

矩阵式变换器电流环无源性控制

王孝洪¹, 吴捷², 杨金明², 张向伟²

(1. 华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 针对矩阵式变换器输出侧电流易受输出侧负载影响现象, 提出了一种基于无源性理论的矩阵式变换器的控制器. 首先将矩阵变换器等效为虚拟的交—直—交变换器, 在 $d-q$ 坐标下建立了矩阵变换器输入和输出侧的模型, 并基于无源性理论设计了矩阵式变换器输出侧闭环控制器, 以消除内外扰动和不平衡的影响, 实现对输出电流快速准确的跟踪. 仿真结果表明这种控制器具有很好的动态特性, 对输入和输出扰动均有很好的抑制效果.

关键词: 矩阵式变换器; 无源性控制; 闭环控制

中图分类号: TM311 **文献标识码:** A

Passivity control for current-loop of matrix converter

WANG Xiao-hong¹, WU Jie², YANG Jin-ming², ZHANG Xiang-wei²

(1. College of Automation Science and Technology, South China University of Technology,
Guangzhou Guangdong 510640, China;

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

Abstract: A controller based on the passivity theory is presented for matrix converter(MC) which is influenced by the load on the output. The MC is transformed to a virtual AC-DC-AC converter, and a model is established in $d-q$ frame and the controller is designed to eliminate the influence of inner and outer disturbance and to realize the fast accurate tracking of output current. Simulation results demonstrate the desirable dynamic performance and strong robustness to the input and output disturbance.

Key words: matrix converter; passivity control; closed-loop control

1 引言(Introduction)

矩阵变换器(MC)具有拓扑结构简单、布局紧凑、能量可双向流通、可产生正弦输入电流和输出电压, 输入功率因数角可调等优点^[1,2], 作为一种高性能的电力变换器, 在柔性交流传输系统、变频电源、风力发电等方面, 发挥着重要的作用^[3], 使其研究成为一个热点. 对它的分析和设计目前采用较多的是双电压法和矢量控制法, 但这些方法由于矩阵变换器的交—交直接变换机理, 输出线与输入线直接相连, 无中间储能环节, 输入的扰动或不对称将直接对输出波形质量产生影响, 输出侧的不平衡负载也会造成输出电压的不对称, 因此对矩阵变换器寻求一种提高电能质量的闭环控制方法很有必要.

目前在对矩阵变换器的闭环控制主要集中在控制方法的改进和基本的PID控制^[4~6], 控制的针对性过强, 适用范围窄, 另外, 限于方法的局限性, 这些控制方法的鲁棒性不强. 基于自抗扰控制器的方法, 虽然具有不依赖于模型和高鲁棒性的特点, 但该方法

调试困难, 对整个控制系统的稳定性分析尚缺乏有效手段^[7].

本文基于无源性理论设计了矩阵变换器的控制器, 采用双环结构, 外环采取矢量控制, 内环为基于无源性理论的功率变换器的电流跟踪控制. 无源性理论基于能量“成形”, 通过重新分配系统的能量和注入非线性阻尼, 使系统在满足全局渐近稳定的条件下达到期望的控制效果, 不同于其他非线性控制中需补偿或抵消非线性项, 该方法充分利用系统的物理结构, 无需补偿不影响稳定性的“无功功率”部分非线性项, 减少了运算和控制量^[8]. 该方法具有易于实现和鲁棒性强的特点, 仿真结果表明, 对输入扰动或不对称以及输出负载不平衡等扰动具有很好的抑制作用.

2 输出电流控制(Output current control)

2.1 矩阵变换器的数学模型(Model of MC)

根据矩阵变换器间接控制原理, 将其虚拟变换为

交一直一交变换器,如图1所示.

