

矩阵开关变换器的控制技术研究

张 森¹, 吴 捷², 赵 慧¹

(1. 广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510090; 2. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 基于 PWM 变换技术, 探讨矩阵变换器的控制原理, 提出一种新型开关器件的换流控制方案, 来抑制器件在开关转换过程中的浪涌电压, 仿真结果验证了该原理的可行性。

关键词: 矩阵变换器; 双向开关; 换流; 交-交直接变换控制

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1007-7162(2005)01-0032-05

随着电力电子技术的不断进步, 交流变频调速作为电力传动领域内一项重要的节能技术, 正在突飞猛进地发展。但它同时也有其负面影响——无功功率和谐波污染。目前主要的治理手段是无功补偿和有源滤波, 这只是一项消极意义上的无功和谐波抑制方法; 而主动、积极地开发高功率因数和低谐波污染的新型电力电子变换器, 去消除谐波产生根源显然更为重要。矩阵变换器的电路拓扑形式早在 1976 年就由 BR. Pelly 等提出^[1], 与其它电力变换器相比, 矩阵变换器主电路拓扑结构具有诸多优良特性, 如: 1) 可提供正弦的输出电压和产生正弦的输入电流; 2) 无中间直流环节, 结构紧凑, 动态响应快; 3) 同一矩阵变换器装置可实现整流器、逆变器、变频器、斩波器等多重功能。

目前国外矩阵式变换器的研究工作尚未成熟, 离实用化还有距离, 关键原因是适用的双向开关尚未产品化, 而现有组合型双向开关的安全换流问题还未得到彻底解决^[2~4], 由于矩阵式变换器的突出特点已引起功率器件生产商的重视, 如 Eupec 公司推出自己经济型矩阵式功率模块^[5]。而国内研究刚刚起步^[6,7], 从理论到实践都还有很多问题尚未解决。本文针对这一现状, 在深入分析双向开关工作机理的基础上, 通过引入换流死区和辅助开关的概念, 设计了一种简便易行的换流策略, 提出了按矩阵式变换器交-交直接变换实际工作方式建模的仿真方法。

1 矩阵式变换器的交-交直接变换控制

1.1 三相矩阵式变换器结构

典型的三相到三相矩阵变换器拓扑结构如图 1 所示, 9 个双向开关排成 3 行 3 列矩阵, 并利用 9 个双向开关在开关周期内的占空比来组成 3 行 3 列的开关调制矩阵, 来决定矩阵变换器的变换关系。

开关内嵌式如图 2(a) 所示, 它由一个桥式整流器和一个功率开关组成, 当功率开关开通和关断时, 表现一个真正的交流开关的特点。

串联型又分为共发射极和共集电极结构两种, 图 2(b) 为开关共射型。这种类型的每个功率

收稿日期: 2003-10-08

作者简介: 张 森(1967), 男, 副教授, 主要研究方向为电力电子技术。

开关、二极管均工作在两象限方式, 具有分离元件少、可靠性高等特点.

混合型结构利用电容充放电作用保证了开关开通时的电流从零开始增长, 关断时关断电压接近于零, 因而可以近似做到开关过程零损耗.

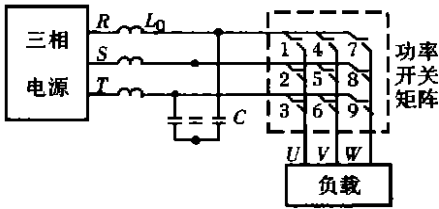


图 1 三相到三相矩阵变换器拓扑结构

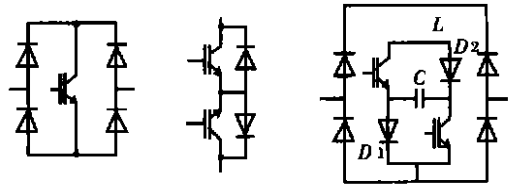


图 2 双向开关结构

从理论上, 开关动作可以瞬间完成并同时进行, 但对实际应用的非理想开关还必须考虑有限的开关动作时间和驱动电路与开关本身的延迟. 如图 1 所示的电路, 若开关 2 在 1 关断之前开通, 则电源 R、S 经开关 1、2 就构成一条短路路径; 为了避免出现这种短路现象, 1、2 切换过程中就要增加一个两者同时关断的过程, 即死区时间. 由于输电线路存在杂散电感 L_0 、负载可能是电感负载如电机等, 其带来的浪涌电压足以击穿损坏相应的功率开关器件. 为了克服浪涌电压带来的不利影响, 目前被广泛采用的办法是在变换器输入、输出端增加一电压钳位电路^[2~5, 8], 如图 3 所示.

