

DOI: 10.7652/xjtuxb201810014

用于辅助电源 Buck 变换器的切换滑模控制策略

马光亮, 续丹, 王斌, 张乐, 周佳辉
(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对电动汽车辅助电源系统采用滑模控制方法,存在策略实现复杂度高、系统输出不稳定的问题,提出了一种用于辅助电源 Buck 变换器的切换滑模控制策略。将辅助电源系统输出电压与目标电压进行对比输出电压误差,然后在限制条件下对电压误差进行调节,有效避免了电压误差变化率的负向输出,从而实现了 MOSFET 开关的高效控制。搭建仿真模型与实验平台,完成了对切换滑模控制策略有效性的验证,结果表明:所提的辅助电源 Buck 变换器的切换滑模控制策略在降低复杂度的基础上,能有效地消除奇异问题,保证系统的动态响应速度和稳定性;与传统的滑模控制策略相比,辅助电源采用切换滑模控制策略,系统启动响应调节时间缩短了 25%,系统抗干扰能力和鲁棒性均得到了提高。

关键词: 辅助电源;Buck 变换器;切换滑模控制;限制条件

中图分类号: TM46;TP13 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)10-0102-08

A Control Strategy of Switching Sliding Mode for Auxiliary Energy Source Buck Converter

MA Guangliang, XU Dan, WANG Bin, ZHANG Le, ZHOU Jiahui
(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A switching sliding mode control (SSMC) strategy for auxiliary energy source Buck converter is proposed to solve the problems that the implementation of the sliding mode control (SMC) strategy for auxiliary energy source system in electric vehicle is too complicated, and the output voltage of the system might be unstable. The output voltage and target voltage of the auxiliary energy source are compared to output a voltage error. Then, the voltage error is regulated under some restrictive conditions, so that negative output of the change rate of the voltage error is effectively avoided, and the efficient control of MOSFET switch is realized. A simulation model and an experimental platform are established to verify the effectiveness of the proposed SSMC strategy. Results show that the proposed SSMC strategy for auxiliary energy source Buck converter effectively eliminates the singularity problem and reduces the implementation complexity. Moreover, the dynamic response speed and stability of the auxiliary energy source system with Buck converter are guaranteed. A comparison with the SMC strategy shows that the proposed SSMC strategy has 25% improvement in the settling-time of start-up response for the auxiliary energy source system with Buck converter. The anti-interference ability and robustness of the system are improved.

Keywords: auxiliary energy source; Buck converter; switching sliding mode control; restrictive conditions

随着能源危机、环境污染和气候变暖等问题日益加剧,新能源的开发与利用越来越受到研究者的关注,电动汽车、燃料电池、太阳能、风能等新能源产业应运而生^[1-3]。然而,由于电动汽车储能系统、燃料电池、太阳能电池等供能系统的输出电压会大范围波动,因此无法直接为负载供能^[4]。另外,对于电动汽车,其供能系统通常被设计为高电压输出^[5-6]。供能系统的高电压输出和大电压波动特性,使其只能借助降压型辅助电源向低压电器设备供能。因此,作为非线性时变系统的降压(Buck)变换器,成为保证辅助电源低压稳定输出的关键部件^[7-8]。然而,在 Buck 变换器的实际应用中,由于负载突变、输入电压波动等原因,其开关控制策略常常存在控制效果差、策略实现复杂度高问题^[9-10]。为提高辅助电源系统的鲁棒性和抗干扰性,设计有效的控制策略就显得尤为重要。

滑模控制因具有高稳定性、强鲁棒性、快动态响应等优点而被广泛应用于非线性时变系统、不确定系统和切换系统中^[11-13]。基于滑模控制理论,多种滑模控制策略相继被提出,如积分滑模控制^[14]、自适应滑模控制^[12,15]等。为改善线性滑模控制策略的渐进收敛性,非线性滑模控制策略得到了深入研究。在非线性滑模控制策略中,终端滑模控制策略因其能保证系统状态在有限时间内收敛至平衡点而成为经典^[16]。然而,Buck 变换器采用终端滑模控制,涉及的负分数指数将导致奇异问题,最终影响系统稳定性^[13,17]。文献[17]中 Buck 变换器的非奇异终端滑模控制策略虽有效克服了奇异问题,但该策略与终端滑模控制策略一样涉及指数运算,且无法避免正负双向输出,使得该滑模控制策略在实际工程中的实现难度陡增。

为了克服上述滑模控制存在的实现复杂度高及奇异点导致的不稳定问题,本文设计了一种新的用于辅助电源 Buck 变换器的切换滑模控制策略。首先,分析了终端滑模控制和非奇异终端滑模控制两种非线性控制策略;基于非奇异终端滑模控制策略设计了新的切换滑模面函数并对其进行分析;进一步,基于 MOSFET 开关的导通与关断状态,建立了 Buck 变换器的状态空间模型;为保证切换滑模控制系统稳定性,基于上述状态模型,并结合 Lyapunov 稳定性准则,确定了控制策略的限制条件;最后,通

