

DOI: 10.7652/xjtuxb201904006

电动汽车混合储能系统的自适应协同控制

续丹, 周佳辉, 王斌, 毛景禄, 汪建林

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对电动汽车混合储能系统在采用协同控制方法时受超级电容等效电阻和电池内阻引起的输入电压波动影响等问题,提出了一种自适应协同控制策略。首先,基于直流变换器理想状态空间平均模型设计了协同控制器,并对其稳定性进行了分析;其次,基于超级电容等效电阻和电池内阻建立了系统的精确数学模型,定义了自适应观测函数和基于 Lyapunov 函数的自适应控制律,并对负载及输入电压进行估计;进一步,选取了协同控制宏变量并推导出自适应协同控制的占空比函数;最后,在 MATLAB/Simulink 中搭建了混合储能系统的仿真模型,验证了自适应协同控制的有效性。仿真结果表明:自适应协同控制只有轻微的超调和因负载变化造成的电流波动,且响应速度较快,约为 4 ms,电流跟踪误差不超过 1%。与协同控制和滑模控制相比,自适应协同控制系统有更好的稳定性和抗干扰能力,能有效提高电动汽车混合储能系统的稳定性和鲁棒性,保证功率分配策略的有效实施。

关键词: 电动汽车;混合储能系统;直流变换器;自适应协同控制

中图分类号: TM46;TP13 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)04-0038-06

An Adaptive Synergetic Control Strategy for Hybrid Energy Storage System of Electric Vehicles

XU Dan, ZHOU Jiahui, WANG Bin, MAO Jinglu, WANG Jianlin

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An adaptive synergetic control strategy is proposed to solve the problem that the control effect of the synergetic control adopted in battery-ultracapacitor hybrid energy storage system of electric vehicles is affected by the equivalent resistance of the ultracapacitor and the input voltage fluctuation caused by the internal resistance of the battery. A synergetic controller is designed based on the ideal state space average model of the DC-DC converter, and its stability is analyzed. Then, an accurate mathematical model of the system is established by considering the equivalent resistance of the ultracapacitor and the battery internal resistance. An adaptive observation function is designed and the adaptive control law is obtained based on the Lyapunov function. The unknown load and varying input voltage are then estimated. Furthermore, a macro-variable is designed, and a duty cycle function of the adaptive synergetic control is derived. Finally, a simulation model of the hybrid energy storage system is established in MATLAB/Simulink to verify the effectiveness of the adaptive synergetic control. Results show that the proposed adaptive synergetic control has slight overshoot and current fluctuation caused by load

收稿日期: 2018-09-29。 作者简介: 续丹(1964—),女,教授;王斌(通信作者),男,助理研究员。 基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2018M631143);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2018JQ5126)。

网络出版时间: 2019-01-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190121.1106.014.html>

change, and its response speed is fast (the settling-time is about 4 ms). Moreover, the tracking error is less than 1% in current tracking control. Comparisons with the synergetic control and the sliding mode control show that the adaptive synergetic control has better stability and anti-interference ability. Therefore, the adaptive synergetic control effectively improves the stability and robustness of the hybrid energy storage system, and ensures the effectiveness of power allocation strategy.

Keywords: electric vehicle; hybrid energy storage system; DC-DC converter; adaptive synergetic control

在环境污染和能源危机的背景下,电动汽车受到广泛的关注与重视,成为当下研究的热点^[1-3]。然而,电池作为电动汽车传统储能和供能装置,其技术尚不完善,存在功率密度低、循环寿命短等问题。由于超级电容具有功率密度高、循环寿命长等优点^[4-6],因此电池与超级电容组合的混合储能系统应运而生,该系统兼具高能量密度和高功率密度的优点,既能够保证电动汽车在各种工况下的功率需求,又能有效延长电池的使用寿命^[7-9]。

