

一种新型电动车超级电容-蓄电池复合电源系统

肖祥慧¹, 曾祥君¹, 戴作财²

(1. 长沙理工大学电网安全监控技术教育部工程研究中心, 湖南长沙 410004; 2. 国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 针对目前电动车续驶里程短、电池易老化、爬坡能力差、能量回收效率低的缺陷, 研究以比功率高、循环寿命长的超级电容作为辅助电源, 实现了一种新型超级电容-蓄电池复合电源系统. 从超级电容-蓄电池系统的结构出发, 对电动车的行驶工况进行了具体分析, 构建了超级电容充电模型和超级电容-蓄电池复合电源系统模型. 仿真和实际试验结果表明, 该复合电源系统能有效回收制动能量, 从而使蓄电池的低能量密度和低功率密度等缺陷得到弥补, 进而提高电动车动力性能和电能的利用率, 使电动车的续驶里程增长, 能有效地降低蓄电池电压和电流幅值波动, 延长蓄电池的使用寿命.

关键词: 电动车; 超级电容; 蓄电池; 复合电源系统

中图分类号: TN86

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2017)04-0922-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.04.022

Research on the New Hybrid Power System of the Super Capacitor-Battery for the Electric Vehicle

XIAO Xiang-hui¹, ZENG Xiang-jun¹, DAI Zuo-cai²

(1. Engineering Research Center of Power Grid Safety Monitoring & Control Technology (Ministry of Education),
Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410004, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: For the electric vehicle's defects of short continued driving mileage, easy battery aging, poor climbing ability and low energy recovery efficiency, the high power density and long cycling life hybrid power system of the super capacitor-battery based on the super capacitor auxiliary is studied. Based on the structure of the super capacitor-battery system, the driving mode of the electric vehicle is analyzed and the super capacitor charging model is built; meantime, the super capacitor battery hybrid power system is built and simulated. Simulation and experimental results show that the hybrid power system can effectively recover the braking energy, make up the defects of the battery low energy density and low power density, improve the electric vehicle power performance and power utilization. So this system can make the electric vehicle continued driving mileage longer, effectively reduce the battery voltage and current amplitude fluctuations as well as prolong the battery service life.

Key words: electric vehicle; super capacitor; battery; the hybrid power system

1 引言

随着社会的发展, 不断污染的环境和逐渐减少的现存能源已成为 20 世纪以来亟待解决的两大危机. 能源方面, 近年来随着汽车保有量急剧上升, 石油资源开始出现不足, 研究表明, 石油蕴藏量仅可供当前世界消耗速度使用 50 ~ 70 年. 环境方面, 石油燃烧严重污染大气, 使人类健康受到严重危害. 因此, 随着能源危机和环

境污染的加剧, 节能无污染以及方便快捷经济的电动车逐渐成为人们生活中一种重要的绿色交通工具, 特别是混合动力汽车 (HEV)^[1,2].

混合动力汽车 (HEV) 凭借其环保、节能的优点在市场上的应用越来越广泛. 但是, 目前 HEV 的动力性能仍比不上传统燃油汽车. 然而, 目前 HEV 在能量回收再生制动过程中仍存在一些问題. 由于蓄电池难以实现短时间大功率充电, 而且充放电循环次数有限, 以及对

回馈脉动电流的吸收效率很低,频繁过大的充电会对蓄电池造成损害,影响蓄电池的比功率和循环使用寿命,限制能量回收效率的提高^[3~5];因此一种能够辅助电动车电源供给的快速充放电模块成为电动车领域的迫切需要,而超级电容作为辅助电源来配合工作是该问题比较理想的解决方案.将蓄电池与 UC 相结合构成复合电源(HES)来对蓄电池进行功率补偿,这将会给 HEV 储能系统带来很大的性能提升^[6,7].

由于超级电容拥有的优越性能以及近年来不断提高的开发能力,使得目前世界上的很多国家都投入到超级电容的研究中,并且逐渐地将其应用到 HEV 上;超级电容已经成为 HEV 电源发展的新趋势^[8,9].日本率先将超级电容应用到 HEV 上,20 世纪 70 年代,日本 NEC 电气公司和松下公司联合开发了数法拉(F)容量并作为电源使用.随着数字电路的大量出现,从 20 世纪 50 年代末开始,超级电容逐步得到商业化使用.到 20 世纪 90 年代,随着电动车、太阳能装置、重型机械等技术的发展,欧共体启动了镍福电动汽车超级电容器发展计划,美国能源部和军方也开始了超级电容的研究计划.

针对上述 HEV 发展阶段中存在的问题与超级电容应用的快速发展过程中出现的问题,利用蓄电池和超级电容结合的复合电源系统研究应用也逐渐兴起.超级电容-蓄电池复合电源系统对电动车的后续发展起着非常重要的作用,由于目前电动车存在续驶里程短、电池易老化、爬坡能力差、能量回收效率低的缺陷,使得对以功率高、循环寿命长的超级电容作为辅助电源的超级电容-蓄电池复合电源系统的研究具有十分深远的意义.

2 新型超级电容-蓄电池复合电源系统结构

蓄电池-超级电容复合电源系统的能量功率流模块包括电机、电机驱动系统、能量管理控制系统、蓄电池、DC/DC 直流变换器、超级电容^[10~13].超级电容-蓄电池复合电源系统各个模块之间功率流的关系如图 1 所示.能量管理控制系统管理蓄电池、超级电容和电机之间的能量调整,驱动系统能够控制电机实现功率的转化,在车辆行驶过程中电机能将电能转化为动能,制动时,电机将动能转化为电能存储于超级电容.

