

一种基于低通滤波算法的车用 HESS 功率分配控制策略^{*}

张根嘉, 王淑红, 任建, 苏效琳

(太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 在混合动力汽车行驶中, 为了能让车载超级电容有效地为蓄电池提供能量缓冲, 其荷电状态 (SOC) 需保持在一个安全范围内, 以防止电容过充或能量不足。针对这一问题, 基于车载超级电容的工作特性, 改进了传统的车用混合储能系统滤波分配法, 舍弃算法逻辑复杂、参数设计困难的逻辑门控制, 使用简单的 PI 控制实现了电动汽车运行过程中超级电容电量的自保持, 并通过基于 TMS320F2812 控制的混合储能装置和基于半实物仿真的永磁同步电机试验平台对所提出的方法进行了试验验证。结果表明, 该方法在超级电容提供负载峰值功率, 达到对蓄电池“削峰填谷”目标的同时, 又使其稳态电压保持在一个稳定值, 满足混合动力汽车对于车载超级电容的能量回收要求。

关键词: 混合储能系统; 车载超级电容; 功率分配策略; 低通滤波算法; 能量回馈

中图分类号: TM912 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2022)06-0047-06

doi: 10.12177/emca.2022.039

A Power Distribution Control Strategy for Vehicle HESS Based on Low Pass Filtering Algorithm^{*}

ZHANG Genjia, WANG Shuhong, REN Jian, SU Xiaolin

(College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to effectively provide energy buffer for the battery during the driving of hybrid electric vehicle, the state of charge (SOC) of the vehicle-mounted super-capacitor should be kept within a safe range to prevent capacitor overcharge or insufficient energy. To solve this problem, based on the working characteristics of the vehicle-mounted super-capacitors, we improve the traditional filtering distribution method of vehicle-based hybrid energy storage system. The logic gate control which uses complex algorithm logic and is difficult to design parameters is abandoned, and a simple PI control is used to realize the self-maintenance of super-capacitor power during the operation of electric vehicles. The proposed method is verified by a hybrid energy storage device based on the control of TMS320F2812 and a permanent magnet synchronous motor experimental platform based on hardware-in-the-loop simulation. The results show that this method can not only provide peak load power for the super-capacitor, achieve the "peak load shifting" of the battery, but also keep its steady-state voltage at a stable value, which can meet the energy recovery requirements of the vehicle-mounted super-capacitor for the hybrid electric vehicle.

Key words: hybrid energy storage system (HESS); vehicle-mounted super-capacitor; power distribution strategy; low pass filtering algorithm; energy feedback

收稿日期: 2022-03-08; 收到修改稿日期: 2022-05-29

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(52077140)

作者简介: 张根嘉(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为特种电机理论与控制技术。

王淑红(1965—), 女, 博士, 教授, 研究方向为特种电机理论与控制技术。

任建(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为特种电机理论与控制技术。

0 引言

在当今石油价格上涨、环境问题日益严峻的背景下,超级电容、蓄电池和燃料电池等电源的发展使得电动汽车储能系统的研究有了多种选择^[1]。目前纯电动汽车大多使用的是蓄电池储能系统。尽管蓄电池的比能量大,但由于其比功率低、循环寿命短,难以应对电机瞬时启动、加速及快速制动时的功率需求。同时,复杂工况下储能装置频繁进行充放电切换将缩短蓄电池的使用寿命^[2-3]。针对这一问题,通常将比功率更大、循环寿命更长的超级电容(SC)作为辅助能源与蓄电池相结合构成混合储能系统(HESS),并通过相应的控制策略合理分配SC和蓄电池之间的功率,充分发挥二者的优点来兼顾电动汽车对储能系统的能量需求和功率需求,延长电池的使用寿命^[4-5]。

