

文章编号:1005 - 0523(2009)05 - 0039 - 05

双级矩阵变换器空间矢量调制策略的仿真研究

王 锋,高海生,刘霁亮

(华东交通大学 电气与电子工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:首先简要地介绍了常规矩阵变换器(Conventional MC)的优点及不足,说明了双级矩阵变换器(TSMC)的优势。接着推导了从常规 MC 到 TSMC 的演变过程,证明了两开关函数等效、变换功能相同。然后介绍了 TSMC 空间矢量调制(SVM)策略,在此基础上建立了基于 MATLAB 的 TSMC 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:双级矩阵变换器;空间矢量调制;仿真

中图分类号:TM46 **文献标识码:**A

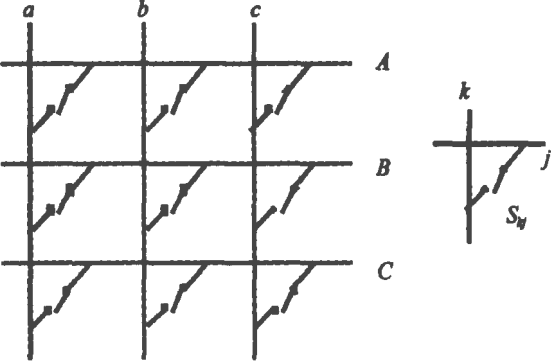
20 世纪 80 年代以来,随着微电子技术和电力电子技术的迅猛发展,各种电力变换器在国民经济建设中得到了越来越广泛的应用,同时也给电力系统带来了谐波污染和低功率因数等负面影响^[1]。尽管可装设补偿装置来防治电力污染,但代价高、不能治本。而矩阵变换器的出现,给从根本上防治“电力公害”带来了新的希望。由于自身结构的特点,矩阵变换器具有一系列优点^[2]:能量双向流通,可实现四象限运行;正弦输入/输出电流;输入功率因数可调;不需要直流储能元件等。

常规矩阵变换器(Conventional MC)因其复杂的控制策略和四步换流增加了控制的难度,降低了系统的可靠性,使得常规 MC 的研究仍停留在实验阶段,而不能在工业中推广应用。双级矩阵变换器(TSMC)^[3]的出现在一定程度上解决了常规 MC 所面临的问题。TSMC 不仅能够实现常规 MC 的所有功能,并且具有功率开关器件相对较少、箝位电路大大简化、换流简单可靠、调制算法复杂度降低、系统成本降低等优点。

1 常规 MC 到 TSMC 的演变

常规 MC 的拓扑结构如图 1 所示,常规 MC 的输入输出关系可表示为^[4]

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{aA} & S_{bA} & S_{cA} \\ S_{aB} & S_{bB} & S_{cB} \\ S_{aC} & S_{bC} & S_{cC} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (1.1)$$



式中, u_A 、 u_B 、 u_C 为三相输出电压, u_a 、 u_b 、 u_c 为三相输入电压, T 为常规 MC 的开关变换矩阵, 代表了输入输出的关系。 S_{kj} 代表连接矩阵变换器 k 相输入和 j 相输出的开关状态, $k \in \{a, b, c\}$, $j \in \{A, B, C\}$, $S_{kj} = 1$ 表示开关导通, $S_{kj} = 0$ 表示开关关断。设有中间 p, n 两点, 对应电压为 u_p 、 u_n 其与三相输入输出电压关系为

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{Ap}S_{An} \\ S_{Bp}S_{Bn} \\ S_{Cp}S_{Cn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_p \\ u_n \end{bmatrix} = T_1 \cdot \begin{bmatrix} u_p \\ u_n \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

图 1 常规矩阵变换器拓扑结构

收稿日期:2009 - 03 - 02

基金项目:华东交通大学科研基金(01303086)

作者简介:王 锋(1986 -),男,安徽阜阳人,硕士研究生,研究方向为电力电子电路、装置、系统控制技术及其计算机仿真及其辅助设计。

$$\begin{bmatrix} u_p \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{ap}S_{bp}S_{cp} \\ S_{an}S_{bn}S_{cn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = T_2 \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \tag{1.3}$$

