

基于前馈补偿的 SPWM 矩阵变换器控制策略研究

权建洲¹, 吴保芳², 孙容磊¹, 熊有伦¹

(1. 华中科技大学, 湖北省 武汉市 430049; 2. 空军雷达学院, 湖北省 武汉市 430019)

A Compensation Method for SPWM Matrix Converter Based on Feed-forward Control

QUAN Jian-zhou¹, WU Bao-fang², SUN Rong-lei¹, XIONG You-lun¹

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China;

2. Air Force Radar Academy, Wuhan 430019, Hubei Province, China)

ABSTRACT: Matrix converter (MC) is a direct energy conversion device, which output characteristics and reliability will be degraded due to the abnormal inputs at the AC line side because of its lack of DC line elements. To improve its performance, a feed-forward control scheme based on SPWM matrix converter is proposed. Each pulse is compensated differently in width of SPWM by pre-modulation of reference sine waveform according to envelop of input line voltages. The compensation algorithm is simple and the control scheme is easy to be implemented by hardware. Analyze and simulation studies demonstrate that the proposed compensation scheme improve effectively the output characteristics of MC under abnormal input conditions.

KEY WORDS: Matrix Converter; Feedforward; SPWM ; Unbalance; Non-sinusoidal; Voltage surge

摘要: 矩阵变换器是一种 AC/AC 直接变换器, 电网的任何非正常输入将直接恶化其输出电压特性。文中基于 SPWM 矩阵变换器提出了一种前馈补偿方案。通过检测输入线电压包络, 对参考正弦进行预调制, 使得正弦脉宽调制输出脉冲在宽度上给予自适应地补偿。文章分析了补偿原理并介绍了实现方法。采用 Matlab/Simulink 对补偿前后的输出特性进行了仿真对比。分析和仿真表明该方案可以有效地改善矩阵变换器在非正常条件下的输出特性, 验证了方案的有效性和正确性。该方案具有简单易行的优点, 既便于硬件实现, 又便于数字实现, 而且计算量小。

关键词: 矩阵变换器; 前馈控制; 正弦脉宽调制; 非对称; 非正弦; 电压突变

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2003CB716207); 国家自然科学基金“十五”重大项目(50390063, 50390064)。

Project Supported by Special Fund of the National Priority Basic Research of China(2003CB716207); The National Science Foundation of China under Grant (50390063, 50390064).

1 引言

矩阵式变换器由于其输入电流、输出电压为正弦波, 无中间储能环节, 结构紧凑, 效率高, 谐波污染小, 已成为交-交变频器的研究热点^[1-6]。间接变换法是目前研究最多, 也是最有前途的一种调制策略。它将交-交变换虚拟为交直和直交变换, 这样可以将现有的 SPWM 控制技术和高频 PWM 波形合成技术相结合, 从而实现高效变换。然而在间接变换法中, 由于虚拟整流环节中无电感、电容等储能元件。输入电压的不对称、畸变、浪涌等特殊情况将直接导致矩阵变换器输出特性降低。

本文通过引入前馈补偿控制, 将影响矩阵变换器输出特性的各种非正常输入转化为虚拟整流输出的扰动, 通过改变逆变器输出的脉冲宽度加以补偿。将该控制策略应用于 SPWM 三相矩阵变换器, 对调制正弦参考信号首先进行预调制, 使其幅值随虚拟整流电压的变化而进行实时、适当地调整, 然后再进行常规二次调制, 从而最终产生具有补偿因素的脉冲。控制方案简单, 易于通过硬件或数值算法实现。最后通过 Matlab/Simulink 仿真及实验验证了该控制策略的正确性。

2 SPWM 矩阵变换器工作原理

SPWM 矩阵变换器^[7-8]的主电路拓扑如图 1(a)所示。它由三行三列的方阵组成, 行与列的交叉处由一个双向开关接联。电网输入的三相电压由 a、b、c 接入, 变换器后的期望电压由 A、B、C 输出。基于虚拟整流, 间接变频的分析方法, 可以等效为电压源整流(VSR)和电压源逆变(VSI)两个功率