在混合储能系统中,通常采用直流变换器实现电池和超级电容之间的功率分配。直流变换器是一种典型的非线性、时变系统,对其控制的研究吸引了众多研究者。传统的 PI 控制等方法只能使系统工作在某个具体的点附近,因而不适用于电动汽车多工况、负载频繁变化的情况。滑模控制已经被成功应用于直流变换器的控制中,具有降阶、去耦合以及对参数变化不敏感等优点,但其控制器带宽过高、开关切换频率变化导致其存在颤振问题,不易数字化实现^[10-11],而协同控制不仅具有与滑模控制相同的降阶、去耦合优点,又因其开关切换频率固定、不存在颤振问题而非常便于数字化实现^[12-14]。

协同控制采用解析的方法,充分利用系统数学模型实现非线性系统的控制^[12-15],可以保证控制的精准性。合理设计协同控制器,能够保证系统的闭环稳定性、鲁棒性以及良好的动态响应特性,因此协同控制非常适用于电动汽车混合储能系统的控制与功率分配。然而,协同控制需要知道完整的系统信息,但在实际应用中,负载信息往往是未知的,且电池和超级电容均存在动态变化的内阻,这都是协同控制器设计时需要考虑的因素。

为了提高电池-超级电容混合储能系统的稳定性和控制的准确性,以及保证功率分配的有效实施,本文在协同控制的基础上设计了一种自适应协同控制策略。首先,在系统理想状态空间平均模型的基础上设计了协同控制器,并验证了其稳定性;其次,

考虑各电源内阻定义了自适应观测函数,并基于 Lyapunov 函数设计自适应控制律,对负载及输入电压进行估计;然后,选取了合理的协同控制宏变量,并由此推导出自适应协同控制的占空比函数;最后,通过仿真验证了所提出的自适应协同控制策略在混合储能系统电流跟踪控制中的效果。

1 模型建立

本文采用半主动结构的电池-超级电容混合储能系统, V_{battery} 为电池输出电压; L 、 C 、 R 分别为电感、电容和负载电阻,系统结构如图 1 所示。电池组电压低于超级电容电压,经过一个直流变换器升压输出,超级电容直接输出。

状态空间平均法是直流变换器瞬态建模分析的常用方法之一。假设升压变换器输入端电池电压无波动、忽略超级电容影响,当 SW 导通时,有

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= V_{\text{battery}}/L \\ \dot{x}_2(t) &= -x_2/(RC) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: x_1 为电感电流; x_2 为输出电压。当 SW 关断时,有

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= -x_2/L + V_{\text{battery}}/L \\ \dot{x}_2(t) &= x_1/C - x_2/(RC) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可以得出系统的理想状态空间平均模型为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= -(1-d)x_2/L + V_{\text{battery}}/L \\ \dot{x}_2(t) &= (1-d)x_1/C - x_2/(RC) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: d 为占空比。

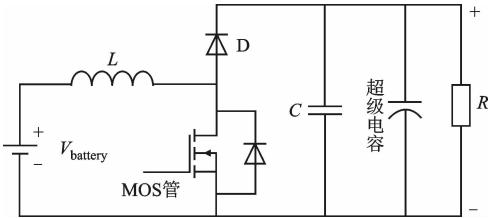


图 1 半主动电池-超级电容混合储能系统

2 协同控制

协同控制是以自组织思想为基础演变而来的非线性系统控制方法。该方法利用系统状态空间模型,引入宏变量定义状态变量之间的关系,迫使系统从任意初始点运动至一不变的流形,并最终沿着这一流形达到稳态^[12-14]。

2.1 协同控制器设计

首先,定义宏变量 ψ ,表达式为

$$\psi(t) = \psi(x, t) \quad (4)$$

控制器通过控制这一宏变量 ψ 迫使系统工作在流形,即 $\psi=0$ 。 $\psi=0$ 这一条件也使得系统的阶次降低一次。通过定义 ψ ,设计者可以根据需求引入不同的控制律以提升控制性能。

