

12-13-2019

Direct Torque Control Technology for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on SVPWM

Yin Xing

1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; ;

Dengke Yuan

2. Department of Electrical Engineering, College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

Yongcheng Zhen

1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; ;

Zhongshu Shao

1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; ;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Direct Torque Control Technology for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on SVPWM

Abstract

Abstract: The traditional direct torque control technology of permanent magnet synchronous motor utilizes the results of torque and flux linkage hysteresis comparison, and directly controls the torque by looking up the voltage vector. Though this algorithm is simple, its current waveform distortion and torque ripple is more serious, which is very unfavorable for actual motor control. *In this case, by analyzing the shortcomings of traditional direct torque control, SVPWM technology is introduced into direct torque control, and the original look-up table module is replaced by SVPWM module. A simulation model is established for comparative analysis in MATLAB/Simulink, PMSM direct torque control technology based on SVPWM can significantly improve the phenomenon of serious current distortion and reduce torque ripple. The test is carried out on the DSP motor controller and the feasibility of this control algorithm in actual motor control is proved.*

Keywords

permanent magnet synchronous motor, direct torque control, SVPWM, torque ripple

Authors

Yin Xing, Dengke Yuan, Yongcheng Zhen, Zhongshu Shao, and Xiangjie Lü

Recommended Citation

Yin Xing, Yuan Dengke, Zhen Yongcheng, Shao Zhongshu, Lü Xiangjie. Direct Torque Control Technology for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on SVPWM[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(11): 2535-2542.

基于 SVPWM 的永磁同步电机 DTC 技术

尹星¹, 袁登科², 甄永成¹, 邵仲书¹, 吕相杰¹

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学电子与信息工程学院电气工程系, 上海 201804)

摘要: 永磁同步电机传统 DTC(Direct Torque Control)技术利用转矩、磁链的滞环比较结果, 通过查表选择电压矢量的方式对转矩进行直接控制, 虽然其算法简单, 但其电流波形畸变、转矩脉动情况较严重, 对实际电机控制非常不利。通过分析传统直接转矩控制的缺点, 将 SVPWM 技术引入直接转矩控制中, 利用 SVPWM 模块代替原有的查表模块。在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型进行对比分析, 基于 SVPWM 的永磁同步电机 DTC 技术能明显改善电流畸变严重的现象和降低转矩脉动。在 DSP 电机控制器上进行了试验验证, 证明了其控制算法在实际电机控制中的可行性。

关键词: 永磁同步电机; 直接转矩控制; SVPWM; 转矩脉动

中图分类号: TM351

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 11-2535-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-FZ0279

Direct Torque Control Technology for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on SVPWM

Yin Xing¹, Yuan Dengke², Zhen Yongcheng¹, Shao Zhongshu¹, Lü Xiangjie¹

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Department of Electrical Engineering, College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The traditional direct torque control technology of permanent magnet synchronous motor utilizes the results of torque and flux linkage hysteresis comparison, and directly controls the torque by looking up the voltage vector. Though this algorithm is simple, its current waveform distortion and torque ripple is more serious, which is very unfavorable for actual motor control. *In this case, by analyzing the shortcomings of traditional direct torque control, SVPWM technology is introduced into direct torque control, and the original look-up table module is replaced by SVPWM module. A simulation model is established for comparative analysis in MATLAB/Simulink, PMSM direct torque control technology based on SVPWM can significantly improve the phenomenon of serious current distortion and reduce torque ripple. The test is carried out on the DSP motor controller and the feasibility of this control algorithm in actual motor control is proved.*

Keywords: permanent magnet synchronous motor; direct torque control; SVPWM; torque ripple

引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous

Motor, PMSM)具有可靠性高、效率高、能量密度高、调速范围宽以及振动噪声低等特点, 已经被广泛的用作新能源电动汽车的驱动电机^[1-2]。对于车用电机控制技术而言, 其本质是对电磁转矩进行控制, 传统 DTC 就是以此为出发点, 通过查表选择电压矢量的方式来对转矩进行直接控制, 其控制算法简单, 动态响应快, 已成为继 FOC 之后发展起来的另一种高性能电机控制方法^[3]。



