

# 一种改进的永磁同步电机 SVM-DTC 控制方法

华心怡, 杨建飞, 吴华仁, 刘建, 程继红

(1. 南京师范大学江苏省三维打印装备与制造重点实验室, 江苏 南京 210042)  
(2. 南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

**[摘要]** 永磁同步电机传统 DTC 控制方法由于采用滞环控制方式导致电机转矩和磁链脉动较大, 而 SVM 控制方法基于对转矩和磁链误差的精确补偿从而能够有效降低二者的脉动, 但传统 SVM 控制方法包含了转速和转矩角两个 PI 调节器, 两个调节器的参数设计比较复杂, 也直接影响了电机性能. 本文从 DTC 控制转矩角这一本质出发, 提出了一种改进的 SVM 控制方法, 通过动态调整转矩角调节器的输出限幅值即可实现对电机转矩的高性能控制, 从而省去了复杂的 PI 参数调试过程. 仿真结果验证了所提控制方法的正确性和有效性.

**[关键词]** 永磁同步电机, 直接转矩控制, 空间矢量调制

**[中图分类号]** TM761 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2014)04-0011-06

## An Improved Method of Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Space Vector Modulation

Hua Xinyi, Yang Jianfei, Wu Huaren, Liu Jian, Cheng Jihong

(1. 3D Printing Equipment and Manufacturing Key Lab of Jiangsu Province, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)  
(2. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** Stator flux linkage and torque ripple are large in traditional direct torque control (DTC) of permanent magnet synchronous motor because of the Hysteresis Control. Space vector modulation (SVM) is based on the precise compensation of the error of stator flux linkage and torque, so it is effective to reduce the ripple. However, two PI regulators are included in traditional SVM method, one is speed regulator and the other is torque regulator. Design of Parameters of the two PI regulators is complex and the motor performance is effected by these Parameters directly. The paper embarks from the nature that DTC control torque angle and presents an improved method of SVM. The motor can be controlled efficiently through dynamically adjusting the output limit value of torque angle regulator. Complex debugging process of the PI parameters can be eliminated in this method. The correctness and validity of the proposed method are verified by simulation result.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor, direct torque control, space vector modulation

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)以其动态性能优良、运行效率高等突出优点受到了人们越来越多的关注,在要求转矩能够快速响应及需要高效运行的场合倍受青睐,在工业中获得了广泛运用<sup>[1-3]</sup>.

永磁同步电机的直接转矩控制方案具有结构简单、转矩响应速度快、对电机参数鲁棒性好等优点,所以受到众多学者的关注.传统的直接转矩控制虽然具有很多突出优点,却是以牺牲转矩和磁链的控制精度为代价的.为了解决这些问题,众多学者做了大量的工作,提出了基于空间电压矢量调制技术的直接转矩控制(direct torque control based on space vector modulation, SVM-DTC)方案<sup>[4-10]</sup>,该方案在保持了传统直接转矩控制优点的基础上,显著降低了转矩和磁链脉动.

从控制理论的角度来说, PMSM 的 SVM-DTC 方案是一种存在两个 PI 调节器的串级控制系统, 两组 PI 参数相互影响并最终直接影响到整个系统的性能. 对于这两组 PI 参数的整定方案, 目前很多学者只是提

收稿日期: 2014-07-19.

基金项目: 国家自然科学基金(61273243、51177074)、江苏省高校自然科学基金(12KJB470011、13KJB590001).

通讯联系人: 杨建飞, 博士, 讲师, 研究方向: 电机控制与三维打印. E-mail: yjfsmile@njnu.edu.cn

出了一个大致整定方向,缺少具体的理论指导.针对以上问题,本文以隐极式永磁同步电机为研究对象,引入空间矢量调制技术,提出了一种改进的永磁同步电机 SVM-DTC 控制方案,通过动态调整转矩角调节器的输出限幅,降低了 PI 参数对系统控制性能的影响,简化了调制的过程.仿真结果证明了该方案的正确性和有效性.

## 1 永磁同步电机改进 SVM-DTC 控制方法

直接转矩控制方法的核心思想是在保持定子磁链幅值恒定的条件下通过控制转矩角实现对电机转矩的直接控制,因此,转矩角的控制是 DTC 系统实现中至关重要.而在 DTC 控制中,转矩和磁链的控制最终都是通过发送电压矢量来实现的.在 DTC 分析中,常用的坐标系如图 1 所示.其中,  $\alpha\beta$  为静止坐标系,  $dq$  为转子旋转坐标系,两者偏差角度为  $\theta_r$ ;  $\psi_s$ 、 $\psi_r$ 、 $\omega_r$  分别为定子磁链、转子磁链及转子角速度,  $\delta$  为定子磁链角度的误差,  $U_1 \sim U_6$  分别为 6 个运动空间电压矢量.

