

一种基于数学构造的矩阵变换器调制策略*

栗梅, 余岳, 孙尧, 桂卫华

中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083
E-mail: sumeicsu@yahoo.com.cn

摘要: 针对矩阵变换器现有调制策略复杂, 计算量大的问题, 本论文提出了一种基于数学构造的矩阵变换器调制策略。该调制策略, 省去了以往调制策略中对扇区的计算, 算法简单, 易于理解和实现, 并且能够保证最大电压传输比为 0.866 和输入功率因素可控。仿真和实验结果表明了这种方法的可行性和正确性。
关键词: 矩阵变换器, 数学构造, 调制策略

A Matrix Converter Modulation Based on Mathematical Construction*

Su Mei, Yu Yue, Sun Yao, Gui Weihua

School of Information Science & Engineering of Central South University, Changsha 410083, P.R.China
E-mail: sumeicsu@yahoo.com.cn

Abstract: Various modulation schemes have been proposed for its control. But the most control methodology of matrix converter operation is too complex. In this paper, a simple modulation based on mathematical construction is proposed. This modulation does not need any sector information. It is simple and easy to comprehend and implement. It can ensure maximum input power voltage transmission ratio of 0.866 and controllable input power factor. Theoretical considerations are supported by experimental results.

Key Words: matrix converter, mathematical construction, modulation

1 引言(Introduction)

矩阵变换器是一种直接变换型交流—交流电力变换装置, 具有一些优于传统脉宽调制(PWM)变频器的特性: 能量双向流通、正弦输入与输出电流、可控的输入功率因数、无需大的储能元件等。自 1976 年矩阵变换器的拓扑结构提出以来, 多种调制策略被相继提出, 其中, 最有影响的有 Venturini 的“直接传递函数法”^[1]、Huber 的“间接空间矢量脉宽调制法”^[2]和 Casadei 的“直接空间矢量调制策略法”^[3]。但是, 这些调制策略分析方法比较复杂, 算法的计算量比较大。本论文提出了一种基于数学构造的矩阵变换器调制策略。该调制策略, 省去了以往调制策略中对扇区的计算, 算法简单, 易于理解和实现, 并且能够保证最大电压传输比为 0.866 和输入功率因素可控。仿真和实验结果表明了这种方法的可行性和正确性。

2 矩阵变换器的结构原理(Matrix Converter)

2.1 矩阵变换器的拓扑结构(Topology of Matrix converter)

图 1 为矩阵变换器的拓扑结构示意图。从图 1 中可以看出矩阵变换器是由 9 个开关组成的, 通过一定的规律来控制 9 个开关的通断就可以用输入电压来合成所需的输出电压。图 1 中双向开关 S_{jk}

($j \in \{A, B, C\}$ $k \in \{a, b, c\}$) 为理想开关。

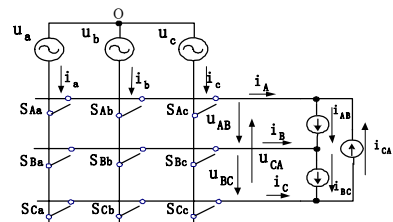


图 1 矩阵变换器拓扑结构示意图

Fig.1 The simplified topology of matrix converter

2.2 矩阵变换器的基本工作原理(Matrix Converter Theory)

矩阵变换器可以看成一六端口网络, 其中三个输入端口, 三个输出端口, 对于任意一组输入电压可按一定的调制规则控制开关矩阵中的九个开关, 从而在其输出端合成所需的一组输出电压。设三相输入相电压为

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = U_{im} \times \begin{bmatrix} \cos(\omega_1 t) \\ \cos(\omega_1 t - 2\pi/3) \\ \cos(\omega_1 t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (1)$$

将这个变换过程用调制矩阵 M 表示, 因此三相输出相电压可表示为

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(60674065); 湖南省自然科学基金项目(05JJ30102); 湖南省科技攻关计划项目(05GK3035).
* Project Supported by Natinal Natural Science Foundation (60674065).

