

基于 SVM-DTC 的交流伺服驱动器的研究与设计

邹杰 邓志良

(江苏科技大学电子信息学院, 镇江 212003)

摘要 介绍了基于永磁同步电机的交流伺服系统。针对直接转矩控制的脉动问题,进行了分析,提出了基于 SVM-DTC 的控制策略,该策略利用电子电压在定子磁链坐标系的分量控制电磁转矩和磁链,结合空间矢量调制控制逆变器开关,并基于 DSP2812 搭建了硬件实验平台,通过 MatLab 仿真和实验波形表明,SVM-DTC 的控制策略可以有效减小转矩、磁链脉动。

关键词 永磁同步电机 空间电压矢量 直接转矩 DSP

中图分类号 TM311.42; **文献标志码** A

伺服驱动系统(Servo system)简称伺服系统,它伴随着电的应用而发展起来,最早出现于21世纪初。近年来,伺服的发展由液压转向电气,在电气伺服中,交流伺服代替直流伺服已成必然。交流伺服中,永磁同步电机(PMSM)又以结构简单、气隙磁密高、功率密度大等优点成为近年来的研究热点。

基于PMSM的交流伺服的控制方式有V/F控制、矢量控制、直接转矩控制等。直接转矩控制是继矢量控制后又一高效控制策略,得到了广泛关注。直接转矩控制通过在定子坐标系下计算电磁转矩和磁链,通过两者的滞环比较,以开关表的方式对逆变器进行最佳控制^[1]。与矢量控制相比,直接转矩控制具有控制方式简单、转矩响应迅速、便于实行全数字化的优点,目前,直接转矩控制已应用于永磁同步电机交流伺服系统中^[2]。

直接转矩控制建立在滞环比较的控制方式,使其转矩、磁链脉动大。近年来,许多专家、学者提出了一些优化措施。文献[3]提出了细分电压矢量的方式,来优化开关表,以达到减小脉动,但矢量越多,控制就越复杂。文献[4]提出了一种基于离散空间电压矢量的控制方式,利用电压所在扇区的两

个相邻非零电压和一个零电压矢量各作用1/3采样周期,来减小转矩、磁链脉动。文献[5]则把滑模变结构引入直接转矩控制中,替代原来的滞环比较以减小脉动。

本文通过研究DTC中转矩、磁链脉动原因,提出了一种基于空间电压矢量(SVPWM)的控制策略,并搭建了基于DSP2812的全数字化试验平台^[6]。仿真和实验结果都表明,这种控制策略能有效减小转矩、磁链脉动。

1 永磁同步电动机 DTC 分析

在永磁同步电动机的DTC中,转矩和磁链是两个关键的控制量。下面就磁链和转矩做一些分析。

1.1 磁链

在DTC中,定子电压与定子磁链关系如表达式(1)所示。

$$u_s = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} \quad (1)$$

式(1)中: u_s 、 i_s 、 R_s 、 ψ_s 分别为定子电压、电流、电阻、磁链。

将式(1)忽略定子电阻压降并离散化后可写成:

$$\psi_{s,k+1} = \psi_{s,k} + u_{s,k} T_s \quad (2)$$

式(2)中 T_s 为一个采样周期,在一个采样周期内磁链的变化值为

$$\Delta\psi_s = |\psi_{s,k+1}| - |\psi_{s,k}| \approx |u_{s,k} T_s| \quad (3)$$

式(3)表明,磁链的变化与采样周期和电压矢量幅值存在正比关系,通过控制采样周期和作用的空间电压矢量即可调节磁链的变化。

1.2 转矩

永磁同步电动机转矩的表达式为

$$T = \frac{3n_p |\psi_s|}{4L_d L_q} [2\psi_f L_q \sin\delta - |\psi_s| (L_q - L_d) \sin 2\delta] \quad (4)$$