收稿日期: 2019-05-28 修回日期: 2019-07-04;
基金项目: 同济大学中央高校基本科研业务费专项基金 (1700219157), 同济大学研究生教改基金 (2018GH08008);

作者简介: 尹星(1996-), 男, 重庆, 硕士, 研究方向为永磁同步电机控制技术; 袁登科(1979-), 男, 安徽, 博士, 讲师, 研究方向为交流电气传动。

<http://www.china-simulation.com>

• 2535 •

传统 DTC 的控制算法虽然简单,但其只利用逆变器产生的 6 个非零电压矢量来对转矩和磁链进行控制,难以对时刻变化的定子磁链进行准确的调节,必然使得其转矩脉动情况较严重。同时,传统 DTC 的采用了滞环比较的方法,滞环比较器类似一种 Bang-Bnag 控制器,会使得定子相电流波形正弦度较差,电流畸变较严重,对实际电机控制非常不利。

针对传统 DTC 存在的问题,许多学者进行了大量研究。文献[4]通过分析了零电压矢量对电磁转矩的影响后,将逆变器生成的另外 2 个零电压矢量加入到了传统 DTC 的电压矢量开关表中,结果发现其能一定程度上改善转矩脉动情况,但其抑制效果有限。文献[5]提出了一种新的扇形区域划分方案,将原有的 6 个扇形区域细化到 12 个扇形区域,从而构造出新的电压矢量开关表,结果表明其对转矩脉动起到抑制作用,同样,抑制效果有限。文献[6]采用了一种改进的二阶滑模算法来替代传统 DTC 中的滞环比较器,同时在磁链估算中建立基于模糊比例积分控制的定子电阻补偿器,消除定子电阻变化对磁链估算的影响,仿真结果表明其能对转矩脉动进行部分抑制,但其未对定子电流改善情况进行分析。文献[7-8]将扩展卡尔曼滤波器应用到 DTC 的定子磁链估计中,实现了更准确的磁链观测精度。

本文针对传统 DTC 存在的定子相电流畸变较严重、转矩脉动大的缺点,将 SVPWM 技术同 DTC 技术结合起来,与其他 DTC 控制算法相比,该算法优势有以下几点:

1) 控制思路简单。将常用于 FOC 控制中的 SVPWM 引入 DTC 控制中,用 PI 控制器替代传统 DTC 的滞环比较器,其控制算法简单,方便在实际电机控制器上进行算法移植。

2) 控制效果明显。由于 SVPWM 可实现对任意位置的电压矢量进行合成,可实现对磁链、转矩更加准确的控制。该控制算法的转矩脉动抑制效果明显,同时,能极大程度上改善定子畸变严重的现

象,有利于提高控制系统的效率以及减小对硬件系统的依耐性。

本文利用 SVPWM 可准确合成任意空间位置的电压矢量的优点^[9],来代替传统 DTC 中的查表选择电压矢量的模块,从而实现对磁链、转矩的准确控制。同时,在 MATLAB/Simulink 中搭建了仿真模型,仿真结果表明基于 SVPWM 的永磁同步电机 DTC 技术能明显改善传统 DTC 相电流畸变严重、转矩脉动大的缺点。最后,在 DSP 电机控制器上对基于 SVPWM 的 DTC 控制算法进行了试验验证,试验结果证明了该控制算法在实际电机控制中的可行性。

1 PMSM 数学模型及传统 DTC 控制方案

1.1 PMSM 的数学模型

传统 ABC 三相静止坐标系中 PMSM 数学模型十分复杂,因此常常在 dq 转子磁链旋转坐标系下对 PMSM 进行控制,不同坐标系的关系见图 1^[10]。

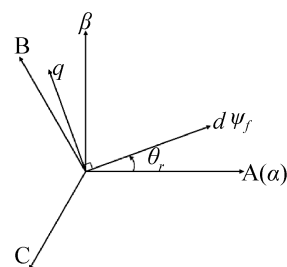


图 1 不同坐标系之间的关系

Fig. 1 Relationship between different coordinate systems

经坐标变换后, dq 转子磁链旋转坐标系中 PMSM 的数学模型如下:

