

控制与决策

Control and Decision

基于指数趋近律的车载复合储能系统全局滑模控制

张细政, 卢张宇, 谭崇苗, 郑亮

引用本文:

张细政, 卢张宇, 谭崇苗, 等. 基于指数趋近律的车载复合储能系统全局滑模控制[J]. *控制与决策*, 2021, 36(4): 885–892.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0478>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

输入饱和的充液航天器抗干扰有限时间滑模控制

Anti-disturbance finite-time sliding mode control for liquid-filled spacecraft with input saturation

控制与决策. 2021, 36(5): 1078–1086 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0820>

基于变速趋近律的Buck型变换器抗扰动控制

Disturbance rejection control of Buck converters based on variable rate reaching law

控制与决策. 2021, 36(4): 893–900 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1073>

基于高阶滑模速度控制器的异步电机模型预测转矩控制

A model predictive torque control for induction motor based on high order sliding mode speed controller

控制与决策. 2021, 36(4): 953–958 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0650>

基于高阶滑模速度控制器的异步电机模型预测转矩控制

A model predictive torque control for induction motor based on high order sliding mode speed controller

控制与决策. 2021, 36(4): 953–958 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0650>

直线同步电动机磁悬浮系统的自适应模糊滑模控制

Adaptive fuzzy sliding mode control for magnetic suspension system of linear synchronous motor

控制与决策. 2021, 36(3): 693–698 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0774>

基于指数趋近律的车载复合储能系统全局滑模控制

张细政[†], 卢张宇, 谭崇茁, 郑亮

(湖南工程学院 电气与信息工程学院, 湖南湘潭 411104)

摘要: 针对电动汽车存在电池使用寿命和续航里程不足的问题, 引入超级电容、电池和DC/DC变换器构成车载复合储能系统. 基于五阶状态空间电路平均模型, 提出一种基于指数趋近律的全局滑模(E-GSM)控制策略, 并基于Lyapunov方法进行控制策略的稳定性分析. 该策略包括一个全局滑模电流控制器(用于精确跟踪电池和超级电容电流参考值)和一个PI控制器(用于稳定母线电压); 同时, 提出一种改进的基于规则的能量管理策略, 用于生成电池电流参考值. 仿真结果表明, E-GSM控制策略能够精准跟踪负载功率变化, 在中国典型城市工况及新欧洲行驶工况下, 电池SOC终值分别提高10%和7%, 且避免了电池大电流放电, 验证了E-GSM控制策略的有效性.

关键词: 电动汽车; 复合储能系统; 能量管理; 指数趋近律; 全局滑模控制

中图分类号: TK02; U469.72

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0478

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 张细政, 卢张宇, 谭崇茁, 等. 基于指数趋近律的车载复合储能系统全局滑模控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(4): 885-892.

Global sliding mode control of vehicle-mounted hybrid energy storage system based on exponential reaching law

ZHANG Xi-zheng[†], LU Zhang-yu, TAN Chong-zhuo, ZHENG Liang

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411104, China)

Abstract: In view of the problems of short battery life and driving distance of electric vehicles, super-capacitors, batteries and DC/DC converters are introduced to form vehicle-mounted hybrid energy storage systems. Based on the circuit average model of the five-order state space, a global sliding mode control strategy based on exponential reaching law (E-GSM) is proposed, and the stability of the control strategy is analyzed based on the Lyapunov method. The strategy includes a global sliding mode current controller which can accurately track the current reference value of the battery and super-capacitor, and a PI controller which can stabilize the bus voltage. At the same time, an improved rule-based energy management strategy is proposed to generate the current reference value of the battery. The simulation results show that the E-GSM control strategy can accurately track the change of load power. Under typical urban conditions in China and new Europe driving conditions, the final SOC value of the battery has increased by 10% and 7%, respectively, and the high current discharge of the battery can be avoided, which can verify the effectiveness of the E-GSM control strategy.

Keywords: electric vehicle; hybrid energy storage system; energy management; exponential reaching law; global sliding mode control

0 引言

随着对生态环境的重视逐步提高, 汽车行业目前最重要的发展方向就是电动汽车, 然而电动汽车续航里程短、动力电池寿命短, 造成电动汽车无法广泛普及. 动力电池具有高能量密度, 但不能承受瞬时大电流充放电, 无法满足汽车性能的需求. 超级电容具有高功率密度和长循环寿命, 将超级电容和电池进行互补, 并与双向DC/DC变换器结合组成车载复合储能系统, 能够提高电池使用寿命和电动汽车续航里程,

具有较强的研究意义和实用价值^[1-3].

从已有复合储能系统的相关研究来看: 文献[4]针对车载复合储能系统提出了一种先进的能量存储拓扑结构, 但该结构的实用性和有效性有待进一步验证. 文献[5]利用燃料电池和超级电容组成复合储能系统, 但该技术中燃料电池的动态响应时间较长. 文献[6]提出了一种基于典型循环工况的复合储能系统参数匹配优化方法, 制订了基于滤波思想控制策略, 并与复合模糊控制策略结合, 仿真结果表明复合储能

收稿日期: 2019-04-16; 修回日期: 2019-11-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61673164).

[†]通讯作者. E-mail: z_x_z2000@163.com.