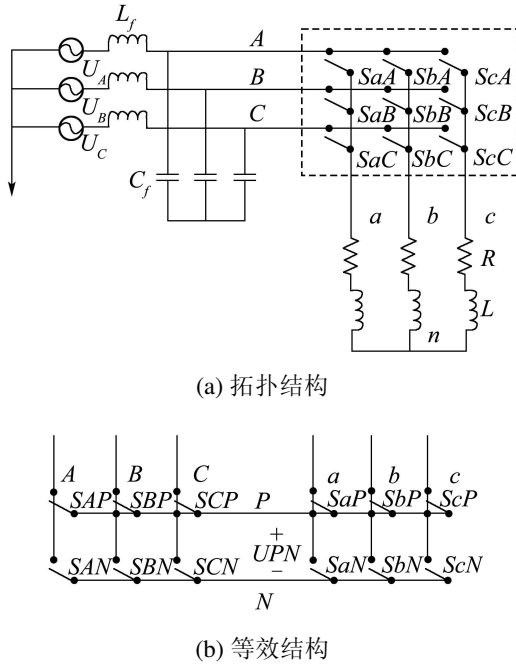


图1 矩阵变换器的拓扑及其等效结构

Fig. 1 The topology and equivalent circuit for MC

定义开关函数 $S_{jk}(j, k \in \{A, B, C, a, b, c, P, N\})$ 开通时, $S_{jk} = 1$; 关断时, $S_{jk} = 0$. 经推导可得: $S_{jk} = S_{jP}S_{kP} + S_{jN}S_{kN}$. 代入任一时刻虚拟整流、逆变器的开关量, 即可得到矩阵变换器的实际开关量.

间接控制方法为将输入侧等效为可控电流源, 将输出侧等效为可控电压源. 忽略PWM调制时延, 在

三相对称的情况下, 对于输出侧有

$$u_x = L \frac{di_x}{dt} + Ri_x + u_n, \quad x = a, b, c. \quad (1)$$

其中: u_x 为 abc 各相输出电压, i_x 为各相输出电流, u_n 为负载星结点电压, 它们均为局部平均值, R 与 L 分别为三相平衡负载时的各相电阻和电感. 在三相不平衡时, 只要在式(1)中引入不平衡项即可.

引入 abc 坐标向 $d-q$ 坐标的PARK变换矩阵:

$$C_{abc-dq} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t) & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix}. \quad (2)$$

ω 取期望输出角频率 ω_0 , 对式(1)进行PARK变换并整理, 可得 $d-q$ 轴模型

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = u_d - Ri_d + \omega_0 Li_q, \\ L \frac{di_q}{dt} = u_q - Ri_q - \omega_0 Li_d. \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)改写为Euler-Lagrange形式:

$$D\dot{X} + BX + KX = u. \quad (4)$$

式中: $X = [i_d, i_q]^T$ 为状态向量, $u = [u_d, u_q]^T$ 为控制向量, $D = \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 & L\omega_0 \\ -L\omega_0 & 0 \end{bmatrix}$,

$$K = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix}.$$

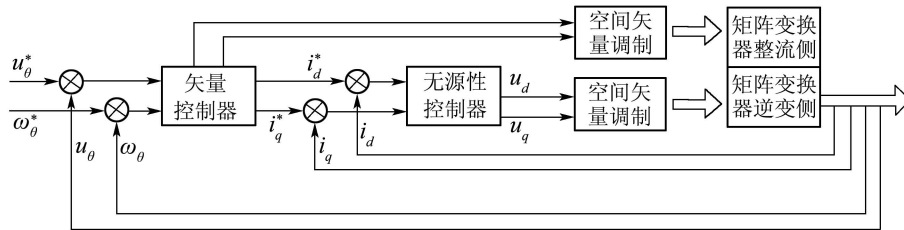


图2 矩阵变换器整体控制框图

Fig. 2 Block diagram of control system for MC

2.2 电流环控制器设计(Design of current loop controller)

矩阵变换器的整体控制框图如图2所示.

控制系统采用双环结构, 外环采取矢量控制, 对输出的电压和频率进行跟踪; 内环采用无源性控制器, 对功率变换器的电流进行跟踪控制.

对于由式(4)表示的电流环控制子系统, 如将 u 视为输入, 将 X 视为输出, 则电流环子系统满足无源性条件, 即

$$V(X) - V(X^0) = \int_0^t X(s)^T u ds. \quad (5)$$

其中 $V(X) = \frac{1}{2} X^T D X$ 为电流环子系统的能量函数.

定义电流环控制子系统误差向量:

$$E = X - X_d. \quad (6)$$

式中 X_d 为电流期望值, 代入电流环子系统得误差动态方程:

$$D\dot{E} + BE + KE = u + D\dot{X}_d + BX_d + KX_d. \quad (7)$$

对电流环误差子系统取能量函数: $V'(X) = \frac{1}{2}E^T DE$.

对 $V'(X)$ 沿误差动态方程(式7)微分, 得

$$\dot{V}' = E^T[-BE - KE + u + D\dot{X}_d + BX_d + KX_d]. \quad (8)$$

式(8)中矩阵 B 为反对称矩阵, 即 $B(X) = -B(X)^T$, 从而有 $E^T BE = 0$, 由上式可知, 这部分动态(无功功率)不影响系统稳定性. 根据李雅普诺夫稳定性理论, 只要令 $u = -D\dot{X}_d - BX_d - KX_d + KE$, 就可使 $\dot{V}' = -E^T KE < 0$, 从而保证电流环控制系统稳定并使电流跟踪期望值. KE 项是为了改善动态特性而注入的阻尼项.

