

同步 BUCK 电路中的新型非奇异终端滑模控制性能研究^{*}

刘 洋 马家庆 吴钦木 何志琴 陈昌盛

(贵州大学电气工程学院 贵阳 550025)

摘要: 针对传统滑模控制趋近速度较慢、抖振较大,应用在同步 Buck 变换器中响应速度较慢、精度较低等问题,提出了一种新型非奇异终端滑模控制的方法。首先对传统的滑模面函数进行了修改,通过引入非线性函数并附上积分项,可以迫使系统快速收敛,从而缩短响应时间。其次在传统趋近律的基础上引入了形式为 sigmoid 的函数,并用饱和函数来替代符号函数,避免了符号函数在零附近高频切换,因此降低了传统滑模控制带来抖振影响。最后在 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建相应的模型,结果显示,其调整时间为 90 μ s,突加负载后恢复时间为 20 μ s。并通过实验验证,在转速指令发生改变时,所设计的方法调整时间更快,在突加负载后,抗干扰能力更强。

关键词: 滑模控制;同步 Buck 电路;改进趋近律;滑模面函数

中图分类号: TM132; TN40 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.4

Performance study of a new non-singular terminal sliding mode control in synchronous BUCK circuits

Liu Yang Ma Jiaqing Wu Qinmu He Zhiqin Chen Changsheng

(School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: The traditional sliding mode control has the problems of slow approach speed, large buffeting, slow response speed and low precision when applied to a synchronous Buck converter. A novel non-singular terminal sliding mode control method is proposed. Firstly, the traditional sliding mode surface function is modified. By introducing a nonlinear function and attaching the integral term, the system can be forced to converge quickly, thus reducing the response time. Secondly, based on the traditional approach law, a function of the form sigmoid is introduced, and a saturation function is used to replace the sign function, which avoids the high-frequency switching of the sign function near zero, and thus reduces the chattering effect caused by the traditional sliding mode control. Finally, the corresponding model is built on the MATLAB/Simulink simulation platform, and the results show that the adjustment time is 90 μ s and the recovery time after sudden loading is 20 μ s. The experimental results show that when the speed instruction changes, the proposed method can adjust the time faster, and the anti-interference ability is stronger after sudden loading.

Keywords: sliding mode control; synchronous Buck circuit; improved convergence law; sliding mode surface function

0 引言

随着现代电力电子技术的迅猛发展,降压型直流-直流(DC-DC)变换器作为电能转换的关键组件在各种电源管理和工业应用中扮演着至关重要的角色^[1]。然而,受到电源波动、负载变化以及环境扰动等因素的影响,同步 BUCK

变换器的稳定性和控制性能仍然是一个具有挑战性的问题^[2]。

PID 控制倾向于将 DC-DC 变换器简化为线性模型^[3]。然而,PID 控制器对负载变化表现出相对较高的灵敏度^[4],在非线性系统中,PID 控制器的性能会受到影晌。因此,近年来在 DC-DC 降压变换器的背景下,对预测

控制^[5]、神经网络控制^[6]、模糊控制^[7]等控制方法进行了大量的研究。

滑模控制由于其固有的优点,如对系统的快速响应和对系统参数变化和干扰的鲁棒性,受到了研究人员的广泛关注^[8-11]。在 DC-DC 降压变换器中,具有离散和变结构特性^[12],电路元件参数的变化是不确定的^[13]。因此滑模控制已得到广泛应用。在文献[14]中提出离散趋近律来表示趋近过程,并在趋近律中加入 sgn 函数,使滑动变量能够在有限时间内到达指定的滑动面。但是未考虑 sgn 函数会在滑动面附近产生频繁切换。因此文献[15]提出了一种快速非奇异固定时间终端滑模控制方法,基于固定时间稳定理论,保证系统能在固定时间内稳定,不会产生频繁切换。文献[16]设计反余切型辅助函数构造变速趋近律,改变了系统收敛速度,使得系统具有更快的响应速度。

