

DOI: 10.7652/xjtuxb201610006

升压型电池-超级电容复合电源的自适应滑模控制

王斌, 徐俊, 曹秉刚, 续丹, 严珍
(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对升压型电池-超级电容复合电源的输出端超级电容电压不稳定、输入端电池电流波动大等问题,提出了一种自适应滑模控制策略。结合升压变换器的平均状态模型和超级电容特性建立了升压型电池-超级电容复合电源的动态模型。在此基础上,设计自适应观测函数并根据李亚普诺夫函数确定自适应规则。选取合适的滑模面,基于滑模面和自适应规则设计占空比函数。考虑复合电源的工作需求,分别针对恒流和恒压控制设计比例因子。搭建实验台进行测试,实验结果表明:与 PI 控制策略相比,升压型电池-超级电容复合电源采用自适应滑模控制,能使系统快速达到稳定状态,在恒压控制和恒流控制条件下,系统的调节速度分别提高了 88.8%与 62.5%;在超级电容电压较低时,采用自适应滑模控制能有效抑制输出电压和电感电流波动,提升系统的安全性和可靠性。

关键词: 升压变换器;复合电源;自适应滑模控制;超级电容

中图分类号: TM46;TP13 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)10-0036-06

An Adaptive Sliding-Mode Control Strategy for Hybrid Power Sources of Battery-Supercapacitor with a Boost Converter

WANG Bin, XU Jun, CAO Binggang, XU Dan, YAN Zhen
(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: For the battery-supercapacitor (SC) hybrid power source (HPS) with a boost converter, the supercapacitor voltage (i. e. output voltage) might be unstable and the battery current (i. e. input current) fluctuation might be very high. To solve these problems, an adaptive sliding-mode control strategy is proposed. A dynamic model of the battery-SC HPS with the boost converter is established by combining the conventional averaged model of the boost converter and the characteristics of the SC. It is based on the model that an adaptive estimator is designed to estimate the related parameters, and adaptive rules are defined according Lyapunov function. Furthermore, a suitable sliding surface is selected and a duty ratio function is designed according to the selected sliding surface and the adaptive rules. Observe gains are also designed in accordance with the constant current/voltage control requirement in the HPS. An experimental platform is established. Experimental results show that the proposed strategy makes the system reach steady state quickly. A comparison with the PI control strategy in the conditions of both constant current control and constant voltage control shows that the strategy improves the transient time by 88.8% and 62.5%, respectively. It effectively eliminates the fluctuation of the

output voltage and inductor current, and improves the safety and reliability of system when the SC voltage is lower.

Keywords: boost converter; hybrid power source; adaptive sliding-mode control; supercapacitor

升压型电池-超级电容复合电源采用超级电容直接并联负载、超级电容作低通滤波器使用可避免电池组直接受充放电冲击,能有效延长电池组的使用寿命^[1-3]。该类型复合电源已被广泛应用于电动汽车、混合动力汽车、能量回收系统等^[4-7]。然而,超级电容直接并联负载时输出电压随超级电容电压变化^[8-9]。升压型电池-超级电容复合电源的超级电容内阻小,如果在超级电容电压较低时控制不当,将造成很大的电压波动,进而导致电池输出电流发生较大波动,不利于电池安全^[10-11]。

升压型电池-超级电容复合电源的功率分配主要通过控制升压变换器实现^[4,12]。传统的升压变换器控制方法可为该类复合电源控制提供参考。目前许多方法被应用于升压电路控制,例如 PI 控制、自适应控制、模糊控制、神经网络控制等^[13-16]。但是多数文献没有考虑超级电容作为非线性负载带来的电压和电流波动,严重时还会导致 MOS 管炸裂、升压变换器损坏^[17]。滑模控制是一种非常有效的非线性控制方法,通过到达滑模面或保持滑模移动,系统将快速趋于稳定^[13,17]。滑模控制已被成功应用于升压变换器、降压变换器控制,并能很好地消除各类直流变换器的电压和电流波动^[17-19]。