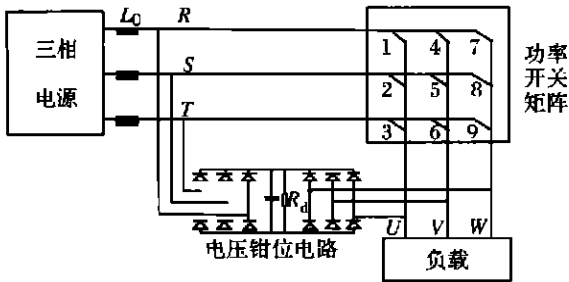


图 3 系统结构原理框图

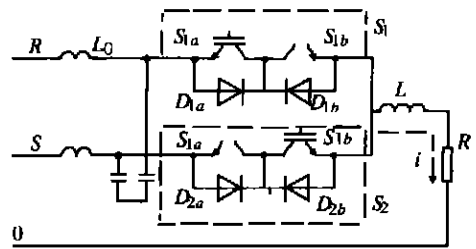


图 4 开关转换原理图

在图 3 所示的电路中, 为了避免钳位电路直流部分浪涌能量的累积, 电阻 R_d 被用来消耗电压钳位电路在开关切换过程中吸收的能量, 电阻 R_d 增大了电路的附加损耗, 随着开关器件开关频率的提高, 附加损耗也随之增大. 为了避免电压钳位电路给装置带来的附加损耗, 在这里采用图 4 所示的电路拓扑, 开关采用串连共阴极式. 与图 3 相比, 增加了用于吸收电网杂散电感带来的浪涌电压 C , 去除了图 3 中的电压钳位电路.

为了克服负载给矩阵变换器带来的浪涌电压, 以图 4 为例, 开关由 S_1 开通、 S_2 关断转换成 S_1 关断、 S_2 开通. 在转换前, 电流 i 由 R 经漏感 L_0 、 D_{1a} 、 S_{1b} 流向负载, 在切换时, 先关断 S_{1a} 和开通 S_{2b} , 电流 i 流向负载的路径不变; 经过一段延时(死区)后, 再关断 S_{1b} 和开通 S_{2a} , 电流 i 流向的路径变为由 S 经漏感 L_0 、 D_{2a} 、 S_{2b} 流向负载. 显然通过适当的选择开关的次序, 可以克服负载给矩阵变换器带来的浪涌电压.

开关由 S_1 开通、 S_2 关断转换成 S_1 关断、 S_2 开通, 开关工作次序的选择是根据 R 、 S 相电压的关系来选择, 当 R 相电压大于 S 相电压时, 则可先开通 S_{2b} 、关断 S_{1b} , 再开通 S_{2a} 、关断 S_{1a} ;

当 R 相电压小于 S 相电压时, 则可先开通 S_{2a} 、关断 S_{1a} , 再开通 S_{2b} 、关断 S_{1b} .

1.2 矩阵式变换器的工作原理

一个用于实现交-交变换的矩阵式变换器可以采用一个虚拟的整流器和一个虚拟的逆变器构成的等效交-直-交结构来代替, 如图 5 所示.

采用这样的等效结构可以充分利用已有成熟的交-直-交变换中的 PWM 控制技术, 并可通过对分析出如图 5 所示实际结构矩阵式变换器的开关控制规律.

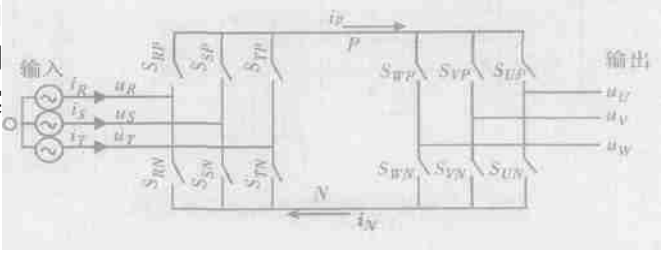


图 5 矩阵式变换器的等效交-直-交结构图

在这里定义开关函数 S_{jk} : 导通时, $S_{jk} = 1$; 断开时, $S_{jk} = 0$. 其中 $j \in \{R, S, T, U, V, W\}$, $k \in \{P, N\}$. 由于输电线路即负载可能存在一定的电感, 因而输入电压不能被短路、输出电路不能突然开路的原则, 虚拟整流器同一直流母线 P 或 N 上的开关必须有一个且只能有一个处于导通状态, 即

