

新型单 Buck 逆变器三阶积分滑模控制策略

陈江辉¹, 谢运祥¹, 公伟勇¹, 严伟加²

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640;

2. 艾默生网络能源有限公司, 广东 深圳 518101)

摘要: 为进一步提高逆变器滑模控制器的稳态精度, 针对一种由一个双向 Buck 变换器和桥式换向电路组成的单 Buck 型逆变器进行了三阶积分滑模控制策略的研究。在其等效电路的状态空间平均法动态模型基础上, 采用微分几何理论中李导数方法阐述了滑模控制器的设计, 同时给出了滑模切换面系数的选取方法。分别采用传统比例微分控制策略和三阶积分滑模控制策略进行了对比实验。实验结果表明三阶积分滑模控制大幅度减小稳态终值误差, 改善了系统的稳态性能, 同时具有良好的动态性能, 减弱控制系统的干扰和漂移。实验验证了所采用三阶积分滑模控制策略的正确性。

关键词: Buck 逆变器; 三阶积分滑模控制; 稳态误差; 李导数; 状态空间平均法

中图分类号: TM 464

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)09-0033-04

0 引言

传统 DC/AC 逆变器主电路大多采用推挽式、半桥式和全桥式等电路拓扑, 其不足表现在^[1]:

- a. 电压利用率不高, 输入/输出间的电压匹配困难;
- b. 谐波含量高, 其中某些逆变电路含有低次谐波, 使得滤波容量大, 滤波器体积大;
- c. 器件开关损耗高, 且易产生电磁干扰(EMI);
- d. 直通造成短路, 工作可靠性不高。

近年来, 基于直流变换电路实现逆变功能的新颖 DC/AC 逆变拓扑越来越受到关注^[2-5]。文献[4]给出了一种新颖逆变电路(区别文献[5]中提到的双 Buck 组合逆变器), 此电路拓扑由单 Buck 变换器和全桥电路组成。这种逆变器不仅可以实现高精度开关功率放大器等实际应用, 还可以充分应用 DC/DC 变换电路成熟的软开关技术。对于逆变器的输出特性要求尽可能高的稳态精度, 同时对于负载变化具有优良的瞬态响应, 因此对控制的要求比较高。

传统 PID 控制策略整定不易, 性能欠佳, 对运行工况尤其负载大幅度变化的适应性较差; 而滑模变结构控制在系统参数变化较大时, 只要滑模切换面是可达的, 就可以实现滑模控制, 即变结构系统的滑动模态具有完全自适应性, 这成为变结构系统最突出的优点。对于逆变器的开关非线性变结构系统, 滑模控制是很适合的, 且具有鲁棒性好、可靠性高和控制算法简单的优点。因此, 滑模变结构控制越来越多地被应用于开关非线性系统中, 特别是逆变器系统^[6-14]。

目前, 有关电力电子变换器中使用滑模变结构控制的应用文献比较多, 但大多数都是基于单输入二阶

滑模控制的研究。文献[15]指出根据最优控制理论, 实现全状态反馈的系统是最优控制系统, 能实现动态响应的误差平方积分指标最小; 但在一定的外部扰动后, 系统存在输出稳态误差比较大、调节时间长和有爬行现象。为了减小输出稳态误差, 提高稳态性能, 在滑模变结构控制策略中加入了积分环节^[16-18]。

为了提高逆变器的输出性能和控制鲁棒性, 进一步减小系统稳态误差, 本文采用了一种新颖的三阶积分滑模变结构控制策略, 使用李导数给出了三阶积分滑模控制器的详细分析和设计, 并且将该三阶滑模控制应用于新型单 Buck 逆变器, 给出了系统的稳定条件和滑模切换面系数的选取方法。

实验结果证明了三阶积分滑模控制能大幅减小稳态终值误差, 且输出具有强鲁棒性有良好的动态性能, 减弱控制系统的干扰和漂移, 为实现逆变系统和提高稳态性能提供了一种新的思路。