环节的级联，图 1(b)示出了这种等效拓扑。为获得最高电压利用率和最为平滑的虚拟直流输出，将整流环节虚拟为不控整流方式。应使三相输入电压最高和最低两相上的开关工作。以 $[t_0, t_1]$ 时段为例，在此状态下， S_{Aa} 、 S_{Cb} 、 S_{Ba} 、 S_{Ab} 、 S_{Ca} 、 S_{Bb} 在相应的控制策略下工作，其余时段以此类推。图 2 示出了虚拟环节的工作波形关系。

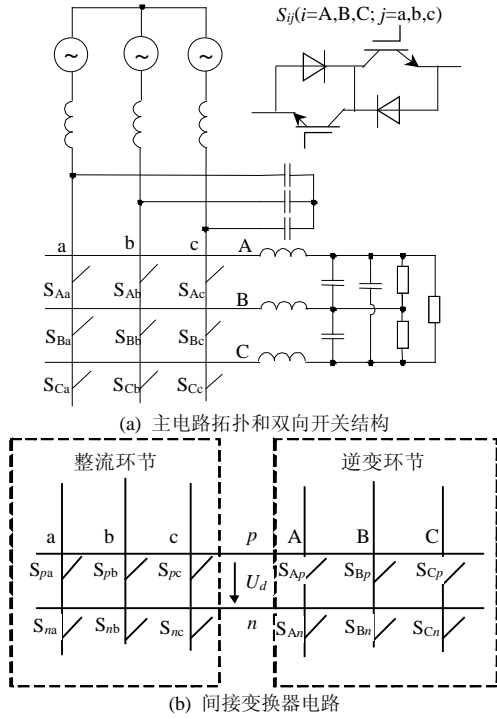


图 1 矩阵变换器主电路拓扑

在正常输入条件下，整流级的开关函数为 $S_{rec}(w_i t) = [r_a \ r_b \ r_c]^T = P[\cos w_i t \ \cos(w_i t - 2\pi/3) \ \cos(w_i t + 2\pi/3)]^T$ (1) 设三相输入为 $u_i(w_i t) = [u_a \ u_b \ u_c]^T = U_{im}[\cos(w_i t - j_i) \cdot \cos(w_i t - j_i - 2\pi/3) \ \cos(w_i t - j_i + 2\pi/3)]^T$ 则虚拟整流的直流电压为

$$U_d = [S_{rec}(w_i t)] \times [u_i(w_i t)] = \frac{3PU_{im}}{2} \cos j_i \quad (2)$$

因为虚拟直流环节采用了不控整流方式，所以其虚拟直流电压为 $(3\sqrt{3}/\pi)U_{im}^{[9]}$ ，即三相不控整流的平均值，则 $P = (2\sqrt{3}/\pi)$ 。

若逆变器的开关函数为 $S_{INV}(w_0 t) = [\cos w_0 t \ \cos(w_0 t + 2\pi/3) \ \cos(w_0 t - 2\pi/3)]^T$ (3) 则 SPWM 矩阵变换器期望的输出交流电压为

$$u_o(w_0 t) = [S_{INV}(w_0 t)] \cdot U_d = (3\sqrt{3}/\pi)U_{im}m_a \cdot \cos j_i [\cos(w_0 t + j_0) \ \cos(w_0 t + j_0 - 2\pi/3) \ \cos(w_0 t + j_0 + 2\pi/3)]^T \quad (4)$$

式中 U_{im} 为输入相电压幅值； j_i 为交流输入侧电压、电流相位差， m_a 为调制系数； w_0 为输出交流电压的角频率； j_0 为输出电压初相角。

由上式可以看出，调节 m_a 、 w_0 、 j_0 可以得到期望的交流正弦输出，而且输出频率 w_0 与输入频率 w_i 无关，既可低于电源频率也可高于电源频率，理论上无上限。这是传统的 AC/AC 变频器所无法比拟的。