由以上文献可以证明,传统趋近律的可调性有限,可调参数相对固定,制约了其实际控制性能。因此,众多学者致力于改进趋近律的阶数或者幂次项,以提高系统的响应速度和鲁棒性。如终端滑模控制^[17]、高阶滑模控制^[18]和基于观测器的滑模控制^[19]等。然而,并未考虑滑模面对系统性能的影响,而滑模面的设计直接影响系统的鲁棒性,合理的滑模面设计能够提高系统对参数不确定性和外界扰动的抵抗能力,从而提高控制系统的鲁棒性。

为解决传统滑模控制(traditional sliding mode control, TSMC)存在的控制精度以及趋近速度较慢的问题,本文通过改进滑模面函数以及改进传统趋近律,提出了一种新型非奇异终端滑模控制器(novel non-singular terminal sliding mode control, NNTSMC)。该方法在滑模面函数中通过引入非线性函数从而能够有效的避免奇异性问题,而在趋近律中引入了 sigmoid 形式的函数,使得趋近速度能够动态调整,同时将符号函数替代为饱和函数,使得系统可以平滑的趋近目标值。最后,搭建同步 Buck 变换器实验平台,通过仿真和实验验证所提方法的有效性。

1 同步 Buck 变换器的一般拓扑结构

图 1 是同步 Buck 电路的一般拓扑图,主电路拓扑组成为: V_{in} 为输入电压, V_o 为输出电压, R 为负载电阻, C 为滤波电容, L 为储能电感, Q_1 、 Q_2 为控制信号的开关管和整流管。电路通过电压外环和电流内环经过 PWM 输出两路反向的信号来分别驱动 Q_1 、 Q_2 。

2 同步 Buck 变换器的数学建模

从图 1 可以得到输出电流与输出电压的状态方程如下:

$$\begin{cases} V_L = L\dot{i}_L = V_{in} - V_o \\ \dot{i}_L = CV_o + \frac{V_o}{R} \end{cases} \quad (1)$$

变形得:

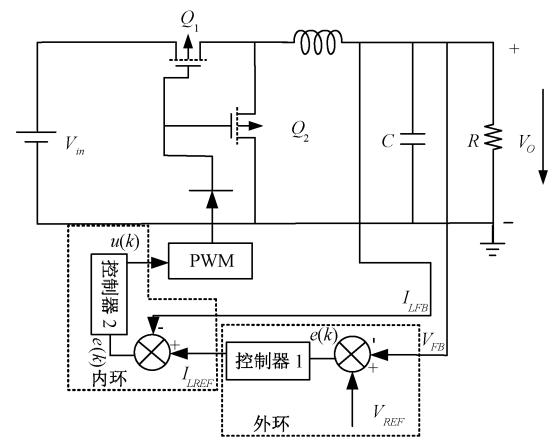


图 1 同步 Buck 变换器一般拓扑结构图

Fig. 1 General topology of synchronous BUCK converter

$$\begin{cases} \dot{i}_L = \frac{V_{in} - V_o}{L} \\ \dot{V}_o = \frac{Ri_L - V_o}{RC} \end{cases} \quad (2)$$

定义状态变量:

$$\begin{cases} X_1 = V_{ref} - V_o \\ X_2 = \dot{X}_1 = -\dot{V}_o \end{cases} \quad (3)$$

联立式(1)~(3), 定义 $\dot{i}_L = u$, $\frac{RCV_L + L(i_L - V_o)}{RC^2V_L} =$

D , 则有:

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = -\dot{V}_o = X_2 = -\frac{i_L R - V_o}{RC} \\ \dot{X}_2 = \frac{RCV_L + L(i_L - V_o)}{RC^2V_L} - i_L = Du \end{cases} \quad (4)$$

在上述所有公式中 V_{ref} 为参考电压, V_o 为输出电压, V_{in} 为输入电压, R 为负载电阻, C 为滤波电容, L 为储能电感, 当参考电压与输出电压相等时, 系统处于稳定状态。

3 改进滑模函数以及改进趋近律分析

传统滑模面函数:

$$s = cx_1 + x_2 \quad (5)$$

如式(5)所示,传统的线性滑模控制器只能保证渐近稳定,即系统状态会在无限时间内逐渐收敛到滑模面上,这意味着在实际应用中,系统可能需要较长的时间才能达到稳定状态,尤其时在存在外部扰动和不确定性的情况下。

