

基于 MATLAB 的矩阵变换器空间矢量调制策略仿真

张大双, 高海生

(华东交通大学 电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 首先简述了交-交矩阵变换器的工作原理及调制策略, 然后分析了空间矢量调制策略的算法实现, 着重讨论了矩阵变换器的建模与仿真. 在此基础上建立了基于 MATLAB 的矩阵变换器仿真模型, 并给出了仿真波形. 仿真结果验证了模型及控制策略的正确性.

关键词: 矩阵变换器; 空间矢量调制; 建模; 仿真

中图分类号: TM46

文献标识码: A

矩阵变换器是一种新型“绿色”交-交电力变换装置, 具有能量双向流动, 输入电流与输出电压为正弦, 输入功率因数与输出电压幅值、频率可调, 无需大容量储能元件, 谐波污染小等优良特性, 因此成为近 20 年来 AC/AC 变换器研究的热点. 目前, 各国学者针对矩阵变换器的研究主要集中在双向开关器件的实现、控制策略的优化、试验装置的开发及系统集成等方面, 各项研究使矩阵变换器的相关理论日臻完善. 本文在概述矩阵变换器的工作原理及调制策略的基础上, 着重分析了空间矢量调制策略, 并利用 SIMULINK 的 PSB 工具箱对其进行了建模及仿真研究.

1 矩阵变换器工作原理

交-交矩阵变换器是一个单级变换器, 由 $m \times n$ 个双向功率开关构成, 能直接将 m 相电源与 n 相负载连接起来. 三相/三相矩阵变换器的建模与仿真的拓扑结构如图 1 所示. 它由连接在两个独立三相系统之间的 9 个双向开关组成, 通过一定的控制策略来控制开关的通断从而实现电压幅值与频率的变换. 假设三相输入相电压及输出线电压为

$$\vec{U}_i = \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = U_{im} \begin{bmatrix} \cos(\omega_i t) \\ \cos(\omega_i t - 120^\circ) \\ \cos(\omega_i t + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

$$\vec{U}_o = \begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = \sqrt{3} U_{om} \begin{bmatrix} \cos(\omega_o t - \varphi_o + 30^\circ) \\ \cos(\omega_o t - \varphi_o + 30^\circ - 120^\circ) \\ \cos(\omega_o t - \varphi_o + 30^\circ + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

U_{im}, ω_i 分别为输入电压幅值、频率, $U_{om}, \omega_o, \varphi_o$ 分别为输出电压幅值、频率、相角.

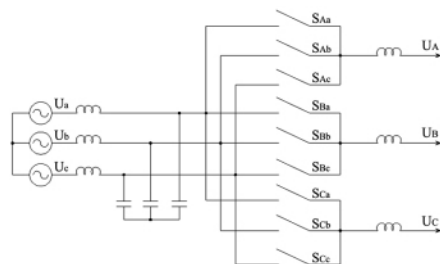


图1 三相交-交矩阵变换器拓扑结构
则必存在变换矩阵 $\bar{T}$, 使得

$$\vec{U}_o = \bar{T} \cdot \vec{U}_i$$

此时变换矩阵的形式为

$$\bar{T} = m \begin{bmatrix} \cos(\omega_o t - \varphi_o + 30^\circ) \\ \cos(\omega_o t - \varphi_o + 30^\circ - 120^\circ) \\ \cos(\omega_o t - \varphi_o + 30^\circ + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\omega_i t - \varphi_i) \\ \cos(\omega_i t - 120^\circ - \varphi_i) \\ \cos(\omega_i t + 120^\circ - \varphi_i) \end{bmatrix}^T$$

收稿日期: 2007-10-24

基金项目: 华东交大科研基金资助(01303086)

作者简介: 张大双(1980-), 女, 湖北随州人, 在读硕士研究生, 主要研究领域为电力电子与电力传动.

m, φ_i 分别为调制系数和输入功率因数角, 其中 $0 < m < 1$.

同理, 对于输入相电流与输出线电流也存在如下关系

$$\vec{I}_i = \vec{T}^T \cdot \vec{I}_o$$

因此变换矩阵的确定反映了矩阵变换器的开关控制策略.