电压方程为:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_r \psi_q \\ u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_r \psi_d \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_s 为定子电阻; u_d , u_q 分别为定子电压在 dq 坐标系下的投影; i_d , i_q 分别为定子电流在 dq 坐标系下的投影; ψ_d , ψ_q 分别为定子磁链在 dq 坐

标系下的投影。

磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

式中: L_d 为定子直轴同步电感; L_q 为定子交轴同步电感; ψ_f 为转子永磁体磁链。

电磁转矩方程为:

$$T_e = \frac{3}{2} p_n (\psi_d i_q - \psi_q i_d) = \frac{3}{2} p_n (\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (3)$$

式中: p_n 为电机极对数。

1.2 PMSM 的传统 DTC 控制方案

根据式(3)中的转矩公式, DTC 控制需要对其进行进一步的处理, 最终得到的转矩方程为:

$$T_e = \frac{3P_n}{4L_d L_q} |\psi_s| (2\psi_f L_q \sin\delta + |\psi_s| (L_d - L_q) \sin 2\delta) \quad (4)$$

式中: $|\psi_s|$ 为定子磁链的幅值; δ 为定子磁链与转子磁链之间的夹角, 在此称为转矩角。

由式(4)可知, 由于永磁体磁链 ψ_f 为常值, 则电磁转矩 T_e 只与定子磁链幅值 $|\psi_s|$ 和转矩角 δ 有关, 若将定子磁链幅值 $|\psi_s|$ 控制成常数, 即定子磁链满足圆形磁场分布, 则电磁转矩就仅仅与转矩角相关。通过控制转矩角, 就可以完成对转矩的控制, 这就是传统 DTC 的基本控制原理^[11]。

传统 DTC 只利用逆变器生成的 6 个非零电压矢量 $u_1(0 0 1)$, $u_2(0 1 0)$, $u_3(0 1 1)$, $u_4(1 0 0)$, $u_5(1 0 1)$, $u_6(1 1 0)$, 采用滞环比较的方法, 根据磁链和转矩的比较结果, 通过查表来选择正确的电压矢量, 从而将定子磁链幅值和转矩的偏差控制在一定的范围内, 以实现转矩的直接控制。滞环比较示意图如图 2。

磁链、转矩滞环比较的输出表达式为:

$$\psi = \begin{cases} 1 & |\psi_s| \leq |\psi_s^*| - \Delta|\psi_s| \\ 0 & |\psi_s| \geq |\psi_s^*| + \Delta|\psi_s| \end{cases} \quad (5)$$

$$T = \begin{cases} 1 & |T_e| \leq |T_e^*| - \Delta T \\ -1 & |T_e| \geq |T_e^*| + \Delta T \end{cases}$$

式中: $\Delta|\psi_s|$ 为磁链滞环带宽; ΔT 为转矩滞环带宽; $\psi=1$ 表示磁链幅值应该增加, $\psi=0$ 表示磁链幅值应该减小; $T=1$ 表示电磁转矩应该增加, $T=-1$ 表示电磁转矩应该减小。

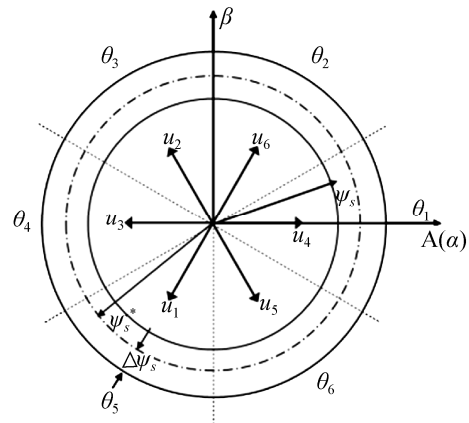


图 2 空间扇形区域及滞环比较

Fig. 2 Spatial sector region and hysteresis comparison

根据不同扇形区域磁链、转矩滞环比较结果, 可以选择此时应给出的电压矢量, 经整理, 6 个扇形区域的电压矢量开关表如表 1 所示。

表 1 传统 DTC 电压矢量开关表

Tab. 1 Traditional DTC voltage vector switch table

ψ	T	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
1	1	u_6	u_2	u_3	u_1	u_5	u_4
	-1	u_5	u_4	u_6	u_2	u_3	u_1
0	1	u_2	u_3	u_1	u_5	u_4	u_6
	-1	u_1	u_5	u_4	u_6	u_2	u_3

