

一种基于双闭环控制策略的新型矩阵变换器研究

张小平¹⁾²⁾ 朱建林³⁾ 文泽军¹⁾ 岳舟³⁾ 柳莎莎³⁾

1) 湖南科技大学机械设备健康维护湖南省重点实验室, 湘潭 411201)

2) 湖南科技大学信息与电气工程学院, 湘潭 411201)

3) 湘潭大学信息工程学院, 湘潭 411105)

(2006 年 11 月 12 日收到, 2006 年 11 月 17 日收到修改稿)

针对传统矩阵变换器存在电压传输比低的缺陷, 提出一种新型的矩阵变换器, 称为 Boost 交直交矩阵变换器的电路拓扑结构. 介绍了该拓扑结构的基本构成和工作原理, 分析推导了其电压传输比与占空比之间函数关系的解析表达式, 着重阐述了所采用的双闭环控制策略的基本设计方法, 最后通过仿真对该新型电路拓扑的有效性和可行性进行了验证. 结果表明: 该电路能实现电压传输比和输出频率的任意调节, 且输出波形的正弦性好、失真度小, 从而有效地解决了传统矩阵变换器电压传输比低的固有缺陷, 具有一定的应用价值.

关键词: boost 交直交矩阵变换器, 电压传输比, 双闭环控制策略, 仿真

PACC: 0670M

1. 引 言

矩阵变换器(matrix converter, MC)由于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. 经过多年来许多学者的不懈努力, 有关矩阵变换器的理论和控制方法得到了迅速发展. 然而到目前为止, 矩阵变换器还未进入真正的实用化, 除了控制算法复杂及缺乏有效的双向功率开关器件等原因外, 还有一个主要原因就是电压传输比低. Alesina 及 Venturini 曾从理论上证明了矩阵变换器在线性调制区的最大电压传输比为 0.866^[3], 它是制约矩阵变换器在诸如电力传动等要求电压传输比为 1 的领域应用的一个重要因素.

针对矩阵变换器存在电压传输比低的缺陷, 不少学者从改变控制策略入手进行了广泛的研究, 提出了一些可将电压传输比提高到 0.866 以上的方法^[4-7], 但效果不够理想, 如采用过调制法存在输出谐波过大的问题.

本文从改变矩阵变换器主电路拓扑结构出发进行研究, 提出一种新型的矩阵变换器电路拓扑结构, 如图 1 所示. 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, 其整流级和常规交直交矩阵变换器的整流级相同, 为一个 3/2 相矩阵变换器, 逆变级则采用 Boost 逆变器的结构形

式. 由于该拓扑结构和常规交直交矩阵变换器的拓扑结构相似, 本文称之为 Boost 交直交矩阵变换器(Boost AC-DC-AC matrix converter, BMC). 文中对这种新型电路拓扑结构进行了说明, 对其工作原理进行了分析, 并通过 Matlab 对其进行了仿真验证. 结果表明: 该拓扑结构可实现输出电压和频率的任意调节, 其电压传输比既可大于 1.0, 也可小于 1.0, 从而有效解决了矩阵变换器电压传输比低的难题.

2. BMC 基本工作原理

三相-三相 BMC 的拓扑结构如图 1 所示. 其整流部分为一个 3/2 相矩阵变换器, 其中 6 个开关为双向开关(由两个带反向二极管的单向开关串联组成), 它将三相交流整流成 PWM 调制的直流电压. 逆变部分采用三相 Boost 逆变器, 它由三个电流可双向流动的 Boost DC-DC 变换器组成^[8-11], 其主要特点是通过调节占空比, 可实现其交流输出电压的任意调节, 即其交流输出电压既可高于、也可低于其直流输入电压. 相对于该新型拓扑结构, 传统矩阵变换器的逆变环节(交直交型存在实际的整流和逆变环节, 而交交型可等效为虚拟的整流和逆变环节)可看作是一个常规的电压源逆变器, 在线性调制区它只能实现降压输出, 即其交流输出电压只能低于其直流输入电压, 这正是造成传统矩阵变换器电压传