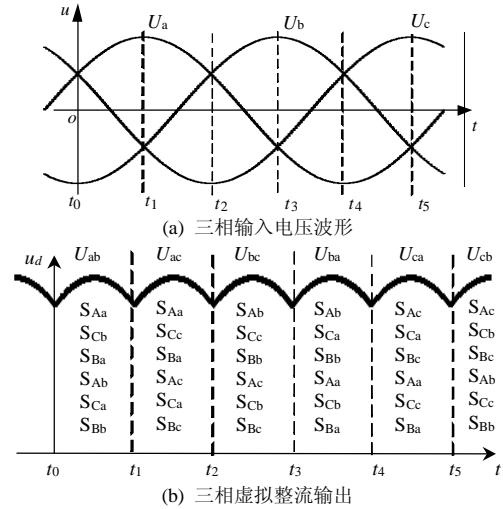


图 2 三相输入与虚拟整流工作波形关系

由工作原理知，需要把输入电源的一个周期划分为 6 个 S 型的区段，每个区段对应一个三相逆变器工作。虚拟“直流环节”的输出电压中包含有 6 倍的电源频率的脉动分量。虚拟直流电压即线电压的包络线 u_d 可表示为

$$u_d = \sqrt{3}U_{im} \cos(w_i t + (2\pi/3) \cdot k) \quad k = 1, 2, \dots, \quad t \in [-\pi/3w_i, \pi/3w_i] \quad (5)$$

其脉动系数为^[8-10]

$$S_u = \frac{\sqrt{3}U_{im} \frac{m}{p} \sin\left(\frac{\pi}{m}\right) \frac{2}{m^2 - 1}}{\sqrt{3}U_{im} \frac{m}{p} \sin\left(\frac{\pi}{m}\right)} = \frac{2}{m^2 - 1} = 5.7\% \quad (6)$$

式中 $m = 6$ 。

显然由于虚拟直流的波动，尽管矩阵变换器的开关频率很高，在一个开关周期内 u_d 的差值较小，但对于逆变器输出正弦波的影响却很大。图 3 为未采取补偿措施的 SPWM 矩阵变换器的输出波形。可见矩阵变换器即使在对称输入下，虚拟直流纹波对正弦输出的影响是很大的，恶化了对负载的供电特

性,然而电网的非正常情况是经常出现的。因此采取补偿措施是必要的,以下介绍基于前馈控制的补偿控制策略。

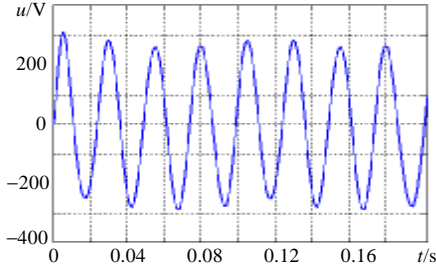


图3 无补偿 SPWM 矩阵变换器输出电压波形
Fig. 3 Without compensation voltage waveform of SPWM MC

3 前馈补偿控制策略

3.1 补偿原理

SPWM 技术是基于面积等效原理的^[8-10]。图 4 中,在一个开关周期 T_s 内,期望输出正弦波的面积可表示为

$$A_r = U_{om} \int_{t_k}^{t_{k+1}} \sin w_0 t dt = \frac{U_{om}}{w_0} [\cos(w_0 t_k - \cos(w_0 t_{k+1}))] \quad t \in [t_k, t_{k+1}], k = 1, 2, \dots, m_f \quad (7)$$

式中 m_f 为频率调制比。

常规逆变器输入的是理想直流 U_d , 调制后的高频脉冲的宽度 Δt 与 U_d 的乘积应与 A_r 相等, 即

$$U_d \Delta t = U_{om} [\cos(w_0 t_k - \cos(w_0 t_{k+1}))] / w_0 \quad (8)$$

$$\Delta t = U_{om} [\cos(w_0 t_k - \cos(w_0 t_{k+1}))] / U_d w_0 \quad (9)$$

由上式可知,当 U_d 为一平稳的理想直流高压,稳态时逆变器只需通过常量 m_a 控制即可。如前所述,矩阵变换器的交流输入即使是在平衡(或对称)的条件下,其虚拟的直流输出中也含有 300Hz(输入 50Hz 时)的低频脉动分量,它将严重地影响到矩阵变换器的输出特性,更为甚者,是当其输入为不对称、非正弦的情况。由式(9)还可看出,此时矩阵变换器中 U_d 应换为 u_d 。为了补偿输入 u_d 脉动对逆变器输出的影响,当 u_d 变高时,调制出的脉冲宽度 Δt 应变窄;当 u_d 变低时, Δt 应变宽。调制的脉冲宽度不是常规的 Δt , 而应是图 4 中的 $\Delta t'$ 。因此有必要引入一个补偿调制系数 m_{cp} , 用以补偿虚拟直流的非理想情况。