$$S_{Rk} + S_{Sk} + S_{Tk} = 1. \tag{1}$$

而虚拟逆变器同一输出相必须有一个而且只能有一个开关导通, 即

$$S_{jP} + S_{jN} = 1. \tag{2}$$

等效交-直-交变换器中整流器部分的变换关系为

$$U_p = [S_{RP}, S_{SP}, S_{TP}] [u_R, u_S, u_T]^T, \quad U_N = [S_{RN}, S_{SN}, S_{TN}] [u_R, u_S, u_T]^T, \tag{3}$$

$$[i_R, i_S, i_T]^T = [S_{RP}, S_{SP}, S_{TP}]^T i_{p-} - [S_{RN}, S_{SN}, S_{TN}]^T i_N. \tag{4}$$

等效交-直-交变换器中逆变器部分的变换关系为

$$[u_U, u_V, u_W]^T = [S_{UP}, S_{VP}, S_{WP}]^T U_p + [S_{UN}, S_{VN}, S_{WN}]^T U_N = \begin{bmatrix} S_{UP} \cdot S_{RP} + S_{UN} \cdot S_{RN} & S_{UP} \cdot S_{SP} + S_{UN} \cdot S_{SN} & S_{UP} \cdot S_{TP} + S_{UN} \cdot S_{TN} \\ S_{VP} \cdot S_{RP} + S_{VN} \cdot S_{RN} & S_{VP} \cdot S_{SP} + S_{VN} \cdot S_{SN} & S_{VP} \cdot S_{TP} + S_{VN} \cdot S_{TN} \\ S_{WP} \cdot S_{RP} + S_{WN} \cdot S_{RN} & S_{WP} \cdot S_{SP} + S_{WN} \cdot S_{SN} & S_{WP} \cdot S_{TP} + S_{WN} \cdot S_{TN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_R \\ u_S \\ u_T \end{bmatrix}. \tag{5}$$

由图 1 可得实际矩阵式变换器交交直接变换关系为

$$\begin{bmatrix} u_U \\ u_V \\ u_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 & S_3 \\ S_4 & S_5 & S_6 \\ S_7 & S_8 & S_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_R \\ u_S \\ u_T \end{bmatrix}, \tag{6}$$

$$\begin{bmatrix} S_1 & S_2 & S_3 \\ S_4 & S_5 & S_6 \\ S_7 & S_8 & S_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{UP} \cdot S_{RP} + S_{UN} \cdot S_{RN} & S_{UP} \cdot S_{SP} + S_{UN} \cdot S_{SN} & S_{UP} \cdot S_{TP} + S_{UN} \cdot S_{TN} \\ S_{VP} \cdot S_{RP} + S_{VN} \cdot S_{RN} & S_{VP} \cdot S_{SP} + S_{VN} \cdot S_{SN} & S_{VP} \cdot S_{TP} + S_{VN} \cdot S_{TN} \\ S_{WP} \cdot S_{RP} + S_{WN} \cdot S_{RN} & S_{WP} \cdot S_{SP} + S_{WN} \cdot S_{SN} & S_{WP} \cdot S_{TP} + S_{WN} \cdot S_{TN} \end{bmatrix}. \tag{7}$$

针对系统的工作特点, 可把一个工频周期分为 6 个区域, 如图 6 所示.

在每个区域里可取 $U_p = \max[u_R, u_S, u_T]$, $U_N = \min[u_R, u_S, u_T]$, 如系统工作如图 6 所示的第 4 区, S 相电压最高、 T 相电压最低, 即 $U_p = u_S$, $U_N = u_T$, 由式(3)可得

$$[S_{RP}, S_{SP}, S_{TP}] = [0, 1, 0], [S_{RN}, S_{SN}, S_{TN}] = [0, 0, 1].$$

S_{ik} 状态的选择可采用已有成熟的直/交变换中的 SPWM 控制技术来构造, 其中 $i \in \{U, V,$

W], $k \in [P, N]$. 设系统的开关周期为 T , 系统工作于图 6 所示的第 4 区, 以 U 相为例, $S_{UP} = 1$ 的时间为 t_1 , $S_{UN} = 1$ 的时间为 t_2 , U, V, W 三相同连接至某一相断开其它相的连接的时间为 t_0 , 其中 $T = t_1 + t_2 + t_0$. 则输出 U 相的相电压