2 矩阵变换器空间矢量控制策略

目前针对矩阵变换器的开关策略提出许多不同的控制方法. 根据矩阵变换器控制目标的不同, 可将三相矩阵变换器的控制方法分为电压控制法和电流控制法. 其中 Venturini 法、双电压合成法、空间矢量控制属于电压控制法; 而滞环电流跟踪法属于电流控制法. 本文主要研究矩阵变换器的空间矢量控制方法.

空间矢量控制法将交-交矩阵变换器虚拟为交-直变换和直-交变换, 即用等效交-直-交结构代替, 如图 2 所示. 所不同的是, 等效交-直-交变换结构中输出线电压和输入相电流的空间矢量调制彼此独立分开进行, 而实际矩阵变换器中同一开关要担负整流任务和逆变任务, 且整流和逆变相互包含同时进行.

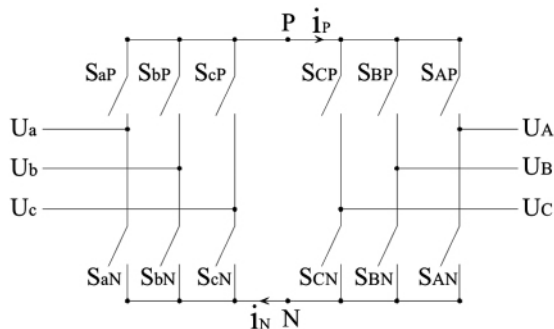


图2 等效交-直-交变换拓扑结构

对于等效交-直-交结构中的逆变部分, 与普通逆变器一样, 利用 8 种不同的开关组合, 在复平面产生相位依次相差 60° 的 6 个有效矢量和 2 个零矢量, 如图 3 所示. 图中 $U_1 \sim U_6$ 为 6 个幅值相同相位互差 60° 的空间电压矢量, U_7, U_8 为两个零矢量, 其中 6 个非零矢量将复平面划分为 6 个扇区.

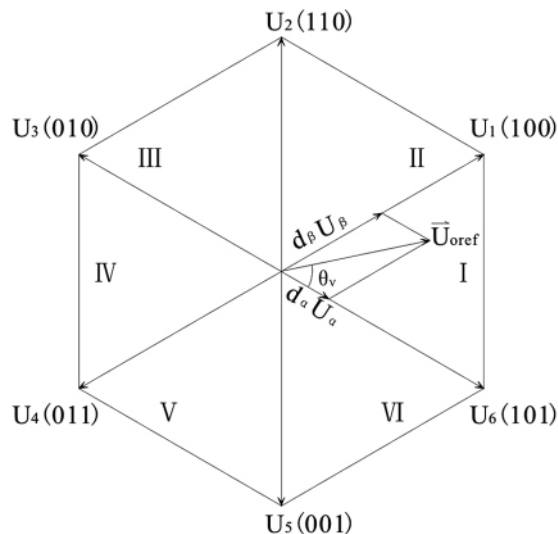


图3 电压空间矢量合成

这 8 个基本电压空间矢量通过线性组合可以合成产生新的等幅均匀间隔电压空间矢量. 任一输出线电压 U_{oref} 均可由时刻 t 时, 平均方向与 U_{oref} 相同的两个相邻电压空间矢量及一个零矢量来合成. 设 U_{oref} 与滞后分量夹角为 θ_v , 则有

$$\vec{U}_o = d_\alpha \vec{U}_\alpha + d_\beta \vec{U}_\beta + d_0 \vec{U}_0$$

其中 d_α, d_β, d_0 分别为 $\vec{U}_\alpha, \vec{U}_\beta$ 及零矢量 $\vec{U}_0$ 的占空比, 且

$$d_\alpha = T_\alpha / T_s = m_v \sin(60^\circ - \theta_v)$$

$$d_\beta = T_\beta / T_s = m_v \sin \theta_v$$

$$d_0 = 1 - d_\alpha - d_\beta$$

上式 T_s 中表示一个 PWM 开关周期, m_v 是电压调制系数.