混合储能系统(HESS)功率分配策略设计及优化主要从系统拓扑结构、数学模型及等效电路三方面来分析^[6]。文献[7]对目前HESS常用的被动式、改进型被动式和主动式结构进行了分析研究,通过建模及仿真对比证明了HESS的主动式结构效果更好。文献[8]提出了一种基于支持向量机(SVM)和粒子群算法(PSO)的SC动态建模方法,该方法可以有效预测SC输出电压。文献[9]对HESS进行全局建模,以此为基础设计了一种非线性控制策略,该策略仅以负载功率分配为目的,并未考虑电源状态。文献[10]以电池和SC的荷电状态(SOC)值为控制量,提出一种优化的模糊PI控制策略,然而由于电池SOC难以准确计算,系统性能会受到影响。文献[11]克服了上述问题,以电机电流、母线电压和SC电压为输入量设计模糊逻辑能量管理策略。尽管模糊控制策略控制效果好,但设计复杂,且难以适应所有工况。文献[12]提出一种自适应滤波器功率分配控制策略,该方法可以在线调整滤波器的时间常数适应不同的负载功率需求。由于基于滤波的功率分配策略仅以负载功率分频为控制目标,因此需要结合其他策略来使用^[13]。文献[14]提出一种基于HESS性能的能量协调、互补控制策略,该策略通过低通滤波算法进行功率初次分配,并基于电源状态对功率进行调整,本质上是一种基于滤波的逻辑门限控制策略,而逻辑门控制算法逻辑复杂,受路况影响大,参数精度与门限值设置将直接决定控制效果^[15]。

针对上述问题,考虑到车载超级电容运行过程中稳态电压的稳定性要求,本文提出了一种基于低通滤波算法的功率分配控制策略,该方法同时满足了负载功率分配和稳定电容SOC,且算法简单,易于实现,并通过试验平台证明了该方法的有效性。

1 车载超级电容工作特性分析

1.1 车载超级电容工作电压影响因素

车载超级电容一般工作于冲击负载下,影响其电压的主要因素有三点:电容充放电、内阻压降及电容的自放电效应。

图1所示为超级电容等效电路模型,可见超级电容的一阶非线性模型由理想电容 C 、串联电阻 R_s 及漏电阻 R_p 组成, U_{oc} 为理想电容电压, U_c 为超级电容外电压, i_c 为超级电容电流。理想电容 C 表征超级电容的容量,超级电容SOC可由 U_{oc} 直接反映:

$$SOC = \frac{Q_r}{Q_{min}} = \frac{C(U_{oc} - U_{min})}{C(U_{max} - U_{min})} = \frac{U_{oc} - U_{min}}{U_{max} - U_{min}} \quad (1)$$

式中: U_{max} 、 U_{min} 分别为超级电容的最大工作电压和截止工作电压。

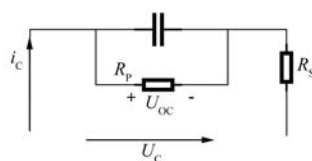


图1 超级电容等效电路模型

超级电容数学模型为

$$U_c = U_{oc} - i_c R_s \quad (2)$$

式(2)表明,冲击负载下 i_c 突变将导致 U_c 突变,由于 U_{oc} 不受 i_c 变化的影响,而车载超级电容工作于稳态时 $i_c=0$ 、 $U_c=U_{oc}$,故电容稳态电压可以准确反映SOC值, $i_c=0$ 时电容电压为

$$U_c(n) = U_{oc}(n) = U_{oc}(n-1)e^{-\frac{i}{R_p C}} \quad (3)$$

式中: $U_c(n)$ 为超级电容此时刻的电压值; $U_{oc}(n)$ 和 $U_{oc}(n-1)$ 分别为理想电容此时刻和上一时刻的电压值。

式(3)表明,受漏电阻 R_p 的影响,超级电容

稳态电压存在衰减效应。

1.2 超级电容充电过程

超级电容通常采用分段充电法,整个充电过程主要分为两段,如图 2 所示。第一阶段采用恒电流充电方式进行大电流充电,使超级电容电压 U_c 快速达到设定值,由于内阻压降的存在,此时,超级电容内部并未完全极化,理想电容电压并未达到设定值;第二阶段采用恒压浮充充电方式进行小电流充电,该阶段充电电流 i_c 快速下降,理想电容电压 U_{oc} 继续上升,电容端电压 U_c 保持不变。最终满足 $i_c=0$ 、 $U_c=U_{oc}$,充电过程结束。