过仿真和实验,验证了所设计的用于辅助电源 Buck 变换器的切换滑模控制策略对提高系统动态响应速度、鲁棒性及稳定性的效果。

1 两种非线性滑模控制策略分析

为更好地进行切换滑模控制策略设计,首先对终端滑模和非奇异终端滑模两种非线性滑模控制策略进行分析。

单输入单输出的二阶非线性系统微分方程可表述如下

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= A(\mathbf{X}) + B(\mathbf{X})u + C(\mathbf{X}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X}=[x_1, x_2]^T$ 是系统状态向量; $A(\mathbf{X})$ 和 $B(\mathbf{X})$ 是已知函数,且 $|B(\mathbf{X})| \neq 0$; $C(\mathbf{X})$ 为不定量, $|C(\mathbf{X})| < L_C$; u 为控制输入变量。

1.1 终端滑模控制策略

非线性终端滑模面函数表示如下^[9]

$$S_T = \frac{1}{\beta} x_1^{q/p} + x_2 \quad (2)$$

式中: β 为调节滑模面函数斜率的参数, $\beta > 0$; p 和 q 为正奇数, $p > q$ 。

结合式(1)和式(2),终端滑模控制策略的控制量可被设计为

$$u_T = -B^{-1}(\mathbf{X})[A(\mathbf{X}) + \frac{q}{p\beta} x_1^{(q/p)-1} x_2 + (L_C + \delta) \operatorname{sgn} S_T] \quad (3)$$

式中: $\delta > 0$ 为控制增益; $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为符号函数。式(3)表示的控制量可确保式(1)所描述的系统满足滑模存在性条件

$$S_T \dot{S}_T = S_T \left[\frac{q}{p\beta} x_1^{(q/p)-1} x_2 + \dot{x}_2 \right] =$$

$$S_T [C(\mathbf{X}) - (L_C + \delta) \operatorname{sgn} S_T] < -\delta |S_T| \quad (4)$$

在式(3)中,当 $x_1 = 0$ 且 $x_2 \neq 0$ 时, $x_1^{(q/p)-1} x_2$ 中的负分数指数 $(q/p)-1$ 将导致奇异问题,使控制量变得不可控,最终影响滑模控制系统的稳定性。

1.2 非奇异终端滑模控制策略

为消除 1.1 节中所描述的终端滑模控制策略的奇异问题,有学者提出了非奇异终端滑模控制策略,其非线性滑模面函数表示如下^[18]

$$S_N = x_1 + (\beta x_2)^{p/q} \quad (5)$$

结合式(1)和式(5),非奇异终端滑模控制策略的控制量可被设计为

$$u_N = -B^{-1}(\mathbf{X})[A(\mathbf{X}) + \frac{q}{p}\beta^{-p/q}x_2^{2-(p/q)} + (L_C + \delta)\operatorname{sgn}S_N] \quad (6)$$

同样地,式(6)表示的控制量可以确保式(1)所描述的系统满足滑模存在性条件

$$S_N \dot{S}_N = S_N[x_2 + (p/q)\beta^{p/q}x_2^{(p/q)-1}\dot{x}_2] = \frac{p}{q}\beta^{p/q}x_2^{(p/q)-1}S_N[C(\mathbf{X}) - (L_C + \delta)\operatorname{sgn}S_N] < -\delta\zeta |S_N| \quad (7)$$

式中: $\zeta = \frac{p}{q}\beta^{p/q}x_2^{(p/q)-1} \geq 0$ 。

在式(6)中,令 $2 - \frac{p}{q} > 0$,则 $q < p < 2q$,终端滑模控制策略存在的奇异问题可被消除。由式(2)和式(5)可知,终端滑模面函数和非奇异终端滑模面函数均涉及指数运算,另外滑模面函数中变量 x_1 、 x_2 均可取正值或负值,存在符号不定性问题^[17],这都将大幅增加滑模控制策略的实现复杂度。在实际工程中,指数项 x^y 的底数 x 若仅涉及单向取值,则可降低指数运算的实现复杂度。因此,需要在避免奇异问题的基础上设计新的控制策略,从而有效解决上述问题。

2 切换滑模控制策略设计

为克服终端滑模控制策略和非奇异终端滑模控制策略存在的不足,指数项 x^y 的底数 x 应避免双向取值。基于上述原则,结合非奇异终端滑模面函数,设计了一种新的切换滑模面函数如下

$$S_s = \begin{cases} S_{s1} = x_1 + (\beta x_2)^{p/q}, & x_2 \geq \theta \\ S_{s2} = x_1, & x_2 < \theta \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\theta \geq 0$;参数 β 、 p 和 q 与式(2)中定义一致。

