



## 四象限 AC-DC 矩阵变换器的建模与仿真

刘文良<sup>1,2</sup>, 姜惠兰<sup>1</sup>, 阎彦<sup>2</sup>

(1. 天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072; 2. 天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222)

**摘要:** 对采用高频隔离结构的 AC-DC 矩阵变换器进行分析, 通过空间矢量调制技术合成交—交及交—直变换开关函数, 在此基础上, 借助 Matlab 软件搭建控制系统模型. 仿真结果体现出良好的系统输入输出性能, 并实现了拖动阻感负载的四象限输出, 为 AC-DC 矩阵变换器在直流可逆调速系统的进一步研究提供基础.

**关键词:** 矩阵变换器; 四象限运行; 空间矢量调制

**中图分类号:** TM921      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-6510 (2007) 03-0065-04

### Modeling and Simulation of Four-quadrant AC-DC Matrix Converter

LIU Wen-liang<sup>1,2</sup>, JIANG Hui-lan<sup>1</sup>, YAN Yan<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

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

**Abstract:** An AC-DC matrix converter with high frequency isolation was analyzed. The switching functions for cycloconverter and rectifier were obtained by introducing space vector modulation. On the basis of these theories, the simulation model of control system was built by means of MATLAB. The simulation results validate the excellent input and output characteristics of matrix converter, and realize the four-quadrant operation of dragging. And it can give help to the further studies of AC-DC matrix converter in direct current reversible speed control system.

**Keywords:** matrix converter; four-quadrant operation; space vector modulation

矩阵变换器作为一种控制性能优良且可解决电力公害问题的新型功率变换电源成为电力电子技术领域的研究热点<sup>[1]</sup>. 近年, 随着多台实验样机的研制成功, 国内外学者逐步开始了矩阵变换器应用于高性能交、直流调速系统的探索性研究.

本文分析了一种新型拓扑的 AC-DC 矩阵变换器, 通过引入高频隔离变压器将系统分为交—交与交—直变换两部分. 在交—交变换中, 通过采用空间矢量调制技术可实现系统输入电流和输出电压的同时控制. 在交—直部分, 采用双向整流可实现拖动直流电机的四象限运行<sup>[2,3]</sup>. 对新型变换器的控制原理及开关函数调制策略作了深入研究, 并搭建控制系统仿真模型. 仿真结果实现了输入功率因数为 1 以及拖动阻感负载的四象限输出, 为 AC-DC 矩阵变换器应用于直流可逆调速系统的进一步理论和实验研究打下基础.

### 1 AC-DC 矩阵变换器控制原理

新型 AC-DC 矩阵变换器的拓扑结构如图 1 所示, 分为交—交变换和交—直变换两部分. 虚线内的交—交变换由 6 个双向开关组成, 用于实现三相工频交流电到单相高频交流输出的直接变换, 高频交流输出经过隔离变压器和双向开关组成的可控整流后输出极性可正负的直流电压  $V_{rec}$ .

若将图 1 虚线内双向开关元件的导通、关断状态用函数表示

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

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

$$s_{ja} + s_{jb} + s_{jc} = 1, \quad j \in \{p, n\} \quad (2)$$

收稿日期: 2007-04-04;

作者简介: 刘文良 (1963—), 男, 天津人, 副教授.