通常正弦脉宽调制器是将参考正弦高于三角载波的两斜边交点之间的宽度作为功率开关的驱动信号,当 u_d 高于正常值时,参考正弦的幅值就应减小,这就需要通过预调制系数 m_{cp} 将参考正弦进行预调

制,降低其幅值,以缩小两交点之间的(间距)宽度,反之则反。这种功能就由预调制器完成。图 5 为该调制方法的示意图。

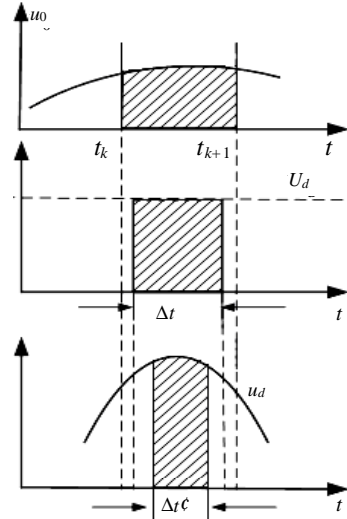


图4 SPWM 的面积等效原理
Fig. 4 Area equivalence principle of SPWM

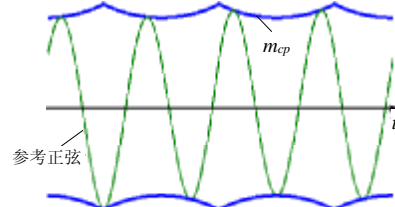


图5 调制波的预调制波形

Fig. 5 Prior modulation waveform of modulation-wave
3.2 实现框图

图 6 示出了基于前馈补偿控制的框图。仅将不同于常规变换器的部分简要说明如下。线电压包络检测是前馈补偿方案的关键单元。无论是对称输入条件下的 6 倍于电网频率的虚拟直流波动;还是不平衡输入(包括幅值的不对称、相位的不对称),非正弦输入;以及电网的浪涌(迭落和突升)等,其信息都包含在线电压的包络 u_d 中。通过对输入电网三相不控整流,便可获得线电压包络,由 u_d 和前馈给定电压 U_r 产生补偿调制系数 m_{cp} , 并送入预调制器,用其对三相参考正弦进行预调制,使正弦波成为随 u_d 而变的变幅正弦波,然后再经调制系数 m_a 二次调制,其输出与等幅三角波比较,最终产生含有补偿因素的脉冲信号。 m_{cp} 的大小由下式确定,

$$m_{cp} = U_r / u_d \quad (10)$$

式中 U_r 的大小为三相对称输入时不控整流电压的平均值。这样,实际调制系数 m_a^* 可表示为

$$m_a^* = m_a \cdot m_{cp} = m_a (U_r / u_d) \quad (11)$$

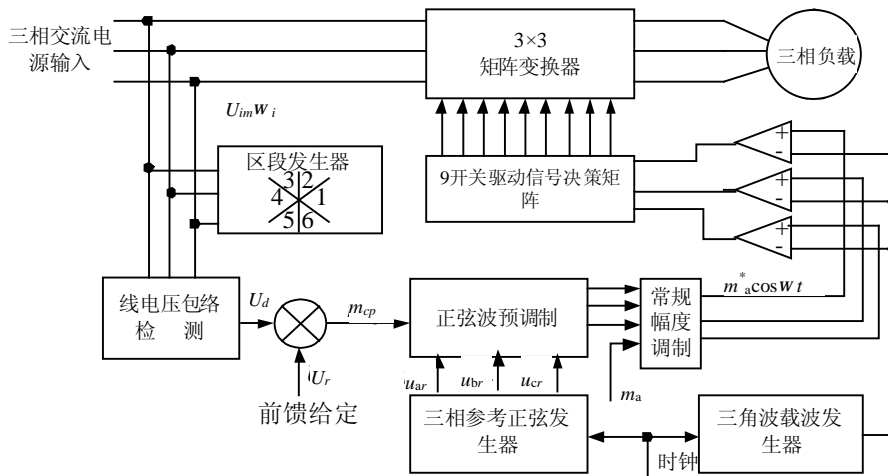


图 6 前馈补偿控制框图

Fig. 6 Feedforward compensation control configuration

4 仿真研究

4.1 基本参数

为了验证上述控制策略的正确性和有效性，利用 MATLAB/Simulink 软件对正常输入和非正常输入，分别采用常规控制策略和前馈补偿控制策略进行了仿真比较。仿真基本参数如下：输入三相电压 220V/380V；输入频率 50Hz；输出三相电压 115V/200V；频率 400Hz；输出滤波电感 600μH；电容 66μF；负载电阻 5Ω；功率开关器件为理想开关；三角波载波频率 12kHz；固定步长 1μs；仿真算法 Ode45。