式中 S_{kw} 、 S_{jw} 表示 k 相、 j 相与 p 、 n 点之间连接开关的状态, $w \in \{p, n\}$ 。

图 2 是根据式(1.2)、式(1.3)得到的 TSMC 拓扑,它同传统的交-直-交变换器拓扑相似,包含交-直(整流级)和直-交(逆变级)两级变换电路。式(1.2)、式(1.3)中 T_1 和 T_2 分别为整流级和逆变级的开关变换矩阵。

综合式(1.2)、式(1.3),可得到 TSMC 输入输出电压之间的变换关系式为

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = T_1 \cdot T_2 \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{ap}S_{Ap} + S_{an}S_{An} & S_{bp}S_{Ap} + S_{bn}S_{An} & S_{cp}S_{Ap} + S_{cn}S_{An} \\ S_{ap}S_{Bp} + S_{an}S_{Bn} & S_{bp}S_{Bp} + S_{bn}S_{Bn} & S_{cp}S_{Bp} + S_{cn}S_{Bn} \\ S_{ap}S_{Cp} + S_{an}S_{Cn} & S_{bp}S_{Cp} + S_{bn}S_{Cn} & S_{cp}S_{Cp} + S_{cn}S_{Cn} \end{bmatrix} \cdot [u_a \ u_b \ u_c]^T \tag{1.4}$$

式中, T 为 TSMC 总开关变换矩阵。将它与常规 MC 开关变换矩阵对比可以看出:

$S_{kp}S_{jp} + S_{kn}S_{jn} = 1$ 时,表示 k 相输入和 j 相输出接通,相当于常规 MC 的 $S_{kj} = 1$; $S_{kp}S_{jp} + S_{kn}S_{jn} = 0$ 时,表示 k 相输入和 j 相输出断开,相当于常规 MC 的 $S_{kj} = 0$ 。因此, $S_{kp}S_{jp} + S_{kn}S_{jn} = S_{kj}$, TSMC 开关变换矩阵与常规 MC 开关变换矩阵等效,二者具有相同的输入输出变换功能。

2 TSMC 的空间矢量调制策略^[5]

矩阵变换器的控制技术是矩阵变换器技术的重要组成部分。由于矩阵变换器包含的开关较多,数学模型复杂,控制也就相应比较繁琐。学者们已经提出了多种矩阵变换器控制策略如 Venturini 法、瞬时双电压合成法、空间矢量调制法、电流滞环跟踪法等^[6]。空间矢量调制策略是通过测量两个输入线电压来决定有效开关组合的作用时间,测量两个输出线电流来实现安全换流。即使在输入电压不平衡时,它也能实现良好控制,避免输出电压引入较多低次谐波。目前,空间矢量调制策略被认为是最具前途的一种矩阵变换器控制策略。双级矩阵变换器的空间矢量调制分为整流级的调制和逆变器调制^[7],下面分别进行说明。

2.1 整流级的空间矢量调制

整流级 6 个双向开关可合成 6 个有效空间矢量 ($I_1 - I_6$),如图 3(a)所示,括号里的两个字母表示输入相与直流 p 、 n 极之间开关的通断状态,如 (b, c) 表示连接 b 相和直流 p 极的开关导通、连接 c 相和直流 n 极的开关导通。

图 3 中, I 为参考输出电流矢量,由两个相邻的空间状态矢量 I_m 、 I_n 及零状态矢量 I_0 合成,如图 3(b)所示, I_m 、 I_n 开关占空比分别为

