

新型Buck-Boost矩阵变换器的双闭环控制策略

张小平^{1,2}, 朱建林³, 唐华平², 张炳根⁴, 宋芳¹

(1. 湖南科技大学 信息与电气工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083;
3. 湘潭大学 信息工程学院, 湖南 湘潭 411105; 4. 湖南交通职业技术学院 机电工程系, 湖南 长沙 410004)

摘要: 为了克服传统矩阵变换器电压传输比低的缺陷, 提出了新型Buck-Boost矩阵变换器, 采用双闭环控制策略进行控制. 介绍了该控制策略的基本原理与设计方法, 对比分析了该控制策略与滑模控制及离散滑模控制的各种特性, 并通过仿真对其控制效果进行了验证. 结果表明: 该控制策略不仅具有比滑模控制和离散滑模控制更加优良的动态性能, 而且还具有更强的谐波抑制能力, 其输出波形的谐波失真度更小, 稳态精度更高, 因而具有更好的应用价值.

关键词: Buck-Boost矩阵变换器; 双闭环控制策略; 对比分析; 仿真

中图分类号: TM46 **文献标识码:** A

A double-loop control strategy for the new Buck-Boost matrix converter

ZHANG Xiao-ping^{1,2}, ZHU Jian-lin³, TANG Hua-ping², ZHANG Bing-gen⁴, SONG Fang¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;
3. College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan Hunan 411105, China;
4. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Communication Polytechnic, Changsha Hunan 410004, China)

Abstract: Because of the low voltage transfer ratio in a conventional matrix converter and no improvement can be made by employing different control strategies, a new Buck-Boost matrix converter is proposed by employing a double-loop control strategy. The fundamental principle of this control strategy and its design method are introduced. Various characteristics are then compared among this control strategy, the sliding mode control and the discrete sliding mode control. The validity of this control strategy is also tested by simulation. The results show that the double-loop control strategy makes the system in better dynamic performance and stronger harmonic suppression than the sliding mode control and the discrete sliding mode control, and achieves lower harmonic distortion and higher steady-state precision. These are the most valuable advantages of the proposed converter in engineering applications.

Key words: Buck-Boost matrix converter; double-loop control strategy; comparison analysis; simulation

1 引言(Introduction)

矩阵变换器因具有简单的拓扑结构和一系列理想的电气特性^[1,2], 而一直成为电力电子领域研究的热点. 然而由于存在电压传输比低等缺陷^[3], 使其至今还未得到推广应用. 为此, 文[4]从改变矩阵变换器主电路拓扑结构出发进行研究, 提出了一种具有高电压传输比的新型Buck-Boost矩阵变换器(Buck-Boost matrix converter, BBMC)的主电路拓扑结构. 并且针对该拓扑结构的逆变级, 提出采用滑模控制策略进行控制, 取得了较好的效果. 但该控制策略存在开关频率不固定以及因未能实现对电感电流的直接控制而在系统出现异常时可能导致控制失败等缺

点. 文[5]针对BBMC提出采用离散滑模控制策略, 虽有效解决了开关频率不固定的问题, 但仍未能实现对电感电流进行直接控制. 本文为此提出采用双闭环控制策略对其进行控制, 则有效解决了上述问题. 文中对该控制策略的基本原理与设计方法进行了说明, 对其控制效果进行了仿真研究, 并与滑模控制及离散滑模控制所具有的不同特点进行了对比分析.

2 BBMC拓扑结构简介(Brief introduction on topology of BBMC)

三相-三相BBMC的拓扑结构如图1所示^[4]. 该结构采用AC-DC-AC两级变换器的结构形式, 中间直

流环节无储能元件;其整流级为一个3/2相矩阵变换器,逆变级则采用三相Buck-Boost逆变器的结构形式,它由3个电流可双向流动的Buck-Boost DC-DC变换器组成;三相负载采用Y型连接,跨接于三相逆变器的输出端。