系统的工作效率更高,但其控制策略较为复杂.文献[7]采用动态规划算法来确定复合储能系统的最优功率分配,使复合储能系统损耗最小,但动态规划算法存在“维数灾难”和计算效率低的问题.文献[8]提出了一种基于四因子法的功率分配策略,但要对其4个因子进行协调控制,控制参数较多.文献[9]和文献[10]分别提出了复合储能系统功率分配控制策略,目的是稳定母线电压,并对超级电容电流参考值进行跟踪,但都忽略了对于电池工作状态的精准控制.文献[11]依据电池和超级电容的荷电状态,将整车需求功率进行线性化分配,控制规则简单易实现.然而,复合储能系统属于一类非线性系统,将其线性化并采用线性控制策略时,其控制性能难以满足时变工况下的车辆驱动要求,需要采用现代控制方法.作为一类特殊的非线性控制技术,滑模变结构控制(sliding mode control, SMC)能够克服系统不确定性,对非线性系统线性化时的未建模动态和外部干扰具有很强的鲁棒性,控制效果良好.全局滑模(global sliding mode, GSM)控制在具有SMC鲁棒性优点的同时,能够柔化控制量的抖振,得到了广泛应用^[12-14].

基于以上对于车载复合储能系统的研究,本文选用主动型复合储能系统作为电动汽车储能装置.基于五阶状态空间电路平均模型提出一种基于指数趋近律的全局滑模(E-GSM)控制策略.E-GSM控制策略包括一个全局滑模电流控制器对电池和超级电容电流参考值实现精确跟踪,以及一个PI控制器保持母线电压稳定.同时,提出一种改进的基于规则能量管理策略,用于生成电池电流参考值.仿真验证了所提出控制策略的有效性.

1 复合储能系统结构

目前常见的复合储能系统结构分为以下3种:被动型、半主动型和主动型.其中主动型拓扑结构采用两个DC/DC变换器同时控制电池和超级电容,控制自由度最多,拥有最佳控制效果.本文选用主动型拓扑结构,其电路拓扑如图1所示.

主动型复合储能系统电路拓扑由电池、超级电容、两个标准双向DC/DC转换器和负载组成.负载由具有可变电流 i_{load} 的电流源来表示.为简化模型,只考虑电池和超级电容的内部串联电阻 R_{bat} 和 R_{sc} .双向DC/DC变换器由两个绝缘栅双极型晶体管(IGBT)、一个电容和一个电感组成.两个IGBT同步运行,当 S_1 关闭时, S_2 打开, S_3 、 S_4 与 S_1 、 S_2 运行状态相同.IGBT的占空比从0到1不等,表示为 D_i (i 为1、

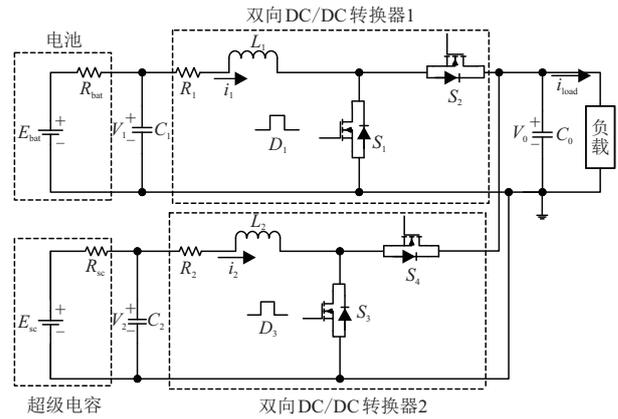


图1 主动型复合储能系统电路拓扑

2、3、4). 开关 S_i 的导通电阻表示为 R_{S_i} , 电池和超级电容开路电压分别表示为 E_{bat} 和 E_{sc} . 由此, 可得如下状态空间方程^[15]:

$$\begin{cases} \dot{V}_1 = -\frac{V_1}{R_{bat}C_1} - \frac{i_1}{C_1} + \frac{E_{bat}}{R_{bat}C_1}, \\ \dot{V}_2 = -\frac{V_2}{R_{sc}C_2} - \frac{i_2}{C_2} + \frac{E_{sc}}{R_{sc}C_2}, \\ \dot{i}_1 = \frac{V_1}{L_1} - i_1 \frac{R_1 + R_{S_2}}{L_1} - \frac{V_0}{L_1} + \\ \quad D_1 i_1 \frac{R_{S_2} - R_{S_1}}{L_1} + V_0 \frac{D_1}{L_1}, \\ \dot{i}_2 = \frac{V_2}{L_2} - i_2 \frac{R_2 + R_{S_4}}{L_2} - \frac{V_0}{L_2} + \\ \quad D_3 i_2 \frac{R_{S_4} - R_{S_3}}{L_2} + V_0 \frac{D_3}{L_2}, \\ \dot{V}_0 = \frac{i_1 + i_2}{C_0} - \frac{i_{load}}{C_0} - D_1 \frac{i_1}{C_0} - D_3 \frac{i_2}{C_0}. \end{cases} \quad (1)$$

其中: V_0 、 V_1 、 V_2 为对应电容 C_0 、 C_1 、 C_2 的电压值, D_1 、 D_3 为控制输入, i_1 、 i_2 为控制输出. 由此, 可得一个五阶状态空间模型

$$\begin{cases} \dot{x} = (A_0 + A_1 D_1 + A_2 D_3) \cdot x + B \cdot v, \\ y = C \cdot x. \end{cases} \quad (2)$$