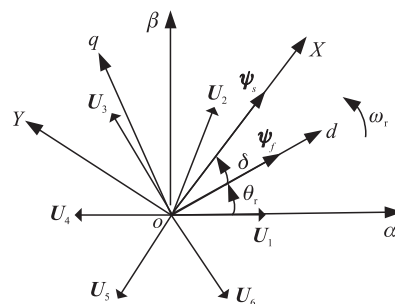


图 1 永磁同步电机各坐标及有关矢量图

Fig. 1 Coordinates and related vectors in the PMSM

PMSM 的 SVM-DTC 的最终目的是使得电机产生近似于圆形的磁链轨迹,控制定子磁链幅值恒定并使磁链在指定的时间内精确运动到给定位置.如图 2(a) 所示, SVM-DTC 较传统 DTC,使用了 SVM 单元替代了传统 DTC 中的转矩与磁链滞环比较器和开关表,通过 SVM 单元根据磁链和转矩的偏差精确得到参考电压矢量. SVM-DTC 在一个控制周期内可以连续发出多个电压矢量,通过选择 2 个相邻的非零电压矢量和 1 个零电压矢量,并计算每个电压矢量作用的时间,就可以达到对磁链的精确控制,使磁链轨迹更接近于圆,从而准确控制转矩角,即可准确地控制转矩.

转矩控制示意图如图 2(b) 所示.图中,  $\psi_s^*$  为磁链给定值,  $\Delta\delta_{sk+1}$  为第  $k+1$  个控制周期,期望的定子磁链旋转的角度.忽略定子电阻压降,设第  $k$  控制周期控制所得的定子磁链为  $\psi_{sk}$ ,根据定子磁链的给定值及转矩误差预测出第  $k+1$  个周期作用所需的定子磁链为  $\psi_{sk+1}^*$ ,该矢量与实际值的误差为  $\Delta\delta_{sk+1}$ .根据矢量合成法则选择  $u_2$ 、 $u_3$ ,并分别计算所需的时间  $T_1$ 、 $T_2$ ,剩余的时间由零矢量进行补充,最终准确合成所需的电压矢量,从而准确控制定子磁链和转矩.

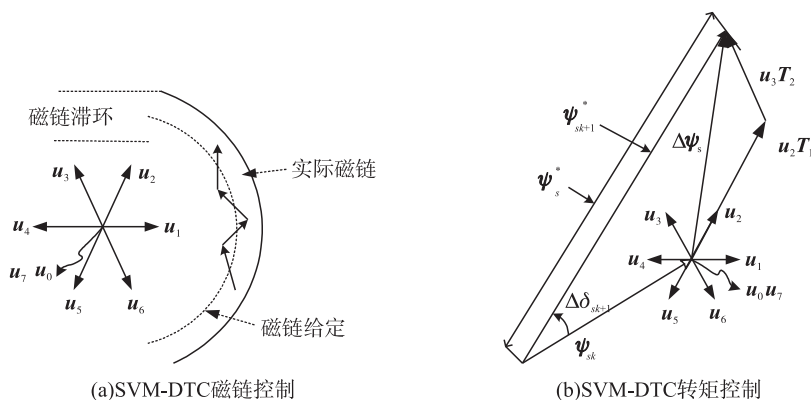


图 2 永磁同步电机 SVM-DTC 原理图

Fig. 2 The principle of SVM-DTC in the PMSM

传统 SVM-DTC 控制方法中,定子磁链给定一般为定值,而转矩的误差是通过控制转矩角的偏差来实现的,系统控制框图如图 3 所示.

从图 3 可知, SVM-DTC 的转矩闭环中,通过额定转速和实际转速的值经过 PI 调节器得到给定的转矩  $T_e^*$ ,然后与电机实际电磁转矩  $T_e$  进行比较,再通过 PI 调节器得到定子磁链矢量在下一个控制周期内期望的转矩角增量  $\Delta\delta_s^*$ .因此,转矩角的增量的大小受到两个串级形式的 PI 调节器参数的影响.而在 DTC 中,转矩角控制的好坏直接影响到了最终转矩的控制效果.由于 PMSM 的 SVM-DTC 系统是个非线性的系统,要得出一个具体的控制模型并计算出精确的传递函数非常困难,所以目前对于两组 PI 参数只能进行一些大致方向的整定.一旦电机参数发生变化,原先的 PI 参数将不再适用,这无疑使得工作量大大增加.

