

# 随机脉冲位置 PWM 及其在矩阵变换器中的实现

粟梅, 肖鹏, 孙尧

(中南大学信息科学与工程学院, 湖南省长沙市 410083)

## Randomized Pulse Position PWM and Its Realization on Matrix Converter

SU Mei, XIAO Peng, SUN Yao

(College of Information Science & Engineering of Central South University,  
Changsha 410083, Hunan Province, China)

**ABSTRACT:** The matrix converter is a new cycle converter with matrix switch sequences, which has a series of advantages. A novel randomized pulse position PWM based on traditional voltage space vectors is proposed, which is worked on the model of matrix converter. In the strategy, the positions of the zero voltage vectors are randomly changed, and then two PWM modes with low switching losses are selected randomly, which make harmonic that comes from matrix converter distribute in a wider frequency range evenly. This paper illustrates a fast algorithm of SVPWM in the less switching loss mode. S-function models are programmed by means of MATLAB, which are combined with the models of power system block in SIMULINK to set up the simulation model. And it produces the better waveform and data by the simulation using the two strategies separately. The simulation results verify the feasibility and the practicability of the novel randomized pulse position PWM.

**KEY WORD:** power electronics; matrix converter; space-vector modulation; random control; simulation

**摘要:** 矩阵变换器是一种开关序列呈矩阵型的交交变换器, 具有一系列的优点。以矩阵变换器为研究对象, 提出了一种基于传统空间电压矢量 PWM 的随机脉冲位置 PWM 控制策略, 该策略通过随机改变每个开关周期中零矢量的位置, 实现了 2 种低开关损耗 PWM 模式之间的随机转换, 使矩阵变换器输出电压的谐波成分均匀地分布在较宽的频带范围内, 同时介绍了在低开关损耗模式下的一种快速 SVPWM 算法。利用 Matlab 编制 s 函数模块, 结合 Simulink 的仿真工具箱的现有模块组成矩阵变换器的仿真模型, 分别在原始空间电压矢量 PWM 和随机脉冲位置 PWM 两种控制策略下进行了仿真对比, 得到良好的波形和数据, 从而验证了随机脉冲位置 PWM 的可行性和正确性。

**关键词:** 电力电子; 矩阵变换器; 空间矢量调制; 随机控制;

仿真

## 0 引言

近20年来, 矩阵变换器一直是AC/AC变换器研究的热点问题。它是由连接在两个独立的三相系统之间的双向开关矩阵组成, 这两个三相系统的每一相输出端都和另一个系统的每一相输入端通过1个双向开关相连接。它具有优于传统变频器的特性: 能量双向流通、正弦输入与输出电流、可控的输入功率因数等, 适用于交流变频调速系统。但是在变频器供电的交流传动系统中, 由于谐波电流的影响产生电磁噪声, 此噪声主要由所采用的PWM方法所致。作为变频器的矩阵变换器同样存在上述问题, 设计出性能优良的矩阵变换器关键技术之一就是要有合适的PWM控制策略, 目前比较成熟的是空间矢量法。在SVPWM方法中, 功率开关以“确定的”方式通断虽然可以很好地抑止电压波形中的低次谐波, 但却产生某些幅值很大的高次谐波, 频谱分析表明, 这些幅值较大的谐波主要集中在一倍和两倍的载波频率附近, 它们将产生明显的噪声和振动<sup>[1]</sup>。

噪声的分布情况直接与开关频率  $f_s(t)$  有关, 如果  $f_s(t)$  为一窄带函数, 噪声将表现为按特定规律重复的有色噪声, 从而污染环境, 对人的听觉有一定的损害。为了解决上述问题, 一种方法是提高开关频率, 使噪声超出人耳的敏感频率范围, 但是这种方法伴随着较高的开关损耗, 且受功率器件开关时间的限制。近年来出现的随机脉宽调制 (RPWM) 为解决噪声问题提供一种新的思路, 即加大  $f_s(t)$  的带宽, 使  $f_s(t)$  为一个宽带的随机函数。随机 PWM