图 1 中, P_1 为电机功率, P_2 超级电容的功率, P_3 为蓄电池的功率. P_1 、 P_2 是功率是双向的. P_3 是单向的,不能回收电能, P_1 、 P_2 和 P_3 的关系如下:

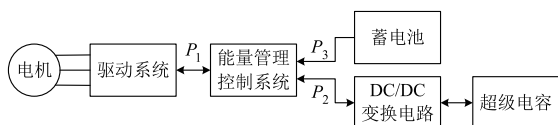


图1 复合电源功率流模块图

$$P_1 = P_2 + P_3 \quad (1)$$

电动车在启动或者加速时,电机的功率需求增大,而蓄电池的最佳状态是恒定放电.因此控制器控制超级电容的输出功率 P_2 随着电机功率 P_1 需求而改变,从而使蓄电池工作在一个相对稳定的状态,制动时产生的功率则被超级电容吸收存储.

3 超级电容-蓄电池复合电源系统建模

超级电容-蓄电池复合电源是回收利用汽车制动能量的电储能装置^[14,15].其制动能量再生工作原理是:①汽车在减速或制动时,发电机将驱动轮(轴)的动能转化为电能并以化学能的形式将电能存储在储能装置;②汽车在启动或加速时,储能装置中的化学能通过电动机转化为汽车行驶的动能.其工作原理如图 2 所示.图 3 为制动能量回收再生系统示意图,其工作过程为:①汽车减速制动时,制动系统启动,电磁离合器接合,接通驱动轴和变速器的输出轴,汽车的动能由输出轴、离合器、驱动轴、驱动轮、被驱动轮、被驱动轴传到发电机和飞轮上,从而使制动时的机械能由发电机转变为电能,经过整流器存入电储能装置;②当电磁离合器再分离时,传到飞轮上的制动能,驱动发电机产生电能,存入电储能装置,发电机和飞轮回收制动能量的同时产生负载作用,进而制动前驱动轮;③汽车启动时,电储能装置的化学能被转换成机械能实现汽车加速启动.

要想回收再生汽车的制动能量,就必须对电储能装置的能量进行分配管理,而复合电源的能量分配管理是在实际满足安全制动条件的工况下能够尽可能地回收电机再生制动力能量^[16,17].在充分考虑制动稳定性、能量回收率和 ECE(Economic Commission of Europe)法规的条件下,提出了复合电源的制动力分配控制管理策略,如图 4 折线所示.

图 4 中,点 I 在横坐标轴线上,对应电动车制动强度(制动减速度与重力加速度的比值) Z_I 约为 0.12.点 II 落在 ECE 法规边界曲线最高点的左边的曲线上,对应电动车制动强度 Z_{II} 约为 0.23,横坐标的值对应前轴制动器制动力为 $2.2 \times 10^3 \text{ N}$.点 III 是过点 II 的 γ 线(前轮抱死,后轮没抱死,后轴制动器制动力关系曲线)与理想满载 α 曲线的交点,对应的制动强度 Z_{III} 约为 0.33;点 IV 在 β 曲线上,对应的制动强度 Z_{IV} 约为 0.77.折线 γ 为理想情况下制动力的分配曲线,如果电动汽车的制动力按 γ 线进行分配,可充分有效的利用电动车与地面接触的附着系数,能够达到最佳的制动效果;但是

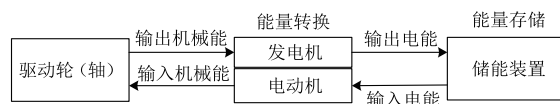


图2 制动能量回收再生系统原理图

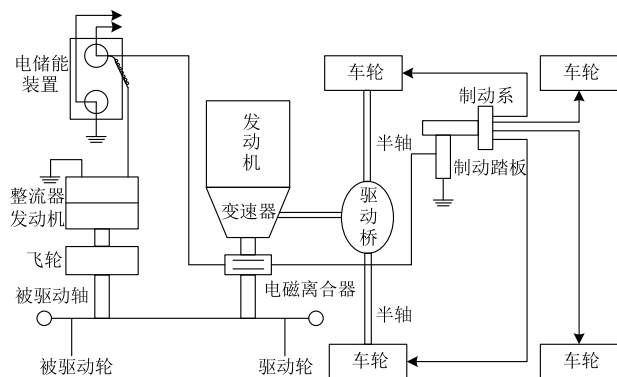


图3 制动能量回收再生系统示意图

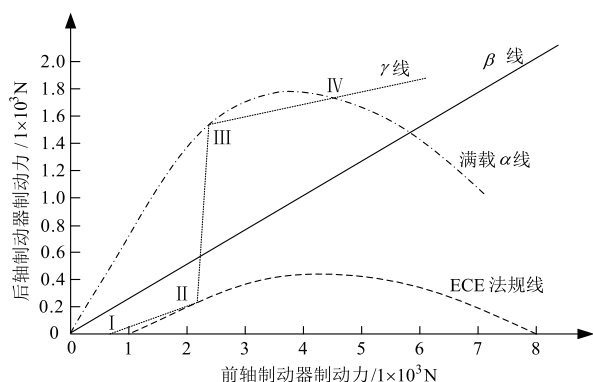


图4 制动力分配管理曲线

这种情况下,电动车不能保证前轮获得最大制动力,致使电动车前轮的再生制动力得不到有效的利用,从而制约着制动电能的回收。因此,在保证制动安全和稳定性的情况下,为了有效的利用电机再生制动力实现能量的回收,复合电源控制策略中设置了制动强度门限值 Z_{III} ,将制动情况分区间处理。如果电动车的制动强度小于 Z_{III} 时,则可以定义为低强度制动,这种情况下,不会出现不稳定制动,以回收再生制动能量为主,图4中的闭环曲(0→I→II→III→IV→0)所组成的区域为有效制动力分配区域。当电动车制动强度超过 Z_{III} 时,为中高强度制动,此工况必须在保证制动安全和稳定的前提下,兼顾能量的回收。

