

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.08.020

# 永磁同步电机无差拍直接转矩控制系统研究\*

陈 殷, 孙 丹\*, 林 斌

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 针对传统永磁同步电机(PMSM)直接转矩控制(DTC)中存在的磁链、转矩脉动大、开关频率不固定等问题,提出了一种永磁同步电机的无差拍直接转矩控制(DB-DTC)方法,在离散化电机方程基础上利用无差拍控制原理计算出电压矢量,并结合了空间矢量调制技术(SVM)产生开关信号控制电机运行。同时针对离散系统运算耗时所带来的控制周期的误差,进一步基于永磁体同步电机数学模型,提出了一种电流观测器以预测下一控制周期的电流值,目的是准确估计定子磁链和转矩。研究表明,所提出的PMSM DB-DTC不仅继承了传统DTC动态响应快的优点,而且能极大程度地削弱定子磁链和转矩的脉动,该系统具有良好的动静态性能,电流观测器能预测定子电流,确保了PMSM DB-DTC系统的控制精度。

**关键词:** 永磁同步电机; 无差拍; 直接转矩控制; 电流观测器

**中图分类号:** TH39; TM301.2 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-4551(2014)08-1053-05

## System of dead-beat direct torque control of permanent magnet synchronous motor

CHEN Yin, SUN Dan, LIN Bin

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** In order to solve the problems existed in the traditional direct torque control(DTC), such as high flux and torque ripples and unfixed switching frequency, a dead-beat direct torque control(DB-DTC) was proposed to control the permanent magnet synchronous motor(PMSM). The DB-DTC scheme used the discretization equation of PMSM and the principle of dead-beat control to calculate the voltage vector, then SVM technique was combined to generate switching signals. Moreover, in order to eliminate the control period error brought by the time-consuming of discrete system calculation, a current observer was introduced to predict the current value in the next period, so as to precisely evaluate the stator flux and torque. The experimental results confirmed the effectiveness of the scheme proposed. The DB-DTC system has good dynamic and static performance, and the current observer can predict the stator current to ensure the control precision.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor(PMSM); dead-beat; direct torque control(DTC); current observer

## 0 引 言

永磁同步电机(PMSM)直接转矩控制(DTC)策略由于对转矩和磁链进行直接控制,其结构简单、动态响应快,鲁棒性强,自提出以来便受到了极大关注<sup>[1-2]</sup>。但常规DTC存在电机转矩、磁链脉动过大、开关频率

不固定和高频噪声等问题,因此已有较多的改进研究。文献[3]通过选择最优的转矩和磁链滞环带宽以减小电流谐波,文献[4]采用模型预测的方法优化开关矢量的选择,文献[5]采用多分区的方式改变电压矢量的选择,这些优化方法能一定程度上削弱传统DTC的转矩和磁链脉动,但开关频率依然不恒定,电磁转矩和定子磁链仍存在明显脉动。文献[6-11]将

收稿日期: 2014-03-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51377141); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2011AA11A101)

作者简介: 陈 殷(1988-),男,湖北武汉人,主要从事永磁同步电机高性能控制方面的研究。E-mail:cy\_cy2011@163.com

通信联系人: 孙 丹,女,博士,副教授,硕士生导师。E-mail:sundan@zju.edu.cn

脉宽调制技术用于对转矩直接控制中,固定了开关频率,解决了转矩和磁链脉动问题,但转矩和磁链控制中的PI控制器需选取合适的参数,否则会影响控制系统的动、静态性能。

无差拍控制利用系统的离散状态方程<sup>[12]</sup>,在一个控制周期内以消除被控量的误差为目标,直接计算得到所需控制量,控制精确。然而在离散化控制系统中,采样数据的处理及运算需要一定时间,无法保证最后所得指令在当前控制周期施加在系统中,导致系统时间上存在一个控制周期的误差,造成系统的振荡甚至不稳定。