式(5)定义了宏变量 ψ 在工作平面内的动态运动规律,即宏变量 ψ 需满足

$$T\dot{\psi} + \psi = 0, \quad T > 0 \quad (5)$$

式中: T 为时间常数,理论上可以任意小。 T 决定系统收敛于流形的速度, T 越小收敛速度越快,稳态误差和系统噪声也越小^[16]。一般情况下系统在 $t=3T$ 时系统即可达到目标流形。

通过求解式(5)可得出控制变量的表达式,在本文中即为占空比 d 的表达式。

在直流变换器的控制中,滑模控制在滑模面附近采用 bang-bang 控制会导致开关切换频率无穷大,采用滞环控制虽然能够有效降低开关切换频率,但开关切换频率是变化的,而协同控制通过生成占空比 d 使系统满足式(5),通过产生 PWM 信号进行控制,开关切换频率固定,不会引起颤振问题。因此,与滑模控制相比,协同控制具有以下优点^[12-13,16-18]:①开关切换频率固定;②易于数字化实现;③偏离目标流形时的动态响应由 T 决定而非完全依赖于系统原有属性。

协同控制中,最简单的宏变量 ψ 可定义为系统状态变量的线性组合,即

$$\psi = k_1(x_1 - x_{1\text{ref}}) + k_2(x_2 - x_{2\text{ref}}) \quad (6)$$

式中: $x_{1\text{ref}}$ 为参考电流; $x_{2\text{ref}}$ 为参考电压。当系统工作在流形 $\psi=0$ 时,状态变量之间为线性关系,即系统的阶次减小一次。系统阶次的减小,可以有效抑制超调的产生。

联立式(3)~式(6),得出占空比

$$d = 1 - \left[\frac{k_1 V_{\text{battery}}}{L} - \frac{k_2 x_2}{RC} + \frac{k_1(x_1 - x_{1\text{ref}})}{T} + \frac{k_2(x_2 - x_{2\text{ref}})}{T} \right] / \left(\frac{k_1 x_2}{L} - \frac{k_2 x_1}{C} \right) \quad (7)$$

式(7)为协同控制器的控制律,用于控制本文中的直流变换器。该控制律控制系统状态变量 x_1 、 x_2 收敛于流形 $\psi=0$,并沿着该流形向稳态工作点运动,最终到达稳态工作点 $x_1 = x_{1\text{ref}}$ 、 $x_2 = x_{2\text{ref}}$ 。

式(7)表明,由于协同控制使用了系统完整的数学模型,其控制律的形式相对复杂、计算量增大,但利用现有的处理器(如 DSP 等)可有效解决上述问题。此外,使用完整的数学模型会导致系统对参数变化的敏感性增大,这一问题可通过合理定义宏变量 ψ 解决。

2.2 稳定性证明

选取 Lyapunov 函数为

$$V = 0.5\psi^2 \quad (8)$$

进一步求得

$$\dot{V} = \psi\dot{\psi} \quad (9)$$

由式(5)可知 $\dot{\psi} = -\psi/T$,于是有

$$\dot{V} = \psi\dot{\psi} = -\psi^2/T < 0 \quad (10)$$

根据 Lyapunov 稳定性原理,可知系统是渐近稳定的。

3 自适应协同控制

由式(7)可知,协同控制律中存在 $-k_2 x_2/RC$ 项,即控制律的实现需要知道准确的负载信息,这在实际应用中显然是难以实现的。虽然根据欧姆定律 $R=U/I$ 可以计算负载的大小,但是瞬态时负载端电压和电流测量值滞后,导致此时误差较大,严重影响系统的瞬态响应性能。另外,式(3)为理想状态下的状态空间平均模型,为实现精确控制,需要考虑电池内阻带来的输入电压波动和超级电容等效内阻的影响,并且电池和超级电容的内阻又是动态变化的^[4,19-20]。针对以上问题,本文结合自适应控制理论对协同控制进行改进,设计了一种自适应协同控制策略:基于 Lyapunov 函数设计自适应状态观测器对负载及输入电压进行估计,以克服系统参数变化引起的电压和电流波动。

