

基于空间矢量调制的矩阵变换器仿真研究

张卫江¹, 张婕²

(1. 陕西国防工业技术学院, 陕西 扶风 722200;

2. 承德石油高等专科学校, 河北 承德 067000)

摘要: 矩阵变换器由于内部没有储能元件使得它所带来的电能质量问题少, 在实现变频的同时可以改变功率因数且与负载的类型无关, 已经成为交-交变频器研究中非常热门的课题。目前比较常用的方法是空间矢量法调制, 针对空间矢量法利用 S 函数块进行仿真, 验证了空间矢量调制策略的正确性。

关键词: 矩阵变换器; 空间矢量调制; 仿真; S 函数; 建模

中图分类号: TM464

文献标识码: A

Simulation research of matrix converter based on space vector modulation

ZHANG Wei Jiang¹, ZHANG Jie²

(1. Shanxi Defense Industry Technology College, Fufeng 722200, China;

2. Chengde Petroleum College, Chengde 067000, China)

Abstract: Matrix converter has no energy storage element and can bring less problem of power quality, because it can realize frequency Conversion and change power factor at the same time despite of any load and other advantages. It has become very hot problem of cycloconverter studies. The common use method is the space modulation technology for converter. Based on space vector modulation in this paper, using S-function to set up the simulation model of the matrix converter to simulate. The simulated results have verified the correctness of space vector modulation.

Key words: matrix converter; space vector modulation; simulation; S-function; modeling

矩阵变换器是一个从任意 m 相输入直接变换到 n 相输出的电力变换装置。电力电子器件和控制手段的发展与成熟使得矩阵变换器从学术思想变为现实成为可能。人们从控制方法、换流方法、等效电路等不同的角度对它进行了一系列的研究, 证明了矩阵变换器具有众多优点: 中间没有储能环节, 使它的谐波大大减少; 可以实现能量的双向流动; 实现功率因数可调, 且与负载的类型无关。本文利用 SIMULINK 的 Power System Blockset 工具箱中的现有模块及其强大的建模、仿真功能, 对矩阵变换器进行了尝试性地成功建模与研究, 提高了可视化程度。

1 空间矢量调制策略

1.1 矩阵变换器简介

矩阵变换器的拓扑图如图 1 所示。它由 9 个双向开

关组成, 通过一定的规律控制 9 个开关的通断, 以实现用输入电压来合成所需的输出电压。

其开关单元如图 2 所示。矩阵变换器输入端不能开路, 带感性负载时输出端不能开路。

1.2 空间矢量调制策略^[1-3]

矩阵变换器的空间矢量调制, 是基于空间矢量变换的一种方法, 它将矩阵变换器等效成虚拟的交-直-交变换器, 其中的直流环节是虚拟的, 然后分别利用空间调制技术实现虚拟整流和虚拟逆变, 最后将两者综合, 得到所需的调制函数矩阵, 实现一次变换。三相到三相矩阵变换器等效的交-直-交简化拓扑结构如图 3 所示。

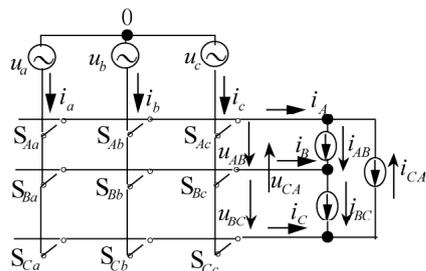


图1 矩阵变换器的拓扑图

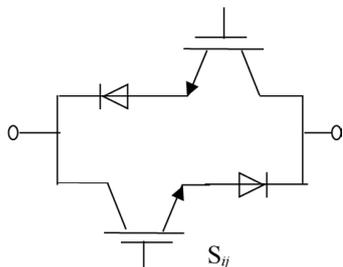


图2 矩阵变换器开关单元

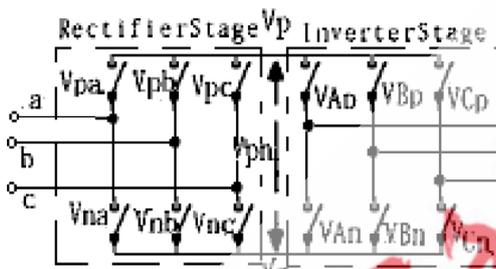


图3 矩阵变换器的交-直-交等效电路

对于虚拟逆变器部分的调制，采取了将相关信息映射到电压空间的方法，得到输出电压与虚拟直流电压的关系，即将电力开关的8种有效允许组合，映射为电压空间的8个静止空间电压矢量。对于三相瞬时输出电压，可利用派克变换映射为旋转空间电压矢量。而旋转空间矢量可以由静止空间矢量通过脉宽调制来合成，即当期望输出的电压旋转空间矢量位于某扇区时，可用组成该扇区的两个静止空间矢量 V_λ 、 V_μ 合成，如图4所示。

