

矩阵变换器驱动异步电动机仿真研究

粟梅 杨文 张泰山

中南大学

摘要: 论述了空间矢量调制矩阵变换器基本原理, 深入分析了空间矢量调制策略, 推导出矩阵变换器开关状态表, 在 MATLAB/SIMULINK 平台上, 建立了矩阵变换器简单实用的仿真模型, 并针对矩阵变换器驱动异步电动机启动、运行的开环系统进行了仿真, 仿真结果验证了空间矢量调制策略的可行性和正确性, 表明矩阵变换器具有优良的输入输出特性, 为矩阵变换器在高性能的交流调速闭环系统中的具体实用打下基础。

关键词: 矩阵变换器 空间矢量调制 开关状态

Simulation Study on Matrix Converter Fed Induction Motor Drive System

Su Mei Yang Wen Zhang Taishan

Abstract: The basic principle of matrix converter based on space vector modulation is presented and the space vector modulation scheme of matrix converter is deeply analysed. The table of switching state of matrix converter is deduced and the practical model of matrix converter is set up under MATLAB/Simulink. At the aim of investigation on the starting-up and running process in AC frequency conversion for asynchronous motor, a lot of simulation researches have been done. Simulation results not only demonstrate the excellent input and output characteristics of the converter, which, validates the correctness and availability of the space vector modulation scheme of matrix converter. This laid the basis for the practical application of matrix converter in AC motor driver.

Keywords: matrix converter space vector modulation switching state

1 引言

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等, 非常适合于应用到交流电机调速领域中。因而在交流调速系统中, 使用矩阵变换器驱动异步电动机, 一方面能够实现较好的传动性能, 另一方面也可以满足日益严格的电网电能质量的要求^[1]。目前, 国外矩阵变换器的研究工作尚未成熟, 加之双向开关器件尚未商品化, 故离实用化还有一定距离, 国内研究刚刚起步, 许多基础理论和相关的应用基础问题有待深入研究。本文深入分析了矩阵变换器的空间矢量

调制策略, 推导出符合实际工作情况的矩阵变换器的 9 个双向开关组合模式的开关状态表, 建立了矩阵变换器的仿真模型, 与其他仿真模型^[2]相比, 其通用性和计算速度等都非常优秀, 可方便地选择滤波器结构和改变滤波器参数, 能够适用各种负载, 为将矩阵变换器应用于矢量控制和直接转矩控制异步电动机调速系统奠定基础。

2 矩阵变换器的空间矢量调制策略

2.1 矩阵变换器的基本原理

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 个开关的通断可以用输入电压来合成所需的输出电压^[3]。图 1 中双向开

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

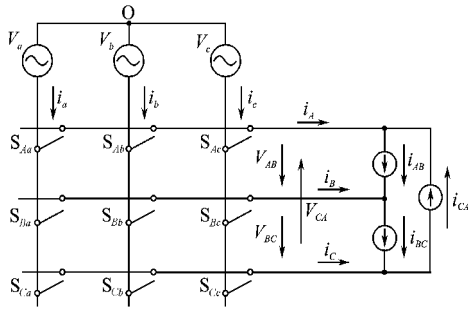


图 1 矩阵变换器拓扑结构示意图

设三相输入相电压，输出参考线电压可以写成

$$V_{iph} = V_{in} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ \cos(\omega t - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$V_{ol}^* = \sqrt{3} V_{om} \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \varphi_+ 30^\circ) \\ \cos(\omega t - \varphi_+ 30^\circ + 120^\circ) \\ \cos(\omega t - \varphi_+ 30^\circ + 240^\circ) \end{bmatrix} \quad (2)$$

令 $V_{ol} = V_{ol}^*$ ，根据 $V_{ol} = T_{PHL} V_{iph}$ 可知矩阵变换器的低频调制矩阵为

$$\overline{T}_{PHL} = m \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \varphi_+ 30^\circ) \\ \cos(\omega t - \varphi_+ 30^\circ + 120^\circ) \\ \cos(\omega t - \varphi_+ 30^\circ + 240^\circ) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \varphi) \\ \cos(\omega t - \varphi - 120^\circ) \\ \cos(\omega t - \varphi + 120^\circ) \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