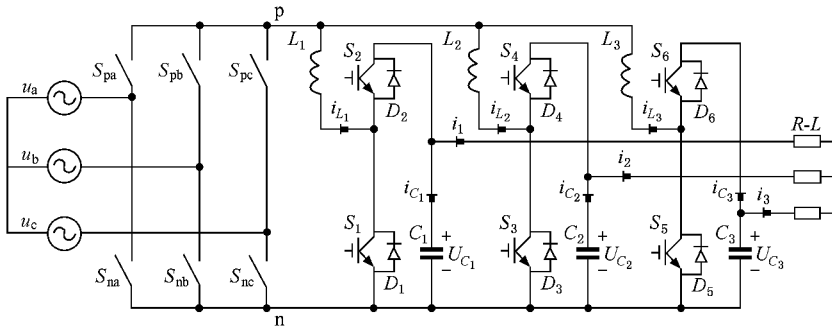


图 1 三相-三相 BMC 拓扑结构

输比低的根本原因;因此采用 Boost 逆变器来取代上述常规电压源逆变器,因其可实现交流输出电压,也即电压传输比的任意调节,从而可从根本上解决传统矩阵变换器电压传输比低的难题.三相负载采用 Y 形连接,跨接于三相逆变器的输出端.在实际应用中,每相 Boost DC-DC 变换器的参考电压设置为具有相同直流偏置的正弦信号,且正弦信号的幅值相同,相位差互为 120° .由于在负载两端得到的直流偏置电压具有相同量值而相互抵消,因而在三相负载上得到的就是三相对称的正弦交流电压.下面简述其基本工作原理.

整流部分采用无零矢量的空间矢量调制策略^[12],它在一个 PWM 开关周期内只产生两个有效的空间矢量,而不会出现零矢量,因而可获得最大的整流输出电压.

设三相输入电压为

$$\begin{aligned} u_a &= U_m \cos \theta_a = U_m \cos(\omega_i t), \\ u_b &= U_m \cos \theta_b = U_m \cos\left(\omega_i t - \frac{2}{3}\pi\right), \\ u_c &= U_m \cos \theta_c = U_m \cos\left(\omega_i t + \frac{2}{3}\pi\right), \end{aligned} \quad (1)$$

其中 ω_i 为输入角频率, U_m 为输入相电压幅值.

根据文献 [12],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直流电压的局部平均值为

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

其中 $\cos\theta_m = \max(|\cos\theta_a|, |\cos\theta_b|, |\cos\theta_c|)$.

逆变部分为三相 Boost 逆变器.对于每相 Boost DC-DC 变换器(以第一相为例,其他两相相同)利用局部平均值的概念,可得其输出输入电压关系式为

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

式中 u_{C1} 为电容 C_1 两端的电压, d 为占空比.

由于 Boost DC-DC 变换器的输出电压为具有直流偏置的正弦电压,可设 $u_{C1} = u_{DC} + u_{O1}$,其中 u_{DC} 为电容电压的直流分量, u_{O1} 为电容电压的正弦分量,则有 $u_{O1} = u_{C1} - u_{DC}$.根据文献 [13],可得单相 Boost DC-DC 变换器交流输出电压相对于其直流输入电压的增益为

$$\frac{u_{O1}}{\bar{u}_{dc}} = \frac{2d - G_m(1-d)}{2(1-d)}, \quad (4)$$

其中 $G_m = u_{op}/\bar{u}_{dc}$, u_{op} 为单相 Boost 变换器交流输出电压峰-峰值.

将 (2) 式代入 (4) 式中,得 BMC 交流输出相电压相对于其输入相电压幅值的增益为

$$\frac{u_{O1}}{U_m} = \frac{3(2d - G_m(1-d))}{4(1-d)\cos\theta_m}. \quad (5)$$

可见在输入电压固定的情况下,通过调节占空比即可调节输出电压,达到改变电压传输比的目的.

由于每相 Boost DC-DC 变换器均工作于变工作点的工况,使其难以控制,为此必须采用合适的控制策略.本文采用双闭环控制策略进行控制,取得了较好的控制效果.下面先阐述其基本工作原理,再通过仿真对其进行验证.

3. 双闭环控制策略^[10,11]

该控制策略的主要优点在于它通过对电感电流的直接控制而使它对外部干扰具有极强的鲁棒性,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,因而具有极高的可靠性.