针对传统滑模面函数的不足,改进滑模面函数:

$$s = x_2(t) + m \int_0^t x_1(\tau) d\tau + n \int_0^t |x_1(\tau)|^\lambda \operatorname{sgn}(x_1) d\tau \quad (6)$$

求导得:

$$\dot{s} = \dot{x}_2 + mx_1 + n |x_1|^\lambda \operatorname{sgn}(x_1) \quad (7)$$

如式(6)所示,通过引入非线性函数并附加上积分项改进了滑模面函数,与传统滑模面相比,所引入的非线性函数

能够避免奇异性问题,而所附加的积分项能够使趋近律具备积分的作用,可以迫使系统快速收敛至 $s = 0$ 处,从而缩短响应时间。

Buck 变换器的滑模控制器设计采用趋近律的控制方式,其中一般趋近律的设计为:

$$\dot{s} = -\epsilon \operatorname{sgn}(s) - ks \quad (8)$$

传统的指数趋近律的趋近速度通常是固定的,无法根据系统状态的变化进行动态调整,这意味着在不同的状态范围内,系统的响应速度无法自适应地优化。而且指数趋近律的收敛时间通常较长,特别是在趋近滑模面时,由于其固定的指数形式,系统的状态可能需要较长的时间才能达到期望精度。

针对传统趋近律的不足,设计改进指数趋近律为:

$$\begin{cases} \dot{s} = -\epsilon \operatorname{sat}(s) \cdot f(s) - qs \\ f(s) = \frac{1}{1 + \exp(-s)} \end{cases} \quad (9)$$

在指数趋近律中引入了一个非线性函数 $f(s)$,其形式为 sigmoid 函数。由于 $f(s)$ 的形式,趋近速度可以动态调整。当 s 较大时, $f(s)$ 接近 1, 此时趋近速度较慢,而当 s 接近于 0 时, $f(s)$ 接近于 0.5, 此时趋近速度较快。在保持了鲁棒性的同时,提供了灵活的调节机制。同时在所设计的趋近律中,用饱和函数来替代了符号函数,避免了符号函数在零附近的高频切换,从而使得系统状态可以更平滑的趋近目标值,不会因为高频切换导致较大的控制误差。

根据 Lyapunov 稳定性分析:验证系统运动点能否在有限的时间内到达切换面。

$$V = \frac{1}{2}s^2 \quad (10)$$

根据 SMC 的基本理论,所设计的 SMC 需要满足以下条件:

$$\dot{V} = ss \leq 0 \quad (11)$$

联立式(9)和(11),可以得到:

$$\dot{V} = ss = -\epsilon \operatorname{sat}(s) \cdot \frac{1}{1 + \exp(-s)} - qs^2 \quad (12)$$

由式(12)可知, $-\epsilon \operatorname{sat}(s) < 0, f(s) > 0$ 。所以 $\dot{V} < 0$, 由滑模可达性条件可知,如果 $ss \leq 0$, 则所设计的滑模控制器满足滑模可达性。

由式(4)、(7)、(9)可以得到 NNTSMC 的控制律为:

$$u = \frac{1}{D} [\epsilon \operatorname{sat}(s) \cdot f(s) + qs + mx_1 + n |x_1|^\alpha \operatorname{sgn}(x_1)] \quad (13)$$

4 仿真分析

如图 2 所示,在同步 Buck 电路中,为了验证 NNTSMC 的有效性,建立 Matlab/Simulink 的仿真模型。同步 Buck 变换器的仿真参数如表 1 所示。