为实现升压型电池-超级电容复合电源的精确控制,可采用等效电路或数学模型描述超级电容,辨识超级电容等效电阻对建模至关重要^[3,20]。同时,升压变换器控制还需结合电池自身内阻估计输入电压^[14]。此外,复合电源在超级电容电压较低时,采用恒流控制保证系统稳定;在超级电容电压达到目标值时,则采用恒压控制^[8-9]。在恒压与恒流控制切换时,需根据系统控制要求调整控制参数。

为提高升压型电池-超级电容复合电源的稳定性和提高系统的响应速度,本文设计了一种自适应滑模控制策略。首先,设计自适应观测函数并采用李亚普诺夫函数确定自适应规则;然后,基于滑模面和自适应规则设计相应的占空比函数,分析被控量和估计量的收敛性;最后,分别针对恒压和恒流控制设计控制参数进行切换控制,保证复合电源在不同控制条件下均能稳定运行。

1 模型建立

升压型电池-超级电容复合电源如图 1 所示。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,理想平均状态模型可由下式表达^[14]

$$\dot{x}_1 = -(1-d)x_2/L + V_{in}/L \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = (1-d)x_1/C - x_2/RC \quad (2)$$

式中: x_1 是电感电流; x_2 是输出电压; L 、 R 、 C 分别为电感、负载电阻和输出端电容; d 是占空比。

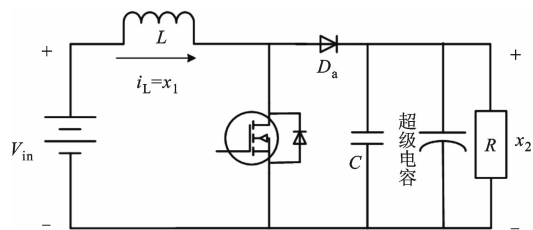


图 1 升压型电池-超级电容复合电源

为精确控制,电池内阻和超级电容等效电阻不可忽视。将超级电容等效为电流源与电容并联,图 1 可等效为图 2,其中 C_{SC} 为超级电容等效电容,则

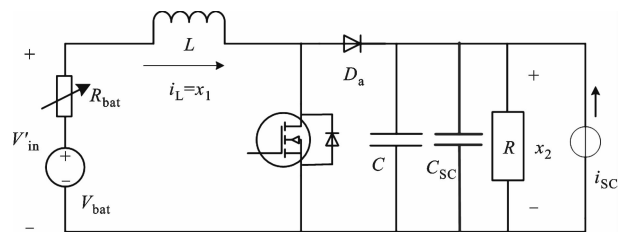


图 2 含可变内阻的等效电路

式(1)、(2)可修改为

$$\dot{x}_1 = -(1-d)x_2/L + (V_{bat} - R_{bat} \Delta I_{bat})/L \quad (3)$$

$$\dot{x}_2 = [(1-d)x_1 - x_2/R + i_{SC}]/(C + C_{SC}) \quad (4)$$

式中: ΔI_{bat} 是电池组电流变化量。令 $i_{SC} = V_0/R_{SC}$ (其中 $V_0 = x_2$ 是输出电压, R_{SC} 是超级电容等效电阻), $R_{eq} = RR_{SC}/(R + R_{SC})$, $V'_{in} = V_{bat} - R_{bat} I_{bat}$, 有

$$\dot{x}_1 = -(1-d)x_2/L + V'_{in}/L \quad (5)$$

$$\dot{x}_2 = [(1-d)x_1 - x_2/R_{eq}]/(C + C_{SC}) \quad (6)$$

式(5)、式(6)可用图 3 等效电路表示。超级电容被等效为电阻负载与电容并联在输出端,电池被等效为电压源与可变电阻串联,最后可用波动的电压 V'_{in} 表示。