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}$, 其中, m_{ij} ($i=1,2,3$ 或 $j=1,2,3$) 为矩阵变换器的调制系数(即各开关的占空比)。为保证调制矩阵物理上的可实现性, 各调制系数必须具有非负性, 即必须满足约束条件(3), 考虑到输入端不能短路, 输出端不能断路, 必须满足约束条件(4)~(6)。

$$0 \leq m_{ij} \quad (3)$$

$$m_{11} + m_{12} + m_{13} = 1 \quad (4)$$

$$m_{21} + m_{22} + m_{23} = 1 \quad (5)$$

$$m_{31} + m_{32} + m_{33} = 1 \quad (6)$$

矩阵变换器的调制策略主要就是确定这个调制矩阵。不同的调制矩阵 M 的构造, 就可以产生不同的调制策略。

3 矩阵变换器的简单实现策略 (Proposed Method for Matrix Converter)

深入分析矩阵变换器工作原理可知, 要想矩阵变换器获得任意频率 ω_o 的输出电压(即与输入电压频率 ω_i 无关), 可行的方法之一是采用间接空间矢量脉宽调制法中虚拟整流和虚拟逆变的思想^[2], 将输入电压整成虚拟直流后再逆变就与输入电压频率无关了。于是我们首先按(7)式的方法构造一个过渡调制矩阵 M'' 。

$$M'' = \begin{bmatrix} m_{11}'' & m_{12}'' & m_{13}'' \\ m_{21}'' & m_{22}'' & m_{23}'' \\ m_{31}'' & m_{32}'' & m_{33}'' \end{bmatrix} = K(\omega_o) \cdot D^T(\omega_i)$$

$$= \begin{bmatrix} K_a \\ K_b \\ K_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\omega_i t - \beta) \\ \cos(\omega_i t - \frac{2\pi}{3} - \beta) \\ \cos(\omega_i t + \frac{2\pi}{3} - \beta) \end{bmatrix}^T$$

$$= \begin{bmatrix} K_a \cos(\omega_i t - \beta) & K_a \cos(\omega_i t - \frac{2\pi}{3} - \beta) & K_a \cos(\omega_i t + \frac{2\pi}{3} - \beta) \\ K_b \cos(\omega_i t - \beta) & K_b \cos(\omega_i t - \frac{2\pi}{3} - \beta) & K_b \cos(\omega_i t + \frac{2\pi}{3} - \beta) \\ K_c \cos(\omega_i t - \beta) & K_c \cos(\omega_i t - \frac{2\pi}{3} - \beta) & K_c \cos(\omega_i t + \frac{2\pi}{3} - \beta) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\text{式中, } D^T(\omega_i) = \begin{bmatrix} \cos(\omega_i t - \beta) \\ \cos(\omega_i t - \frac{2\pi}{3} - \beta) \\ \cos(\omega_i t + \frac{2\pi}{3} - \beta) \end{bmatrix}^T, \text{ 其作用相当于}$$

整流器, 将三相输入电压整成虚拟直流;

$$K(\omega_o) = \begin{bmatrix} K_a \\ K_b \\ K_c \end{bmatrix}, \text{ 其作用相当于逆变器, 将中间虚拟}$$

直流逆变成任意频率 ω_o 的交流电压输出;

$$K_a = K \cos(\omega_o t), \quad K_b = K \cos(\omega_o t - \frac{2\pi}{3})$$

$$K_c = K \cos(\omega_o t + \frac{2\pi}{3}), \quad 0 \leq K \leq \frac{\sqrt{3}}{3}$$

若用 M'' 取代 M 代入(2)式, 则 A 相输出电压 u_A 为

$$u_A = K_a \cdot U_{im} \left[\cos(\omega_i t) \cdot \cos(\omega_i t - \frac{2\pi}{3}) \right. \\ \left. + \cos(\omega_i t - 2\pi/3) \cdot \cos(\omega_i t - \frac{2\pi}{3} - \beta) \right. \\ \left. + \cos(\omega_i t + 2\pi/3) \cdot \cos(\omega_i t + \frac{2\pi}{3} - \beta) \right]$$

进一步化简可得

$$u_A = \left(\frac{3}{2} K U_{im} \cos(\beta) \right) \cdot \cos(\omega_o t) \quad (8)$$

从 u_A 的表达式(8)式可以看出, 输出电压的频率已经与输入电压频率无关。但是这时得到的过渡调制矩阵 M'' 仍然不满足(3)~(6)的约束条件, 所以需要继续构造。

