

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2017.10.014

# 基于空间矢量的同步磁阻电机直接转矩控制

解 良, 刘思贝, 姚文熙\*, 吕征宇

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 针对传统直接转矩控制由于采用滞环比较器对磁链和转矩进行直接控制, 导致磁链、转矩脉动较大和开关频率不固定等问题, 对同步磁阻电机直接转矩控制进行了研究, 开展了直接转矩控制的基本原理分析, 根据同步磁阻电机的数学模型, 提出了一种定子磁场定向下磁链和转矩双闭环 PI 控制结构的直接转矩控制方案, 采用空间矢量调制策略, 克服了传统直接转矩控制的缺点。利用 Matlab/Simulink 搭建了两种直接转矩控制方案的仿真模型, 并利用基于 dSPACE 的实验平台对该方案的低速性能进行实验研究, 研究表明: 相较于传统的直接转矩控制, 该方案能明显减小电机的转矩脉动并且能保持开关频率恒定, 能使电机在低速范围内具有良好的动态性能, 并且使得电机在低速范围内稳定运行, 证明了该方案的可行性和有效性。

**关键词:** 同步磁阻电机; 直接转矩控制; 空间矢量调制; 转矩脉动; 定子磁场定向

中图分类号: TH39; TM3

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)10-1156-06

## Direct torque control for synchronous reluctance motor based on space vector modulation

XIE Liang, LIU Si-bei, YAO Wen-xi, LV Zheng-yu

(School of Electric Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of large flux and torque ripples and variable switching frequency in conventional direct torque control (DTC) with a pair of hysteresis comparators to control motor stator flux and electromagnetic torque, the direct torque control of synchronous reluctance motor (SynRM) was studied. After the analysis of basic principle of DTC, a kind of direct torque control scheme of a double closed-loop flux and torque PI control under the stator field was presented according to the mathematical model of SynRM. The space vector modulation (SVM) was applied to the DTC. Matlab/Simulink simulation of two direct torque control schemes was established, and the low speed performance of SVM-DTC method was studied based on dSPACE experimental platform. The results indicate that the SVM-DTC method can dramatically decrease the flux and torque ripples with fixed switching frequency compared with the conventional DTC. In addition, the SVM-DTC method can make the motor have good dynamic performance in the low speed range and make the motor run smoothly in the low speed range, which proves the feasibility and effectiveness of the method.

**Key words:** synchronous reluctance motor (SynRM); direct torque control; space vector modulation; flux and torque ripples; stator flux oriented

## 0 引 言

同步磁阻电机 (SynRM) 本质上是一种具有磁阻性质的同步电机, 定子结构与传统感应电机相同, 由定

子绕组接通交流电源产生旋转磁场, 转子结构采用特殊形状的硅钢片叠压而成, 使得直交轴磁阻存在差异从而产生磁阻性质的电磁转矩。相比于异步电机, SynRM 没有转子绕组, 因此无转子铜损, 增加了电机效率, 温

收稿日期: 2017-02-19

作者简介: 解 良 (1992-), 男, 云南大理人, 硕士研究生, 主要从事同步磁阻电机直接转矩控制技术方面的研究。E-mail: 1318293334@qq.com

通信联系人: 姚文熙, 男, 副教授, 硕士生导师。E-mail: ywxi@zju.edu.cn

升不明显, 延长了电机寿命同时降低了维护成本<sup>[1]</sup>。相比于永磁同步电机, SynRM 转子无永磁体, 因此成本优势明显, 不存在永磁体退磁的危险, 同时能够宽转速范围运行, 不存在高速弱磁困难的问题<sup>[2]</sup>。以上 SynRM 的优点使得该电机具有良好的应用前景。