的基本思想是用一种随机的开关策略代替常规 PWM 中固定的开关模式, 使电磁噪声近似为有限带宽白噪声, 从而使输出电压的谐波成分均匀地分布在一个较宽的频率范围内<sup>[2]</sup>。不仅如此,  $f_s(t)$ 带宽的加大还可以减少输出谐波幅度, 以改变整个系统的电磁兼容性能。

本文在传统的空间电压矢量 PWM 中引入随机脉冲位置 PWM 方法, 并应用于矩阵变换器中, 用 Matlab 进行仿真实现, 证明其可行性。

### 1 矩阵变换器空间电压矢量 PWM 原理

#### 1.1 矩阵变换器的等效交-直-交变换

矩阵变换器由 9 个开关组成, 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。矩阵变换器的拓扑结构如图 1 所示。

其中双向开关  $S_{jk}$  ( $j \in \{A,B,C\}$   $k \in \{a,b,c\}$ ) 为理想开关。按照输入电压不能短路, 输出电压不能开路的原则, 开关函数必须满足:

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

基于 SVPWM 的矩阵变换器的基本原理<sup>[3]</sup>是: 将 MC 的交-交变换虚拟为交-直和直-交变换。在虚拟整流和虚拟逆变过程中, 分别使用空间矢量调制技术, 得到整流和逆变的低频调制矩阵。两者的乘积就是矩阵变换器的低频调制矩阵<sup>[4]</sup>。虚拟分解结构示意图如图 2 所示。

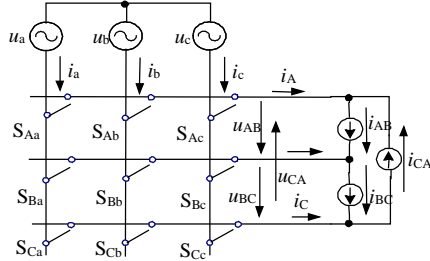


图 1 矩阵变换器拓扑结构示意图  
Fig. 1 The simplified configuration diagram of matrix converter

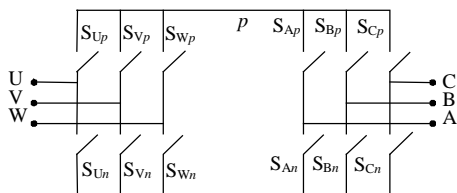


图 2 矩阵变换器等效交-直-交电路  
Fig. 2 The equivalent AC-DC-AC structure of a matrix converter

#### 1.2 矩阵变换器的空间电压矢量 PWM 调制

空间矢量 PWM 调制即通过在每个 PWM 周期中, 计算出所需的 5 种不同的开关组合以及它们对应的 5 个占空比<sup>[5]</sup>, 以此控制矩阵开关从而达到变换的目的。

以虚拟逆变部分为例<sup>[6]</sup>, 空间电压矢量调制如图 3 所示。8 种有效的开关状态映射到空间中的 8 个矢量的位置, 其中 6 个有效矢量 ( $U_1 \sim U_6$ ), 长度为  $\sqrt{2}U_{DC}/3$ , 相位互差  $\pi/3$ , 2 个零矢量 ( $U_0, U_7$ )。SVPWM 的基本原理就是用若干开关电压矢量逼近给定的参考电压矢量, 最终构成一组等幅不同相的空间电压矢量。根据 SVPWM 技术, 参考输出电压矢量

$$U_{oL} = \sqrt{3} \cdot U_{om} \cdot e^{j(\omega_s t - \theta_o + \pi/6)} \quad (2)$$