电动车在制动过程中,控制参数包括 SOC(电池荷电状态)、制动强度信号和车速,制动控制器就是根据这些参数确定制动模式,然后按电动车复合电源控制策略对液压制动力和再生制动力进行控制,从而实现电动车的安全稳定制动和制动能量的回收。控制过程如图5所示(f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 分别代表前轴制动力、后轴制动力、电机再生制动力、需求的制动力、前轴提供的机械制动力)。

3.1 超级电容充电建模

超级电容与常规电容器不同,是一种具有超级储

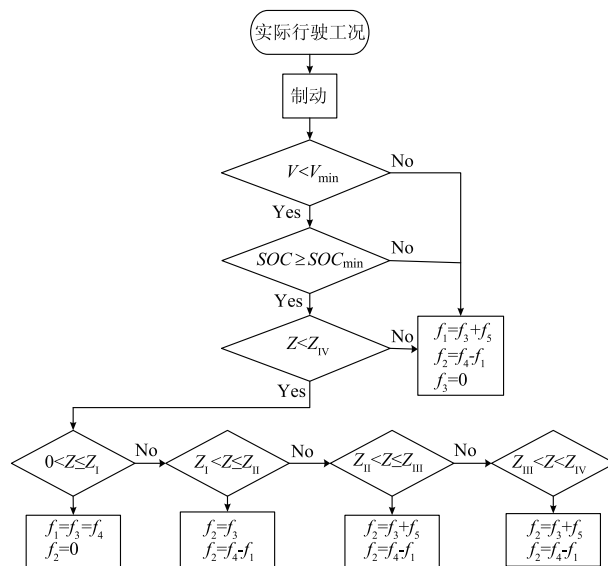


图5 控制策略流程图

电能力,可提供强大脉动功率储能器件,其容量非常大,甚至可以达数万法。超级电容制作的特殊工艺使其电容量很大,等效电阻很低。超级电容的高比功率可以缓和尖峰脉冲电流和电压,因此,超级电容在短时大功率情况下得到广泛的应用。其特性的数学描述如下。

超级电容在恒定的电流 $I_{(t)}$ 充放电 t 时,超级电容的电量从 Q_1 到 Q_2 ,电压从 U_1 到 U_2 ,则该超级电容储存/释放的能量 E 为

$$E = \frac{Q_2^2 - Q_1^2}{2t} \quad (2)$$

其本征容量

$$C = I \frac{dt}{dU} \quad (3)$$

此时超级电容的内阻 RC 消耗的能量 E_R 为

$$E_R = I^2 R_c t = \frac{R_c (Q_1 - Q_2)}{t} \quad (4)$$

定义超级电容时间常数 $\tau = RC$,充电深度 $\beta = U_1/U_2$ 或者放电深度 $\beta = U_2/U_1$,从而可以推算出充电效率 η_c 和放电效率 η_d 的关系为:

$$\eta = \frac{E}{E + E_R} = \frac{t}{t + 2\tau[1 - 2\beta/(\beta + 1)]} \quad (5)$$

$$\eta_d = \frac{E - E_R}{E} = 1 - \frac{2\tau}{t} \left(1 - \frac{2\beta}{\beta + 1}\right) \quad (6)$$

其中 τ 为时间常数, t 为充放电时间, β 为放电深度。荷电状态

$$SOC = \frac{U(t) - U_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}} \quad (7)$$

$U(t)$ 为任意时刻超级电容的电压, $U_{\max}$ 为超级电容完全满电时的电压, $U_{\min}$ 为超级电容完全放电终止时的电压。在实际应用超级电容时,可将超级电容看成单体超

级电容串联使用,那么超级电容的单体电压

$$U(n+1) = U(n) - \frac{I(t)\Delta t}{C} \quad (8)$$

根据上述理论公式,运用 Matlab 软件,建立一个超级电容组 Simulink 仿真模型,并进行一个循环功率周期的模型仿真,如图 6 所示。当输入一个等功率放电—充电循环波纹电压曲线时(如图 7 所示),仿真模型输出电流变化和荷电状态变化分别图 8 所示。

图 8 表明, 充电时荷电状态 SOC 值升高, 放电时

SOC 值下降. 由于内阻存在损耗, SOC 随时间呈近似线性关系的变化, 并不是绝对线性关系变化, 而且最终 SOC 值回到相对初值低一些的状态. 放电时电流会随着 SOC 值的减小增大, 电压会随着 SOC 值降低而减小. 充电时电流会随着 SOC 值升高减小, 电压会随着 SOC 值升高而升高. 为维持 400W 左右的功率, 内阻损耗变化, 电流呈近似线性关系.