其中: 状态向量 $x = [V_1 \ V_2 \ i_1 \ i_2 \ V_0]^T$, 而

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad v = \begin{bmatrix} E_{bat} \\ E_{sc} \end{bmatrix},$$

$$A_0 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_{bat}C_1} & 0 & -\frac{1}{C_1} \\ 0 & -\frac{1}{R_{sc}C_2} & 0 \\ \frac{1}{L_1} & 0 & -\frac{R_1 + R_{S_2}}{L_1} \\ 0 & \frac{1}{L_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_0} \end{bmatrix} \rightarrow$$

$$\begin{aligned}
 & \left[\begin{array}{ccc} 0 & 0 & \\ -\frac{1}{C_0} & 0 & \\ 0 & -\frac{1}{L_1} & \\ -\frac{R_2 + R_{S_4}}{L_2} & -\frac{1}{L_2} & \\ \frac{1}{C_0} & -\frac{i_{load}}{V_0 C_0} & \end{array} \right], \\
 A_1 = & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_{S_2} - R_{S_1}}{L_1} & 0 & \frac{1}{L_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{C_0} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\
 B = & \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{bat} C_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{sc} C_2} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \\
 A_2 = & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{R_{S_4} - R_{S_3}}{L_2} & \frac{1}{L_2} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C_0} & 0 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

2 基于指数趋近律的全局滑模控制策略

E-GSM控制策略结构如图2所示,包括一个全局滑模电流控制器(用于跟踪电池和超级电容电流参考值),以及一个PI控制器(用于保持母线电压稳定)。同时提出一种改进的基于规则能量管理策略,用于生成电池电流参考值。E-GSM控制策略通过设计所需滑模面,能快速响应输入变换,对参数变换和扰动不敏感,具有很好的鲁棒性。

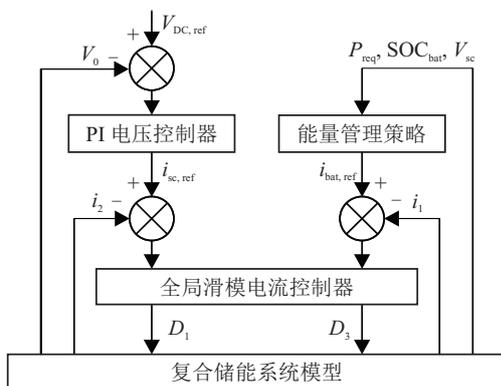


图2 E-GSM控制策略结构

2.1 改进的基于规则能量管理策略设计

目前常用的复合储能系统能量管理策略有:基于规则控制策略、基于滤波思想控制策略、模型预测控制策略、模糊控制策略等。由于电动汽车行驶状态十分复杂,能量管理策略能否合理分配能量十分关键。为此,本文提出一种改进的基于规则复合储能系统能量管理策略。该管理策略通过检测电池SOC值和超级电容电压来控制复合储能系统的工作状态,充分考虑了车辆不同行驶状态下的复合储能系统工作模式。

本文所提能量管理策略如图3所示。其中: P_{req} 为负载需求功率, V_{sc} 为超级电容电压值, SOC_{bat} 为电池荷电状态, $V_{sc,min}$ 为超级电容额定电压的60%, $V_{sc,max}$ 为超级电容额定电压的90%, $SOC_{bat,min}$ 为电池额定荷电状态的25%, $SOC_{bat,max}$ 为电池额定荷电状态的90%, P_{ch} 为超级电容充电功率。给定一个功率阈值 P_{min} ,当 $P_{req} < 0$ 时,车辆处于制动模式,复合储能系统吸收负载提供的功率;当 $P_{req} = 0$ 时,复合储能系统不工作;当 $P_{req} > 0$ 时,车辆处于牵引模式,复合储能系统为负载提供功率。具体设计如下:

1) $P_{req} < 0$ 时,若 $V_{sc} < V_{sc,max}$,则由超级电容吸收负载制动产生的功率;若 $V_{sc} > V_{sc,max}$ 且 $SOC_{bat} < SOC_{bat,max}$,则由电池吸收负载制动产生的功率。若 $V_{sc} > V_{sc,max}$ 且 $SOC_{bat} > SOC_{bat,max}$,则电池和超级电容都不再吸收功率,防止过渡饱和,达到保护复合储能系统的目的。

2) $P_{req} > 0$ 时,有两种情况:

① $P_{req} < P_{min}$ 时,若 $SOC_{bat} > SOC_{bat,min}$,则由电池提供负载所需功率。若 $SOC_{bat} < SOC_{bat,min}$,则由超级电容电压决定:若 $V_{sc} > V_{sc,min}$,则由超级电容提供负载所需功率;若 $V_{sc} < V_{sc,min}$,则电池和超级电容都不提供功率,复合储能系统停止工作,防止过度损耗。

② $P_{req} > P_{min}$ 时,若 $V_{sc} > V_{sc,max}$,则由电池SOC值决定:若 $SOC_{bat} > SOC_{bat,min}$,则由电池提供阈值功率 P_{min} ,超级电容提供剩余功率;若 $SOC_{bat} < SOC_{bat,min}$,则由超级电容提供负载所需功率。若 $V_{sc} < V_{sc,max}$,则也由电池SOC值决定:若 $SOC_{bat} > SOC_{bat,min}$,则由电池提供所需功率,并以恒定功率 P_{ch} 给超级电容充电;若 $SOC_{bat} < SOC_{bat,min}$,则电池和超级电容都不提供功率,复合储能系统停止工作,防止过度损耗。