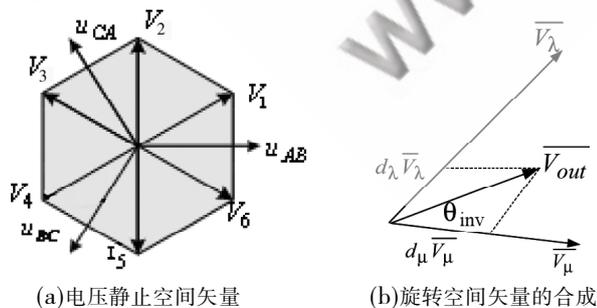


图4 三相瞬时输出电压转换

由正弦定理可得占空比为：

$$\left. \begin{aligned} d_\mu &= m_v \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_{inv}\right) \\ d_\lambda &= m_v \sin(\theta_{inv}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中， m_v 为电压调制比。

虚拟逆变器部分的调制，与虚拟整流器部分的空间矢量调制类似。由静止电流空间矢量合成旋转电流空间矢量。则整流部分占空比为：

$$\left. \begin{aligned} d_\alpha &= m_c \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_{rec}\right) \\ d_\beta &= m_c \sin(\theta_{rec}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中， m_c 为电流调制比。

矩阵变换器空间矢量调制是整流和逆变相结合。由于输入电流和输出电压分别有6个扇区，故调制函数矩阵共有36种可能组合。则矩阵变换器的占空比为：

$$\left. \begin{aligned} d_{\alpha\mu} &= d_\alpha \cdot d_\mu & d_{\alpha\lambda} &= d_\alpha \cdot d_\lambda \\ d_{\beta\mu} &= d_\beta \cdot d_\mu & d_{\beta\lambda} &= d_\beta \cdot d_\lambda \\ d_0 &= 1 - (d_{\alpha\mu} + d_{\alpha\lambda} + d_{\beta\mu} + d_{\beta\lambda}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

2 Power System Blockset 工具箱简介^[4-6]

SIMULINK 中的 Power System Blockset 是一个电力系统仿真工具箱。它包含各种基于 SIMULINK 的电力器件模型，如电压/电流源变压器、线性和非线性网络模块、电力电子器件等。用户可以方便地利用它建立电力系统模型，还可运用 MATLAB 的其他工具箱完成控制算法以及与电力系统有关的其他部分，组成完整的闭环控制系统。其中的 S 函数模块即系统函数模块，在很多情况下是非常有用的，它是扩展 SIMULINK 功能的强有力工具。用户可以利用 MATLAB、C、C++ 以及 FORTRAN 等语言的程序创建自定义的 SIMULINK 模块，而且可以适用于不同性质的系统。S 函数具有一套不同的调用方法，在仿真的不同阶段完成不同的调用任务：(1) 初始化；(2) 计算下一个采样点；(3) 计算主时间步的输出量；(4) 积分计算。

3 矩阵变换器的建模^[7]

针对矩阵变换器空间矢量调制原理的特殊性，编制3个S函数：sf1、sf2、sf3，从而得到3个S函数模块，弥补了电力系统仿真工具箱用于矩阵变换器仿真的不足，进一步扩充了 SIMULINK 的功能。其中 sf1 用于确定在一个 PWM 周期中，矩阵变换器输出电压和输入电流所在的扇区，进而计算出有效电压、电流矢量及其零矢量的5个占空比，并求出对应的5种开关组合；sf2 按照电压、电流双向调制的方法，将5种开关组合中4个非零矢量对应的4个占空比各取1/2，从左至右以零矢量占空比作为中心两边对称的规则，得到9个占空比，按时间的先后确定9个占空比时间内分别对应的开关组合，并按时间的顺序输出每种开关组合对应的3个开关。sf3 用于开关选通，其功能在任一时刻3个导通的开关信号输出高电平，其余6个截止开关输出低电平。

技术与方法

Technique and Method

4 仿真实例

设电压、电流调制比为 0.8，采样频率为 10 kHz，双向开关的关断时间为 0，输入为三相对称电源，电源频率为 50 Hz，相电压有效值 220 V，输出频率为 40 Hz，矩阵变换器带三相平衡的阻感串联负载：有功功率 $P=480$ W，无功功率 $QL=100$ Var。仿真时间 50 ms，仿真算法为 odel5s。仿真模型如图 5 所示。