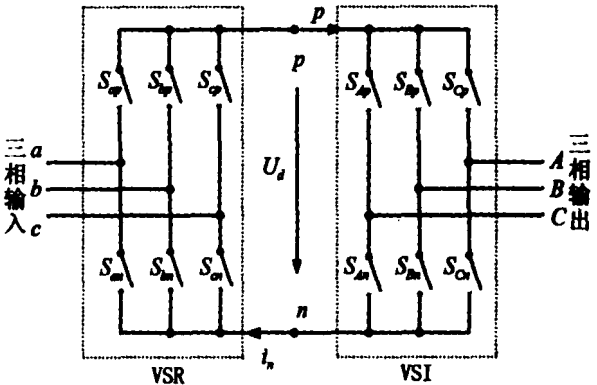


图 2 双级矩阵变换器拓扑结构

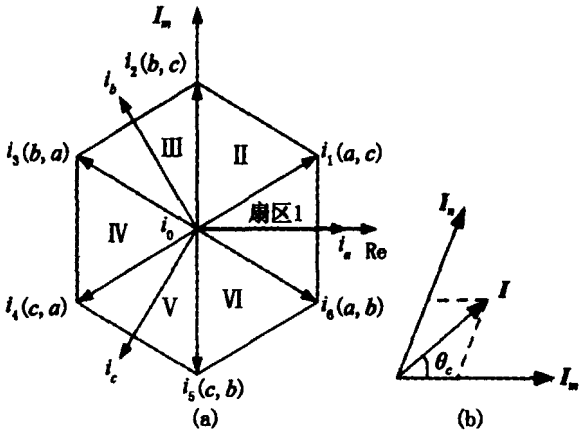


图 3 整流级空间矢量调制

$$\begin{cases} d_m = T_m/T_s = m_c \sin(60^\circ - \theta_c) \\ d_n = T_n/T_s = m_c \sin \theta_c \\ d_{0c} = 1 - d_m - d_n \end{cases} \quad (2.1)$$

式中: m_c 为电流调制系数。且 $0 \leq m_c \leq 1$; T_s 为开关周期; T_m, T_n, T_{0c} 为对应占空比的开关导通时间。

2.2 逆变级的空间矢量调制

TSMC 逆变级的调制如图 4 所示。逆变级电路六个开关可合成六个有效空间矢量 ($U_1 - U_6$) 和两个零矢量。图 3(a) 中括号里的字母按顺序分别代表 a, b, c 三相桥臂上下开关通断状态。例如: (p, p, n) 表示 a, b 两相与 p 极相连的开关导通, c 相与 n 极相连的开关导通, 其余开关处于关断状态。

图 4(b) 中, U_{oL} 为参考输出电压矢量, 由两个相邻的有效空间矢量 U_α, U_β 及零矢量 U_0 合成, 各矢量对应的开关占空比公式为

$$\begin{cases} d_\alpha = m_v \sin(60^\circ - \theta_v) \\ d_\beta = m_v \sin \theta_v \\ d_{0v} = 1 - d_\alpha - d_\beta \end{cases} \quad (2.2)$$