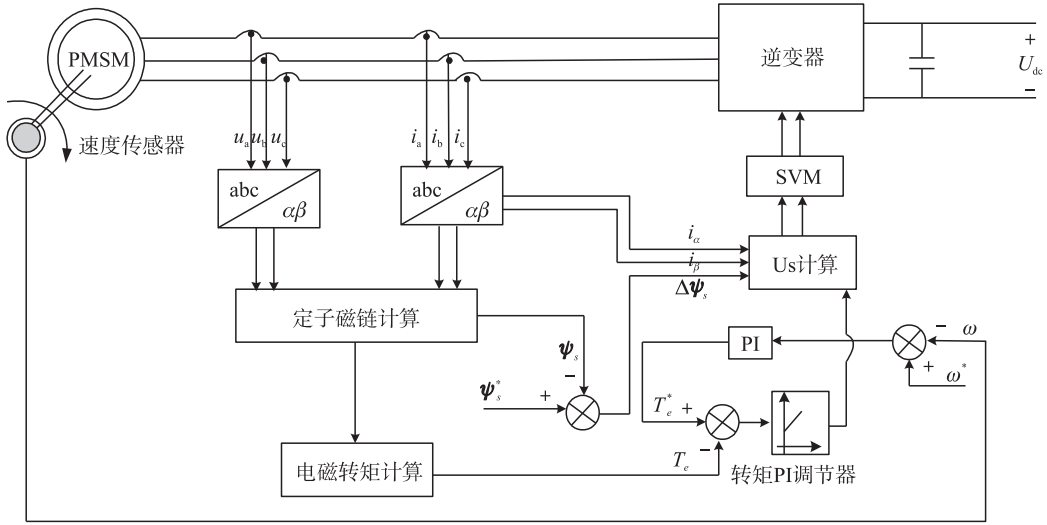


图 3 永磁同步电机 SVM-DTC 转矩角控制示意图

Fig. 3 The schematic diagram of torque angle based on SVM-DTC in the PMSM

在 DTC 中,转矩角的控制始终是核心和关键,而在传统 SVM-DTC 中是通过两个 PI 调节器得到最终的转矩角增量,如果 PI 参数设定不合适将导致最终得到的转矩角增量偏离实际所需要的变化量,具体可分为如下两种情况:

- (1) 调节得到的转矩角增量和实际所需的转矩角的增量变化方向一致,仅数值上存在偏差;
- (2) 调节得到的转矩角增量和实际所需的转矩角的增量变化方向不一致,其中一个增量为正,而另一个增量为负。

对于第一种情况,通过 PI 调节器本身即可实现对误差的自动调节。而对于第二种情况,由于 PI 参数设置不合理,最终调节得到的转矩角的增量为负,严重偏离实际所需要的变化量,由于电机转矩和转矩角直接相关,反应到转矩上,会导致电机转矩发生剧烈的变化从而带来更大的转矩脉动。

针对这个问题,本文提出了一种改进的 SVM-DTC 控制方法。该方法对转矩角增量进行变限幅控制,省去了很多繁琐的 PI 参数的整定,其实现框图如图 4 所示。改进模型从转矩内环出发,在第二级 PI 调节器后加入变限幅单元,建立了转矩角增量  $\Delta\delta_s^*$  的变限幅判据,该判据将转矩内环经过 PI 调节器所得的值的直接对  $\Delta\delta_s^*$  进行控制,在转矩脉动增大的情况下可以迅速调节转矩角增量的限幅值,实时控制转矩角,从而达到对转矩的准确控制。这就将控制的关键转向了变限幅单元,有效避免了系统中 2 个 PI 调节器参数的繁琐整定。