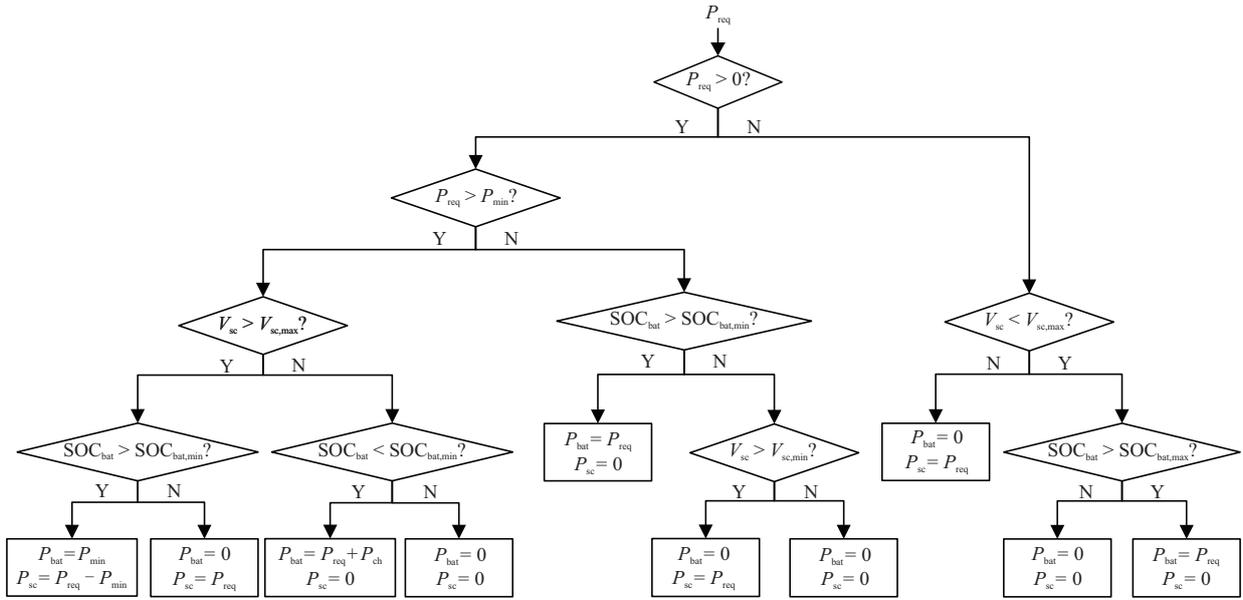


图3 改进的基于规则能量管理策略

2.2 全局滑模电流控制器设计

车辆行驶过程中所需功率具有高频分量大和变化剧烈的特点,这对复合储能系统控制的精度影响很大,从而对控制策略鲁棒性和精确性的要求也更为严格.因此,本文提出一种基于指数趋近律的全局滑模(E-GSM)控制策略,结合指数趋近律和全局滑模控制的优点,减小滑模控制的抖振,同时提高复合储能系统控制的精确性和鲁棒性.具体设计如下:取复合储能系统的状态变量为

$$\begin{cases} e_1 = y_{ref} - y, \\ e_2 = \dot{e}_1 = -\dot{y}. \end{cases} \quad (3)$$

其中: y_{ref} 为复合储能系统的电流期望值, y 为实际值. 对式(3)求导可得

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -\dot{y} = -C(A_0 + A_1D_1 + A_2D_3) \cdot x - CBv, \\ \dot{e}_2 = -\ddot{y} = -C(A_0 + A_1D_1 + A_2D_3) \cdot \dot{x}. \end{cases} \quad (4)$$

令 $H = C(A_0 + A_1D_1 + A_2D_3)$, $U = \dot{x}$.

为了使滑模控制在到达模态和滑动模态两个部分的过程都具有鲁棒性,设计系统全局滑模切换函数 s 为

$$s = ce_1 + e_2 - F(t). \quad (5)$$

其中: c 为大于1的任意常数, $F(t)$ 为全局滑模设计函数. 根据全局滑模控制的要求,将 $F(t)$ 设计为

$$F(t) = F(0)e^{-mt}. \quad (6)$$

其中: m 为常数,取 $F(0) = c \cdot y_{ref}$.

对 s 求一阶导可得

$$\dot{s} = ce_1 + \dot{e}_2 - \dot{F}(t) = -HU + (1 - c)e_2. \quad (7)$$

由滑模控制的指数趋近律可得

$$\dot{s} = -ks - \varepsilon\theta(s) = -HU + (1 - c)e_2. \quad (8)$$

其中: $\theta(s) = \frac{s}{|s| + \delta}$, δ 为任一很小的正常数.

结合式(4)、(7)、(8)可得

$$(1 - c)e_2 + ks + \varepsilon\theta(s) = C \cdot x. \quad (9)$$

其中: $k = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix}$, $\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 \end{bmatrix}$, k_i 、 ε_i 均为大于零的常数. 整理可得

$$\begin{aligned} [C(1 - c)A_1 \cdot x \quad C(1 - c)A_2 \cdot x] \cdot \begin{bmatrix} D_1 \\ D_3 \end{bmatrix} = \\ -C \cdot x - C(1 - c)A_0 \cdot x + ks + \varepsilon\theta(s). \end{aligned} \quad (10)$$