为简化分析,以第一相 Boost DC-DC 变换器为例

进行说明(其他两相的情况完全相同),其数学模型为

$$\bar{u}_{dc} - u_{L1} = (1 - d_1)u_{C1}, \quad (6)$$

$$i_{C1} + i_1 = (1 - d_1)i_{L1}, \quad (7)$$

其中 u_{C1} 和 i_{C1} 为电容 C_1 的电压和电流, u_{L1} 和 i_{L1} 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 Boost 变换器.

电感 L_1 和电容 C_1 的微分方程为

$$u_{L1} = r_{L1} i_{L1} + L_1 \frac{di_{L1}}{dt}, \quad (8)$$

$$i_{C1} + r_{C1} C_1 \frac{di_{C1}}{dt} = C_1 \frac{du_{C1}}{dt}, \quad (9)$$

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

由(8)(9)式并忽略电感电容的等效电阻得

$$\left(\bar{u}_{dc} - L_1 \frac{di_{L1}}{dt}\right)i_{L1} = \left(i_{C1} + C_1 \frac{du_{C1}}{dt}\right)u_{C1}. \quad (10)$$

可见,由于系统中含有两个动态元件,因而表现出二阶的动态特性.为了在变工作点的情况下实现对系统的有效控制,本文采用双闭环控制策略,它由电感电流控制内环和电容电压控制外环组成.其特点在于通过两个控制环实现对两个状态变量的解耦控制,从而达到简化控制方案,提高控制效果的目的.

电感电流控制内环如图 2 所示,它以(6)和(8)式为其数学模型.该控制环的作用在于通过对电感电流的直接控制而达到提高系统可靠性的目的.由于采用了闭环控制,使电感电流能准确地跟踪其参考值的变化,而其参考值由电压控制外环产生并限制了其取值范围,因此即使在系统出现异常的情况下也不会产生过流.为简化控制方案,该控制环以电感电压作为控制变量,即作为 PID 控制器的输出.下面简述其基本工作原理.

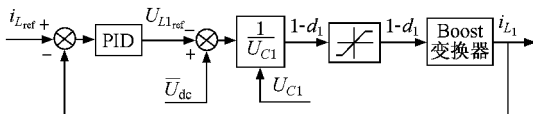


图 2 电感电流控制环

由图 2 可见,以电感电流的参考值与其实际值的偏差作为 PID 控制器的输入,其输出作为控制变量,即电感电压的参考值 u_{L1ref} . 由(6)式有

$$1 - d_1 = \frac{\bar{u}_{dc} - u_{L1ref}}{u_{C1}}. \quad (11)$$

通过上式即可求得占空比 d_1 , 将 $(1 - d_1)$ 经限幅后作为 Boost 变换器的输入信号,控制其功率开关 S_1 和 S_2 的开关时间,从而调节电感电流使其按参考值变化.控制环中的 PID 控制器可按常规方法设计,限幅环节的作用在于避免电感电流出现异常值.

电容电压控制外环如图 3 所示,它以(7)和(9)式为其数学模型.该控制环的作用在于使电容电压按设定的参考值变化,从而获得所需要的输出电压.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作为控制变量,即作为 PID 控制器的输出.其基本工作原理如图 3 所示.

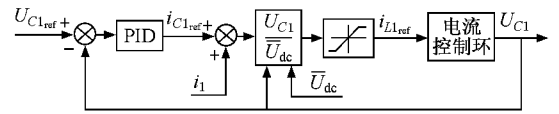


图 3 电容电压控制环

以电容电压的参考值与其实际值的偏差作为 PID 控制器的输入,其输出作为控制变量,即电容电流的参考值 i_{C1ref} . 由(7)式可得

$$i_{L1ref} = \frac{i_{C1ref} + i_1}{1 - d_1} \approx \frac{u_{C1}}{\bar{u}_{dc}}(i_{C1ref} + i_1). \quad (12)$$

通过上式即可求得内环电感电流的参考值.但式中要用到占空比 d_1 ,而它由控制内环确定,为实现外环与内环之间的解耦控制,可用 (u_{C1}/\bar{u}_{dc}) 近似代替 $1/(1 - d_1)$. 这种近似在电感 L_1 较小,电感能量的变化可忽略的时候是允许的,且可获得很好的控制效果.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.