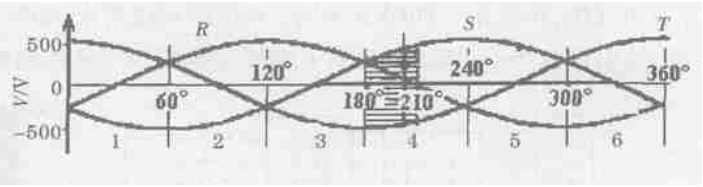


图 6 电网电压波形图

$$u_U = \frac{u_P \cdot t_1 + u_N \cdot t_2}{T} = \frac{u_S \cdot t_1 + u_T \cdot t_2}{T} \tag{8}$$

把上述第 4 工作区的开关状态代入式(8)可得在 t_1 时段即

$$S_{UP} = 1, S_{UN} = 0, S_{SP} = 1, S_{RP} = 0, S_{TP} = 0.$$

代入式(7), 则连接 U 相开关器件 $[S_1, S_2, S_3]$ 的开关状态为

$$[S_1 \ S_2 \ S_3] = [0 \ 1 \ 0]. \tag{9}$$

与之相对应的 t_2 时段, 连接 U 相开关器件 $[S_1, S_2, S_3]$ 的开关状态为

$$[S_1 \ S_2 \ S_3] = [0 \ 0 \ 1]. \tag{10}$$

相同的方法可推出其它开关器件的开关状态, 从而可得出每个工作区相应开关状态, 建立相应工作区的开关表.

2 系统的仿真

为了验证本文所述换流方案的可行性, 在这里利用 Simetrix4.2 分别对图 5 和图 7 所示的电路进行仿真, 仿真结果如图 8 所示, 其中元件参数为 $R = 10 \ \Omega, L = 10 \text{ mH}, C = 100 \ \mu\text{F}$.

由图 8(a)、(c) 可知, 采用本文介绍的换流控制方案, 可较好的抑制换流过程中的浪涌电压, 其抑制的浪涌电压可与含电压浪涌抑制电路图 8(b) 相媲美.

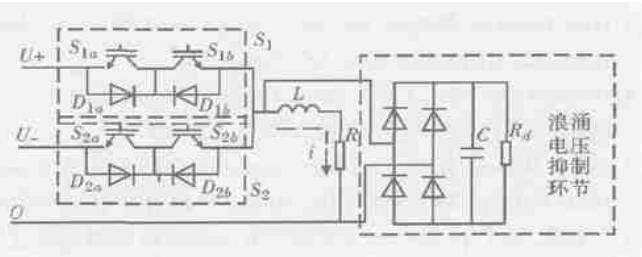


图 7 换流电路仿真原理图

取如图 9 所示矩阵变换器系统的结构框图, 利用 MATLAB 对系统进行仿真, 利用上述功率开关器件的工作原理, 建立了基于 SPWM 控制的矩阵变换器的仿真模型. 以三相感性负载作为矩阵变换器的负载进行仿真, 其中 $L = 10 \text{ mH}, R = 10 \ \Omega$ 、开关频率

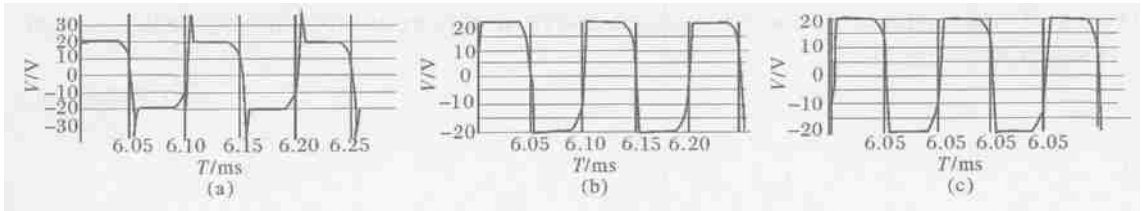


图 8 系统换流过程的仿真波形

- (a) 无电压浪涌抑制电路负载 R, L 端电压波形;
- (b) 含电压浪涌抑制电路 ($R_d = 100 \ \Omega$) 负载电压波形;
- (c) 无电压浪涌抑制电路采用新型换流方案负载电压波形;

$f_k = 10 \text{ kHz}$, 仿真结果如图 10 所示. 从图中可以看出, 矩阵变换器的输出电压波形为 SPWM 调制波, 输出电流接近正弦波, 表明了矩阵变换器 SPWM 控制策略的可行性.