同理对于等效交-直-交结构中的整流部分可以采用电流空间矢量方法. 利用时刻 t 时与参考输入相电流 I_{iref} 平均方向相同的两个相邻非零电流矢量和一个零矢量合成. 其调制公式为

$$\vec{I}_i = d_\gamma \vec{I}_\gamma + d_\delta \vec{I}_\delta + d_{0c} \vec{I}_0$$

且有

$$d_\gamma = T_\gamma / T_s = m_c \sin(60^\circ - \theta_c)$$

$$d_\delta = T_\delta / T_s = m_c \sin \theta_c$$

$$d_{0c} = 1 - d_\gamma - d_\delta$$

上述式中, m_c 为电流调制系数, $d_\gamma, d_\delta, d_{0c}$ 分别为 $\vec{I}_\gamma, \vec{I}_\delta, \vec{I}_0$ 的占空比.

矩阵变换器的空间矢量控制策略就是要通过推导, 找出矩阵变换器与等效交-直-交变换结构的函数关系, 从而得出实际矩阵变换器的开关控制规律.

对于图 1、2 所示电路,定义开关函数为 S_{jk} : 导通时有 $S_{jk} = 1$, 断开时 $S_{jk} = 0$.

对于等效交-直-交变换电路拓扑结构,有 $j \in \{a, b, c, A, B, C\}$, $k \in \{P, N\}$, 由于输入为电压源, 故不能短路, 输出为感性负载, 故不能开路这一原则得到开关函数必须满足

$$S_{ak} + S_{bk} + S_{ck} = 1 \quad k \in \{P, N\}$$

$$S_{jp} + S_{jN} = 1 \quad j \in \{A, B, C\}$$

对于实际的矩阵变换器结构,有 $j \in \{A, B, C\}$, $k \in \{a, b, c\}$, 同样由输入不能短路, 输出不能开路得到开关函数须满足

$$S_{ja} + S_{jb} + S_{jc} = 1 \quad j \in \{A, B, C\}$$

由图 1、2 可推导出两种拓扑结构各自的输出线电压及相电流的表达式, 进而对比得出二者的开关函数关系为

$$S_{jk} = S_{jP}S_{kP} + S_{jN}S_{kN} \quad j \in \{A, B, C\}, k \in \{a, b, c\}$$

由上述分析可知, 空间矢量调制策略首先要根据输出线电压 U_{oref} 和输入相电流 I_{iref} 的方向, 确定输入输出矢量所在扇区, 再计算电压电流在每一扇区的滞后角 θ_v 、 θ_c , 之后计算出 1 个 PWM 周期中四个非零矢量和一个零矢量的综合占空比即得出开关控制规律. 由于每一个综合占空比对应一种开关组合, 且电压电流各有 6 个扇区, 故调制函数矩阵有 36 种可能的组合.

不过, 上述开关函数关系有一限定条件为

$$1 \leq S_{Gm} + S_{Jn} + S_{Kl} \leq 2$$

式中: $G, J, K \in \{A, B, C\}$, $m, n, l \in \{a, b, c\}$, 且 $G \neq J \neq K, m \neq n \neq l$.

此限定条件意味着矩阵变换器的三条输出线只能联到一条或两条输入线上, 不能分别连到三条不同的输入线上. 这是因为采用交-直-交方法后, 中间虚拟直流环节电压只能是两项输入电压之差, 故而三个输出相不可能分别连至三个输入相. 开关函数的对应关系表明: 对于交-直-交变换的每一合法开关状态, 矩阵变换器有唯一的开关状态与之对应.

3 矩阵变换器的仿真模型及波形

通过上述分析可以给出基于 MATLAB 的矩阵变换器仿真模型, 如图 4 所示.

本模型中的功率开关均采用理想开关代替, 开关的通断时间均为 0, 故不需要考虑因开关换流引起的短路问题. 除采用 PSB 工具箱中的模块外, 还

编写了 3 个 S 函数来实现建模: 函数 Sf1 用于确定矩阵变换器在时刻 T 时输出电压与输入电流所在扇区, 计算电压、电流及零矢量的在一个 PWM 周期中的 5 个占空比并找出对应的开关组合; 函数 Sf2 则将 5 个占空比按照以零矢量占空比为中心, 采用双边对称的调制规则分为 9 个占空比, 继而确定各开关的顺序及各开关的电平信号; 函数 Sf3 位于开关选通模块内用于确定任一时刻 3 各导通开关对应的开关调制矩阵.