由式(8)可知, $S_{s1} = S_N$,因此,令 $q < p < 2q$ 即可有效避免终端滑模控制策略存在的奇异问题。另一方面, $S_{s2} = x_1$ 未涉及分数幂,从根本上杜绝了奇异问题的产生。综合来看,所设计的切换滑模面能有效解决奇异问题。另外,虽然 S_{s1} 涉及指数运算,但 $x_2 \geq \theta \geq 0$ 可保证 x_2 始终取非负值,指数运算实现复杂度得以降低。

为保证式(1)所描述系统的渐进稳定性,滑模存在性条件需要被满足。即

$$S_s \dot{S}_s < 0 \quad (9)$$

当 $x_2 \geq \theta (\theta \neq 0)$ 时, $S_s = S_{s1} = S_N$ 。结合1.2节,该子系统满足 $S_{s1} \dot{S}_{s1} < 0$,系统稳定性得到保证^[17]。

当 $x_2 < \theta$ 时, $S_s = S_{s2} = x_1$ 。分以下两种情况进行讨论。

(1)当 $0 < x_2 < \theta$ 时,由于 $(\beta x_2)^{p/q} > 0$,若 $x_1 + (\beta x_2)^{p/q} < 0$,则必有 $x_1 < 0$,那么存在性条件 $S_{s2} \dot{S}_{s2} = x_1 x_2 < 0$ 可被满足,则条件A为:当 $0 < x_2 < \theta$ 时, $x_1 + (\beta x_2)^{p/q} < 0$ 。

(2)当 $x_2 < 0$ 时,由于 $(\beta x_2)^{p/q} < 0$,则有 $x_1 > x_1 + (\beta x_2)^{p/q}$,若 $x_1 + (\beta x_2)^{p/q} > 0$,那么存在性条件 $S_{s2} \dot{S}_{s2} = x_1 x_2 < 0$ 可被满足,则条件B为:当 $x_2 < 0$ 时, $x_1 + (\beta x_2)^{p/q} > 0$ 。

取Lyapunov函数 $V_j = 0.5 S_{sj}^2 > 0$, ($j = 1, 2$),其导数为 $\dot{V}_j = S_{sj} \dot{S}_{sj} < 0$, ($S_{sj} \neq 0$);因此,切换滑模控制子系统稳定性在条件A和B下可得到保证。另外,当 $x_2 = 0$ 时, $\dot{V}_j = S_{sj} \dot{S}_{sj} = 0$, V_j 在切换面 $S_s = 0$ 附近是非增的,因此切换滑模控制系统渐进稳定^[12,19]。

将设计的切换滑模控制策略应用到实际的车载辅助电源上时,其参数 p 、 q 、 θ 需要针对系统要求进行合理设计。否则,本章中的条件A和B不能被满足,系统稳定性无法得到保证。

3 切换滑模控制策略应用

为进一步将所提出的切换滑模控制策略应用于电动汽车辅助电源系统,先对系统中的Buck变换器进行建模,然后合理地设计切换滑模控制策略所需的限制条件。

3.1 辅助电源中的Buck变换器建模

辅助电源中Buck变换器的电路如图1所示。 V_i 是Buck变换器的输入电压; S_w 表示MOSFET开关; D 、 L 和 C 分别表示二极管、电感和电容; R 是系统输出端等效负载; V_R 表示系统输出电压。

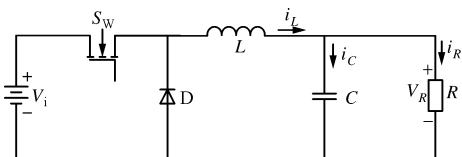


图1 辅助电源中Buck变换器的电路图

当 S_w 导通时

$$di_L/dt = (V_i - V_R)/L \quad (10)$$

$$dV_R/dt = (i_L - V_R/R)/C \quad (11)$$

当 S_w 关断时

$$di_L/dt = -V_R/L \quad (12)$$

$$dV_R/dt = (i_L - V_R/R)/C \quad (13)$$

结合式(10)~式(13),辅助电源中Buck变换器的状态空间模型表示如下

$$\dot{i}_L = (uV_i - V_R)/L \quad (14)$$

$$\dot{V}_R = (i_L - V_R/R)/C$$

(15)

式中: u 是控制因子,满足

$$u = \begin{cases} 1, & S_w \text{ 导通} \\ 0, & S_w \text{ 关断} \end{cases}$$

(16)

将输出电压误差定义为

$$x_1 = V_R - V_{\text{target}}$$

(17)

式中: V_{target} 表示 Buck 变换器输出电压目标值。

电压误差变化率为

$$x_2 = \dot{x}_1 = \dot{V}_R$$

(18)

根据式(14)~式(18),二阶非线性 Buck 变换器系统微分方程可表述如下

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{\dot{x}_1}{RC} + \frac{uV_i - V_{\text{target}} - x_1}{LC} \end{aligned} \right\}$$

(19)

