文章编号:1000-8152(2008)01-0159-04

非平衡输入状态下矩阵式变换器的双电压控制策略与仿真

杨 苹, 陶以彬, 钟国基, 陈 武

(华南理工大学电力学院,广东广州 510640)

摘要:本文分析了当输入不对称或不平衡时,矩阵式变换器的双电压瞬时值控制的原理和在该控制策略下输出 电压的合成规律,证明该控制策略具有良好的抗干扰性能;并分析了在非平衡状态下,输入电流的畸变及其消谐方 法.最后搭建了与实际电路相近的仿真模型,通过仿真分析,验证了理论分析的正确性,为矩阵式变换器进一步应 用研究提供了参考.

关键词: 矩阵式变换器; 双电压控制; 非平衡; 仿真 **中图分类号**: TM464 **文献标识码**: A

A double line-to-line voltage control strategy for matrix converters under unbalanced input

YANG Ping, TAO Yi-bin, ZHONG Guo-ji, CHEN Wu

(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: This paper analyzed the control function of a matrix converter under unbalanced inputs, based on a double line-to-line voltage control strategy. The input current and the harmonic wave reduction are also studied, demonstrating the disturbance-rejection performance achieved by using this control strategy. Simulations are done and current waveforms are recorded and shown in this paper, validating the theoretical analysis. This work may provide a basis for the design and implementation of matrix converters.

Key words: matrix converter; double line-to-line voltage control; unbalanced input; simulation

1 引言(Introduction)

矩阵式变换器是AC-AC直接电源变换器,与传统交-直-交变换器具有无法比拟的优良特性^[1],输入/输出性能好、电力谐波小、特别是功率可双向流动、低频(风机的转差频率)性能好,是一种新型的"绿色"变换器,是高性能电源变换器的发展方向之一,也是近年来电力变换器领域研究的热点之一.

矩阵式变换器的开关众多,对开关管控制即调制则是实现其性能的关键.目前,多采用坐标变换、谐波注入,空间矢量调制法等.其中又以间接空间矢量 最受关注,研究较为成熟,但其缺点是抗干扰性能较差,输入不平衡时,输入亦发生畸变.针对这一问题, 有学者提出通过设置电流偏置角^[2]的方法,改善输入输出特性,但这需增加额外计算量和软件的复杂 度,同时,其误差的收敛性有待进一步验证.

而双电压瞬时值控制^[3]策略属于直接控制,它在 改善变换器开关频率的限制,提高输出输入电压比 等方面有独到之处;当输入电源不对称或含有高次 谐波时,控制函数可以自动修正而不需额外的计算 量,因而非常有利于实时控制.

本文研究在非平衡输入状态时,双电压调制的原理,电压合成规律,首先从理论上分析了该算法的抗 干扰能力. 然后,利用MATALAB/SIMULINK做出仿 真,验证理论分析的正确性,为进一步应用研究提供 了参考.

2 双电压控制原理(Principle of double lineto-line voltage control)

双电压合成法是由A Ishugyro和TF uruhashi提出 的.双电压合成技术是较为理想的矩阵变换器的控 制方法之一.这种方法是根据输入两相相电压的瞬 时值确定其控制函数,以实现对矩阵变换器的控制. 这种方法可以获得较高的输出输入电压比.双电压 合成技术的调制机理是任一瞬间输出电压由两个输 入线电压合成.

收稿日期: 2007-07-20; 收修改稿日期: 2007-10-01.

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(60534040);广东省科技计划资助项目(2005A10505005,2007B010400080).

矩阵式变换器的拓扑如图1所示,当输入电压和 输出电压处于某时间段内时,在每个开关周期内,利 用两个输入线电压与一个零电压向量得线性组合来 合成两个满足三相对称的输出线电压.为了方便的 得到矩阵变换器各个开关控制函数,可在每个周期 内,需要把输入、输出电压按照某种规律划分成多 个时间段,称为扇区.