1 单 Buck 逆变器拓扑结构原理

新型单 Buck 逆变器的电路拓扑图如图 1 所示, 其工作原理示意图如图 2 所示。对于 Buck 变换器, 其输出电压 $u_o = U_{in} D$ (其中, U_{in} 是直流输入电压, D 是主功率开关管 V_{T1} 的占空比)。在逆变器中, 控制电路调制的占空比 D 按 SPWM 脉宽变化, 从而使得

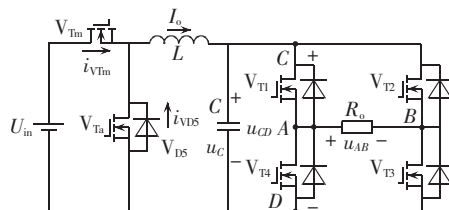


图 1 单 Buck 逆变器电路拓扑图

Fig.1 Topology of single Buck inverter

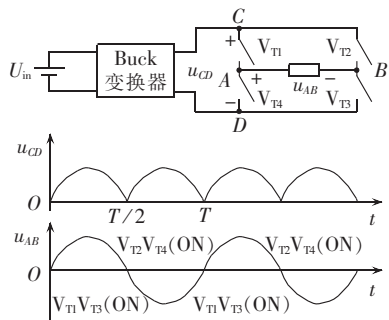


图 2 逆变电路工作原理波形图

Fig.2 Operating principle of inverter circuit

Buck 变换器在滤波电容 C 上的输出电压 u_C 为一系列的正弦半波,再通过后一级的全桥电路使一系列的半波在负载上展开成标准的正弦波。

2 单 Buck 逆变器三阶积分滑模控制设计

2.1 逆变器的三阶动态建模

单 Buck 逆变电路由一个 Buck 型直流开关变换器构成,能根据 Buck 直流变换器的建模方法进行建模,在这里采用三阶状态空间建模。图 3 是单 Buck 逆变电路系统的等效电路图。

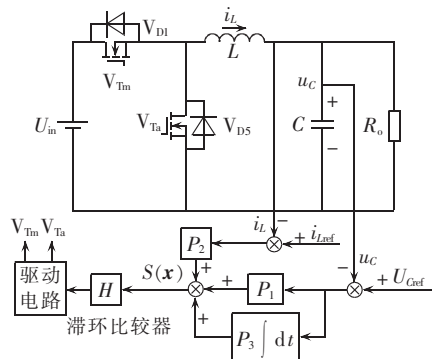


图 3 单 Buck 逆变电路系统等效电路图

Fig.3 Equivalent circuit of single Buck inverter system

以输出电压误差 x_1 、电感电流误差 x_2 和输出电压误差积分 x_3 为状态变量,得到单 Buck 逆变器状态空间模型方程为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u + \mathbf{D} \quad (1)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{Cref} - u_C \\ i_{Lref} - i_L \\ \int (U_{Cref} - u_C) dt \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{U_{in}}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1/R_o C & 1/C & 0 \\ -1/L & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ Q(t) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$i_{Lref} = \frac{U_{Cref}}{R_o} + C \frac{dU_{Cref}}{dt}$$

$$Q(t) = \frac{U_{Cref}}{L} + \frac{U_{Cref}}{R_o} + C \ddot{U}_{Cref}$$

为了便于等效控制方法推导,根据非线性系统变结构理论,上式能定义为

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{D}, \quad \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{B} \quad (2)$$

2.2 基于李导数的三阶积分滑模控制器设计

目前,滑模控制大多数是基于二阶滑模控制器的分析与设计,二阶滑模的稳态误差比较大。因此,本文在输出电容电压误差和电感电流误差的二阶滑模的基础上加入输出电压误差的积分环节,使系统本质上消除了稳态终值误差。图 3 中所示的控制部分即为三阶积分滑模控制器,为了获得良好的输出特性,一般选取状态变量偏差的线性组合建立滑模切换面函数,其滑模切换面函数的选取为

$$S(\mathbf{x}) = P_1 x_1 + P_2 x_2 + P_3 x_3 = P_1 (U_{Cref} - u_C) + P_2 (i_{Lref} - i_L) + P_3 \int (U_{Cref} - u_C) dt \quad (3)$$

