

# 基于双 DSP 的五相异步电机直接转矩控制

张成胜, 张晓锋, 宋庆国, 于飞  
(海军工程大学, 湖北 武汉 430033)

**摘要:**分析了五相逆变器的空间电压矢量,在此基础上提出了采用多级滞环控制器优化开关表的五相异步电机直接转矩控制方案。针对该系统的复杂性及其对控制电路高实时性需求,采用由 TMS320LF2407A 定点 DSP 和 TMS320VC33 浮点 DSP 组成的双 DSP 控制系统,保证了控制精度和响应快速性。实验结果验证了该系统具有较好的控制性能。

**关键词:**逆变器; 转矩控制; 矢量 / 数字信号处理器

**中图分类号:** TM343, TM921.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-100X(2008)04-0054-02

## Direct Torque Control of Five-phase Asynchronous Motor based on Dual-DSPs

ZHANG Cheng-sheng, ZHANG Xiao-feng, SONG Qing-guo, YU Fei  
(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:**Space vectors of five-phase inverter are analyzed and an optimized switch table method in asynchronous motor direct torque control system is proposed, which is based on multi-hysteresis-loop controller. As this system is complicity and demands real-time, it adopts dual-DSPs made up of TMS320LF2407A and TMS320VC33. At last, the experiment results confirm that the system possesses better performance.

**Keywords:** inverter; torque control; vector / digital signal processor

**Foundation Project:** Supported by National Natural Science Foundation of China (No.50421703)

### 1 引言

与三相变频调速系统相比,多相系统除了增加转矩脉动频率,降低转矩脉动幅值之外,还因总输出电流的增加而提高了整个变频调速系统的输出功率,降低了对变频器中功率器件容量的要求。此外,冗余性能好也是多相系统的一个特点,当多相中的一相或几相发生故障时,通过适当的控制,电机仍能降功率运行。五相异步电机调速系统是多相系统中最为典型的代表之一<sup>[1]</sup>。异步电机直接转矩控制(DTC)以其控制简单,动态响应快,无需坐标变换和电流调节环节等优点而日益受到重视<sup>[2-3]</sup>。将传统三相 DTC 应用到五相系统,由于空间电压矢量的增加,可以通过增加转矩和磁链滞环比较器的级数来优化开关表,从而改善调速系统运行性能。由此,对控制器的性能提出了很高的需求。现采用由定点和浮点两块 DSP 芯片组成的控制电路,充分利用定点 DSP 控制能力强和浮点 DSP 运算能力强的特点,实现了基于优化开关表的五相异步电机 DTC。

### 2 五相逆变器的空间电压矢量

图 1 示出五相异步电机调速系统主电路。由三

相不控整流电路、中间直流环节、五相两电平逆变器以及五相异步电机组成。

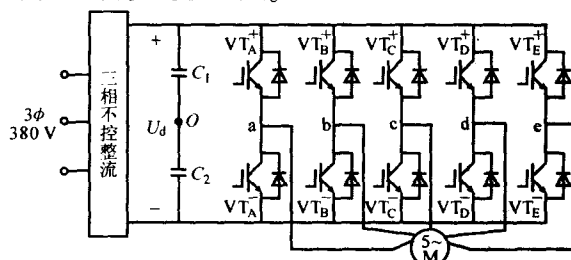


图 1 五相异步电机调速系统主电路

定义五相逆变器的空间电压矢量为:

$$U_i = \frac{2}{5} U_d (S_a + S_b e^{j\frac{2\pi}{5}} + S_c e^{j\frac{4\pi}{5}} + S_d e^{j\frac{6\pi}{5}} + S_e e^{j\frac{8\pi}{5}}) \quad (1)$$

式中:  $S_k$  为开关函数,  $k=a, b, c, d, e$ 。

当第  $k$  个桥臂的上管导通,下管关断时,  $S_k=1$ , 输出相电压为  $U_d/2$ ; 反之,  $S_k=0$ , 输出相电压为  $-U_d/2$ 。

