空气阻力 系数	车轮滚动 / 半径 m	DC/DC 转换效率 / %
680	950	1.67	0.28	0.217	88
蓄电池 额定电压 / V	蓄电池 容量 / Ah	超级电容 额定电压 / V	超级电容 容量 / F	电机额定 功率 / kW	电机额定 转速 / (r/min)
51	50	48	165	5	3500

纯电动汽车一般主要在城市道路中使用,选用新欧洲循环工况 NEDC(the new european driving cycle) 对车辆进行测评,该工况综合性能评测比较均匀,NEDC 循环工况如图 6 所示,NEDC 循环工况下汽车加速情况如图 7 所示。图中看到汽车频繁加速、减速,单纯使用蓄电池供电,由于其自身特性并不能满足这行驶需求,故加入超级电容器十分必要。

采用蓄电池作为单一动力源的传统电动汽车在 NEDC 循环工况下行驶时,蓄电池的电流变化情况如图 8 所示。从图中可以看到蓄电池的电流变化特别频繁,当电流为负时,为放电电流,即输出电流;当电流为正时,为回馈电流,即输入电流。输出电流变化范围为 0~100 A,输入电流变化范围为 0~75 A,并经常伴随有突变的情况发生,蓄电池这种工作性

能并不理想,通常会缩减电池的使用寿命。

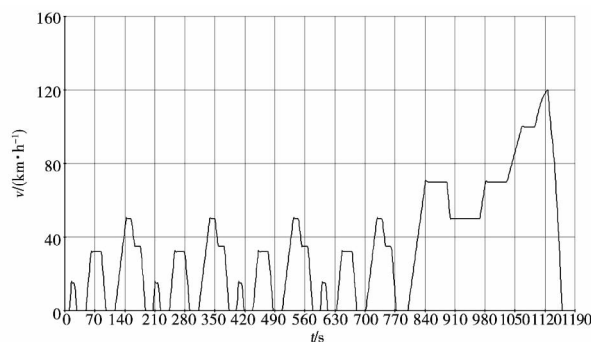


图6 NEDC 循环工况

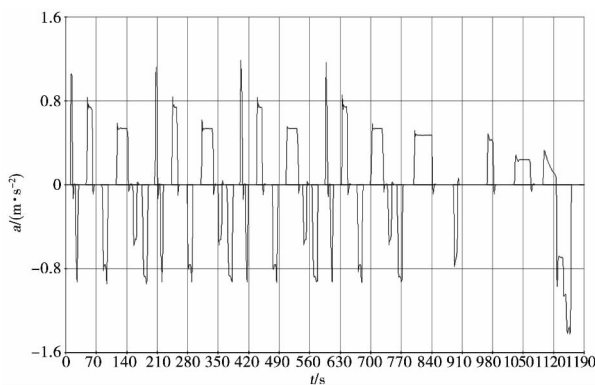


图7 NEDC 循环工况加速情况

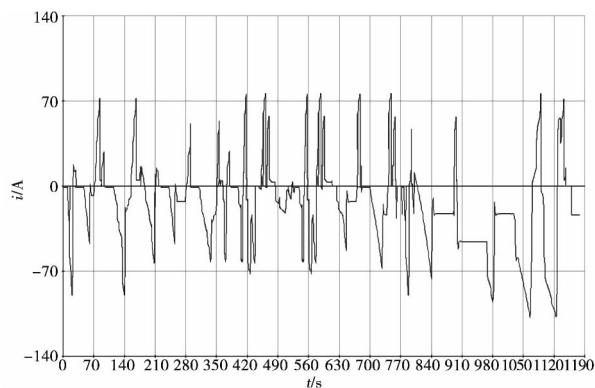


图8 单一-蓄电池电流的变化

根据上节确立的复合能源工作模式建立了相应的能量管理控制策略,控制策略流程图如图 9 所示,其中 $\text{acceleration} > 0.45$ 代表汽车深度加速, $\text{acceleration} < 0.45$ 代表汽车轻度加速, $\text{acceleration} = 0$ 代表汽车匀速行驶, $\text{acceleration} < 0$ 代表减速或制动, $P1$ 为电机需求功率, P_{bat} 为蓄电池功率, P_{sc} 为超级电容功率, V_c 表示超级电容电压。