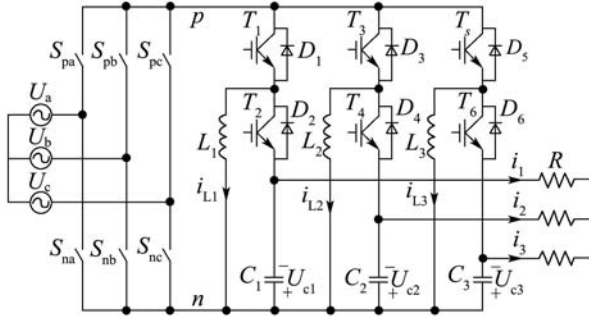


图1 三相-三相BBMC拓扑结构

Fig. 1 The topology of three phase-three phase BBMC

3 BBMC控制策略研究(Study on the control strategy of BBMC)

根据BBMC在结构和功能上分为整流级和逆变级两部分并可独立控制的特点,分别对其研究采用了不同的控制策略。

3.1 整流级控制策略(The control strategy of the rectifier)

BBMC的整流级采用无零矢量的空间矢量调制策略^[6]。

设三相输入电源电压为

$$\begin{cases} u_a = U_m \cos \theta_a = U_m \cos(\omega t), \\ u_b = U_m \cos \theta_b = U_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}), \\ u_c = U_m \cos \theta_c = U_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}). \end{cases} \quad (1)$$

其中: ω 为输入角频率, U_m 为输入相电压幅值。

根据文献[6],在保证单位输入功率因数的条件下,在一个PWM开关周期内整流输出电压的局部平均值为

$$\bar{u}_{dc} = \frac{3U_m}{2 \cos \theta_{in}}, \quad (2)$$

其中

$$\cos \theta_{in} = \max(|\cos \theta_a|, |\cos \theta_b|, |\cos \theta_c|).$$

3.2 逆变级控制策略(The control strategy of the inverter)

先简要介绍一下滑模控制与离散滑模控制的主要特点及基本原理,再重点分析双闭环控制策略的工作原理与设计方法。

3.2.1 滑模控制与离散滑模控制简介(Brief introduction on sliding mode control and discrete sliding mode control)

滑模控制的主要特点在于它对系统的模型误差和参数变化具有鲁棒性^[4]。其基本工作原理是:以逆变器中电容电压与电感电流为状态变量,由状态变量与其参考值的偏差的线性组合构建滑模面函数。在实际应用中,该滑模面函数由硬件电路实现,由硬件电路产生的滑模信号加到一个滞环比较器,由其产生控制信号来控制Buck-Boost变换器中的功率开关,通过调节状态变量的大小使滑模面函数维持在零附近,从而实现输出电压对其参考信号的准确跟踪。

离散滑模控制相对于滑模控制的主要特点在于它使系统具有固定的开关频率^[5,7]。该控制策略通过将逆变级状态方程离散化而得到其差分方程,根据设定的输出变量函数及其参考输出函数而得到系统的跟踪误差,结合该跟踪误差所满足的2阶动态差分方程及滑模存在条件可得到系统的离散滑模面方程,据此可实现针对逆变级状态变量的离散滑模控制。

3.2.2 双闭环控制的基本原理与设计方法(The fundamental principle of double-loop control and its design method)^[8]

该控制策略通过两个控制闭环实现对Buck-Boost变换器中两个状态变量的解耦控制,不仅控制方案简单,而且由于它实现了对电感电流的直接控制而使它对外部干扰具有很强的鲁棒性,即使在非线性负载、负载突变或瞬间短路等恶劣情况下也能保证系统的稳定运行,因而具有很高的可靠性。下面先基于局部平均值的概念建立其数学模型,再阐述其具体设计方法。

为简化分析,以第1相Buck-Boost DC-DC变换器为例(其他两相的情况相同),其数学模型为

$$u_{L1} = d_1 \bar{u}_{dc} - (1 - d_1) u_{C1}, \quad (3)$$

$$i_{C1} = (1 - d_1) i_{L1} + i_1. \quad (4)$$

其中: u_{C1} 和 i_{C1} 分别为电容 C_1 的电压和电流, u_{L1} 和 i_{L1} 分别为电感 L_1 的电压和电流, $\bar{u}_{dc}$ 为直流输入电压, i_1 为输出电流, d_1 为占空比,下标1表示第一相Buck-Boost变换器。

电感 L_1 和电容 C_1 的传递函数为

$$\frac{I_{L1}(s)}{U_{L1}(s)} = \frac{1}{r_{L1} + L_1 s}, \quad (5)$$

$$\frac{U_{C1}(s)}{I_{C1}(s)} = \frac{1 + r_{C1} C_1 s}{C_1 s}, \quad (6)$$

其中 r_{L1} 和 r_{C1} 分别为电感 L_1 和电容 C_1 的等效电阻.

