文章编号:1671 - 6833(2016)01 - 0040 - 05

纯电动赛车复合电源动力系统控制研究

贺伊琳,许世维,刘　瑞,谢学飞

(长安大学 汽车学院,陕西 西安 710064)

摘　要: 提高纯电动赛车性能的关键在于提高其动力性,而制约电动汽车动力性的主要因素在于储能系统,提出了一种纯电动赛车用复合电源动力系统的研究方法与试验方案. 首先确定复合电源的组成并建立数学模型,其次根据不同工况下复合电源的不同工作模式制定控制策略,最后搭建试验台对复合电源的性能与控制方法进行试验验证. 所做研究工作提高了纯电动赛车复合电源动力系统的控制水平,对于提升纯电动赛车的动力性、延长蓄电池的使用寿命具有一定的现实意义.

关键词: 纯电动赛车;复合电源;动力系统;控制策略;试验装置

中图分类号: TM53;TP391.9　　**文献标志码:** A　　doi:10.3969/j.issn.1671 - 6833.201503042

0　引言

随着新能源汽车技术的不断进步,纯电动赛车也走进了人们的生活,纯电动赛车主要通过动力性等指标评判车辆性能,对动力性要求相对较高. 复合电源相比于单一电源能有效提高电动汽车的动力性,因此,研究复合电源对于提升电动赛车的性能具有重要意义. 文献[1]优化了复合电源控制策略,验证了 SOC 与制动能量回收率的变化情况,未考虑动力性的变化;文献[2]提出了一种复合电源的匹配方法与控制策略,最后仅对模型进行了仿真,未对设计复合电源的性能进行实验验证;文献[3]提出了复合电源的逻辑门限控制策略,该策略阈值是固定的,难以满足车辆复杂多变的运行环境. 针对上述不足,笔者针对纯电动赛车的动力系统提出了一种复合电源的设计方案与控制策略,对设计结果进行模型仿真,并在实验室环境下对系统进行调试,使其提高赛车的动力性,最大限度地回收制动能量,延长蓄电池使用寿命.

1　复合电源参数匹配及建模

1.1　复合电源的组成及系统分析

蓄电池作为纯电动汽车的能源供给装置,具有比能量大和比功率小的特点,而超级电容具有比能量小和比功率大的特点[4-5],二者单独用以驱动赛车行驶,均难以满足赛车对理想电源的要求,且大电流充放电易对蓄电池寿命产生不利影响. 若使二者取长补短,组成复合电源作为纯电动方程式赛车动力源,则可同时具有能量密度高和功率密度高的优点,从而提高赛车性能.

复合电源的工作原理图如图 1 所示. 驱动行驶时,蓄电池的输出功率应与赛车行驶所需的平均功率相匹配,在图中即为最大稳态行驶功率与零功率线之间的那部分,而超级电容用于提供峰值功率,实现“削峰”作用,即为需求功率与最大稳态行驶功率之间的部分;制动时,将回收的能量优先考虑给超级电容充电,即图中零功率线之下的那部分,从而实现“填谷”作用.

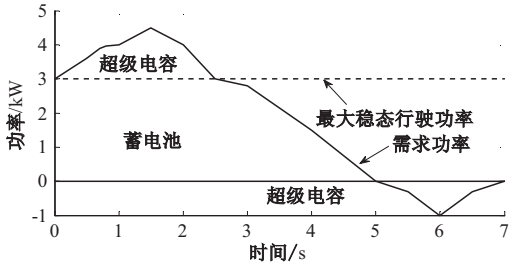

图 1　复合电源工作原理图

Fig. 1　Operating principle of synergic power supply

由于蓄电池与超级电容的充放电特性不同,若将其直接并联组成复合电源,二者端电压相同,仅当蓄电池电压变化时超级电容才开始工作. 为

收稿日期: 2015 - 03 - 20;**修订日期:** 2015 - 04 - 24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51507013);中央高校基金资助项目(310822151025)

作者简介: 贺伊琳(1989—),女,新疆塔城人,工程师,长安大学博士研究生,主要从事电动汽车研究工作,E-mail: heyilin@chd.edu.cn.

引用本文: 贺伊琳,许世维,刘瑞,等. 纯电动赛车复合电源动力系统控制研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2016,37(1):40 - 44.

解决这一问题,在蓄电池和超级电容之间,加装 DC/DC 功率变换器,将其串联在超级电容一端,检测蓄电池电压变化以调节超级电容的输出,控制二者之间的功率分配,实现复合电源的设计目的[6].综上,复合电源的结构图如图 2 所示.