最终, 永磁同步电机传统 DTC 控制系统框图如图 3 所示。

整个系统主要包括磁链、转矩滞环比较、定子磁链估计、转矩估计、定子磁链扇区判断、电压矢量开关表等模块。

1.3 仿真模型及仿真结果

根据上述永磁同步电机传统 DTC 控制框图, 在 MATLAB/Simulink 中搭建其仿真模型, 如图 4 所示。

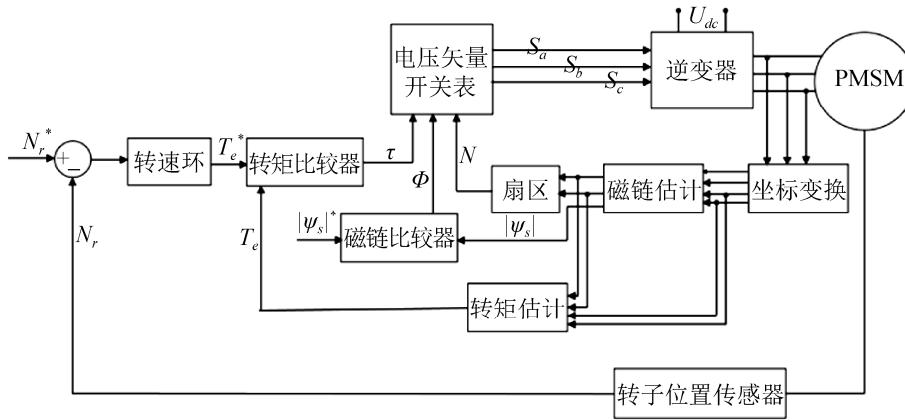


图 3 永磁同步电机传统 DTC 控制框图

Fig. 3 PMSM Traditional DTC Control Block Diagram

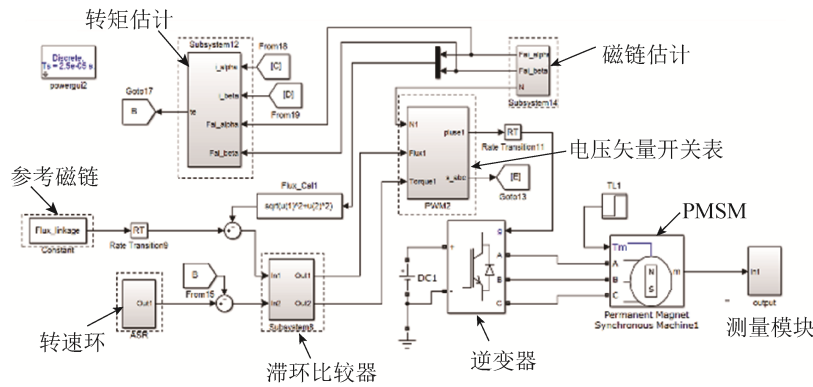


图 4 MATLAB/Simulink 中永磁同步电机传统 DTC 仿真模型

Fig. 4 Traditional DTC Simulation Model of PMSM in MATLAB/Simulink

仿真模型包括永磁同步电机、逆变器、电压矢量开关表、滞环比较、磁链估计、转矩估计等模块，并对其进行封装处理。仿真电机为隐极式永磁同步电机，其基本电机参数如表 2 所示。

表 2 仿真电机的相关参数

Tab. 2 Related parameters of simulation motor

PMSM 类型	隐极式	极对数	4
定子电阻	1.4 Ω	直流母线电压	60 V
定子电感	0.4 mH	额定功率	1.9 kW
永磁体磁链	0.0826 Wb	额定转矩	3 N·m

仿真采用定步长离散仿真，参考定子磁链设定为 0.082 6 Wb，开关频率为 20 kHz，步长及采样时间为 5e-5，仿真时间为 0.2 s，给定转速为 400 r/min，给定负载转矩 0.5 N·m。仿真结果如图 5~7 所示，依次为定子 A 相电流波形、定子磁链轨迹圆波形以及转矩波形。

从仿真波形可以看出，定子 A 相电流脉动较大，其正弦度较差，电流畸变严重。定子磁链轨迹满足圆形磁场分布。转矩平均值为 0.5 N·m，但其转矩脉动较大，脉动峰峰值为 0.8 N·m。