3.2 限制条件设计

为确保切换滑模控制策略对辅助电源中 Buck 变换器系统的有效性,需要对切换滑模控制策略相关参数进行合理设计。限制条件设计如下。

限制条件 1 $q < p < 2q$,该条件保证切换滑模控制策略消除终端滑模控制策略存在的奇异问题。

在限制条件 1 的基础上,根据条件 A 和条件 B 设计其他限制条件保证辅助电源系统的稳定性。

取 $S = x_1 + (\beta x_2)^{p/q}$,令 Lyapunov 函数为 $V = 0.5S^2 > 0$,由 1.2 节可知 $S\dot{S} < 0 (S \neq 0)$ 。基于 Lyapunov 稳定性准则,结合式(19)可得

$$x_2 - \frac{p}{q}\beta^{p/q}x_2^{(p/q)-1}\left[\frac{x_2}{RC} - \frac{V_i - V_{\text{target}} - x_1}{LC}\right] > 0$$

$$S < 0, u = 1$$

(20)

$$x_2 - \frac{p}{q}\beta^{p/q}x_2^{(p/q)-1}\left[\frac{x_2}{RC} + \frac{V_{\text{target}} + x_1}{LC}\right] < 0$$

$$S > 0, u = 0$$

(21)

对于条件 A,将式(17)代入式(20)得

$$\dot{S} = x_2 - \frac{p}{q}\beta^{p/q}x_2^{(p/q)-1}\left[\frac{x_2}{RC} - \frac{V_i - V_R}{LC}\right]$$

(22)

限制条件 2 $\theta < R/L$ 。由于 $0 < x_2 < \theta, \theta < R/L$,则 $\frac{x_2}{RC} - \frac{(V_i - V_R)}{LC} < 0$,进一步, $\dot{S} > 0$ 。那么 $S = x_1 + (\beta x_2)^{p/q} < 0$,条件 A 满足。

对于条件 B,将式(15)(17)(18)代入式(21)得

$$\dot{S} = x_2 - \frac{p}{q}\beta^{p/q}x_2^{(p/q)-1}\frac{1}{C}\left[\frac{i_L}{RC} + \frac{V_R}{L} - \frac{V_R}{R^2C}\right]$$

(23)

限制条件 3 $L < R^2C$ 。由于 $x_2 < 0, L < R^2C$,则 $\frac{i_L}{RC}$

$+\frac{V_R}{L} - \frac{V_R}{R^2C} > 0$,进一步, $\dot{S} < 0$ 。那么 $S = x_1 + (\beta x_2)^{p/q} > 0$,条件 B 满足。

综上,用于辅助电源中 Buck 变换器的切换滑模控制策略的限制条件可设计为

$$\{q < p < 2q, \theta < R/L, L < R^2C\}$$

(24)

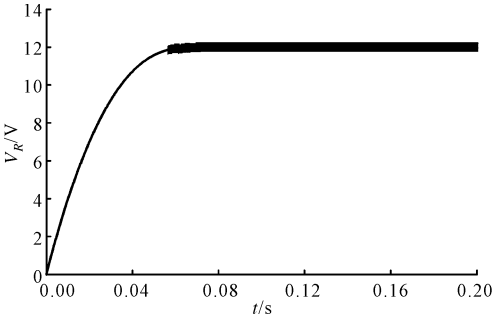
4 仿真与实验结果分析

为证明所设计切换滑模控制策略的有效性,首先在 Matlab/Simulink 中建立仿真模型。辅助电源中的 Buck 变换器各参数值见表 1。表 1 中,输入电压 $V_i = 48\text{ V}$ 代表电动汽车 48 V 系统输出电压,通过 Buck 变换器为 12 V 系统供电。电感 L 和电容 C 的取值通过仿真手段确定^[20]。切换滑模控制策略的重要参数设置为: $\beta = 0.01, p = 5, q = 3, \theta = 5$ 。

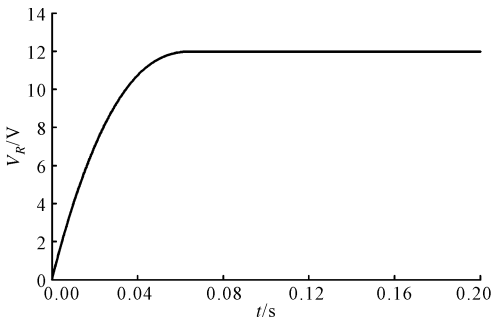
表 1 Buck 变换器参数值

参数	取值
输入电压 V_i/V	48
电感 $L/\mu\text{H}$	1 000
电容 $C/\mu\text{F}$	1 000
初始等效电阻 R_0/Ω	10
目标输出电压 $V_{\text{target}}/\text{V}$	12

辅助电源采用终端滑模和切换滑模控制策略的输出电压响应仿真结果如图 2 所示。由图 2a 可见:



(a)终端滑模控制输出电压响应

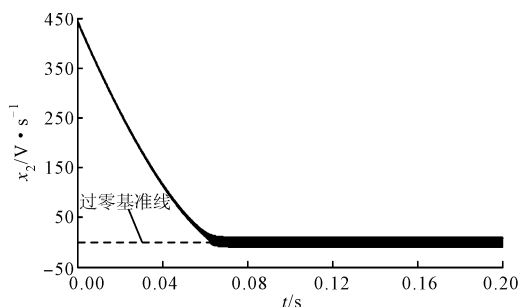


(b)切换滑模控制输出电压响应

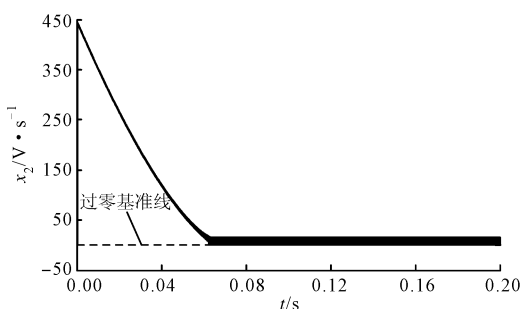
图 2 两种滑模控制策略输出电压响应仿真图

在上升区间,由于电压误差 x_1 恒不为 0,终端滑模控制策略不存在奇异问题,输出电压光滑上升;稳态输出时,电压误差 $x_1=0$ 可能导致终端滑模控制策略的控制量产生奇异点,使其稳态输出电压以约 500 kHz 的频率波动。相反,由图 2b 可见,采用切换滑模控制策略的辅助电源稳态输出电压更加光滑。通过仿真对比可知,切换滑模控制策略能有效解决终端滑模控制策略的奇异问题,系统稳定性得到了保证。

图 3 为非奇异终端滑模和切换滑模控制策略滑模面函数中的输出电压误差变化率 x_2 仿真结果。由图 3a 可见,非奇异终端滑模控制策略滑模面函数的 x_2 可取正值或负值。相反,由图 3b 可见,切换滑模控制策略滑模面函数的 x_2 恒为非负值,指数运算电路可得到简化,切换滑模控制策略实现复杂度大大降低。



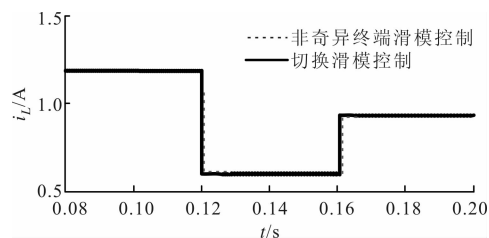
(a) 非奇异终端滑模控制策略



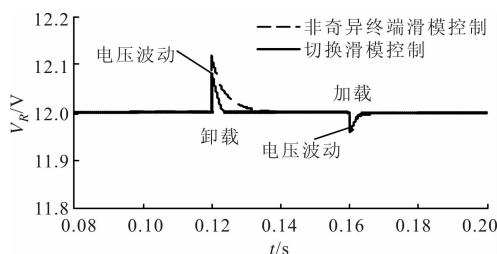
(b) 切换滑模控制策略

图 3 两种滑模控制策略滑模面函数的 x_2 仿真图

为更全面地分析与体现非奇异终端滑模和切换滑模控制策略对非线性辅助电源系统的控制性能与有效性,等效负载设置为非线性变化,将两种控制策略分别对辅助电源进行控制的电压和电流响应作对比。设定等效负载的变化情况为:初始等效负载为 10 Ω ;然后,卸载 20 Ω 以证明切换滑模控制策略在卸载情况下的电压鲁棒性;最后,加载 40 Ω 以证明切换滑模控制策略在加载情况下的电压鲁棒性。仿真对比结果如图 4 所示。



(a) 变负载下辅助电源电流响应



(b) 变负载下辅助电源电压响应

图 4 变负载下采用两种滑模控制策略的辅助电源电流和电压响应对比

由图 4 知,采用非奇异终端滑模和切换滑模控制的辅助电源在变负载下拥有几乎相同的电流响应。与非奇异终端滑模控制策略相比,在负载变化时,切换滑模控制策略同样无法避免电压波动,但其卸载情况下的电压波动更小,且电压调节响应速度更快。因此,辅助电源采用切换滑模控制策略时,系统具有更强的鲁棒性和抗干扰能力。

为在实际工程应用条件下验证切换滑模控制策略对辅助电源中 Buck 变换器系统的控制效果,搭建了辅助电源切换滑模控制实验台,如图 5 所示。图 5 中,指数运算电路原理图如图 6 所示。指数运算电路的主要原理为:输入信号 U_i 由运算放大器反相端输入,借助 $(q-1)$ 个乘法器实现 $-U_i^{1/q}$,再通过 $(p-1)$ 个乘法器进行 p 次乘方得到 $-U_i^{p/q}$,最终利用运算放大器对信号进行反向,实现指数运算。本实验中,根据切换滑模控制策略的重要参数设置, p 和 q 分别取为 5 和 3。