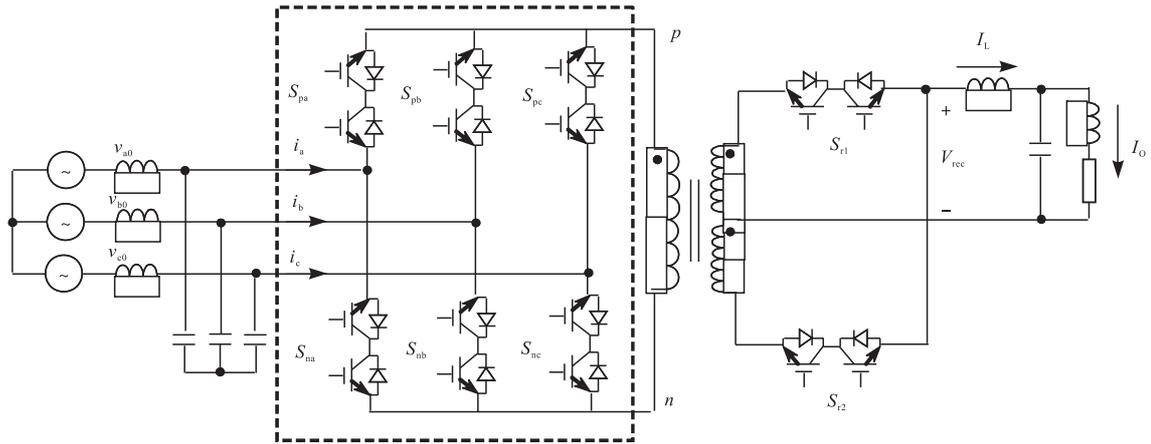


图1 AC-DC矩阵变换器拓扑结构

Fig. 1 AC-DC matrix converter topology

由图1及变换器的约束条件,可将其输入相电流  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  及整流输出电压  $V_{rec}$  的瞬时值用元件的开关函数表示,即

$$i_i = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{pa} - s_{na} \\ s_{pb} - s_{nb} \\ s_{pc} - s_{nc} \end{bmatrix} \cdot \frac{I_L}{n} \quad (3)$$

$$V_{rec} = \frac{1}{n} \cdot [s_{pa} - s_{na} \quad s_{pb} - s_{nb} \quad s_{pc} - s_{nc}] \cdot \begin{bmatrix} v_{a0} \\ v_{b0} \\ v_{c0} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $\begin{bmatrix} v_{a0} \\ v_{b0} \\ v_{c0} \end{bmatrix} = V_m \cdot \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t - 120^\circ) \\ \cos(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix}$ ;  $n$  为变压器变比。

双向开关  $S_{jk}$  的开关函数在单位开关周期内的平均值即为  $S_{jk}$  在开关周期内导通的占空比,将其表示为  $d_{jk}$  ( $0 \leq d_{jk} \leq 1$ ),则式(2)~式(4)在单位开关周期内可等效为

$$d_{ja} + d_{jb} + d_{jc} = 1, \quad j \in \{p, n\} \quad (5)$$

$$\bar{i}_i = \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{pa} - d_{na} \\ d_{pb} - d_{nb} \\ d_{pc} - d_{nc} \end{bmatrix} \cdot \frac{I_L}{n} = \begin{bmatrix} d_a \\ d_b \\ d_c \end{bmatrix} \cdot \frac{I_L}{n} \quad (6)$$

$$\bar{V}_{rec} = [d_a \quad d_b \quad d_c] \cdot \frac{1}{n} \cdot \begin{bmatrix} v_{a0} \\ v_{b0} \\ v_{c0} \end{bmatrix} \quad (7)$$

为了获得功率因数为1的输入电流,将占空比  $d_a$ 、 $d_b$ 、 $d_c$  设为如下形式:

$$\begin{aligned} d_a &= m \cdot \cos(\omega t) \\ d_b &= m \cdot \cos(\omega t - 120^\circ) \\ d_c &= m \cdot \cos(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $m$  为矩阵变换器的调制度,  $0 \leq m \leq 1$ . 将式(8)分别代入式(6)和式(7),计算得到变换器输入电流及整流后的直流电压  $V_{rec}$  为

$$\bar{i}_i = \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix} = I_{im} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t - 120^\circ) \\ \cos(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\bar{V}_{rec} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{n} \cdot m \cdot V_m \quad (10)$$

## 2 基于空间矢量调制的矩阵变换器开关函数

由 AC-DC 矩阵变换器拓扑结构可知,交—交变换部分仅有9种开关组合状态.在任意时刻,位于上、下桥臂的3个双向开关有且仅有一个处于导通状态.因而,交—交变换输出的高频交流电压是由输入线电压及零电压组合得到的.