本研究针对PMSM DTC,结合无差拍控制理论,提出一种无差拍直接转矩控制(DB-DTC)策略,利用PMSM离散状态方程,以电磁转矩和定子磁链幅值零误差为控制目标,直接计算出应施加在定子端的电压矢量,最后经SVM策略得到开关信号,实现电机的有效控制。其中,转矩和磁链控制环节无需PI调节器,结构简单,开关频率恒定。同时为消除DB-DTC离散控制系统中存在的周期误差,本研究采用定子电流观测器,在当前周期预测下一周期的定子电流,用预测电流观测电机运行状态,并在当前周期通过无差拍控制算法计算出下一周期应施加在定子端的电压矢量,在下一控制周期开始时施加在定子端,以消除控制系统时间周期上的误差,实现系统实时、精确地控制。

## 1 PMSM DB-DTC

PMSM在 $d-q$ 转子同步旋转坐标系下的电机定子电压、电磁转矩和磁链方程可分别表示为:

$$\begin{cases} v_d = R_s i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_r \lambda_q \\ v_q = R_s i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_r \lambda_d \end{cases} \quad (1)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (2)$$

$$\begin{cases} \lambda_d = L_d i_d + \lambda_{pm} \\ \lambda_q = L_q i_q \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $v_d$ ,  $v_q$ ,  $i_d$ ,  $i_q$ ,  $\lambda_d$ ,  $\lambda_q$ — $d$ 、 $q$ 轴定子电压、电流和磁链;  $L_d$ ,  $L_q$ —电机 $d$ 、 $q$ 轴电感;  $R_s$ —定子电阻;  $T_e$ —电磁转矩;  $P$ —极对数;  $\lambda_{pm}$ —转子磁链幅值;  $\omega_r$ —转子电角速度。

将式(3)代入式(1)并进行整理和离散化可得:

$$\begin{cases} \lambda_d(k+1) = v_d(k)T_s + \lambda_d(k) + \omega_r T_s \lambda_q(k) - \frac{R_s}{L_d} \lambda_d(k)T_s + \frac{\lambda_{pm} R_s T_s}{L_d} \\ \lambda_q(k+1) = v_q(k)T_s + \lambda_q(k) - \omega_r T_s \lambda_d(k) - \frac{R_s}{L_q} \lambda_q(k)T_s \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $T_s$ —采样周期,  $(k)$ — $k$ 时刻的值。

对式(2)求导有:

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{3}{2} P (i_q \frac{d\lambda_d}{dt} + \lambda_d \frac{di_q}{dt} - i_d \frac{d\lambda_q}{dt} - \lambda_q \frac{di_d}{dt}) \quad (5)$$

将式(5)离散化后代入式(3,4)并推导整理可得:

$$v_q(k)T_s = M v_d(k)T_s + B \quad (6)$$

其中:

$$M = \frac{(L_q - L_d)\lambda_q(k)}{(L_q - L_d)\lambda_d(k) - L_q \lambda_{pm}},$$

$$B = -[\frac{L_d L_q}{(L_q - L_d)\lambda_d(k) - L_q \lambda_{pm}}] \times$$

$$\{\frac{2}{3P} \Delta T_e(k) - \frac{\omega_r T_s}{L_d L_q} [(L_q - L_d)(\lambda_d(k)^2 - \lambda_q(k)^2) - L_q \lambda_d(k)\lambda_{pm}] - \frac{R_s T_s \lambda_q(k)}{L_d^2 L_q^2} [(L_q^2 - L_d^2)(\lambda_d(k) - \lambda_{pm}) - L_q^2 \lambda_{pm}]\}。$$

$\Delta T_e(k) = T_e(k+1) - T_e(k)$ , 无差拍控制目标是在一个控制周期内消除控制量的误差,对电磁转矩进行无差拍控制,故令  $T_e(k+1) = T_e^*$ 。

在电压限制范围内,如忽略电阻项,由式(4)可以得到电机的定子磁链幅值:

$$\begin{aligned} \lambda_s(k+1)^2 &= \lambda_d(k+1)^2 + \lambda_q(k+1)^2 = \\ &[v_d(k)T_s + (\lambda_d(k) + \omega_r \lambda_q(k)T_s)]^2 + \\ &[v_q(k)T_s + (\lambda_q(k) - \omega_r \lambda_d(k)T_s)]^2 \end{aligned} \quad (7)$$