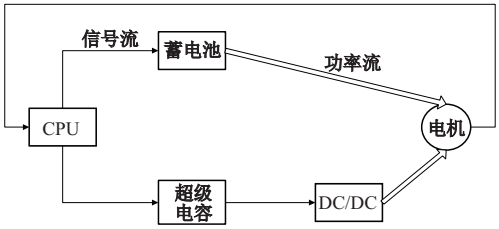

图 2　复合电源的结构

Fig. 2　Structure of synergic power supply

1.2　复合电源模型的建立

复合电源的数学模型由蓄电池、超级电容及 DC/DC 功率变换器 3 个元件的子模型和控制策略模块 4 部分组成.分别基于内阻模型和经典 RC 模型建立蓄电池和超级电容模型,对于 DC/DC 功率变换器,则根据功率变换器的升压效率曲线和降压效率曲线进行耦合,得出 DC/DC 功率变换器的模型[7-8].

在 Matlab/Simulink 软件环境下建立的复合电源模型如图 3 所示.其中,In1(输入端口 1)为电机需求功率,Out1(输出端口 1)为复合电源实际输出的功率,Out2(输出端口 2)和 Out3(输出端口 3)分别表示蓄电池和超级电容的工作电流.

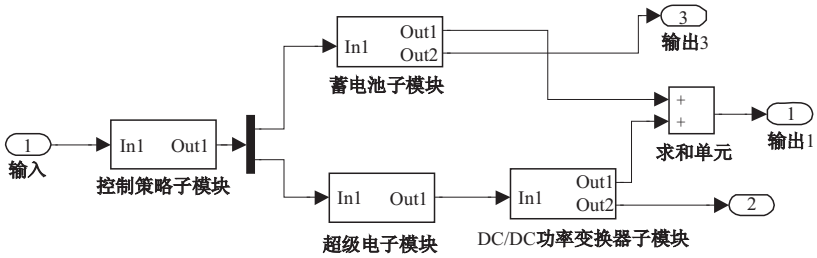

图 3　复合电源的数学模型

Fig. 3　Mathematical model of synergic power supply

2　动力系统的控制策略及仿真

2.1　复合电源的工作模式分析

根据赛车需求功率和复合电源荷电状态的不同,将复合电源的工作模式分为如下 4 种:

1)超级电容与蓄电池共同驱动模式.赛车启动及加速行驶时对功率要求很高,此时蓄电池提供平均功率,超级电容提供峰值功率,达到提高赛车动力性、减小蓄电池工作电流的目的.

2)蓄电池单独驱动模式.赛车运行稳定且速度不高时,蓄电池输出功率能够满足电机要求,此时超级电容不工作,蓄电池单独放电.

3)超级电容充电模式.当电机需求功率较小且超级电容电量不足时,蓄电池给电机提供驱动功率,同时给超级电容充电,保持超级电容高功率放电的能力.

4)再生制动模式.赛车制动时,电机处于发电状态,将一部分动能转化为电能,若复合电源的电量未达上限,优先对超级电容充电,避免大电流对蓄电池造成冲击.

2.2　功率分配策略的制定

采用模糊逻辑控制策略确定复合电源中各部分输出功率占需求功率的比例,同时考虑电源的使用寿命与安全性,依据电机的需求功率 P 以及蓄电池的荷电状态 B_{soc} 和超级电容的荷电状态 C_{soc} 3 个参数分配功率,作为模糊逻辑控制策略的输入.

电机所需的功率由蓄电池和超级电容共同提供,即

$$P = P_b + P_c. \tag{1}$$

式中:P 为电机的需求功率;P_b 为蓄电池提供的功率;P_c 为超级电容提供的功率.

将蓄电池提供的功率占电机总需求功率的比例系数记为 k,

$$k = \frac{P_b}{P}\ (0 \leqslant k \leqslant 1). \tag{2}$$

作为模糊系统的输出量,假定制动时电机反转产生的最大功率为正转所需最大功率的 40%,确定电机需求功率的论域 $P = [-0.4, 1]$;考虑放电深度的影响,蓄电池荷电状态 $B_{soc} = [0.1, 1]$ 和超级电容荷电状态的论域 $C_{soc} = [0.1, 1]$;输出量功率分配系数的论域 $k = [0, 1]$.