升压型电池-超级电容复合电源的等效电路控

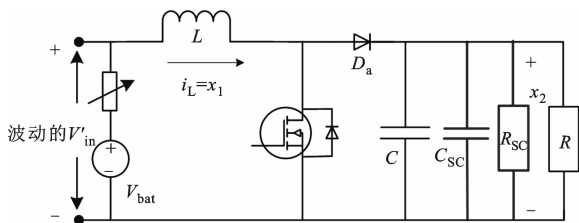


图3 升压型电池-超级电容复合电源等效电路

制类似升压变换器控制,但是需考虑超级电容等效电阻、电池内阻变化引起的输出电压波动和电流波动。由于电池和超级电容的内阻是动态变化的,下面将设计自适应滑模控制策略,克服参数变化引起的电压和电流波动。

2 自适应滑模控制策略

2.1 自适应控制

电感电流和输出电压波动主要由电池内阻和负载电阻变化引起。电池内阻与 V'_in 直接相关,因此采用 $\hat{V}'_{in}$ 和 $\hat{R}_{eq}$ 作为估计量。建立观测函数

$$\dot{\hat{x}}_1 = -(1-d)\hat{x}_2/L + \hat{V}'_{in}/L + \alpha_1(x_1 - \hat{x}_1) \quad (7)$$

$$\dot{\hat{x}}_2 = [(1-d)\hat{x}_1 - x_2/\hat{R}_{eq}]/(C+C_{SC}) + \alpha_2(x_2 - \hat{x}_2) \quad (8)$$

式中: $\hat{x}_1$ 和 $\hat{x}_2$ 分别为 x_1 和 x_2 估计值; α_1 和 α_2 是正比例因子,用于放大估计值与实际值的误差。

令 $\tilde{x}_1 = x_1 - \hat{x}_1$; $\tilde{x}_2 = x_2 - \hat{x}_2$; $\tilde{G}_{eq} = G_{eq} - \hat{G}_{eq}$, 其中 G_{eq} 为等效电导; $R_{eq} = 1/G_{eq}$; $\tilde{V}'_{in} = V'_in - \hat{V}'_{in}$ 。根据式(5)~式(8),有

$$\dot{\tilde{x}}_1 = -(1-d)\tilde{x}_2/L + \tilde{V}'_{in}/L - \alpha_1\tilde{x}_1 \quad (9)$$

$$\dot{\tilde{x}}_2 = [(1-d)\tilde{x}_1 - \tilde{G}_{eq}x_2]/(C+C_{SC}) - \alpha_2\tilde{x}_2 \quad (10)$$

建立李亚普诺夫函数,其中 β_1 和 β_2 为正常数

$$V = 0.5[L\tilde{x}_1^2 + (C+C_{SC})\tilde{x}_2^2 + \tilde{G}_{eq}^2/\beta_1 + \tilde{V}'_{in}^2/\beta_2] \quad (11)$$

$$\dot{V} = -\alpha_1 L\tilde{x}_1^2 - \alpha_2(C+C_{SC})\tilde{x}_2^2 + \tilde{V}'_{in}[\tilde{x}_1 - \dot{\tilde{V}}'_{in}/\beta_2] - \tilde{G}_{eq}[x_2\tilde{x}_2 + \dot{\tilde{G}}_{eq}/\beta_1] \quad (12)$$

令 $\dot{\hat{R}}_{eq} = 1/\dot{\hat{G}}_{eq} = -1/(\beta_1 x_2 \tilde{x}_2)$, $\dot{\tilde{V}}'_{in} = \beta_2 \tilde{x}_1$, 有

$$\dot{V} = -\alpha_1 L\tilde{x}_1^2 - \alpha_2(C+C_{SC})\tilde{x}_2^2 \quad (13)$$

根据 Lasalle 不变原理,有

$$\tilde{x}_1 \rightarrow 0; \quad \tilde{x}_2 \rightarrow 0 \quad (14)$$

结合式(9), $\tilde{V}'_{in} \rightarrow 0$, $\dot{\tilde{V}}'_{in} \rightarrow V'_in$, 即 $\hat{V}'_{in}$ 渐近收敛于 $(V_{bat} - R_{bat} \Delta I_{bat})$ 。

