

文章编号：1005-8451(2008)05-0012-03

基于 Matlab/Simulink 的异步电机直接转矩控制系统仿真

薛俊伟

(中国南车集团 南京浦镇车辆厂, 南京 210031)

摘要：在直接转矩控制理论的基础上，利用 Matlab/Simulink 软件构建异步电动机直接转矩控制调速系统。对仿真模型中的定子磁链观测器模块和逆变器模块进行分析，简要说明空间电压矢量对磁链和转矩的作用及影响。通过对异步电机进行仿真实验，得到电压、电流、转速、转矩以及磁链的仿真波形。

关键词：直接转矩控制；异步电动机；逆变器；空间矢量；仿真

中图分类号：TM 343 : TP39 文献标识码：A

Simulation of Induction Motor Direct Torque Control System based on Matlab/Simulink

XUE Jun-wei

(CSR Nanjing Puzhen Rolling Stock Works, Nanjing 210031, China)

Abstract: Direct Torque Control (DTC) System of induction motor was constructed with Matlab/Simulink based on the theory of DTC. The modules for stator flux observation and inverter were illustrated. It was explained how the space voltage vector affected the motor's stator flux and electromagnetic torque. At last an experiment with definite parameters was emulated and the waveform of stator voltage, stator current, rotor speed and electromagnetic torque were given.

Key words: direct torque control; induction motor; inverter; space vector; simulation.

直接转矩控制是用空间矢量的分析方法直接在定子坐标系下计算与控制交流电机的转矩，借助于双位模拟调节器产生 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，其控制思想新颖，控制结构简单，控制手段直接，信号处理的物理概念明确。该控制系统的转矩响应迅速，是一种具有高静态和动态性能的交流调速方法。

1 直接转矩控制的基本结构

直接转矩控制系统的结构如图 1，它包括转矩控制环和磁链控制环，采用 Bang-Bang 控制，通过转矩和磁链滞环选择合适的电压矢量，调节电机转矩和定子磁链快速跟踪给定。根据对定子磁链的形状来选择开关模式，并通过控制磁链的停止和前进控制电机力矩，从而产生 PWM 信号^[2]。

由图 1 可看出，磁链和转矩分别通过各自的观测器观测到。为方便对转矩的控制，必须先保持定子磁链幅值近似恒定。磁链轨迹越接近圆形，磁链

收稿日期：2007-12-19

作者简介：薛俊伟，助理工程师。

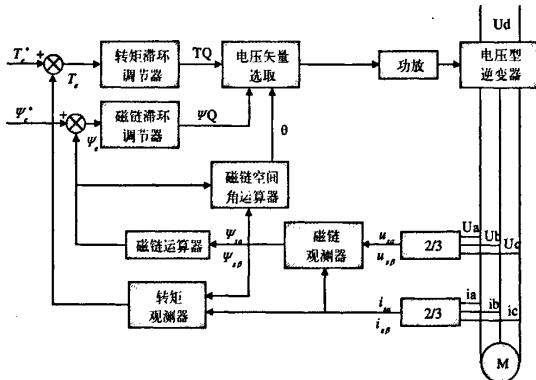


图 1 直接转矩控制系统框图

幅值越接近恒定，对力矩的控制效果越好，同时电机电流的谐波分量越小。但是磁链轨迹越接近圆形，逆变器的开关频率也会越高。通过磁链矢量观测值与给定磁链值相比较，选择合适的电压矢量即可达到对磁链矢量幅值近似恒定的控制，这就是磁链的自控制^[3]。

转矩自控制是通过两点式调节器把转矩的观测值与转矩的给定值作滞环比较。转矩超过容差上限，输出零电压矢量，使转矩下降；转矩低于容差下限，输出使力矩增加的电压矢量。把转矩的波动

限制在一定的范围以内。由频率调节器来调节容差的大小。

直接转矩控制着眼于电机转矩方程，把电机和变频器作为一个整体，通过磁链自控制和转矩自控制，实现了对电机的解耦控制。它的控制效果不取决于电动机数学模型是否能够简化，而是采用 bang-bang 控制实现对电机的高速动态控制。