同电磁转矩一样,对定子磁链进行无差拍控制,即令  $\lambda_s(k+1) = \lambda_s^*$ 。联立式(6,7)可求得方程中的未知量得到电压矢量  $v_d(k)$ ,  $v_q(k)$ 。

## 2 电流观测器

DB-DTC的时间控制图如图1所示。在 $k$ 时刻,采样的定子电流用于观测电机运行状态,本研究根据电机的运行状态求出 $k$ 时刻应施加在定子端的电压矢量  $v_d(k)$ 、 $v_q(k)$ ,但由于控制周期的存在,  $v_d(k)$ 、 $v_q(k)$ 只能在第 $k+1$ 时刻施加在定子端,因此在离散DB-DTC系统在时间上存在一个周期的误差,这种时间上的误差会降低DB-DTC系统的控制性能,甚至使系统产生振荡而无法正常运行。

因此需要设计电流观测器,在 $k$ 时刻采样定子电流并预测 $k+1$ 时刻的电流值,进一步估计电机的运行状态,同时在 $k$ 时刻计算出 $k+1$ 时刻所需施加的定子电压矢量,并在 $k+1$ 时刻施加,从时间上消除误差,确保DB-DTC的控制精度。加入电流观测器后的时间控制如图1(b)所示。

根据PMSM在 $d-q$ 转子同步旋转坐标系下的状态方程(1),可建立连续状态下的开环电流观测器模型,连续时间下开环电流观测器模型如图2所示。

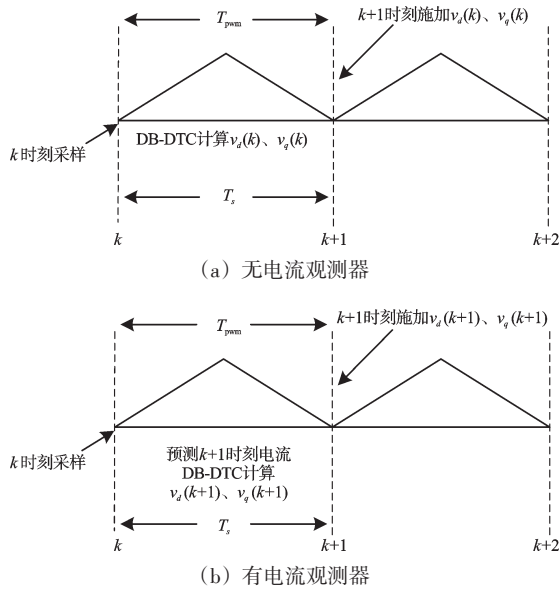


图1 DB-DTC的时间控制图

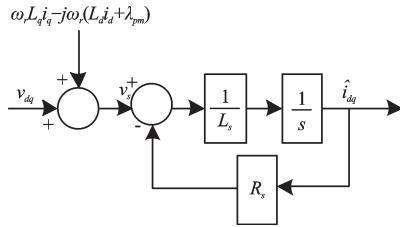


图2 连续时间下开环电流观测器模型

$v_{dq}$ ,  $i_{dq}$ — $d-q$  坐标系下的定子电压、电流向量;  $v_s$ —解耦后电压向量;  $L_s$ —轴电感,在直轴上  $L_s=L_d$ ,交轴上有  $L_s=L_q$ ;  $\sim$ —估测值

将开环电流观测器的连续模型离散化,并加入零阶保持器:

$$\frac{\hat{i}_{dq}(z)}{v_s(z)} = Z \left\{ \left( \frac{1-e^{-sT_s}}{s} \right) \left( \frac{1}{L_s s + R_s} \right) \right\} = \frac{1}{R_s} \frac{1-e^{-\frac{T_s}{\tau}}}{z-e^{-\frac{T_s}{\tau}}} \quad (8)$$