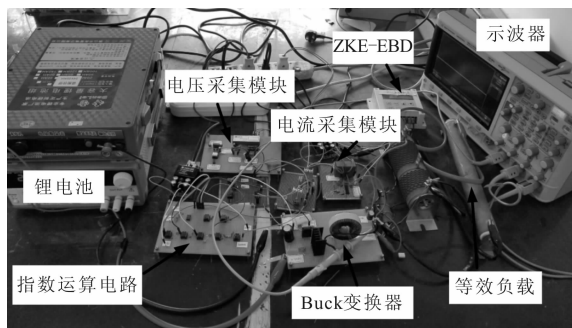


图 5 辅助电源切换滑模控制实验台

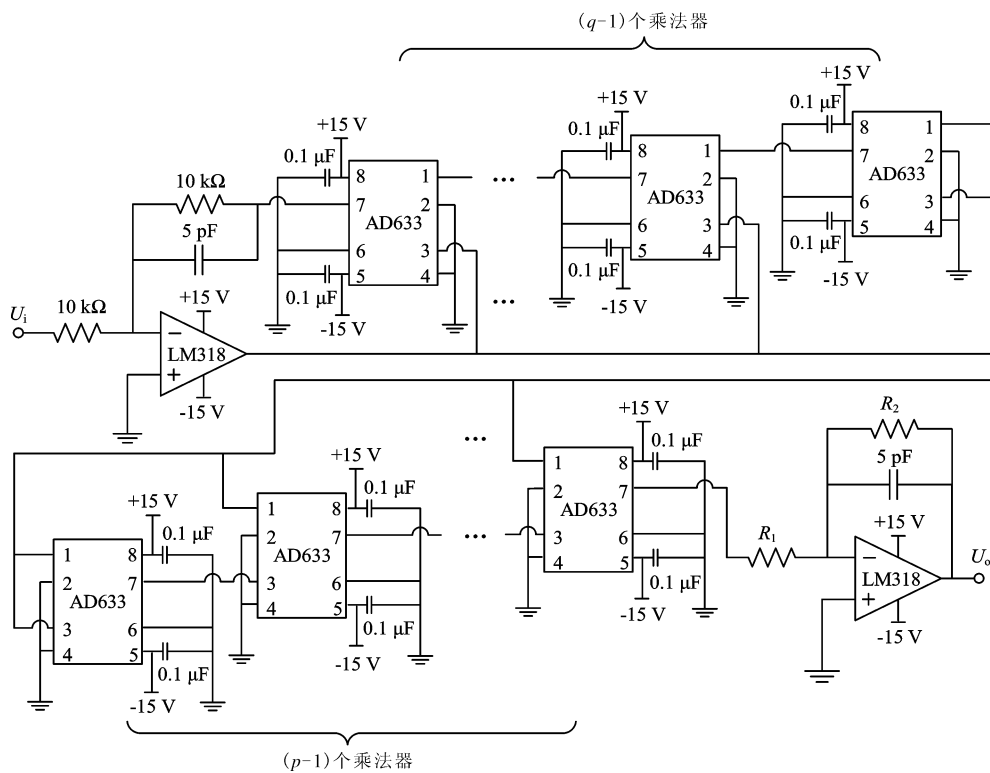
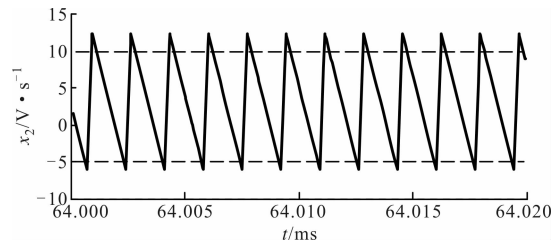


图 6 指数运算电路原理图

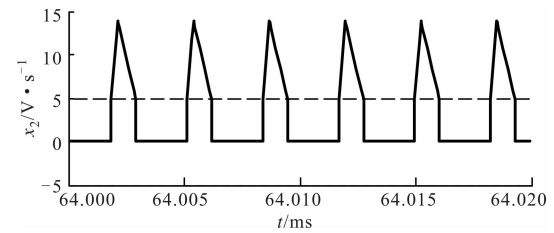
基于所搭建的实验平台,对采用非奇异终端滑模和切换滑模控制策略的 Buck 变换器的电容电流分别进行采集,进一步得出相应的滑模面函数中的输出电压误差变化率 x_2 的实验数据,其实验波形如图 7 所示。由图 7a 和图 7b 对比可知,当辅助电源输出稳定时,非奇异终端滑模面函数的 x_2 大致在一 6 至 13 之间变化,其中当 x_2 负向取值时,控制策略实现复杂度增加。由于切换滑模控制策略的参数 θ