可由 2 个相邻的空间状态矢量  $U_a, U_b$  及零状态矢量  $U_0$  合成得到。

由正弦定理,  $U_a, U_b$  作用时间  $T_a, T_b$  计算如下:

$$\begin{cases} T_a = T_{sw} \cdot m_v \cdot \sin(\pi/3 - q_{sv}) \\ T_b = T_{sw} \cdot m_v \cdot \sin(q_{sv}) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $T_s$  为开关周期;  $m_v$  为调制系数, 且  $0 \leq m_v \leq 1$ 。

$$m_v = (\sqrt{3} \cdot V_{om}) / 2U_{pn} \quad (4)$$

开关占空比为

$$\begin{cases} d_a = T_a / T_s \\ d_b = T_b / T_s \\ d_{0v} = T_{0v} / T_s = 1 - d_a - d_b \end{cases} \quad (5)$$

一般来讲, 传统空间电压矢量 PWM 包括如下几个步骤: ①计算合成电压矢量  $V_{oL}$ ; ②判断  $V_{oL}$  所在的扇区; ③计算开关电压矢量作用的时间  $t_a, t_b, t_0, t_7$ 。④根据开关电压矢量作用时间合成为三相 PWM 信号。

SVPWM 波形如图 4 所示。

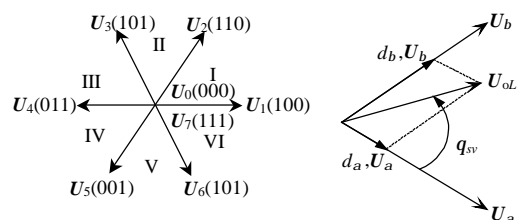


图 3 虚拟逆变器空间矢量调制  
Fig. 3 Voltage space vector and their composition diagram

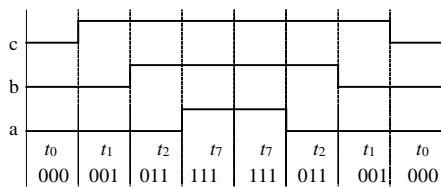


图 4 SVPWM 波形

Fig. 4 Waveform of SVPWM

## 2 随机脉冲位置空间电压矢量调制

### 2.1 随机脉冲位置 PWM 原理

上述空间电压矢量调制方法产生的三相 PWM 波形如图 4 所示。图中，一个开关周期的两端和中间均加入了零矢量。

PWM 的电压控制是通过控制开关器件的占空比来实现的。占空比与开关器件的导通位置（即脉冲位置）和开关频率无关，然而导通位置和开关频率的改变却影响着输出电压的频率分布。如果在导通时间（即脉冲宽度）不变的前提下，随机改变导通位置或开关频率，使幅值较大的谐波均匀分布，输出电压就可以在基波分量不变的情况下得到一个宽而均匀连续频谱，从而有效地抑止幅值较大的谐波分量<sup>[7]</sup>。基于规则采样 PWM 提出了一种简单有效的随机脉冲位置 PWM，在该方法中，三相脉冲要么位于开关周期的开始部分（称为超前方式 lead mode），要么位于开关周期的结束部分（称为滞后方式 lag mode），而每个采样周期  $T_{sw}$  的具体调制方式（超前边缘调制还是滞后边缘调制）则随机地加以选择<sup>[8]</sup>。

以上方法在具体进行算法处理时，三相脉冲进行统一的随机调制，即各相脉冲之间的相对位置关系不变，如图 5 所示。对各相脉冲单独进行调制，即

$$\begin{cases} T_1' / 2 = k_1 T_1 \\ T_1'' / 2 = (1 - k_1) T_1 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} T_2' / 2 = k_2 T_2 \\ T_2'' / 2 = (1 - k_2) T_2 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} T_3' / 2 = k_3 T_3 \\ T_3'' / 2 = (1 - k_3) T_3 \end{cases} \quad (8)$$