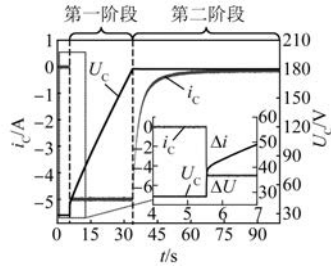


图 2 超级电容充电过程

2 HESS 控制策略研究

超级电容-蓄电池混合储能拓扑结构如图 3 所示,该拓扑结构为 HESS 并联型全主动式拓扑,由超级电容和蓄电池分别通过半桥型双向 DC/DC 变换器和 Boost 变换器并联到同一直流母线上。相比于 HESS 的其他类型拓扑结构,该结构虽然变换器数量多,但是通过对每个 DC/DC 变换器的独立控制和统一协调可以大大提高整个控制系统的自由度与可控性。

HESS 的直接控制目标是维持直流母线电压稳定^[16]。图 3 中,当电机需求功率大于电源输出功率时,母线电压小于参考值,HESS 放电以满足电机功率需求、稳定母线电压;当电机再生制动运行时,母线电压大于参考值,HESS 充电吸收回馈能量。考虑到蓄电池的充放电次数和输出功率的波动大小直接影响其使用寿命,因此 HESS 功率分配问题一般从减少蓄电池充放电次数和抑制其功率波动的角度出发。

2.1 基于滤波的功率分配控制策略

图 4 为常规滤波分配法控制框图。基于滤波的功率分配控制策略又称滤波分配法,常规滤波分配法的基本思想是通过一阶低通滤波算法对负

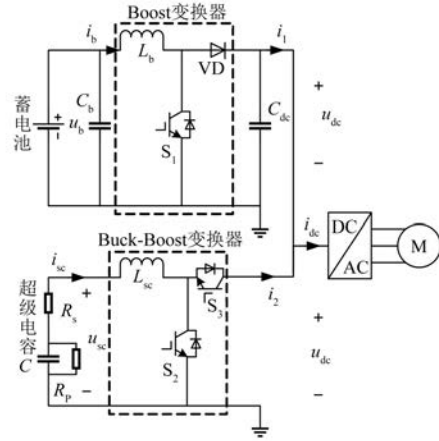


图 3 HESS 拓扑结构

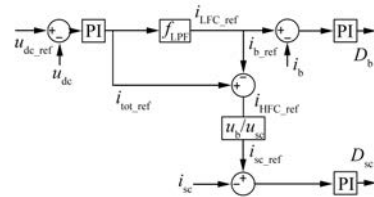


图 4 常规滤波分配法控制框图

载功率进行分频处理,分别由蓄电池和超级电容输出负载电流的稳态分量 i_{LFC_ref} 和暂态分量 i_{HFC_ref} 。

图 4 中蓄电池的参考电流为

$$i_{b_ref} = i_{LFC_ref} = f_{LPF}(i_{tot_ref}) \quad (4)$$

式中: i_{tot_ref} 为总负载电流参考值, f_{LPF} 为一阶低通滤波器。

一阶低通滤波器的传递函数为

$$f_{LPF}(s) = \frac{1}{1 + Ts} \quad (5)$$

式中: T 为时间常数。

电容参考电流为

$$i_{c_ref} = i_{HFC_ref} \cdot \frac{u_b}{u_{sc}} = (i_{tot_ref} - i_{b_ref}) \cdot \frac{u_b}{u_{sc}} \quad (6)$$

式中: u_b 为蓄电池的电压值; u_{sc} 为超级电容的电压值。

2.2 改进的功率分配控制策略

在电动汽车运行过程中,HESS 不仅需要根据电源特性分配负载功率,还需要监测电源状态,保证运行安全。超级电容的正常运行需要确保两点:(1)电机启动、加速、加载条件下存有一定能量储备应对突变的负载功率需求;(2)制动条件下有足够