首先建立考虑各电源内阻的系统模型。将电池等效为电压源与可变电阻串联,用波动的电压 V'_{battery} 表示;将超级电容等效为电阻 R_{UC} 与电容 C_{UC} 并联。进一步,令 $C_{\text{eq}} = C + C_{\text{UC}}$, $R_{\text{eq}} = RR_{\text{UC}}/(R + R_{\text{UC}})$,得到如图 2 所示的系统等效模型。

系统等效数学模型可以写成

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = -(1-d)x_2/L + V'_{\text{battery}}/L \\ \dot{x}_2(t) = (1-d)x_1/C_{\text{eq}} - x_2/R_{\text{eq}}C_{\text{eq}} \end{cases} \quad (11)$$

根据以上模型,可以将输入电压和等效负载作

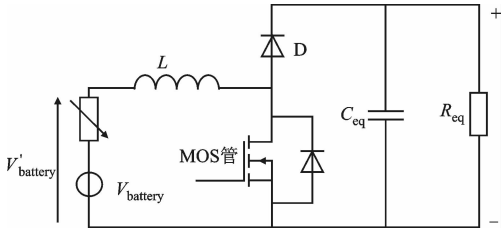


图2 半主动电池-超级电容混合储能系统等效模型

为估计量,建立观测函数

$$\dot{\hat{x}}_1 = -(1-d)\hat{x}_2/L + \hat{V}'_{\text{battery}}/L + p_1(x_1 - \hat{x}_1) \quad (12)$$

$$\dot{\hat{x}}_2 = (1-d)\hat{x}_1/C_{\text{eq}} - \hat{G}_{\text{eq}}\hat{x}_2/C_{\text{eq}} + p_2(x_2 - \hat{x}_2) \quad (13)$$

式中: $\hat{x}_1$ 和 $\hat{x}_2$ 分别为 x_1 和 x_2 的估计值; p_1 和 p_2 是正比例因子,用于放大估计值与实际值的误差; G_{eq} 为等效电导,即 $G_{\text{eq}} = 1/R_{\text{eq}}$, $\hat{G}_{\text{eq}}$ 为其估计值。

令 $\tilde{V}'_{\text{battery}} = V'_{\text{battery}} - \hat{V}'_{\text{battery}}$, $\tilde{x}_1 = x_1 - \hat{x}_1$, $\tilde{x}_2 = x_2 - \hat{x}_2$, $\tilde{G}_{\text{eq}} = G_{\text{eq}} - \hat{G}_{\text{eq}}$ 。根据式(11)~式(13),有

$$\dot{\tilde{x}}_1 = -(1-d)\tilde{x}_2/L + \tilde{V}'_{\text{battery}}/L - p_1\tilde{x}_1 \quad (14)$$

$$\dot{\tilde{x}}_2 = (1-d)\tilde{x}_1/C_{\text{eq}} - \tilde{G}_{\text{eq}}\tilde{x}_2/C_{\text{eq}} - (\tilde{G}_{\text{eq}}\tilde{x}_2 + \hat{G}_{\text{eq}}\tilde{x}_2)/C_{\text{eq}} - p_2\tilde{x}_2 \quad (15)$$

建立 Lyapunov 函数

$$V = 0.5(L\tilde{x}_1^2 + C_{\text{eq}}\tilde{x}_2^2 + \tilde{G}_{\text{eq}}^2/\xi_1 + \tilde{V}'_{\text{battery}}^2/\xi_2) \quad (16)$$

$$\dot{V} = -p_1L\tilde{x}_1^2 - p_2C_{\text{eq}}\tilde{x}_2^2 - \tilde{G}_{\text{eq}}\tilde{x}_2^2 - \tilde{G}_{\text{eq}}(\tilde{x}_2^2 + \tilde{x}_2\tilde{x}_2 - \tilde{G}_{\text{eq}}/\xi_1) + \tilde{V}'_{\text{battery}}(\tilde{x}_1 + \tilde{V}'_{\text{battery}}/\xi_2) \quad (17)$$