直接转矩控制方法最早是由 DEPENDROCK M 和 TAKAHASHI I<sup>[3-4]</sup>在 20 世纪 80 年代中期分别提出来的, 该方法去除矢量控制中的电流环节, 直接控制电机的转矩和定子磁链, 可以获得更好的动态性能。国内外许多文献对 DTC 在 SynRM 中的应用展开了研究。文献[5]最早实现了将传统 DTC 控制方法在 SynRM 中应用; 国内最早是由华中科技大学的辜承林教授团队从事对转子结构为 ALA 的 SynRM 的研究工作, 其中周立求博士<sup>[6]</sup>针对传统 DTC 方法在 SynRM 的控制做了细致的研究工作; 文献[7-8]对 SynRM 的 MTPA 和弱磁控制策略做了研究, 然而这些控制都建立在传统 DTC 的基础上。传统 DTC 存在转矩脉动大且逆变器开关频率不固定等问题<sup>[9]</sup>, 为解决传统 DTC 方法的缺点, 将空间矢量调制 (space vector modulation, SVM) 技术引入 DTC 是一个主要的研究方向<sup>[10-11]</sup>。文献[12]利用预测控制选择最优的电压矢量, 再通过 SVM, 对 SynRM 的磁链和转矩进行控制, 但该方法计算复杂, 不易实现; 文献[13]针对 SynRM 运行过程中的非线性, 利用反馈线性化的方法来对电机进行控制, 能同时对电机的控制策略进行调节, 但同样该方法操作起来比较困难; 文献[14]分析了 SynRM 转矩角和转矩的关系, 通过对电机转矩的比例调节, 得到所需可补偿的转矩角与相应的参考电压空间矢量, 能在一定程度上改善转矩和磁链脉动。

本文对 SynRM 展开研究, 在定子磁场定向的坐标系下, 建立定子磁链和转矩的双闭环控制, 利用两个 PI 控制器根据磁链和转矩的误差合成连续的大小和相位都任意可调的参考电压矢量, 结合空间矢量调制, 从而实现 SynRM 的 SVM-DTC 控制, 并通过仿真和实验对该方案的有效性进行验证。

### 1 传统 DTC 方案

传统 DTC 控制方案是建立在 SynRM 的  $\alpha\text{-}\beta$  静止坐标系下的, 先测量出电机端电压和电流, 通过坐标变换, 转换到两相静止坐标系。然后根据 SynRM 的数学模型计算出定子磁链、电磁转矩和转速。将计算出的定子磁链和转矩分别与给定的磁链和转矩相比较, 产生的误差通过滞环比较器, 得到误差的增减趋势, 误差符号连同磁链所在扇区的信号, 便可以通过查表的方法选择出合适的电压空间矢量, 从而实现电机的直接转矩控制。

传统 DTC 控制方案的原理如图 1 所示。

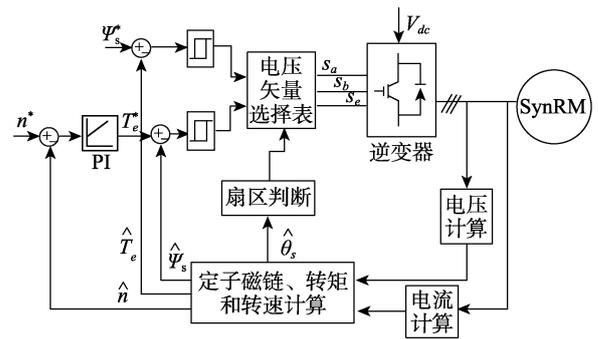


图 1 传统 DTC 控制原理

将 SynRM 的电磁转矩方程用磁链幅值  $|\psi_{\alpha\beta}|$  和磁链角度  $\delta$  表示, 得:

$$T_e = \frac{3}{4} n_p \left( \frac{1}{L_q} - \frac{1}{L_d} \right) |\psi_s|^2 \sin(2\delta) \quad (1)$$

式中:  $L_d, L_q$ —d、q 轴电感;  $n_p$ —电机极对数。

式(1)是 SynRM 直接转矩控制算法的基本表达式, 从式子中可以看出, 通过改变磁链幅值  $|\psi_{\alpha\beta}|$  和磁链角度  $\delta$ , 可以达到改变电机转矩的目的。

SynRM 在  $\alpha\text{-}\beta$  静止坐标下的电压方程为:

$$u_{\alpha\beta} = R_s i_{\alpha\beta} + \frac{d\psi_{\alpha\beta}}{dt} \quad (2)$$