4.2 三相对称输入

图 7(a)为未采用补偿的输出电压波形，图 7(b)为采用前馈补偿输出电压波形。图 8 为两种调制系数。图 9 为矩阵变换器的输出电压波形。

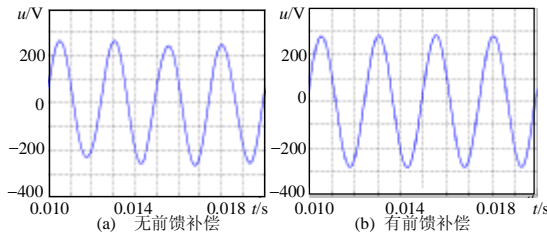


图 7 三相对称输入下输出电压波形

Fig. 7 Simulated output voltages under three phase symmetry input voltages

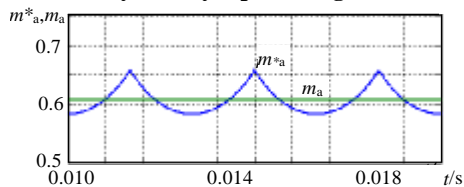


图 8 三相对称输入调制系数

Fig. 8 Modulation index under three phase symmetry input voltages

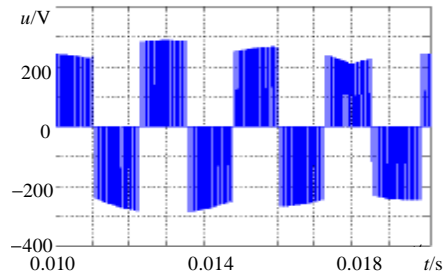


图 9 变换器输出电压波形

Fig. 9 Output voltage of MC under three phase symmetry input

4.3 三相不对称输入

三相不对称包含幅值和相位不对称，设输入电压分别为

$$\begin{cases} u_a = 180\sqrt{2} \cos(100\pi t + 15^\circ) \\ u_b = 200\sqrt{2} \cos(100\pi t - 123^\circ) \\ u_c = 220\sqrt{2} \cos(100\pi t + 133^\circ) \end{cases}$$

其它参数同前。图 10(a)未采用补偿的输出电压波形，图 10(b)采用前馈补偿输出电压波形。图 11 给出了在两种条件下的调制系数。图 12 变换器输出电压波形。

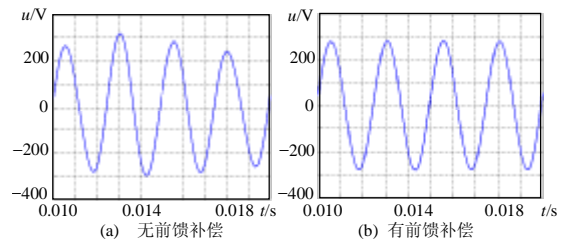


图 10 三相不对称输入下输出电压波形

Fig. 10 Simulated output voltages under unbalanced input voltages

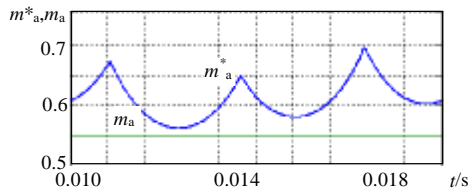


图 11 三相不对称输入调制系数

Fig. 11 Modulation index under unbalanced input voltages

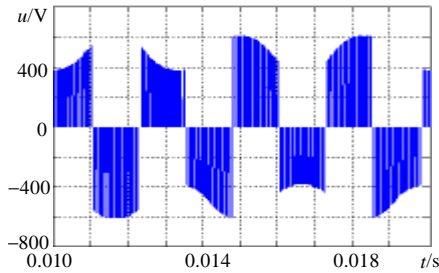


图 12 逆变器输出电压波形

Fig. 12 Output voltage of MC under unbalanced input voltage

4.4 非正弦输入

在非正弦输入下，假设三相输入电压包含有 30% 的 5 次谐波：

$$\begin{cases} u_b = 220\sqrt{2} \cos(100\pi t) + 66\sqrt{2} \cos(5 \times 100\pi t) \\ u_b = 220\sqrt{2} \cos(100\pi t - 120^\circ) + 66\sqrt{2} \cos(5 \times (100\pi t - 120^\circ)) \\ u_c = 220\sqrt{2} \cos(100\pi t + 120^\circ) + 66\sqrt{2} \cos(5 \times (100\pi t + 120^\circ)) \end{cases}$$