4. 仿真分析

本文采用 Matlab 对提出的基于双闭环控制策略的 BMC 新型电路拓扑进行仿真分析^[14,15],并假设三相输入电压源,功率开关,电感及电容等元件均为理想元件.仿真参数设置如下:输入为对称三相电源,其相电压及频率分别为 $220\sqrt{2}$ V/50 Hz;电感与电容分别取 $L_i = 150 \mu\text{H}$, $C_i = 30 \mu\text{F}$,其中 $i = 1-3$;采用三相对称阻感负载,其电阻电感分别为 $R_f = 50 \Omega$, $L_f = 400 \mu\text{H}$,其中 $f = 1-3$;电压控制环中, PID 控制器的参数取: $k_p = 1$, $k_i = 8 \times 10^{-4}$, $k_D = 1 \times 10^{-5}$;

电流控制环中 ,PID 控制器的参数取 $k_p = 20$, $k_i = 1.24 \times 10^{-4}$, $k_d = 9 \times 10^{-6}$;PWM 开关频率取 30 kHz. 为说明该新型电路调压调频的效果 ,仿真分输出频率不变而改变输出电压及输出电压不变而改变输出频率两种情况进行.

第一种情况 ,输出频率不变 ,改变输出电压 ,取参考输出频率为 50 Hz ,输出相电压幅值分别为 450 V ,311 V ,150 V (分别对应电压传输比大于 1、等于 1 及小于 1). 仿真波形如图 4—6 所示 ,分别为上述三种情况的三相输出相电压波形及单相输出电压的频谱分析图 . 仿真结果见表 1.

第二种情况 ,输出电压不变 ,改变输出频率 ,仍取参考输出相电压幅值为 450 V (与图 4 的参考电压幅值一致) ,任取输出频率分别为 25 Hz ,100 Hz. 仿真波形如图 7 8 所示 ,仿真结果见表 2.

表 1 改变电压传输比的仿真结果

电压参考值/V	电压仿真值/V	频率仿真值/Hz	THD/%
450	449.8	50	1.28
311	309.9	50	1.12
150	148.3	50	1.47

表 2 改变输出频率的仿真结果

频率参考值/Hz	频率仿真值/Hz	电压仿真值/V	THD/%
25	25	448.8	1.62
50	50	449.8	1.28
100	100	449.8	1.44