式中: m_v 为电压调制系数, 且 $0 \leq m_v \leq 1$

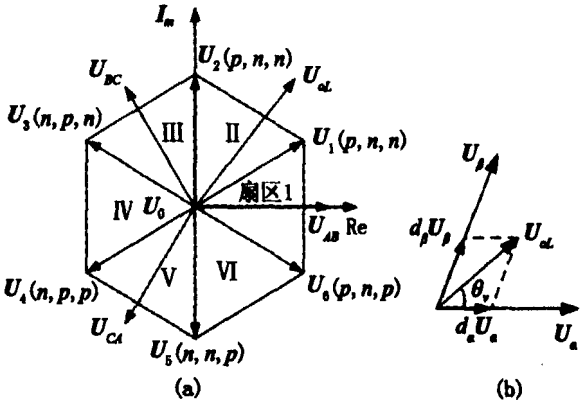


图 4 逆变级空间矢量调制

3 仿真分析

3.1 仿真模型

基于 Matlab/Simulink^[8]及其 S 函数, 建立 18 开关^[9]TSMC 的仿真模型(见图 5)。

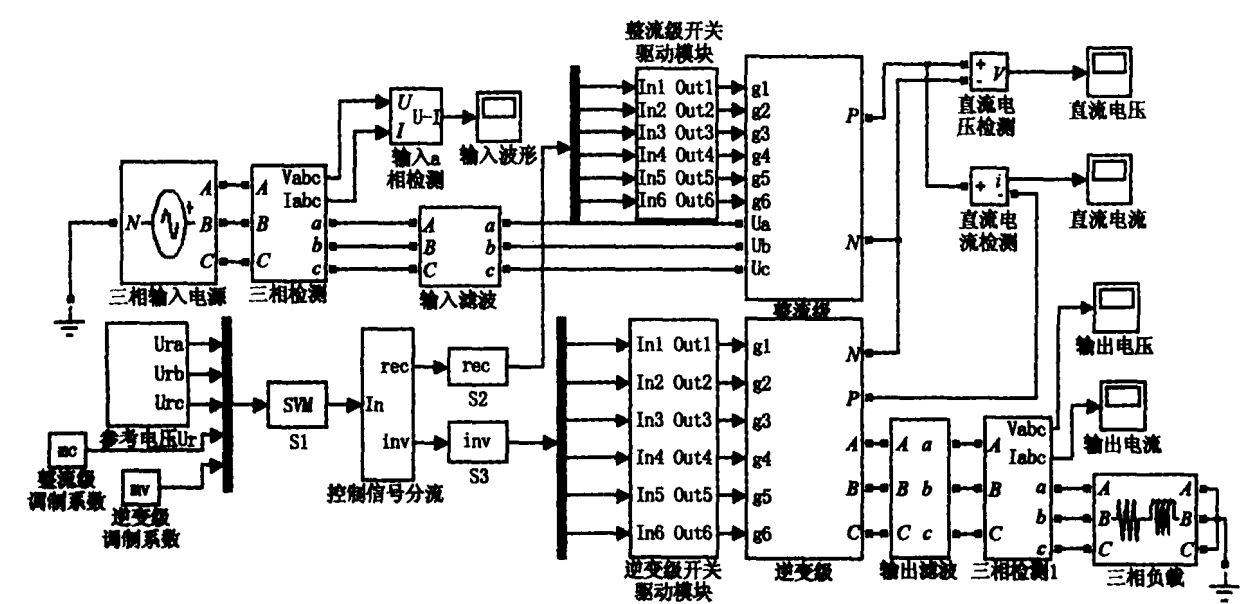


图 5 双级矩阵变换器仿真模型

模型主要组成部分有: 电源和参考电压模块、由理想开关构成的整流级和逆变级模块、开关驱动模块、测量模块、输入滤波器、负载等。

3.2 仿真结果及分析

仿真参数设置如下: 输入为三相对称正弦电压, 其相电压为 220 V/50 Hz; 为了滤除 TSMC 输入电流和

输出电压中的开关高频谐波, TSMC 输入侧和输出侧加入低通 LC 滤波器, 输入侧滤波电感 $L = 0.5 \text{ mH}$, 滤波电容 $C = 45 \mu\text{F}$; 输出滤波电感 $L = 0.9 \text{ mH}$, 滤波电容 $C = 17 \mu\text{F}$; 负载为三相对称阻感负载, 每相电阻为 5Ω , 电感为 1 mH ; PWM 周期为 0.1 ms ; 输出频率为 100 Hz ; 仿真算法为 ode15s:

仿真情况如下:

(1) 输入不加滤波器, 整流级参考电压 U_r 的幅值为 1, 角频率为 50 Hz , 初相角为 0; 逆变级参考电压 U_i 幅值设置为 1, 角频率设置为 100 Hz , 初相角设置为 0, 如图 6(a) 所示; 图 6(b) 为输出三相线电压波形, 忽略滤波电路对其相位的影响, 输出线电压与参考电压的频率、相位基本一致。图 7 为 TSMC 直流电压波形。