的储能空间吸收回馈功率。为了满足上述条件,通常将滤波分配法作为 HESS 的功率初次分配与逻辑门控制策略相结合,通过设置参数门限值与实际参数作比较来决定电源的运行方式。由于门限值固定且实际工况下需要考虑的门限条件较多,因而该方法算法逻辑比较复杂,控制效果受路况、参数精度、门限值设置的影响大。针对上述问题,本文改进了图 4 的控制策略,如图 5 所示。

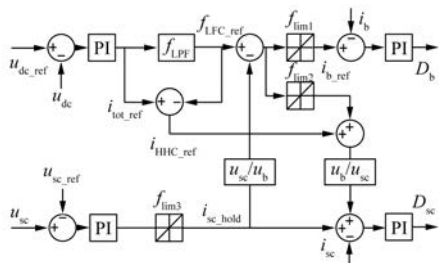


图 5 改进的滤波分配法控制框图

相比于常规的滤波分配法,改进后的控制策略在超级电容控制回路上新增加了电容电压外环,该环 PI 输出信号经过限幅值函数 f_{lim3} 得到电容充放电电流 i_{sc_hold} ,函数 f_{lim3} 设置了电容充放电电流的最大值。电流 i_{sc_hold} 需要由蓄电池来补偿,补偿值为

$$i_{b_comp} = i_{sc_hold} \cdot \frac{u_{sc}}{u_b} \quad (7)$$

结合式(4)和式(7)可以计算出蓄电池参考电流:

$$i_{b_ref} = f_{lim1}(i_{LFC_ref} - i_{b_comp}) \quad (8)$$

其中:

$$f_{lim1}(x) = \begin{cases} x & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (9)$$

分析式(8)可知,当 $u_{sc} < u_{sc_ref}$ 时, $i_{b_comp} < 0$,由蓄电池给超级电容充电,此时 i_{b_ref} 为稳态负载电流 i_{LFC_ref} 与 i_{b_comp} 之和;当 $u_{sc} > u_{sc_ref}$ 时, $i_{b_comp} > 0$,超级电容放电,承担一部分负载功率,若轻载的状态下 $i_{LFC_ref} - i_{b_comp} < 0$,则 $i_{b_ref} = 0$,蓄电池停止放电,为了使超级电容在该情况下不会释放多余能量,仅承担全部负载功率,需要对电容的给定放电功率进行修正,电流修正值为

$$i_{correct} = f_{lim2}(i_{LFC_ref} - i_{b_comp}) \cdot \frac{u_b}{u_{sc}} \quad (10)$$

其中:

$$f_{lim2}(x) = \begin{cases} 0 & x > 0 \\ x & x \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

结合式(6)和式(10)可以计算出超级电容的参考电流为

$$i_{c_ref} = i_{c_hold} + i_{correct} + i_{HFC_ref} \cdot \frac{u_b}{u_{sc}} \quad (12)$$

由以上分析可知,图 5 所示控制策略遵循以下原则:(1)负载功率需求按滤波分配法进行分频处理;(2) $u_{sc} < u_{sc_ref}$ 时蓄电池需额外承担超级电容充电功率;(3) $u_{sc} > u_{sc_ref}$ 时优先由超级电容承担负载功率,蓄电池承担剩余负载功率。通过简单的 PI 控制,该控制策略可以实现蓄电池与超级电容之间的能量交互来达到稳定超级电容稳态电压的效果,由于所需参数比较容易获取且不需要设置任何逻辑门限值,因此不存在逻辑门控制中参数设计困难、算法逻辑复杂等缺点,更容易实现和应用。

3 试验验证

本文所使用的试验平台整体分为两部分,分别为基于 TMS320F2812 控制的混合储能装置和基于半实物仿真的 2.2 kW 永磁同步电机驱动系统,平台整体结构如图 6 所示,实物图如图 7 所示,电机参数见表 1。蓄电池使用电池模拟器,额定电压 E_n 为 156 V、容量 Q_n 为 25 Ah、初始荷电状态 SOC 为 80%。超级电容额定容量 0.83 F,内阻 2.16 Ω ,额定电压 320 V。永磁同步电机使用最大转矩电流比(MTPA)控制策略进行起动与调速控制,分别对常规滤波分配法和本文提出的功率分配控制策略进行试验对比。其中,直流母