式中： m 为矩阵变换器的调制系数， $0 < m < 1$ ； φ_+ 为输入的功率因数角。

由式(1)，式(2)，式(3)可以得到下列关系式

$$V_{om} = \frac{\sqrt{3}}{2} V_{im} m \cos \varphi_+ \quad (4)$$

选择不同的 $\cos \varphi_+$ ，就可以调制出不同的输入功率因数，它可以超前、滞后或为 1。同时，当取 $\cos \varphi_+$ 为最大值 1， m 为最大值 1 时，三相矩阵变换器的输出与输入的最大的电压传输比为 0.866。

2.2 空间矢量调制策略

基于空间矢量调制的矩阵变换器的基本原理为：先将矩阵变换器人为地等效成虚拟的交-直-交式的变频器，在虚拟整流和虚拟逆变过程中，分别使用人们熟悉的空间矢量调制技术。虚拟整流器对输入的电流进行空间矢量 PWM 调制，得到正弦的输入电流和可调的功率因数，而虚拟逆变部分则对输出电压进行空间矢量 PWM 调制，得到幅值和频率可调的正弦输出电压，这样就分别

得到了整流和逆变的低频调制矩阵。两者的乘积就是矩阵变换器的低频调制矩阵，图 2 为矩阵变换器的虚拟分解结构示意图。

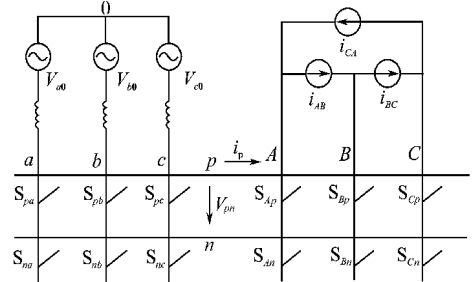


图 2 矩阵变换器虚拟分解示意图

虚拟逆变器部分的调制如图 3 所示。8 种有效的开关状态映射到空间中的 8 个静止矢量的位置，由 6 个互差 60 的非零矢量和 2 个零电压矢量组成。根据空间矢量调制技术，参考输出电压矢量 $V_{ol} = \sqrt{3} V_{om} e^{j(\omega t - \varphi_+ 30^\circ)}$ 可由两个相邻的空间状态矢量 V_α, V_β 及零状态矢量 V_0 合成得到，如图 3 所示。由正弦定理可知，其开关占空比分别为

$$\begin{aligned} d_\alpha &= T_\alpha / T_s = m_v \sin(60^\circ - \theta_v) \\ d_\beta &= T_\beta / T_s = m_v \sin \theta_v \\ d_0 &= T_0 / T_s = 1 - d_\alpha - d_\beta \end{aligned} \quad (5)$$

式中： m_v 为调制系数， $m_v = (\sqrt{3} V_{om}) / V_{pn}$ ，且 $0 < m_v < 1$ ； T_s 为开关周期； T_α, T_β, T_0 为开关的导通时间； d_α, d_β, d_0 为开关的占空比。

