

基于 SVPWM 的 DTC 转矩脉动减小研究

徐 进^{1,2}, 张 学²

(1. 东南大学 电气工程系 江苏 南京 210096;
2. 南京农业大学 电气工程系 江苏 南京 210031)

摘要: 针对感应异步电动机直接转矩控制 DTC(Direct Torque Control)系统存在转矩和磁链脉动的缺点,推导出一种新的减小脉动的控制方法。根据推导预测出所加的电压矢量,电压矢量由电压空间矢量脉宽调制(SVPWM)合成。给出了仿真波形,仿真结果表明该方法能有效控制磁链和转矩的脉动问题。

关键词: 电压空间矢量脉宽调制; 直接转矩控制; 转矩脉动; 异步电动机

中图分类号: TP 212; TP 273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2005)06-0041-02

0 引言

直接转矩控制 DTC(Direct Torque Control)是一种新型的高性能交流调速传动控制技术,它摒弃了矢量控制中解耦的控制思想,采用定子磁链定向和瞬时空间矢量理论,通过检测定子电压和电流,在定子坐标系下观测电机的磁链、转矩,并将观测值与给定值相比较,误差值经滞环控制器调节得到相应的控制信号,综合磁链和转矩信号选择相应的电压空间矢量,对电动机进行控制。

DTC 技术的优点是转矩动态响应快、对转子参数的变化具有一定鲁棒性,缺点是存在转矩和磁链脉动,低速时更为明显。国内外学者提出了很多方案^[1],文献[2]中提出了一种平行双 PWM 的结构,在一定程度上解决了转矩脉动问题,但逆变器结构复杂。文献[3]采用模糊控制算法,原理简单,但计算量大,结果不太精确。本文提出的减小感应电动机磁链和转矩脉动的新方法,仿真结果表明:该方案能有效地减小电机磁链和转矩的脉动,改善电机转矩性能。

1 DTC 基本原理及转矩脉动

DTC 技术是用空间矢量分析方法,直接在定子坐标系下计算与控制交流电动机的转矩,采用定子磁场定向,借助于离散的两点式调节(Bang-Bang 控制)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,它省去了复杂的矢量变换与电动机数学模型的简化处理。

由异步电动机在静止 $\alpha-\beta$ 坐标下的数学模型可知:

$$\begin{aligned} \psi_{s\alpha}(k-1)u_{s\alpha}(k) + \psi_{s\beta}(k-1)u_{s\beta}(k) &= \frac{\psi_{err}}{T_s} |\psi_s(k-1)| + R_s [i_{s\alpha}(k-1)\psi_{s\alpha}(k-1) + i_{s\beta}(k-1)\psi_{s\beta}(k-1)] \\ i_{s\beta}(k-1)u_{s\alpha}(k) - i_{s\alpha}(k-1)u_{s\beta}(k) &= \frac{1}{n_p} \frac{T_{err}}{T_s} - \psi_{s\alpha}(k-1) \frac{i_{s\beta} - i_{err}}{T_s} + \psi_{s\beta}(k-1) \frac{i_{s\alpha} - i_{err}}{T_s} \end{aligned} \quad (7)$$

$$T_e = n_p L_m (i_{s\beta} \psi_{s\alpha} - i_{s\alpha} \psi_{s\beta}) \quad (1)$$

$$d\psi_s / dt = (u_s - R_s i_s) \psi_s / |\psi_s| \quad (2)$$

式中 T_e 为电磁转矩; L_m 为定转子互电感; n_p 为磁极对数; R_s 为定子电阻; ψ_s 为定子磁链矢量; u_s, i_s 分别为定子电压、电流矢量; $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ 分别为定子电流在静止 $\alpha-\beta$ 坐标系下的电流分量。

传统的 DTC,在逆变器的各个开关周期中,所选择的电压矢量一直作用于感应电机,磁链和转矩始终沿着一个方向变化。由于采用了“Bang-Bang”控制,当磁链值(转矩值)由小变大达到给定值时,电压矢量仍然继续作用,直到磁链值(转矩值)和磁链(转矩)额定值的误差达到磁链(转矩)容差,才终止电压矢量,因此产生了较大的磁链和转矩脉动。