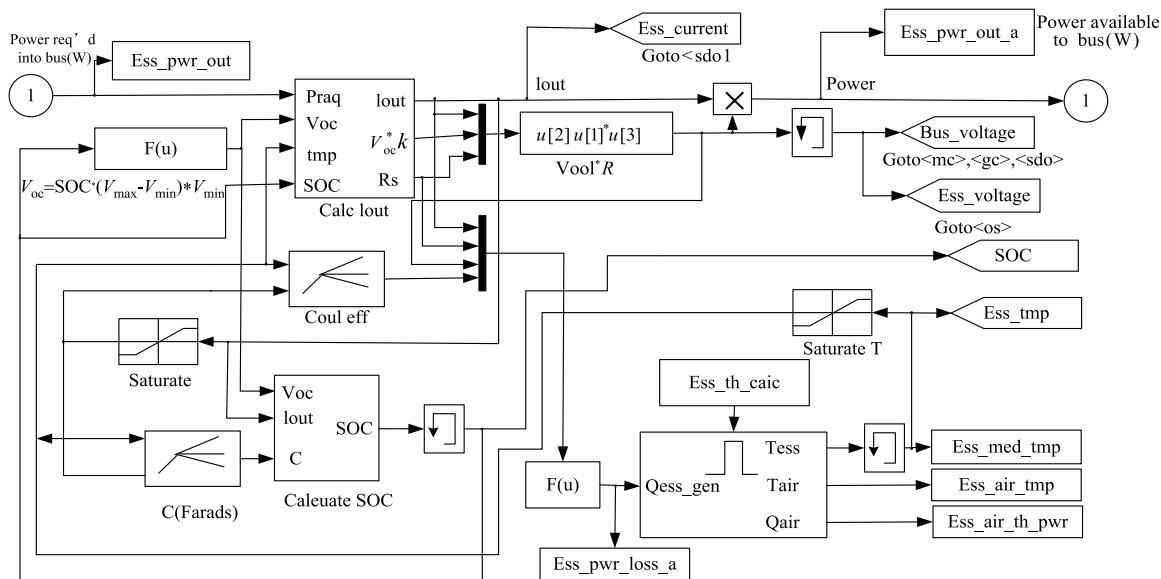


图6 超级电容仿真模型

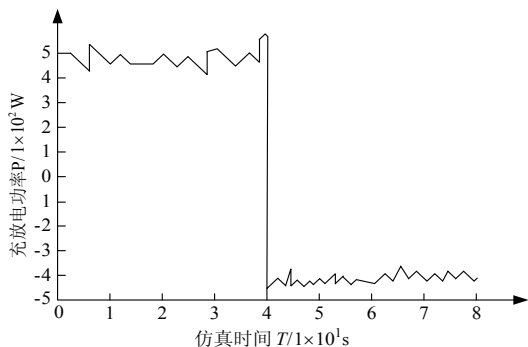


图7 一个循环周期功率充放电曲线

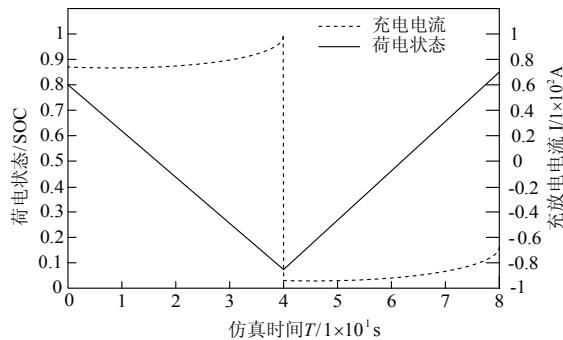


图8 电流与荷电状态变化曲线

3.2 复合电源控制策略框图

在充分考虑超级电容在充放电性能的前提下,控制实际车速与超级电容存储电能成反比关系,即在高车速时,制动能量大,超级电容当前应存储能量应当较少,以使能回收更多再生制动能量;在低车速时,制动能量小,超级电容当前应存储较多电能,以便于电动车起步或是加速时放电辅助蓄电池. 超级电容电量不足时,就是超级电容实际电压低于根据车速计算出的超级电容的理想电压. 超级电容理想电压关系如式(9)所示.

$$\frac{U(t)}{U_{\max}} = \sqrt{1 - k \left(\frac{V(t)}{V_{\max}} \right)^2} \quad (9)$$

式中: $U(t)$ 为超级电容实际电压, $U_{\max}$ 为超级电容最高电压, $V(t)$ 为实际行驶车速, $V_{\max}$ 为整车最高行驶车速 (一般取 180km/h), k 为超级电容循环中能量的利用效率 (一般数值取 0.75).

实际电压与实时计算出的超级电容理想电压进行比较。当实际电压小于计算值,说明超级电容此时馈电,复合电源控制策略为保证下一时刻超级电容能够

输出电能,则控制蓄电池要主动输出电流,为电容充电.当电容实际电压大于计算值时,复合电源控制策略要控制超级电容需要释放一定的电量,这样能使需要

制动时超级电容有充足的空间可以存储制动电量.因此.搭建蓄电池—超级电容复合电源控制策略框图如图9所示.

