



基于矩阵变换器的异步电机矢量控制系统仿真研究

姚 远, 刘文良, 王 杰

(天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222)

摘要: 为改善电网质量并实现异步电动机的四象限运行, 将矩阵变换器作为变频调速系统的功率变换电源, 结合异步电动机矢量控制策略, 构成高性能的“绿色”交流调速系统. 采用空间矢量调制作为矩阵变换器的控制策略, 综合异步电动机转子磁场定向理论, 搭建系统仿真模型, 对系统优质的抗扰能力及四象限运行特性进行分析验证, 展现了该新型交流调速系统的广阔发展前景.

关键词: 矩阵变换器; 空间矢量调制; 异步电动机; 矢量控制

中图分类号: TM921 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-6510 (2007) 04-0060-04

Matrix Converter Fed Induction Motor Vector Control Drive System

YAO Yuan, LIU Wen-liang, WANG Jie

(College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: In order to improve the quality of the grid and realize four quadrant operation of induction motor, matrix convert was used as power supply, combined with vector control strategy to compose high performance and non-pollution AC speed regulation system. Using space vector modulation strategy to control matrix converter, synthesized with rotor flux oriented theory to build simulation model, anti-disturbance capability and four quadrant operation characteristic is analyzed to show the extremely broad development in the future.

Keywords: matrix converter; space vector modulation; induction motor; vector control

随着工业领域对交流调速系统性能要求的不断提升, 使用高性能、“绿色”电力变换装置替代传统交一直一交变频器成为该领域中研究的热点. 矩阵变换器本身具有输入/输出特性良好、输入功率因数高, 可自由调节且与负载功率因数无关等优点, 特别是可以实现能量的双向流动这一特点, 使其易于实现电机的四象限运行. 国外对矩阵变换器的研究始于 80 年代初期, 对矩阵变换器的控制理论与控制技术的研究已趋于成熟, 而我国对矩阵变换器的研究起步较晚, 并且在理论研究与实际研制方面都与国际先进水平存在着一定的差距, 特别是对基于矩阵变换器的调速系统这一课题的研究, 仍处于起步阶段. 因此, 本文将矩阵变换器作为变频调速系统的功率变换电源, 构成了基于矩阵变换器的异步电动机矢量控制系统^[1,2], 并使用 MATLAB 软件中的电力系统工具箱对系统进行了深入的仿真研究, 证明了

该方案既能保证系统具有良好的动态性能, 又避免了因谐波污染带来的电力系统环保问题, 从而为矩阵变换器在调速系统中的深入研究和应用打下了基础.

1 矩阵变换器控制策略

矩阵变换器的三相输出和三相输入通过 9 个双向功率开关直接相连, 简化的三相到三相矩阵变换器及其双向开关的拓扑结构如图 1 所示.

若将双向开关元件的导通、关断状态用函数 s_{jk} 表示:

$$s_{jk} = \begin{cases} 1, & S_{jk} \text{ 关断} \\ 0, & S_{jk} \text{ 导通} \end{cases} \quad (j \in \{A, B, C\}, k \in \{a, b, c\}) \quad (1)$$

则该部分输入不能短路, 输出不能开路的约束条件可表示为

$$s_{ja} + s_{jb} + s_{jc} = 1, j \in \{A, B, C\} \quad (2)$$

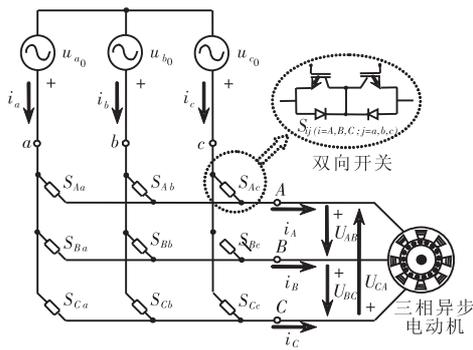


图1 三相矩阵变换器及其双向开关

Fig. 1 Three phase matrix converter and bi-directional switch

矩阵变换器的空间矢量调制策略是在矩阵变换器交—交直接变换中引入虚拟的直流环节,将其等效为熟知的交—直—交结构,其中VSR和VSI分别为电压源整流空间矢量调制和电压源逆变空间矢量调制,如图2所示。