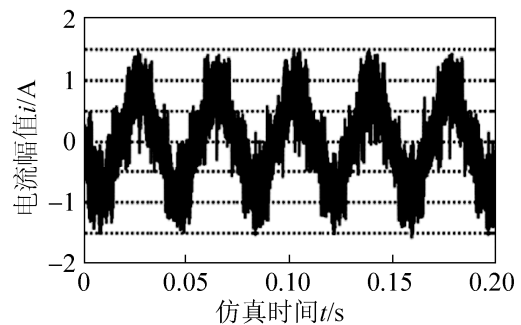


图 5 定子 A 相电流波形

Fig. 5 Current waveform of stator A phase

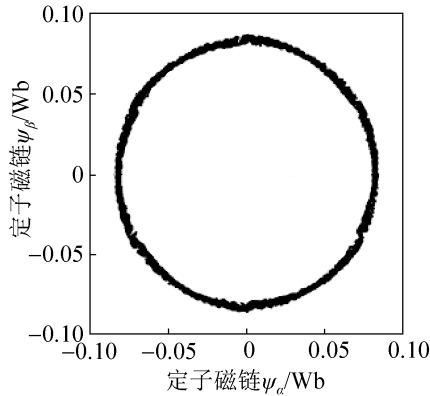


图 6 定子磁链轨迹圆曲线
Fig. 6 Stator flux linkage trajectory

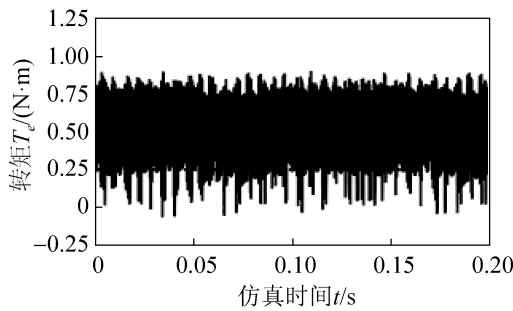


图 7 转矩波形
Fig. 7 Torque waveform

2 基于 SVPWM 的永磁同步电机 DTC 控制方案

2.1 基于 SVPWM 的 DTC 控制原理

为改善传统 DTC 转矩脉动大的缺点, 本文将 SVPWM 同 DTC 技术结合起来, 通过对非零电压矢量和零电压矢量的作用时间进行组合, 合成此时所需的任意位置的电压矢量, 来代替传统 DTC 中的查表模块, 从而实现对转矩的准确控制。

SVPWM 利用逆变器生成的 6 个非零电压矢量和 2 个零电压矢量, 把空间等分成了 6 个扇形区域, 各电压矢量所处位置如图 8 所示。

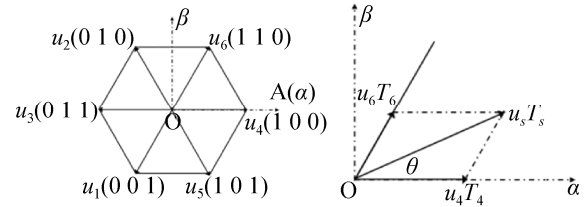


图 8 空间扇形区域及电压矢量合成方法
Fig. 8 Spatial sector area and vector synthesis method

当参考电压矢量位于扇形区 θ_1 时, 电压矢量合成方法图 8 所示, 最终合成电压矢量 u_s 由相邻非零空间电压矢量 u_4, u_6 通过不同的作用时间组合得到, 等效原则为:

$$\begin{aligned} T_s u_s &= T_4 u_4 + T_6 u_6 \\ T_s &= T_4 + T_6 + T_0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: T_s 为单个控制周期; T_4, T_6 为非零电压矢量 u_4, u_6 的有效作用时间; T_0 为零电压矢量的有效作用时间。