其中， $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  为归一化的随机数。

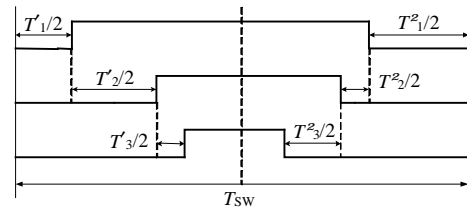


图 5 脉冲位置的随机化

Fig. 5 Randomization of pulse position

### 2.2 基于空间电压矢量的随机脉冲位置 PWM

在常规的空间电压矢量 PWM 中，通常令两个零矢量作用时间相等<sup>[9]</sup>，即

$$T_0 = T_7 = (T_{sw} - T_1 - T_2) / 2 \quad (9)$$

而规则采样 PWM 的  $T_0$  和  $T_7$  不一定相等，该算法和常规的 SVPWM 算法是等效的，证明如下：

规则采样 PWM 如图 6 所示。根据图 6 可得到脉冲宽度计算公式

$$\begin{cases} T_a = (U_a^* / U_{DC}) \cdot T_s + T_f \\ T_b = (U_b^* / U_{DC}) \cdot T_s + T_f \\ T_c = (U_c^* / U_{DC}) \cdot T_s + T_f \end{cases} \quad (10)$$

式中： $U_a^*$ 、 $U_b^*$ 、 $U_c^*$  为输出的瞬时参考电压； $T_s$  为  $T_{sw} / 2$ ； $T_f$  为  $T_{sw} / 2$ 。

令  $T_a = T_{max}$ 、 $T_b = T_{mid}$ 、 $T_c = T_{min}$ ，由图 4 和图 6 推知两个非零矢量作用时间为

$$\begin{cases} T_1 = T_{max} - T_{mid} = T_a - T_b \\ T_2 = T_{mid} - T_{min} = T_b - T_c \end{cases} \quad (11)$$

将式(10)代入式(11)得

$$\begin{cases} T_1 = \sqrt{3}U \cdot T_s \cdot \sin(60^\circ - q) / U_{DC} \\ T_2 = \sqrt{3}U \cdot T_s \cdot \sin q / U_{DC} \end{cases} \quad (12)$$

与式(3)比较可以证明  $T_1$  和  $T_2$  与一般空间电压矢量计算所得的时间完全一致。

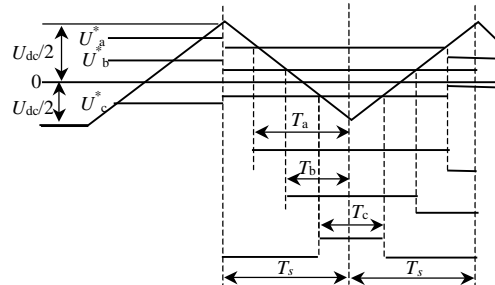


图 6 规则采样 PWM

Fig. 6 PWM based on regular sampling

零矢量的作用时间为

$$\begin{cases} T_0 = T_s - (T_{\max} + T_f) \\ T_7 = T_{\min} + T_f \end{cases} \quad (13)$$

在低开关损耗模式下要求某项参考电压为正且绝对值最大, 则对应的开关在本 PWM 周期中常开; 为负且绝对值最大, 则对应的开关在本 PWM 周期中常闭, 可得开关周期

$$T_f = T_s - T_{\max} \quad (T_{\min} + T_{\max} \geq 0) \quad (14)$$

$$T_f = -T_{\min} \quad (T_{\min} + T_{\max} < 0) \quad (15)$$

代入可知

当  $|T_{\max}| > |T_{\min}|$  时,  $T_0=0$ , 即只用到  $U_7$ ;