2.2 滑模控制

选取式(15)作为滑模面,包含电感电流估计值

$\hat{x}_1$ 、自适应参数 $\hat{V}'_{in}$ 和 $\hat{R}_{eq}$, 其中 $\dot{\hat{R}}_{eq} = 1/\dot{\hat{G}}_{eq}$ 。

$$s(t) = \hat{x}_1 - V_{ref} \hat{G}_{eq} / \hat{V}'_{in} \quad (15)$$

式中: V_{ref} 是参考输出电压。

结合式(7)、式(15),滑模面导数必然包含 $\hat{x}_2$ 。

考虑到 $\dot{\hat{G}}_{eq} = -\beta_1 x_2 \tilde{x}_2$, $\dot{\tilde{V}}'_{in} = \beta_2 \tilde{x}_1$, 有

$$\dot{s}(t) = [(d-1)\hat{x}_2 + \hat{V}'_{in}]/L + V_{ref}^2 \beta_1 x_2 \tilde{x}_2 / \hat{V}'_{in} + \alpha_1 \tilde{x}_1 + V_{ref}^2 \hat{G}_{eq} \beta_2 \tilde{x}_1 / \hat{V}'_{in}^2 \quad (16)$$

为使系统处于滑模运动,可选择合适的初值

$$s(0) = [\hat{x}_1(0) - V_{ref}^2 / \hat{R}_{eq}(0) \hat{V}'_{in}(0)] = 0. \quad \text{令 } \dot{s}(t) = 0, \text{ 有}$$

$$d' = 1 - [\hat{V}'_{in} / \hat{x}_2 + \alpha_1 L \tilde{x}_1 / \hat{x}_2 + V_{ref}^2 L \beta_1 x_2 \tilde{x}_2 / \hat{V}'_{in} \hat{x}_2 + V_{ref}^2 L \hat{G}_{eq} \beta_2 \tilde{x}_1 / \hat{V}'_{in}^2 \hat{x}_2] \quad (17)$$

式中: d' 为自适应占空比。

在趋近滑模面运动时满足 $s(t)\dot{s}(t) < 0$ 。升压型电池-超级电容复合电源控制时,要求最高升压不超过3倍,根据输入输出电压关系 $V_{in} = V_o(1-d')$, 有 $0.34 \leq (1-d') < 1$, 相应占空比满足

$$0.34 \leq [\hat{V}'_{in} + \alpha_1 L \tilde{x}_1 + X] / \hat{x}_2 < 1 \quad (18)$$

式中: $X = V_{ref}^2 L(\beta_1 x_2 \tilde{x}_2 / \hat{V}'_{in} + \hat{G}_{eq} \beta_2 \tilde{x}_1 / \hat{V}'_{in}^2)$; $\tilde{x}_2 > 0$ 。

为证明 $\hat{x}_2$ 收敛,考虑下式

$$\begin{aligned} d\hat{x}_2^2/dt = & -2\hat{x}_2 \hat{G}_{eq} x_2 / (C+C_{SC}) + 2\alpha_2 \hat{x}_2 \tilde{x}_2 + \\ & 2\hat{G}_{eq} V_{ref}^2 [\hat{V}'_{in} + \alpha_1 L \tilde{x}_1 + X] / [(C+C_{SC}) \hat{V}'_{in}] \end{aligned} \quad (19)$$

根据式(14), $\tilde{x}_1 \rightarrow 0$, $\tilde{x}_2 \rightarrow 0$, $X \rightarrow 0$, 有

$$d\hat{x}_2^2/dt = 2\hat{G}_{eq} [V_{ref}^2 - \hat{x}_2^2] / (C+C_{SC}) \quad (20)$$