(2) 输入不加滤波器, 整流级参考电压 U_r 的幅值为 1, 角频率为 50 Hz , 初相角为 0; 将参考电压 U_i 的幅值降为 0.5, 角频率设置为 100 Hz , 初相角设置为 -90° , 如图 6(c) 所示; 图 6(d) 为输出三相线电压波形, 其幅值与相位的变化与参考电压变化一致, 这说明通过逆变级开关函数参考电压可以对 TSMC 输出电压的频率、幅值和相位进行直接控制。

(3) 输入侧加入滤波器, 整流级参考电压 U_r 功率因数控制角分别设置为 0° 、 30° 时, 电网侧 a 相输入电压电流波形见图 8(a) 与图 8(b), 可见电流与电压的相位差与设置相同, 这说明了通过整流级开关函数可以对输入电流相位进行控制, 从而达到调节 TSMC 输入功率因数的目的。

仿真结果表明, 采用空间矢量调制算法, 不仅能通过两级开关函数的参考电压直接对输入电流和输出电压进行控制, 而且能够保证 TSMC 具有优良的输入输出性能。由于整流级插入了零矢量, 可以使得直流电压局部平均值保持恒定, 逆变级调制系数无需修正, 简化了其控制且可以利用开关函数直接计算占空比, 使得运算任务大大减轻, 因此适合 TSMC 的闭环控制。仿真结果验证了本文调制策略的正确性。

