

基于矩阵式变换器的异步电机直接转矩控制策略

杨 苹, 胡 斌, 陈 武, 钟国基

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 研究一种基于矩阵式变换器的异步电机控制策略, 分析了异步电机的直接转矩控制方法和矩阵式变换器的空间矢量调制, 给出了在直接转矩控制方案中, 矩阵式变换器矢量电压的选择. 这一控制策略同时实现了矩阵式变换器的空间矢量调制和异步电机的直接转矩控制. 利用MATLAB仿真平台实现了该控制策略, 仿真结果表明: 采用这一控制策略的调速系统具有良好的静、动态性能, 并且保持了单位功率因素.

关键词: 矩阵式变换器; 直接转矩控制; 空间矢量调制

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A

Direct-torque control strategy for asynchronous electromotor based on matrix converters

YANG Ping, HU Bin, CHEN Wu, ZHONG Guo-ji

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

Abstract: The direct-torque control strategy for asynchronous electromotor based on matrix converters is studied. The principle of direct-torque control, the space vector modulation of matrix converter (MC) and the selection of MC space vector voltage based on direct-torque control are systematically analyzed. Realization of this strategy based on MATLAB and the simulation results are given in this paper, which verify that this control strategy results in good static and dynamic performance of speed control system, and maintains the unity power factor.

Key words: matrix converter; direct-torque control; space vector modulation

1 引言(Introduction)

直接转矩控制是20世纪80年代中期出现的一种新型高性能交流变频调速技术. 它采用空间矢量的分析方法, 直接在静止坐标系下计算与控制交流电机的转矩, 采用定子磁通定向, 借助于离散的两点式调节产生PWM信号, 直接对逆变器的开关状态进行最佳控制, 以获得转矩的高动态性能. 它省掉了复杂的矢量变换与电机模型的简化处理, 没有通常的PWM信号发生器. 直接转矩控制在很大程度上解决了矢量控制中计算量大、控制复杂、特性易受电机参数变化影响、实际性能难于达到理论分析结果等重大问题^[1]. 所以, 直接转矩控制技术一诞生, 就受到了普遍的关注并得到了迅速的发展.

以往的直接转矩控制都是基于普通的交-直-交变频器实现的, 其中的直流环节不但增加了异步电机调速系统的维护工作量, 而且使得系统的谐波增大, 功率因数降低. 矩阵式变换器是一种优良的“全硅”交-交变频装置, 将矩阵式变换器和直接转矩控

制结合起来进行研究不仅具有重要的理论意义, 还为“变频器-电机”集成化发展方向提供一定的工程参考. 本文将在对矩阵式变换器的实施空间矢量调制的基础上, 将矩阵式变换器应用于异步电机的直接转矩控制中.

2 异步电机直接转矩控制的基本原理(Principle of asynchronous electromotor direct-torque control)

2.1 异步电动机的数学模型(Mathematical model of asynchronous electromotor)

本文采用异步电动机的等效模型如图1所示.

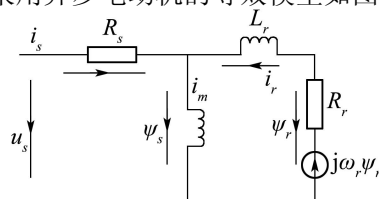


图 1 异步电动机等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit of asynchronous electromotor

得异步电动机的状态方程及转矩方程:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \vec{\psi}_s \\ \vec{\psi}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s L_r}{\sigma L_s L_r} - \frac{R_s L_m}{\delta} & \frac{R_s L_m}{\delta} \\ -\frac{R_r L_m}{\delta} & -\frac{R_r L_r}{\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{\psi}_s \\ \vec{\psi}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \vec{u}_s, \quad (1)$$

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \vec{\psi}_s \otimes \vec{\psi}_r = \frac{3}{2} n_p \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} |\vec{\psi}_s| \cdot |\vec{\psi}_r| \sin \theta(t). \quad (2)$$

式(2)表示成定子磁链和定子电流形式为

$$T_e = \frac{3}{2} n_p (\vec{\psi}_s \otimes \vec{i}_s) = \frac{3}{2} n_p (\Psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{s\beta} i_{s\alpha}). \quad (3)$$