电机的需求功率选择响应最快的三角隶属函数为其隶属度函数,将论域分为负小(NS)、正小

(PS)和正大(PB)3个模糊子集,即 $P=\{NS,PS,PB\}$;蓄电池荷电状态和超级电容荷电状态选择具有良好过渡性的高斯隶属函数作为其隶属度函数,将论域分为较小(LE)、中间(ME)、较大(GE)3个模糊子集,分别为:$B_{soc}=\{LE,ME,GE\}$ 和 $C_{soc}=\{LE,ME,GE\}$;选用高斯隶属函数、Z型隶属函数和S型隶属函数作为输出量比例分配系数的隶属度函数,将其论域分为较小(LE)、中小(ML)、中间(ME)、中大(MB)和较大(GE)5个模糊子集,即 $k=\{LE,ML,ME,MB,GE\}$.

依据超级电容"削峰填谷"的原则,确定不同工况下复合电源的工作模式,笔者制定的模糊控制规则集如表1所示.

表1 模糊控制规则集

Tab.1 Rules of fuzzy control

P	B_{soc}	C_{soc}	k
PB	LE	LE	MB
PB	LE	ME	MB
PB	LE	GE	ME
PB	ME	LE	GE
PB	ME	ME	GE
PB	ME	GE	MB
PB	GE	LE	GE
PB	GE	ME	MB
PB	GE	GE	ME
PS	LE	LE	GE
PS	LE	ME	ME
PS	LE	LE	LE
PS	ME	LE	GE
PS	ME	ME	ME
PS	ME	GE	ML
PS	GE	LE	GE
PS	GE	ME	MB
PS	GE	GE	MB
NS	LE	LE	LE
NS	LE	ME	ME
NS	LE	GE	GE
NS	ME	LE	LE
NS	ME	ME	ME
NS	ME	GE	GE
NS	GE	LE	LE
NS	GE	ME	MB
NS	GE	GE	LE

2.3 仿真结果及分析

以2011年全国大学生方程式汽车大赛为依托,按照电车组比赛专项规则对赛车参数的要求,确定整车设计目标参数,根据设计目标中最高车速匹配电机,据此确定复合电源的参数.其中,整车质量为293 kg,空气阻力系数为0.34,迎风面积为1.4 m^2,滚动阻力系数为0.024,设计最高车速为120 km/h,匹配电机的额定电压为144 V,确定所选蓄电池电压为144 V,质量为99.6 kg,超级电容的额定电压为64 V,质量为13.2 kg.

在Matlab/Simulink软件环境下将复合电源的数学模型运用模糊控制策略进行仿真,得到蓄电池功率和超级电容功率的仿真结果如表2所示.

由表2可知,蓄电池和超级电容输入输出功率的变化趋势大致相同,但蓄电池功率变化范围始终小于超级电容.蓄电池仅承担平均功率部分,超级电容补充剩余部分,有效发挥了其"削峰填谷"的作用,提高电源效率.

单一电源中电池电流和复合电源中电池电流的仿真结果如表3所示.

由此可知,由于超级电容的加入,复合电源中电池的电流小于蓄电池单独工作的电流.电池和超级电容能够很好地发挥各自优势,有效延长蓄电池的使用寿命.

通过车速随时间的变化情况,对赛车动力性进行仿真,结果如图4所示.

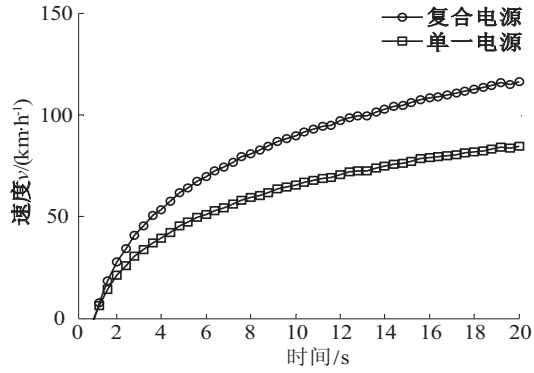

图4 动力性仿真结果

Fig.4 Simulation result of dynamic performance for vehicle

表2 电池功率和超级电容功率仿真结果

Tab.2 Simulation result of power of battery and super capacitor W

超级电容	6 100	-5 000	4 200	-5 500	6 500	-7 600	7 800	-4 800
蓄电池	2 500	-3 900	2 000	-4 000	3 000	-4 100	3 400	-2 100

表 3　单一电源和复合电源中蓄电池电流仿真结果

Tab. 3　Simulation result of current of battery in single power supply and synergic power supply　　A

单一电源	390	-80	360	-100	300	-85	40	-40
复合电源	90	-40	85	-40	150	-40	40	-30

由图 4 可知,采用单一电源赛车的加速曲线始终处于采用复合电源赛车的加速曲线之下,表明在赛车加速过程中的任一时刻,采用复合电源的赛车车速较高,其原地起步加速时间明显小于采用单一电池电源的赛车,有效提高了赛车的动力性.