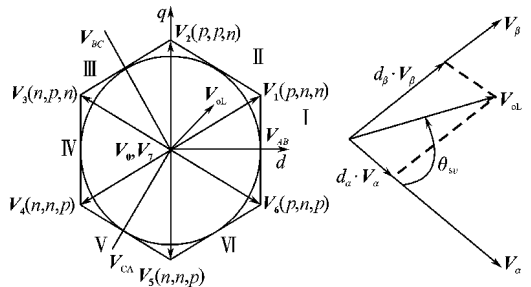


图 3 虚拟逆变器空间矢量调制

虚拟整流器的空间矢量调制（见图 4）与逆变器的调制方式类似，其开关占空比分别为

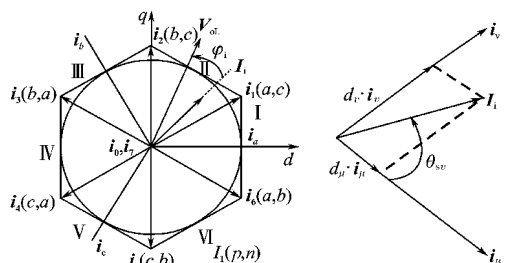


图 4 虚拟整流器空间矢量调制

$$\begin{aligned}
 d_{\mu} &= T_{\mu}/T_s = m_c \sin(60^\circ - \theta_c) \\
 d_{\nu} &= T_{\nu}/T_s = m_c \sin \theta_c \\
 d_{0v} &= T_{0c}/T_s = 1 - d_{\mu} - d_{\nu}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

式中: m_c 为电流调制系数, $m_c = I_m/I_{dc}$, $0 < m_c < 1$; T_s 为开关周期; T_{μ} , T_{ν} , T_{0c} 为开关导通时间, d_{μ} , d_{ν} , d_{0v} 为开关的占空比。

矩阵变换器的 9 个开关状态的占空比可以表示成为逆变器与整流器的开关占空比乘积的形式, 即

$$\begin{aligned}
 d_{\alpha\mu} &= d_{\alpha}d_{\mu} = m \sin(60^\circ - \theta_v) \sin(60^\circ - \theta_c) \\
 d_{\beta\mu} &= d_{\beta}d_{\mu} = m \sin \theta_v \sin(60^\circ - \theta_c) \\
 d_{\beta\nu} &= d_{\beta}d_{\nu} = m \sin \theta_v \sin \theta_c \\
 d_{0v} &= d_{0}d_{\nu} = m \sin(60^\circ - \theta_v) \sin \theta_c \\
 d_0 &= d_s - d_{\alpha\mu} - d_{\beta\mu} - d_{\beta\nu} - d_{0v} \\
 0 < m < 1
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

由虚拟逆变器与虚拟整流器的开关状态可以

合成矩阵变换器的开关状态。例如, 表 1 中的第 1 行 $i_6 - V_6$ 状态, 图 5a 中 i_6 是由虚拟整流器的开关 S_{pa} , S_{nb} 接通而合成, 而 V_6 是由虚拟逆变器开关 S_{Ap} , S_{Bn} , S_{Cp} 接通而合成。 p 为虚拟直流部分的正极, n 为负极。把同时接在正极的开关合成, 把同时接在负极的开关合成, 就可以得到对应的矩阵变换器的开关状态, 即 S_{Aa} , S_{Bb} , S_{Cc} 接通, 其余开关关断, 如图 5b 所示。用此方法得到的电压电流矢量构成第 1 扇区的开关状态表, 如表 1 所示。

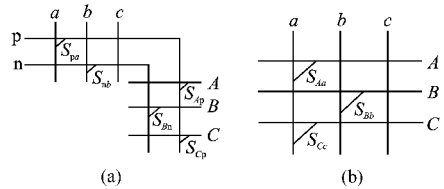


图 5 矩阵变换器的开关状态确定

表 1 电压电流矢量在第 I 扇区情况下开关状态

调制矢量	pn	ABC	占空比	输出电压 $V_{AB} V_{BC} V_{CA}$	输入电流 $i_a i_b i_c$	开关状态									
						S_{Aa}	S_{Ab}	S_{Ac}	S_{Ba}	S_{Bb}	S_{Bc}	S_{Ca}	S_{Cb}	S_{Cc}	
$i_6 - V_6$	ab	aba	$d_{\alpha\mu}$	$V_{ab} - V_{ab} 0$	$-i_b i_b 0$	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
$i_6 - V_1$	ab	abb	$d_{\beta\mu}$	$V_{ab} 0 - V_{ab}$	$i_a - i_a 0$	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
$i_1 - V_1$	ac	acc	$d_{\beta\nu}$	$V_{ac} 0 - V_{ac}$	$i_a 0 - i_a$	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
$i_1 - V_6$	ac	aca	d_{0v}	$V_{ac} - V_{ac} 0$	$-i_b 0 i_b$	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0
$i_0 - V_0$	aa	aaa	d_0	0 0 0	0 0 0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0