令导通电阻 $R_{S1} = R_{S2}$, $R_{S3} = R_{S4}$, 可得

$$\begin{aligned} D_1 = & -\frac{i_1L_1}{V_0(1 - c)} - \frac{V_1}{V_0} + i_1 \frac{R_1 + R_{S2}}{V_0} + \\ & 1 + k_1 \frac{L_1}{V_0(1 - c)} (i_{bat,ref} - i_1) + \\ & \varepsilon_1 \frac{L_1}{V_0(1 - c)} \theta(i_{bat,ref} - i_1), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} D_3 = & -\frac{i_2L_2}{V_0(1 - c)} - \frac{V_2}{V_0} + i_2 \frac{R_2 + R_{S4}}{V_0} + \\ & 1 + k_2 \frac{L_2}{V_0(1 - c)} (i_{sc,ref} - i_2) + \\ & \varepsilon_2 \frac{L_2}{V_0(1 - c)} \theta(i_{sc,ref} - i_2). \end{aligned} \quad (12)$$

定义Lyapunov函数为

$$V = \frac{1}{2}s^2, \quad (13)$$

结合式(8)可得其导数为

$$\dot{V} = \dot{s}s = -ks^2 - \varepsilon \frac{s^2}{|s| + \delta}. \quad (14)$$

其中: k, ε 均为大于0的常数, δ 为任一很小的正常数, 则式(13)可改写为

$$\dot{V} = \dot{s}s = -ks^2 - \varepsilon|s|. \quad (15)$$

因此 $\dot{V} \leq 0$ 恒成立, 由Lyapunov第二法(直接法)可知其在基于指数趋近率的全局滑模控制下渐近稳定.

2.3 PI电压控制器设计

式(11)、(12)中, $i_{\text{bat,ref}}$ 为电池电流参考值, 由能量管理策略得到

$$i_{\text{bat,ref}} = P_{\text{bat}}/V_{\text{bat}}. \quad (16)$$

$i_{\text{sc,ref}}$ 为超级电容电流参考值, 由PI控制器得到. 设给定母线电压与实际母线电压之间的误差为 e_3 , 可得

$$e_3 = V_{\text{DC,ref}} - V_0, \quad (17)$$

其控制规律为

$$u(t) = K_P e_3 + K_I \int_0^t e_3 d(t). \quad (18)$$

保持母线电压稳定即保持 V_0 稳定, 结合式(8)可得

$$i_{\text{sc,ref}}(t) = \frac{V_0}{V_2} \left[K_P e_3 + K_I \int_0^t e_3 d(t) - i_1 \frac{V_1}{V_0} + i_{\text{load}} \right]. \quad (19)$$

其中: K_P 为比例系数, K_I 为积分系数.

3 仿真结果与分析

3.1 Simulink 仿真结果及分析

为验证本文所提出的E-GSM控制策略的有效性, 在Matlab/Simulink软件中建立仿真模型进行仿真. 其中母线电压基准设置为220V, 电池初始SOC值设定为0.9、初始电压为180V; 超级电容初始电压设定为150V; P_{min} 设定为2kW, 超级电容充电功率 P_{ch} 为100W, 脉宽模块开关频率设置为10kHz; 比例系数 K_P 为20, 积分系数 K_I 为3. 自定义负载功率需求 P_{req} 如图4所示, 在第1.5s~3s之间加入一个振幅为2kW、频率为0.5Hz的正弦波来模拟负载波纹. 此外, 选用中国典型城市工况和新欧洲行驶工况这两种标准工况进行进一步仿真研究, 中国典型城市工况下的功率需求如图5所示, 新欧洲行驶工况下的功率需求如图6所示. 其余参数如表1和表2所示.

表1 仿真模型参数

参数	数值
L_1 : 电池侧电感/ μH	255
L_2 : 超级电容侧电感/ μH	188
R_1 : 电池侧电阻/ Ω	0.256
R_2 : 超级电容侧电阻/ Ω	0.161
C_0 : 负载侧电容/mF	15
C_1 : 电池侧滤波电容/ μF	69
C_2 : 超级电容侧滤波电容/ μF	69
R_{S_i} : 开关导通电阻/m Ω	21

表2 控制器参数

参数	数值
$k_1 L_1 / V_0 (1 - c)$	5
$\varepsilon_1 L_1 / V_0 (1 - c)$	0.3
$k_2 L_2 / V_0 (1 - c)$	500
$\varepsilon_2 L_2 / V_0 (1 - c)$	30

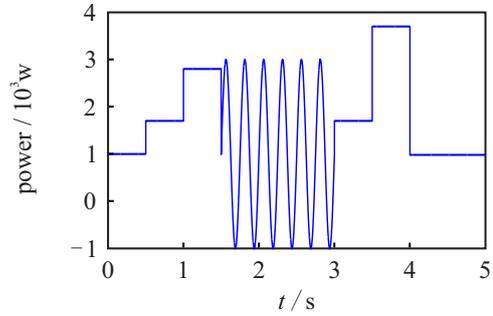


图4 自定义负载功率需求

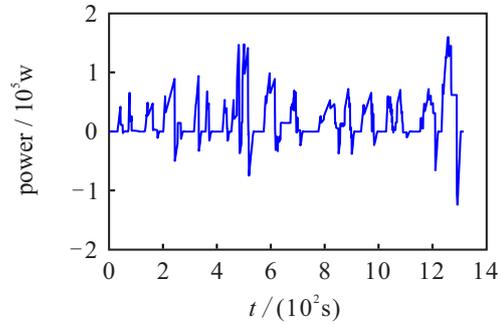


图5 中国典型城市工况功率需求

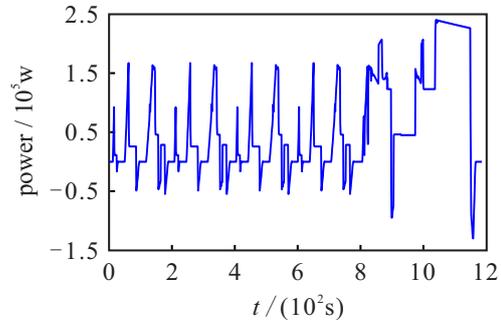


图6 新欧洲行驶工况功率需求

图7给出了自定义负载需求功率下的电流电压跟随曲线, 可以看出电池和超级电容在工作时, 其电流能够精准跟踪参考值, 且母线电压总是稳定于参考电压220V, 这表明E-GSM控制策略具有良好的精确性和鲁棒性.