2 圆形磁链轨迹直接转矩控制的开关状态选择

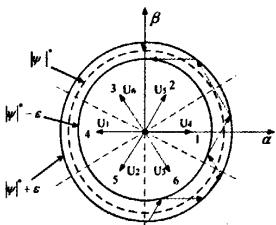


图 2 磁链圆的空间区域划分及圆形轨迹

若三相异步电机通入对称的三相正弦电流，电机产生圆形旋转磁势，相应的电机空间磁链矢量的轨迹为圆形^[4]。反过来，根据前面介绍的电压矢量对磁链矢量的作用，使电机的磁链矢量沿 6 个电压矢量方向走折线逼近圆形轨迹，如图 2，那么变频器的各相电流也就近似为正弦电流。

实际实施时，给定参考圆形磁链幅值 $|\Psi|^{*}$ 和磁链容差以及力矩参考和力矩容差，使磁链在电压的作用下，沿磁链容差的圆环内运动。若磁链容差很小时，磁链轨迹近似为圆形。形成圆形磁链轨迹，必须根据定子磁链所处的位置采用相应的电压矢量，如图 2，整个圆周按虚线分成 6 个区域。

给定力矩与实际力矩的误差，经过滞环比较器得出 \bar{sT} 信号，给定磁链幅值与实际观测磁链幅值，经过滞环比较器得出 $\bar{s\Psi}$ 信号，然后根据这两个信号以及正反转信号可以找出应该采用的电压矢量，如表 1。

表 1 圆形磁链轨迹电压开关表 (正转)

区域 1			区域 2			区域 3		
\bar{sT}	$\bar{s\Psi}$	u	\bar{sT}	$\bar{s\Psi}$	u	\bar{sT}	$\bar{s\Psi}$	u
1	1	$u_5(110)$	1	1	$u_6(010)$	1	1	$u_1(011)$
1	0	$u_6(010)$	1	0	$u_1(011)$	1	0	$u_5(001)$
0	1	$u_6(111)$	0	1	$u_0(000)$	0	1	$u_6(111)$
0	0	$u_0(000)$	0	0	$u_0(111)$	0	0	$u_0(000)$
区域 4			区域 5			区域 6		
\bar{sT}	$\bar{s\Psi}$	u	\bar{sT}	$\bar{s\Psi}$	u	\bar{sT}	$\bar{s\Psi}$	u
1	1	$u_2(001)$	1	1	$u_3(101)$	1	1	$u_4(100)$
1	0	$u_3(101)$	1	0	$u_4(100)$	1	0	$u_5(110)$
0	1	$u_0(000)$	0	1	$u_0(111)$	0	1	$u_0(000)$
0	0	$u_0(111)$	0	0	$u_0(000)$	0	0	$u_0(111)$

圆形磁链轨迹的优点是电流谐波小，但控制较复杂，开关频率受磁链容差以及转矩容差影响。该磁链控制方案是目前应用较多的，也是广为研究的方案，且处在不断改进中。

3 逆变器的开关频率调节及实现

在直接转矩控制的方法中，开关频率是通过转矩容差的宽度 ε_T 的调节来确定的。转矩容差 ε_T 设定的较窄些，对于减小转矩脉动是有利的，但同时增加了逆变器的开关频率。逆变器的开关频率受两个因素的影响：(1) 转矩容差的大小；(2) 转速的大小。当容差 ε_T 一定时，逆变器的开关频率取决于转速。可以用一个开关频率调节器来调节容差宽度 ε_T ，这个调节器的任务是保证逆变器在给定的开关频率下工作。当开关频率超过给定频率时，就是加大 ε_T ，以此来避免开关频率过高。反之亦然。

DTC 系统用到 180° 电压型逆变器，如果三相负载的定子绕组接成星形，其输出电压的空间矢量 $u_s(t)$ 经引入 Park 矢量变换后的表达式为：

$$u_s(t) = \frac{2}{3} [u_a + u_b e^{j2\pi/3} + u_c e^{j4\pi/3}] \quad (1)$$

式中， u_a 、 u_b 、 u_c 分别为 a 、 b 、 c 三相定子负载绕组的相电压。为了便于仿真研究，采用模拟的方法，根据逆变器的电压状态与逆变器的开关状态 S_{abc} 和直流电压 E_d 之间的关系，得到 u_{sa} 和 u_{sb} ，再经过 2/3 坐标变换器，变换成 U_a 、 U_b 、 U_c 。其基本方程由式 (1) 得到：

$$\begin{aligned} u_{sa} &= \frac{2}{3} E_d (S_a - \frac{1}{2} S_b - \frac{1}{2} S_c) \\ u_{sb} &= \frac{2}{3} E_d (\frac{\sqrt{3}}{2} S_b - \frac{\sqrt{3}}{2} S_c) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \end{bmatrix} \quad (3)$$