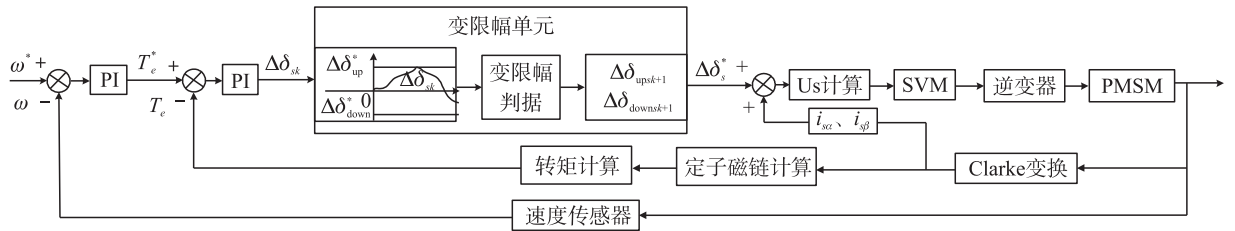


图 4 永磁同步电机改进控制框图

Fig. 4 The improved control diagram for a PMSM

变限幅单元的具体实现方式如式(1)、(2)所示:

$$\Delta\delta_{upsk+1} = \begin{cases} 0 & \Delta\delta_{sk} - \Delta\delta_{down}^* \leq 0; \\ \Delta\delta_{upsk} & \Delta\delta_{sk} - \Delta\delta_{down}^* > 0. \end{cases} \quad (1)$$

$$\Delta\delta_{downsk+1} = \begin{cases} 0 & \Delta\delta_{sk} - \Delta\delta_{up}^* \geq 0; \\ \Delta\delta_{downsk} & \Delta\delta_{sk} - \Delta\delta_{up}^* < 0. \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\Delta\delta_{upsk+1}$ 、 $\Delta\delta_{downsk+1}$  分别为第  $k+1$  个控制周期所需的转矩角增量上限值和下限值;  $\Delta\delta_{upsk}$ 、 $\Delta\delta_{downsk}$  分别为

第  $k$  个控制周期的转矩角增量上限值和下限值;  $\Delta\delta_{sk}$  为第  $k$  个控制周期中转矩 PI 调节器所获得的数值;  $\Delta\delta_{up}^*$ 、 $\Delta\delta_{down}^*$  分别为额定的正负限幅值.

当转矩 PI 调节器得到的数值达到正限幅值时,下限值变为 0,反之,则将上限值变为 0.但由于变限幅也是根据 PI 参数的正负误差理论和误差累积原理来设置的,所以在变限幅时要保留一定的裕量,变化的限幅值不会完全达到 0,而是给定到额定转矩角的 10% 左右.当转矩脉动较小时,系统将按原有 PI 参数进行控制,一旦脉动增大,变限幅单元动作,迅速对  $\Delta\delta_s^*$  的进行调整.这样,在整个控制系统中通过转矩内环经过 PI 调节器的值的正负变化实时对转矩角增量进行变限幅控制,将大大减少系统中的两组 PI 参数的繁琐整定,又能对电机进行有效控制.

2 系统的仿真与分析

在 Matlab/Simulink 仿真工具中分别搭建 PMSM 的 DTC 和改进 SVM-DTC 系统.其中,两种控制方案的磁链给定均为  $0.2\text{ N}\cdot\text{m}$ ,电机参数如表 1 所示.

2.1 电机稳态运行性能仿真

在相同的电机参数的条件下,分别采用传统 DTC 和 SVM-DTC 两种控制方法进行仿真,所获得的定子磁链轨迹和转矩波形如图 5、图 6 所示.

表 1 永磁同步电机参数

Table 1 Parameters of the PMSM

电机参数	数值	电机参数	数值
母线电压/V	300	定子电阻/ $\Omega$	4.765
额定转速/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	3 750	电机极对数	2
额定转矩/ $\text{N}\cdot\text{m}$	1.7	直轴电感/H	0.014
给定磁链/Wb	0.2	交轴电感/H	0.014