观察过渡调制矩阵 M'' 可知各行元素之和等于零, 为满足约束条件(3), 可将 M'' 的各列分别叠加一个偏置 x, y, z , 可构成另一个过渡调制矩阵 M' , 如式(9)所示。从数学的角度看, 在 M'' 的各列叠加同样的偏置, 同样程度地改变了各相电压, 但并未改变相间电压(即线电压), 相当于仅仅改变了矩阵变换器的输出端的共模电压。

$$M' = \begin{bmatrix} m_{11}' & m_{12}' & m_{13}' \\ m_{21}' & m_{22}' & m_{23}' \\ m_{31}' & m_{32}' & m_{33}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}''+x & m_{12}''+y & m_{13}''+z \\ m_{21}''+x & m_{22}''+y & m_{23}''+z \\ m_{31}''+x & m_{32}''+y & m_{33}''+z \end{bmatrix} \quad (9)$$

不失一般性, 以第一列为例, 问题转化为寻找同时满足式(10)~(12)的 x 。

$$m_{11}' = m_{11}'' + x \geq 0 \quad (10)$$

$$m_{21}' = m_{21}'' + x \geq 0 \quad (11)$$

$$m_{31}' = m_{31}'' + x \geq 0 \quad (12)$$

显然, $x \geq -\min(m_{11}'', m_{21}'', m_{31}'')$ 。对第二、第三列作同样处理可得到如下不等式组(13)。

$$\begin{cases} x \geq -\min(m_{11}^*, m_{21}^*, m_{31}^*) \\ y \geq -\min(m_{12}^*, m_{22}^*, m_{32}^*) \\ z \geq -\min(m_{13}^*, m_{23}^*, m_{33}^*) \end{cases} \quad (13)$$

为了继续满足式(4)、(5)和(6)的约束条件,最简单的方法是对过渡调制矩阵 M' 的各个元素叠加偏置 D , 其中的一组解为

$$D = \frac{1 - (x + y + z)}{3}, \quad (D \geq 0) \quad (14)$$

令

$$m_{ij} = m_{ij}' + D \quad (i=1,2,3; j=1,2,3) \quad (15)$$

这样,就完成了调制矩阵 M 的一种简单构造。

矩阵变换器调制算法可以归纳为,首先根据检测的输入三相电压和希望的三相输出电压按式(7)计算出 M'' , 其次,依据式(13)选择一组 x, y, z 的值,最后按式(14)和(15)逐步构造出一种符合要求的调制矩阵 M 。

从不等式组(13)可以看出, x, y, z 的选择余地很大,不同的选取方法,可以生成不同性能的调制策略。其中最简单的选择方法为取边界极值,即按式(16)取值。

$$\begin{cases} x = -\min(m_{11}^*, m_{21}^*, m_{31}^*) \\ y = -\min(m_{12}^*, m_{22}^*, m_{32}^*) \\ z = -\min(m_{13}^*, m_{23}^*, m_{33}^*) \end{cases} \quad (16)$$

4 实验结果(Experimental Results)

矩阵变换器实验系统按照模块化设计的思想,总体结构上分为三大模块如图2中灰色框所示,系统总体结构框图如图2所示。首先检测当前的三相输入电压的幅值和相位,依据上述矩阵变换器调制算法,计算出矩阵变换器的开关控制所需要的占空比数据(调制矩阵 M),然后将这些占空比的数据转换为开关开启和闭合的时间来控制开关的通断,从而达到控制交流异步电动机的目的。

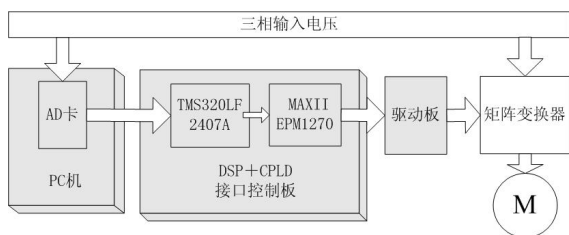


图2 矩阵变换器系统结构框图

Fig.2 Block diagram of the matrix converter control system

系统采用 AD 卡结合 PC 机作为采样和算法处理单元,然后通过接口板中的 DSP 处理器将 PC 机计算得到的占空比计数值送入 CPLD 计数, CPLD 根据计数值,按照对称调制的方法^[3],经过四步换流策略给出开关信号至驱动板,最后由驱动板控制矩阵变换器的开关的动作。