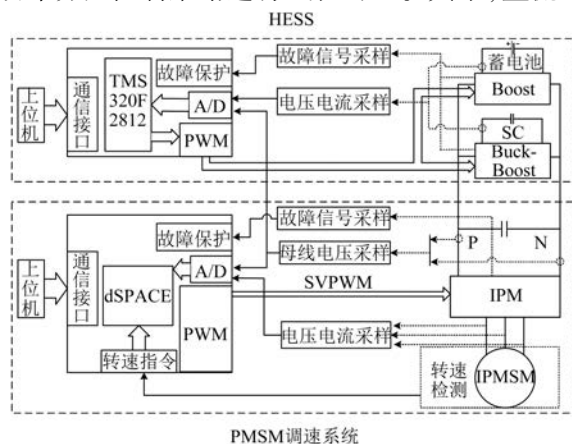


图 6 试验平台结构图



图7 试验平台实物图

线电压控制为 330 V,设置图 5 中电容充放电电流 i_{sc_hold} 限幅值为 ± 1.2 A,超级电容电压参考值 u_{sc_ref} 为 180 V。

表 1 电机参数

参数名称	参数值
转子磁链 $\Psi_f/(V \cdot s)$	0.93
定子电阻 R_s/Ω	2.483
交轴电感 L_q/mH	0.237
直轴电感 L_d/mH	0.108
极对数 n_p	2
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.007 1
额定功率 P/kW	2.2

电机空载起动与调速试验的结果如图 8 所示,2.5 s 电机起动至转速 1 000 r/min,8.2 s 与 13.8 s 分别调速至 500 r/min 和 1 000 r/min。由试验结果可知,常规滤波分配法控制下超级电容仅在电机起动、加速、制动时工作,稳态时电流为 0,蓄电池仅提供电机稳态运行的功率,超级电容稳态电压随着电容充放电运行而变化,同时受自放电电阻的影响而缓慢衰减;使用改进的控制策略控制下电机启动与加速时由于超级电容瞬时大电流放电导致 $u_{sc} < u_{sc_ref}$,稳态时超级电容电流由正转负充电,电池输出电流为稳态电流与 i_{b_comp} 之和,直至电容电压接近设定值后电容电流趋于 0,进入恒压浮充状态来抵消自放电所导致的电压衰减,同时电池电流趋于稳态值。电机制动时, $u_{sc} > u_{sc_ref}$,此时超级电容优先承担稳态负载功率,由于负载较小,电池电流为 0,超级电容输出全部负载功率,电容电压接近设定值时转为恒压浮充状态,

蓄电池电流回升至稳态值。系统运行过程中超级电容的稳态电压基本稳定在 180 V。

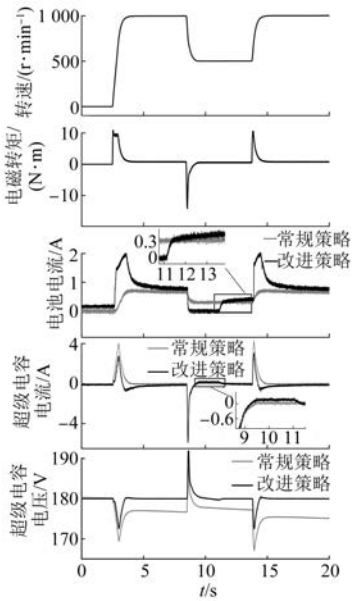


图8 空载起动与调速试验结果

电机带载起动与调速试验的结果如图 9 所示,2.5 s 电机起动至转速 900 r/min,8.2 s 与 13.8 s 分别调速至 400 r/min 和 900 r/min,转速为 900 r/min 时稳态负载转矩为 5 N·m,400 r/min 时为 2.5 N·m。由试验结果可知,使用常规滤波分配法控制下系统运行过程中超级电容稳态电压随着充放电运行而变化,且存在衰减问题而