当  $|T_{\max}| < |T_{\min}|$  时,  $T_7=0$ , 即只用到  $U_0$ 。

在空间电压矢量调制中, 规则采样的占空比决定输出电压的非零矢量的作用时间  $T_1$ 、 $T_2$ , 而与电压矢量  $U_1$ 、 $U_2$  的作用时刻无关<sup>[10]</sup>。在实现一个矢量序列的转换过程中, 零矢量的选择同所需开关次数有关; 若两个零矢量均参与合成, 将导致功率开关器件开关次数增加, 因此提出只有一个零矢量参与合成, 则减少开关次数, 从而减小开关损耗。由以上推导提出基于 SVPWM 随机脉冲位置 PWM 的 2 种基本模式: 当零矢量为  $U_0$  时, 即有 1 个开关器件处于常闭状态, 零矢量仅作用在开关周期的两端 (称为 0 模式), 其开关顺序为  $U_{000}$ 、 $U_{001}$ 、 $U_{011}$ 、 $U_{011}$ 、 $U_{001}$ 、 $U_{000}$ ; 当零矢量为  $U_7$  时, 即有 1 个开关器件处于常开状态, 零矢量仅作用在开关周期的中间 (称为 1 模式), 其开关顺序为  $U_{001}$ 、 $U_{011}$ 、 $U_{111}$ 、 $U_{111}$ 、 $U_{011}$ 、 $U_{001}$ 。当零矢量位置随机改变, 非零矢量位置 (脉冲位置) 也随机改变, 从而实现随机脉冲位置 PWM。该方法实质上是两种低开关损耗模式之间的随机转换, 故可在减少噪声的同时提高变频器的效率<sup>[11]</sup>。

### 3 RPWM 在矩阵变换器中的实现

#### 3.1 随机调制对矩阵变换器开关频率的影响

矩阵变换器的开关以“确定的、最优的”方式通断, 以开关转换次数最少、开关损耗最小为准, 以第 I 扇区为例, 传统的矢量变换需要 10 次开关动作。

随机脉冲位置 PWM 调制中, 改变零矢量的位置, 由随机数的产生选择不同的模式: 0 模式或 1

模式。显然, 由一种模式进入另一种模式可能出现的情况及概率如图 7 所示<sup>[12]</sup>。

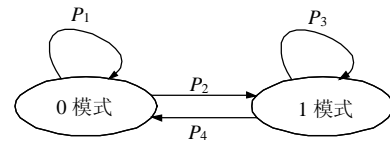


图 7 模式转换关系

Fig. 7 Transform between two modes

(1) 0 模式自身转换, 发生概率设为  $P_1$ , 开关次数增量为 0。

(2) 0 模式进入 1 模式, 发生概率设为  $P_2$ , 开关次数增量为 2。

(3) 1 模式自身转换, 发生概率设为  $P_3$ , 开关次数增量为 0。

(4) 1 模式进入 0 模式, 发生概率设为  $P_4$ , 开关次数增量为 2。

其中  $P_1 + P_2 = 1$ ,  $P_3 + P_4 = 1$ 。

引入随机调制后, 开关次数增量的数学期望为

$$E = P_1 \times 0 + P_2 \times 2 + P_3 \times 0 + P_4 \times 2 = 2(P_2 + P_4) \quad (16)$$

显然, 当  $P_2 = P_4 = 0$  时, 即为传统的空间矢量 PWM 调制<sup>[13]</sup>。

#### 3.2 仿真实验

根据上述矩阵变换器的调制策略, 利用 Matlab\ Simulink 的电力系统工具箱提供的各种功率器件、电源、滤波电路、测量模块和负载等, 结合 s 函数的强大接口功能, 建立了空间矢量调制的矩阵变换器的通用仿真模型<sup>[14]</sup>。本文侧重研究矩阵变换器的控制策略, 因此采用了简化的 MC 模型带动阻感性负载<sup>[15]</sup>。该模型主要由 6 个部分组成: 电源、输入输出测量、输入滤波器、控制策略、矩阵开关和负载部分, 如图 8 所示。为了验证随机脉冲位置 PWM 的正确性和可行性, 在 Matlab6.5 下进行了仿真。仿真参数如下:

(1) 输入为三相对称电源, 其相电压为 220/50Hz, 功率因数控制为 1; 设定的输出频率为 100Hz。

(2) 输入 LC 滤波器电感  $L=0.6\text{mH}$ ,  $C=10\mu\text{F}$ 。控制策略的调制比  $m$  为 1, 采样周期为 0.2ms, 仿真算法为 ode15。