式中:  $R_s$ —定子电阻;  $u_{\alpha\beta}$ —定子电压;  $i_{\alpha\beta}$ —定子电流;  $\psi_{\alpha\beta}$ —定子磁链。

由式(2)可以得到定子磁链的计算公式, 即:

$$\psi_{\alpha\beta} = \int (u_{\alpha\beta} - R_s i_{\alpha\beta}) dt \quad (3)$$

若忽略定子电阻压降, 式(3)的离散形式为:

$$\psi_{\alpha\beta}(t_{k+1}) = \psi_{\alpha\beta}(t_k) + u_{\alpha\beta}(t_k) \Delta t \quad (4)$$

式(4)表明: 在  $\Delta t$  时间内, 定子磁链矢量的顶部沿电压矢量的方向移动。根据定子磁链所在扇区, 可以选择合适的电压矢量, 使得定子磁链幅值及电磁转矩增大或减小, 不同电压空间矢量对磁链和转矩的影响如图 2 所示。

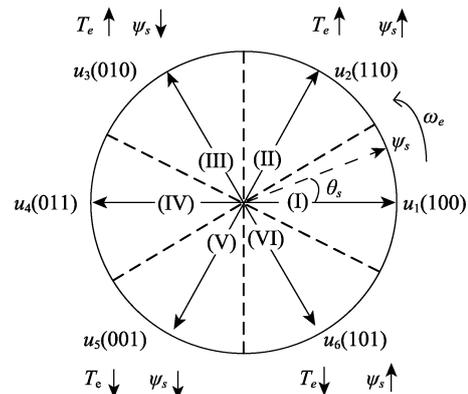


图 2 电压空间矢量对磁链和转矩的影响

假设某时刻定子磁链矢量位于区域 1 中,若定子磁链逆时针沿圆周运动,则磁链幅值保持不变。可见,当施加电压矢量  $u_1$ 、 $u_2$  和  $u_6$  时,定子磁链幅值将增大;而施加电压矢量  $u_3$ 、 $u_4$  和  $u_5$  时,定子磁链幅值将减小;若加入零矢量,则定子磁链不变。由于选择  $u_1$  和  $u_4$  时会使定子磁链幅值急剧变化,不利于控制,在区域 1 中可供选择的电压矢量为  $u_2$ 、 $u_3$ 、 $u_5$ 、 $u_6$  以及两个零矢量。假设定子磁链逆时针旋转,因此选择电压矢量  $u_2$  和  $u_3$  将使定子磁链角度增大,即转矩增大;而电压矢量  $u_5$  和  $u_6$  将使定子磁链角度减小,即转矩减小。定子磁链矢量位于其他区域中时,也可以根据以上的分析来选择电压矢量选择表。

## 2 基于空间矢量调制的 DTC 方案

传统 DTC 在每个控制周期中根据滞环比较器的输出,只区分磁链和转矩的误差方向,忽略了误差的大小,从而造成选择的矢量调节力度过大或过小。而且由于只有 6 个有效电压矢量,通过电压矢量选择表选择的矢量在整个开关周期内都起作用,调节效果不够精细,无法在一个周期中准确补偿磁链和转矩误差,因此导致磁链和转矩脉动大、开关频率不固定以及低速性能不好等问题。

SVM-DTC 控制原理图如图 3 所示。

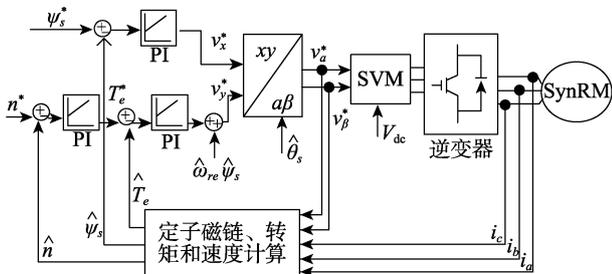


图 3 SVM-DTC 控制原理

SVM-DTC 方案是在定子磁场定向坐标系下实现的,采用两个 PI 控制器代替传统 DTC 中的滞环比较器,将计算出的磁链幅值和转矩分别与给定磁链幅值和转速外环输出的参考转矩作比较,根据磁链和转矩误差来实时合成任意的电压矢量,再利用空间矢量调制技术来代替传统 DTC 中的电压矢量选择表来驱动逆变器,从而可以有效减少磁链和转矩脉动,并且使得开关频率固定。