由式(1)的计算可知,五相逆变器一共有 32 个电压矢量,这些矢量分成 4 组,其中大、中、小矢量各 10 个,形成 3 个边长不同的正十边形,以及零矢量两个。由于小矢量作用于电机时,导致定子磁链互相抵消,因此要避免使用,所以五相逆变器的有效工作电压矢量有大、中矢量各 10 个和零矢量两个,其分布见图 2。与三相逆变器的 8 个工作电压矢量相比,五相逆变器的工作电压矢量增加到 22 个,因此可以对电机转矩和磁链进行更加细致的调节,有利于减小转矩和磁链的脉动,提高系统运行性能。

**基金项目:**国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金资助项目(50421703)

**定稿日期:** 2008-01-14

**作者简介:**张成胜(1978-),男,安徽桐城人,博士研究生。研究方向为船舶多相电力推进技术。

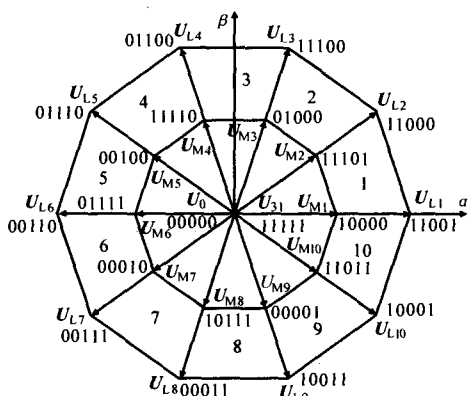


图2 五相逆变器有效工作电压矢量空间分布

### 3 基于优化开关表的 TDC

根据异步电机的数学模型<sup>[4]</sup>可得:

$$\psi_s = \int (u_s - r_s i_s) dt \approx \int u_s dt \quad (2)$$

$$\frac{d\psi_r}{dt} + \left( \frac{1}{\sigma\tau_r} - j\omega_r \right) \psi_r = \frac{L_m}{\sigma\tau_r L_s} \psi_s \quad (3)$$

$$T_e = n_p \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} |\psi_s| |\psi_r| \sin\theta \quad (4)$$

式中:  $\sigma = 1 - L_m^2 / L_s L_r$ ;  $\tau_r = L_r / r_r$

由式(2)~式(4)可知,定子磁链随着作用于定子的电压矢量变化而迅速旋转变换,但转子磁链因一阶惯性而保持平均转速,从而得到磁通角  $\theta$  的迅速变化,所以在保证定子磁链幅值恒定的情况下,通过改变作用于定子的电压矢量,即改变了电机的输出转矩。

图3示出五相异步电机 DTC 系统结构框图。图中:给定转速与反馈转速的误差经 PI 调节得到转矩给定值,再将转矩、磁链的给定值与观测值的误差分别送到各自的滞环比较器,最后根据转矩、磁链的滞环比较结果以及磁链所在的位置利用开关表的形式来确定每个控制周期内所需的电压矢量。

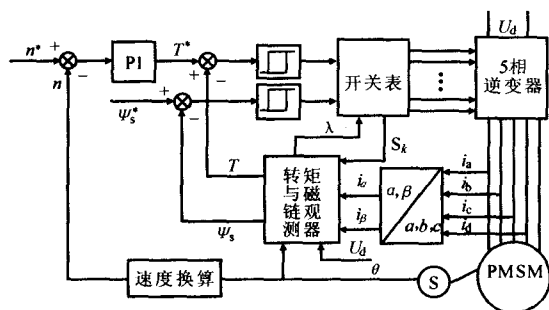


图3 五相异步电机直接转矩控制框图

由于五相逆变器的电压矢量增加,可通过增加滞环比较器的级数来优化开关表,从而改善控制系统的性能。该系统中,磁链调节采用3级滞环控制,转矩调节采样7级滞环控制。

### 4 系统控制电路设计

控制电路主要由图4所示的双 DSP 板、A/D 采样板、脉冲输出板等3块控制板构成。

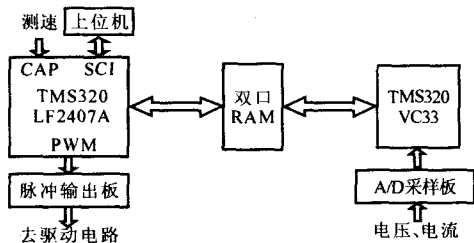


图4 控制电路框图

(1)双 DSP 板 它是控制电路的核心,是根据上位机的控制指令和电机电压、电流及速度的反馈,实时计算并发出开关器件的 PWM 脉冲,经脉冲输出板送到驱动电路,控制逆变器驱动五相异步电机。该 DSP 板由 TMS320LF2407A 定点 DSP 和 TMS320VC33 浮点 DSP 组成。定点 DSP 完成测量电机转速、与上位机的串口通讯以及输出 PWM 脉冲;浮点 DSP 控制 A/D 板采样电机的电压、电流,并根据 DTC 算法实时快速计算 PWM 脉冲。两者通过双口 RAM 交换数据。系统的控制周期仅为 20  $\mu$ s,能很好地保证控制精度和响应快速性。