式中:  $Z\{\}$ —传递函数作  $Z$  变换;  $\tau$ —时间常数,  $\tau=L_s/R_s$ 。

为了提高定子电流观测器预测电流的精度,需构建闭环的电流观测器,即将  $k-1$  时刻预测值  $\hat{i}_{dq}(k)$  作为反馈,与  $k$  时刻的采样实际值  $i_{dq}(k)$  求差再做 PI 运算,其输出用以调整电流观测器在  $k$  时刻的预测电流  $\hat{i}_{dq}(k+1)$ ,闭环电流观测器的原理图如图3所示。

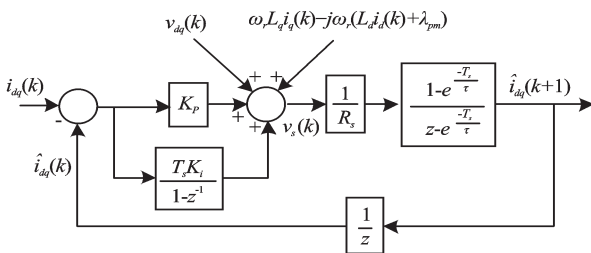


图3 离散时间下闭环电流观测器模型

闭环电流观测器的离散时间下电流误差:

$$\tilde{i}_{dq}(k) = i_{dq}(k) - \hat{i}_{dq}(k) \quad (9)$$

离散时间下电压计算方程:

$$v_s(k) = (K_p + T_s K_i) \tilde{i}_{dq}(k) - K_p \tilde{i}_{dq}(k-1) + v_{dq}(k) + \omega_r L_q i_q(k) - j\omega_r (L_d i_d(k) + \lambda_{pm}) \quad (10)$$

式(8)整理后,可得离散时间下的预测电流表达式:

$$\hat{i}_{dq}(k+1) = \frac{v_s(k)}{R_s} (1 - e^{-\frac{T_s}{\tau}}) + \hat{i}_{dq}(k) e^{-\frac{T_s}{\tau}} \quad (11)$$

$k$  时刻利用采样的定子电流  $i_{dq}(k)$  和电压  $v_{dq}(k)$  以及前一时刻 ( $k-1$  时刻) 的预测电流  $\hat{i}_{dq}(k)$ , 通过 PI 控制得出电压  $v_s(k)$ , 再由式(11)可计算出预测电流  $\hat{i}_{dq}(k+1)$ 。预测电流初始值  $\hat{i}_{dq}(0)=0$ , 根据采样电压、电流可求出下一周期预测电流。

### 3 PMSM DB-DTC 系统

PMSM DB-DTC 系统框图如图4所示。由编码器得到的转速  $\omega_r$  与给定转速  $\omega^*$  经 PI 调节器输出给定电磁转矩  $T_e^*$ , 磁链给定值  $\lambda_s^*$ 。采样电压与电流经过旋转变换以后输入到定子电流观测器以预测下一控制周期的电流, 预测电流用于电磁转矩的计算和磁链的估计。 $T_e^*$ ,  $\lambda_s^*$  与观测器得到的  $T_e(k+1)$ ,  $\lambda_d(k+1)$ ,  $\lambda_q(k+1)$  一起输入到 DB-DTC 模块, 计算得到应施加的电压矢量, 再经 SVM 得到开关信号, 控制 PMSM 的运行。

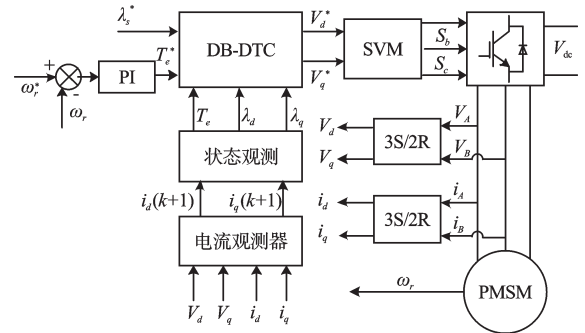


图4 PMSM DB-DTC 系统框图

### 4 实验验证

为了验证 PMSM DB-DTC 的控制性能, 本研究在如图5所示的实验平台基础上进行了详尽的实验研究, 同时给出了 PMSM 常规 DTC 的实验结果作为对比。实验系统中 DSP 采用 TI 公司 TMS320F28335, 交流电源由调压器提供, 经整流电路输出直流电压  $V_{dc}$  供以逆变器使用, 逆变器输出控制装有编码器的 PMSM, 直流电机作为负载和 PMSM 同轴相连。PMSM 参数如表1所示, 采样周期 10 kHz。实验结果如图6~8所示。