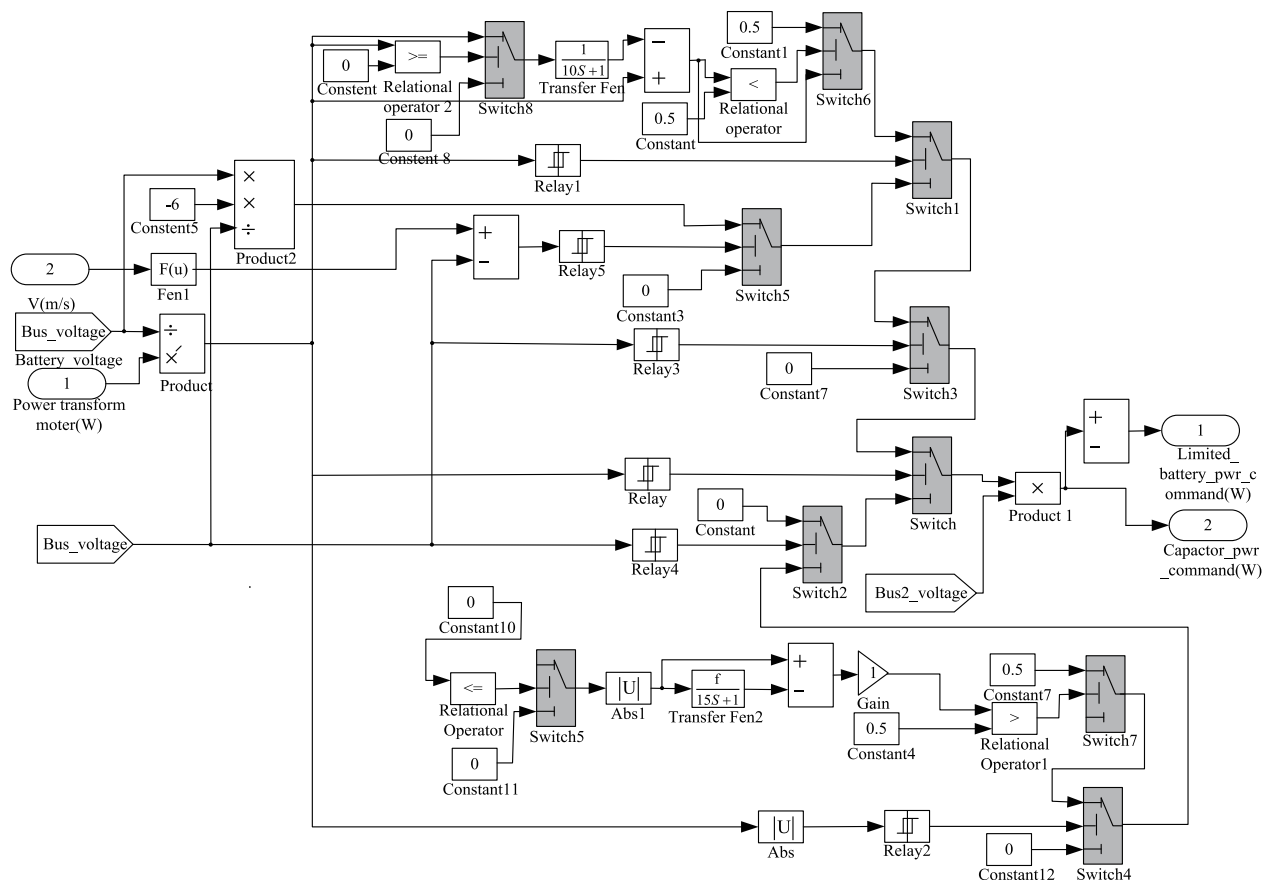


图9 复合电源控制策略图

4 仿真结果与分析

为了验证复合电源控制策略(EMS)的有效性,根据图8所示的控制策略运用 Matlab 仿真环境下进行仿真验证,具体仿真行驶汽车参数:整车质量(满载)1200kg,迎风面积 2m^2 ,空气阻力系数0.335,滚动阻力系数0.009,滚动半径0.28m,电机功率58kW.仿真电池参数:电池组容量 $30\text{A}\cdot\text{h}$,电池组额定电压336V,电池组最大电压336V,电池组最大电流120A,超级电容容量40F,超级电容额定电压300V,超级电容最大电压324V,超级电容最大电流250A,电池组初始SOC值为0.9,超级电容初始SOC值为0.9,仿真的具体工况如图10所示.

图10所示的汽车行驶工况包括车辆的启动、加速、匀速、减速、制动和停止的全过程.复合混合动力汽车性能测试, also 具有很强的代表性.蓄电池和超级电容的功率变化曲线分别如图11和图12所示.图11表明汽车在启动时,蓄电池和超级电容的输出功率变化起伏的频率比较高,而超级电容比蓄电池的输出功率的变化频率要高,

说明在汽车启动时,超级电源作为辅助电源能够辅助电动车快速启动;在电动汽车高速行驶时,蓄电池与超级电容功率变化的幅度比较大,说明蓄电池和超级电容组合的电源系统能够同时给电动汽车提供电能,超级电容能给电动车提速;在电动车制动和停止的过程中,蓄电池和超级电容都有能量输出的波动,但超级电容有负功率的出现,说明超级电容能够回收制动能量.图13~图16分别为蓄电池和超级电容的电压与电流的变化曲线,图13和图14表明,在电动车行驶过程中,蓄电池电压变化起伏较大,而超级电容电压变化比较平缓,两者的电流变化趋势基本相似,因此超级电容能在一定程度上起到保护蓄电池的效果.图17是蓄电池与超级电容的SOC值变化对比曲线,两者的曲线变化趋势相同,超级电容的SOC值变化比较缓慢,说明其回收电动车制动能量效果明显,减缓了SOC值的变化,复合电源控制策略作用明显,说明复合电源中的电池得到了相对的保护,其工作负荷也得到了有效的减缓.