SynRM 在  $d$ - $q$  轴系下的数学方程为:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d - \omega_e L_q i_q + L_d p i_d \\ u_q = R_s i_q + \omega_e L_d i_d + L_q p i_q \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $u_d$ 、 $u_q$ —SynRM 的  $d$ 、 $q$  轴定子电压;  $i_d$ 、 $i_q$ —

SynRM 的  $d$ 、 $q$  轴定子电流;  $\omega_e$ —定子磁链电角速度。

SynRM 电机在稳态运行状态下的 3 种坐标系如图 4 所示。

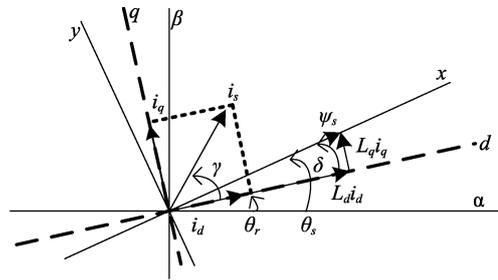


图 4 SynRM 空间坐标系和矢量图

$d$ - $q$  旋转坐标系的  $d$  轴与转子凸极轴线重合,  $q$  轴沿旋转方向超前  $d$  轴  $90^\circ$ , 坐标轴随电机转子以同步速度旋转;  $\alpha$ - $\beta$  静止参考坐标系, 其  $\alpha$  轴与  $A$  相重合,  $\beta$  轴沿旋转方向超前  $\alpha$  轴  $90^\circ$ ;  $x$ - $y$  为与定子磁链  $\psi_s$  同步的旋转坐标系,  $x$  轴沿定子磁链矢量的方向,  $y$  轴沿旋转方向超前  $x$  轴  $90^\circ$ 。  $\theta_r$  和  $\theta_s$  分别为转子位置角和定子磁链角,  $\delta$  和  $\gamma$  分别为转矩角和电流角。

根据图 3 可得到电压分量从  $d$ - $q$  旋转坐标系变换到定子磁链坐标系  $x$ - $y$  的变换式为:

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_d \\ F_q \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中:  $F_d$ 、 $F_q$ —电机相关变量  $F$  在  $d$ - $q$  坐标系中的分量;  $F_x$ 、 $F_y$ —变量  $F$  在  $x$ - $y$  坐标系中的分量。

在  $xy$  坐标系下,  $\psi_s = \psi_x$ ,  $\psi_y = 0$ , 转矩角  $\delta = \theta_s - \theta_r$ , 由此可以得到转矩和定子电压方程为:

$$T_e = \frac{3}{2} n_p |\psi_s| i_y \quad (7)$$

$$v_x = R_s i_x + \frac{d\psi_x}{dt} = R_s i_x + \frac{d|\psi_s|}{dt} \quad (8)$$

$$v_y = R_s i_y + \omega_e \psi_x = R_s i_y + \left( \frac{d\delta}{dt} + \omega_{re} \right) |\psi_s| \quad (9)$$

式中:  $v_x$ 、 $v_y$ —SynRM 的定子电压在  $x$ - $y$  坐标下的分量;  $i_x$ 、 $i_y$ —SynRM 的定子电流在  $x$ - $y$  坐标下的分量;  $\omega_{re}$ —转子旋转电角速度。

由式 (8) 可知, 如果忽略定子电阻压降, 电压在  $x$  轴上的分量  $v_x$  可以直接决定定子磁链幅值的变化; 由式 (1) 和式 (7) 可以看出, 当磁链幅值恒定时, 转矩的大小与转矩角  $\delta$  有关, 转矩正比于  $y$  轴电流  $i_y$ , 因此结合式 (9) 可知, 电压在  $y$  轴上的分量  $v_y$  可以控制电机转矩大小的变化。