上述数学模型准确地描述了Buck-Boost变换器的基本特性,在此基础上提出双闭环控制策略,它由电感电流控制内环和电容电压控制外环组成.

电感电流控制内环如图2所示,它以式(3)(5)为其数学模型.该控制环通过对电感电流的直接控制而达到了提高系统可靠性的目的.为简化控制方案,该控制环以电感电压为控制变量,即作为PI控制器的输出.下面简述其基本工作原理:

由图2可见,以电感电流的参考值与其实值的偏差作为PI控制器的输入,其输出作为电感电压的参考值 u_{L1ref} .由式(3)有

$$d_1 = \frac{u_{C1} + u_{L1ref}}{u_{C1} + \bar{u}_{dc}}. \quad (7)$$

通过上式即可求得占空比 d_1 ,将 d_1 经限幅后作用于Buck-Boost变换器,控制其功率开关 T_1 和 T_2 的导通时间,从而调节电感电流使其按参考值变化.其中PI控制器可按常规方法设计,限幅环节在于避免电感电流出现异常值.

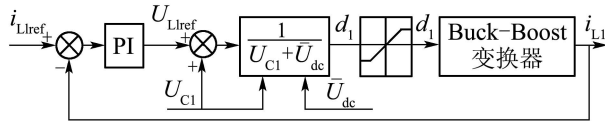


图2 电感电流控制内环原理框图

Fig. 2 Schematic diagram of the inner control loop for inductor current

电容电压控制外环如图3所示,它以式(4)(6)为其数学模型.该控制环的作用在于使电容电压按设定的参考值变化,从而获得所需的输出电压.同样,为简化控制方案并实现外环与内环之间的解耦控制,该控制环以电容电流为控制变量,即作为PI控制器的输出.其基本工作原理是:

以电容电压的参考值与其实值的偏差作为PI控制器的输入,其输出作为电容电流的参考值 i_{C1ref} .由式(4)可得:

$$i_{L1ref} = \frac{i_{C1ref} - i_1}{1 - d_1}. \quad (8)$$

通过上式即可求得内环电感电流的参考值.但式中占空比 d_1 由控制内环确定,为实现外环与内环之间的解耦控制, $(1 - d_1)$ 可由下式近似表示.

$$1 - d_1 \approx \frac{\bar{u}_{dc}}{u_{C1} + \bar{u}_{dc}}. \quad (9)$$

将产生的电感电流参考值经限幅后作用于控制内环,进而通过改变占空比 d_1 调节电感电流和电容电压,使电容电压按设定的参考值变化,从而达到控

制输出电压的目的.

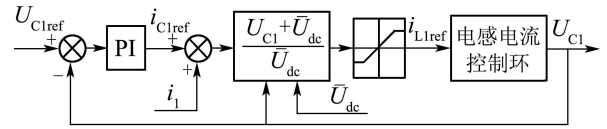


图3 电容电压控制外环原理框图

Fig. 3 Schematic diagram of the outer control loop for capacitor voltage

4 仿真分析(Simulation and analysis)

为验证双闭环控制策略的控制效果并便于同滑模控制及离散滑模控制进行对比分析,采用MATLAB对上述3种控制策略同时进行仿真研究.假设三相输入电源,功率开关,电感及电容等均为理想元件.仿真参数设置如下:

输入为对称三相电源,其相电压有效值与频率分别取:220 V/50 Hz;电感与电容分别取: $L_i = 450 \mu\text{H}$, $C_i = 70 \mu\text{F}$, $i = 1 \sim 3$;采用三相对称阻感负载,其电阻和电感分别为: $R_j = 50 \Omega$, $L_j = 300 \mu\text{H}$, $j = 1 \sim 3$;滑模控制系数取: $k_1 = 0.1$, $k_2 = 0.09$;2阶差分方程参数取: $\lambda_1 = -1.89$, $\lambda_2 = 0.89$;电压控制环PI控制器参数取: $k_P = 5.5$, $k_I = 8 \times 10^{-4}$;电流控制环PI控制器参数取: $k_P = 50$, $k_I = 1.24 \times 10^{-4}$;PWM开关频率取20 kHz.为验证BBMC变压变频的性能,仿真分稳态分析和动态分析两种情况进行:

4.1 稳态分析 (Steady-state analysis)

稳态分析在于验证系统对频率与幅值固定的参考信号的跟踪情况.任取参考信号分别为450 V/75 Hz及150 V/25 Hz(对应于相电压幅值/频率).仿真波形如图4~6所示.其中图4为a相输入电压 u_a 与输入电流 i_a 的波形,由于滤波电容的作用,使 i_a 的相位略超前 u_a ;图5和图6则分别为参考电压设为450 V/75 Hz和150 V/25 Hz时对应于3种控制策略的三相输出电压仿真波形;仿真结果分别见表1和表2,其中THD表示总谐波失真度.

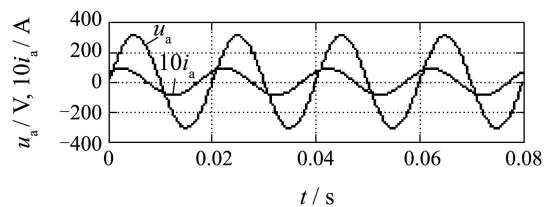
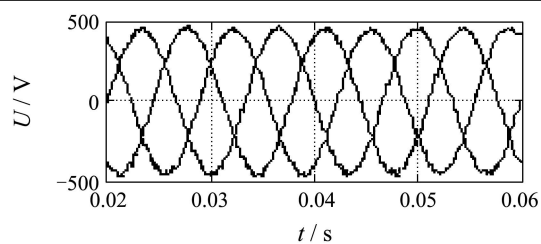
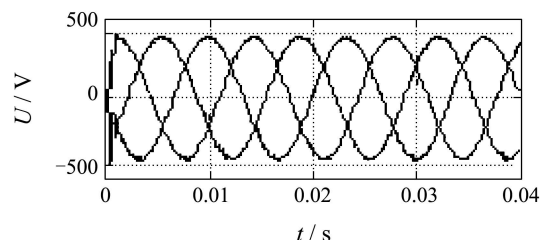


图4 a相输入电压与输入电流波形

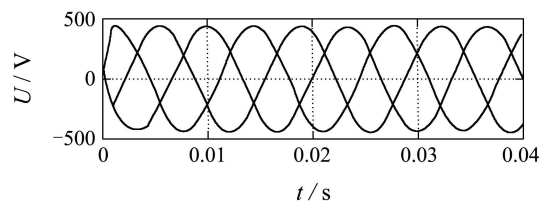
Fig. 4 The simulation waveforms of a phase voltage and current



(a) 滑模控制

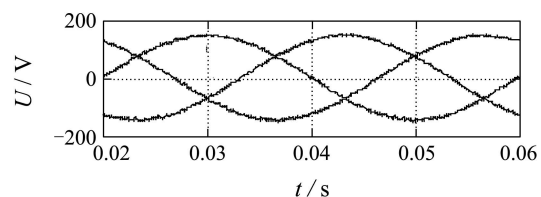


(b) 离散滑模控制

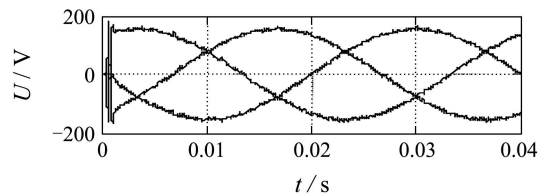


(c) 双闭环控制

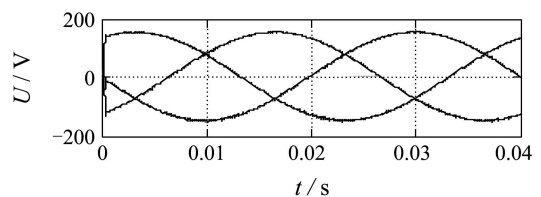
图5 参考电压设为450 V/75 Hz时的三相电压波形
Fig. 5 The simulation waveforms of three-phase output voltage under expect output 450 V/75 Hz