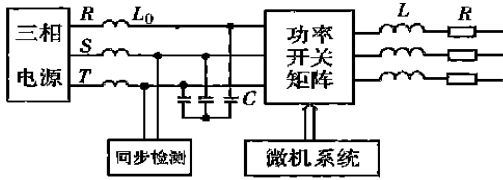


图 9 系统的结构框图

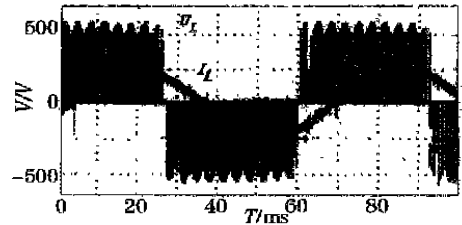


图 10 系统的仿真结果

3 结束语

随着电力半导体器件性能的不不断提高, 研究新型的既有优良控制性能又有优良输入电流品质的变换器已成为当前电力电子技术的发展趋势. 由于矩阵式变换器的一系列优点, 研究工作在国内外引起了广泛重视, 并取得了一定的成果, 但在应用中还存在许多问题有待进一步的研究、解决. 本文对基于传统的 PWM 控制技术, 提出一种新型开关器件的换流控制方案, 来抑制器件在开关转换过程中的浪涌电压, 并对矩阵变换器的工作原理进行了分析及仿真研究, 对未来的矩阵变换器控制策略研究及硬件设计具有一定的意义.

参考文献:

- [1] Gyugyi L, Pelly B R. Static Power Frequency Changers[M]. New York: John Wiley and Sons Inc. 1976.
- [2] Hube L, Borojevic D. Space vector modulated three phase to three phase matrix converter with input power factor correction [J]. IEEE Trans, Ind. 1995, 31(6): 1234-1246.
- [3] Peter Mutschler, Matthias Marcks. A Direct Control Method for Matrix Converters [J]. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2002, 49(2): 362-369.
- [4] Christian Klumpner. A New Matrix Converter Motor (MCM) for Industry Applications [J]. IEEE TRANSACTIONSON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2002, 49(2): 325-335.
- [5] Jochen Mahlein. Matrix Converter Commutation Strategies With and Without Explicit Input Voltage Sign Measurement [J]. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2002, 49(2): 407-414.
- [6] 王建宽, 汤宁平. 基于 SPWM 的矩阵变换器的控制策略 [J]. 福州大学学报(自然科学版). 2002, 30(2): 217-220.
- [7] 穆新华, 庄心复. 交-交型矩阵变换器的双电压控制原理及波形合成 [J]. 南京航空航天大学学报, 1997, 29(2): 151-157.
- [8] Patrick W Wheeler. Matrix Converters: A Technology Review [J]. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2002, 49(2): 276-288.

(下转第 41 页)

Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(10) : 970-986.

- [4] Wang M, Evans J, Hassenbrook L, et al. A multistage, optimal active contour model[J] . IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(11) : 1586-1591.
- [5] 杨杨, 张田文. 基于多分辨率方法的主动轮廓线跟踪算法[J] . 计算机学报, 1998, 21(3) : 210-216.

Snake Model Based on MR-MS and Its Application

DING Wei, CHENG Si-yuan, ZHANG Xiang-wei

(Faculty of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China)

Abstract: The snake model, which was developed by Kass et al. in 1987, has absorbed a lot of attention of researchers in the field of computer vision, and is applied to many cases of computer vision. To solve its limitation, a new snake model based on MR-MS (multi-resolution and multi-scale) is presented and used for medical image segmentation. The result of experiments shows that this new model is feasible.

Key words: snake model; multi-resolution; multi-scale

(上接第 36 页)

The Control Technology Research of Matrix Converter

ZHANG Miao¹, WU Jie², ZHAO Hui¹

(1. Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China

2. College of Power Supply, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;)

Abstract: This paper studies the control principle of matrix converter, based on the technology of PWM, analyzes the switch on/off mode of matrix converter power modules, and presents a novel control scheme of switching power modules to overcome the surge voltage during the process of the power modules switching on/off. The simulating results based on Simetrix 4.2 and Matlab are presented at last.

Key words: matrix converter; Bi-direction switch; convert; AC-AC converting control