从上述分析可知, 在定子磁场定向坐标系下, 通过控制定子电压分量  $v_x$  和  $v_y$  可实现对磁链和转矩的控制。

### 3 仿真和实验

为验证本文所建立的 SVM-DTC 方案的正确性, 笔者利用 Matlab/Simulink 和 dSPACE 建立传统 DTC 和 SVM-DTC 的仿真模型和实验平台, 不考虑饱和等非线性因素的影响, SynRM 的参数如表 1 所示。

表 1 SynRM 主要参数

名称	数值
额定功率/W	2 200
定子电阻/ $\Omega$	0.75
额定线电压/V	380
额定电流/A	5.7
极对数 $n_p$	2
$d$ 轴电感 $L_d$ /H	0.23
$q$ 轴电感 $L_q$ /H	0.03
转动惯量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$	0.007 1

#### 3.1 仿真研究

仿真时, 给定定子磁链幅值为 1 Wb, 直流侧电压  $U_{dc}=540\text{ V}$ , 逆变器开关频率为 6 kHz, 系统采样周期为 12 kHz。传统 DTC 仿真转矩滞环宽度设为 0.05 N·m, 磁链滞环宽度为 0.001 Wb。SVM-DTC 磁链环的 PI 参数设为  $k_{p_\psi}=300$ ,  $k_{i_\psi}=50$ ; 转矩环的 PI 参数设为  $k_{p_{T_e}}=48$ ,  $k_{i_{T_e}}=270$ 。电机在速度给定为 1 000 r/min, 两种控制算法空载启动的仿真波形如图 5 所示。

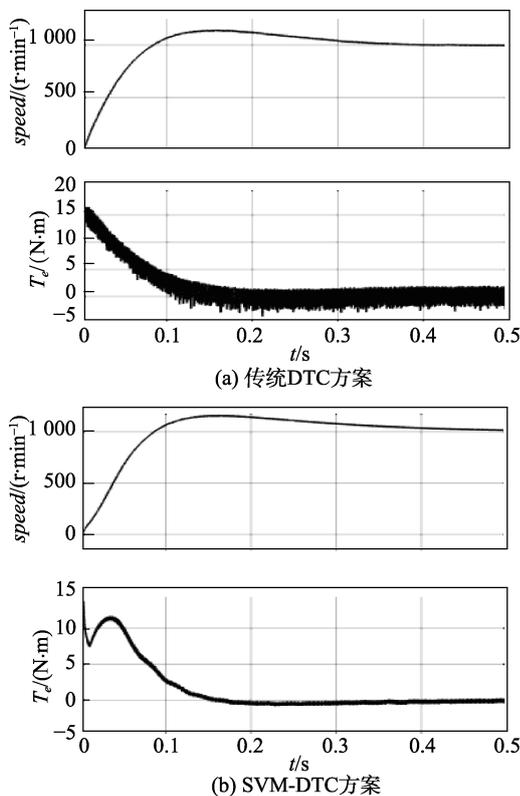


图 5 空载启动时两种方案的转速和转矩仿真波形

两种算法都能使 SynRM 在空载情况下迅速起动, SVM-DTC 的起动时间与传统 DTC 相差不大, 但转矩脉动明显减小。

#### 3.2 实验研究

为了研究本文所设计的 SVM-DTC 方案在无位置传感器控制下的低速性能, 笔者在基于 dSPACE 的 SynRM 实验平台上, 对 SVM-DTC 方案在低速范围内的控制性能做实验分析, 实验平台如图 6 所示。