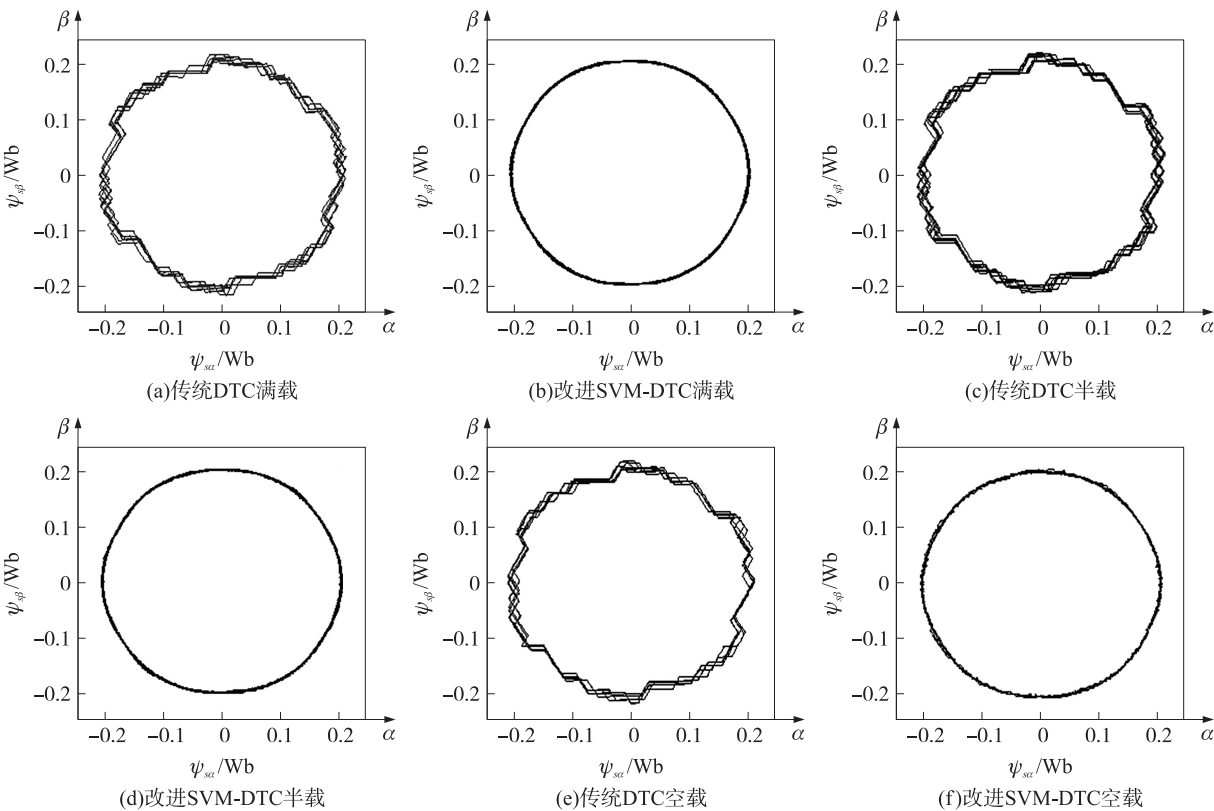


图 5 定子磁链轨迹图

Fig. 5 Stator flux waveforms

两种控制方法都要保持定子磁链幅值恒定,所以磁链应呈现为一圆形轨迹.在相同的运行条件下,从传统 DTC 和改进 SVM-DTC 两种控制方法进行仿真所获得的定子磁链轨迹可知,传统 DTC 的磁链在满载、空载、半载的情况下定子磁链脉动均较大,磁链轨迹已不是一圆形.而采用改进 SVM-DTC 的控制方法所获得的定子磁链轨在 3 种情况下均表现出一光滑的圆形,只出现了较小的脉动,基本能保持  $0.2\text{ Wb}$  的给定值.可见改进 SVM-DTC 方案在降低了 PI 参数对系统控制性能的影响的情况下,控制定子磁链恒定的效果依然优于传统 DTC 的方案.