式(4)中: n_p 为极对数, L_d 、 L_q 为电感的 d 、 q 轴分量, ψ_f 为永磁体磁链, δ 为定、转子磁链夹角(负载角)。

令 $L_d = L_q$, 并对式(4)求微分,得:

$$\frac{dT}{d\delta} = \frac{3n_p |\psi_s|}{2L_d L_q} (\psi_f L_q \cos\delta) \quad (5)$$

当转矩变化很小时,有

$$\Delta T = \frac{3n_p |\psi_s|}{2L_d L_q} (\psi_f L_q \cos\delta) \Delta\delta \quad (6)$$

在动态情况下, $\Delta\delta$ 的变化范围很小,可以近似为:

$$\Delta\delta \approx \arcsin\left(\frac{\Delta\psi_s}{|\psi_s|}\right) \simeq \left(\frac{\Delta\psi_s}{|\psi_s|}\right) \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)并结合式(3)可得:

$$\Delta T = \frac{3n_p |u_{s,k} T_s|}{2L_d L_q} (\psi_f L_q \cos\delta) \quad (8)$$

式(8)说明,转矩的变化也和采样周期以及周期内的空间电压矢量有关,控制这两个物理量变可以控制转矩的变化。

从上述分析中可以看出,磁链和转矩的变化都与采样周期以及周期内作用的电压矢量有关,若要减小 DTC 中磁链有转矩的脉动,一方面可以减小采样周期,另一方面即选择更为合适的空间电压矢量,这可以通过空间矢量调制的方法来实现。

2 空间矢量调制(SVPWM)

2.1 基于 DTC 的空间电压矢量计算

$$\Delta\theta = \Delta\delta + \omega_s T_s \quad (9)$$

$T_e = \frac{3p_n}{2L_d} |\psi_s| \psi_f \sin\delta$, 从此式中可以看出 T_e 与 $\sin\delta$ 成

正比,可以用一个 PI 调节器,将实际转矩与观测转矩的差值进行 PI 调节得到 δ , 即得到 $\Delta\theta$ 。由此已知的量有 $\psi_s(k)$ 、 $|\psi_s^*|$ 、 $\Delta\theta$ 。将 $\psi_s(k+1)$ 分解成 α - β 坐标系下,即:

$$\begin{cases} \psi_{\alpha}(k+1) = |\psi_s^*| \cos(\theta + \Delta\theta) \\ \psi_{\beta}(k+1) = |\psi_s^*| \sin(\theta + \Delta\theta) \end{cases} \quad (10)$$

定义 $\psi_s(k+1) - \psi_s(k) = \psi_{ref}$

$$\begin{cases} \psi_{\alpha ref} = \psi_{\alpha}(k+1) - \psi_{\alpha}(k) = |\psi_s^*| \cos(\theta + \Delta\theta) - \psi_{\alpha}(k) \\ \psi_{\beta ref} = \psi_{\beta}(k+1) - \psi_{\beta}(k) = |\psi_s^*| \sin(\theta + \Delta\theta) - \psi_{\beta}(k) \end{cases} \quad (11)$$

为了补偿这个 ψ_{ref} , 需要产生一个等效的 u_{ref} 。

根据定子磁链观测模型可知:

$$\psi_s(t) = \int (u_s(t) - i_s(t) R_s) dt \quad (12)$$

忽略定子电阻并离散化后得:

$$\Delta\psi_s(k+1) = \psi_s(k+1) - \psi_s(k) = \psi_{ref} = u_s(k)。$$

T_s , T_s 为 PWM 采样周期。

将 $\Delta\psi_s(k+1)$ 在 α - β 坐标系下分解,得:

$$\begin{cases} \psi_{\alpha ref} = u_{\alpha}(k) T_s \\ \psi_{\beta ref} = u_{\beta}(k) T_s \end{cases} \quad (13)$$

即:

$$\begin{cases} u_{\alpha ref} = \frac{\psi_{\alpha ref}}{T_s} \\ u_{\beta ref} = \frac{\psi_{\beta ref}}{T_s} \end{cases} \quad (14)$$