其中, P_1 、 P_2 和 P_3 为正常数。

根据非线性系统的变结构控制理论,滑模控制规律和在该规律下滑模切换面的存在和达到条件为

$$u = \begin{cases} 0 & S(\mathbf{x}) < 0 \\ 1 & S(\mathbf{x}) > 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$S\dot{S} < 0 \Rightarrow \begin{cases} L_{f+g} S(\mathbf{x}) = \sum_{i=0}^m \frac{\partial S}{\partial x_i} [f_i(\mathbf{x}) + g_i(\mathbf{x})] < 0 & S > 0 \\ L_f S(\mathbf{x}) = \sum_{i=0}^m \frac{\partial S}{\partial x_i} f_i(\mathbf{x}) < 0 & S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

满足式(5)的必要条件是:

$$L_g S(\mathbf{x}) = \sum_{i=0}^m \frac{\partial S}{\partial x_i} g_i(\mathbf{x}) < 0 \quad (6)$$

为使系统在滑模切换面上保持滑模运动,则在 $S=0$ 的情况下满足下式:

$$\dot{S}(\mathbf{x}) = \frac{\partial S}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \frac{\partial S}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{B}u = 0 \quad (7)$$

可得等效控制:

$$u_{eq} = - \left(\frac{\partial S}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{B} \right)^{-1} \frac{\partial S}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (8)$$

因此,滑模切换面上存在滑模运动的充要条件是等效控制 u_{eq} 满足 $0 < u_{eq} < 1$ 。

将式(1)(3)代入式(6)得:

$$L_g S(\mathbf{x}) = \sum_{i=0}^m \frac{\partial S}{\partial x_i} g_i(\mathbf{x}) = -\frac{P_2 U_{in}}{L} < 0 \quad (9)$$

由式(6)知, $S(\mathbf{x})$ 满足存在滑模运动的必要条件。同理,将式(1)(3)代入式(8)可得:

$$u_{eq} = \frac{1}{U_{in}} \left[\left(\frac{P_3 L}{P_2} - \frac{P_1 L}{P_2 R_o C} - 1 \right) x_1 + \frac{P_1 L}{P_2 C} x_2 + L Q(t) \right] \quad (10)$$

将 $P_2=1$, $P_1=C/L$, $x_1=U_{Cref}-u_C$ 和 $P_3=1/(R_o L)$ 代入式(10),且 $i_{Lref}-i_L \approx C dU_{Cref}/dt - C d u_C/dt$,可得:

$$u_{eq} = \frac{1}{U_{in}} \left[u_C - C \frac{d(U_{Cref} - u_C)}{dt} + \frac{L}{R_o} \dot{U}_{Cref} + L C \ddot{U}_{Cref} \right] \quad (11)$$

由于在实际电路中电感 L 和电容 C 的值足够小,且当系统处于稳态时, $U_{Cref} \approx u_C$,因此式(11)近似为 $u_{eq} \approx u_C/U_{in}$,据 Buck 电路理论知 $0 < u_{eq} < 1$,因此包

含积分环节的滑模切换面函数满足存在滑模运动的充要条件,控制策略有效。

2.3 滑模切换区和滑模切换面函数系数选取

为了保证系统的状态轨迹达到滑模切换面,必须满足式(5),因此将式(1)(3)代入式(5),可以得到该三阶滑模控制的滑模切换区,如下式所示:

$$0 \leq \left(\frac{P_3}{P_2} - \frac{P_1}{P_2 R_0 C} - \frac{1}{L} \right) x_1 + \frac{P_1}{P_2 C} x_2 + Q(t) \leq \frac{U_{in}}{L} \quad (12)$$