在 NEDC 循环工况下,电动汽车复合储能系统中蓄电池和超级电容的电流变化如图 10(a) 和(b) 所示,蓄电池和超级电容的 SOC 变化如图 11(a) 和(b) 所示。

从图 10 中可看出蓄电池电流和超级电容电流

相差很大, 蓄电池输出电流变化范围

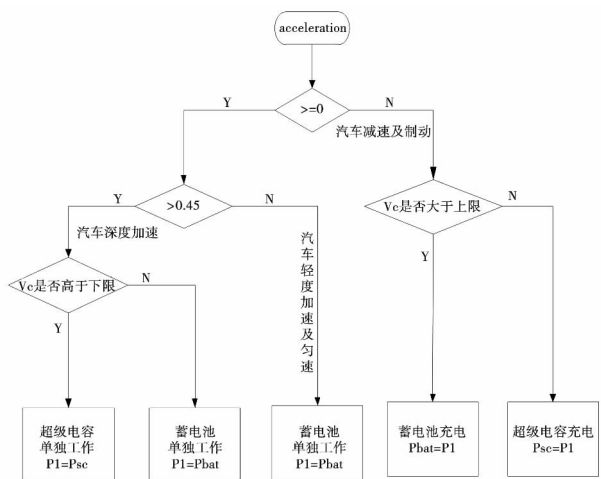
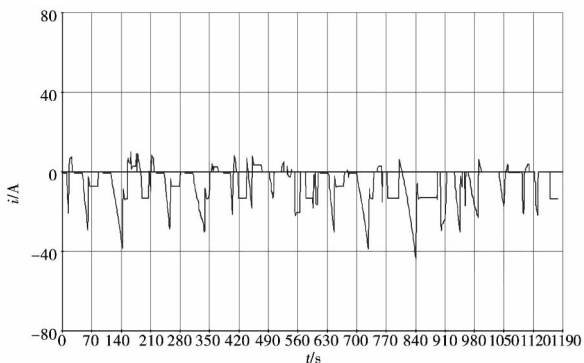
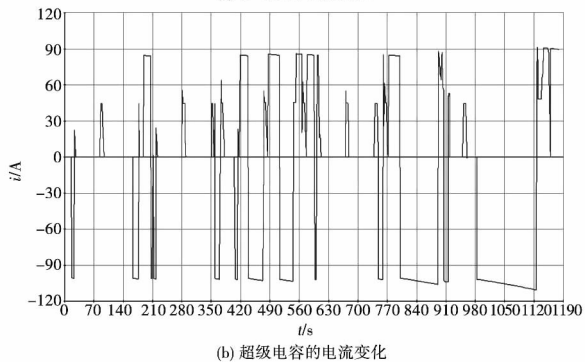


图9 复合储能系统能量管理控制策略流程图



(a) 蓄电池的电流变化



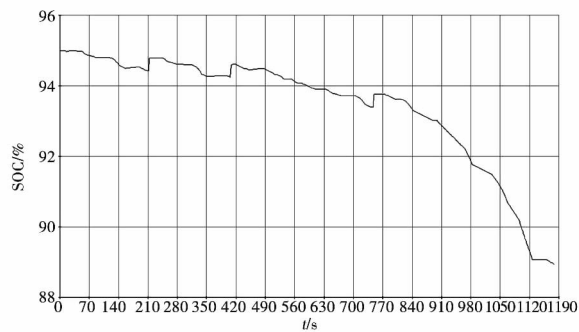
(b) 超级电容的电流变化

图10 复合储能系统电流变化

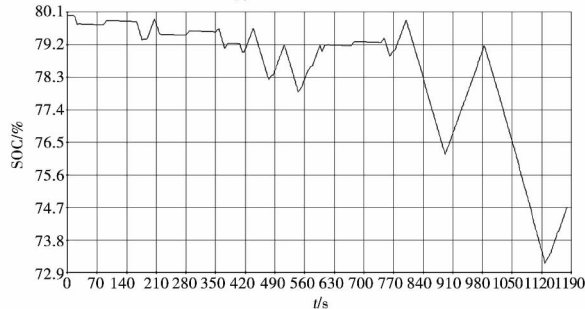
为0~40 A, 输入电流范围为0~10 A, 超级电容输出电流变化范围为0~100 A, 输入电变化范围为0~90 A左右。相比单一蓄电池作为纯电动汽车的动力源, 蓄电池的输出电流减少了60%, 输入电流减少了86.7%。数据表明采用复合存储系统后, 有效避免了蓄电池大电流输出, 使其免受大电流的冲击, 在汽车具有大功率需求时, 超级电容优先提供大电流进行驱动。