基于 DTC 的 SVPWM 理论框图如图 1 所示。

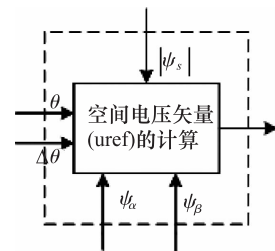


图 1 DTV-SVM 空间电压矢量计算框图

3 仿真分析和实验研究

3.1 MatLab 仿真

模型参数: $R_s = 3 \Omega$, $L_d = L_q = 0.02682$, $\psi_f =$

0.175 Wb, $J=0.008$, $B=0$, $p=2$, 速度环: $k_p=10$, $k_i=0.1$; θ 角: $k_p=5$, $k_i=0.5$, 速度给定 1 000 r/s, 磁链幅值 0.8 Wb。负载在 0.03 s 时从 0 突变为 1。图 2—图 4 为仿真曲线。

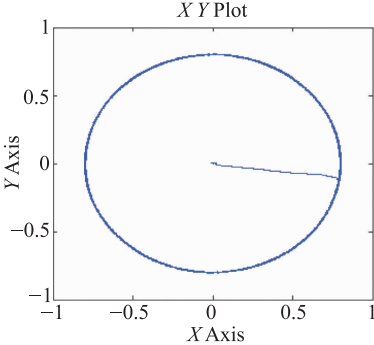


图 2 定子磁链圆

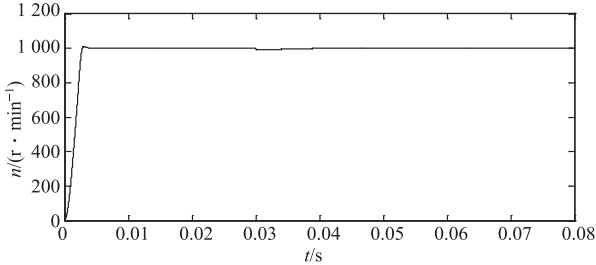


图 3 转速响应曲线

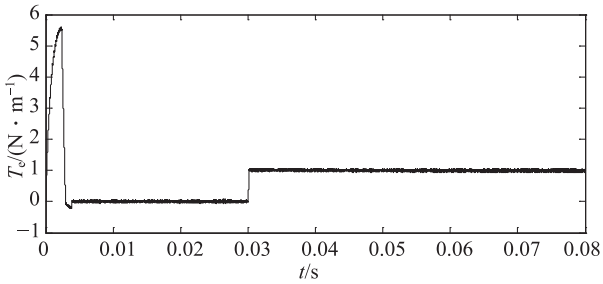


图 4 转矩响应曲线

图 3、图 4 表明基于 SVPWM 的 PMSM DTC 控制方式,在转矩变化时,速度响应时间为 0.003 s,达到了很好的跟踪效果,通过图 1、图 3 的放大效果图可以看出,转矩脉动为 0.05 N · M,磁链脉动为 0.005 Wb,可以说 SVM-DTC 在一定程度上减小了转矩和磁链的脉动,并且拥有直接转矩控制的快速启动响应能力,仿真效果达到了预期的效果。

3.2 实验结果

本实验平台基于 DSP2812 的全数字化实验平台,由仿真器、控制板、功率驱动板、光电编码器及永磁同步电机组成。控制板包括: DSP2812 为核心最小系统,编码器差分信号接收电路, ADC 调理电