式中: R_s, R_r 表示异步电动机的定子和转子电阻; L_s, L_r 和 L_m 分别表示定子自感、和转子漏感及两者的互感; ω 表示电动机的电角速度; $\delta = L_s L_r - L_m^2$, $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ 称为电机漏感系数; n_p 表示异步电动机的极对数; $\theta(t)$ 为定转子磁链的夹角, “ $\otimes$ ” 表示矢量积。

2.2 直接转矩控制的基本原理(Principle of direct-torque control)

由式(3)可知, 若视电机参数近似不变, 则电磁转矩 T_e 为定子、转子磁通的向量积, 其大小在定子转子磁通幅值不变的情况下直接由转差角 $\theta(t)$ 的正弦值决定。标准感应电机的转子电气时间常数一般都较大, 因此, 转子磁通相对定子磁通而言变化较缓慢。如果设法保持定子磁通幅值恒定, 那么通过快速控制定子磁通旋转角速度, 即通过快速调节 $\theta(t)$ 的变化, 结合转矩的直接控制, 则可能迅速且有效的调

节 T_e 达指令值。

通过对异步电机转矩的分析, 可知通过对定子磁通与转子磁通转差角度的控制, 就可以获得快速的动态响应^[1]。根据以上分析, 得到直接转矩控制的基本结构原理框图如图2所示。

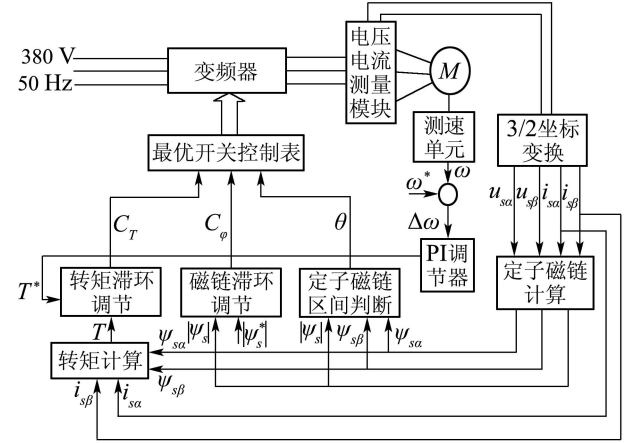


图2 近似圆形磁链DTC控制系统框图

Fig. 2 Chart of approximate circular magnetism chain DTC control system

3 矩阵式变换器的空间矢量调制(Space vector modulation of matrix converter)

矩阵式变换器的拓扑如图3所示^[2], 矩阵式变换器的空间矢量控制是目前比较成熟的一种调制策略, 不仅能用于控制输出正弦电压, 而且能使电动机获得圆形磁场。其思想是将矩阵式变换器等效成一个整流器和一个逆变器的组合, 两者通过一个“虚拟直流”环节来连接, 利用传统交-直-交变换器的方法实施控制^[3,4]。

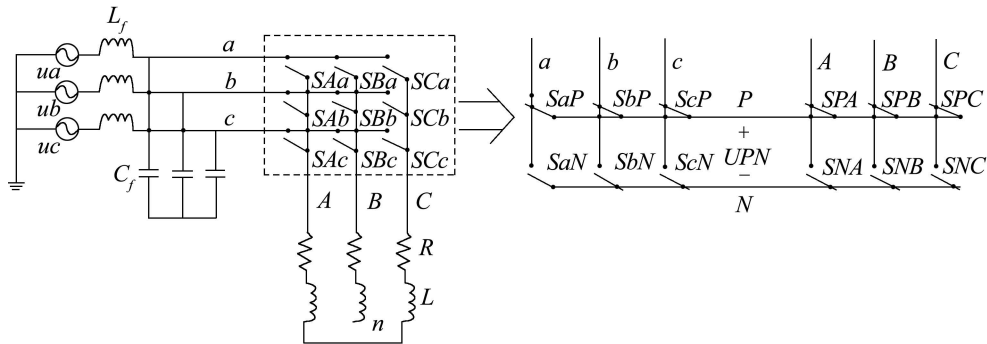


图3 矩阵变换器主电路拓扑及其等效电路

Fig. 3 Topology of matrix converter and the equivalent circuit

在整流器中对输入线电流进行空间矢量PWM调制, 在逆变器中对输出线电压进行空间矢量PWM调制, 最后根据开关函数的对应关系综合出矩阵式变换器的交-交直接变换控制方式。分别得到输出电压及输入电流的矢量圆, 如图4所示。