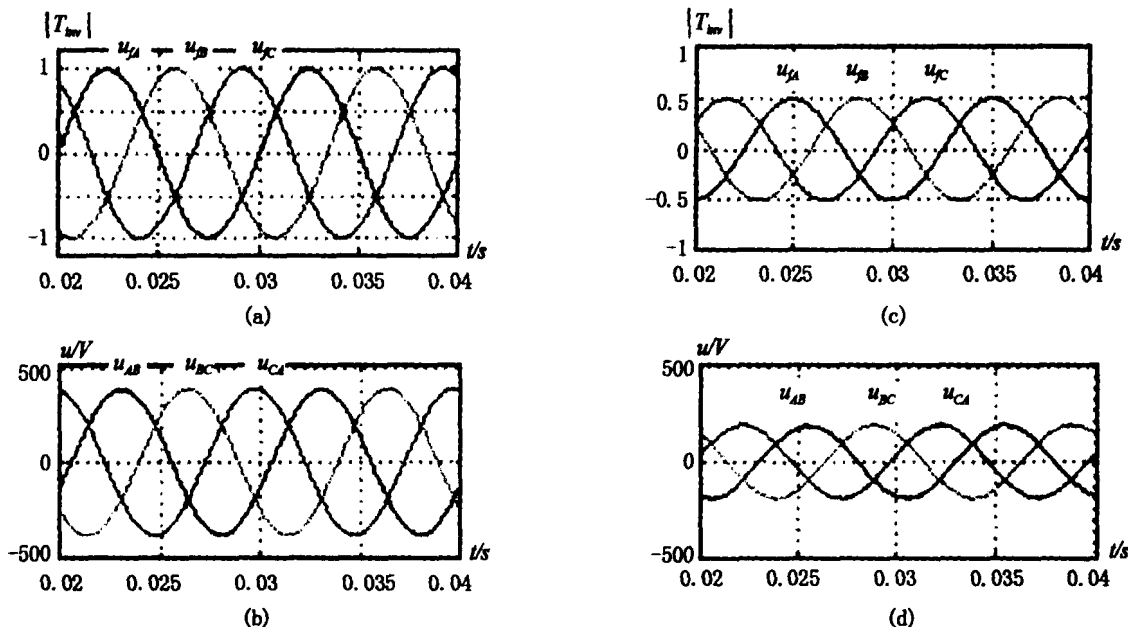


图 6 逆变级参考电压及相应的 TSMC 输出电压波形

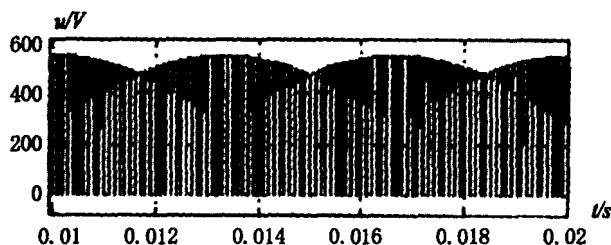


图 7 TSMC 直流电压波形

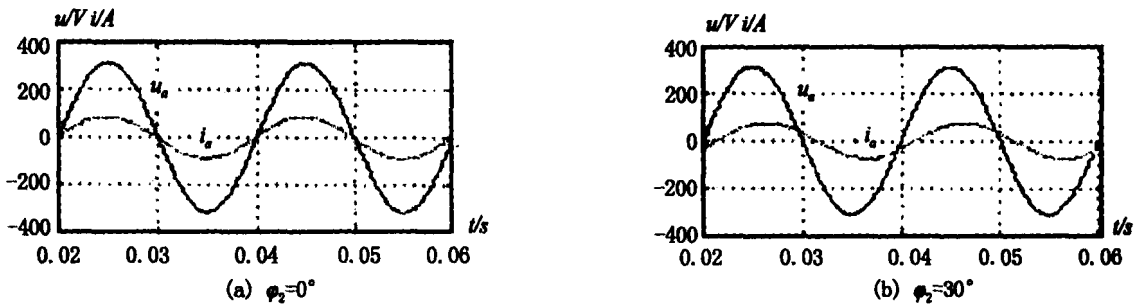


图8 TSMC的a相输入电流和电压波形

4 结论

(1) 推导了从常规矩阵变换器拓扑结构到双级矩阵变换器拓扑结构的演变过程,证明了两者的开关函数等效,变换功能相同。

(2) 分析了双级矩阵变换器空间矢量调制方法,建立了矩阵变换器的仿真模型。

(3) 仿真结果验证了其调制策略的正确性和可行性,为双级矩阵变换器的进一步研究和软硬件设计提供了理论基础。

参考文献:

- [1] 庄心复. 交-交矩阵变换器的控制原理与实验研究[J]. 电力电子技术, 1994, 28(2): 1-5.
- [2] Patric W. Wheeler. Matrix converter: A technology review[J]. IEE Trans on Indus Elect, 2002, 49(4): 276-288.
- [3] Wei L, Lipo T A. A novel matrix converter topology with simple commutation[C]. Proceedings IEEE IAS2001, 2001. 1 749-1 754.
- [4] 邓文浪, 杨欣荣, 朱建林. 18 开关双级矩阵变换器的空间矢量调制策略及其仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 84-90.
- [5] Klumpner C, Blaabjerg F. Two stage direct power converters: an alternative to the matrix converter[C]. IEE Seminar Matrix Converters, 2003. 1-9.
- [6] 张华强, 王立国, 徐殿国, 等. 矩阵式电力变换器的控制策略综述[J]. 电机与控制学报, 2004, 8(3): 237-241.
- [7] 孙 凯, 周大宁, 梅 杨. 矩阵变换器技术及其应用[M]. 机械工业出版社, 2007. 162-169.
- [8] 李维波. MATLAB 在电气工程中的应用[M]. 中国电力出版社, 2007. 143-431.
- [9] Kolar J. W, Baumann M, Schafmeister F, Ertl H. Novel three-phase AC-DC-AC sparse matrix converter[C]. Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC, 2002. 777-791.

Simulation Study of Two Stage Matrix Converter Space Vector Modulation Strategy

WANG Feng, GAO Hai-sheng, LIU Ji-liang

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

Abstract: The advantages and the defects of the conventional matrix converter(CMC) are introduced to explain the strengths of the two-stage matrix converter(TSMC). Then, the process of topology evolution from CMC to TSMC is analyzed to prove that they have the same switching functions and transform function. The space vector modulation(SVM) strategy of TSMC is introduced, and the simulated model of TSMC based on MATLAB is established, main waveforms are given. The simulation results verify the correctness of the model and controlling strategy.

Key words: two stage Matrix converter; space vector modulation; simulation

(责任编辑:王建华)