式中: ξ_1 和 ξ_2 为正常数

为保证系统的稳定性,自适应控制律需满足 $\dot{V} < 0$ 。因此,令 $\dot{\tilde{G}}_{\text{eq}} = \xi_1(\tilde{x}_2^2 + \tilde{x}_2\tilde{x}_2)$, $\dot{\tilde{V}}'_{\text{battery}} = -\xi_2\tilde{x}_1$ 。由于 $\tilde{G}_{\text{eq}} = G_{\text{eq}} - \hat{G}_{\text{eq}}$, $\tilde{V}'_{\text{battery}} = V'_{\text{battery}} - \hat{V}'_{\text{battery}}$, 且 G_{eq} 与 V'_{battery} 在控制阶段可以认为是不变的,于是自适应控制律可以设计成

$$\dot{\tilde{G}}_{\text{eq}} = -\xi_1(\tilde{x}_2^2 + \tilde{x}_2\tilde{x}_2) \quad (18)$$

$$\dot{\tilde{V}}'_{\text{battery}} = \xi_2\tilde{x}_1 \quad (19)$$

因此, $\dot{V} = -p_1L\tilde{x}_1^2 - p_2C_{\text{eq}}\tilde{x}_2^2 - \tilde{G}_{\text{eq}}\tilde{x}_2^2 < 0$ 。根据 Lasalle 不变性原理,有 $\tilde{x}_1 \rightarrow 0$, $\tilde{x}_2 \rightarrow 0$ 。结合式(12)和式(13)可知, $\tilde{G}_{\text{eq}} \rightarrow 0$, $\tilde{V}'_{\text{battery}} \rightarrow 0$, 即 $\hat{G}_{\text{eq}}$ 和 $\hat{V}'_{\text{battery}}$ 渐近收敛于 G_{eq} 和 V'_{battery} 。

选取协同控制宏变量为

$$\psi = k_1(\hat{x}_1 - x_{1\text{ref}}) + k_2(\hat{x}_2 - x_{2\text{ref}}) \quad (20)$$

由于 $\hat{x}_1$ 、 $\hat{x}_2$ 渐进收敛于 x_1 、 x_2 , 结合式(20), x_1 、 x_2 将最终收敛于 $x_{1\text{ref}}$ 、 $x_{2\text{ref}}$, 即系统能达到稳态工作点。

根据式(5)和式(20),可得

$$d = 1 - \left[\frac{k_1 \hat{V}'_{\text{battery}}}{L} + k_1 p_1(x_1 - \hat{x}_1) - \frac{G_{\text{eq}} k_2 \hat{x}_2}{C_{\text{eq}}} + k_2 p_2(x_2 - \hat{x}_2) + \frac{k_1(\hat{x}_1 - x_{1\text{ref}})}{T} + \frac{k_2(\hat{x}_2 - x_{2\text{ref}})}{T} \right] / \left(\frac{k_1 \hat{x}_2}{L} - \frac{k_2 \hat{x}_1}{C_{\text{eq}}} \right) \quad (21)$$

式(21)即为本文所提出的自适应协同控制策略的占空比函数。

4 仿真实验

为了验证本文设计的自适应协同控制策略的有效性,在 MATLAB/Simulink 中搭建电池-超级电容混合储能系统的仿真模型进行验证。具体的混合储能系统仿真参数为:电池组为 25 V/(44 A·h), 内阻在 0.05~0.15 Ω 之间;超级电容模块为 48 V/15 F, 内阻在 0.1~0.5 Ω 之间;PWM 波频率为 25 kHz, 初始条件 $\hat{V}'_{\text{battery}}(0) = 24$ V。其他参数: $C = 600 \mu\text{F}$, $L = 960 \mu\text{H}$, $\xi_1 = 2$, $\xi_2 = 20$, $k_1 = 13$, $k_2 = 1$, $T = 0.0005$ 。