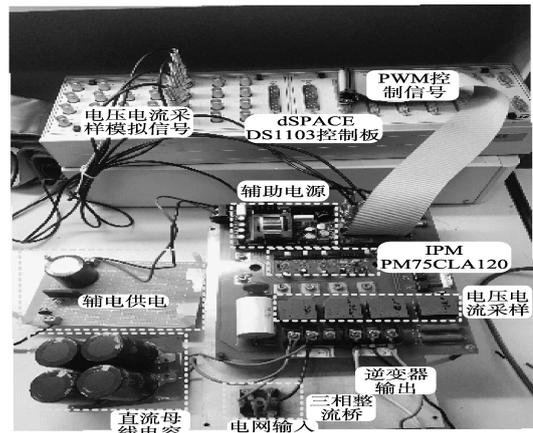


图 6 实验平台

SynRM 空载时给定转速由 60 r/min (2 Hz) 跳变到 120 r/min (4 Hz) 时计算出的转速动态响应波形如图 7 所示。

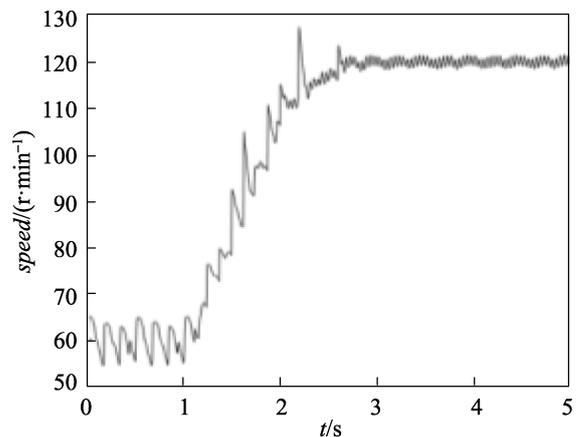
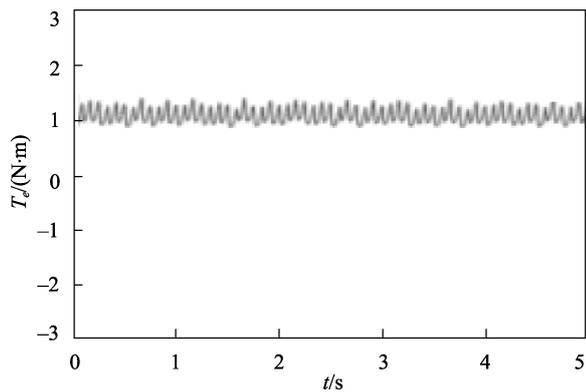