图 1 MC主电路拓扑结构 Fig. 1 Topology of Matrix Converter

输入扇区划分的原则是: 三相相电压中只有一 相出现极值(正值或负值), 而另两相电压与之异号, 且保持单调变化. 输出扇区划分的原则是: 三相相电 压均保持单调变化, 其中一相始终为正值, 一相始终 为负值, 第3相从正到负(或从负到正). 扇区划分如 图2所示.

当输入输出电压均处于第2扇区,输出线电压u_{AB},u_{AC}与输入线电压u_{ab},u_{ac}同极性,并且绝对值最大,可获得较高的电压增益,故用输入电压u_{ab},u_{ac}及零电压向量u_{aa}来合成两个输出线电压,合成表达式如式(1), u_{AB},u_{AC}式中为期望输出线电压:

$$\begin{cases} u_{AB} = b_0 u_{aa} + b_1 u_{ab} + b_2 u_{ac}, \\ u_{AC} = c_0 u_{aa} + c_1 u_{ab} + c_2 u_{ac}. \end{cases}$$
(1)

对应占空比函数:

$$\begin{cases} b_1 = \frac{u_{ab} - u_{bc}}{\Delta} u_{AB}^*, \\ b_2 = \frac{u_{bc} + u_{ac}}{\Delta} u_{AB}^*, \\ b_0 = 1 - b_1 - b_2, \end{cases} \begin{cases} c_1 = \frac{u_{ab} - u_{bc}}{\Delta} u_{AC}^*, \\ c_2 = \frac{u_{bc} + u_{ac}}{\Delta} u_{AC}^*, \\ c_0 = 1 - c_1 - c_2. \end{cases}$$
(2)

其中: $\Delta = u_{i1}^2 + u_{i2}^2 + u_{i3}^2$, u_{i3} 是指在利用式子(1)合成输 出线电压时除式子中出现的两个输入线电压之外的 第3个输入线电压(以a, b, c相序出现, 如 u_{ab}, u_{bc}, u_{ca}).

由于输入电压和输出电压在一个周期内均被划 分为6个区,因此它们共有36种组合.但在每个采样 周期中,有一个开关一直是导通的,这个开关就称为 "源开关"^[4],这样36种情况又归结为9种状态,每 种状态对应一个"源开关",可见利用"源开关" 极大的简化分析、设计及软件实现的复杂性.





3 非平衡状态下的输出电压、输入电流合成 分析(Analysis of the output voltage and the input current under unbalanced input)

3.1 非平衡状态下的输出电压(Output voltage under the unbalanced input)

由于矩阵式变换器没有中间储能环节,输入的扰动将直接影响输出.在输入电压不稳定的场合,需寻求一种有效的策略,使矩阵式变换器具有良好的抗干扰能力.采用双电压调制方法时,在输入非平衡状态下,假设输入电压Ũ_{ab},Ũ_{bc},Ũ_{ca}存在谐波分量或非对称输入线电压,仍然以输入输出均处于第2扇区为例,可得此时的输出线电压:

$$\overline{U} = b_0 \tilde{U}_{aa} + b_1 \tilde{U}_{ab} + b_2 \tilde{U}_{ac} =$$

第1期

$$\frac{(\tilde{U}_{ab} - \tilde{U}_{ac})}{\tilde{U}^{2}_{ab} + \tilde{U}^{2}_{bc} + \tilde{U}^{2}_{ca}} u^{*}_{AB} \tilde{U}_{ab} + \frac{(\tilde{U}_{bc} + \tilde{U}_{ac})}{\tilde{U}^{2}_{ab} + \tilde{U}^{2}_{bc} + \tilde{U}^{2}_{ca}} u^{*}_{AB} \tilde{U}_{ac} = \frac{\tilde{U}^{2}_{ab} - \tilde{U}_{bc} \tilde{U}_{ab} + \tilde{U}_{bc} \tilde{U}_{ac} + \tilde{U}^{2}_{ca}}{\tilde{U}^{2}_{ab} + \tilde{U}^{2}_{bc} + \tilde{U}^{2}_{ca}} u^{*}_{AB} = U^{*}_{AB}.$$
(3)

由上式可见,在输入电压含有谐波或非对称的情况下,依然能够获得与期望值一致的输出电压局部 平均值,即输出电压局部平均值始终等于期望的对称正弦输出电压,无论输入电压是否为对称正弦电压,只要能够划分扇区即可,不需额外的补偿措施.