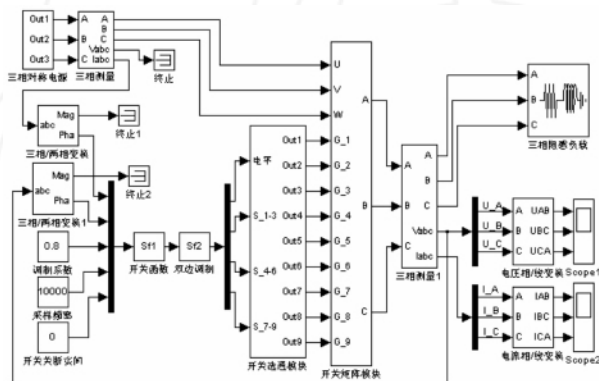


图4 矩阵变换器仿真模型

运行图 4 所示仿真模型, 采用调制系数 $m = 0.8$, 采样频率为 10 kHz, 输入为三相对称电源, 电压幅值 220 V, 频率 50 Hz, 输出电压频率为 133.33 Hz, 接三相阻感负载, 得到如图 5 所示仿真结果, 其中输出电压是标准正弦 PWM 波形, 输出电流也是正弦波, 由于含有少量谐波, 所以波形不很光滑.

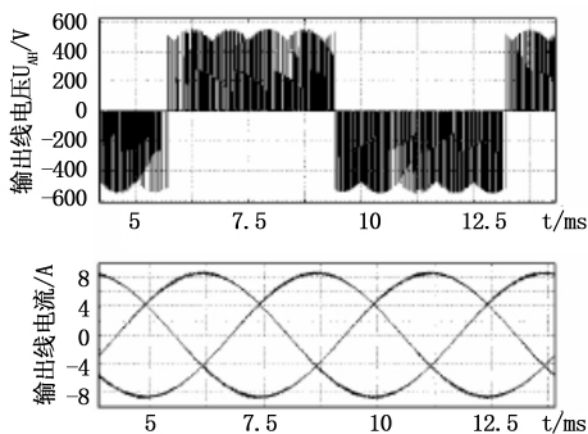


图5 矩阵变换器仿真结果

4 结语

本文详细分析了矩阵变换器空间矢量调制策略, 建立了矩阵变换器的仿真模型, 仿真结果验证了调制策略的正确性和可行性. 但是由于采用理想开

关代替,所以对于实际的矩阵变换器装置须考虑换流、输入输出滤波及外围缓冲保护电路等问题.

参考文献:

- [1] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制 [M]. 北京: 机械工业出版社,1999.
- [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,2003,23(3): 80-84.
- [3] 王 勇,吕征宇,陈 威,汪栖生. 基于 DSP 的矩阵变换器空间矢量调制 [J]. 电源技术应用,2003,6(10): 23-28.
- [4] Angkititrakul. S & Erickson. R. W, Control and implementation of a new modular matrix converter [R]. Applied Power Electronics Conference and Exposition,2004,IEEE 19th Annual,(2): 813-819.
- [5] 郭有贵,朱建林. 矩阵变换器的几项关键技术 [J]. 电工技术,2003,(4): 26-28.

Simulation of Matrix Converter with Space Vector Modulated Control Strategy Based on MATLAB

ZHANG Da - shuang,GAO Hai - sheng

(Institute of Electrical and Electronic Engineering,East China Jiaotong University,Nanchang 330013,China)

Abstract: This paper discusses the modeling and simulation of the matrix converter. First,the basic principle of AC-AC matrix converter is described briefly,and the algorithm realization of space vector modulation strategy is analyzed in detail. Then,the simulated model of matrix converter based on MATLAB is established,and main waveforms are given. The simulation results verify the correctness of the model and control strategy.

Key words: matrix converter; space vector modulation; modeling; simulation

(责任编辑: 王建华)