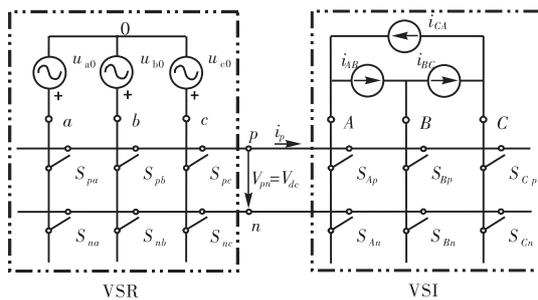


图2 矩阵变换器交—直—交等效结构图

Fig. 2 Emulation of VSR-VSI conversion

根据空间矢量调制原理,虚拟整流部分和虚拟逆变部分分别对输入相电流和输出线电压空间矢量进行调制。在某一时刻,VSI的输出线电压参考空间矢量 \bar{v}_{oL} 可近似的由两个相邻的非零电压开关状态矢量 (v_α 、 v_β) 和一个零矢量 (v_0) 合成得到。而开关状态矢量在每个开关周期内的占空比则根据空间矢量调制原理和正弦定理计算得到^[3]。

同理,输入相电流参考空间矢量 \bar{i}_{ph} 的相位由输入相电压和给定的输入功率因数角 φ_i 决定,在某时刻,可由相邻的两个非零开关状态矢量和一个零矢量近似合成,而开关状态矢量的占空比根据空间矢量调制原理和正弦定理计算得到。

由于矩阵变换器引入的是虚拟直流环节,因而VSR和VSI过程实际上是同时进行的,削去虚拟的

中间直流环节,并将上述两个空间矢量调制过程结合起来,就得到矩阵变换器的控制规律及其合成占空比,使其在感性负载条件下,输出电压和输入电流波形均为正弦,且输入功率因数 $\cos \varphi_i$ 可以方便地进行调节。

2 基于矩阵变换器的异步电动机矢量控制系统

采用将矩阵变换器作为异步电动机矢量控制系统的功率变换电源,目的在于突出矩阵变换器本身所具有的输入功率因数高、能量可以双向流动等优点,同时发挥异步电动机矢量控制系统动态性能好、调速范围宽的优点,从而构成高性能的交流调速系统,并满足电网电能质量要求^[4]。

采用的控制系统结构框图如图3所示,系统采用转子磁链开环的转差频率型矢量控制系统,同时选择两相旋转的 $d-q$ 坐标系作为参考坐标系,并按异步电动机转子磁场定向。

转差频率型矢量控制系统具有结构简单,动态性能良好等优点,它无需进行磁通检测,只需将转子磁链的给定值 φ_r^* 设定为恒值,并将检测到的三相定子电流 i_{ABC} 和转子角速度 ω_r 通过简单的数学模型运算便可得到转子磁链 φ_r 及其相位角 θ ,从而实现磁场定向控制,其相应的公式为

$$\theta = \int \omega_1 dt = \int (\omega_s + \omega_r) dt \quad (3)$$

$$\omega_s = \frac{L_m}{T_r} \cdot \frac{i_q}{\varphi_r} \quad (4)$$

$$\varphi_r = \frac{L_m}{1 + T_r S} \cdot i_d \quad (5)$$

$$\begin{cases} i_d^* = \frac{1}{L_m} \cdot \varphi_r^* \\ i_q^* = \frac{L_r}{N_p \cdot L_m} \cdot T_e^* \end{cases} \quad (6)$$