(3) 利用传统的 SVPWM 和 RPWM 分别仿真实际情况下 30ms 的波形, 采样频率为 5000Hz。稳态运行时波形如图 9 所示。



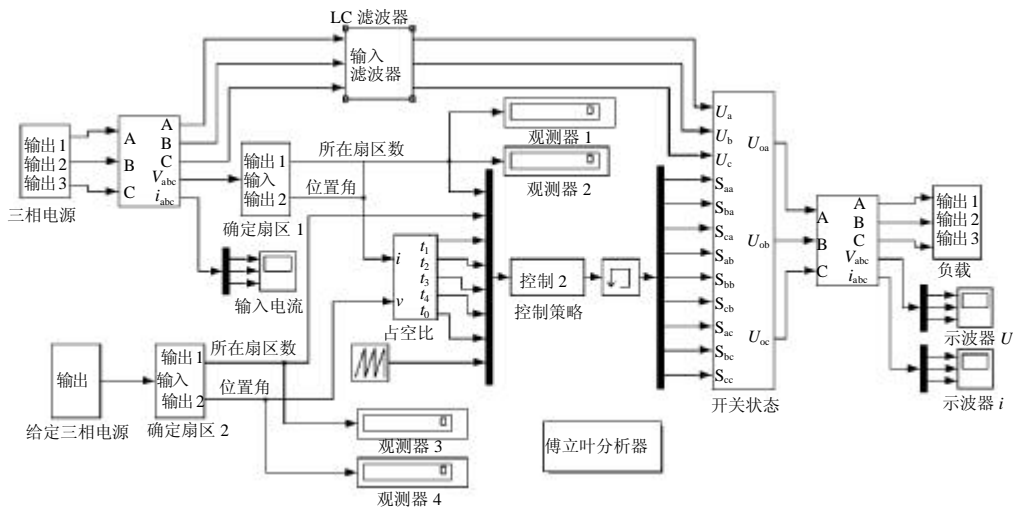


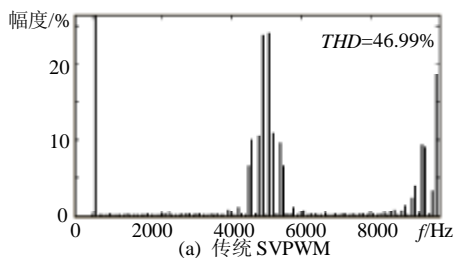
图 8 矩阵变换器 Simulink 仿真模型  
Fig. 8 Simulation figuration of MC

由图 9 可以看出，在传统 SVPWM 下，在采样频率的一倍频和二倍频附近产生很多幅值较大的谐波，而在 RPWM 下输出电压的谐波成分均匀地分布在一个较宽的频率范围内。两种调制策略下采样频率附近各个频率的谐波占基波的百分比如表 1 所示。

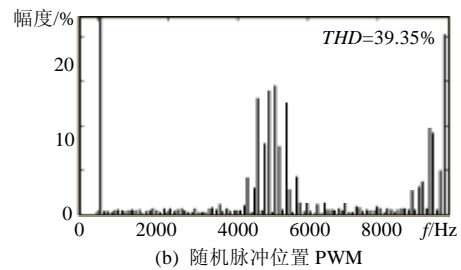
表 1 仿真数据对比表

Tab. 1 The comparisons of the simulation

$f/\text{Hz}$	SVPWM/%	RPWM/%
4300	0.20	4.52
4400	0.08	0.72
4500	6.60	3.62
4600	9.82	12.85
4700	0.11	0.44
4800	10.53	7.78
4900	23.92	14.32
5000	0.12	1.12
5100	23.94	13.99
5200	10.75	7.74
5300	0.08	0.33
5400	9.78	12.93
5500	6.52	3.58
5600	0.09	1.07
5700	0.17	4.64



(a) 传统 SVPWM



(b) 随机脉冲位置 PWM

图 9 输出线电压的 FFT 分析

Fig. 9 FFT analysis of the output line voltage

## 4 结论

本文以矩阵变换器为研究对象，分析了矩阵变换器空间电压矢量 PWM 调制策略，在此基础上，提出了基于空间电压矢量的随机脉冲位置 PWM，并分别进行了仿真实验比较两种控制策略的优劣，证明了随机脉冲位置 PWM 的可行性，同时为解决交流传动系统中的噪声问题提供新的思路。