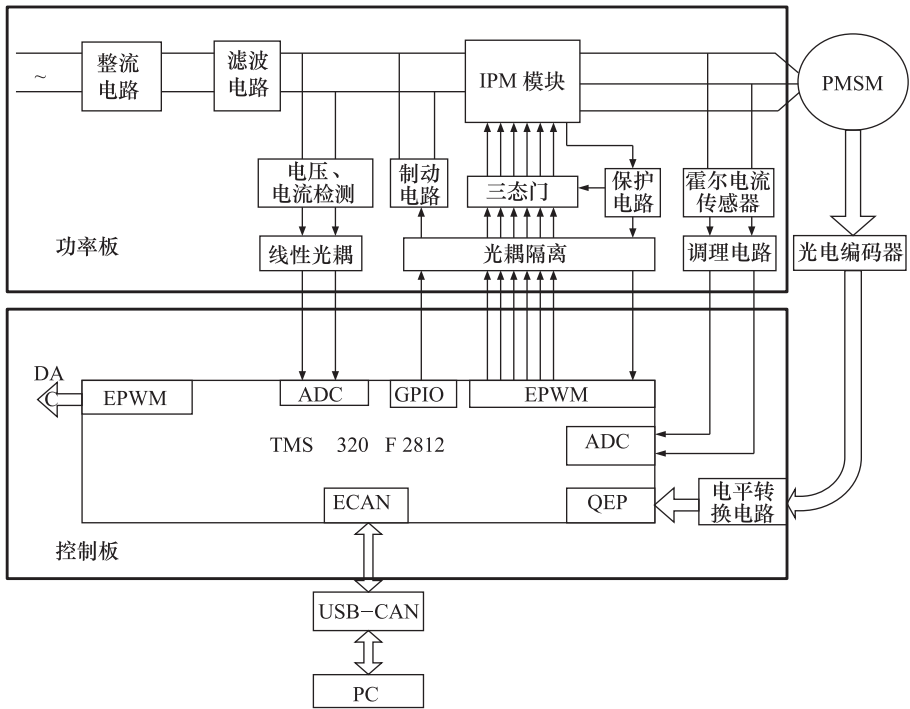


图 5 硬件原理框图

路,电压转换电路;功率驱动板包括:两相定子电流采集电路,直流母线电压采集电路,保护电路,光耦隔离电路等。具体参考图 5 所示。

3.2.1 SVPWM 波形

这里选择 PWM 的载波频率为 12.5 kHz,死区时间为 1.5 μs 。图 6 为扇区 1 中 PWM3 与 PWM5 的波形。图 7 为 T_a 、 T_b 的波形,在程序中把 EPWM7、EPWM9、EPWM11 脚配置成 DA 输出, T_a 、 T_b 经过低通滤波器输出马鞍波形。