2 预测 DTC 算法

对式(1)求导得:

$$\begin{aligned} \frac{dT_e}{dt} &= n_p (\psi_{s\alpha} \frac{di_{s\beta}}{dt} - \psi_{s\beta} \frac{di_{s\alpha}}{dt} + \\ &\quad i_{s\beta} \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} - i_{s\alpha} \frac{d\psi_{s\beta}}{dt}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$d\psi_s / dt = u_s - i_s R_s \quad (4)$$

将式(4)代入式(3),并整理得:

$$i_{s\beta} u_{s\alpha} - i_{s\alpha} u_{s\beta} = \frac{1}{n_p} \frac{dT_e}{dt} - \psi_{s\alpha} \frac{di_{s\beta}}{dt} + \psi_{s\beta} \frac{di_{s\alpha}}{dt} \quad (5)$$

在静止 $\alpha-\beta$ 坐标下,可将磁链、电压和电流写成分量的形式,即

$$u_s = u_{s\alpha} + j u_{s\beta}, \quad i_s = i_{s\alpha} + j i_{s\beta}, \quad \psi_s = \psi_{s\alpha} + j \psi_{s\beta} \quad (6)$$

设系统的采样周期为 T_s ,电磁转矩和定子磁链的实际值与给定值之间的误差分别为 T_{err} 和 ψ_{err} ,将式(2)(5)离散化并整理得式(7):

由方程(7)可解得:

$$\begin{aligned}
 u_{s\alpha}(k) &= [\xi_1 \psi_{s\beta}(k-1) + \xi_2 i_{s\alpha}(k-1)] / [i_{s\beta}(k-1) \psi_{s\beta}(k-1) + i_{s\alpha}(k-1) \psi_{s\alpha}(k-1)] \\
 u_{s\beta}(k) &= [\xi_2 i_{s\beta}(k-1) - \xi_1 \psi_{s\alpha}(k-1)] / [i_{s\beta}(k-1) \psi_{s\beta}(k-1) + i_{s\alpha}(k-1) \psi_{s\alpha}(k-1)] \\
 \xi_1 &= \frac{1}{n_p} \frac{T_{err}}{T_s} - \psi_{s\alpha}(k-1) \frac{i_{s\beta}(k-1) - err}{T_s} + \psi_{s\beta}(k-1) \frac{i_{s\alpha}(k-1) - err}{T_s}, \xi_2 = \frac{\psi_{err}}{T_s} | \psi_{s\alpha}(k-1) | + R_s [i_{s\alpha}(k-1) \psi_{s\alpha}(k-1) + i_{s\beta}(k-1) \psi_{s\beta}(k-1)]
 \end{aligned} \quad (8)$$

将获得的感应异步电动机的电压矢量作为逆变器输出电压矢量的参考值,再利用 SVPWM 技术进行矢量合成, SVPWM 可以将 6 个非零电压矢量和 2 个零电压矢量合成为任意大小和方向的电压矢量。由于篇幅原因,关于 SVPWM 合成请参考有关文献。

3 仿真

为了验证所提出的 DTC 预测算法的空间矢量脉宽调制方法的有效性,利用 Matlab 搭建仿真电路。系统仿真电路框图如图 1 所示。

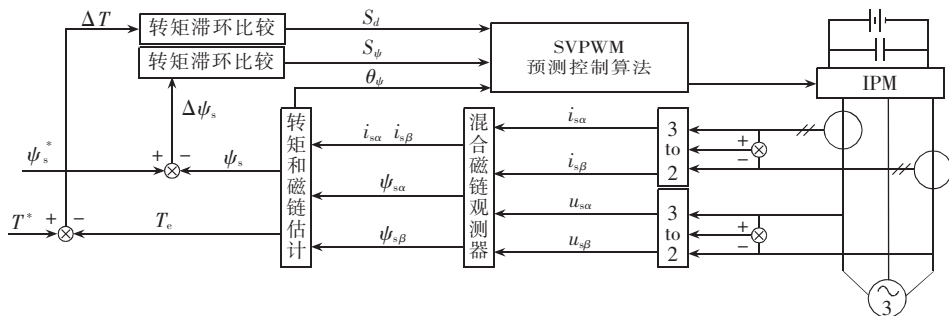


图 1 DTC 预测 SVPWM 控制算法系统图

Fig.1 The block diagram of DTC system with SVPWM forecast control algorithm

电机系统参数为:定子自感 $L_s = 666 \text{ mH}$, 转子自感为 $L_r = 671 \text{ mH}$, 定、转子互感为 $L_m = 651 \text{ mH}$, 定子电阻 $R_s = 4.25 \Omega$, 转子电阻 $R_r = 3.24 \Omega$, 额定定子磁链 $\psi_s = 0.95 \text{ Wb}$, 磁极对数 $n_p = 2$, 电机额定转速 $n_e = 1410 \text{ r/min}$ 。