(a) 滑模控制



(b) 离散滑模控制



(c) 双闭环控制

图6 参考电压设为150 V/25 Hz时的三相电压波形
Fig. 6 The simulation waveforms of three-phase output voltage under expect output 150 V/25 Hz

表1 参考电压设为450 V/75 Hz时的仿真结果

Table 1 The simulation results under expect output 450 V/75 Hz

控制方式	电压/频率/THD
滑模控制	449.2 V/75 Hz/1.74%
离散滑模控制	457.8 V/75 Hz/1.24%
双闭环控制	448.9 V/75 Hz/0.53%

表2 参考电压设为150 V/25 Hz时的仿真结果

Table 2 The simulation results under expect output 150V/25Hz

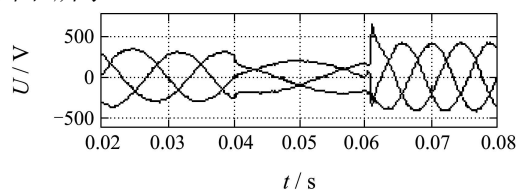
控制方式	电压/频率/THD
滑模控制	148.3 V/25 Hz/1.71%
离散滑模控制	149.3 V/25 Hz/0.98%
双闭环控制	148.7 V/25Hz/0.60%

4.2 动态分析(Dynamic-state analysis)

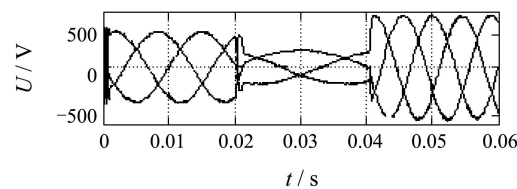
动态分析在于验证系统在运行中当参考信号或负载发生突变时的运行情况,以此来评价系统的动态性能. 仿真分两种情况进行:

第1种情况 负载不变,参考信号发生突变. 如取参考信号由311 V/50 Hz突变至150 V/25 Hz,又突变至450 V/75 Hz. 仿真波形如图7所示.

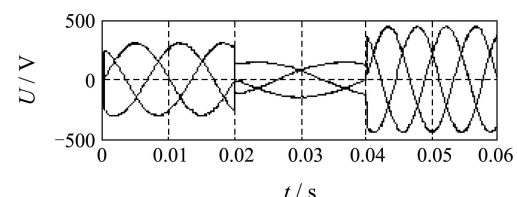
第2种情况 参考信号不变,负载发生突变. 如取参考信号为311 V/50 Hz,负载电阻由50 Ω 突变至25 Ω 又回到50 Ω ,相应的输出相电压与相电流波形如图8所示.



(a) 滑模控制



(b) 离散滑模控制



(c) 双闭环控制

图7 参考信号发生突变时的三相输出电压波形
Fig. 7 Simulation waveforms of three-phase output voltage for a sudden change in the reference signal