当 $\hat{x}_2 \rightarrow V_{ref}$ 时,式(20)趋于渐进稳定,即 $\hat{x}_2$ 渐近收敛于 V_{ref} 。因为 $\tilde{x}_2 = (x_2 - \hat{x}_2) \rightarrow 0$, 当 $x_2 \rightarrow V_{ref}$, 式(20)同样趋于渐进稳定,即 x_2 渐近收敛于 V_{ref} 。

结合式(10), $\tilde{G}_{eq} \rightarrow 0$, 有 $\hat{R}_{eq} \rightarrow RR_{SC}/(R+R_{SC})$ 。令 $I_{ref} = V_{ref}^2 / [V'_{in} RR_{SC}/(R+R_{SC})]$, 则 $x_1 \rightarrow I_{ref}$ 。

通过自适应滑模控制,满足 $(x_1, x_2, \hat{R}_{eq}, \hat{V}'_{in})$ 渐近收敛于 $(I_{ref}, V_{ref}, RR_{SC}/(R+R_{SC}), (V_{bat} - R_{bat} \Delta I_{bat}))$, 即系统最后能克服等效电阻、负载变化带来的电压与电流波动。

在实际应用时,参考式(7)、式(8), $\alpha_1(x_1 - \hat{x}_1)$ 和 $\alpha_2(x_2 - \hat{x}_2)$ 分别放大电感电流误差和输出电压误差。复合电源在超级电容电压小于目标值时,实行恒流控制,此时电流反馈控制起主要作用,设计

$$\alpha_1 = 7G_{eq}/C; \quad \alpha_2 = 2G_{eq}/C \quad (21)$$

在超级电容电压大于目标值时,切换为恒压控制,此时电压反馈控制起主要作用,设计

$$\alpha_1 = 3.5G_{eq}/C; \quad \alpha_2 = 4G_{eq}/C \quad (22)$$

恒流控制与恒压控制相互切换过程中,为避免参数突变发生波动,编程时对控制系数 α_1 和 α_2 逐步增加或减少。

3 实验结果及分析

为证明所设计的自适应滑模控制策略的有效性,搭建实验台进行验证,分别采用 PI 控制和自适应滑模控制进行比较。由于升压变换器控制本质上是对占空比控制,增加微分环节会提高电流控制的响应速度,但微分环节易导致电压波动,且微分环节系数难以确定。因此,本文选用经典 PI 控制算法进行对比。

实验中具体的复合电源参数:电池组为 25 V/55 A·h,内阻在 0.05~0.12 Ω 之间;超级电容模块为 50 V/15.6 F,最高电压可达到 60 V;电感最大承受电流为 20 A。采用 4 个输出电阻 $R_1\sim R_4$ 并联(40,10,10 和 6 Ω),通过开关控制模拟负载突变。PWM 波频率为 25 kHz,初值条件为 $\hat{V}_{in}(0)=25$ V。其他参数: $C=100\ \mu\text{F}$, $L=260\ \mu\text{H}$, $\beta_1=2$, $\beta_2=120$,升压型电池-超级电容复合电源实验原理图如图 4 所示。

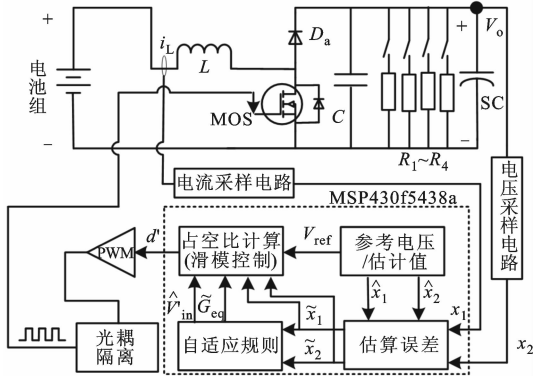


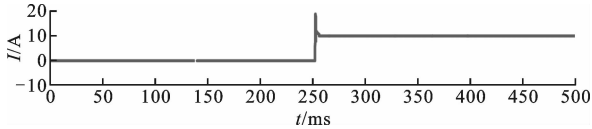
图 4 升压型电池-超级电容复合电源实验原理图

采用 PI 控制的表达式为^[15]