(2)A/D 采样板 它的功能是将逆变器输入、输出的电压、电流等模拟信号高速转换成高精度数字量,并将信号传输给双 DSP 板。该 A/D 板可对 8 路模拟量进行 A/D 转换,每 4 路可同时进行转换,4 路的转换时间共计不超过 3.6  $\mu$ s。

(3)脉冲输出板 它是控制单元的最后环节,实现 PWM 电平信号到光信号的转换,通过光纤将开关器件的 PWM 信号送给驱动电路,当逆变器发生过压、过流等故障时,该控制板能及时封锁 PWM 脉冲,保护功率元件。

### 5 实验结果

实验系统由采用 IGCT 的五相两电平变频器(含控制电路部分)、五相异步电机、直流发电机和负载电阻柜组成。五相异步电机主要参数:额定功率为 15kW,额定相电压为 140V,额定相电流为 25A,额定转速为 600 r/min,极对数为 2。图5示出实验结果。

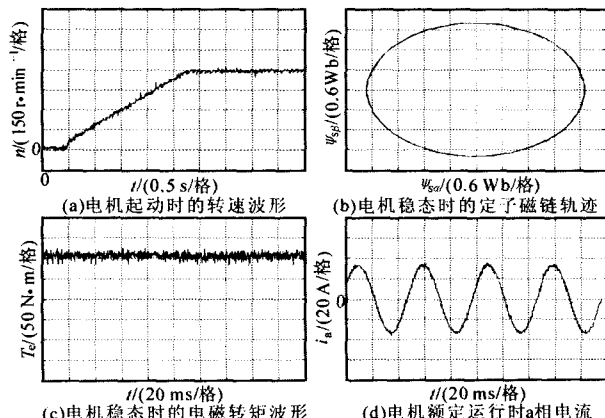


图5 实验波形

图5a为电机起动时转速  $n$  波形,(下转第73页)

### 3 实验结果

现以兆瓦级大功率风力发电并网系统为背景,在实验室进行小功率模拟实验。实验采用 DSP 芯片 TMS320LF2407 作为系统的控制核心<sup>[5]</sup>。由于大功率开关器件的开关频率相对较低,故实验中设定的开关频率为 2.5 kHz,以此来模拟真实的运行条件。图 3 给出实验波形。