由磁场定向控制与空间矢量调制之间存在的内在联系,可将 i_d^* 与 i_q^* 经反旋转变换和 2/3 变换得到定子三相电流的参考值 i_{ABC}^* , 其与三相电流的实测信号 i_{ABC} 的偏差分别经过 3 个电流调节器 (ACR), 并经过相线变换及矢量合成得到用于矩阵变换器空间矢量调制所需的三相定子输出线电压参考空间矢量 \bar{v}_{oL} , \bar{v}_{oL} 经过 VSI-SVM 得到输出线电压空间矢量的扇区号 S_{v0} 、扇区角 θ_{sv} 及 VSI 调制度 m_v ; 由输入相电压和输入功率因数角 φ_i 共同决定的输入相电流参考

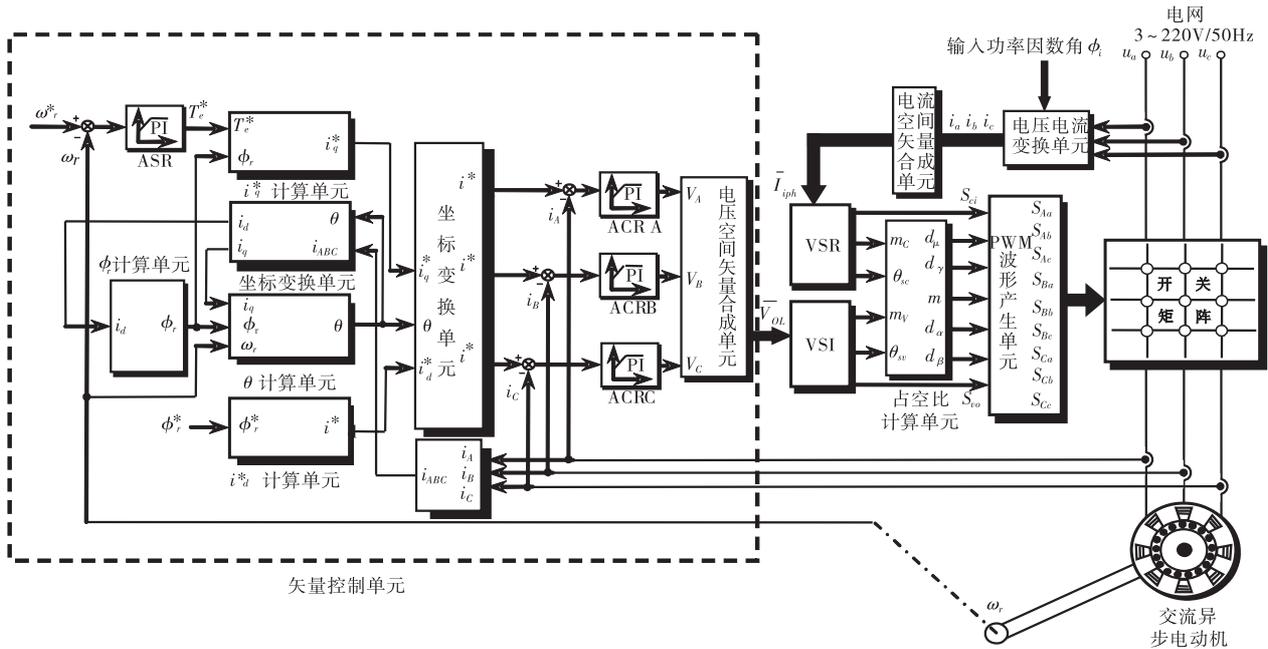


图 3 基于矩阵变换器的异步电动机矢量控制系统

Fig. 3 Block diagram for vector controlled matrix converter induction motor drive

空间矢量 \bar{I}_{iph} 经过 VSR-SVM 得到输入相电流空间矢量的扇区号 S_{ci} 、扇区角 θ_{sc} 及 VSR 调制度 m_c ； θ_{sv} 、 m_v 、 θ_{sc} 和 m_c 经过占空比计算单元分别得到占空比 d_α 、 d_β 、 d_μ 、 d_γ 和调制度 m ($m = m_c \cdot m_v = m_v$)，且有

$$m = \frac{2 \cdot V_{om}}{\sqrt{3} \cdot V_{im} \cdot \cos \phi_i}, \quad 0 \leq m \leq 1 \quad (7)$$