3　动力系统的试验装置研究

3.1　试验装置的硬件设计

复合电源动力系统试验装置由蓄电池、超级电容、DC/DC 功率变换器、主控制器、电机控制器、电机、传感器、加速踏板、相应的信号调理电路与工作状态监控显示等硬件部分组成. 其中,蓄电池和超级电容是试验装置正常运转的能量源;电机需求功率的变化通过调节加速踏板开度实现;传感器包括电压传感器和电流传感器两类,用以检测蓄电池和超级电容的端电压与工作电流;信号调理电路对传感器的输出信号进行相应处理,使其满足主控制器的输入条件;主控制器作为整个系统的核心,接收信号调理电路的输出信号,实现复合电源的功率分配[9]. 同时,将电机转速、蓄电池与超级电容的端电压和电流等主要参数通过工作状态监控显示界面进行实时显示,查看试验装置的运行状态.

复合电源系统由蓄电池放电驱动电机、超级电容放电驱动电机及蓄电池为超级电容充电 3 条支路组成,每条支路中串接一个电子开关,由电子开关的通断状态决定该支路是否参与工作,继而实现对复合电源系统的控制,其电路如图 5 所示. 其中,C 为超级电容,B 为蓄电池,R 为限流电阻,MOSFET1 ~ MOSFET3 分别为 3 个电子开关,D1 ~ D3 为 3 个二极管,M 为电机.

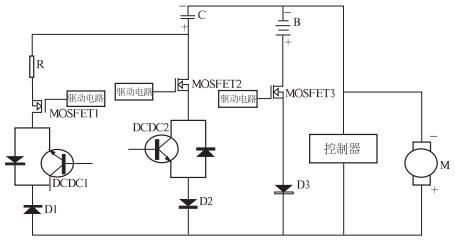

图 5　试验装置电路图

Fig. 5　Circuit diagram of test facility

3.2　试验装置的软件设计

大量试验表明,蓄电池和超级电容的端电压与荷电状态 SOC 近似为一线性关系,因此,在该试验中以端电压的值表示其荷电状态 SOC.

以踏板开度信号为需求功率,根据蓄电池和超级电容的端电压,确定 3 条支路上电子开关的工作状态,其软件流程图如图 6 所示. 其中,U_B 和 U_C 分别为蓄电池和超级电容的端电压,K 为加速踏板开度,VT1 ~ VT3 为图 6 中 MOSFET1 ~ MOSFET3 3 个电子开关,值取 1 表示接通,取 0 表示断开.

在 MCGS 嵌入式组态软件(monitor and control generated system)环境下设计试验装置的工作状态监控界面[10],实时显示蓄电池的电压电流、超级电容的电压电流、电机转速以及加速踏板开度等参数,对比复合电源和单一电源在不同工况下的电流变化情况. 采用串行通信的方式将中央处理单元计算所得信号的值发送到显示屏,实现信息的传递与显示.

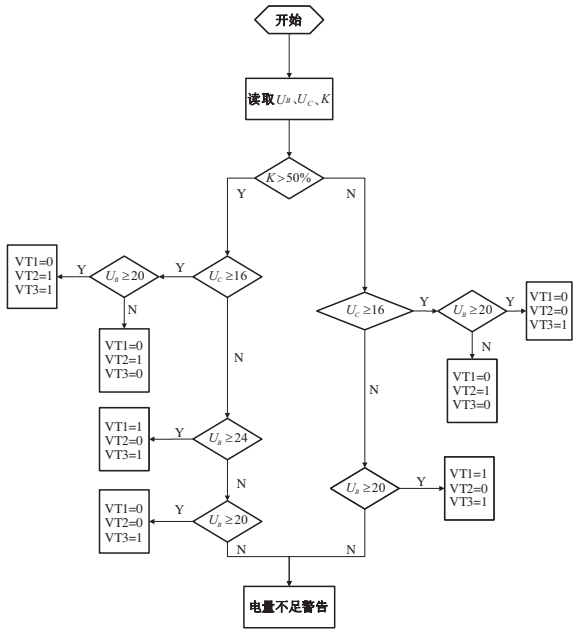

图 6　试验装置软件流程图

Fig. 6　Software flow diagram of test facility

3.3　试验结果及分析

1)将蓄电池和超级电容充电至额定电压,调节踏板开度使电机转速稳定在 500 r/min,当双能量源的支路均接通时,蓄电池的电流为 8.3 A,仅

蓄电池支路接通时,各支路电流大小不变.试验结果表明,电机需求功率较小且复合电源电量充足时,超级电容不工作,蓄电池单独驱动电机且放电电流不大.