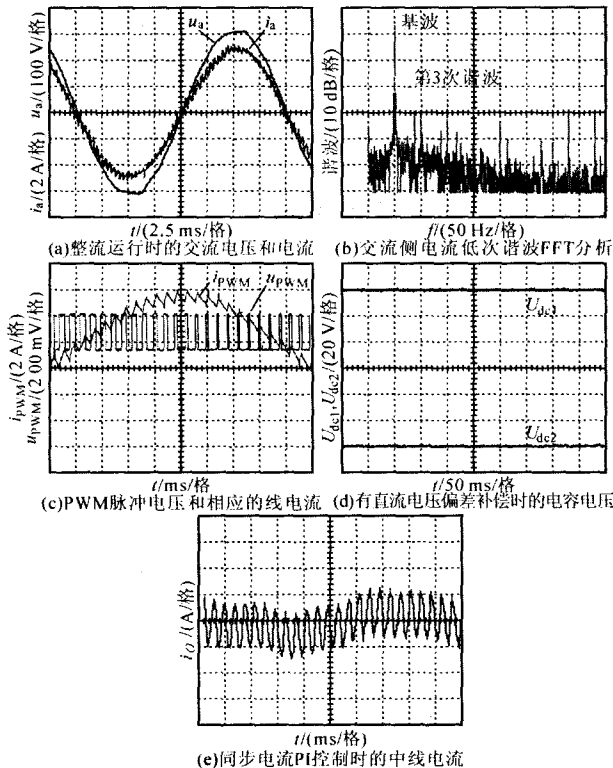


图 3 实验波形

图 3a 为 PWM 变流器在整流运行时交流侧的电压  $u_a$  和电流  $i_a$  波形。可见,功率因数接近 1,并且因存在电压前馈修正,所以尽管有一定的交流电压畸变,但电流波形仍保持较好的正弦度。对交流侧电流进行 FFT 分析,如图 3b 所示。可见,其主要的低次谐波含量为 3,5,7 次谐波,最大低次谐波为 3 次谐波,含量约为 1.31%,所以应用前述电流控制策略可显著减小低次谐波含量。图 3c 为 PWM 脉冲电压

$u_{PWM}$  和相应的线电流  $i_{PWM}$  波形。可见,与不接中线时的波形不同,在一个开关周期内电流只有一次波动,这表明线电流谐波只受这一相开关函数的影响<sup>[5]</sup>,这也符合前述理论推导的结果。无直流电压偏差补偿环节时,分裂电容  $C_1$  的正极对地电压  $U_{dc1}$  与分裂电容  $C_2$  的负极对地电压  $U_{dc2}$  间有一定的电压差。图 3d 给出加上补偿环节后,经过偏差补偿 PI 调节,上下两个分裂电容上的电压基本保持相等,这可保证稳定输出 O 轴电流 PI 调节的给定信号  $i_o^*$ 。图 3e 给出经过同步电流 PI 调节后的中线电流  $i_o$  波形。可见,其叠加有 3 次低频和开关频率大小的高频分量。经测算知,中线电流的低频谐波分量是交流侧电流低频谐波分量的 3 倍,这是因为三相支路的电流都流经中线而造成的。

### 4 结论

首先对分裂电容式三相电压型 PWM 整流器进行了数学建模,并根据该应用矢量控制原理分别设计了电压外环和电流内环的控制策略,在现有实验条件下对该控制策略进行了实验验证。结果表明,适当调整电流内环  $K_p$  和  $K_i$  参数,能有效减小低次谐波的含量;调整电压外环  $K_p$  和  $K_i$  参数,能较好补偿分裂电容电压偏差,并获得较理想的控制性能。

### 参考文献

- [1] 张崇巍,张兴编 PWM 整流器及其控制[M].北京:机械工业出版社,2003
- [2] S H Song, S Kang, N K Hahm. Implementation and Control of Grid Connected AC-DC-AC Power Converter for Variable Speed wind Energy Conversion System[A]. Proc. IEEE APEC'03[C]. [S.l.]: [s.n.], 2003, (1): 154-158.
- [3] 张昌盛,段善旭,康勇.基于电流内环的一种逆变器控制策略研究[J].电力电子技术,2005,39(3): 14-16.
- [4] 张纯江,王英,赵清林.基于 DSP 的三相电压型 PWM 整流器控制系统设计[J].电力电子技术,2002,36(6): 45-47.
- [5] 张兴华.基于 DSP 和 IPM 的感应电机直接矢量控制系统[J].电力电子技术,2003,37(5): 44-46.

(上接第 55 页)其起动时间大约为 2.3 s。图 5b, c 分别为电机稳态运行时定子磁链轨迹  $\psi_{\alpha}, \psi_{\beta}$  和电磁转矩  $T_e$  波形。图 5d 示出额定工况下逆变器 a 相的输出电流  $i_a$  波形。

### 6 结论

设计了基于双 DSP 的五相异步电机直接转矩控制系统。实验结果表明,采用多级滞环控制器对系统动、稳态性能有很大改善,双 DSP 控制电路保证了控制精度和高实时性。

### 参考文献

- [1] Toliyat H A. Analysis and Simulation of Five-phase Variable Speed Induction Motor Drives Under Asymmetrical Connections[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 1998, 7(4): 748-756.
- [2] Isao Takahashi. High-performance Direct Torque Control of an Induction Motor[J]. IEEE Trans. on IA, 1989, 25(20): 257-264.
- [3] 谢顺依,胡达平.多层滞环比较器的异步电机直接转矩控制研究[J].电力电子技术,2005,39(1): 98-100.
- [4] 李夙.异步电动机直接转矩控制[M].北京:机械工业出版社,1999.