DTC 和 DB-DTC 的空载启动及变速运行实验结果

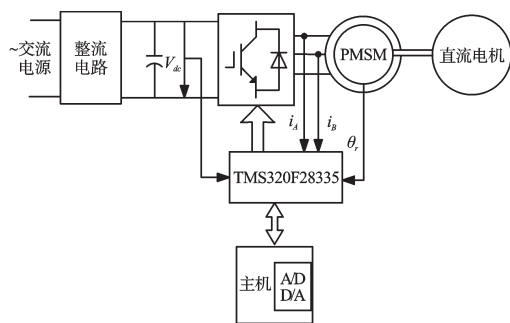
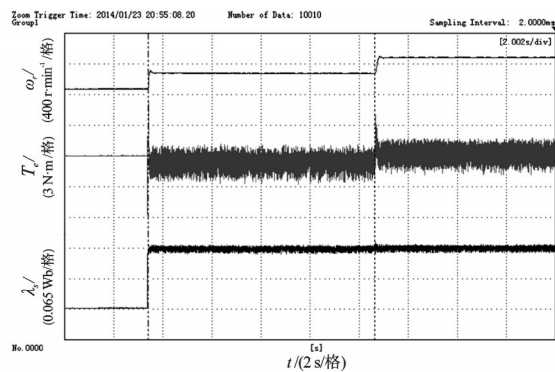


图5 PMSM实验平台框图

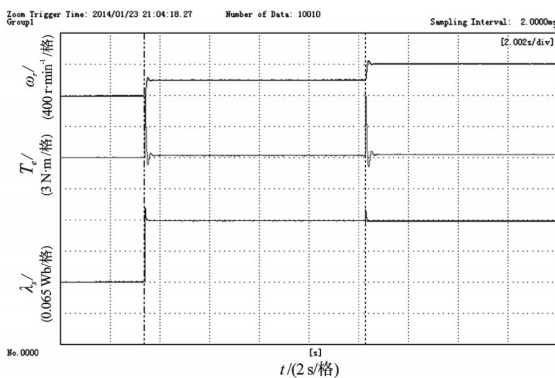
表1 PMSM参数

| 参数                          | 数值    | 参数       | 数值   |
|-----------------------------|-------|----------|------|
| 额定电压/V                      | 220   | 额定转矩/N·m | 5.0  |
| 额定电流/A                      | 5     | 直轴电感/mH  | 7.76 |
| 额定转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 2 000 | 交轴电感/mH  | 17   |
| 额定功率/kW                     | 1.3   | 定子电阻/Ω   | 1.35 |
| 极对数                         | 4     |          |      |

如图6所示。图6中,由上至下3条曲线依次为转速,电磁转矩和定子磁链幅值。电机运行条件为,零速时给定阶跃转速400 r/min,PMSM空载起动,平稳运行后给定转速变为800 r/min。