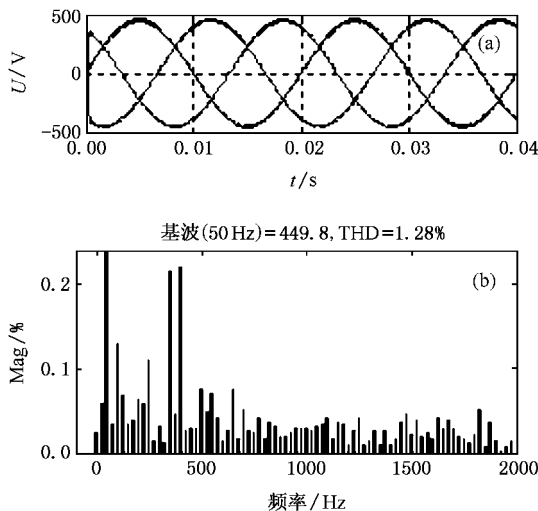


图 4 输出设为 450 V/50 Hz 时相电压波形和频谱图 (a)输出相电压波形 (b)频谱图

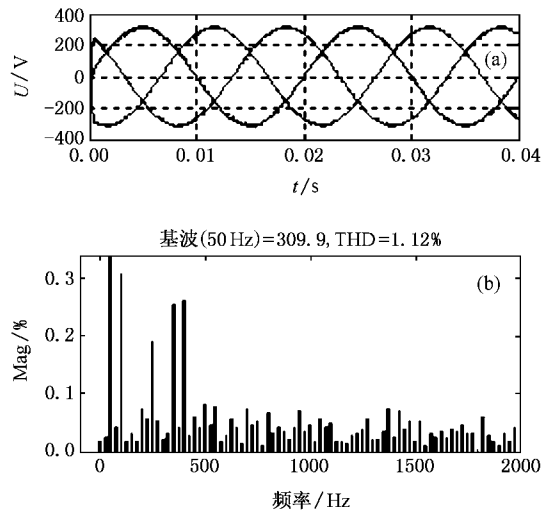


图 5 输出设为 311 V/50 Hz 时相电压波形和频谱图 (a)输出相电压波形 (b)频谱图

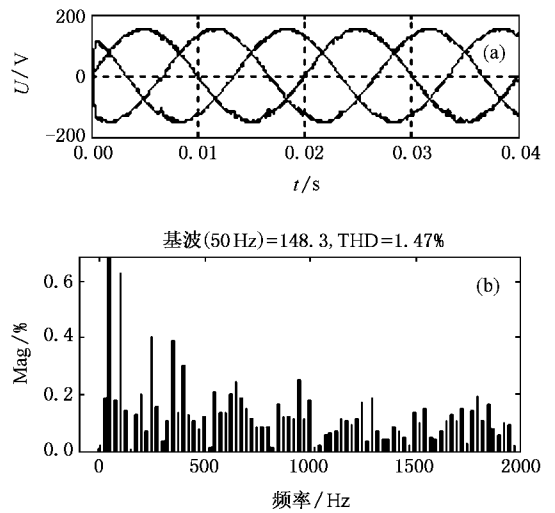


图 6 输出设为 150 V/50 Hz 时相电压波形和频谱图 (a)输出相电压波形 (b)频谱图

压能较准确地按设定的参考值变化 . 对应于图 4—6 的电压传输比分别为 1.446 ,0.996 及 0.477 ,即电压传输比可大于 1 ,等于 1 及小于 1.

2) BMC 能实现输出频率的任意调节 ,且输出频率和设定的参考值一致 .

3) 直接输出三相对称的正弦波 ,无需滤波环节 ,且波形失真度小 ,其总谐波失真度 THD 均在 2% 以下 .

4) 从电压仿真波形可见 ,系统从仿真一开始即迅速进入稳定状态 ,起动力性能好 ,无超调 . 可见系统具有很好的动态性能和稳态性能 .

由仿真波形及表 1 ,表 2 可见 :