3 控制系统仿真(Simulation of control)

利用MATLAB/Simulink进行数值仿真, 矩阵变换器的开关器件采用理想开关模型, 电源为工频220 V. 滤波电路的每相参数: $L_f = 15 \text{ mH}$, $C_f = 6 \mu\text{F}$.

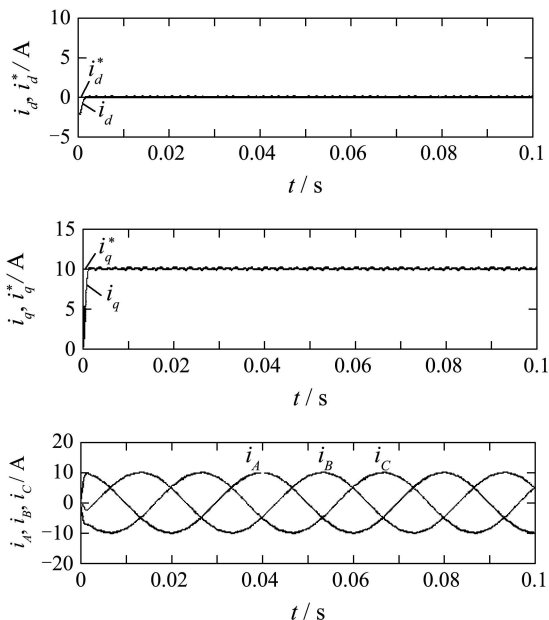


图3 输入不对称情况下的电流跟踪过程

Fig. 3 Simulation of current control under unbalanced input

1) 输入不对称情况.

三相对称负载的每相参数: $R = 2.8750 \Omega$, $L = 12 \text{ mH}$; 期望三相对称的输出电流为: 幅值10 A, 频率50 Hz, 正相序; 空间矢量调制的采样周期为0.0002 s.

三相输入为

$$\begin{aligned} U_A &= 436.8 \sin(\omega t + 16.7), \\ U_B &= 394.8 \sin(\omega t - 126.79), \end{aligned}$$

$$U_C = 235.6 \sin(\omega t + 108.54).$$

图3为输入不对称情况下阶跃变化时的实际输出 i_d, i_q 跟踪期望电流 i_d^*, i_q^* 的过程.

2) 输出不对称情况.

三相不对称负载分别为

$$\begin{aligned} R_a &= R_b = 2.875 \Omega, R_c = 4.6 \Omega, \\ L_a &= L_b = 12 \text{ mH}, L_c = 7 \text{ mH}. \end{aligned}$$

输出频率为25 Hz, 期望三相对称的输出电流为: 幅值10 A, 频率50 Hz, 正相序; 空间矢量调制的采样周期为0.0002 s.

图4为输出负载不对称情况下阶跃变化时的实际输出跟踪期望电流的过程.

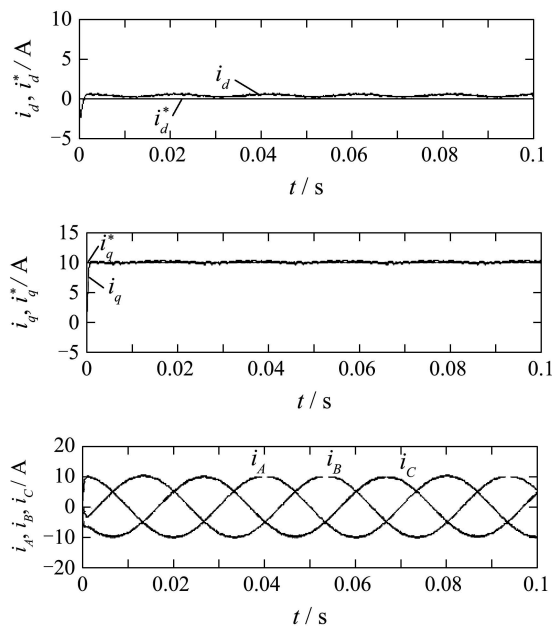


图4 输出负载不对称情况下的电流跟踪过程

Fig. 4 Simulation of current control under unbalanced load

由以上仿真结果, 基于无源性原理设计的控制器充分利用了矩阵式变换器的结构特点, 如式(3)中对于与输出频率有关的交叉耦合项 $L\omega_0 i_d$ 和 $L\omega_0 i_q$, 因其不影响电流环子系统的稳定性, 没必要消除该部分动态, 简化了控制算法. 另外, 通过注入阻尼, 可改善电流环控制的动态特性.