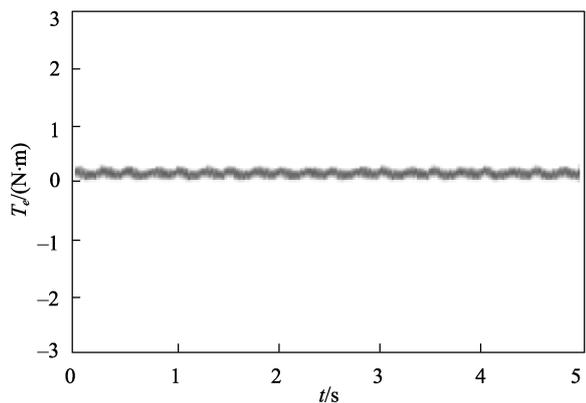
图 7 转速跳变时转速响应实验波形

由于实验时速度给定不是理想的阶跃跳变, 电机大约经过 1.5 s 的时间到达速度给定值, 跳变过程中速度计算存在一定的尖刺, 但最终电机能稳定运行在给定转速。

电机空载运行时, 转速在 60 r/min (2 Hz) 和 120 r/min (4 Hz) 稳定时计算出的转矩和定子电流实验波形如图 8、图 9 所示。

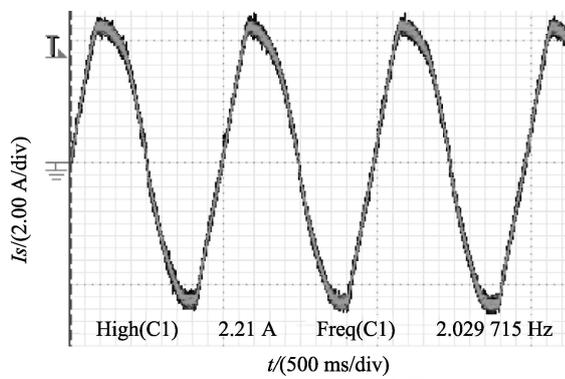


(a) 转速为60 r/min时的转矩

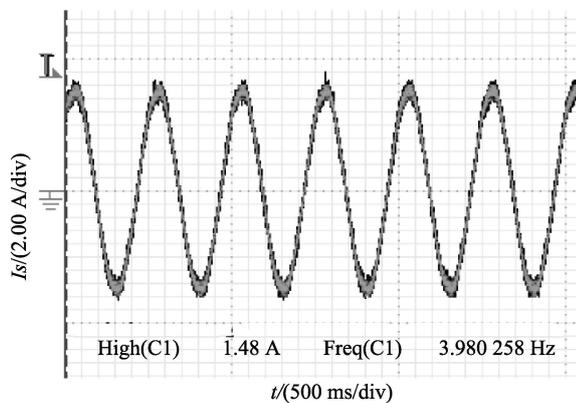


(b) 转速为120 r/min时的转矩

图 8 稳态时计算出的转矩实验波形



(a) 转速为60 r/min时的定子电流



(b) 转速为120 r/min时的定子电流

图 9 稳态时定子电流实验波形

从实验结果可以看出,当电机转速为 60 r/min 时,往往低速时无速度传感器控制的磁链观测比较困难,由此导致 SVM-DTC 的磁场定向不准,存在一定的无功电流,从而使得定子电流比电机转速为 120 r/min 时的定子电流大,此时定子电流存在一定的畸变;同时计算出的转矩值存在一定的误差,转矩脉动较大,但电机转速能稳定的维持在给定转速。当电机转速上升到 120 r/min 时,此时磁链的观测趋于准确,磁场定向也比较准确,因此计算出的电机转速和转矩值都比较准确,同时转矩脉动较小,定子电流波形也比较正弦。实验结果表明了 SVM-DTC 能够使得 SynRM 在低速范围内稳定运行,证明了该方案的有效性。

### 4 结束语

本文对具有良好应用前景的同步磁阻电机展开了研究,分析了直接转矩控制的基本原理,根据同步磁阻电机的数学模型,提出了一种定子磁场定向下磁链和转矩双闭环控制结构的直接转矩控制方案,利用两个 PI 控制器根据磁链和转矩的误差合成连续的大小和相位都任意可调的参考电压矢量,结合空间矢量调制策略,克服了传统 DTC 的缺点。笔者利用 Matlab/Simulink 建立了两种直接转矩控制方案的仿真模型,通过仿真实验,表明 SVM-DTC 能明显减小转矩脉动,并使得开关频率恒定。搭建了基于 dSPACE 的同步磁阻电机直接转矩控制实验平台,对 SynRM 在 SVM-DTC 控制下的低速性能做了实验研究,实验结果表明该方案能使得电机在低速范围内具有良好的动态性能,并能使电机稳定地运行在速度给定值,证明了该方案的可行性和有效性。

### 参考文献(References):

- [1] BOGLIETTI A, PASTORELLI M. Induction and synchronous reluctance motors comparison [C].Conference of the IEEE Industrial Electronics Society , Porto :IEEE, 2009.
- [2] ZHU Z Q, GUAN Y, ZHU Z Q, et al. Design of synchronous reluctance and permanent magnet synchronous reluctance machines for electric vehicle application[J]. **COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering**, 2016, 35(2): 586-606.
- [3] DEPENBROCK M. Direct self-control (DSC) of inverter-fed induction machine[J]. **IEEE transactions on power electronics**, 1988, 3(4): 420-429.