根据上述 SVPWM 的控制原理, 基于 SVPWM 的永磁同步电机 DTC 控制系统框图如图 9 所示。

磁链估计与转矩估计仍与传统 DTC 系统保持一致, 生成 SVPWM 所需的参考电压矢量 u_α^*, u_β^* 由转矩 PI 与定子磁链偏差矢量计算得到^[12], 计算式为:

$$\begin{aligned} u_\alpha^* &= \frac{|\psi_s^*| \cos(\theta + \Delta\theta) - |\psi_s| \cos \theta}{T_s} + R_s i_\alpha \\ u_\alpha^* &= \frac{|\psi_s^*| \sin(\theta + \Delta\theta) - |\psi_s| \sin \theta}{T_s} + R_s i_\beta \end{aligned} \quad (7)$$

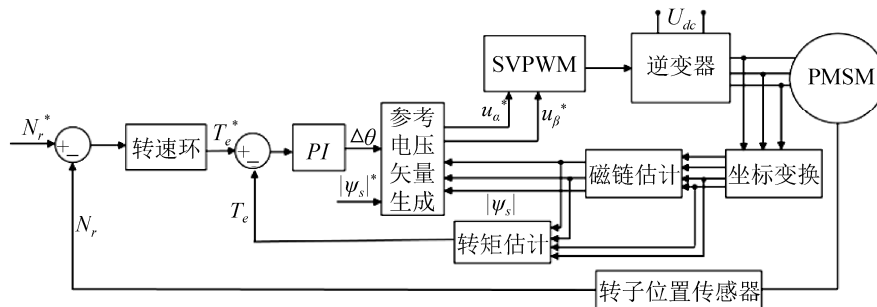


图 9 基于 SVPWM 的永磁同步电机 DTC 控制框图
Fig. 9 DTC control block diagram of PMSM based on SVPWM

2.2 仿真模型及仿真结果

根据上述控制算法, 在 MATLAB/Simulink 中搭建了基于 SVPWM 的永磁同步电机 DTC 仿真模型, 如图 10 所示。仿真工况与传统 DTC 一致, 仿真波形如图 11~13 所示, 依次为定子 A 相电流波形、定子磁链轨迹圆波形以及转矩波形。

与传统 DTC 仿真结果对比可以看出, 基于

SVPWM 的永磁同步电机 DTC 技术较传统 DTC 技术有了较大的改善。从电流波形可以看出, 基于 SVPWM 的 DTC 技术的定子电流已经十分接近正弦分布, 改善了传统 DTC 定子电流畸变严重的现象。从转矩波形可以发现, 基于 SVPWM 的 DTC 技术的转矩脉动情况较传统 DTC 有了极大的改善, 转矩脉动已由原来的 0.8 N·m 减小至 0.02 N·m, 效果明显。