在 Simulink 下仿真框图如图 3。

4 圆形磁链轨迹直接转矩控制系统仿真实现

电机模块直接采用 Simulink 中 simpower systems 工具箱中的已有电机模块，设置成鼠笼式异步电动

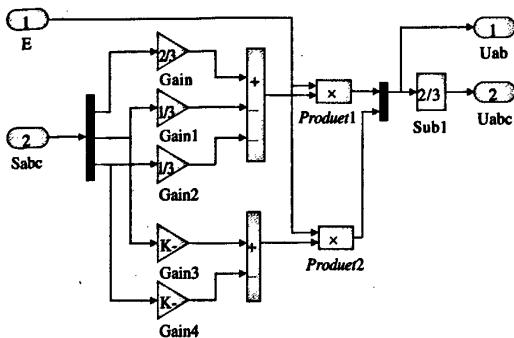


图3 逆变器仿真模型

机, 本论文电机的仿真参数如下: 2.2 kW, 380 V, 50 Hz, 极对数 $P=2$, 定子电阻 $R_s=0.435 \Omega$, 转子电阻 $R_r=0.816 \Omega$, 定子漏感 L_{si} 和转子漏感 L_{ri} 均为 2 mH, 定转子互感 $L_m=69.3$ mH, 机械转动惯量 $J=0.035 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

5 结束语

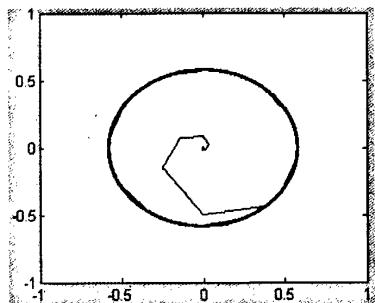


图4 圆形磁链轨迹

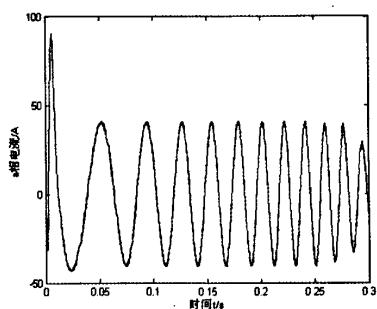


图5 相电流波形

从图4圆形磁链轨迹可明显看到电压矢量在滞环控制中的选择与作用过程, 低速域磁链畸变小;

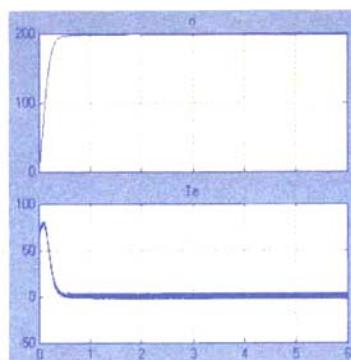


图6 转速和转矩曲线

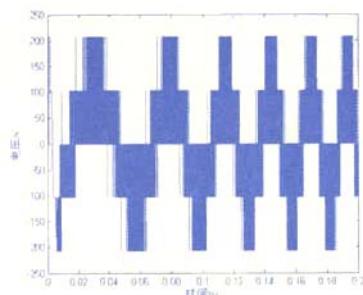


图7 负载相电压波形

相电流波形如图5, 基本为正弦波形, 这正是走圆形磁链的优点, 电流谐波分量减小, 控制更为平滑; 图6的转矩可看出, 当系统趋于稳定后, 转矩近似为给定的负载转矩。从实验结果可知, 本实验系统采用的直接转矩控制系统具有较好的稳态性能。

参考文献:

- [1] 李 凤. 异步电动机直接转矩控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998, 4.
- [2] 周渊深. 交直流调速系统与 MATLAB 仿真[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003, 12.
- [3] 吴学智, 刘亚东, 黄立培. 三电平电压型逆变器空间矢量调制算法的研究[J]. 电工电能新技术, 2002, 21 (4): 16-19.
- [4] Hamid A. Toliyat. Analysis and simulation of five-phase variable speed induction motor drives under asymmetrical connections [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1998, 13 (4): 748-756.
- [5] C.K.Lee, S.Y.R.Hui, H.Shu-hung Chung, Yash Shrivastava. A Randomized Voltage Vector Switching Scheme for Three-Level Power Inverters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2002, 17 (1): 94-100.