从图11中可以看到, 一个循环工况后, 蓄电池SOC由95%降到89%, 超级电容SOC由80%变为74.7%。蓄电池和超级电容的SOC都有回升的趋

势, 可知在再生制动过程中确有能量回馈到复合储能系统中, 且超级电容SOC回升幅度较大, 制动能量优先回馈给超级电容。



(a) 蓄电池的SOC变化



(b) 超级电容的SOC变化

图11 复合储能系统SOC变化

4 实验及结果分析

4.1 电动汽车复合储能系统搭建

汽车实验平台模拟小型电动汽车, 采用额定电压48 V, 额定功率5 kW的无刷直流电机和额定电压48 V的电机控制器HPC300, 低噪音, 低转矩脉动驱动, 具有刹车、加速和巡航定速等功能。在此基础上, 搭建了复合储能结构及其控制系统, 采用两个磷酸铁锂电池串联组成动力电池组, 单体电池额定电压25.6 V, 标称容量50 Ah; 采用Maxwell超级电容, 额定电压48 V, 额定容量165 F; 双向DC/DC变换器额定功率8 kW, 高压侧0~60 V, 低压侧0~48 V, 电源效率高达97%, 具有升降压工作模式, 通过CAN指令控制模式切换。复合储能系统连接图12所示。

对电机控制器的外围电路进行搭建, 通过外围按键可以实现巡航控制和刹车控制, 电机控制器的加速信号端口与加速踏板相连, 通过检测按键和加速踏板的输出信号判断汽车行驶模式。用电压传感器检测超级电容电压, 将所检测到的信号都传送给DSP芯片, 根据汽车不同的行驶模式, DSP芯片通过CAN指令控制蓄电池回路中的IGBT和双向DC/DC变换器, 以实现蓄电池和超级电容的能量分配。

由于实验条件的有限性,不能准确的模拟 NECD 工况,利用电动机和加速踏板模拟不同的行驶模式。复合储能电源系统的结构如图 13 所示。

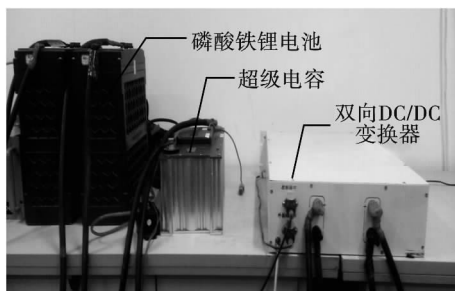


图 12 复合储能系统连接图

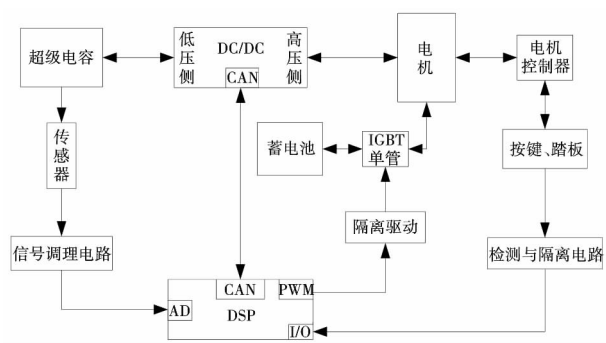


图 13 复合储能电源系统结构图

4.2 实验结果分析

采用 LabVIEW 对复合储能系统的数据进行采集,利用传感器、数据采集卡和计算机对蓄电池和超级电容电压电流信号进行自动采集、显示和储存。被测信号经相应的传感器转换为电压信号,经过信号调理电路滤波放大,由数据采集卡输入计算机,通过查看电脑终端上监测界面可以随时监测到复合储能系统工作情况。