以式(11)的输入相电流矢量位于第一扇区 ( $-30^\circ \leq \varphi(\omega t) \leq 30^\circ$ ) 为例,在不考虑换流的情况下,若6个双向开关的驱动信号如图2(a)所示.

$$i_i = \frac{2}{3} (i_a + i_b \cdot e^{j120^\circ} + i_c \cdot e^{-j120^\circ}) = I_{im} \cdot e^{j(\omega t)} \quad (11)$$

其中,占空比  $d_a$ 、 $d_b$ 、 $d_0$  由空间矢量调制原理<sup>[4]</sup>得出,

$$\begin{aligned} d_a &= m \cdot \sin(60^\circ - \phi) \\ d_b &= m \cdot \sin(\phi) \\ d_0 &= 1 - d_a - d_b \end{aligned} \quad (12)$$

则通过空间矢量调制得到的变压器原边交流信号波形如图2(b)所示,该信号由线电压  $V_{ab}$ 、 $V_{ac}$  及零电压合成得到.

对于变换器整流部分,若输出正向的直流电压,

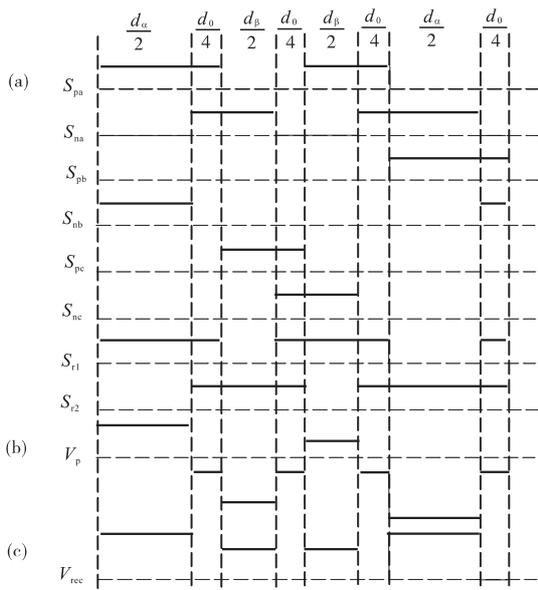


图2 AC-DC矩阵变换器的驱动及输出信号波形  
 Fig. 2 Drive signals and output waveforms of AC-DC matrix converter

则需要 $V_p$ 为正电压的间隔内导通 $S_{r1}$ ,关断 $S_{r2}$ ,此时输出电流流过 $S_{r1}$ .在随后 $V_p$ 为零的间隔内, $S_{r1}$ 与 $S_{r2}$ 同时导通,两个双向开关各流过0.5倍输出电流 $I_L$ .对于 $V_p$ 为负电压时刻,导通 $S_{r2}$ ,关断 $S_{r1}$ ,使输出电流通过开关 $S_{r2}$ 流出.这一过程中,作用在开关 $S_{r1}$ 和 $S_{r2}$ 的驱动信号如图2(a)所示,而经过整流后的

输出电压 $V_{rec}$ 波形如图2(c)所示.

### 3 AC-DC 矩阵变换器仿真研究

根据上述AC-DC矩阵变换器空间矢量调制原理以及图1所示的拓扑结构,搭建了开环控制的矩阵变换器仿真模型,如图3所示.变换器的主电路由LC输入滤波器、变换器开关矩阵、理想高频隔离变压器、双向可控整流电路、输出滤波器及负载组成.矩阵变换器的控制电路用于产生交-交及交-直变换的开关函数.