参数同前。图 13(a)未采用补偿的输出电压波形，图 13(b)采用前馈补偿输出电压波形。图 14 给出了输入电压中含有 5 次谐波时调制系数变化情况。图 15 变换器输出电压波形。

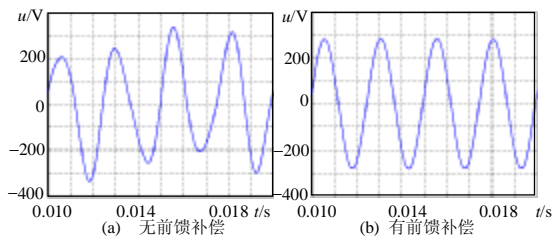


图 13 非正弦输入下输出电压波形

Fig. 13 Simulated output voltages under non-sinusoidal input voltages

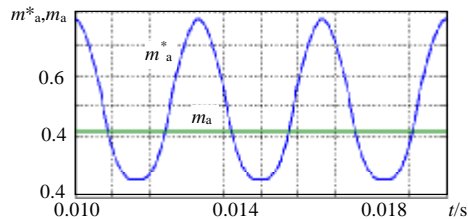


图 14 非正弦输入调制系数

Fig. 14 Modulation index under non-sinusoidal input voltages

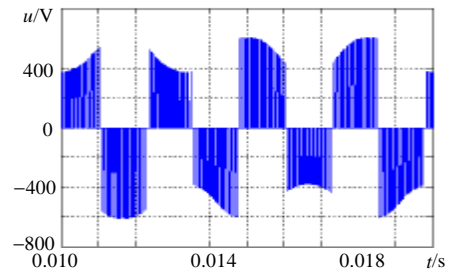


图 15 非正弦输入逆变器输出电压波形

Fig. 15 Output voltage of MC under non-sinusoidal input voltages

从图 13 可以看出，当输入电压中包含有 5 次谐波时，未采用前馈补偿时幅值变化较大，并产生了畸变。而采用前馈补偿明显减小输入谐波对输出电压的影响。

4.5 电源电压突变

与上述相类似，对电源在不同时间跌落 30% 和突升 30% 的情况一起进行了仿真。图 16(a)未采用前馈补偿输出电压，(b)采用有前馈补偿时输出电压波形。图 17 为该条件下的调制系数。

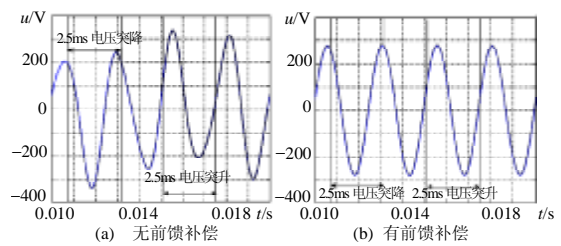


图 16 浪涌输入下输出电压波形

Fig. 16 Simulated output voltages under surge input voltages

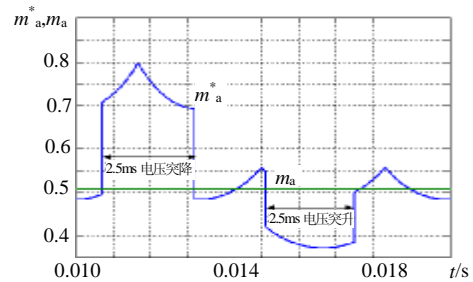


图 17 输入三相电压突变调制系数

Fig. 17 Modulation index under surge input

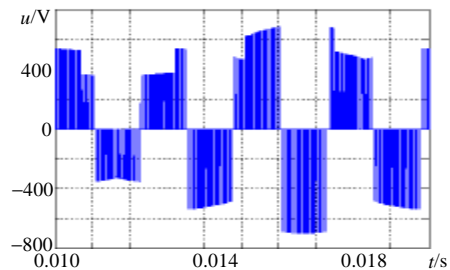


图 18 逆变器输出电压波形

Fig. 18 Output voltage of MC surge input

在 10.7ms 处电压突降 30%，时间为 2.5ms，在 15.1ms 处电压突升 30%，时间同为 2.5ms。由图 16 中可以明显看出，输出电压在输入突降和突升时，幅值变化剧烈，而采用前馈补偿后在输入电压突降和突升时，虽然调制系数变化范围较大，但输出电压幅值无明显变化。