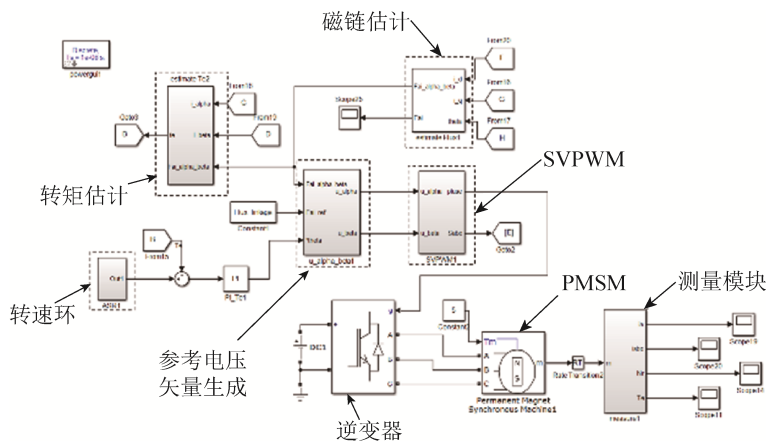


图 10 MATLAB/Simulink 中基于 SVPWM 的永磁同步电机 DTC 仿真模型

Fig. 10 DTC simulation model of PMSM based on SVPWM in MATLAB/Simulink

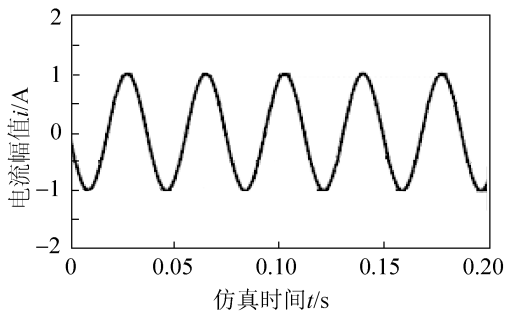


图 11 定子 A 相电流波形
Fig. 11 Stator A phase current waveform

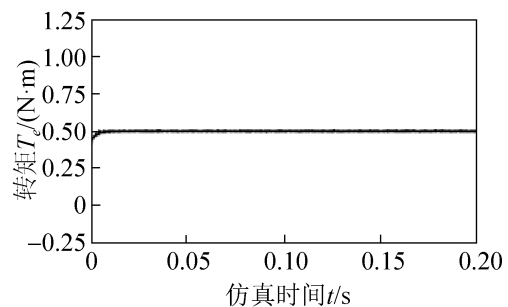


图 13 转矩波形
Fig. 13 Torque waveform

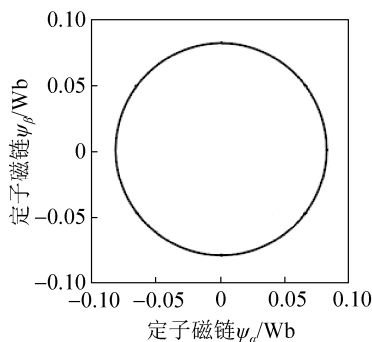


图 12 定子磁链轨迹圆曲线
Fig. 12 Stator flux linkage trajectory

3 试验验证

为验证所建立的基于 SVPWM 的永磁同步电机 DTC 控制算法在实际电机控制中的可行性, 下面对控制算法进行试验验证。控制器硬件平台采用基于 TI 公司的 TMS320F28335 系列数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP), 试验工况为电机转速 400 rpm, 负载转矩 0.5 N·m。整个台架试验平台如图 14 所示。



图 14 电机试验平台
Fig. 14 Motor test platform

由于测试试验设备有限,不能直接采集到转矩输出波形,在此用示波器采集到的定子相电流波形作为验证指标,试验所得相电流波形如图 15 所示。为方便对比试验结果,同时给出了相同工况由 Simulink 仿真得到的定子 A 相电流波形,结果如图 16 所示。

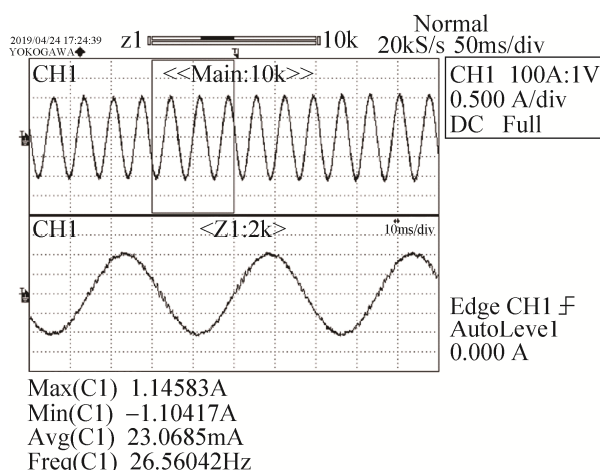


图 15 示波器采得的定子 A 相电流波形
Fig. 15 Stator A phase current waveform acquired by the oscilloscope

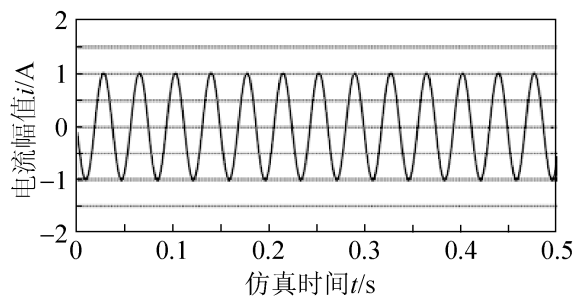


图 16 相同工况仿真得到的定子 A 相电流波形
Fig. 16 Stator A phase current waveform obtained by simulation of the same working condition

从示波器采集到的相电流波形可以看出,电机定子相电流波形正弦度较高,电流波形基本对称,幅值为 ± 1.1 A,与同工况下仿真得到的电机定子相电流波形相比,两者波形结果十分接近。