矩阵变换器实验系统如图3所示,输入三相交流电压 120 V; 输入滤波器^[4-5] $L=3$ mH, $C=10$ μ F;

系统开关频率为 5 kHz; 异步电动机的额定功率为 750 W; 在给定输出电压频率为 16.67 Hz 时,实验曲线如图4所示。实验结果表明,矩阵变换器输入电流基本正弦; 输出线电压正弦脉冲宽度调制、电流正弦变化; 输入电流和输出电压中基波分量占绝对主要成分。

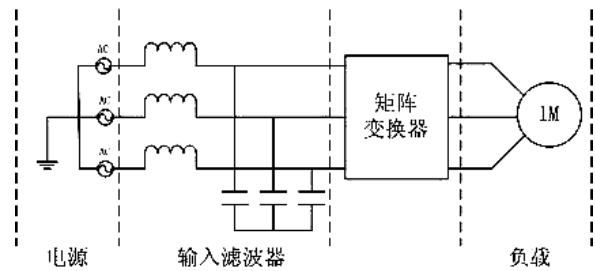
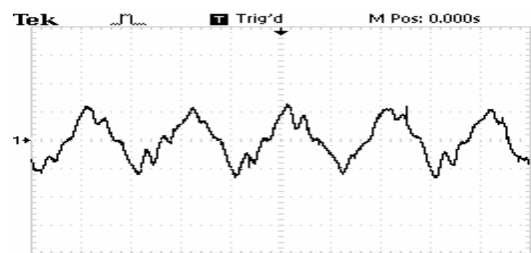
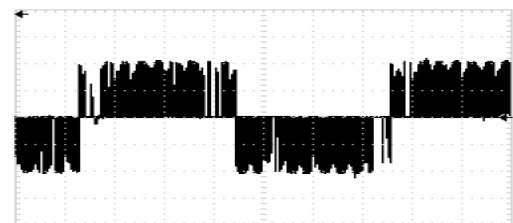


图3 矩阵变换器实验系统结构图

Fig.3 Experimental configuration



(a) 输入电流(0.1 A/div), 时间(10 ms/div)



(b) 输出线电压(100 V/div), 时间(10 ms/div)



(c) 输出电流(0.2 A/div), 时间(25 ms/div)

图4 矩阵变换器系统实验曲线

Fig.4 Waveform of the matrix converter

5 结论(Conclusion)

针对矩阵变换器现有调制策略复杂,计算量大的问题,本论文提出了一种基于数学构造的矩阵变换器调制策略。该调制策略,省去了以往调制策略中对扇区的计算,算法简单,易于理解和实现,并且能够保证最大电压传输比为 0.866 和输入功率因素可控。本论文提出的矩阵变换器调制策略的数学构造方法,很有新意,对其他电力电子变换器调制策略的提出具有

较好的理论意义和实用价值。

参考文献(References)

- [1] Alesina A, Venturini M. Analysis and Design of Optimum-Amplitude Nine-Switch Direct AC-AC Converters[J]. IEEE Transaction on Power Electronic, 1989, 4(1): 101-112.
- [2] Huber L, Borojevic D. Space vector modulator for forced commutated cycloconverters[C]// Conference Record IEEE-IAS Annul Meeting, 1989: 871-876.
- [3] Casadei D, Serra G, Tani A, et al. Matrix Converter Modulation Strategies: A New General Approach Based on Space-Vector Representation of the Switch State[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronic, 2002, 49(2): 370-381.
- [4] 粟梅, 覃恒思, 孙尧, 张泰山. 矩阵变换器系统的稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 62-69.
- [5] 粟梅, 孙尧, 覃恒思, 张泰山. 一种改善矩阵变换器系统

动态性能和稳定性的控制方法[J]. 电工技术学报, 2005, 20(12): 18-23.

作者简介:

粟梅(1967—), 女, 博士, 教授, 从事电力系统自动化、电力电子及电力传动方面的研究。

余岳(1978—), 男, 硕士研究生, 从事电力电子变换技术方面的研究。

孙尧(1981—), 男, 硕士研究生, 从事非线性控制在电力电子方面的应用研究。

桂卫华(1950—), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂工业过程建模与优化控制等研究。