由式(12)可知,三阶滑模控制的切换区为2个平行平面之间的三维空间。为了便于分析,通过映射从而可以得到二维的区域是位于2条平行直线 l_1, l_2 之间的区域,其滑模区域的数学表达式如式(13)所示。合理选择系数,系统状态轨迹将在滑模切换区内运动,最终会使轨迹进入稳态点。

$$\begin{aligned} l_1: & \left(\frac{P_3}{P_2} - \frac{P_1}{P_2 R_0 C} - \frac{1}{L} \right) x_1 + \frac{P_1}{P_2 C} x_2 + Q(t) = 0 \\ l_2: & \left(\frac{P_3}{P_2} - \frac{P_1}{P_2 R_0 C} - \frac{1}{L} \right) x_1 + \frac{P_1}{P_2 C} x_2 + Q(t) = \frac{U_{in}}{L} \end{aligned} \quad (13)$$

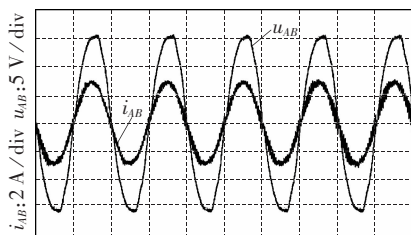
滑模切换面函数中 x_1 和 x_2 的系数分别代表系统稳态和动态调节的特性,即 P_1/P_2 值越大,其动态性就越好; P_3/P_2 值越大,其稳态性就越好。如何选择 P_1, P_2 和 P_3 是滑模控制设计的关键。就本文中单 Buck 逆变器而言,一般情况令 $P_2=1, P_1=C/L$, 且 $P_3=1/(R_0 L)$ 使 P_3/P_2 值较大,因此在保证动态性能前提下,积分环节使稳态终值误差很小。

3 实验装置与结果

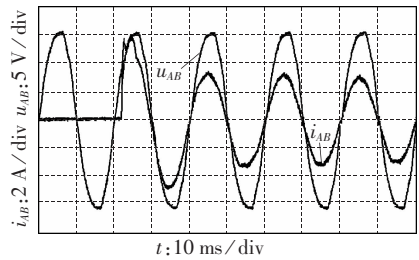
根据图1拓扑组建单 Buck 逆变器实验系统,实验参数:输入电压 $U_{in}=24\text{ V}$ (2节铅酸电池串联获得),输出电压 $u_{AB}=16\sin(100\pi t)$, $C=2 \times 56\text{ }\mu\text{F}$, $L=200\text{ }\mu\text{H}$, $R_0=5\text{ }\Omega$ 。同时分别采用传统的 PD 控制(比例系数 $k_p=20$ 、微分系数 $k_d=3 \times 10^{-3}$)和三阶系统全状态积分滑模控制作为实验系统的控制策略,下面给出实验结果和分析。

3.1 传统 PD 控制单 Buck 逆变器实验结果

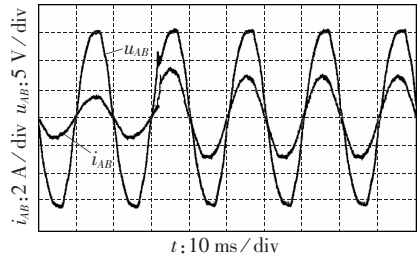
图4(a)为 PD 控制下满载稳态时输出电压、电流波形,图4(b)和(c)为负载突变时电压、电流输出波形。实验结果表明:采用 PD 控制有较好的输出波形,但输出电压过峰值时产生较大的畸变,稳态性能较差,稳态误差较大;负载突变时,输出电流畸变很大,空载到满载时输出电流进入稳态较慢(30 ms),系统动态性能和抗负载扰动性能较差,鲁棒性不强。



(a) 满载时输出波形



(b) 空载到满载时输出波形



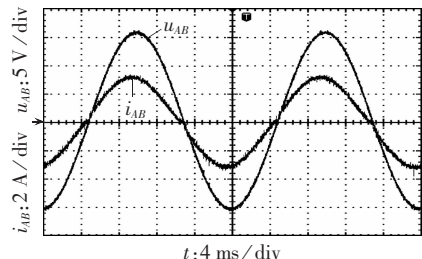
(c) 轻载到满载时输出波形

图4 满载时稳态和负载突变时输出波形(传统 PD 控制)