首先,为了验证本文自适应协同控制策略的有效性,分别将协同控制(负载由欧姆定律 $R = U/I$ 计算得出,以下简称协同控制)、滑模控制与本文自适应协同控制策略得到的电池输出电流跟踪效果进行对比,3 种策略均考虑各电源内阻。在电流控制时,电流误差的反馈起主要调节作用,因此需选取 $p_1 > p_2$, 本文中取 $p_1 = 9$, $p_2 = 2$ 。设置参考电流为 10 A, 负载为 10 Ω , 在 $t = 0.02$ s 时并入另一个 10 Ω 负载,得到的电流跟踪效果和系统输出电压特性如图 3 和图 4 所示。

由图 3 可知:启动时,协同控制与滑模控制的响应时间基本相同,约为 4.3 ms,且两者均存在明显的超调;自适应协同控制响应速度稍快,约为 4 ms,且超调明显减小,仅为协同控制的 40%、滑模控制的 50%;负载波动时,协同控制与滑模控制的波动明显,响应时间约为 8 ms;自适应协同控制响应速度快,约为 3 ms,这是因为自适应协同控制有效减小了负载突变造成的电流波动。以上分析表明:协同控制与滑模控制的控制效果相近,这与文献[14]的结论相同;自适应协同控制响应速度快,系统稳定性和抗干扰能力更强。因此,自适应协同控制非常适用于混合储能系统中功率分配策略的实现。需要指出的是,由于采用自适应估计的方法,图 3c 中实际电流与参考电流之间的稳态误差大于图 3a 和 3b,但不超过 1%。

图 4 为 3 种策略下系统的输出电压特性曲线。

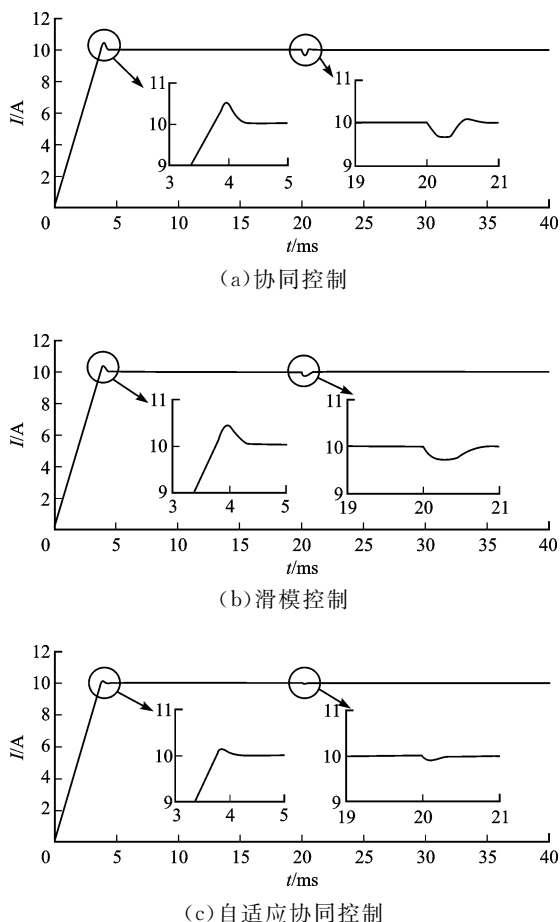


图 3 3 种控制策略的电流跟踪控制效果对比

协同控制中定义的宏变量 ψ 同时包括电流误差与电压误差项,在电流控制时,参考电流 $x_{1\text{ref}}$ 由设计者直接指定,而参考电压 $x_{2\text{ref}}$ 通过功率守恒定律计算得