1) BMC 能实现输出电压的任意调节 ,且输出电

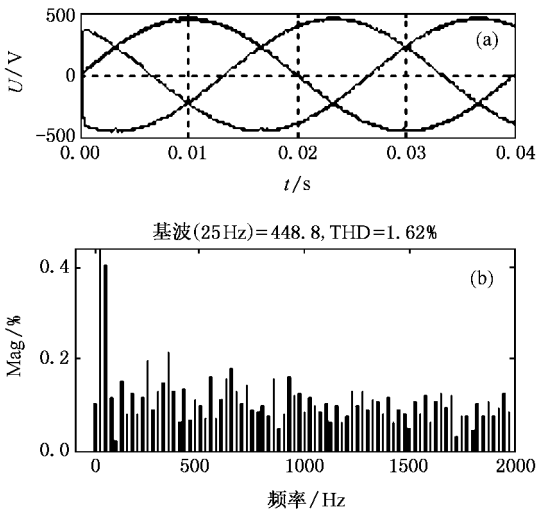


图7 输出设为 450 V/25 Hz 时相电压波形和频谱图 (a) 输出相电压波形 (b) 频谱图

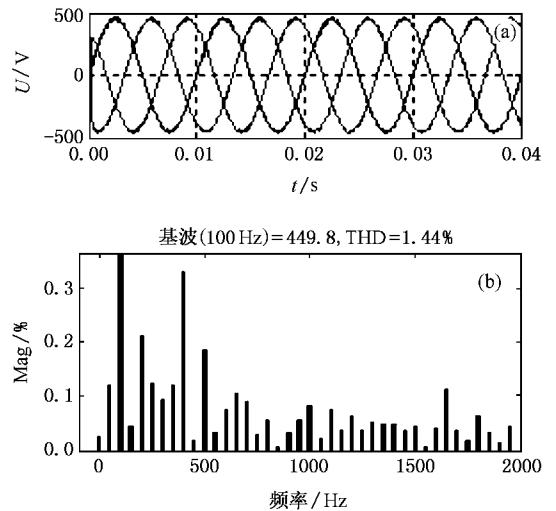


图8 输出设为 450 V/100 Hz 时相电压波形和频谱图 (a) 输出相电压波形 (b) 频谱图

5. 结 论

本文提出了一种新型的 Boost 交直交矩阵变换器(BMC)的电路拓扑结构,介绍了该拓扑结构的基本构成及其工作原理,着重阐述了所采用的双闭环

控制策略的设计方法,并通过仿真对其有效性和可行性进行了验证,结果表明:该新型拓扑结构能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,且输出波形的正弦性好,谐波含量小,从而有效解决了传统矩阵变换器存在的电压传输比低的缺陷,具有一定的应用价值。

- [1] Huber L, Borojevic D 1995 *IEEE Trans. On Industry Applications* **31** 1234
- [2] Casadei D, Grandi G, Serra G, Tani A 1993 *Fifth European Conference on Power Electronics and Applications* **7** 170
- [3] Alesina A, Venturini G B 1989 *IEEE Trans. on Power Electronics* **4** 101
- [4] Ziogas P D, Khan S I, Rashid M H 1986 *IEEE Trans. On Industrial Electronics* **33** 271
- [5] Chekhet E M, Mordatch V P 1996 *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics* **1** 466
- [6] Wiechmann E P, Garcia A R, Salazar L D 1997 *IEEE Trans. On Power Electronics* **12** 547
- [7] Chang J, Sun T, Wang A H 2002 *IEEE Trans. on Industrial Electronics* **49** 345
- [8] Zhou Y F, Chen J Y, Tse C K *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3676 (in Chinese) [周宇飞、陈军宇、谢智刚等 2004 物理学报 **53**

3676]

- [9] Dai D, Ma X K, Li X F *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2729 (in Chinese) [戴 栋、马西奎、李小峰等 2003 物理学报 **52** 2729]
- [10] Sanchis P, Ursa A 2005 *IEEE Trans. on Power Electronics* **20** 343
- [11] Sanchis P, Gorpide O 2001 *IEEE Power Electronics Specialists Conference* **2** 974
- [12] Deng W L, Yang X R 2005 *Proceedings of the CSEE* **25** 84 (in Chinese) [邓文浪、杨欣荣 2005 中国电机工程学报 **25** 84]
- [13] Vazquez N, Cortes D 2003 *IEEE International Power Electronics Conference* 1403
- [14] Lan Z Y, Zhu J L 2005 *Natural Science Journal of Xiangtan University* **27** 110 (in Chinese) [兰志勇、朱建林 2005 湘潭大学自然科学学报 **27** 110]
- [15] Ding W, Zhu J L 2002 *Natural Science Journal of Xiangtan University* **24** 100 (in Chinese) [丁 伟、朱建林 2002 湘潭大学自然科学学报 **24** 100]

Study of a novel matrix converter based on double-loop control strategy

Zhang Xiao-Ping¹⁾²⁾ Zhu Jian-Lin³⁾ Wen Ze-Jun¹⁾ Yue Zhou³⁾ Liu Sha-Sha³⁾

1) *Sound Maintenance on Machine and Equipment Key Laboratory of Hunan Province, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China*

2) *College of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China*

3) *College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China*

(Received 12 November 2006 ; revised manuscript received 17 November 2006)

Abstract

As the conventional matrix converter has the drawback of low voltage transfer ratio, a novel matrix converter referred to as a boost AC-DC-AC matrix converter is proposed. The basic configuration of the new topology and its fundamental principles are firstly introduced, the analytic expression concerning functional relation of voltage transfer ratio to duty cycle is analyzed, and the design method of double-loop control strategy adopted is expounded particularly. Finally the validity and feasibility of the new topology are tested by simulation, and the results indicate that the modulation of voltage transfer ratio and output frequency can be realized optionally through this new converter and an ideal sine output wave with little distortion can be gotten, so that the inherent drawback of conventional matrix converter having low voltage transfer ratio is solved successfully. This work may give some hints on further technological research and engineering application.

Keywords : boost AC-DC-AC matrix converter, voltage transfer ratio, double-loop control strategy, simulation

PACC : 0670M