为体现E-GSM控制策略的优越性, 将所提E-GSM控制策略与经典PI控制策略进行性能对比. 设计电池侧PI控制为

$$u_{\text{bat}}(t) = K_{P,\text{bat}}(i_{\text{bat,ref}} - i_1) + K_{I,\text{bat}} \int_0^t (i_{\text{bat,ref}} - i_1) d(t). \quad (20)$$

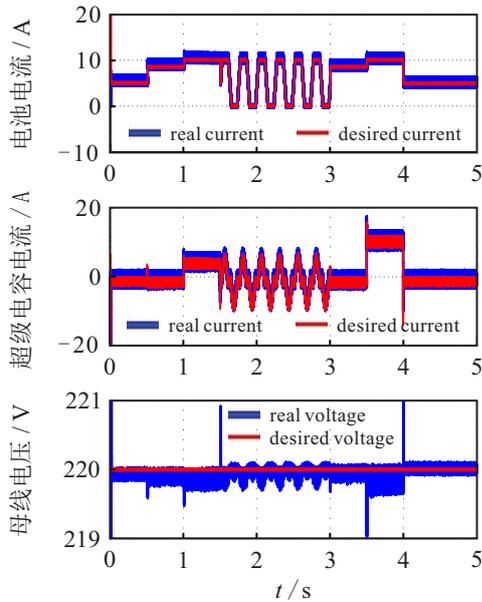


图7 自定义负载功率需求下的电流电压跟随曲线

设计超级电容侧PI控制为

$$u_{sc}(t) = K_{P,sc}(i_{sc,ref} - i_2) + K_{I,sc} \int_0^t (i_{sc,ref} - i_2) dt. \quad (21)$$

其中: $K_{P,bat}$ 为电池侧比例系数, $K_{I,bat}$ 为电池侧积分系数, $K_{P,sc}$ 为超级电容侧比例系数, $K_{I,sc}$ 为超级电容侧比例系数.

两种控制方法性能比较如图8所示. 由图8可以看出,在跟踪参考值方面,本文提出的E-GSM控制策略精度更高,E-GSM控制策略在一开始就能快速稳定母线电压值,而PI控制则需要一定的响应时间才能将母线电压值稳定在参考值附近. 同时,E-GSM控制策略具有更小的电池和超级电容电流抖振,鲁棒性更强、精确度更高.

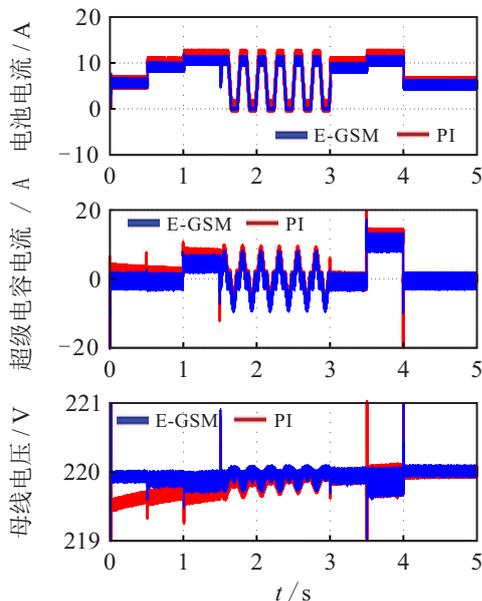


图8 自定义负载功率需求下的控制性能对比

为进一步验证E-GSM控制策略的有效性,在中国典型城市工况下进行仿真,结果如图9所示. 由图9可以看出,在中国典型城市工况下,电池输出电流和超级电容输出电流对参考值跟踪十分稳定,而母线电压也稳定于目标电压220V,进一步验证了E-GSM控制策略的有效性.

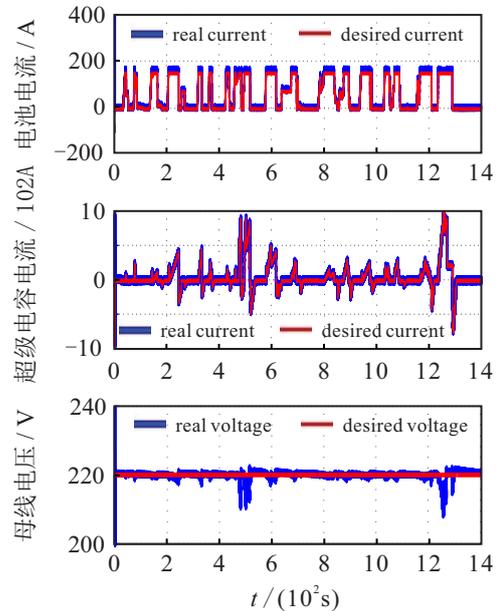


图9 中国典型城市工况下电流电压跟随曲线

3.2 Advisor仿真结果及分析

为体现本文所提E-GSM控制策略的优势,在高级车辆仿真软件Advisor中进行仿真测试^[16],整车基本参数如表3所示.