3 仿真研究

根据上述矩阵变换器的空间矢量调制策略, 利用 MATLAB/SIMULINK 的电力系统工具箱提供各种功率器件、电源、滤波电路、保护电路、测量模块和负载等, 结合 s 函数的强大的接口功能, 建立了空间矢量调制的矩阵变换器的通用仿真模型, 该矩阵变换器模型主要由 6 个部分组成: 电源、输入输出测量、输入滤波器、控制策略、矩阵开关和负载部分, 如图 6 所示。仿真算法为 ode15, 调制周期 $T_s = 10 \text{ kHz}$ 。

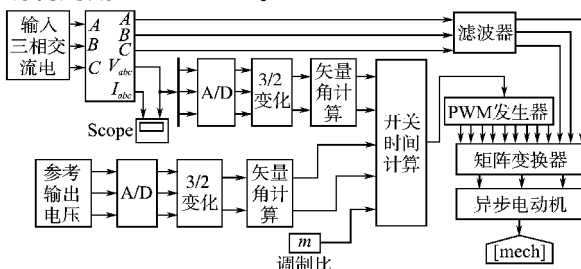


图 6 矩阵变换器 Simulink 仿真图

为了验证所建模型的有效性和正确性, 针对

矩阵变换器驱动异步电动机启动、运行, 在 MATLAB6.5 下进行了仿真。仿真参数为: 输入为三相对称电源, 其相电压为 220 V/50 Hz, 功率因数控制为 1; 三相绕线型异步电动机, 其额定功率为 $3 \times 746 \text{ W}$, 额定电压为 220 V/60 Hz, 定子电阻和漏感分别为 0.435Ω , 4 mH , 转子电阻和漏感分别为 0.816Ω , 2 mH , 激磁电感(互感)为 69.31 mH , 转动惯量为 $0.089 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $T_1 = 11.9 \text{ N} \cdot \text{m}$; 输入 LC 滤波器滤波电感 $L = 1 \text{ mH}$, $C = 10 \mu\text{F}$ 。

如果从图 6 中去掉输入滤波器环节, 矩阵变换器的输入电流波形(即电网输出电流波形)如图 7a 所示, 畸变严重, 当设定截止频率为 15000 Hz 时, 谐波畸变率 THD 值为 44.93%。加入上述参数的滤波器后, 矩阵变换器的输入电流波形如图 7b 所示, 高频谐波分量大大减少, 当设定截止频率为 15000 Hz 时, 谐波畸变率 THD 值为 5.89%。因此, 必须加输入滤波器, 用以滤除输入相电流中的高频成分并使电流连续, 隔离功率器件开关过程对电网的影响。但输入滤波器的加入

必然影响原有输入电压和输入电流的相位关系^[4],关于矩阵变换器输入滤波器设计的解析分析和仿真分析将在以后详细论述。电机启动、运行过程相电流、电磁转矩和转速波形如图 8 所示。稳态运行时典型的输入、输出电压、电流波形如图 9 所示。仿真所用时间仅为 4 min,实际运行时间和仿真所需时间之比为 1 : 240,在增加输入滤波器和采用了复杂的异步电动机负载的情况下,计算时间不到文献[2]的 0.2%。