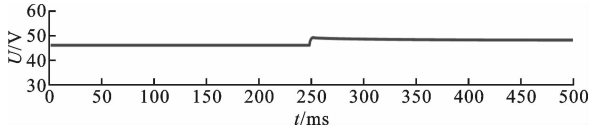
$$\Delta d(t) = K_p \bar{x}_1 + K_i \int_0^t \bar{x}_1 dt \quad (23)$$

式中: $K_p=0.6$; $K_i=360$; $\bar{x}_1=I_{\text{ref}}-x_1$, 恒流控制时 $I_{\text{ref}}=10\text{ A}$, 恒压控制时 $I_{\text{ref}}=V_{\text{ref}}^2/V_{\text{in}}R_{\text{eq}}$ 。

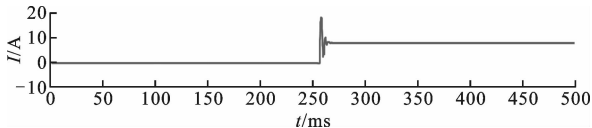
图 5a~图 5d 为升压变换器恒流控制对比结果。此时超级电容已充电至 46 V,负载侧接入 2 个



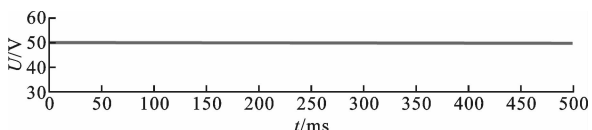
(b) 自适应滑模控制时启动至恒流的电流响应特性



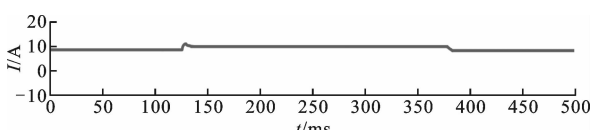
(c) PI 控制时启动至恒流的电压响应特性



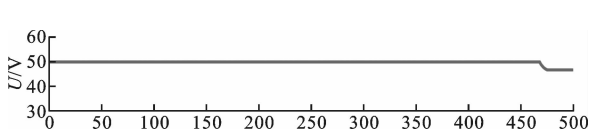
(d) PI 控制时启动至恒流的电流响应特性



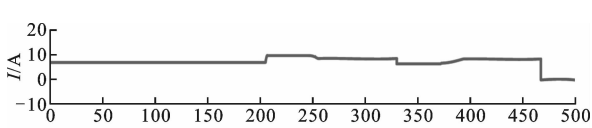
(e) 自适应滑模恒压控制时的电压响应特性



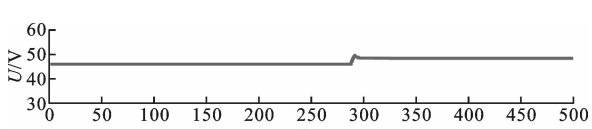
(f) 自适应滑模恒压控制时的电流响应特性



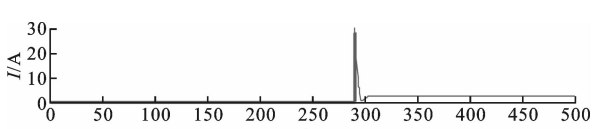
(g) PI 恒压控制时电压响应特性



(h) PI 恒压控制时电流响应特性



(i) PID 控制时电压响应特性



(j) PID 控制时电流响应特性

图 5 自适应滑模控制和 PI 控制结果对比

10 Ω 和 1 个 40 Ω 电阻。可以看出:采用自适应滑模控制和 PI 控制在启动时均有浪涌电流,这是由 MOS 管和电路电容引起的。启动后,系统采用自适应滑模控制将迅速趋于稳定,而 PI 控制经过一段振荡后趋于稳定,最后电流稳定在 10 A。