5 实验结果

基于以上对主电路工作原理和前馈补偿控制策略的分析，设计了三相 50Hz 输入 400Hz 三相输出的直接变频实验样机一台。控制系统的硬件采用 DSP TMS320LF2407 作为主控制器。由于采用了 SPWM 工作模式，其他外围的硬件相对简单，主要包括电源电压状态检测环节、开关元件控制信号的互锁、隔离、保护及放大驱动电路。通过 18 个 IGBT 和 18 个快速恢复二极管构成了 9 个双向开关。经 600 μ H 滤波电感和 66 μ F 滤波电容后，由 Δ -Y 变压器隔离，接三相 10 Ω 阻性负载。考虑到实验的可操作性，三相不对称输入 $U_a=200V$ 、 $U_b=180V$ 、 $U_c=220V$ 、 $m_a=0.8$ 。三相输出相电压波形如图 19 所示。输出波形的对称性良好、失真度 $THD < 5\%$ 。

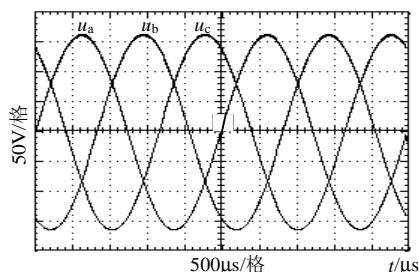


图 19 三相输出波形

Fig. 19 Waveforms of three-phase output

6 结论

矩阵变换器要获得良好的输出特性，无论输入侧是否正常（即使是对称输入），也无论矩阵变换器是作为交流传动（目前作为交流传动应用的较多），还是用作交流电源，都必须采取措施进行补偿。目前这也是矩阵变换器的研究热点之一。本文在 SPWM 矩阵变换器工作原理的基础上，讨论了由于虚拟整流输出不存在储能元件，在正常及非正常交流输入条件下，虚拟直流波动对矩阵变换器输出特性的影响。提出了一种统一的基于前馈控制的补偿方案。