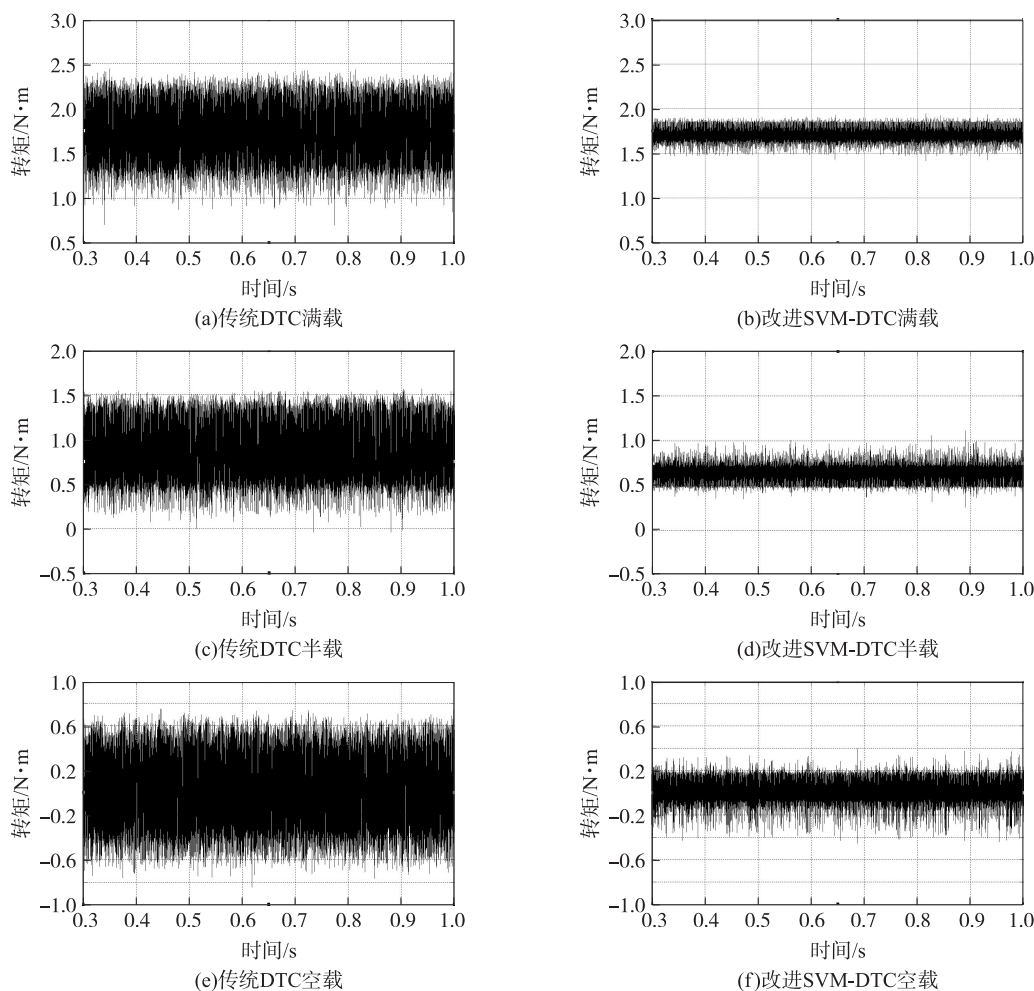


图 6 转矩波形图

Fig. 6 Torque waveforms

在相同运行条件下,从两种控制方案所获得的转矩波形来看,传统 DTC 的转矩脉动在满载、半载和空载的情况下分别达到了  $1.7 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $1.65 \text{ N}\cdot\text{m}$  和  $1.55 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,带载不同呈现出的转矩脉动均很大.而改进 SVM-DTC 的转矩脉动对应只有  $0.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $0.85 \text{ N}\cdot\text{m}$  和  $0.85 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,在负载变化的情况下系统依然稳定运行,转矩脉动均能保持较小的状态,均小于传统 DTC 的控制方案.进一步说明了本文提出的改进 SVM-DTC 的控制方案相比于传统 DTC,系统的稳定性更好,控制效果更佳,且相比于 SVM-DTC 方案,减小了 PI 参数对系统控制性能的影响,省去了繁琐的 PI 参数的整定,在保持 SVM-DTC 方案优良性能的前提下大大减少了工作量.

## 2.2 电机动态运行性能仿真

在稳态性能仿真的基础上,对两种控制方法的动态性能进行仿真对比分析,当在  $0.1 \text{ s}$  时刻突加  $1.7 \text{ N}\cdot\text{m}$  的给定转矩时,系统的仿真结果如图 7 所示.

从仿真波形可以看出,在电机稳态运行时突加负载,传统 DTC 的转矩响应时间为  $0.4 \text{ ms}$ ,而改进 SVM-DTC 的转矩响应时间只有  $0.3 \text{ ms}$ ,较传统 DTC 更快.同时,从动态仿真的转矩波形可以看出,新方法的转矩脉动也比传统方法小得多.

产生此现象的根本原因在于,传统 DTC 只运用 8 个基本空间电压矢量,通过转矩和磁链滞环对定子磁链进行控制,而 SVM-DTC 引入了 SVM 单元,使得逆变器可以发出线性连续的空间电压矢量,从而对磁链和转矩达到更精确的控制,大大降低转矩脉动.而本文提出的一种改进方案的 SVM-DTC,更是运用控制理论和电机理论相结合的方法对系统进行分析,得出了系统的改进模型.在改进模型中,采用变限幅的方法对转矩角增量进行实时控制,大大降低了 4 个 PI 参数对整个控制系统性能的影响.故改进方案的 SVM-DTC 能够在保持 SVM-DTC 的优良性能的同时大大减轻工作量.