单一蓄电池作为电动汽车的动力源时,蓄电池的电压电流如图 14(a)、(b) 所示。从图中可以看出,单一蓄电池作为动力源时,电压的变化范围为 45.6 ~ 35.4 V,电流的变化范围为 0 ~ 35 A,变化比较大,这样频繁的大电流输出会对蓄电池造成损害。

在系统中加入超级电容和双向 DC/DC 变换器构成复合储能电源系统后,监测到的蓄电池的电压电流如图 15(a)、(b) 所示,超级电容的电压电流如图 16(a)、(b) 所示。从图 15、16 中可以看出,采用复合储能系统以后,电压变化范围为 48.6 ~ 47.8 V,蓄电池的电流变化范围为 0 ~ 5 A,最大电流由单一蓄电池时的 35 A 降到了 5 A。超级电容的电压变化范围为 46.6 ~ 36.6 V,电流变化范围为 0 ~ 28 A,分担了蓄电池的大电流,避免了对蓄电池的损害。

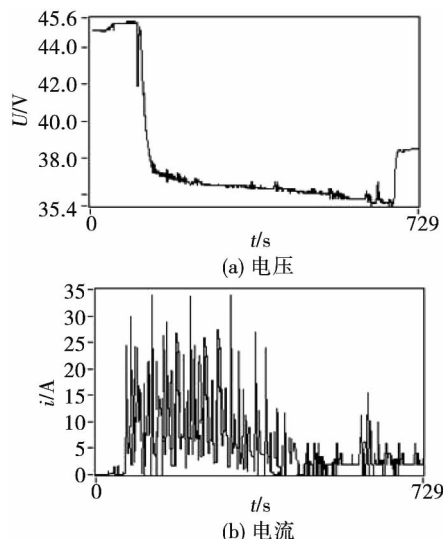


图 14 单一电源蓄电池

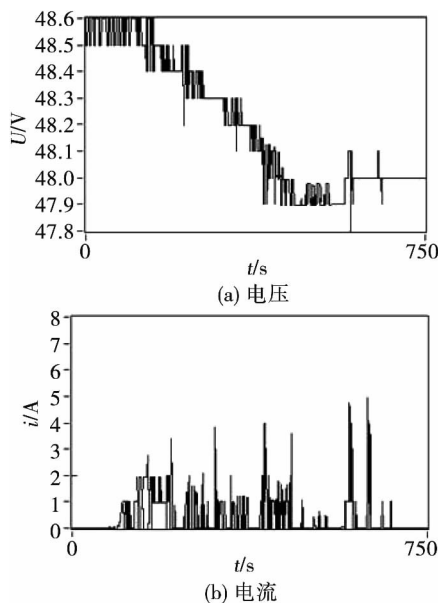


图 15 复合储能系统蓄电池

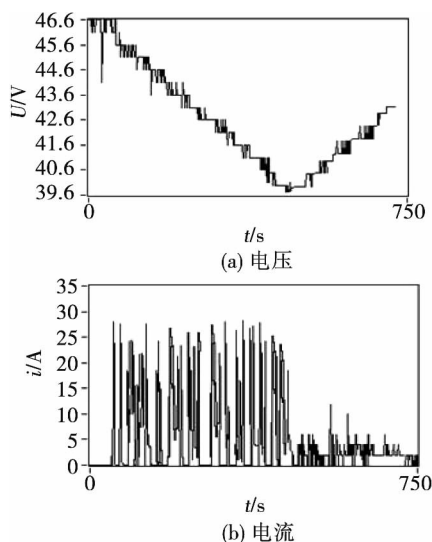


图 16 复合储能系统超级电容

从图14~16可以看出,采用单一蓄电池作为动力源提供能量,蓄电池会频繁发生瞬时大电流充放电,影响蓄电池的寿命,损害非常大。采用复合储能结构作为电动汽车的动力源,应用本文中改进的复合储能系统能量管理策略,利用超级电容输出和吸收瞬时大电流,使得蓄电池的输入输出电流可以维持在较小范围内。采用此复合储能系统及能量控制策略,可以充分发挥蓄电池和超级电容的优势,使电动汽车的性能达到最优化,从而在满足汽车行驶需求的情况下,延长蓄电池的使用寿命,提高电动汽车的续航里程。