仿真模型以三相220V交流电源为输入,经LC输入滤波后送入AC-DC矩阵变换器的交-交变换部分,该部分的6个双向开关元件在控制电路信号的驱动下,在高频变压器原边侧输出高频交流信号,经变压器、双向可控整流、滤波后输出直流电压.模型中,变换器开关频率为5kHz,变压器变比为2,输出滤波器参数 $L=150\text{ mH}$ , $C=8\text{ }\mu\text{F}$ ,输入滤波器中滤波电感、电容分别为 $200\text{ mH}$ 、 $1.6\text{ }\mu\text{F}$ ,负载参数为 $10\text{ }\Omega$ , $58\text{ mH}$ .在矩阵变换器输出电压给定定为 $100\text{ V}$ 条件下,交-交变换部分输出的电压波形如图4所示,图5为整流输出电压 $V_{rec}$ 波形.当矩阵变换器稳定运行到 $0.5\text{ s}$ 时,将给定输出电压从 $100\text{ V}$ 切换到 $-100\text{ V}$ 后,矩阵变换器的输出电流 $I_L$ 波形如图6所示,在此过程中,A相输入电流与输入电压波形如图7所示.

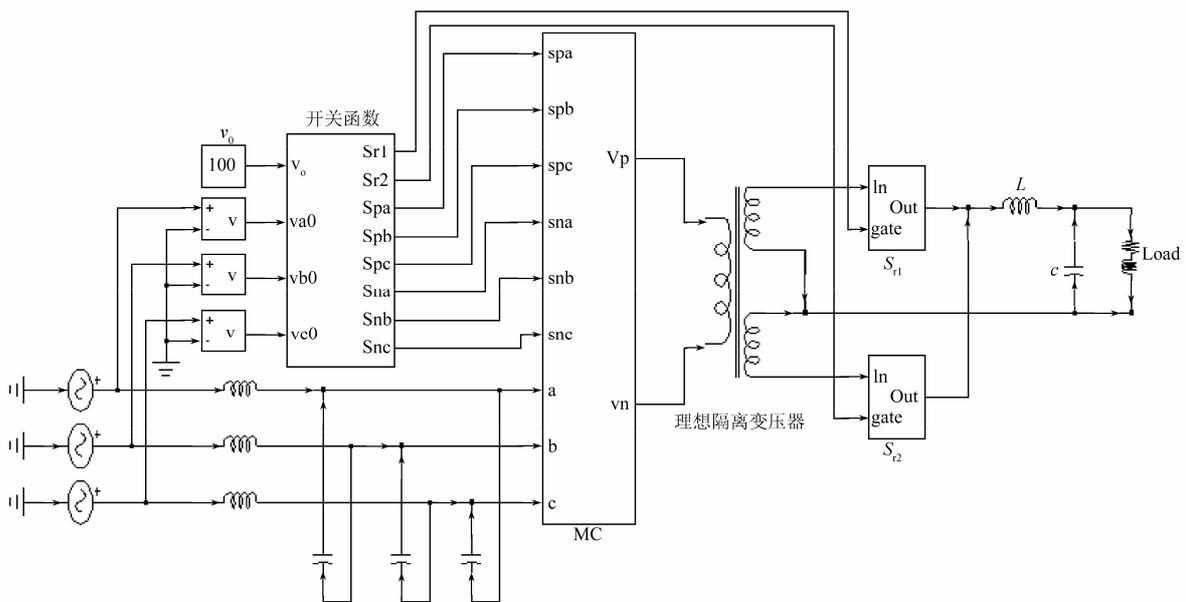


图3 AC-DC矩阵变换器仿真模型  
 Fig. 3 Simulation model of AC-DC matrix converter

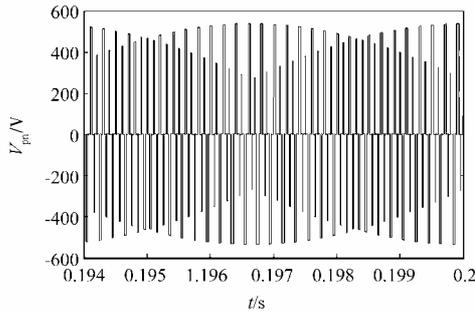


图4 交—交变换高频输出电压波形

Fig.4 Waveform of high frequency output voltage of cycloconverter

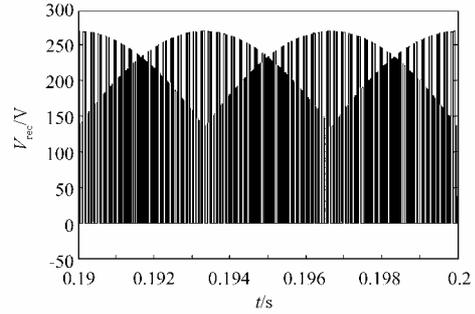


图5 矩阵变换器整流输出电压波形

Fig.5 Waveform of matrix converter rectified output voltage

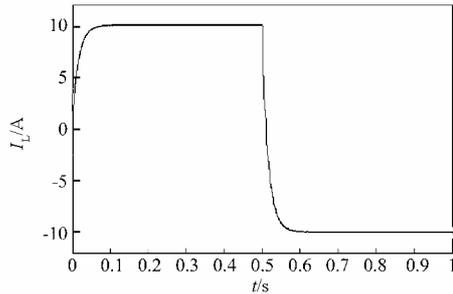


图6 矩阵变换器输出电流波形

Fig.6 Waveform of matrix converter output current

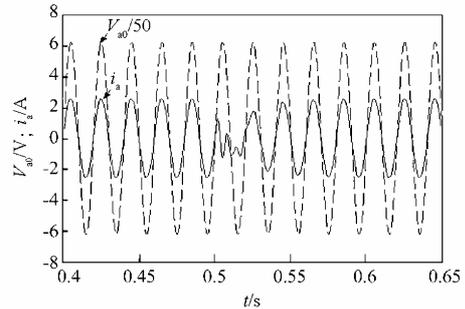


图7 A相输入电压与输入电流波形

Fig.7 Waveforms of input voltage and current of A phase