PWM 波形产生单元根据 VSR-SVM、VSI-SVM 和占空比计算单元分别产生的扇区号及占空比，经过计算得到矩阵变换器 9 个双向开关在任意时刻的开关状态 PWM 信号，并发送给开关矩阵。

3 仿真实验及结果

采用 MATLAB 软件来搭建基于矩阵变换器的异步电动机矢量控制系统的仿真模型，如图 4 所示。系统的主电路由三相电源、矩阵变换器、异步电动机负载构成；控制电路中的 VSI、VSR 以及 PWM 波形产生单元用于实现对矩阵变换器的空间矢量调制；而矢量控制单元则用于完成异步电动机转子磁场定向控制。异步电动机的各项参数为 $P_e = 1.7 \text{ kW}$ ， $N_{nom} = 1440 \text{ r/min}$ ， $I_{nom} = 2.6 \text{ A}$ ， $T_e = 8.84 \text{ N} \cdot \text{m}$ ， $R_1 = 4.25 \text{ } \Omega$ ， $R_2 = 3.24 \text{ } \Omega$ ， $L_1 = 0.666 \text{ H}$ ， $L_2 = 0.671 \text{ H}$ ， $L_m = 0.651 \text{ H}$ ， $J = 0.02 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ ， $N_p = 2$ 。

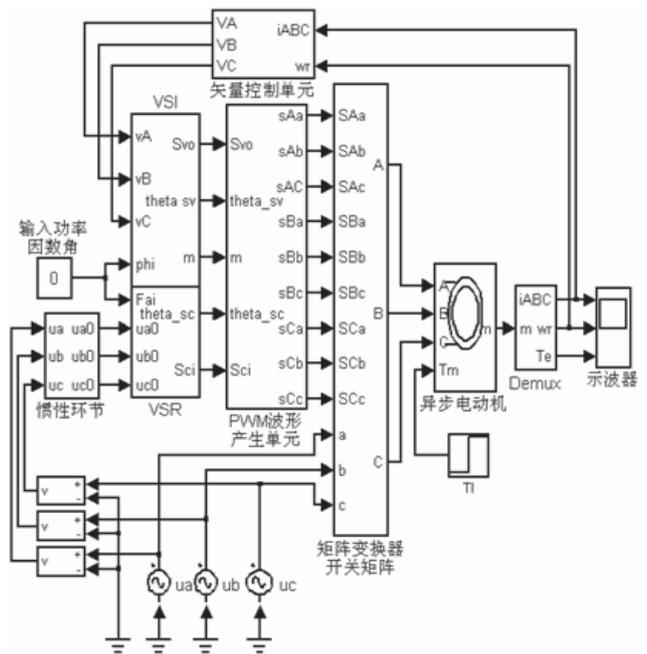


图 4 基于矩阵变换器的异步电动机矢量控制系统仿真模型

Fig. 4 Simulation model of vector controlled induction motor drive supplied by matrix converter

仿真结果如图 5 和图 6 所示。图 5 (a)、(b) 和 (c) 分别为系统突加给定启动并在 0.25 s 突加负载转矩为 $10 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时电机的转子角速度 ω_r 、三相定子电流 i_{ABC} 和电磁转矩 T_e 的响应曲线，可以看出，系统能够实现快速启动，且在负载转矩突然变化的情况

下,系统能够在很短的时间内重新达到稳定.图6(a)、(b)和(c)分别为系统在转矩—转速四象限运行时 ω_r 、 i_{ABC} 和 T_e 的响应曲线,可以看出,系统

在0.25~0.52 s内完成了由正向运行向反向运行切换,证明系统可以实现快速制动,且该系统能够实现四象限运行.