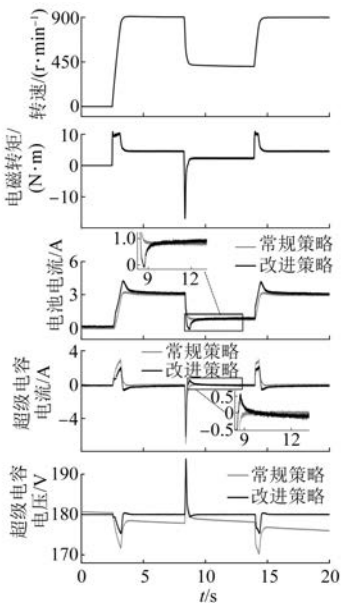


图9 带载起动与调速试验结果

无法稳定;使用改进的控制策略控制下电机带载运行时 HESS 功率分配规则与电机空载运行时基本一致,运行过程中超级电容的稳态电压可以稳定在 180 V。

4 结 语

针对车载超级电容运行状态的要求,本文分析了电动汽车运行过程中超级电容的工作特性,改进了常规的基于滤波的 HESS 功率分配控制策略,并通过试验进行验证。结果表明,本文所提出的控制策略可以达到如下控制效果:(1)对负载功率需求分频处理,降低电池充放电倍率;(2)自动调节超级电容充放电状态,保持其 SOC 处于安全值;(3)克服了超级电容自放电效应对电容稳态电压的影响。由于不需要设置逻辑门限值,在滤波分配法作为功率初次分配的 HESS 能量管理策略中,该控制策略可以大大减少整个控制系统算法逻辑的复杂程度。

【参 考 文 献】

- [1] KHANYISA S, KUSAKANA K. A review of hybrid energy storage systems in renewable energy applications[J]. International Journal of Smart Grid and Clean Energy, 2022, 11(2): 99.
- [2] ZHANG Q, LI G. Experimental study on a semi-active battery-supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicle application [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 35 (1): 1014.
- [3] LIU F, WANG C, LUO Y. Parameter matching method of a battery-supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicles[J]. World Electric Vehicle Journal, 2021, 12(4): 253.
- [4] 乔亮波, 张晓虎, 孙现众, 等. 电池-超级电容器混合储能系统研究进展[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(1): 98.
- [5] 丁石谷, 蔡荣海, 张鹏. 车载超级电容器组多工况动态特性仿真分析[J]. 电气传动, 2021, 51(21): 66.
- [6] 刘宇嫣, 杨中平, 林飞, 等. 城轨地面式混合储能系统自适应能量管理与容量优化配置研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(23): 4874.
- [7] 韩乐. 车载混合储能动力系统功率最优分配策略研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(10): 94.
- [8] 王琪, 孙玉坤, 黄永红. 不同结构混合动力汽车用复合电源的比较[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2014, 35(5): 578.
- [9] DING S, HANG J, WEI B, et al. Modelling of supercapacitors based on SVM and PSO algorithms [J]. IET Electric Power Applications, 2018, 12(4): 502.
- [10] 王琪, 孙玉坤, 罗印升. 混合动力电动汽车的复合电源功率分配控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(18): 143.
- [11] 徐元中, 肖菀莹, 吴铁洲. 基于模糊 PI 控制的 EV-HESS 能量利用效率优化[J]. 电源技术, 2019, 43(10): 1668.
- [12] SELLALI M, ABDEDDAIM S, BETKA A, et al. Fuzzy-super twisting control implementation of battery/super capacitor for electric vehicles[J]. ISA Transactions, 2019, 95: 243.
- [13] 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, 34(增刊1): 195.
- [14] 陈欢, 林程, 熊瑞. 车用复合电源系统在线自适应能量管理[J]. 电工技术学报, 2020, 35(增刊2): 644.
- [15] 王珂. 现代有轨电车车载混合储能系统能量管理策略及容量配置优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [16] LI S, HE H, ZHAO P. Energy management for hybrid energy storage system in electric vehicle: a cyber-physical system perspective[J]. Energy, 2021, 230: 120890.