## 参考文献

- [1] 李永东. 交流电机数字控制系统. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [2] 丁洪兵, 沈兵, 李洪江. 异步电机的随机脉冲调制技术[J]. 中小型电机, 2004, 31(1): 21-24.
- [3] Ding hongbing, Shen bing, Li hongjiang[J]. Random pulse width modulation for induction motor, 2004, 31(1): 21-24(in Chinese).
- [4] Casadei D, Serra G, Tani A. The use of matrix converters in direct torque control of induction machines[J]. IEEE Transaction on IE, 2001, 48(6): 1057-1064.
- [5] 陈希有, 陈学允. 基于 PARK 变换的空间矢量调制矩阵变换器的暂态分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 80-84.

- Chen xiyou, Chen xueyun. Park transformation based the transient analysis for the space vector modulated matrix converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 80-84(in Chinese).
- [5] 王毅, 陈希有, 徐殿国. 空间矢量调制矩阵变换器闭环控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6), 164-169.
- Wang yi, Chen xiyou, Xu dianguo. The research of closed-loop conerol method for matrix converter based on space vector modulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6), 164-169(in Chinese).
- [6] 陈希有, 丛树久, 陈学允. 双电压合成矩阵变换器特性与电压扇区的关系分析[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 63-67.
- Chen xiyou, Cong shujiu, Chen xueyun. The analysis of the relationship between the voltage sectors and the performances of matrix converter based on two-voltage synthesis[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 63-67(in Chinese).
- [7] Hui S Y R. Novel random PWM schemes with weighted switching decision [J]. IEEE Trans. on PE, 1997, 12(6): 945-952.
- [8] Trzynadlowski A M. Random pulse width modulation techniques for converter-fed drive systems[J]. IEEE Trans On IA, 1994, 30(5): 1166-1175.
- [9] Pedersen J K. Digital quasi-random modulated SFVM PWM in an AC-drive system[J]. IEEE Trans. on IE, 1994, 41(5): 518-525.
- [10] Kirlin R L. Power spectra of a PWM inverter with randomized pulse position[J]. IEEE Trans. on PE, 1994, 9(5): 463-472.
- [11] Habetler T G, Divan D M. Acoustic noise reduction in sinusoidal PWM drives using a randomly modulated carrier[J]. IEEE Trans. Power Electron, 1991, 6(3): 356-361.
- [12] Aleksandar M Stankovic, George C Verghese, David J Perreault. Randomized modulation of power converters via Markov Chains[J]. IEEE Transaction on Control Systems Technology, 1997, 5(1), 61-73.
- [13] Broeck H W. Analysis and realization of a pulse width modulation based on voltage space vector[J]. IEEE Trans on Ind Appl, 1988, 24(1): 142-150.
- [14] 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. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 80-84.
- Li zhiyong Zhu jianlin Yi lingzhi Ding wei *et al.* Simulation research of space-vector modulated matrix converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 80-84(in Chinese).
- [15] 王毅, 陈希有, 徐殿国. 双电压合成矩阵变换器闭环控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 74-79.
- Wang yi, Chen xiyou, Xu dianguo. Research on closed-loop control method for matrix converter based on double line-to-line voltage synthesis[J]. Proceeding of the CSEE, 2002, 22(1): 74-79(in Chinese).

---

收稿日期: 2005-11-19。

作者简介:

粟梅(1967—), 女, 中南大学在读博士, 副教授, 从事电力电子及电力传动方面的研究, [sumeicsu@yahoo.com.cn](mailto:sumeicsu@yahoo.com.cn);

肖鹏(1979—), 女, 硕士研究生, 从事电力电子及电力传动方面的研究;

孙尧(1981—), 男, 中南大学硕士研究生, 研究方向为电力电子及电力传动。

(编辑 王彦骏)