表3 整车模型参数

参数	数值
空气阻力系数	0.55
车轮滚动半径/mm	478
迎风面积/m ²	8.7
整备质量/kg	12500
满载质量/kg	18000
蓄电池容量/Ah	60
蓄电池额定电压/V	495
超级电容容量/F	9500
超级电容额定电压/V	360
驱动电机额定功率/kW	60

在中国典型城市工况和新欧洲行驶工况下,对本文提出的E-GSM控制策略和基于滤波技术思想控制策略(filtering technology, FT)^[17-18]进行控制性能比较. FT控制策略结构如图10所示.

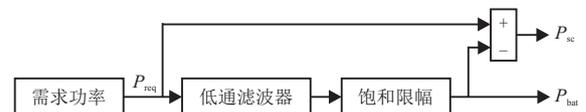


图10 基于滤波技术思想控制策略

FT控制策略将汽车行驶需求功率分为两个部分:峰值功率和平均功率. 选用低通滤波器对汽车需求功率进行滤波后可得到平均功率,平均功率主要由电池提供,剩余峰值功率则由超级电容提供,可避免电池收到大电流的损害,从而延长电池寿命. 本文中低通滤波器滤波函数为

$$f(s) = 1/(1 + \tau s). \quad (22)$$

图11和图12给出了本文所提E-GSM策略和FT控制策略在中国典型城市工况和新欧洲行驶工况下的电池状态变化曲线,表4和表5给出了有关变量的变化范围. 可明显看出:在中国典型城市工况下,应用E-GSM控制策略的电池SOC终值较FT控制策略提高10%;在新欧洲行驶工况下,应用E-GSM控制策略的电池SOC终值较FT控制策略提高7%,且都避免了电池大电流放电. 可以看出,本文所提出的E-GSM控制策略能够很好地发挥超级电容与电池结合的优势,减缓电池放电速率,避免电池大电流放电,从而在满足汽车行驶需求的情况下,提升复合储能系统能量利用效率,提高电池使用寿命和电动汽车续航里程.

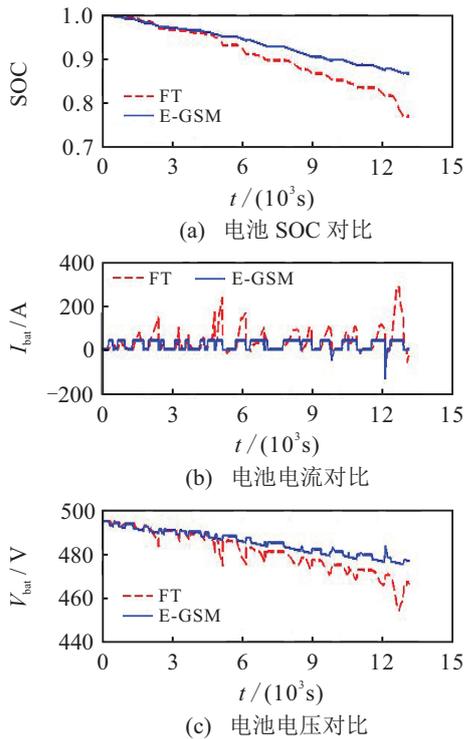


图11 中国典型城市工况下电池工作状态变化曲线

表4 中国典型城市工况下电池工作状态对比

	类型	变化范围
E-GSM控制策略	SOC值	1~0.86
	电池电流 I/A	45~-130
	电池电压 V/V	495~477
FT控制策略	SOC值	1~0.76
	电池电流 I/A	290~-60
	电池电压 V/V	495~467

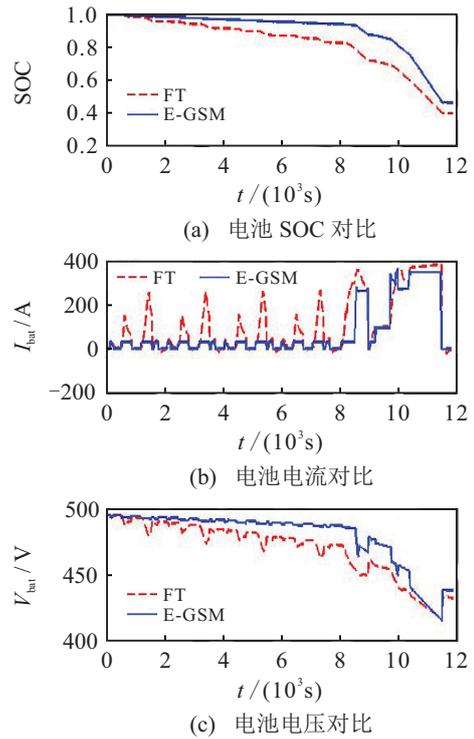


图12 新欧洲行驶工况下电池工作状态变化曲线

表5 新欧洲行驶工况下电池工作状态对比

	类型	变化范围
E-GSM控制策略	SOC值	1~0.46
	电池电流 I/A	350~0
	电池电压 V/V	495~437
FT控制策略	SOC值	1~0.39
	电池电流 I/A	385~-30
	电池电压 V/V	495~431

4 结论

本文提出了一种基于指数趋近率的车载复合储能系统全局滑模(E-GSM)控制策略,包括一个全局滑模电流控制器(用于跟踪电池和超级电容电流参考值)和一个PI控制器(用于保持母线电压稳定),并提出了一种改进的基于规则能量管理策略,用于生成电池电流参考值. 仿真结果说明:本文所提出的E-GSM控制策略能实现对电池和超级电容电流参考值的精确跟踪,且能保持母线电压稳定. 在相同工况下电池SOC终值分别提高10%和7%,且能避免电池大电流放电,说明E-GSM控制策略能提升复合储能系统能量利用效率,提高电池使用寿命和电动汽车续航里程,验证了E-GSM控制策略的有效性.