如图 3 所示,根据第 3 节的 Buck 电路数学模型并结合

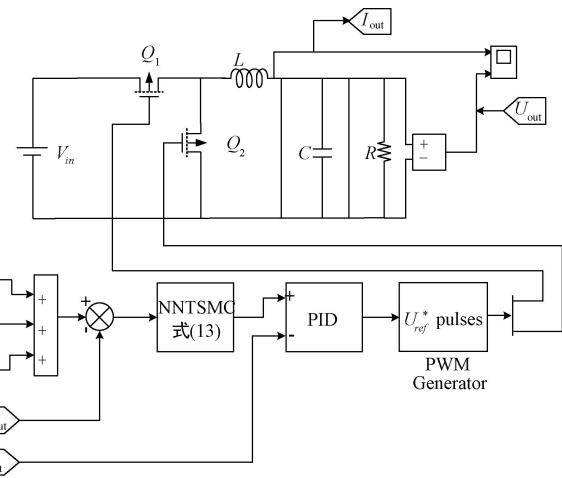


图 2 同步 Buck 电路仿真模型

Fig. 2 Simulation model of synchronous Buck circuit

表 1 同步 Buck 变换器的参数

Table 1 Parameters of the synchronous BUCK converter

参数项	参数值
输入电压 V_{in} /V	36
输出电压 V_o /V	24
电感数值 L /mH	1
电容数值 C /mF	0.3
电阻数值 R /Ω	5.0
PWM 频率/kHz	200

第 4 节所设计的滑模面函数与趋近律,推导出该控制器的控制律并在 Matlab/Simulink 中搭建出该控制器的控制结构。

图 4(a)、图 5(a) 分别为系统启动后,输出电压的动态响应,以及负载从 5Ω 突变为 50Ω 的动态响应。

从图 4(b) 中可以看出,PI 控制有较大的超调, TSMC 没有超调但是其调整时间较慢,而本文所设计的 NNTSMC,无论是调整时间还是超调量都得到了较大的提升。从图 4(c) 中可以看出, NNTSMC 的调整时间最快。图 4(d) 与 (b) 情况基本相同, NNTSMC 的调整时间和稳态纹波都是优于 PI 控制和 TSMC。

如图 5(b) 所示,当负载突变后, NNTSMC 的恢复时间比 PI 和 TSMC 快,且波动范围较小。具体指标如表 2 所示。

5 实验验证分析

如图 6 所示,为进一步验证本文所设计的控制器的有效性,搭建同步 Buck 变换器的实验平台,对 TSMC 与 NNTSMC 进行实验对比。

实验平台主要包括示波器、直流输入电源、STM32G474 主控板、负载等。其中 PWM 开关频率为 200 kHz, 电路参数与仿真一致,如表 1 所示。

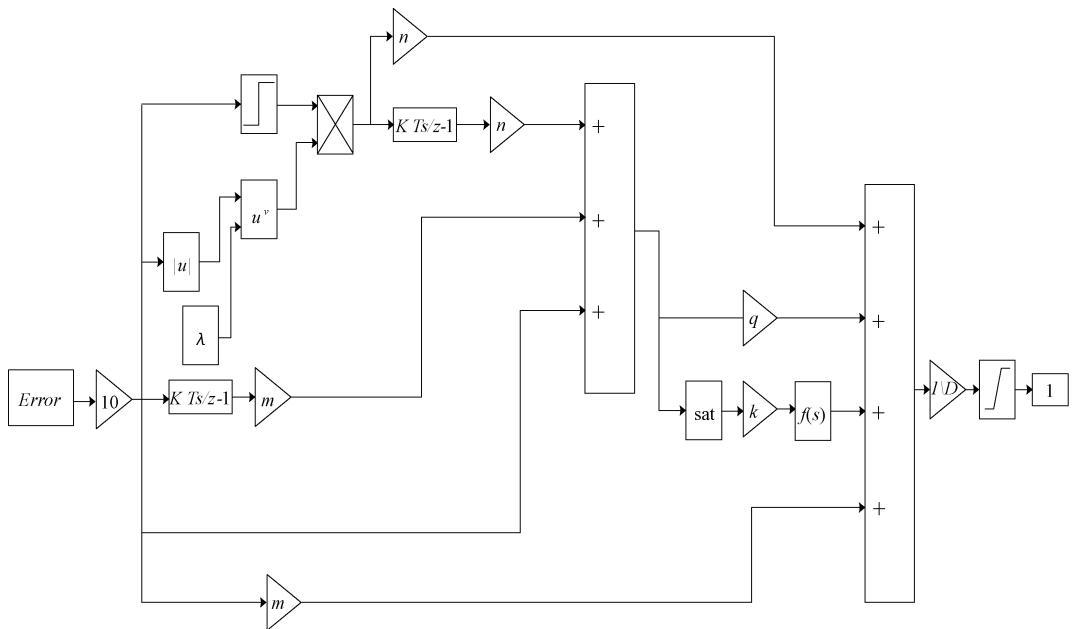
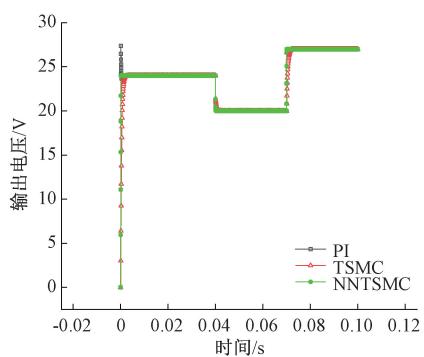