5 结 论

1) 确立了复合储能系统的结构,提出了一种改进的逻辑门限控制方法,根据车辆不同的运行状态确立不同的能量管理策略。

2) 利用 AVL CRUISE 搭建整车模型,进行了城市工况下的性能仿真,验证能量控制策略的有效性,在实验平台上进行实物验证。实验结果显示,采用复合储能系统以后,蓄电池的最大输出电流由采用单一蓄电池时的 35 A 降到了 5 A,降低了 86%,超级电容的输出电流为 0~28 A,超级电容承担了剩余部分的电流和功率。

3) 仿真和实验表明,采用该复合储能系统及其能量控制策略能够避免蓄电池的大电流输出和冲击,超级电容能够输出和吸收瞬间大电流,且超级电容能够优先回收再生制动能量,延长了蓄电池的使用寿命和汽车续航里程。

参 考 文 献:

- [1] 刘卓然,陈健,林凯,等. 国内外电动汽车发展现状与趋势[J]. 电力建设,2015(7):25-32.
- [2] 宋永华,阳岳希,胡泽春. 电动汽车电池的现状与发展趋势[J]. 电网技术,2011(4):1-7.
- [3] 曹秉刚,曹建波,李军伟,等. 超级电容在电动车中的应用研究[J]. 西安交通大学学报,2008(11):1317-1322.
- [4] 桑丙玉,陶以彬,郑高,等. 超级电容-蓄电池混合储能拓扑结构和控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2014(2):1-6.

- [5] 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 and Electronic Engineering, 2014, 9(5): 548-554.
- [6] KHALIGH A, LI Z. Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(6): 2806-2814.
- [7] TROVÃO J. P., SANTOS V. D., PEREIRINHA P. G., et al. Comparative study of different energy management strategies for dual-source electric vehicles, Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), 2013 World, Barcelona: 1-9.
- [8] 胡建军,肖军,晏玖江. 纯电动车车用复合储能装置控制策略及参数优化[J]. 重庆大学学报,2016(1):1-11.
- [9] 王琪,孙玉坤. 一种混合动力汽车复合电源能量管理系统控制策略与优化设计方法研究[J]. 中国电机工程学报,2014(S1):195-203.
- [10] 王琪,孙玉坤,黄永红. 一种蓄电池-超级电容器复合电源型混合动力汽车制动力分配策略研究[J]. 电工技术学报,2014(S1):155-163.
- [11] 黄智奇,姚栋伟,杨国青,等. 电动汽车复合能源系统再生制动分段控制策略研究[J]. 机电工程,2016(3):280-286.
- [12] 王斌,徐俊,曹秉刚,等. 一种新型电动汽车复合电源结构及其功率分配策略[J]. 汽车工程,2015(9):1053-1058+1052.
- [13] 王同景. 电动汽车复合电源能量管理策略研究[D]. 长春:吉林大学,2015.
- [14] ZENG X., WANG J. A Parallel Hybrid Electric Vehicle Energy Management Strategy Using Stochastic Model Predictive Control With Road Grade Preview [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(6):2416-2423.
- [15] 周美兰,赵强,周永勤. 改进的 PSO-BP 神经网络估算磷酸铁锂电池 SOC [J]. 哈尔滨理工大学学报,2015(4):88-92.
- [16] 张纯江,董杰,刘君,等. 蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略[J]. 电工技术学报,2014(4):334-340.
- [17] 武伟,谢少军,张墨,等. 基于 MMC 双向 DC-DC 变换器的超级电容储能系统控制策略分析与设计[J]. 中国电机工程学报,2014(27):4568-4575.
- [18] 李珂,张承慧,崔纳新. 电动汽车用高效回馈制动控制策略[J]. 电机与控制学报,2008(3):324-330.
- [19] 朱洪波,康龙云,杨会州. 基于 LabVIEW 的复合能源电动汽车数据采集系统的设计[J]. 测控技术,2011(8):19-22.
- [20] 刘永相,惠富会,徐瑞林,等. 基于 LabVIEW 和 CAN 总线的电动汽车充电站监控系统设计[J]. 电测与仪表,2011(11):41-44.

(编辑:关毅)