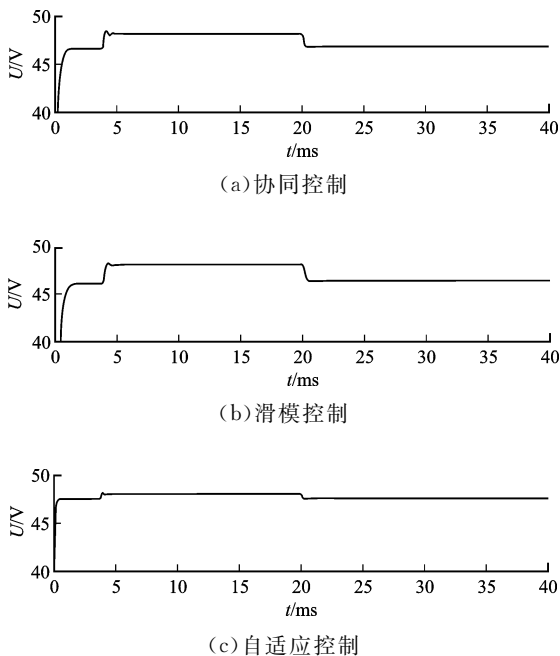


图 4 3 种控制策略下系统的输出电压特性

出,本文中 $x_{2\text{ref}} = \sqrt{R_{\text{eq}}(V_{\text{battery}} I_{\text{battery}} + V_{\text{UC}} I_{\text{UC}})}$,因此负载突变会导致输出电压变化。图 4 表明,自适应协同控制下系统的输出电压波动小且响应速度快,响应性能优于协同控制和滑模控制,进一步表明自适应协同控制响应速度快且具有较强的稳定性和抗干扰能力。

为进一步验证本文提出的自适应协同控制在混合储能系统功率分配中的性能,以电池输出电流为控制量,设计了短时间内连续变化的参考电流模拟工况对其进行验证。实验中保持负载需求功率不变,控制电池跟随参考电流输出,剩余功率由超级电容补偿。结果如图 5 所示。

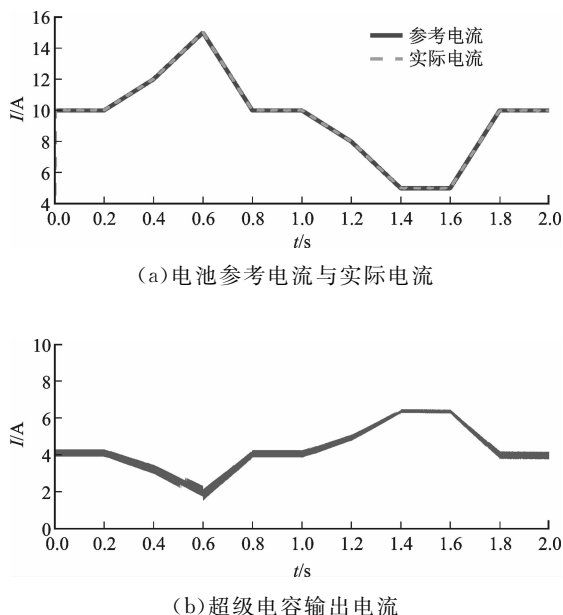


图 5 参考电流连续变化时的电流跟踪效果

由图 5 可知,在参考电流连续变化的情况下,电池实际输出电流能够迅速响应(响应时间约为 4 ms),并能准确跟踪参考电流值变化(跟踪误差小于 1%)。这一特性在混合储能系统的功率分配中非常适用,不仅能够有效保证功率分配策略的有效实施,还能保证电池输出的稳定性,充分发挥超级电容“削峰填谷”的作用。

5 结 论

电池-超级电容混合储能系统采用协同控制时,控制准确度较高且开关切换频率固定而不存在颤振问题。但是,协同控制需要知道准确的负载信息,在实际中由欧姆定律计算负载会降低系统瞬态响应性能;并且,实际应用中电池内阻带来的输入电压波动和超级电容等效电阻的影响也不可忽视。针对以上