图 3 NNTSMC 控制结构图
Fig. 3 NNTSMC control structure

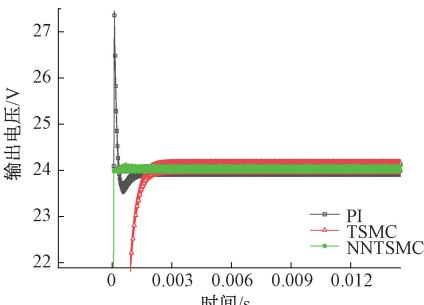
图 7、8 表示对指令电压下降、上升时,输出电压和输出电流的波形。启动阶段输出电压指令为 24 V,而后改变输出电压从 24 V 降到 20 V,再从 20 V 上升到 27 V。

如图 7(a) 所示, TSMC 的调整时间为 24 ms。如图 7(b) 所示,NNTSMC 的调整时间为 16 ms。如图 8(a)



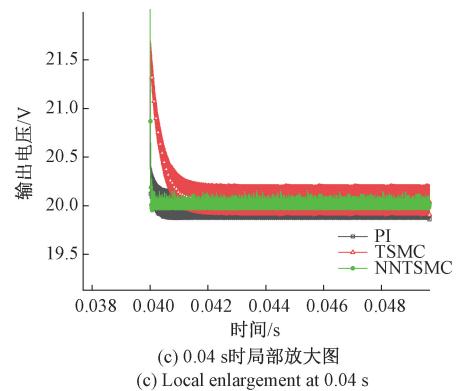
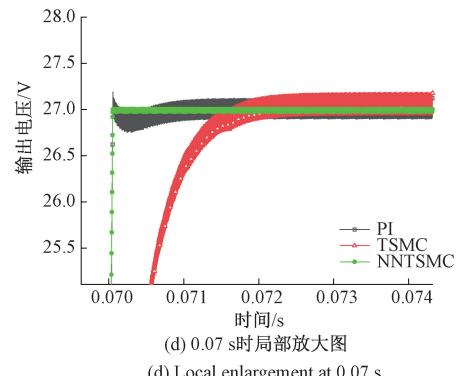
(a) 变指令下不同控制器下的输出电压

(a) Output voltage with different controllers under variable command



(b) 启动阶段时局部放大图

(b) Localized zoomed-in view during the start-up phase

(c) 0.04 s时局部放大图
(c) Local enlargement at 0.04 s

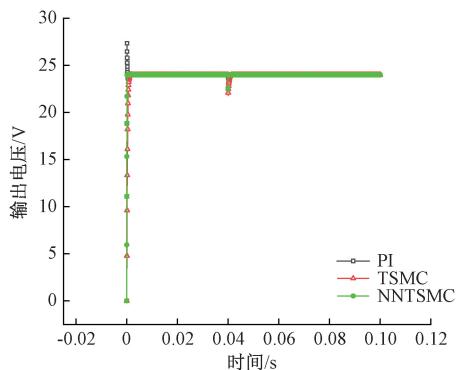
(d) 0.07 s时局部放大图

(d) Local enlargement at 0.07 s

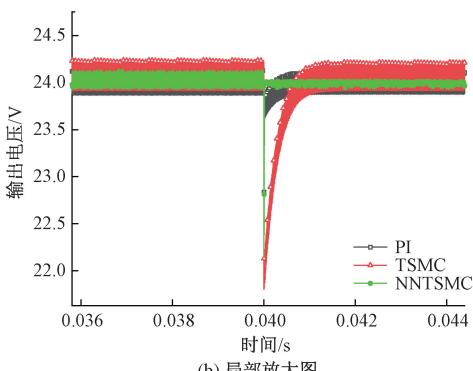
图 4 变指令下不同控制器的输出电压波形

Fig. 4 Output voltage waveforms of different controllers under variable commands

所示, TSMC 的调整时间为 46 ms, 如图 8(b) 所示, NNTSMC 的调整时间为 32 ms。由以上可知, NNTSMC 的调整时间更快,能够更迅速的达到指令电压数值。