4 结论(Conclusion)

在空间矢量调制基础上, 对输出侧电流环进行基于无源性理论的闭环控制, 在控制器的设计上充分利用的矩阵变换器的结构特性, 不必对其中的“无功功率”部分动态进行补偿, 使控制器的控制输出小, 控制器鲁棒性强且易于实现, 仿真结果表明, 该控制方法对由输入的扰动或不对称、输出侧的不平衡负载等引起的扰动均有很好的抑制作用.

(下转第347页)

模型参数设置为: 开关频率为5000 Hz; 输入电压为220 V, 50 Hz对称电源, 输出为110 V, 30 Hz对称交流输出, 得的仿真波形如图3、图4所示。

以上仿真结果验证了理论分析的正确性, 获得良好的输出线电压正弦波形和输入电流波形, 低次谐波含量少。由于在输入侧未加滤波, 输入电流中含有高次谐波。

4 结论(Conclusions)

采用双电压瞬时值控制的矩阵式变换器, 可获得优良的输出电压品质。由于采用高频开关, 输入电流含有高次谐波, 因此, 在电路设计中需考虑引入输入滤波器。另外, 采用开关的优化组合, 可有效减小输出电压的谐波。引入闭环反馈, 可改善电压电流的畸变。

随着电力半导体器件如IGBT性能的不断提高, 具有优良控制性能又有优良输入电流品质的矩阵式变换器已成为当前的发展趋势, 本文针对矩阵式变换器双电压控制所做的分析及仿真, 对矩阵式变换器设计将有一定的意义, 而矩阵式变

换器的实现则将解决在风力发电系统中一个关键问题。

参考文献(References):

- [1] WHEELER P, CLARE J, EMPRINGHAM L, et al. Matrix converters[J]. *Power Engineering Journal*, 2002, 16(6): 273 – 282.
- [2] ALESINA A, VENRUTINI M G B. Analysis and design of optimum-amplitude nine-switch direct AC-AC converters[J]. *IEEE Transaction on Power Electronics*, 1989, 4(1): 101 – 112.
- [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 Transaction on Industrial Electronics*, 1991, 38(3): 166 – 172.
- [4] 陈希有, 丛树久, 陈学. 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 Xiyu, CONG Shujiu, CHEN Xueyun. Analysis Of the relationship between the voltage sectors and the performances of matrix converter based on two voltage synthesis[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2001, 21(9): 63 – 67.)
- [5] 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]. *Transaction of China Electrotechnical Society*, 1998, 13(1): 46 – 50.)
- [6] NIELSEN P, BLAABJERG F, PEDERSEN J K. Space vector modulated matrix converter with minimized number of switches and feed-forward compensation of input voltage unbalance[J]. *Proceedings of Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth*, 1996, 2(1): 833 – 839.
- [7] 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 Xiyu, CHEN Xueyun. Park transformation based the transient analysis for the space vector modulated matrix converter[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2000, 20(5): 80 – 84.)
- [8] QOI B T, KAZERANI M. Voltage-source matrix converter as a controller in flexible ac transmission systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1998, 13(1): 247 – 253.
- [9] ZHANG L, WATTHANASARAN C, SHEPHERD W. Control of AC-AC matrix converter for unbalanced and/or distorted supply voltage[C]//*Proceedings of the 2001 IEEE Electronics Specialist Conference*. Vancouver, Canada: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2001: 1108 – 1113.
- [10] WEI Lixiang, MATUSHITA Yoichi, LIPO T A. A compensation method for dual-bridge matrix converters operating under distorted source voltages[C]//*Proceedings of the 2003 IEEE Industrial Electronics Society*. Roanoke, Virginia, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2003: 2078 – 2084.
- [11] 邓文浪, 杨欣荣, 朱建林. 不平衡负载情况下基于双序dq坐标系双级矩阵变换器的闭环控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 70 – 75.
(DENG Wenlang, YANG Xinrong, ZHU Jianlin. Study of closed loop control based on double synchronous rotating frame for two-stage matrix converter under unbalanced load[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2006, 26(19): 70 – 75.)
- [12] 杨国顺, 吴捷, 陈渊睿. 矩阵变换器的自抗扰控制技术[J]. 电机与控制学报, 2005, 9(4): 311 – 15.
(YANG Guoshun, WU Jie, CHEN Yuanrui. Auto-disturbance rejection control technique of matrix converter [J]. *Electric Machines and Control*, 2005, 9(4): 311 – 15.)
- [13] YANG J M, JIN X, WU J, et al. Passivity-based control incorporating trajectory planning for a variable-reluctance finger gripper[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, PART I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2004, 218(3): 99 – 109.

(上接第343页)

参考文献(References):