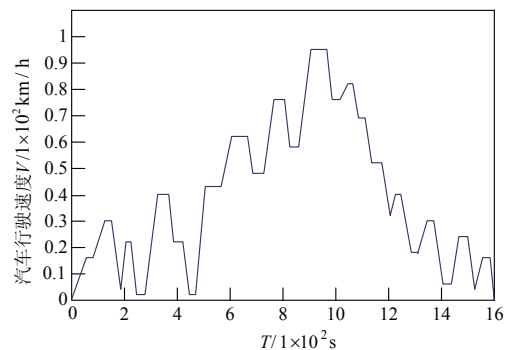


图10 仿真工况

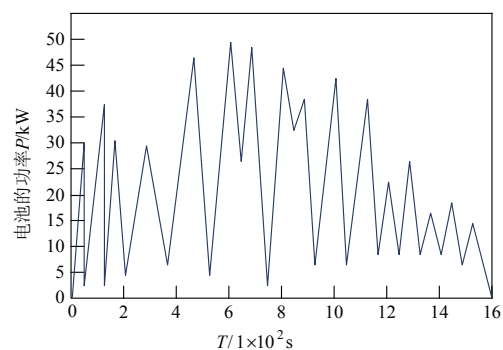


图11 电池的功率曲线

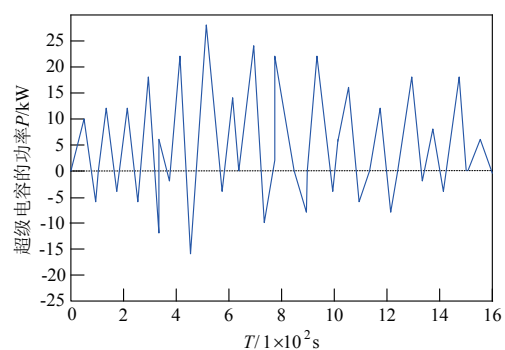


图12 超级电容的功率曲线

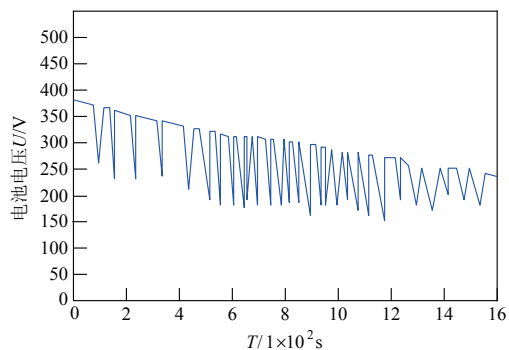


图13 超级电容的功率曲线

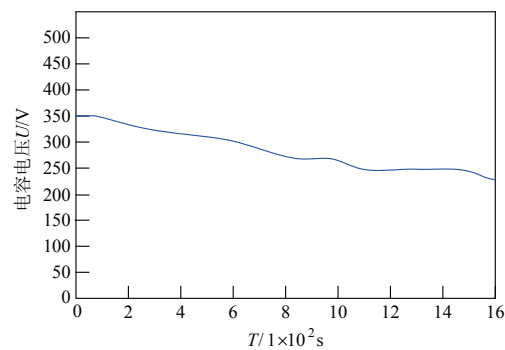


图14 超级电容的电压变化曲线

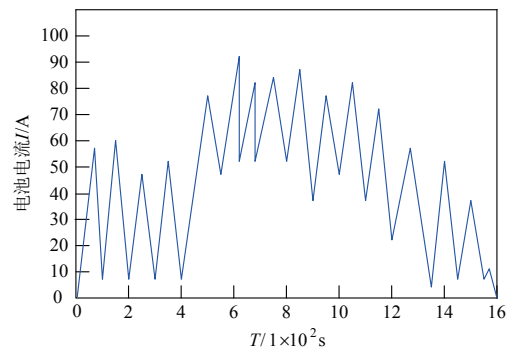


图15 电池的电流变化曲线

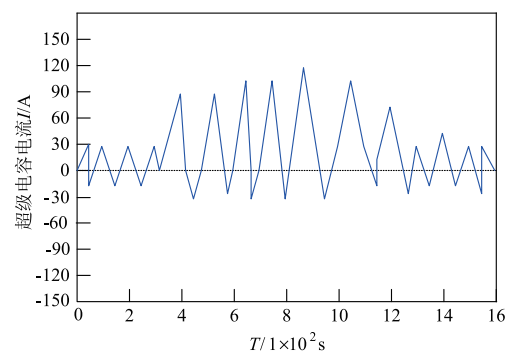


图16 超级电容的电流变化曲线

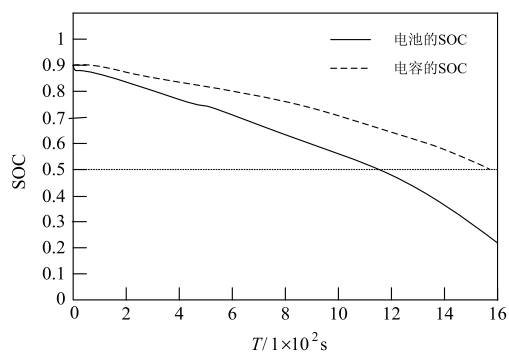


图17 电池与超级电容的SOC变化对比曲线

图 18 所示为需求的总功率与电池实际功率对比曲线,图 18 表明在汽车高速行驶的过程中,蓄电池的实

际功率小于电源总需求功率,说明复合电源中的蓄电池得到了相对的保护,其工作负荷也得到了有效的减

缓,超级电容的“削峰填谷”作用明显.在制动的过程中,超级电容接收制动产生的电能,当超级电容满电时,电能全部由电池接受,则电池的实际功率变大,在一定程度上缓和了电动车动力不足、电池损坏、能量回收效率低的问题.