(a) 负载突变后, 输出电压的响应
(a) Output voltage response after sudden load change



(b) 局部放大图
(b) Locally enlarged image

图 5 负载突变后, 输出电压的响应波形

Fig. 5 Response waveform of output voltage after a sudden load change

表 2 数据总结

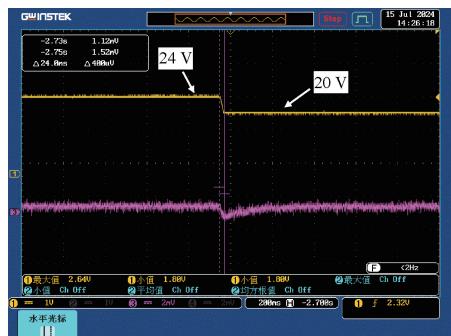
Table 2 Summary of data

性能参数	PI	TSMC	NNTSMC
输出电压 24 V 时			
超调量	14.3%	0	0
调整时间/ μ s	1 000	2 000	90
负载突变电压恢复时间/ μ s	400	1 000	20

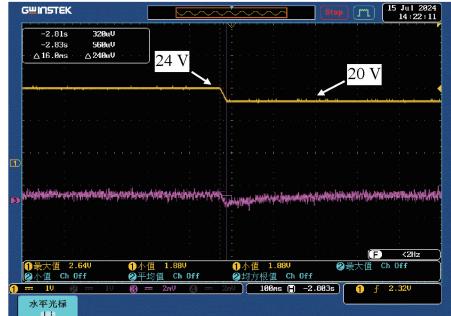


图 6 同步 Buck 变换器控制系统实验平台

Fig. 6 Experimental platform for synchronous Buck converter control system



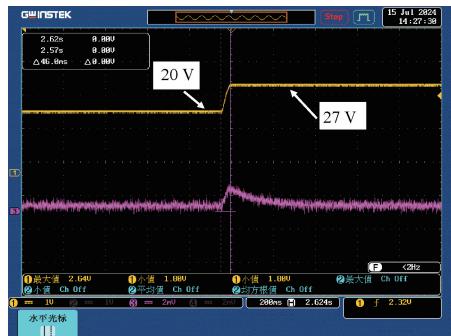
(a) TSMC方法
(a) TSMC method



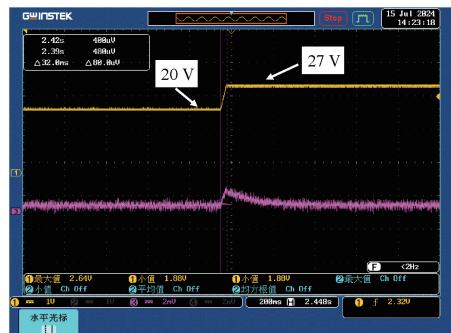
(b) NNTSMC方法
(b) NNTSMC method

图 7 指令电压下降时输出电压波形

Fig. 7 Output voltage waveform when command voltage drops



(a) TSMC方法
(a) TSMC method



(b) NNTSMC方法
(b) NNTSMC method

图 8 指令电压上升时输出波形

Fig. 8 Output waveform when command voltage rises

图 9 表示输出侧由空载接入 50 Ω 负载时,输出电压和输出电流的波形。

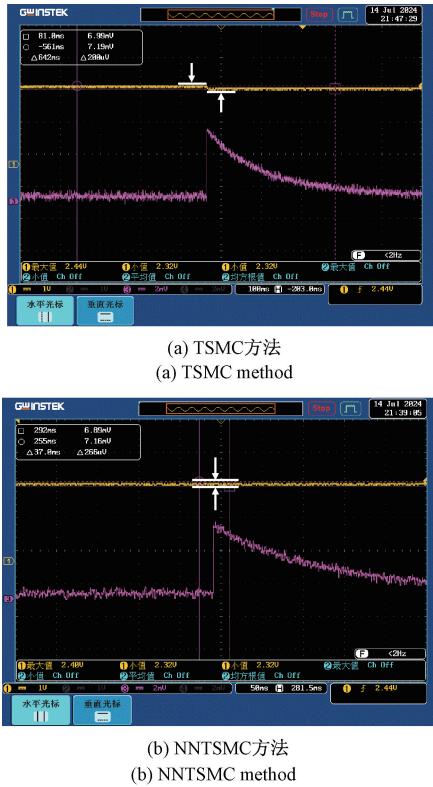


图 9 突加负载时输出电压波形

Fig. 9 Output voltage waveform during sudden load application

如图 9(a)所示, TSMC 从原来的 24 V 下降了 200 μ V, 且电压并未恢复至原来的 24 V。如图 9 (b) 所示, NNTSMC, 输出电压并未波动,持续稳定在 24 V。由此可证明,所设计的 NNTSMC 具有更好的抗扰动能力。

6 结 论

针对传统趋近律的滑模控制器,响应速度较慢,抖振较大的问题。提出了一种新型非奇异终端滑模控制方法,通过改进滑模面函数,以及对传统趋近律的改进,保证了输出电压具有更好的动态性能,提高了系统的响应时间和抗扰动能力。通过仿真和实验验证了所提方法的有效性。但是滑模控制器的性能依赖于滑模面函数和趋近律的参数选择,这些参数的选择往往需要根据具体应用来进行调节,过程较为复杂,如何让参数能够自适应地调整,还有待解决。

参考文献

- [1] WANG Z, LI SH H, LI Q. Continuous nonsingular terminal sliding mode control of DC-DC boost converters subject to time-varying disturbances [J]. IEEE Journal of Circuits and Systems II: Express Briefs, 2020, 67(11): 2552-2556.
- [2] 马幼捷,王硕,周雪松,等. 基于混沌同步的 Buck 变换器并联均流控制 [J]. 电子测量技术,2022,45(5): 13-19.