3.2 非平衡状态下的输入电流(Input current under the unbalanced input)

将非平衡状态下的参数代入电流合成方程^[5~7], 可得此时的输入电流为

$$\overline{i}_{a} = i_{A} + b_{0}i_{B} + c_{0}i_{C} = \frac{2P_{L}\cos\omega_{i}t}{3U_{im}^{+}[U_{im}^{+} + U_{im}^{-}\cos(2\omega_{i}t + \psi^{-})]}.$$
(4)

其中: P_L 为负载功率, ω_i 为输入电压频率, U_{im}^+, U_{im}^- 分别为输入电压的正负序分量的幅值, ψ^- 为负序分量初相角. 由此可见,此时输入电流 将不再是对称正弦波形,含有谐波分量,给输入滤波 带来一定的难度.为消除输入电流中因非对称而产 生的谐波,可以采用消谐参考电压调制,即在参考电 压中注入负序分量. 定义消谐参考电压如下:

$$U_{r} = \begin{bmatrix} U_{ra} \\ U_{rb} \\ U_{rc} \end{bmatrix} = U_{rm} \begin{bmatrix} \cos(\omega_{i}t + \varphi_{r}^{+}) \\ \cos(\omega_{i}t + \varphi_{r}^{+} - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega_{i}t + \varphi_{r}^{+} + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} + U_{rm} \begin{bmatrix} \cos(\omega_{i}t + \varphi_{r}^{-}) \\ \cos(\omega_{i}t + \varphi_{r}^{-} + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega_{i}t + \varphi_{r}^{-} - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}.$$
(5)

参考式(2)和式(4),得

$$\bar{i}_a = i_A + b_0 i_B + c_0 i_C = \frac{2P_L U_{ra}}{W},$$
 (6)

上式中:

$$W = U_{rab}U_{ab} + U_{rbc}U_{bc} + U_{rca}U_{ca} =$$

$$4.5[U_{rm}^+U_{im}^+\cos{(\varphi_r^+)} +$$

$$U_{rm}^{-}U_{im}^{-}\cos(\varphi_{r}^{-}-\psi^{-})] + 4.5[U_{rm}^{-}U_{im}^{+}\cos(2\omega_{i}t+\varphi_{r}^{-}) + U_{rm}^{+}U_{im}^{-}\cos(2\omega_{i}t+\varphi_{r}^{+}+\psi^{-})].$$
(7)

为了获得正弦输入电流,ω须为常量,令

$$U_{rm}^{-} = \frac{U_{rm}^{+}U_{im}^{-}}{U_{im}^{+}}, \ \varphi_{r}^{-} = \varphi_{r}^{+} + \psi^{-},$$

可得

$$W = 4.5 \frac{U_{rm}^+}{U_{im}^+} [(U_{im}^+)^2 + (U_{im}^-)^2] \cos(\varphi_r^+) = \mathring{\mathbb{R}} \boxplus.$$

此时, $i_a = U_{ra}$ 成正比, 故 i_a 中不再含有谐波分量, 但含有负序分量, 造成输入电流非对称, 输入电流非 对称度与参考输入电压非对称度相同.

4 仿真研究(Simulation Research)

为验证以上分析的正确性,并为该算法的软硬件 实现提供参考和依据.本文在MATLAB环境下,编写 理想开关函数,搭建了系统仿真模型.在仿真模型中, 设置仿真参数如下:

输入电压:

$$U_{i} = \begin{cases} 220\sqrt{2}\cos(100\pi t) \\ 220\sqrt{2}\cos(100\pi t - \frac{2\pi}{3}) \\ 220\sqrt{2}\cos(100\pi t - \frac{2\pi}{3}) \\ 20\sqrt{2}\cos(300\pi t + \frac{2\pi}{3}) \\ 20\sqrt{2}\cos(300\pi t - \frac{2\pi}{3}) \\ 20\sqrt{2}\cos(300\pi t - \frac{2\pi}{3}) \\ 20\sqrt{2}\cos(300\pi t + \frac{2\pi}{3}); \end{cases}$$