参考文献(References)

[1] Zhang X Z, Wang Y N, Liu G R. Robust regenerative charging control based on T-S fuzzy sliding-mode approach for advanced electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2016, 2(1): 52-65.

- [2] 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.
(Sang B Y, Tao Y B, Zheng G, et al. Research on topology and control strategy of the super-capacitor and battery hybrid energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 1-6.)
- [3] 张雷, 胡晓松, 王震坡. 超级电容管理技术及在电动汽车中的应用综述[J]. 机械工程学报, 2017, 53(16): 32-43.
(Zhang L, Hu X S, Wang Z B. Overview of supercapacitor management techniques in electrified vehicle applications[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(16): 32-43.)
- [4] Jung H, Wang H, Hu T. Control design for robust tracking and smooth transition in power systems with battery/supercapacitor hybrid energy storage devices[J]. Journal of Power Sources, 2014, 267: 566-575.
- [5] Ayad M Y, Bechenif M, Henni A, et al. Passivity based control applied to DC hybrid powersource using fuel cell and supercapacitors[J]. Energy Conversion Management, 2010, 51(7): 1468-1475.
- [6] 胡建军, 郑勇, 胡志华, 等. 纯电动汽车复合储能系统参数匹配及控制策略[J]. 中国公路学报, 2018, 31(3): 142-150.
(Hu J J, Zheng Y, Hu Z H, et al. Parameter matching and control strategies of hybrid energy storage system for pure electric vehicle[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(3): 142-150.)
- [7] Phillip K, Mackenzie W, John R, et al. Optimal performance of a full scale li-ion battery and li-ion capacitor hybrid energy storage system for a plug-in hybrid vehicle[C]. 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Cincinnati: IEEE, 2017.
- [8] 高建平, 葛坚, 赵金宝, 等. 复合电源系统功率分配策略研究[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(7): 17-24.
(Gao J P, Ge J, Zhao J B, et al. Power allocation strategy for hybrid power system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(7): 17-24.)
- [9] 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): 143-151.
(Wang Q, Sun Y K, Luo Y S. A Power distribution control strategy of hybrid energy storage system in hybrid electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(18): 143-151.)
- [10] 王琪, 罗印升, 倪福银. 车辆复合电源功率分配稳定控制策略研究[J]. 电子科技大学学报, 2018, 47(3): 376-381.
(Wang Q, Luo Y S, Ni F Y. Research on a power distribution stability control strategy of hybrid energy storage system in vehicles[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2018, 47(3): 376-381.)
- [11] Rotenberg D, Vahidi A, Kolmanovsky I. Ultracapacitor assisted powertrains: Modeling, control, sizing, and the impact on fuel economy[J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 2011, 19(3): 576-589.
- [12] Ling R, Maksimovic D, Leyva R. Second-order sliding-mode controlled synchronous buck DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(25): 39-49.
- [13] 修春波, 臧亚坤. 改进快速全局滑模控制方法[J]. 控制与决策, 2016, 31(12): 2267-2270.
(Xiu C B, Zang Y K. Improved quick global sliding mode control[J]. Control and Decision, 2016, 31(12): 2267-2270.)
- [14] 肖会敏, 刘振. 一类不确定切换中立型系统的鲁棒滑模控制[J]. 控制与决策, 2016, 31(3): 521-527.
(Xiao H M, Liu Z. Robust sliding mode control for a class of uncertain switched neutral systems[J]. Control and Decision, 2016, 31(3): 521-527.)
- [15] Song Z, Hou J, Hofmann H, et al. Sliding-mode and Lyapunov function-based control for battery/supercapacitor hybrid energy storage system used in electric vehicles[J]. Energy, 2017(122): 601-612.
- [16] 曾小华, 宫维钧. ADVISOR 2002 电动汽车仿真与再开发应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 1-395.
(Zeng X H, Gong W J. ADVISOR 2002 electric vehicle simulation and redevelopment[M]. Beijing: China Machine Press, 2017: 1-395.)
- [17] Huang X L, Hiramatsu T, Hori H Y. Energy management strategy based on frequency-varying filter for the battery supercapacitor hybrid system of electric vehicles[J]. World Electric Vehicle Journal, 2013, 6(3): 623-628.
- [18] Shahverdi M, Mazzola M, Grice Q, et al. Bandwidth-based control strategy for a series HEV with light energy storage system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(2): 1040-1052.

作者简介

张细政(1979—), 男, 教授, 博士, 从事现代电气传动、电动汽车电控系统关键技术等研究, E-mail: z_x_z2000@163.com;

卢张宇(1997—), 男, 硕士生, 从事电动汽车复合储能系统智能优化控制及其应用的研究, E-mail: 1301157026@qq.com;

谭崇苗(1995—), 男, 硕士生, 从事电动汽车复合储能系统能量管理策略的研究, E-mail: 359805251@qq.com;

郑亮(1995—), 男, 硕士生, 从事智能算法在风电系统中的应用和电机控制的研究, E-mail: 1279779664@qq.com.

(责任编辑: 齐 霖)