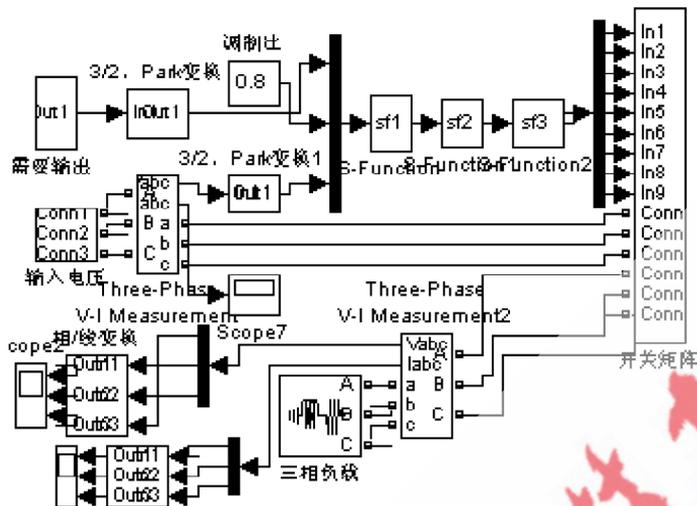
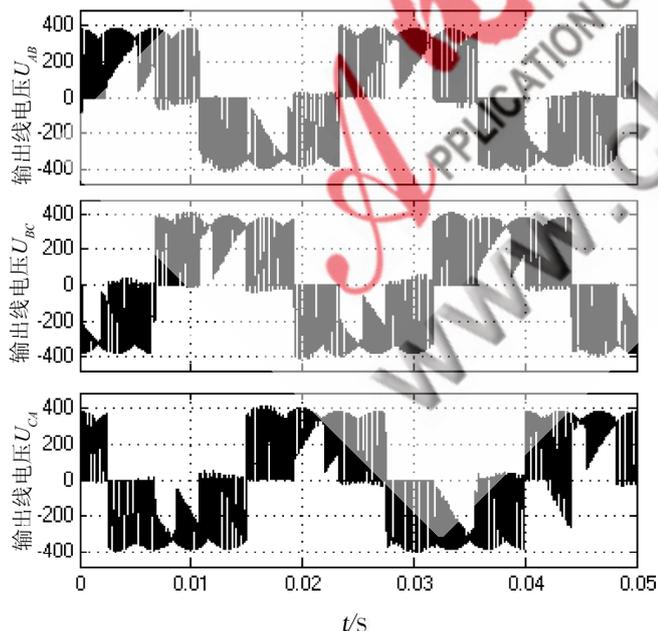
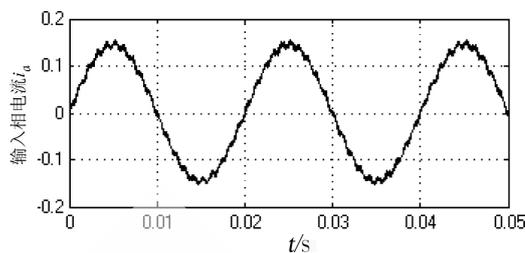


图 5 矩阵变换器的仿真模型

运行如图 5 所示的矩阵变换器仿真模型，运行过程非常平稳。输出电压为标准正弦型的 PWM 波形，如图 6 所示。



(a) 三相线输出电压



(b) 输入相电流 i_a

图 6 输出线电压、输入相电流

由图可以看出输入电流也为正弦波，但波形不很光滑，显然含有少量的谐波，这是由于开关频率引起的。

本文阐述了矩阵变换器的空间矢量调制原理，在此基础上，利用 SIMULINK 的电力系统仿真工具箱结合其 S 函数的功能，尝试了矩阵变换器的 SIMULINK 仿真模型的建立。该模型具有一定的扩充性和代表性，较 MATLAB 编程提高了效率和可视化程度。仿真结果表明，输出电压、电流波形是正弦波，验证了空间矢量调制的正确性和可行性。但输入电流含有少量谐波，这是由高频开关引起的。因此，有必要在输入端设计适当的滤波器以消除谐波的干扰。

参考文献

- [1] WHEELER P W, GRANT D A. Reducing the semiconductor losses in a matrix converter. variable speed drives and motion control. IEE Colloquium, 1992, 4(11): 14/1-14/5.
- [2] HUBER L, BOROJEVIC D. Space vector modulated three-phase to three-phase matrix converter with input factor correction. IEEE Trans. On Industry Applications, 1995, 31 (6): 1234-1246
- [3] HUBER L, BOROJEVIC D. Space vector modulated for forced commutated cycloconverters. IEEE Conf. Rec. of 1989 Industry Application Society Annual Meeting, 1989: 871-876.
- [4] 崔怡, 张滨, 邱玉力, 等. Matlab 5.3 实例详解[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.
- [5] NIELSEN P, BLAABJERG F, PEDERSEN J K. Space vector modulated matrix converter with minimized number of switching and a feed-forward compensation of input voltage unbalance [J]. Proceedings of PEDES' 96, 1996, (2): 833-839.
- [6] KLUMPNER C, NIELSEN P, BLAABJERG F. A New matrix converter motor fMCM1 for industry applications [J]. IEEE transactions on industry electronics, 2002, 49(2): 325-335.
- [7] 陈桂明, 张明照, 戚红雨, 等. 应用 MATLAB 建模与仿真[M]. 北京: 北京科学出版社, 2001.

(收稿日期: 2009-01-01)