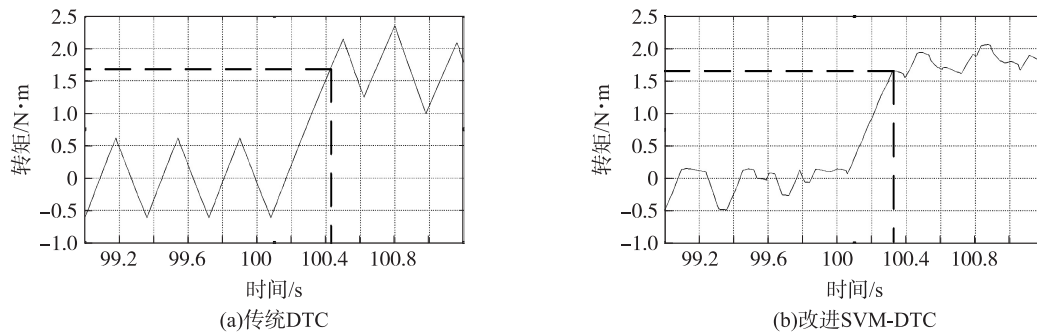


图7 转矩动态响应图

Fig. 7 The dynamic response diagram of torque

### 3 结语

在深入分析永磁同步电机数学模型和控制方法的基础上,提出了一种改进方案的空间电压矢量调制的永磁同步电机直接转矩控制(PMSM SVM-DTC). 该方案不仅可以解决传统的直接转矩控制带来的一系列问题,同时保证 SVM-DTC 的优良控制性能,有效降低磁链与转矩脉动,且得出 SVM-DTC 的改进模型,通过实时的变限幅单元降低了 PI 调节器对系统控制性能的影响,省去了繁琐复杂的 PI 参数的整定,简化了系统设计过程,为 SVM 方法的实现提供了一条可借鉴的思路.

### [参考文献](References)

- [1] 周扬忠,许海军. 直接转矩控制永磁同步发电机相位自校正型定子磁链观测器[J]. 中国电机工程学报,2012,32(18):99-107.  
Zhou Yangzhong, Xu Haijun. A phase self-tuning stator flux linkage estimator for permanent magnet synchronous generators based on the direct torque control[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(18):99-107. (in Chinese)
- [2] 杨建飞,胡育文. 永磁同步电机直接转矩控制转矩调节器设置[J]. 中国电机工程学报,2011,31(9):76-81.  
Yang Jianfei, Hu Yuwen. A torque control design for permanent magnet synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(9):76-81. (in Chinese)
- [3] 周扬忠,毛洁. 基于有效磁链概念的永磁同步电动机新型定子磁链滑模观测器[J]. 中国电机工程学报,2013,33(12):152-158.  
Zhou Yangzhong, Mao Jie. A novel sliding mode stator flux linkage estimator based on active flux principle for permanent magnet synchronous motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12):152-158. (in Chinese)
- [4] 周胜灵,刘峰. 永磁同步电机直接转矩控制系统的改进及仿真[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2013,36(11):87-92.  
Zhou Shengling, Liu Feng. Improvement and simulation on direct torque control system of permanent magnet synchronous motor[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2013, 36(11):87-92. (in Chinese)
- [5] 黄彦婕,周扬忠,江修波,等. SVM-DTC 控制的永磁同步伺服系统仿真[J]. 电力系统及其自动化学报,2012,24(5):108-111.  
Huang Yanjie, Zhou Yangzhong, Jiang Xiubo, et al. Simulation of PMSM servo system controlled by SVM-DTC[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2012, 24(5):108-111. (in Chinese)
- [6] 周扬忠,胡育文,黄文新. 基于直接转矩控制电励磁同步电机转子励磁电流控制策略[J]. 南京航空航天大学学报:自然科学版,2007,39(4):429-434.  
Zhou Yangzhong, Hu Yuwen, Huang Wenxin. Rotor excitation current control strategy of electrically excited synchronous motor drive based on DTC[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics: Natural Science Edition, 2007, 39(4):429-434. (in Chinese)
- [7] 周扬忠,胡育文,黄文新. 低转矩磁链脉动型电励磁同步电机直接转矩驱动系统的研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(7):152-157.  
Zhou Yangzhong, Hu Yuwen, Huang Wenxin. Research on a direct torque control for electrically excited synchronous motor drive with low ripple in flux and torque[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7):152-157. (in Chinese)