- MA Y J, WANG SH, ZHOU X S, et al. Chaotic synchronization-based parallel equalization control for Buck converters [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(5): 13-19.
- [3] 吴志强,于莲芝,孔梦君. 基于数字 PID 切换控制的 Buck 变换器研究 [J]. 电子技术应用,2019,45(1): 109-113.
- WU ZH Q, YU L ZH, KONG M J. Study of Buck converter based on digital PID switching control [J]. Electronic Technology Application, 2019, 45(1): 109-113.
- [4] 叶满园,邹文骏. 三开关单级升降压并网逆变器 PID 控制器优化 [J]. 电力电子技术,2017,51(7): 23-25,36.
- YE M Y, ZOU W J. Optimization of PID controller for three-switch single-stage liftvoltage grid-connected inverter [J]. Powerelectronic Technology, 2017, 51(7): 23-25,36.
- [5] 杨智斌,张茂松,陶骏,等. 双有源桥 DC/DC 变换器无偏模型预测控制策略 [J]. 电力电子技术,2023, 57(11): 102-105.
- YANG ZH B, ZHANG M S, TAO J, et al. Unbiased model predictive control strategy for dual active bridge DC/DC converter [J]. Powerelectronic Technology, 2023, 57(11): 102-105.
- [6] 胡霞,王华俊. 基于 BP 神经网络 PID 控制 DC/DC 变换器研究 [J]. 佳木斯大学学报(自然科学版),2023, 41(3): 28-30.
- HU X, WANG H J. Research on DC/DC converter control based on BP neural network PID control [J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2023, 41(3): 28-30.
- [7] 杜宇庭,王君艳. 基于模糊控制的交错并联双向 DC/DC 变换器研究 [J]. 电气自动化,2018,40(5): 88-91.
- DU Y T, WANG J Y. Study of interleaved parallel bi-directional DC/DC converter based on fuzzy control [J]. Electrical Automation Electrical Automation, 2018, 40(5): 88-91.
- [8] 王艳敏,曹雨晴,夏红伟. Buck 变换器的电压电流双闭环终端滑模控制 [J]. 电机与控制学报,2016,20(8): 92-97.
- WANG Y M, CAO Y Q, XIA H W. Voltage-current dual closed-loop terminal sliding mode control for Buck converters [J]. Journal of Electric Machines and Control, 2016, 20(8): 92-97.