根据期望输出电压和输入电流即可确定其所在的扇区。以虚拟整流器、逆变器均工作在第I扇区为例, 可以矢量合成的空间电流、电压矢量分别是 I_1, I_6 和 U_1, U_6 , 两个空间矢量的综合调制采用相互嵌套的办法来实现。整个输入相电流和输出线电压矢量合成过程共有 $I_6 - U_6, I_6 - U_1, I_1 - U_6$,

$I_1 - U_1$ 以及零矢量 $I_0 - U_0$ 5种组合. 每一矢量组合的作用时间用占空比表示时是该组合内各矢量占空比的乘积. 即

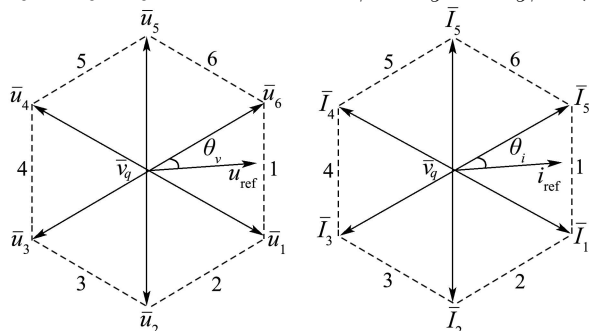
$$I_6 - U_6: dx\alpha = dx \cdot d\alpha = m \sin(60^\circ - \theta_i) \cdot \sin(60^\circ - \theta_v), \quad (4)$$

$$I_1 - U_6: dx\beta = dx \cdot d\beta = m \sin(60^\circ - \theta_i) \cdot \sin \theta_v, \quad (5)$$

$$I_6 - U_1: dy\alpha = dy \cdot d\alpha = m \sin \theta_i \cdot \sin(60^\circ - \theta_v), \quad (6)$$

$$I_1 - U_1: dy\beta = dy \cdot d\beta = m \sin \theta_i \cdot \sin \theta_v, \quad (7)$$

$$I_0 - U_0: d_0 = 1 - dx\alpha - dx\beta - dy\alpha - dy\beta. \quad (8)$$



(a) 输出线电压合成

(b) 输入相电流合成

图4 矩阵式变换器空间矢量合成示意图

Fig. 4 Graphics of space vector for MC

4 基于直接转矩控制的矩阵变换器的空间电压选择(Selection of MC space vector voltage based on direct-torque control)

直接转矩控制事实上是将变频器的控制模式和电机运行性能作为一个整体来考虑的, 通过控制异步电动机的输入电压来实现对电动机的定子磁链控制, 当对称三相正弦波电压加于对称三相绕组时, 在电动机的气隙中将产生具有恒定幅值和恒定旋转速度的磁通, 这时电动机在理想的状态下运行. 当异步电动机是由一个三相变频器供电时, 则电动机的输入电压完全取决于变频器的开关切换模式, 而电动机磁通的波形又取决于输入电压的模式, 因此直接转矩控制的目标之一就是建立磁链和逆变器开关模式之间的关系, 通过控制变频器开关正确的切换, 使电动机气隙获得一个近似圆形的磁场^[7]. 因此, 对于矩阵式变换器—异步电机直接转矩系统控制的关键是如何选定空间电压矢量^[5~7].

在电机实际运行中, 任一时刻只能施加一个电压矢量, 所以必须同时考虑到磁链控制的需求和转矩控制的需求才能正确的选择空间电压矢量. 对于具体的控制系统, 可根据定子磁链控制

器、转矩控制器的输出以及磁链所处的扇区. 根据单独从磁链控制和转矩控制的角度可以确定所应施加的空间电压矢量, 若滞环控制器输出 C_ψ 为“+1”, 表示要减小定子磁链; 若 C_ψ 为“-1”, 表示要增加定子磁链. 若滞环控制器的输出 C_T 为“-1”, 表示要增加电磁转矩; 若 C_T 为“+1”则表示要减小电磁转矩; 若 C_T 为“0”, 则变频器应工作于 $\vec{u}_0$, 将电机的以上需求情况与电压矢量轨迹结合, 制定如表1所示的电压矢量状态切换表格. 在控制过程中, 实时检测转矩大小和定子磁通的幅值及相角, 根据磁链控制器、转矩控制器的输出以及磁链所处的扇区, 通过查开关输出状态表, 就可以确定变频器的需要输出的电压矢量空间, 进而确定开关的切换状态.