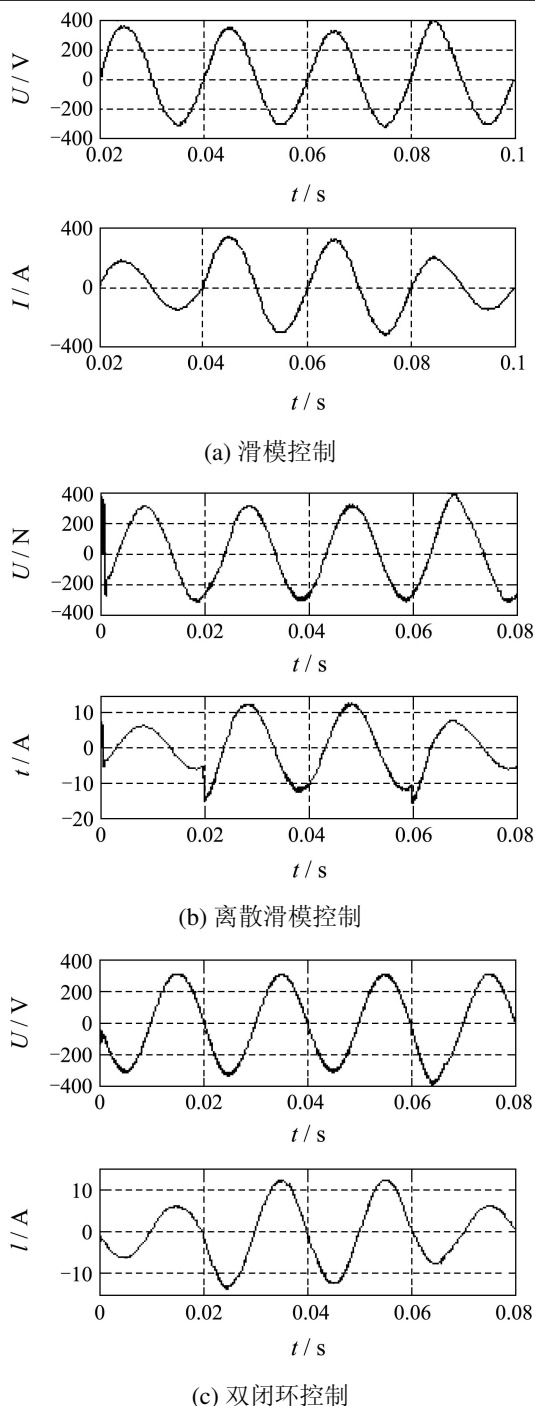


图8 负载电阻由 $50\ \Omega$ 突变至 $25\ \Omega$ 又回到 $50\ \Omega$ 时的三相输出电压波形

Fig. 8 Simulation waveforms of three-phase output voltage for a sudden change in the load from $50\ \Omega$ to $25\ \Omega$ and then to $50\ \Omega$

5 逆变级3种控制策略的对比分析(Comparison of the three control strategy for the inverter)

根据上述仿真分析及相应的仿真结果,对双闭环控制与滑模控制及离散滑模控制进行对比分析如

下:

1) 3种控制方案的共同点:

① 3种控制方案均能使BBMC实现输出电压和频率的任意调节,其电压传输比既可大于1、也可小于1;且输出电压能较准确地按设定的参考值变化,输出频率和参考值基本一致。

② 3种控制方案均能使BBMC直接输出较标准的三相对称正弦波而无需滤波环节,谐波失真度小。

2) 3种控制方案的稳态和动态性能比较:

① 在稳态情况下,以双闭环控制对应输出波形的谐波失真度最小,输出波形质量最好,离散滑模控制次之,而滑模控制对应输出波形的谐波失真度最大。

② 动态性能方面,从输出波形的动态响应来看,滑模控制从运行开始至进入稳态之前,输出波形会出现较大的超调,过渡过程时间较长;比较而言,离散滑模控制起动过程的超调较小,过渡过程时间较短;而双闭环控制的起动过程几乎无超调,过渡过程时间很短,系统能很快进入稳定状态;当运行条件发生突变,如参考输出电压或者负载发生突变时,也有上述同样的结果。说明双闭环控制的动态特性最好,离散滑模控制次之,而滑模控制更次之。

3) 3种控制方案其他优缺点的比较:

① 滑模控制的优点在于它对系统的模型误差和参数变化具有鲁棒性,另外其硬件和软件实现均较简单。其缺点在于它所涉及的相关理论较复杂、开关频率不固定、滑模控制系数的选择较困难以及由于未能实现对电感电流的直接控制而在系统出现异常情况时可能导致控制失败等;其次,其基于模拟电路的实现方式还存在易受干扰及漂移等因素影响的缺点。

② 离散滑模控制相对于滑模控制的主要优点在于它使系统获得了固定的开关频率,另外其基于数字式的实现方式,还使系统具有控制灵活、移植方便等优点。该控制策略的缺点同滑模控制一样,也包括它所涉及的相关理论复杂、控制参数的选择较困难以及未能实现对电感电流的直接控制而在系统出现异常时可能导致控制失败等;另外,在相同输出电压的情况下,离散滑模控制所需直流偏置电压较滑模控制和双闭环控制都要大,因而相应的开关损耗亦较大。

③ 双闭环控制的优点在于因其实现了对电感电流的直接控制而使系统对外部干扰具有很强的鲁棒性,控制系统因而具有很高的可靠性;其次,该控制策略的基本原理和控制算法都较简单,系统设计实现均较容易等。其缺点在于相对于另外两种控制

策略来说,其控制系统每相都增加了1个电流检测模块,硬件成本略有提高.