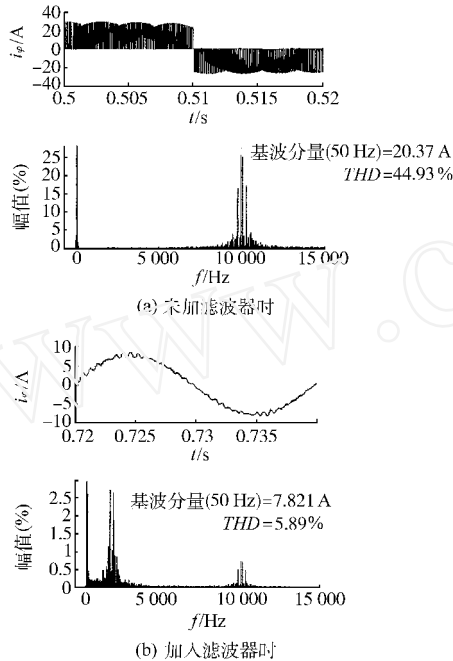


图 7 未加和加入滤波器时输入相电流波形和 FFT 分析

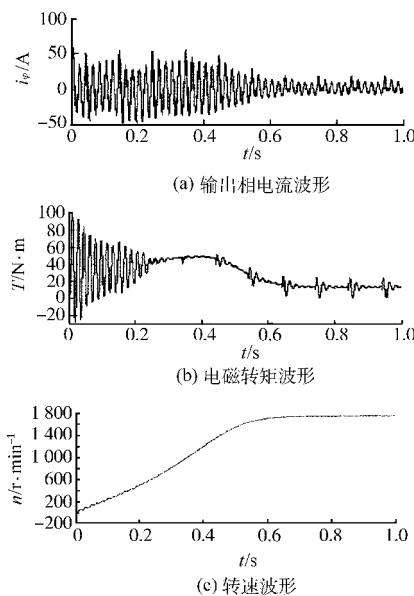


图 8 电机启动过程电流、电磁转矩和转速波形

入电压、电流正弦且基本同相;输出线电压正弦脉冲宽度调制、线电流正弦变化;输入电流和输出电压中基波分量占绝对主要成分,具有优良的输入输出特性。

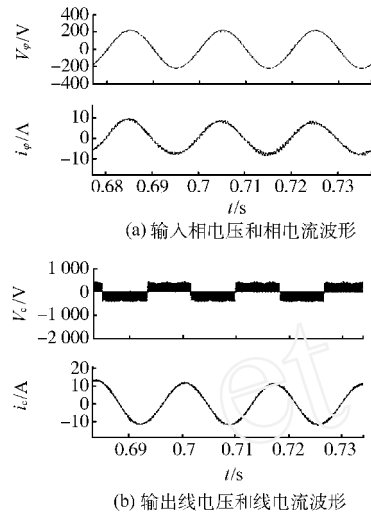


图 9 稳态时输入输出电压电流波形

4 结论

本文针对矩阵变换器一次性功率交换的本质,充分利用交-直-交变换技术中成熟的空间矢量调制技术,推导出基于空间矢量调制的矩阵变换器的开关状态表,建立了矩阵变换器的通用仿真模型,仿真结果验证了空间矢量调制策略的有效性和正确性,表明矩阵变换器具有优良的输入输出特性。该仿真模型计算速度快,采用模块化设计,方便搭接,具有开放性和工程实用价值,为将矩阵变换器应用于矢量控制和直接转矩控制异步电动机调速系统奠定了基础。

参考文献

- 1 Sunter S, Clare J C. A True Four Quadrant Matrix Converter Induction Motor Drive with Servo Performance [C]. IEEE Proc. of PESC, 1996: 146~ 151
- 2 李志勇,朱建林,易灵芝等.空间矢量调制的矩阵式变换器仿真模型研究[J].中国电机工程学报,2003,33(3): 80~ 84
- 3 贺益康,刘勇.交-交直接变换控制下矩阵式变换器的仿真研究[J].电工技术学报,2002,17(3): 48~ 53
- 4 陈希有,孙力,陈学允.基于 Park 变换的空间矢量调制矩阵变换器在非理想条件下的稳态分析[J].电机与控制学报,1999,3(3): 165~ 168

收稿日期: 2004-11-22

修改稿日期: 2005-04-06

仿真结果表明,空间矢量调制矩阵变换器输