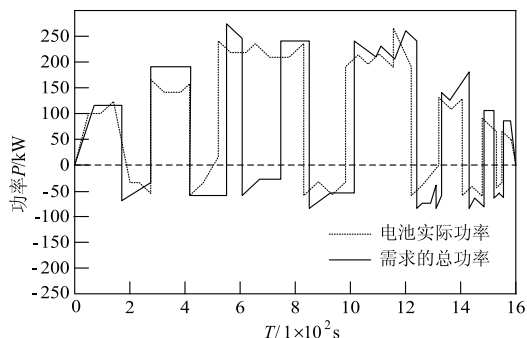


图18 需求的总功率与电池实际功率对比曲线

5 实验

实验的目的是验证复合电源中的超级电容是否能够辅助蓄电池有效的吸收制动能量,解决蓄电池快速充放电而对回馈脉动电流的吸收效率低,频繁过大的充电电流会对蓄电池造成严重损害而影响蓄电池的比功率,循环使用寿命的问题.实验采用的复合电源为直接并联式复合电源,电池组:305节30A·h镍氢电池单体串联,标称电压336V;电容器:120节最高电压2.5V容量40F超级电容单体串联,最高电压350V,最低电压285V;DC/DC直流变压模块,正向峰值功率60kW,反向最大功率60kW,电容器端输入电压250~350V.

实验在混合动力电动车在实际行驶工况中,测得蓄电池和超级电容的作用过程如图19和图20所示.图19是蓄电池给超级电容充电的过程,图20是超级电容给蓄电池充电的过程.图19表明:经过一个15A左右的放电脉冲后,此时负载需求电流接近于0,但此时电池依然在放电,电流逐渐减小,相应电容处于充电状态,因此超级电容有效的收集了制动时的能量;放电结束后,由于电容内阻较小,其压降更大,则当负载电流需求不大时,处于高压端的电池就会自动给电容充电,以恢复电压平衡,此时超级电容起到保护蓄电池的作用.图20表明:经过24A左右的充电脉冲后,负载需求电流逐渐趋于0A,但此时电容开始放电,同时电池持续充电,一段时间后二者电流趋近于0A;当有充电电流时,电容的电压跃升更大,充电结束后,处于高压端的电容则自动给电池充电以恢复电压平衡.图19和图20表明:在汽车行驶中,复合电源中的蓄电池和超级电容之间的充电平衡作用,减缓了蓄电池工作负荷,在一定

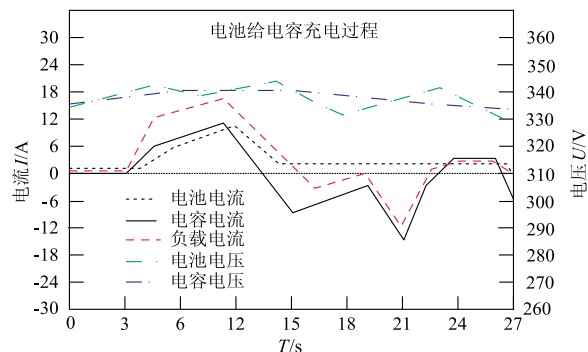


图19 蓄电池给超级电容充电过程

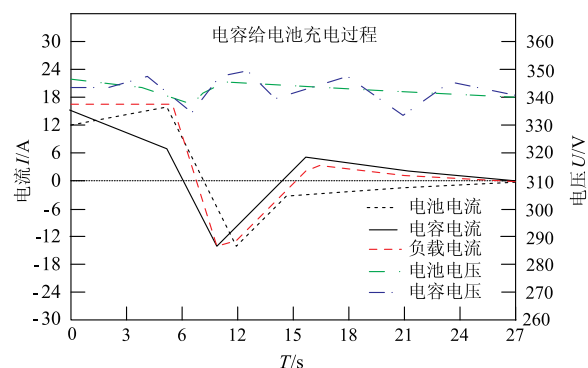


图20 超级电容给蓄电池充电过程

程度上缓和了电动车动力不足,延缓电池损坏,使制动能量得到有效回收.但是由于条件限制,只能在直接并联复合电源系统进行实现.由于端电压限制,电池和电容之间存在频繁充放电情况,电池端电压频繁波动,也直接造成了一定能量消耗,并且给SOC的预估增加了难度,这需要在以后的研究中进行改进.