为了比较所得结果,将传统 DTC 控制和 DTC 预测的 SVPWM 控制进行波形比较,如图 2~5 所示。

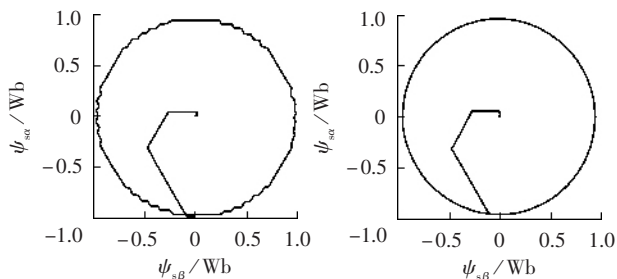


图 2 传统的 DTC 定子磁链波形

图 3 SVPWM 预测 定子磁链波形

Fig.2 The stator magnetic flux linkage waveform by traditional DTC

Fig.3 The stator magnetic flux linkage waveform by SVPWM forecast

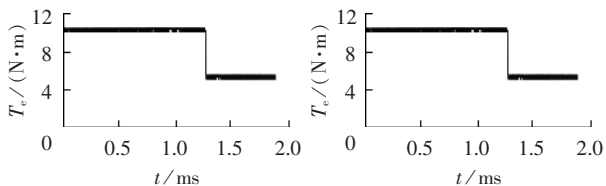


图 4 传统的 DTC 转矩波形
Fig.4 The torque waveform by traditional DTC

图 5 SVPWM 预测转矩波形
Fig.5 The torque waveform by SVPWM forecast

从图 2 和图 3 磁链波形以及图 4 和图 5 转矩波形比较可得出,利用本算法可以得出脉动减小的近似为圆的定子磁链和脉动减小的转矩,仿真图充分

说明了所提出方法的有效性。

4 结论

本文所提出的控制具有如下的特点:

a. 改变了传统的控制策略,用磁链和转矩误差实时计算在下一采样周期将加的电压矢量,使磁链和转矩脉动能更准确控制;

b. 改变了传统的 DTC 控制主要考虑转矩误差的方法,对电动机的转矩和磁链误差一起综合考虑,使转矩和磁链综合性能得到提高;

c. 感应电动机脉动最小化方法在没有增加系统复杂性的情况下,使得电动机的磁链和转矩脉动最小,提高了系统的整体性能;

d. 实验仿真证明,系统具有较好的稳定性和动态响应,可以达到较高的控制精度。

参考文献:

- [1] ORTEGA R, BARABANOV N, ESCOBAR G. Direct torque control of induction motors; Stability analysis and performance improvement [J]. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 2001, 46(12): 1209 - 1222.
- [2] TAKAHASHI I, NOGUCHI T. Take a look back upon the past decade of direct torque control [J]. *IECON'97*, 1997, (2): 546 - 551.
- [3] ROMERAL L, ARIAS A, ALDABAS E, et al. Novel direct torque control (DTC) scheme with fuzzy adaptive torque-ripple reduction [J]. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2003, 50(3): 487 - 492.
- [4] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

徐进(1970-),男,江苏连云港人,讲师,博士研究生,

研究方向为电机及其控制,电力电子及其应用,DSP应用等(E-mail:xujin@pk.njau.edu.cn)。

DTC with torque-pulsation reduction based on SVPWM

XU Jin^{1,2}, ZHANG Xue²

- (1. Southeast University, Nanjing 210096, China;
2. Nanjing Agriculture University, Nanjing 210031, China)

Abstract: A new control method of induction motor is proposed to reduce the pulsation of motor torque and magnetic flux linkage, which is a great disadvantage existing in the DTC (Direct Torque Control) system. According to the deduction, the needed voltage vector is forecasted, which is modulated by SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation). The simulative results show that it effectively reduces the torque pulsation and magnetic flux linkage.

Key words: space vector pulse width modulation; direct torque control; torque pulsation; asynchronous motor