(a) DTC



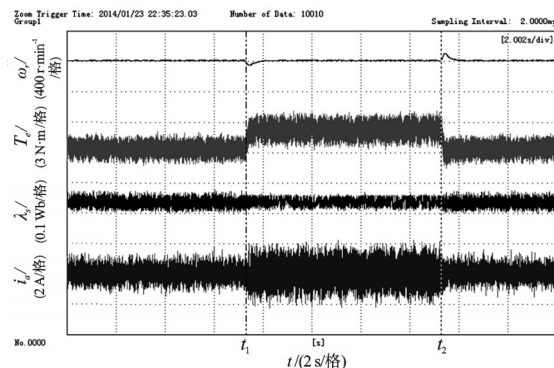
(b) DB-DTC

图6 空载启动及变速运行实验

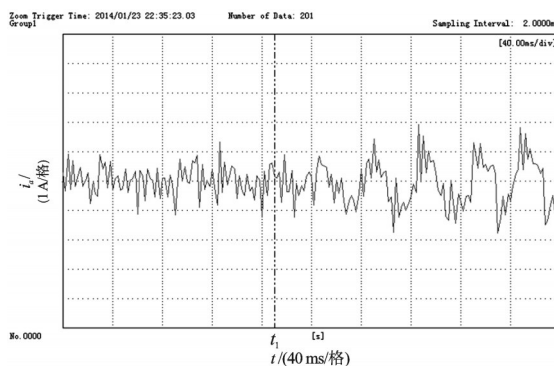
从图6可看出,DTC启动速度快,响应迅速,但磁链和转矩脉动相当大,同时在实验过程中电机运转高频噪声大,抖动明显。DB-DTC具有与DTC同样优异

的动态性能,且与DTC相比,磁链和转矩脉动明显减小,稳态性能显著提高,实验中也无明显高频噪音和振动。

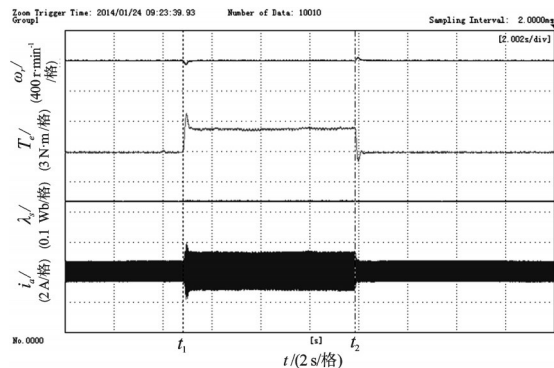
PMSM DTC和DB-DTC突加负载和突卸负载的实验结果如图7所示。PMSM空载运行,转速稳定于



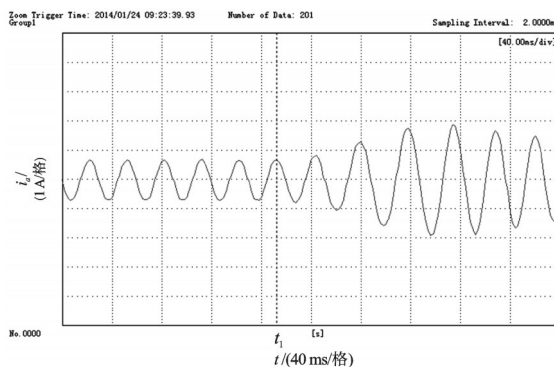
(a) DTC加载及卸载



(b) DTC A相电流局部放大



(c) DB-DTC加载及卸载



(d) DB-DTC A相电流局部放大

图7 加载、卸载实验结果

400 r/min,在 $t_1$ 时刻突加负载 $2.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ , $t_2$ 时刻卸载,响应曲线依次为电机转速、电磁转矩、定子磁链幅值和A相电流。

从图7可看出,DB-DTC保持了DTC优良的带载能力,转矩响应快,加载、卸载过程中转速波动较小;DTC带载转矩、磁链幅值脉动依然很大,DB-DTC转矩、磁链幅值平稳,抖动小;观察电流波形,DTC空载及带载电流出现严重畸变,波形不正弦,谐波含量较大,空载时更加明显,DB-DTC不论空载还是带载,电流正弦并且谐波很小。图6和图7说明,在各种运行条件下,DB-DTC具有与DTC相同优异的动态性能,静态性能方面,DB-DTC能明显减小DTC中存在的转矩、磁链、电流脉动,具有良好的静态性能。

PMSM DB-DTC空载运行时转速从400 r/min跳变到600 r/min瞬间, $d$ 、 $q$ 轴电流 $i_d(k)$ 、 $i_q(k)$ 以及定子电流观测器预测出的电流 $\hat{i}_d(k+1)$ 、 $\hat{i}_q(k+1)$ 波形如图8所示。从图8可看出,电流观测器预测的电流 $\hat{i}_d(k+1)$ 、 $\hat{i}_q(k+1)$ 正好超前采样电流 $i_d(k)$ 、 $i_q(k)$ 一个控制周期(0.1 ms),说明预测电流在电机的动态过程中能提前一个控制周期,准确地预测出定子电流。