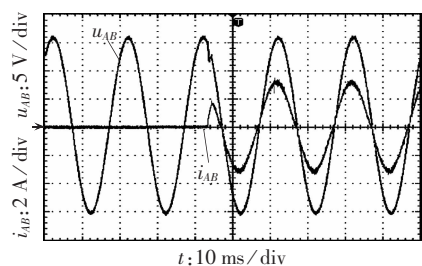
Fig.4 Steady-state and transient output waveforms(PD control)

3.2 滑模控制实验结果

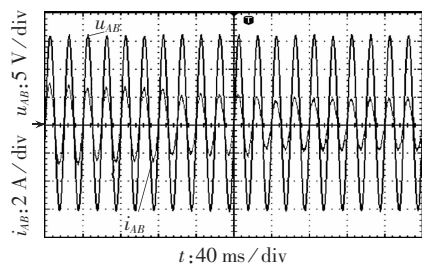
图5(a)为滑模控制下满载稳态时输出电压和电流波形,图5(b)和(c)为负载突变时电压和电流



(a) 满载时稳态输出波形



(b) 空载切换到满载时输出波形



(c) 满载切换为轻载时输出波形

图5 满载时稳态和负载突变时输出波形(滑模控制)

Fig.5 Steady-state and transient output waveforms(sliding-mode control)

波形。系统在满载时输出电压稳态误差如表 1 所示(表中, U_{ref} 为参考电压, U_{AB} 为输出电压, ΔU 为电压误差)。实验结果表明: 电路有较好的输出波形, 带有积分控制具有良好的稳态性能, 能够减小系统的终值误差; 系统具有非常好的动态性能和抗负载扰动性能; 相比 PD 控制, 积分滑模控制具有优良的动态特性和稳态性能。

表 1 输出电压稳态精度表

Tab.1 Steady-state error of output voltage

U_{ref}	U_{AB}	ΔU
15.50	15.48	-0.02
14.71	14.74	0.03
12.89	12.88	-0.01
10.30	10.31	0.01
8.19	8.17	-0.02
6.13	6.15	0.02
4.47	4.44	-0.03

4 结论

本文基于新型单 Buck 逆变器采用了一种新颖的三阶系统全状态积分滑模控制策略。文中给出其电路三阶动态模型和电路工作原理, 同时采用李导数清楚地阐述了滑模控制器的设计。实验结果表明: 相比传统 PD 控制策略, 三阶积分滑模控制大幅减小了稳态终值误差, 且输出具有强鲁棒性和良好的动态性能; 同时验证所采用的控制策略的正确性, 为逆变系统提高稳定性、动态性能和减小稳态误差提供了一种新的思路和控制策略。

参考文献:

- [1] 林渭勋. 现代电力电子电路[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002: 154-157.
- [2] 谢运祥, 邱添泉. 基于 Buck 变换的新型逆变器及其稳定性分析[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2006, 34(10): 73-76.
XIE Yunxiang, QIU Tianquan. A novel inverter based on Buck conversion and its stability analysis[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2006, 34(10): 73-76.
- [3] CARERES R, BARBI I. A boost DC-AC converter: analysis, design, and experimentation[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1999, 14(1): 134-141.
- [4] YANG Zhaohong, SEN P C. Analysis of a novel bidirectional DC-to-AC[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 2000, 47(5): 747-757.
- [5] 马皓, 韩思亮. 新型功率放大器时变滑模控制方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 55-59.
MA Hao, HAN Siliang. Time-dependent sliding surface for novel AC power amplifier[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 55-59.
- [6] UTKIN V I. Variable structure systems with sliding modes[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1977, 22(2): 212-222.
- [7] CARPITA M, MARCHESONI M. Experimental study of a power conditioning system using sliding mode control[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1996, 11(5): 731-741.
- [8] 张昌凡, 王耀南. 滑模变结构的智能控制及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(3): 27-29.
ZHANG Changfan, WANG Yaonan. An intelligent control using sliding mode variable structure and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(3): 27-29.
- [9] BOCK S A, PINHEIRO J R, GRUNDLING H, et al. Existence and stability of sliding modes in bi-directional DC-DC converters[C]//Power Electronics Specialists Conference, Vancouver, 2001. PESC. 2001 IEEE 32nd Annual. Vancouver, Canada: IEEE, 2001: 1277-1282.
- [10] SPIAZZI G, MATTAVELLI P. Sliding mode control of switched mode power supplies of the "the power electronics handbook" [M]. Florida, USA: CRC Press, 2002: 321-368.
- [11] 张黎, 丘水生. 滑模控制逆变器的分析与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 59-63.
ZHANG Li, QIU Shuisheng. Analysis and experimental study of sliding mode control inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 59-63.
- [12] 汤赐, 罗安, 周柯, 等. 新型注入式混合有源滤波器的滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 99-103.
TANG Ci, LUO An, ZHOU Ke, et al. Sliding mode control of new injection type hybrid active filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 99-103.
- [13] BIEL D, FOSSAS E, GUINJOAN F, et al. Application of sliding-mode control to the design of a buck-based sinusoidal generator[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2001, 48(3): 563-571.
- [14] TAI T L, CHEN J S. UPS inverter design using discrete-time sliding mode control scheme[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(1): 67-75.
- [15] 蔡宣三, 龚绍文. 高频功率电子学[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 237-239.
- [16] 黄赋光, 谢运祥, 杨苹. 新型 Boost 逆变器的积分滑模控制[J]. 电力电子技术, 2004, 38(1): 7-9.
HUANG Fuguang, XIE Yunxiang, YANG Ping. Integral sliding mode control in a novel Boost inverter[J]. Power Electronics, 2004, 38(1): 7-9.
- [17] 郑雪生, 李春文, 汤洪海, 等. 三相 PWM 电压型逆变器的积分滑模控制[J]. 电工技术学报, 2007, 22(12): 105-109.
ZHENG Xuesheng, LI Chunwen, TANG Honghai, et al. Integral sliding mode control for three-phase PWM voltage source inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(12): 105-109.
- [18] NIU Y G, HO D W C, LAM J. Robust integral sliding mode control for uncertain stochastic systems with time-varying delay[J]. Automatic, 2005, 41(5): 873-880.

(编辑: 柏英武)

作者简介:

陈江辉(1975-), 男, 湖南湘潭人, 博士研究生, 主要研究方向为中小功率逆变器、电力电子电路和新能源供电系统(E-mail: jianghuichen@hotmail.com);

谢运祥(1965-), 男, 湖南邵阳人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为功率电子变换技术、无功补偿、供电系统和电力电子系统集成;

严伟加(1980-), 男, 湖南湘潭人, 工程师, 主要研究方向为功率电子变换技术和电源系统集成。

Third-order integral sliding-mode control for single Buck inverter

CHEN Jianghui¹, XIE Yunxiang¹, GONG Weiyong¹, Jarvy.Yan²

(1.College of Electric Power,South China University of Technology,Guangzhou 510640,China;

2. Emerson Network Power Co.,Ltd.,Shenzhen 518101,China)

Abstract: In order to further improve the precision of inverter sliding-mode controller,the third-order integral sliding-mode control strategy is studied for the single Buck inverter composed of a bi-directional Buck converter and a bridge-type diverter. The dynamic model of its equivalent circuit is built with state space average method,the sliding-mode controller is designed with Lie derivative method,and the selection of sliding-mode switching surface coefficients is analyzed. Experimental results show that, compared with the traditional PD control,the third-order integral sliding-mode control greatly reduces the final steady-state error,improves the system static and dynamic performances,and weakens the interference and excursion,verifying its correctness.

The work is supported by the Natural Science Foundation of Guangdong(05006521).

Key words: Buck inverter; third-order integral sliding-mode control; steady-state error; Lie derivative; state space average method