- [4] TAKAHASHI I, NOGUCHI T. A new quick-response and high- efficiency control strategy of an induction motor[J]. **IEEE Transactions on Industry applications**, 1986(5): 820- 827.
- [5] LAGERQUIST R, BOLDEA I, MILLER T J. Sensorless-control of the synchronous reluctance motor[J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 1994, 30(3): 673-682.
- [6] 周立求, 朱建华, 辜承林. 轴向叠片各向异性转子同步磁阻电机直接转矩控制的研究[J]. **中国电机工程学报**, 2006, 26(4): 154-158.
- [7] BOLOGNANI S, PERETTI L, ZIGLIOTTO M. Online MTPA control strategy for DTC synchronous-reluctance-Motor drives[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2011, 26(1): 20-28.
- [8] INOUE Y, MORIMOTO S, SANADA M. A novel control scheme for maximum power operation of synchronous reluctance motors including maximum torque per flux control[J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2009, 47(1): 115-121.
- [9] 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**, 2008, 23(11): 47-52.
- [10] BUJA G S, KAZMIERKOWSKI M P. Direct torque control of PWM inverter-fed AC motors-a survey[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2004, 51(4): 744-757.
- [11] 张华强, 王新生, 魏鹏飞, 等. 基于空间矢量调制的直接转矩控制算法研究[J]. **电机与控制学报**, 2012, 16(6): 13-18.
- [12] CAPORAL R M, PACAS M. Encoderless predictive direct torque control for synchronous reluctance machines at very low and zero speed[J]. **Industrial Electronics IEEE Transactions on**, 2008, 55(12): 4408-4416.
- [13] ZARCHI H A, MARKADEH G R A, SOLTANI J. Direct torque and flux regulation of synchronous reluctance motor drives based on input-output feedback linearization[J]. **Energy Conversion & Management**, 2010, 51(1): 71-80.
- [14] 贺小玉. 基于 dSPACE 的 ALA 转子电机直接转矩控制系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学电气与电子工程学院, 2012.

[编辑: 李 辉]

#### 本文引用格式:

解 良, 刘思贝, 姚文熙, 等. 基于空间矢量的同步磁阻电机直接转矩控制[J]. **机电工程**, 2017, 34(10): 1156-1161.

XIE Liang, LIU Si-bei, YAO Wen-xi, et al. Direct torque control for synchronous reluctance motor based on space vector modulation[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017, 34(10): 1156-1161. 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 1137 页)

(4) 本研究的研究方法和思路, 可减少实际生产成本, 也为同类研究提供了参考。

#### 参考文献(References):

- [1] 陆剑雄, 张福昌, 申利民. 坐姿与座椅设计的人机工程学探讨[J]. **人类工效学杂志**, 2005, 11(4): 44-46.
- [2] 孙琳琳. 汽车座椅舒适度的创新设计及其主客观评价研究[D]. 长春: 吉林大学机械科学与工程学院, 2014.
- [3] 杨庆乐. 基于 ANSYS/FE-SAFE 的强夯机臂架疲劳寿命分析[D]. 大连: 大连理工大学机械工程学院, 2010.
- [4] 蔡 欢, 秦宝荣, 王郑兴, 等. 办公室休闲椅折叠式搁脚机构的开发[J]. **机械设计与研究**, 2015, 31(1): 157-164.
- [5] 段立江. 休闲椅机械装置的设计及研究[D]. 杭州: 浙江工业大学机械工程学院, 2015.
- [6] 陈蓉蓉. 基于维持健康坐姿的工作椅设计研究[D]. 杭州市: 浙江大学计算机科学与技术学院, 2007.
- [7] 周 辉. 电动老人椅的结构设计与研究[D]. 杭州: 浙江工业大学机械工程学院, 2015.
- [8] 张冬冬, 秦宝荣, 王郑兴, 等. 秋千式办公休闲椅的设计及其力学性能研究[J]. **机械强度**, 2017, 39(1): 235-238.
- [9] 赵会民, 赵掌焰, 钟茗秋. 基于虚拟样机的起重门架结构疲劳仿真研究[J]. **武汉理工大学学报**, 2015, 37(10): 85-89.
- [10] MAIJER D M, GAO Y X, LEE P D, et al. A throughprocess model of an A356 brake caliper for fatigue life prediction[J]. **Metallurgical and Materials Transactions A**, 2004, 35(10): 3275-3288.

[编辑: 李 辉]