- [9] 李博,邹浩彦. 双向 DC/DC 变换器鲁棒滑模控制[J]. 物联网技术,2021,11(10):58-61.
LI B, ZOU H Y. Robust sliding mode control for bidirectional DC/DC converters[J]. Internet of Things (IOT) Technology, 2021, 11(10): 58-61.
- [10] VICTOR R, NURIA M, DOMING B. A comparative study of terminal and conventional sliding-mode startup peak current controls for a synchronous Buck converter[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(1): 197-205.
- [11] ZHENG CH M, DRAGIĆEVIĆ T, ZHANG J SH, et al. Composite robust quasi-sliding mode control of DC-DC Buck converter with constant power loads[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(2): 1455-1464.
- [12] LIU ZH, LIN X P, GAO Y B, et al. Fixed-time sliding mode control for DC/DC Buck converters with mismatched uncertainties[J]. IEEE Journal of Circuits and Systems I: Regular Papers, 2023, 70 (1): 472-480.
- [13] 陈龙,卢旺. 基于滑模变结构控制的 Buck 型 DC/DC 变换器实验研究[J]. 实验技术与管理,2017,34(11): 65-70.
CHEN L, LU W. Experimental study of Buck-type DC/DC converter based on sliding mode variable structure control[J]. Experimental Technology and Management, 2017, 34(11): 65-70.
- [14] ZHANG Y Q, YIN ZH G, ZHANG Y P, et al. A novel sliding mode observer with optimized constant rate reaching law for sensorless control of induction motor[J]. IEEE Journal of Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5867-5878.
- [15] 黄曦,刘宜成,涂海燕,等. Buck 变换器的新型非奇异固定时间滑模控制[J]. 电气传动,2022,52(4):31-35.
HUANG X, LIU Y CH, TU H Y. Novel non-singular fixed-time sliding mode control for Buck converters[J]. Electric Drive, 2022, 52(4): 31-35.
- [16] 陈强,杨晨冰,南余荣. 基于变速趋近律的 Buck 型变换器抗扰动控制[J]. 控制与决策,2021,36 (4): 893-900.
CHEN Q, YANG CH B, NAN Y R. Antidisturbance control of Buck-type converter based on variable speed convergence law [J]. Control and Decision, 2021, 36(4): 893-900.
- [17] 邓建新,袁邦颐,黄秋林,等. 基于快速终端滑模的机器人柔顺磨抛阻抗控制[J]. 组合机床与自动化加工技术,2023(11):79-83.
DENG J X, YUAN B Y, HUANG Q L, et al. Impedance control of robotic soft and smooth grinding and polishing based on fast end-slip molds [J]. Combined Machine Tools and Automated Processing Technology, 2023(11): 79-83.
- [18] 廖磊,刘细平,杨彬. 基于高阶滑模的 PMSM 无传感器控制[J]. 组合机床与自动化加工技术,2024 (3): 129-132.
LIAO L, LIU X P, YANG B. Sensorless control of PMSM based on higher order sliding mode [J]. Combined Machine Tools and Automated Processing Technology, 2024(3): 129-132.
- [19] 潘登,刘义才,高俊. 基于滑模抗扰动观测器的 PMSM 无差拍预测控制[J]. 组合机床与自动化加工技术,2024(2):114-120.
PAN D, LIU Y C, GAO J. Sliding-mode anti-disturbance observer-based PMSM predictive control without differential beats [J]. Combined Machine Tools and Automated Processing Technology, 2024(2): 114-120.

作者简介

刘洋,硕士研究生,主要研究方向为开关电源智能控制。

E-mail:1349315806@qq.com

马家庆(通信作者),副教授,博士研究生,主要研究方向为交流电机非线性控制及传感器非线性特性。

E-mail:357287962@qq.com

吴钦木,教授,博士研究生,主要研究方向为电机控制、深度学习、故障诊断。

E-mail:505953130@qq.com

何志琴,教授,博士,主要研究方向为电力电子运动控制技术。

E-mail:641443416@qq.com

陈昌盛,硕士,实验师,主要研究方向为工业机器人,嵌入式。

E-mail:495761009@qq.com