通过上述分析可见,从控制系统所获得的动态与稳态性能、系统的抗干扰能力、有关控制系统设计与具体实现的难易等方面比较,双闭环控制策略相对于滑模控制与离散滑模控制都具有较明显的优势,因而具有更好的应用价值.

6 结论(Conclusion)

针对为克服传统矩阵变换器电压传输比的缺陷而提出的新型Buck-Boost矩阵变换器(BBMC),提出采用双闭环控制策略进行控制.介绍了该控制策略的基本原理与设计方法,对比分析了该控制策略与滑模控制及离散滑模控制的不同特点,并对3种控制策略的控制效果进行了对比仿真分析.结果表明:双闭环控制不仅具有比滑模控制和离散滑模控制更加优良的动态性能,而且还具有更强的谐波抑制能力,其输出波形的谐波失真度更小,稳态精度更高,因而具有更好的应用价值.

参考文献(References):

- [1] HUBER L, BOROJEVIC D. Space vector modulated three-phase to three-phase matrix converter with input power factor correction[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1995, 31(6): 1234 – 1246.
- [2] CASADEI D, GRANDI G, SERRA G, et al. Space vector control of matrix converters with unity input power factor and sinusoidal input/output waveforms[C]//*Fifth European Conference on Power Electronics and Applications*. Brighton, UK: IEEE Press, 1993, 7: 170 – 175.
- [3] ALESINA A, VENTURINI M G B. Analysis and design of optimum-amplitude nine-switch direct AC-AC converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1989, 4(1): 101 – 112.
- [4] 张小平, 朱建林, 唐华平, 等. 一种新型Buck-Boost矩阵变换器[J]. 信息与控制, 2008, 37(1): 40 – 45.
(ZHANG Xiaoping, ZHU Jianlin, TANG Huaping, et al. A novel Buck-Boost matrix converter[J]. *Information and Control*, 2008, 37(1): 40 – 45.)
- [5] 张小平, 朱建林, 唐华平, 等. 基于离散滑模控制的新型Buck-Boost矩阵变换器[J]. 高技术通讯, 2008, 18(2): 179 – 183.
(ZHANG Xiaoping, ZHU Jianlin, TANG Huaping, et al. A novel Buck-Boost matrix converter based on discrete sliding mode control[J]. *Chinese High Technology Letters*, 2008, 18(2): 179 – 183.)
- [6] 邓文浪, 杨欣荣, 朱建林, 等. 18开关双级矩阵变换器的空间矢量调制策略及其仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 84 – 90.
(DENG Wenlang, YANG Xinrong, ZHU Jianlin, et al. Space vector modulation strategy of two-stage matrix converter with 18 switches and it's simulation study[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2005, 25(15): 84 – 90.)
- [7] 孟光伟, 瞿少成, 蔡汉强, 等. 基于离散变结构控制的DC/DC变换器[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(1): 63 – 65.
(MENG Guangwei, QU Shaoheng, CAI Hanqiang, et al. Design of DC/DC converter based on discrete variable structure control theory[J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(1): 63 – 65.)
- [8] SANCHIS P, URSUA A, GUBIA E, et al. Buck-boost DC-AC inverter: proposal for a new control strategy[C]// *Proceedings of the IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference(PESC)*. Aachen, Germany: IEEE Press, 2004, 5: 3994 – 3998.

作者简介:

张小平 (1966—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为电力电子与电力传动, E-mail: zxp836@163.com;

朱建林 (1942—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力电子与电力传动、计算机控制等, E-mail: zjl@xtu.edu.cn;

唐华平 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为机电系统智能控制, E-mail: huapingt-csu@163.com;

张炳根 (1969—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为机电控制系统, E-mail: zbg819@126.com;

宋芳 (1974—), 女, 讲师, 主要研究方向为计算机应用, E-mail: fsong@hnust.edu.cn.