6 总结

本研究在构建新型超级电容—蓄电池电源系统的基础上,建立了超级电容的充放电仿真模型,分析了超级电容模型充放电特性.同时,在超级电容—蓄电池电源系统的控制策略研究中,对电动车的行驶工况进行具体分析,然后进行超级电容—蓄电池复合电源系统仿真,以及实验研究.研究表明,超级电容—蓄电池复合电源系统能最大程度地存储电动车再生制动力制动过程中回收的电能,然后再将回收的电能用以驱动电动车行驶,从而延长了电动汽车的续驶里程,复合电源系统能在一定程度上给电动车提供较大的动力.复合电源中的超级电容能有效的起到“削峰填谷”作用,有效的保护蓄电池不受损坏.本文研究的超级电容—蓄电池复合电源系统可以弥补普通单一蓄电池构成的电源系统功率密度低、能量密度低、使用寿命短等缺点,验证了超级电容—蓄电池复合电源高效回收制动能的可行性,为后续的研究奠定了理论基础,在电动车发展

领域有着广阔的发展前景,对电动车的发展具有十分重要的意义。

参考文献

- [1] 曹国强. 混合动力车用复合电源系统开发与实验验证 [D]. 吉林:吉林大学,2011.
- [2] 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]. 江苏:江苏大学,2012.
- [3] 黄万友. 纯电动汽车动力总成系统匹配技术研究 [D]. 山东:山东大学,2012.
- [4] 彭栋. 混合动力汽车制动能量回收与 ABS 集成控制研究 [D]. 上海交通大学,2007.
- [5] BRUNI G, CORDINER S, MULONE V. Domestic distributed power generation: Effect of sizing and energy management strategy on the environmental efficiency of a photovoltaic-battery-fuelcell system [J]. Energy, 2014, 77 (1): 133 - 143.
- [6] 鲍薇. 多电压源型微源组网的微电网运行控制与能量管理策略研究 [D]. 北京:中国电力科学研究院,2014.
- [7] BIANCHI M, BRANCHINI L, FERRARI C, MELINO F. Optimal sizing of grid-independent hybrid photovoltaic-battery power systems for household sector [J]. Applied Energy, 2014, 136 (31): 805 - 816.
- [8] 董昊龙. 纯电动车复合电源系统及其管理策略研究 [D]. 北京:北京工业大学,2013.
- [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.
WANG Qi, SUN Yukun. Research on the control strategy and optimization of energy management system of hybrid energy storage in a hybrid electric vehicle [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, (S1): 195 - 203. (in Chinese)
- [10] 彭然. 混合动力列车复合电源系统的研究 [D]. 四川:西南交通大学,2014.
- [11] 张莉, 邹积岩, 郭莹, 王泉水. 40V 混合型超级电容器单元的研制 [J]. 电子学报, 2004, 32 (8): 1253 - 1255.
ZHANG Li, ZOU Ji-yan, GUO Ying, WANG Quan-shui. Study on 40V hybrid super-capacitor unit [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32 (8): 1253 - 1255. (in Chinese)
- [12] 王晓峰, 王大志, 梁吉, 孔祥华. 双电层电容器及其复合电源系统的研制 [J]. 电子学报, 2002, 30 (8): 1100 - 1103.
WANG Xiao-feng, WANG Da-zhi, LIANG Ji, KONG Xiang-hua. Research on the carbon based double-layer capacitor and hybrid power source [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30 (8): 1100 - 1103. (in Chinese)
- [13] 何仁. 汽车制动能量再生方法的探讨 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2003, 24 (6): 1 - 4.
HE Ren. Study on methods of regenerative braking energy of automobile [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2003, 24 (6): 1 - 4. (in Chinese)
- [14] 王儒. 微型电动汽车复合电源能量管理系统研究 [D]. 山东:山东理工大学,2014.
- [15] 王婷. 混合动力电动汽车控制策略的优化研究 [D]. 北京:北京交通大学,2009.
- [16] 张大兴, 邱雪娜, 梁英, 贾建援. 针对微生物燃料电池能量采集的最优电容理论计算方法与实验研究 [J]. 电子学报, 2012, 40 (8): 1635 - 1639.
ZHANG Da-xing, QIU Xue-na, LIANG Ying, JIA Jian-yuan. Theoretical method and experimental study of determining the optimal capacitance for energy harvesting from MFCs [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40 (8): 1635 - 1639. (in Chinese)
- [17] 张自强, 李平, 文玉梅, 潘世强. 一种上变频自供电无线传感器电源管理电路 [J]. 电子学报, 2015, 43 (7): 1407 - 1412.
ZHANG Zi-qiang, LI Ping, WEN Yu-mei, PAN Shi-qiang. A frequency up-conversion self-powered power management circuit for wireless sensors [J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43 (7): 1407 - 1412. (in Chinese)

作者简介



肖祥慧 男, 1983 年 9 月出生, 湖南邵阳人, 博士, 长沙理工大学电气与信息工程学院教师. 主要从事智能电网(微网)故障诊断、接地网故障诊断、变压器故障诊断、电磁场理论及其应用、电气工程及自动化等方面的研究工作.
E-mail: xiaoen3@126.com



曾祥君 男, 1972 年 1 月出生, 博士、教授, 长沙理工大学电气与信息工程学院院长, 电力与交通安全及节能技术教育部工程研究中心主任, 智能电网运行与控制湖南省重点实验室主任. 主要从事电力系统微机保护与控制的的教学和研究开发工作.
E-mail: eexjzeng@qq.com



戴作财 男, 1988 年 05 月出生, 湖南邵阳人, 博士研究生. 2015 年 9 月, 硕士毕业于浙江师范大学, 主要从事机电工程及自动化方面的研究工作.