2)将蓄电池和超级电容充电至额定电压,调节踏板开度使电机转速稳定在1 500 r/min,当双能量源的支路均接通时,蓄电池电流为23.4 A,超级电容电流为27.9 A,仅蓄电池支路接通时,蓄电池电流为51.7 A,几乎增加了一倍.试验结果表明,电机需求功率较大且复合电源电量充足时,蓄电池和超级电容同时驱动电机,有效减小了蓄电池的工作电流.

3)将超级电容放电至较低电量,调节踏板开度使电机转速稳定在500 r/min,双能源支路均接通时,蓄电池电压为25.5 V,电流为12.6 A,超级电容电压为14.9 V,电流为-4.7 A.试验结果表明,当电机需求功率较小且超级电容电量不足时,蓄电池在驱动电机的同时对超级电容充电.

4)将蓄电池和超级电容放电至较低电量,调节加速踏板,蓄电池电压为18.1 V,超级电容电压为14.7 V,各支路电流为零,即使踩下加速踏板,电机转速仍为零,电量不足警告指示灯变红,表明此时电源电量过低,复合电源不工作.

4 结论

1)蓄电池-超级电容的复合电源同时具有高比能量和高比功率的特性,与单一电源相比,能最大限度地满足纯电动方程式赛车对动力性的要求;而且超级电容"削峰填谷"的作用还能有效减小蓄电池的工作电流,延长蓄电池使用寿命,有利于赛车制动能量回收性能的提高.

2)在后续研究工作中,应进一步优化复合电源的功率分配策略,研究多种控制相结合的方法,提高控制精度.设计试验装置时,应考虑制动能量回收的作用,完善纯电动赛车动力系统,为实际应用奠定理论基础与实践经验.

参考文献:

[1] 张丹红,汪江卫,刘开培,等. HEV车载复合电源系统控制策略优化研究[J],电源技术,2012,136(5):650-654.

[2] 陆建康. 微型纯电动汽车复合电源系统研究[D]. 南京:南京航空航天大学能源与动力学院,2011.

[3] 曹国强. 混合动力车用复合电源系统开发与试验验证[D]. 长春:吉林大学汽车学院,2011.

[4] 盘朝奉,何志刚,张德望,等. 复合电源电动汽车动力系统建模与仿真[J],广西大学学报(自然科学版),2012,37(2):284-290.

[5] SHEN X J,CHEN S,ZHANG Y. Configure methodology of on-board super-capacitor array for recycling regenerative braking energy of URT vehicles[J]IEEE transaction on industry applications,2012,49(4):1-8.

[6] 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,2014,42(2):1-6.

[7] 毕东阳. 混合动力客车用复合电源电气架构优化设计[D]. 长春:吉林大学汽车学院,2014.

[8] 胡春花. 纯电动大客车复合电源系统能量管理关键技术研究[D]. 长春:吉林大学汽车学院,2012.

[9] 孙同景. Freescale9S12十六位单片机原理及嵌入式开发技术[M],北京:机械工业出版社,2008.

[10] 冀承凯. 基于MCGS组态监控技术的溢流染色机集散控制系统研究[D],济南:济南大学机械工程学院,2012.

Research of Powertrain Control Based on Synergic Power Supply for Electric Racing Vehicle

HE Yilin, XU Shiwei, LIU Rui, XIE Xuefei

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The key to the improvement of the performance of electric racing vehicle is to promote its dynamic performance, while the main factor of restraining dynamic performance is energy resource. In view of this, the research method and experiment scheme of synergic power for electric racing vehicle is put forward. The components of synergic power are obtained and the synergic power mathematical model is established. The control strategy is worked out according to different working models in different conditions. Finally, the performance of synergic is testified with experiment. The research is of great significance to improve the dynamic performance of electric racing vehicle. At the same time, it can also prolong the life span of battery.

Key words: electric racing vehicle; synergic power; power train; control strategy; test facility