### 4 结论

从仿真结果可以看出,新型拓扑结构的 AC-DC 矩阵变换器在空间矢量调制技术的控制下不仅具有良好的输出特性,而且输入侧经过滤波后,可实现低谐波畸变以及功率因数为 1,满足对电网无污染的要求.同时,变换器交—交变换部分输出的高频交流信号经过双向可控整流,在连接感性负载时可以实现四象限输出.由此可见,具有这些优质输入输出性能的新型 AC-DC 矩阵变换器,必将在高性能直流可逆调速系统中具有广阔的发展前景.

### 参 考 文 献:

[1] 丁士启, 栗梅. 新型电力变换装置——矩阵变换器

[J]. 大众用电, 2006, 9: 22—23.

[2] Garcia-Gil R, Espi J M, Sanchis-Kilders E, et al. Bi-directional three-phase rectifier with high frequency isolation and power factor correction[C]// 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 2869—2874.

[3] Garcia-Gil R, Espi J M, Sanchis-Kilders E, et al. A DSP-controlled four quadrant AC-DC matrix converter with high-frequency isolation[C]//Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 1194—1199.

[4] Huber L, Borojevic D. Space vector modulated three-phase to three-phase matrix converter with input power factor correction [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 1995, 31 (6): 1234—1246.

(上接第61页)

[4] 周富强, 张广军. 用于结构光视觉传感器标定的特征点获取方法[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26 (4): 347—350.

[5] 卢荣胜, 叶声华. 多传感器视觉测量系统坐标统一技术. [C]//2000年中国博士后学术大会论文集: 机械与仪

表分册. 北京: 科学出版社, 2000: 220—225.

[6] 李清安, 王厦, 孙志远, 等. 基于电子经纬仪的双目 CCD 测量系统的标定研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27 (6): 188—190.