期望输出电压:

$$U_o^+ = \begin{cases} 110\sqrt{2}\cos\left(60\pi t + \frac{\pi}{6}\right)\\ 110\sqrt{2}\cos\left(60\pi t - \frac{\pi}{2}\right)\\ 110\sqrt{2}\cos\left(60\pi t + \frac{5\pi}{6}\right) \end{cases}$$

开关频率为5 kHz, 电阻负载. 得仿真波形如 下(横轴为时间轴, 单位 s; 纵轴为电压/电流轴, 单 位 V/A).

由图3可见,输出线电压瞬时值的包络线仍为输入线电压,但输出线电压平均值仍为非常好的正弦波,低次谐波含量很小,从而有力地证明了双电压压瞬时值控制算法具有良好的抗扰动性能.图4表明输入相电压虽然含有谐波,波形为非正弦,但输入相电流相位接近为1,即与输入相电压保持同相位,从而证明了理论分析的正确性.

161



Fig. 4 Input current

5 结论(Conclusions)

本文分析了在非平衡输入状态下,矩阵式变换器 的双电压调制策略,分析表明该控制策略具有良好 的抗干扰能力,当输入不平衡时,依然可以获得对称 的正弦输出线电压.当输入电压中含有谐波时,输入 电流将发生畸变,利用参考消谐电压,能够达到有效 的消除或减少谐波.为验证算法,本文在MATLAB平 台下,搭建了与事物系统一致的仿真模型,为矩阵式 变换器的开发提供良好的工具,并可以将仿真系统 的算法结构移植到实际控制系统.仿真结果证明了 双电压调制策略的良好的抗干扰能力.

参考文献(References):

- ALESINA A, VENTURINI M G B. Analysis and design of optimumamplitude nine-switch direct AC-AC converters[J]. *IEEE Trans on Power Electronics*, 1989, 4(1): 101 – 112.
- [2] 易灵芝,李志勇,朱建林,等.非平衡时矩阵变换器动态调制策略的仿真实现[J].系统仿真学报,2004,16(9):2017-2020.
 (YI Lingzhi, LI Zhiyong, ZHU Janlin, et al. The simulation of current dynamic modulation on matrix converter under unbalanced input[J]. *J of System Simulation*, 2004, 16(9): 2017 2020.)
- [3] ISHIGURO A, FURUHASHI T, OKUMA S. A novel control method for forced commutated cycloconverters using instantaneous values of input line-to-line voltages[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics.*, 1991, 38 (3): 166 – 172.
- [4] 穆新华, 庄心复, 陈怀亚. 双电压控制的矩阵变换器的开关状态与 仿真分析[J]. 电工技术学报, 1998, 13(1): 46 – 50.
 (MU Xinhua, ZHUANG Xinfu, CHEN Huaiya. The switch state analysis and simulation of matrix converter using two-voltage control technique[J]. *Trans of China Electrotechnical Society*, 1998, 13(1): 46 – 50.)
- [5] 陈希有,陈学允.双电压合成矩阵变换器无功功率的控制与输入 电流消谐[J]. 电气传动, 2001, 1: 11 – 15. (CHEN Xiyou, CHEN Xueyun. The control of reactive power and the harmonic elimination of input current for matrix converter based on double line-to-line voltage synthesis[J]. *Electric Drive*, 2001, 1: 11 – 15.)
- [6] 陈希有. 矩阵式电力变换器在非对称输入条件下的原理与仿 真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2000.
 (CHEN Xueyun. Principle study of matrix converter under unbalanced input and the simulation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2000.)
- [7] 陈希有,陈学允.矩阵变换器在非对称输入情况下输出电压波形的改善[J]. 电气传动, 2000, 6: 16 20.
 (CHEN Xiyou, CHEN Xueyun. The improvement of output voltage waveforms for matrix converter under the unbalanced input voltages[J]. *Electric Drive*, 2000, 6: 16 20.)