总体试验结果表明,基于 SVPWM 的永磁同步电机 DTC 算法的试验结果与仿真结果基本一致,初步证明所搭建的控制算法在实际电机控制中的可行性。

4 结论

本文通过对永磁同步电机传统 DTC 控制算法进行仿真分析,发现其原有的通过磁链、转矩的滞环比较结果来选择电压矢量的方式,会使得其相电流畸变严重、转矩脉动大,不利于实际的电机控制。为解决传统 DTC 存在的缺点,本文将 SVPWM 技术引入 DTC 中,利用 SVPWM 模块代替原有的电压查表模块。通过在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型进行对比分析,基于 SVPWM 的 DTC 技术能明显改善传统 DTC 存在的相电流畸变严重、转矩脉动大的缺点。在 DSP 控制器上验证了所搭建的基于 SVPWM 的 DTC 控制算法在实际电机控制中的可行性。

参考文献:

- [1] 袁登科, 徐延东, 李秀涛. 永磁同步电动机变频调速系统及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
Yuan Dengke, Xu Yandong, Li Xiutao. Permanent magnet synchronous motor variable frequency speed control system and its control[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2015.
- [2] 张舟云, 贡俊. 新能源汽车电机技术与应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2013.
Zhang Zhouyun, Gong Jun. New energy automotive motor technology and application[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2013.
- [3] 高靖凯, 林荣文, 张润波. 永磁同步电机直接转矩控制的研究及算法改进[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(11): 16-20.
Gao Jingkai, Lin Rongwen, Zhang Runbo. Research and algorithm improvement of permanent magnet synchronous motor direct torque control[J]. Electric

- Machines & Control Application, 2015, 42(11): 16-20.
- [4] Hu Yuwen, Tian Cun, Gu Yikang. In-depth research on direct torque control of permanent magnet synchronous motor[C]. 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Sevilla: IEEE Industrial Electronics Society, 2002(3): 1060-1065.
- [5] 王晓磊, 赵克友, 崔培良. 永磁同步电机定子磁链十二区间直接转矩控制[J]. 青岛大学学报, 2006, 21(4): 66-69.
Wang Xiaolei, Zhao Keyou, Cui Peiliang. Permanent magnet synchronous motor stator flux linkage twelve-section direct torque control[J]. Journal of Qingdao University, 2006, 21(4): 66-69.
- [6] 董绍江, 胡宇, 王艳, 等. 一种改进的永磁同步电机直接转矩控制方法[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2019, 46(3): 105-111.
Dong Shaojiang, Hu Yu, Wang Yan, et al. An improved direct torque control method for permanent magnet synchronous motor[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2019, 46(3): 105-111.
- [7] 陈振, 刘向东, 靳永强, 等. 采用扩展卡尔曼滤波磁链观测器的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(33): 75-81.
Chen Zhen, Liu Xiangdong, Jin Yongqiang, et al. Direct torque control of permanent magnet synchronous motors based on extended kalman filter observer of flux linkage [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2008, 28(33): 75-81.
- [8] 刘英培, 万健如, 梁鹏飞. 基于扩展卡尔曼滤波器和空间电压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, 2009, 29(27): 67-74.
Liu Yingpei, Wan Jianru, Liang Pengfei. Direct torque control for permanent magnet synchronous motor drive based on extended kalman filter and space vector modulation [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2009, 29(27): 67-74.
- [9] Swierczynski D, Kazmierkowski M P. Direct torque control of permanent magnet synchronous motor (PMSM) using space vector modulation (DTC-SVM)-simulation and experimental results[C]. Sevilla: IECON. IEEE, 2002: 751-755.
- [10] 杨建飞. 永磁同步电机直接转矩控制系统若干关键问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
Yang Jianfei. Research on the key issues in direct torque control system for permanent magnet synchronous motor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [11] 胡育文, 高瑾, 杨建飞, 等. 永磁同步电动机直接转矩控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
Hu Yuwen, Gao Jin, Yang Jianfei, et al. Permanent magnet synchronous motor direct torque control system [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2015.
- [12] 肖卫文. 永磁同步电机直接转矩控制系统的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
Xiao Weiwen. Research on direct torque control system of permanent magnet synchronous motor[D]. Changsha: Hunan University, 2009.