$=5$,其切换滑模面函数的 x_2 值始终保持在 5 以上,因此 x_2 的单向取值使滑模控制策略的实现复杂度得以简化。

图 8 为传统滑模控制和切换滑模控制下的辅助电源的启动电压响应。可以看出,当采用传统滑模控制策略时,辅助电源启动响应时间约为 80 ms,其稳态输出电压存在较大误差,无法稳定在 $V_{\text{target}}=12\text{ V}$ 处。而采用切换滑模控制策略时,辅助电源输出电压较光滑且误差更小,启动时间约为 60 ms。因此,采用切换滑模控制策略时,辅助电源的启动响应

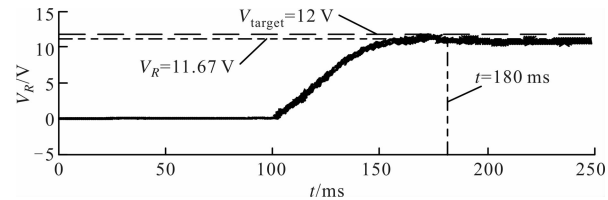


(a) 非奇异终端滑模控制策略

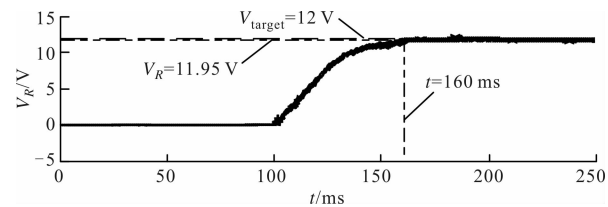


(b) 切换滑模控制策略滑

图 7 两种滑模控制策略滑模面函数的 x_2 实验波形图



(a) 启动时传统滑模控制输出电压响应

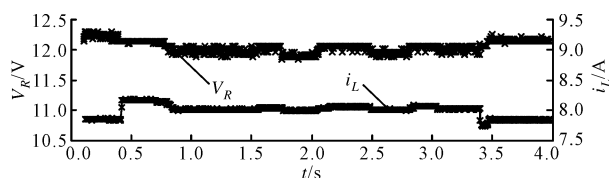


(b) 启动时切换滑模控制输出电压响应

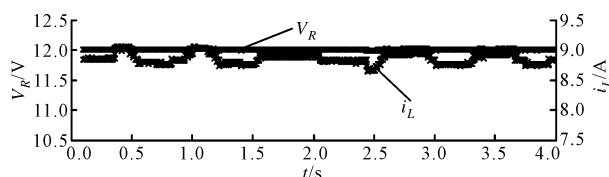
图 8 两种滑模控制策略下辅助电源的启动电压波形图

时间可缩短 25%。

为验证变负载下切换滑模控制策略的实际控制性能,采用直流电子负载进行连续变负载模拟。Buck 变换器的输出电压和电流数据可由 ZKE-EBD 记录,数据波形如图 9 所示。由图 9a 可见,采用传统滑模控制的辅助电源输出电压存在明显波动,辅助电源工作状态不稳定。由图 9b 可见,切换滑模控制下的辅助电源输出电压更加稳定,系统具有更好的鲁棒性和抗干扰能力。



(a) 变负载下传统滑模控制的输出电压和电流响应



(b) 变负载下切换滑模控制的输出电压和电流响应

图9 变负载下两种滑模控制策略的输出电压和电流响应

5 结 论

在电动汽车辅助电源系统控制中,终端滑模控制策略存在奇异点,输出电压不稳定且策略实现复杂度高,非奇异终端滑模控制策略同样存在策略实现复杂等问题。为提高系统稳定性,降低控制策略实现的复杂度,本文提出了一种新的用于辅助电源 Buck 变换器的切换滑模控制策略。通过分析终端滑模控制策略和非奇异终端滑模控制策略,描述了其存在的问题。基于非奇异终端滑模控制策略定义了新的切换滑模面函数,并对切换滑模控制系统进行了稳定性分析与讨论。在此基础上,将切换滑模控制策略应用到具体的辅助电源系统中,结合 MOSFET 开关的导通与关断状态建立了辅助电源中 Buck 变换器的状态空间模型,并利用 Lyapunov 稳定性准则合理设计了相应的限制条件,从而保证系统的稳定性。仿真和实验结果表明:辅助电源中的 Buck 变换器采用切换滑模控制策略不仅可以有效避免奇异问题,还可在降低策略实现复杂度的基础上,获得良好的动态响应和稳定性;与传统滑模控制策略相比,采用切换滑模控制的辅助电源系统,其启动响应时间可缩短 25%,系统应对负载突变的能

力增强,抗干扰能力及鲁棒性都得到了提高。

参考文献:

- [1] YU Hongwei, DUAN Jinhui, DU Wei, et al. China's energy storage industry: develop status, existing problems and countermeasures [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 71: 767-784.
- [2] LI Qiyu, ZHAO Shengdun, WANG Mengqi, et al. An improved perturbation and observation maximum power point tracking algorithm based on a PV module four-parameter model for higher efficiency [J]. Applied Energy, 2017, 195: 523-537.
- [3] YANG Yong, GUO Su, LIU Deyou, et al. Operation optimization strategy for wind-concentrated solar power hybrid power generation system [J]. Energy Conversion & Management, 2018, 160: 243-250.
- [4] GANG B G, KIM H, KWON S. Ground simulation of a hybrid power strategy using fuel cells and solar cells for high-endurance unmanned aerial vehicles [J]. Energy, 2017, 141: 1547-1554.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] CHEN Guipeng, DENG Yan, DONG Jie, et al. Integrated multiple output synchronous buck converter for electric vehicle power supply [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(7): 5752-5761.
- [8] GORDILLO J, AGUILAR C. A simple sensorless current sharing technique for multiphase DC-DC buck converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(5): 3480-3489.
- [9] KOMURCUGIL H. Adaptive terminal sliding-mode control strategy for DC-DC buck converters [J]. ISA Transactions, 2012, 51(6): 673-681.
- [10] 汪建林, 续丹, 周欢, 等. Buck 变换器的自适应终端滑模控制策略 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(4): 103-108.
WANG Jianlin, XU Dan, ZHOU Huan, et al. Adaptive control method of terminal sliding mode with double loop for Buck converters [J]. Journal of Xi'an

- Jiaotong University, 2017, 51(4): 103-108.
- [11] SHEN Liqun, LU D C, LI Chengwei. Adaptive sliding mode control method for DC-DC converters [J]. IET Power Electronics, 2015, 8(9): 1723-1732.
- [12] WANG Bin, XU Jun, WAI R J, et al. Adaptive sliding-mode with hysteresis control strategy for simple multi-mode hybrid energy storage system in electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2): 1404-1414.
- [13] MU Chaoxu, HE Haibo. Dynamic behavior of terminal sliding mode control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(4): 3480-3490.
- [14] MU Bingxian, ZHANG Kunwu, SHI Yang. Integral sliding mode flight controller design for a quadrotor and the application in a heterogeneous multi-agent system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(12): 9389-9398.
- [15] 王斌, 徐俊, 曹秉刚, 等. 升压型电池-超级电容复合电源的自适应滑模控制 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(10): 36-41.
- WANG Bin, XU Jun, CAO Binggang, et al. An adaptive sliding-mode control strategy for hybrid power sources of battery-supercapacitor with a boost converter [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(10): 36-41.
- [16] WU Yuqiang, YU Xinghuo, MAN Zhihong. Terminal sliding mode control design for uncertain dynamic systems [J]. Systems & Control Letters, 1998, 34(5): 281-287.
- [17] KOMURCUGIL H. Non-singular terminal sliding-mode control of DC-DC buck converters [J]. Control Engineering Practice, 2013, 21(3): 321-332.
- [18] WANG Junxiao, LI Shihua, YANG Jun, et al. Finite-time disturbance observer based non-singular terminal sliding-mode control for pulse width modulation based DC-DC buck converters with mismatched load disturbances [J]. IET Power Electronics, 2016, 9(9): 1995-2002.
- [19] BRANICKY M S. Multiple Lyapunov functions and other analysis tools for switched and hybrid systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1998, 43(4): 475-482.
- [20] 洪乃刚. 电力电子、电机控制系统的建模和仿真 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 120-122.

(编辑 刘杨)

(上接第 94 页)

- [14] 高立超, 杨志华, 孙兴彬, 等. GIS 现场交流耐压试验中放电点定位方法的研究 [J]. 电工电气, 2016(8): 43-46.
- GAO Lichao, YANG Zhihua, SUN Xingbin, et al. Research on discharging point location method in site alternating current voltage withstand test of gas-insulated metal-enclosed switchgear [J]. Electrotechnics Electric, 2016(8): 43-46.
- [15] 邵先军, 何文林, 徐华, 等. 550 kV GIS 现场交流耐压试验下放电故障的定位与分析研究 [J]. 高压电器, 2014, 50(11): 30-37.
- SHAO Xianjun, HE Wenlin, XU Hua, et al. Location and analysis of discharge failures in 550 kV GIS during field withstanding AC voltage test [J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(11): 30-37.
- [16] 梅晓云. 局放检测超声波传感器电路设计与应用 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012: 9-15.
- [17] 李颖. GIS 局部放电超声检测技术的研究及应用 [D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2014: 20-26.
- [18] PORTUGUES I E, MOORE P J, GLOVER I A, et al. RF-based partial discharge early warning system for air-insulated substations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 24(1): 20-29.
- [19] PORTUGUES I E, MOORE P J, GLOVER I A, et al. A portable wideband impulsive noise location system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2008, 57(9): 2059-2066.
- [20] MOORE P J, PORTUGUES I E, GLOVER I A. Radiometric location of partial discharge sources on energized high-voltage plant [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 2264-2272.
- [21] 陈克安, 曾向阳, 杨有粮. 声学测量 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 1-42.

(编辑 杜秀杰)