(1) 本文提出的基于前馈控制的对参考正弦进行预调制方案，其理论依据是 SPWM 技术的等面积

原理。方案简单，易于实现。如采用数字方式时，可避免较多的繁琐计算，因而计算量小。硬件实现也比较容易，而且动态性能会更好。

(2) 同其它补偿方式一样，前馈预调制补偿方案也是以牺牲电压增益（或利用率）为代价来换取对称的正弦输出电压。这种缺陷是不可避免的 [1-7, 11-14]。

(3) 仿真验证了方案的正确性，表明该方案对常见的几种交流输入情况的补偿是有效的。本方案为矩阵变换器的进一步研究和实用化提供了参考。

参考文献

- [1] Huber L, Borojevic D. Space vector modulated three-phase to three-phase matrix converter with input power factor correction[J]. IEEE Trans. IA, 1995, 11(3): 1234-1246.
- [2] Kai Sun, Lipei Huang. Combined control of matrix converter fed induction motor drive system[C]. Industry Applications Conference of 38th Annual IEEE, Salt Lake City, 2003, 38(3): 1723-1729.
- [3] Wheeler P W, Clare J C. A vector controlled MCT matrix converter induction motor drive with minimized commutation times and enhanced waveform quality[C]. Industry Applications Conference of 37th Annual IEEE, Pittsburgh PA, 2002, 37(1): 466-472.
- [4] Wei L. Matsushita T A Lipo. Investigation of dual-bridge matrix converters operation under unbalanced source voltages[C]. Power Electronics Specialist Conference of 34th Annual IEEE, Acapulco, Mexico, 2003, 34(2): 1293-1298.
- [5] Kai Sun, Daning Zhou, Lipei Huang. Compensation control of matrix converter fed induction motor drive under abnormal input voltage conditions[C]. Industry Applications Conference of 39th Annual IEEE, Seattle, WA, 2004, 39(2): 623-630.
- [6] 刘芙蓉, Klumpner Christian, Blaabjerg Frede. 矩阵变换器建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 62-67.
Liu Furong, Klumpner Christian, Blaabjerg Frede. Modeling and simulation of matrix converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 62-67.
- [7] 汤宁平, 王建宽, 吴汉光. 矩阵变换器的 SPWM 控制技术及其实现[J]. 电工技术学报, 2003, 18(4): 25-29.
Tang Ningping, Wang Jizkuan, Wu Hanguang. SPWM converter control strategy on Matrix converter and its implementation [J]. Transactions of China Electrotechnical society, 2003, (4): 25-29.
- [8] 王建宽. 基于 TMS320C24x 的矩阵变换器的 SPWM 控制策略[D]. 福州: 福州大学, 2002.
Wang Jiankuan. SPWM control strategy on the basis of the matrix converter of TMS320C24x[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2002.
- [9] 何茂军, 彭怀东, 李晓帆, 等. 一种新型矩阵式 AC/AC 变换电路的研究[J]. 电力电子技术, 2001(2): 10-12.
He Maojun, Peng Huaidong, Li Xiaofan, et al. Research on a novel Matrix AC/AC converter[J]. Power electronic, 2001 (2): 10-12.
- [10] 陈坚. 电力电子学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [11] 张志学, 马皓. 矩阵变换器的电流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 61-66.
Zhang Zhixue, Ma Hao. Current control strategies for matrix converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 61-66.

- [12] 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]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 74-79.
- [13] 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 control method for Matrix converter based on space vector modulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 164-169.
- [14] 刘洪臣, 陈希有, 冯勇, 等. 双电压合成矩阵变换器共模电压的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 182-186.
Liu hongchen, Chen Xiyou, Feng yong, et al. A research on common-mode voltage for matrix converter based on two line voltage

synthesis[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 182-186.

收稿日期: 2005-10-08。

作者简介:

权建洲(1971-), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事电力电子技术和智能控制方面研究;

吴保芳(1946-), 男, 教授, 从事电力电子与电力传动等方面的研究与教学工作;

孙容磊(1963-), 男, 博士, 研究领域为 FMS 动态调度、机器学习、智能控制;

熊有伦(1939-), 男, 教授, 博士生导师, 中科院院士, 机械工程机电控制与自动化及其有关理论和技术的研究。

(编辑 王彦骏)

(上接第 37 页 Continued from page 37)

- [28] Ketabi A, Asmar H, Ranjbar A M, et al. An approach for optimal units start-up during bulk power system restoration[C]. Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, Halifax, NS Canada, 2001.
- [29] Shinohara J, Kozakai I. Knowledge-based behavior interface: its application to power network restoration support system[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1996, 11(1): 383-389.
- [30] 王洪涛, 刘玉田, 邱夕照. 基于分层案例推理的黑启动决策支持系统[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(11): 49-52.
Wang Hongtao, Liu Yutian, Qiu Xizhao. Hierarchical case-based reasoning decision-making system for power system black start[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 49-52.
- [31] 苏德生, 顾雪平, 赵书强, 等. 河北南网黑启动决策支持系统的研究开发[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(12): 45-50.
Su Desheng, Gu Xueping, Zhao Shuqiang, et al. Development of a black start decision support system for the southern power network of Hebei province[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(12): 45-50.
- [32] 高远望, 顾雪平, 刘艳, 等. 电力系统黑启动方案的自动生成与评估[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(13): 50-54.
Gao Yuanwang, Gu Xueping, Liu Yan, et al. Automatic derivation and

assessment of power system black-start schemes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(13): 50-54.

- [33] 魏权龄. 评价相对有效性的 DEA 方法—运筹学的新领域[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1987.

收稿日期: 2005-10-08。

作者简介:

刘艳(1973-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统安全防御和系统恢复、智能技术在电力系统中的应用;

顾雪平(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统安全稳定评估与控制、电力系统安全防御和系统恢复、智能技术在电力系统中的应用;

张丹(1979-), 男, 硕士, 助理工程师。从事电力系统稳定分析与计算、黑启动方案制定等工作。

(责任编辑 喻银凤)