问题,为提高系统的稳定性和控制的准确性,本文提出了一种自适应协同控制策略。在直流变换器状态空间平均模型的基础上,考虑各电源内阻定义自适应观测函数,并基于 Lyapunov 函数设计自适应控制律,对负载及电源内阻进行估计;选取协同控制宏变量并由此推导出自适应协同控制的占空比函数,对混合储能系统进行电流跟踪控制。结果表明,自适应协同控制响应速度较快,约为 4 ms,且没有明显的超调以及因负载变化造成的电流波动;电流跟踪控制时响应速度快且跟踪误差不超过 1%;说明系统稳定性和抗干扰能力较强,控制准确性较好。因此,自适应协同控制能有效保证混合储能系统的稳定性和功率分配的准确性。

参考文献:

- [1] IBRAHIM M, JEMEI S, WIMMER G, et al. Nonlinear autoregressive neural network in an energy management strategy for battery/ultra-capacitor hybrid electrical vehicles [J]. *Electric Power Systems Research*, 2016, 136: 262-269.
- [2] HANNAN M A, AZIDIN F A, MOHAMED A. Hybrid electric vehicles and their challenges: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 29: 135-150.
- [3] 续丹,周欢,王斌,等. 一种简化级联电动汽车复合电源及其控制方法 [J]. *汽车工程*, 2017(12): 1368-1374.
XU Dan, ZHOU Huan, WANG Bin, et al. A simplified cascading hybrid power and its control scheme for electric vehicles [J]. *Automotive Engineering*, 2017(12): 1368-1374.
- [4] WANG Bin, XU Jun, XU Dan, et al. Implementation of an estimator-based adaptive sliding mode control strategy for a boost converter based battery/supercapacitor hybrid energy storage system in electric vehicles [J]. *Energy Conversion & Management*, 2017, 151: 562-572.
- [5] SONG Z, HOFMANN H, LI J, et al. A comparison study of different semi-active hybrid energy storage system topologies for electric vehicles [J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 274: 400-411.
- [6] SHEN J, KHALIGH A. A supervisory energy management control strategy in a battery/ultracapacitor hybrid energy storage system [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2015, 1(3): 223-231.
- [7] TIE S F, TN C W. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2013, 20(4): 82-102.
- [8] CAO J, EMADI A. A new battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 27(1): 122-132.
- [9] SONG Z, LI J, HAN X, et al. Multi-objective optimization of a semi-active battery/supercapacitor energy storage system for electric vehicles [J]. *Applied Energy*, 2014, 135: 212-224.
- [10] KOLLIMALLA S K, MISHRA M K, NARASAMMA N L. Design and analysis of novel control strategy for battery and supercapacitor storage system [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2014, 5(4): 1137-1144.
- [11] WANG Bin, MA Guangliang, XU Dan, et al. Switching sliding-mode control strategy based on multi-type restrictive condition for voltage control of buck converter in auxiliary energy source [J]. *Applied Energy*, 2018, 228: 1373-1384.
- [12] SANTI E, MONTI A, LI D, et al. Synergetic control for DC-DC boost converter: implementation options [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, 39(6): 1803-1813.
- [13] ZERROUG N, HARMAS M N, BENAGGOUNE S, et al. DSP-based implementation of fast terminal synergetic control for a DC-DC Buck converter [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2018, 355(5): 2329-2343.
- [14] SANTI E, MONTI A, LI D, et al. Synergetic control for power electronics applications: a comparison with the sliding mode approach [J]. *Journal of Circuits Systems & Computers*, 2004, 13(4): 737-760.
- [15] 聂勇文. 基于协同控制理论的水轮发电机组调速系统控制研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016: 22-29.
- [16] NECHADI E, HARMAS M N, ESSOUNBOULI N, et al. Optimal synergetic control based bat algorithm for DC-DC boost converter [J]. *IFAC: PapersOnline*, 2016, 49(12): 698-703.
- [17] 王前,李韬. 基于变结构的协同控制方法及其在 DC/DC 开关变换器中应用 [J]. *电力自动化设备*, 2010, 30(4): 31-35.
WANG Qian, LI Tao. Synergetic control based on variable structure and its application in DC/DC converter [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2010, 30(4): 31-35.

(下转第 57 页)