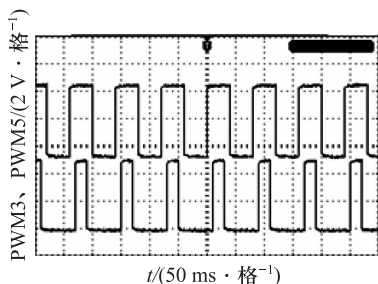


图 6 扇区 3 中 PWM3 与 PWM5 波形

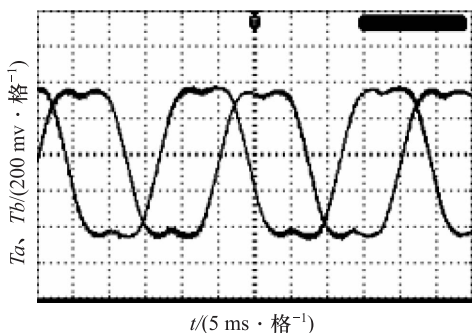


图 7 T_a 、 T_b 波形

3.2.2 定子电流波形

霍尔传感器检测到的相电流输入到 ADC 中,经芯片处理后再通过 DAC 输出到示波器上,图 8 为 20 Hz 时 A 相的相电流

3.2.3 转速波形

图 9 为在给定转速阶跃信号下,转速从 0 r/min 到 1 500 r/min,转速响应时间为 200 ms,响应快速,能满足控制要求。

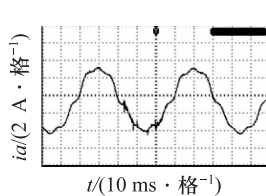


图 8 A 相的相电流波形

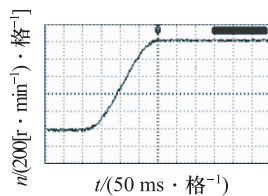


图 9 转速响应波形

4 结论

本文通过对 DTC 控制系统中转矩、磁链脉动的分析基础上,提出了基于 SVPWM 的 DTC 控制策略,通过 MatLab 仿真分析,验证了其理论可行性,并搭建了以 DSP2812 为基础的全数字化实验平台,进一步证明,SVPWM 在 DTC 控制系统中,可以有效的减小转矩和磁链的脉动,并有快速的响应和速度、位置跟踪性能,能达到很好的伺服控制效果。

参考文献

- 1 Jia Hongping, He Yikang. Variable structure sliding mode control for PMSM DTC. Transactions of China Electro-technical Society, 2006; 21(1): 1—6
- 2 Puppo A, Hinkkanen M, Luomi J. Sensorless control of PMSM drives using a combination of voltage model and HF signal injection. Conf Rec IEEE-IAS. Seattle, 2004: 964—970
- 3 Puppo A, Hinkkanen M, Luomi J. Sensorless control of PMSM drives using a combination of voltage model and HF signal injection. Conf Rec IEEE-IAS. Seattle, 2004: 964—970
- 4 史光辉, 卜文绍, 张亮. 基于 DSVM 的直接转矩控制系统转矩脉动减小研究. 微特电机, 2009; (10): 53—55
- 5 逯国亮, 李文新, 王彦斌. 基于模糊滑膜控制的容错系统伺服驱动器设计. 电测与仪表, 2009; (11): 77—80
- 6 李长诗, 王素梅. 基于 DSP 控制的 IPM 数字化电机伺服驱动系统设计. 微电机, 2010; (4): 42—44, 63

(下转第 6620 页)

Design of Microwave Interdigital Bandpass Filter

LUO Zhi-xian, ZHANG Huai-wu

(School of Microelectronics and Solid-State Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, P. R. China)

[**Abstract**] A interdigital bandpass filter from 1 GHz to 1.41 GHz and another one from 1.41 GHz to 2 GHz are designed. They were from lumped low-pass structure transformation to interdigital microstrip line structure by classical design method, so as to solve the problems that complex structure, narrow bandwidth and huge insertion loss of lumped structure filter in high frequency. Based on ADS and VNA, the filters are simulated and optimized and the response of S21 had been measured. Final results show that achieve index requirements.

[**Key words**] bandpass interdigital ADS VNA

(上接第 6612 页)

Safety Design for the Throw Device in Fuse Experiment

GAO Zhen-zhou, CHEN Ling, JIN Chang-gen, CUI Yun-hang

(Wuhan Ordnance Top Sergeant School, Wuhan 430075, P. R. China)

[**Abstract**] In fuse experiment, the fuse sample is very dangerous especially when the sample is thrown, because its safety device has been removed artificially. So, the automatic long range throw device is developed using the automatic long range control system. It can reduce the hidden danger when manually throwing the sample, and raise the safety of the fuse experiment.

[**Key words**] fuse experiment throw device safety

(上接第 6616 页)

Research and Design of AC Servo Driver Based on SVM-DTC

ZOU Jie, DENG Zhi-liang

(School of Electronics and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhengjiang 212003, P. R. China)

[**Abstract**] This essay introduces the AC servo system of the PMSM, and put forward a new control strategy based on SVM-DTC, aiming at the torque pulsation of the direct torque control(DTC). This strategy uses component of electron voltage in the stator flux linkage coordinate to control electromagnetic torque and flux linkage, integrating SVPWM to control the switch of inverter. Besides, hardware platform is built using DSP2812. According to the simulation of MatLab and the wave form of the test, SVM-DTC can reduce the fluctuation of torque and flux linkage effectively.

[**Key words**] PMSM SVPWM DTC DSP