表1 矩阵式变换器空间矢量选择表

Table 1 Space vector selection on MC

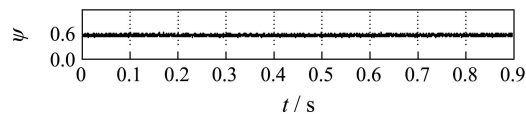
扇区		1	2	3	4	5	6
$C_\psi = -1$	$C_T = +1$	$\vec{u}_6$	$\vec{u}_1$	$\vec{u}_2$	$\vec{u}_3$	$\vec{u}_4$	$\vec{u}_5$
	$C_T = 0$	$\vec{u}_0$	$\vec{u}_0$	$\vec{u}_0$	$\vec{u}_0$	$\vec{u}_0$	$\vec{u}_0$
	$C_T = -1$	$\vec{u}_2$	$\vec{u}_3$	$\vec{u}_4$	$\vec{u}_5$	$\vec{u}_6$	$\vec{u}_1$
$C_\psi = +1$	$C_T = +1$	$\vec{u}_5$	$\vec{u}_6$	$\vec{u}_1$	$\vec{u}_2$	$\vec{u}_3$	$\vec{u}_4$
	$C_T = 0$	$\vec{u}_0$	$\vec{u}_0$	$\vec{u}_0$	$\vec{u}_0$	$\vec{u}_0$	$\vec{u}_0$
	$C_T = -1$	$\vec{u}_3$	$\vec{u}_4$	$\vec{u}_5$	$\vec{u}_6$	$\vec{u}_1$	$\vec{u}_2$

在确定了输出的电压矢量后, 就可以确定输出电压所在扇区. 然后采用双空间矢量调制策略, 就可以确定开关的导通和关断, 再求得各个占空比. 需要注意的是这里 $\theta_v = 0$ 或者 $\pi/3$.

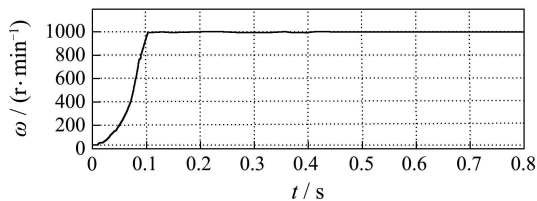
5 仿真结果分析(Analysis of simulation results)

利用上述在MATLAB/SIMULINK下建立的矩阵变换器—直接转矩控制系统仿真模型, 在MATLAB7.2下进行仿真, 系统参数设置如下:

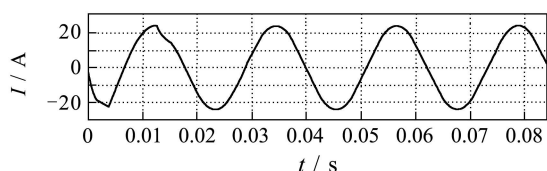
电源各相电压峰值为 $220\sqrt{2}$, 相角互差 $2\pi/3$. 电机定子电阻 $R_s = 0.45 \Omega$, 定子漏感 $L_{ls} = 2.1 \text{ mH}$, 转子漏感 $L_{lr} = 2.1 \text{ mH}$, 转子电阻 $R_r = 0.34 \Omega$, 互感 $M = 52 \text{ mH}$, 额定电压380 V, 额定功率4.0 kW, 两对极. 仿真算法为ode23tb. 仿真结果如图5所示.



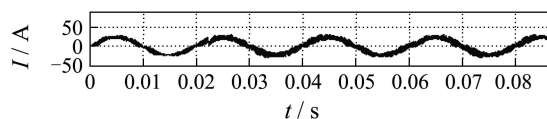
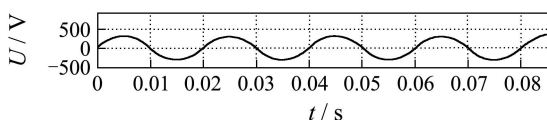
(a) 1200 r/min, 20 N·m时的磁通