图 5e~图 5h 为恒压控制对比结果,此时输出电压已达到目标电压 50 V。在恒压条件下,负载侧最初并联 40 Ω 和 6 Ω 电阻,之后接入一个 10 Ω 电阻,电流将增大,然后卸载,电流相应减小。在恒压控制条件下加载和卸载时,采用自适应滑模控制能使电流快速收敛于参考值。采用 PI 控制时电流波动较大,由于 PI 控制仅仅是简单地针对误差和累积误差控制,实际值很快超过了参考值,为避免误差过大造成系统失控,可采用滞环控制抑制波动,系统输出被限定在允许的最大波动范围内,但延长了系统的调节时间^[21]。采用 PID 控制在特定的条件下可提高调节速度,但是超级电容电压低于目标值时,输出电流将会出现剧烈的波动或较大误差,如图 5i~图 5j 所示。

此外,设计多组 PI 控制参数,通过恒压和恒流切换控制能实现较好的控制效果,但是需结合系统的全局稳定性设计控制参数,增加了控制器设计的复杂性。在超级电容电压低于目标值时,相应的 PI 参数不易确定,电压波动较大,需设计边界条件限制相应的波动。

由于实验升压变换器采用电流型 MOS 管,其耐压特性限制了恒压条件下的调整效果,特别是 PI 控制的效果。如果需提升 PI 控制在恒压条件下的调整速度,则可采用电压型 MOS 管。为说明自适应滑模控制能满足升压型电池-超级电容复合电源的控制需求,对其占空比进行检测,如图 6 所示。在恒压控制条件下,占空比每两个周期(100 μ s)调整一次,而传统的复合电源控制要求为毫秒级别,这完全可以满足控制需求。

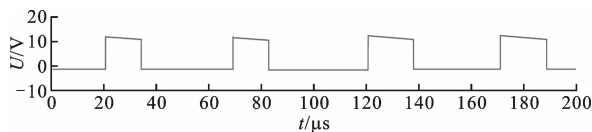


图 6 自适应滑模恒压控制时的占空比自适应调节

最后,对自适应滑模控制和 PI 控制结果进行计算。自适应滑模控制在恒压条件下适应负载变化的调节时间仅为 20 ms,而采用 PI 控制的调节时间为 180 ms。恒流条件下,采用自适应滑模控制的调节时间仅需 3 ms,而 PI 控制的调节时间为 8 ms。与

PI 控制策略相比,在恒压和恒流控制时采用自适应滑模控制的调节速度分别提高了 88.8% 和 62.5%。

4 结 论

升压型电池-超级电容复合电源采用超级电容直接并联负载,在负载波动或超级电容电压较低时输出端电压不稳定,导致输入端的电池电流发生较大波动,不利于电池安全。为提高系统的稳定性,实现恒压控制和恒流控制,提出了一种自适应滑模控制策略。在传统升压变换器平均状态模型的基础上,将超级电容等效为电阻和电容并联建立升压型电池-超级电容复合电源的动态模型。设计了自适应观测函数,并采用李亚普诺夫函数确定自适应规则。在此基础上,选取相应的滑模面,依据滑模面 and 自适应规则设计占空比函数,分别针对恒流控制和恒压控制设计比例因子。实验结果表明:升压型电池-超级电容复合电源采用自适应滑模控制策略能使系统快速达到稳定状态;与 PI 控制策略相比,在恒压控制和恒流控制条件下采用自适应滑模控制的调节速度分别提高了 88.8% 和 62.5%。采用自适应滑模控制能有效抑制输出电压和电感电流波动,提升系统的安全性和可靠性。

参考文献:

- [1] SONG Ziyou, HOFMANN H, LI Jianqiu, 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.
- [2] 王斌, 徐俊, 曹秉刚, 等. 一种新型电动汽车复合电源结构及其功率分配策略 [J]. 汽车工程, 2015, 37(9): 1053-1058.
WANG Bin, XU Jun, CAO Binggang, et al. A novel hybrid power configuration and its power distribution strategy for electric vehicles [J]. Automotive Engineering, 2015, 37(9): 1053-1058.
- [3] WANG Bin, XU Jun, CAO Binggang, et al. Compound-type hybrid energy storage system and its mode control strategy for electric vehicles [J]. Journal of Power Electronics, 2015, 15(3): 849-859.
- [4] TIE S F, TAN C W. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 20: 82-102.
- [5] KUPERMAN A, AHARON I, MALKI S, et al. Design of a semiactive battery-ultracapacitor hybrid energy source [J]. IEEE Transactions on Power Electron-

- ics, 2013, 28(2): 806-815.
- [6] CAO Jian, 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, 2012, 27(1): 122-132.
- [7] ZOU Zhongyue, CAO Junyi, CAO Binggang, et al. Evaluation strategy of regenerative braking energy for supercapacitor vehicle [J]. ISA Transactions, 2014, 55: 234-240.
- [8] WANG Bin, XU Jun, CAO Binggang, et al. A novel multimode hybrid energy storage system and its energy management strategy for electric vehicles [J]. Journal of Power Sources, 2015, 281: 432-443.
- [9] 王斌, 徐俊, 曹秉刚, 等. 电动汽车的多模式复合电源能量管理自适应优化 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(12): 130-136.
- WANG Bin, XU Jun, CAO Binggang, et al. Adaptive optimization of energy management strategy for a multi-mode hybrid energy storage system in electric vehicles [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(12): 130-136.
- [10] WANG Bin, XU Jun, CAO Binggang. Design of a novel hybrid power for EV [C]//Proceedings of the 2014 IEEE Conference and Expo in Transportation Electrification. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 1-5.
- [11] 王斌, 徐俊, 曹秉刚, 等. 采用模拟退火算法的电动汽车复合电源能量管理系统优化 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(8): 90-96.
- WANG Bin, XU Jun, CAO Binggang, et al. Optimization of energy management system with simulated annealing approach for hybrid power source in electric vehicles [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(8): 90-96.
- [12] KHALIGH A, LI Zhihao. Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles; state of the art [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(6): 2806-2814.
- [13] WAI R J, LIN Y F, LIU Y K. Design of adaptive fuzzy-neural-network control for single-stage boost inverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 7282-7297.
- [14] WAI R J, SHIH L C. Adaptive fuzzy-neural-network design for voltage tracking control of a DC-DC boost converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(4): 2104-2115.
- [15] WAI R J, SHIH L C. Design of voltage tracking control for DC-DC boost converter via total sliding-mode technique [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(6): 2502-2511.
- [16] OUHERIAH S, GUO Liping. PWM-based adaptive sliding-mode control for boost DC-DC converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 3291-3294.
- [17] WAI R J, CHEN M W, LIU Y K. Design of adaptive control and fuzzy neural network control for single-stage boost inverter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(9): 5434-5445.
- [18] BLANES J M, GUTIERREZ R, GARRIGOS A, et al. Electric vehicle battery life extension using ultracapacitors and an FPGA controlled interleaved buck-boost converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(12): 5940-5948.
- [19] LEYVA-RAMOS J, ORTIZ-LOPEZ M, DIAZ-SALDIERNA L, et al. Average current controlled switching regulators with cascade boost converters [J]. IET Power Electronics, 2011, 4(1): 1-10.
- [20] 赵洋, 韦莉, 张逸成, 等. 基于粒子群优化的超级电容器模型结构与参数辨识 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(15): 155-161.
- ZHAO Yang, WEI Li, ZHANG Yicheng, et al. Structure and parameter identification of supercapacitors based on particle swarm optimization [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2012, 32(15): 155-161.
- [21] TAN S C, LAI Y, TSE C K, et al. Adaptive feedforward and feedback control schemes for sliding mode controlled power converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(1): 182-192.

(编辑 武红江)