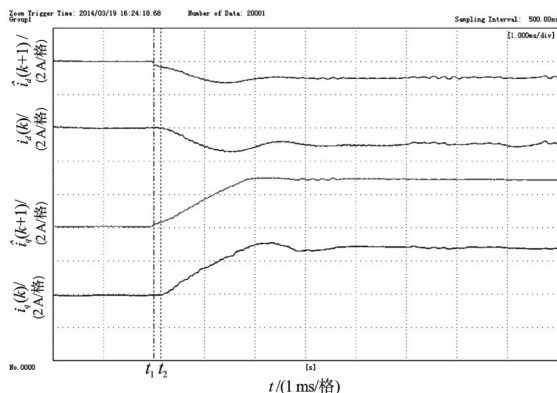


图8 DB-DTC预测电流和采样电流

## 5 结束语

本研究在PMSM离散化状态方程基础上,结合无差拍控制原理,提出了PMSM DB-DTC方案。该控制方法可精确计算出应施加在定子端的电压矢量,结合SVM技术固定了开关频率,有效降低了传统DTC中的电磁转矩和定子磁链的脉动。研究人员利用定子电流观测器可精确预测下周期的电流,消除了离散误

差拍控制系统控制周期带来的误差,确保了PMSM DB-DTC系统的控制精度。

实验结果表明,PMSM DB-DTC系统具有优异的动态特性和稳态性能。

## 参考文献(References):

- [1] ZHONG L, RAHMAN M F, HU W Y, et al. Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1997, 12(3): 528-536.
- [2] RAHMAN M F, ZHONG L, LIM K W. A direct torque-controlled interior permanent magnet synchronous motor drive incorporating field weakening [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1998, 34(6): 1246-1253.
- [3] MATHAPATI S, BOCKER J. Analytical and offline approach to select optimal hysteresis bands of DTC for PMSM [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(3): 885-895.
- [4] PREINDL M, BOLOGNANI S. Model predictive direct speed control with finite control set of PMSM drive systems [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(2): 1007-1015.
- [5] 吴晓东, 南余荣. 无速度传感器十二区段直接转矩控制 [J]. *机电工程*, 2008, 25(3): 46-48.
- [6] LASCU C, BOLDEA I, BLAABJERG F. Super-twisting Sliding Mode Control of Torque and Flux in Permanent Magnet Synchronous Machine Drives [C]//Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE. Vienna: IEEE, 2013: 3171-3176.
- [7] 邱 鑫, 黄文新, 杨建飞, 等. 一种基于转矩角的永磁同步电机直接转矩控制 [J]. *电工技术学报*, 2013(3): 56-62.
- [8] 吴凤桥, 王卫玉, 高玉娟. 永磁同步电机的混沌模型及其控制器设计 [J]. *机电工程技术*, 2013(12): 44-46, 67.
- [9] 孙 丹, 贺益康. 基于恒定开关频率空间矢量调制的永磁同步电机直接转矩控制 [J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(12): 112-116.
- [10] 徐艳平, 钟彦儒, 杨 惠. 一种基于空间矢量调制的永磁同步电动机新型直接转矩控制方案 [J]. *电工技术学报*, 2009, 23(11): 47-52.
- [11] 徐旭明, 王友仁, 王 玲, 等. 基于简化的SVPWM的PMSM磁场定向系统 [J]. *兵工自动化*, 2013, 32(5): 55-59.
- [12] KAWABATA T, MIYASHITA T, YAMAMOTO Y. Dead beat control of three phase PWM inverter [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1990, 5(1): 21-28.

[编辑: 洪炜娜]

## 本文引用格式:

陈 殷, 孙 丹, 林 斌. 永磁同步电机无差拍直接转矩控制系统研究 [J]. *机电工程*, 2014, 31(8): 1053-1057.

CHEN Yin, SUN Dan, LIN Bin. System of dead-beat direct torque control of permanent magnet synchronous motor [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(8): 1053-1057.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>