(b) 1200 r/min, 20 N·m时的电机转速



(c) 1200 r/min, 20 N·m时的定子电流



(d) 1200 r/min, 20 N·m时的磁通输入电压、电流

图5 矩阵式变换器—直接转矩控制系统仿真结果

Fig. 5 Simulation results of direct-torque control system based on MC

由以上各图可见, 矩阵变换器—直接转矩控制系统继承了传统变换器直接转矩控制系统的特点, 定子磁通幅值和电磁转矩稳定在给定值, 电机输入电流为正弦波。

同时还可以看到输入电流是正弦波, 电压波形与电流波形基本是同相位的。说明了矩阵变换器应用在直接转矩控制系统中时保持了其输入电流为正弦、输入功率因数很高的优点。

6 结论(Conclusions)

本文从异步电机在静止系中的等效电路出发, 推导出了转矩与转差角速度的关系, 得到了以下结论: 在保持定子磁通恒定的前提下, 通过准确地控制定子的旋转速度, 使其转差角速度的值尽可能大, 就可以获得转矩的瞬时快速响应。此外, 就基于矩阵式变换器的异步电机直接转矩控制系统, 分析了用于实现直接转矩控制的空间矢量给定方法, 并结合矩阵式变换器的双空间矢量调制策略研究了开关切换的实现方法。

最后, 本文采用了MATLAB/SIMULINK软件对矩阵变换器—直接转矩控制系统进行了仿真实验, 由仿真实验的结果可知, 该系统的控制算法能够实现三相异步电机的直接转矩控制, 定子磁通幅值和电磁转矩稳定在给定值, 电机输入电流为正弦波体现了矩阵变换器的优点。矩阵变换器的

输入电流为正弦波, 且电压与电流相位基本相同, 说明系统的功率因数很高。仿真实验证明了基于矩阵变换器的直接转矩控制系统是一种优良的调速系统。

参考文献(References):

- [1] 谢新锋. 异步电动机直接转矩控制闭环调速系统的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2003
(XIE Xinfeng. Study of direct torque control system of an induction machine in closed loop[D]. Nanning: Guangxi University, 2003.)
- [2] WHEELER P W, RODRIGUEZ J, CLARE J C, et al. Matrix converters: A technology review[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2002, 16(6): 276–288.
- [3] 陈伯时, 陆海慧. 矩阵式交-交变换器及其控制[J]. *电力电子技术*, 1999, 1: 8–11.
(CHEN Boshi, LU Haihui. Matrix AC-AC converter and its control[J]. *Power Electronics*, 1999, 1: 8–11.)
- [4] 陈希有, 陈学允. 一般矩阵式电力变换器的等效电路及其应用[J]. *电工技术学报*, 1999, 14(5): 31–34.
(CHEN Xiyu, CHEN Xueyun. The equivalent circuit and its applications for generalized matrix converter[J]. *Electrical Journal*, 1999, 14(5): 31–34.)
- [5] 吴捷, 石章海, 杨俊华, 等. 采用直接转矩控制的矩阵式变换器的仿真[J]. *华南理工大学学报*, 2006, 34(4): 47–50.
(WU Jie, SHI Zhanghai, YANG Junhua, et al. Simulation of matrix converter based on direct torque control[J]. *Journal of South China University of Technology*, 2006, 34(4): 47–50.)
- [6] 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[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(3): 80–84.
(LI Zhiyong, ZHU Jianlin, YI Lingzhi, et al. Simulation research of space-vector modulated matrix converter[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2003, 23(3): 80–84.)
- [7] KLUMPNER C, NIELSEN P, BOLDEA I, et al. A new matrix converter-motor(MCM) for industry applications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2002, 4: 325–335.)

作者简介:

杨 苹 (1967—), 女, 1998年毕业于华南理工大学电力学院, 获自动控制博士学位, 现为华南理工大学电力学院教授, 主要研究方向为电力电子电路的建模与控制、模糊控制与决策、人工智能系统的理论与应用等, E-mail: eppyang@scut.edu.cn;

胡 斌 (1983—), 女, 华南理工大学电力学院硕士研究生, 主要研究领域为电力电子电路的建模与控制、人工智能系统的理论与应用;

陈 武 (1982—), 男, 华南理工大学电力学院硕士研究生, 主要研究领域为电力电子电路的建模与控制、人工智能系统的理论与应用;

钟国基 (1981—), 男, 华南理工大学电力学院硕士研究生, 主要研究领域为电力电子电路的建模与控制、人工智能系统的理论与应用。