(下转第44页)

- [22] Goodarzi M, Freitas M P, Jensen R. Ant colony optimization as a feature selection method in the QSAR modeling of anti-HIV-1 activities of 3-(3, 5-dimethylbenzyl) uracil derivatives using MLR, PLS and SVM regressions [J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2009, 98(2): 123–129.
- [23] Matteucci M, Mussone L. An ant colony system for transportation user equilibrium analysis in congested networks [J]. *Swarm Intelligence*, 2013, 7(4): 255–277.
- [24] Crawford B, Soto R, Johnson F, et al. A max-min ant system algorithm to solve the software project scheduling problem [J]. *Expert Systems with Applications*, 2014, 41(15): 6 634–6 645.
- [25] 周勇, 陈洪亮. 蚁群算法的研究现状及其展望 [J]. *微型电脑应用*, 2002, 5(2): 23–25.  
Zhou Yong, Chen Hongliang. The status quo and foresight on ant colony algorithm [J]. *Microcomputer Applications*, 2002, 5(2): 23–25. (in Chinese)
- [26] 张煜东, 吴乐南, 韦耿. 基于正负反馈机制的蚁群算法用于软硬件划分 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2009, 23(8): 32–38.  
Zhang Yudong, Wu Lenan, Wei Gen. Application of improved ant colony algorithm based on forward/backward feedback in hardware/software partition [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2009, 23(8): 32–38. (in Chinese)
- [27] Ahmmed A, Rana M A A, Mahmudul Haque A A M, et al. A multiple ant colony system for dynamic vehicle routing problem with time window [C]//*Proceedings of the Convergence and Hybrid Information Technology, 2008 ICCIT'08 Third International Conference on*. Khulna, Bangladesh, 2008: 182–187.
- [28] Boltuzic F, Rakipovic A. A hybrid ant colony system approach for solving capacitated vehicle routing problems with time windows [C]//*Proceedings of the MIPRO, 2012 Proceedings of the 35th International Convention*. Opatija, Croatia, 2012: 1 758–1 762.
- [29] 何靖华, 肖人彬, 师汉民. 蚂蚁算法在机构同构判定中的实现 [J]. *模式识别与人工智能*, 2001, 14(4): 406–412.  
He Jinghua, Xiao Renbin, Shi Hanmin. Implementation of ant algorithm for isomorphism identification of mechanisms [J]. *PR&AI*, 2001, 14(4): 406–412. (in Chinese)
- [30] 张煜东, 吴乐南, 唐磊. 隶属云模型蚁群算法的新应用: 生鲜食品多阶段动态定价 [J]. *统计与决策*, 2009, 22: 26–29.  
Zhang Yudong, Wu Lenan, Tang Lei. Cloud model based ant colony algorithm for multi-period dynamic pricing of fresh foods [J]. *Statistics and Decision*, 2009, 22: 26–29. (in Chinese)
- [31] Wang S, Wu L, Zhang Y, et al. Ant colony algorithm used for bankruptcy prediction [C]//*Proceedings of the Information Science and Engineering (ISISE)*, 2009 Second International Symposium on. Shanghai, 2009: 137–139.
- [32] Qi C M, Li P. An exponential entropy-based hybrid ant colony algorithm for vehicle routing optimization [J]. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 2014, 8(6): 3 167–3 173.
- [33] Guerrero G D, Cecilia J M, Llanes A, et al. Comparative evaluation of platforms for parallel ant colony optimization [J]. *Journal of Supercomputing*, 2014, 69(1): 318–329.

[责任编辑: 严海琳]

(上接第16页)

- [8] 杨建飞, 胡育文. 永磁同步电机最优直接转矩控制 [J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(27): 109–115.  
Yang Jianfei, Hu Yuwen. Optimal direct torque control of permanent magnet synchronous motor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(27): 109–115. (in Chinese)
- [9] Jia Jun, Zhao Jie, Liu Dichen, et al. The study of optimal structure and value of dump resistance in direct-drive permanent magnet synchronous generators [J]. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2014, 2(4): 334–339.
- [10] Zhong L, Rahman M F, Hu Y W, et al. A direct torque controller for permanent magnet synchronous motor drives [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1999, 14(3): 637–642.

[责任编辑: 严海琳]