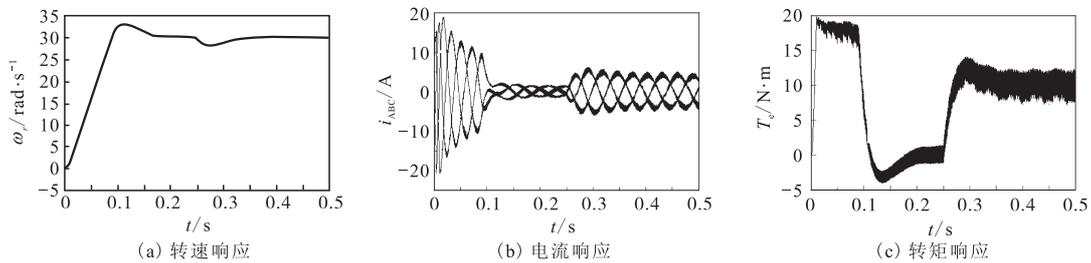


图5 负载转矩变化动态响应波形

Fig. 5 Impact load response

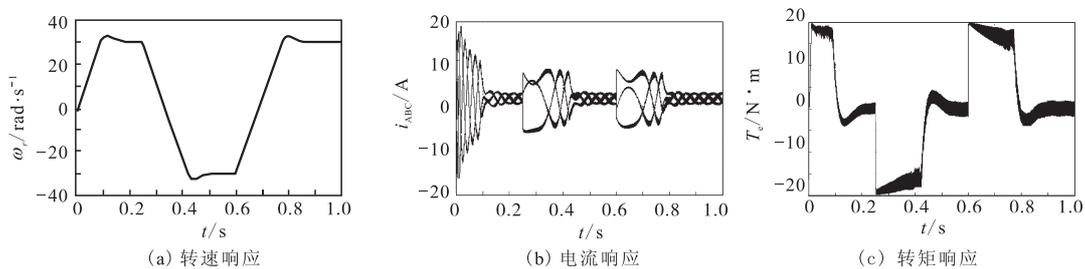


图6 四象限运行波形

Fig. 6 Four quadrant operation

4 结 语

矩阵变换器以其优良的性能成为目前人们关注的一种新型的、绿色的电力变换装置.本文在对矩阵变换器拓扑结构、调制策略等进行理论分析的基础上,重点研究了三相矩阵变换器在交流调速控制系统中的应用.

在对矩阵变换器调制策略以及异步电动机矢量控制原理进行理论分析的基础上,建立了基于矩阵变换器的异步电机矢量控制系统模型,并利用Matlab对控制系统进行了仿真验证.结果表明,该系统在电机负载转矩变化及四象限运行条件下,均表现出良好的动态性能,同时,四象限运行结果也证明了该系统可以实现能量的双向流动.从而为矩阵变换器实际系统的构建打下了坚实的基础.

因此,将矩阵变换器空间矢量调制技术与异步电机矢量控制技术相结合是现代交流调速技术的一

种发展趋势.它克服了传统交—直—交变频器的一系列缺点,又实现了异步电动机的高性能控制.所以,基于矩阵变换器的交流调速系统必将成为下一代交流传动模式.

参 考 文 献:

- [1] Altun H, Sunter S. Matrix converter induction motor drive: modeling, simulation and control [J]. *Electrical Engineering*, 2003, 86 (1): 25—33.
- [2] Sunter S, Clare J C. A true four quadrant matrix converter induction motor drive with servo performance [J]. *IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, 1996, 1: 146—151.
- [3] Huber L, Borojevic D. Space vector modulated three-phase to three-phase matrix converter with input power factor correction[J]. *IEEE Tansaction on Industry Application*, 1995, 31 (6): 1234—1246.
- [4] 孙凯,黄立培,松濂贡规.基于矩阵式变换器的异步电动机矢量控制[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2004, 44 (7): 909—912.