

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2015.04.017

# 开关磁阻电动机直接瞬时转矩控制系统的设计与仿真\*

高 营, 王家军\*, 杨森峰

(杭州电子科技大学 自动化学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 针对开关磁阻电动机转矩脉动问题, 将直接瞬时转矩控制方法应用于开关磁阻电动机的转矩控制。基于四相8/6极开关磁阻电动机, 给出了其速度控制系统的设计。在 Matlab/Simulink 环境下, 利用基本模块建立了开关磁阻电动机的直接瞬时转矩控制仿真模型。为了实现转矩的反馈, 构建了转矩、电流和位置之间的二维表  $T(i, \theta)$ 。最后, 结合速度 PID 控制器, 对开关磁阻电动机的直接瞬时转矩方案进行了仿真研究。研究表明, 直接瞬时转矩控制能有效地减小转矩脉动, 而且能够提升开关磁阻电动机的动、静态工作性能, 对开关磁阻电动机是一种有效的控制方法。

**关键词:** 开关磁阻电动机; 直接瞬时转矩控制; 滞环控制器; 转矩脉动抑制

**中图分类号:** TM352; TH39      **文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-4551(2015)04-0521-06

## Direct instantaneous torque control system of switched reluctance motor

GAO Ying, WANG Jia-jun, YANG Sen-feng

(School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Aiming at the torque ripple problem, direct instantaneous torque control was applied to switched reluctance motor. Speed control system was designed on the basis of four phase 8/6 switched reluctance motor(SRM). Then the direct instantaneous torque control (DITC) system is built using Matlab/Simulink. A 2-D lookup table  $T(i, \theta)$  in Matlab/Simulink was built to obtain the feedback torque. Finally, the model was simulated by using of speed PID controller. The results show that the DITC which is considered as an effective control method can not only reduce the torque ripple effectively but also enhance the dynamic and static performance of SRM.

**Key words:** switched reluctance motor(SRM); direct instantaneous torque control(DITC); hysteresis controller; torque ripple restrain

## 0 引 言

开关磁阻电动机(SRM)具有结构简单、起动转矩大、运行可靠、调速范围宽以及成本低廉等优点, 是一种十分具有发展潜力的新一代调速电机<sup>[1]</sup>。相对于传统的交流电动机, 开关磁阻电动机定转子的双凸极结构、磁场的高饱和特性与功率驱动电路开关式供电方

式使得开关磁阻电动机具有较大的转矩脉动。在低速运转时, 转矩脉动将导致速度震荡并且可能激发起传动系统中机械部件的共振<sup>[2]</sup>。从机械结构设计的角度来抑制转矩脉动时, 设计成本比较高并且难度大。因此, 如何从控制的角度上降低转矩脉动是人们研究的重点之一。

SRM 的 3 种基本控制方法即电流斩波控制(CCC)、电压斩波控制(CVC)和角度位置控制(APC),

收稿日期: 2014-11-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61273086); 浙江省自然科学基金资助项目(LY12E07001)

作者简介: 高 营(1989-), 男, 山东临沂人, 主要从事开关磁阻电机控制方面的研究. E-mail: ying\_gao2014@163.com

通信联系人: 王家军, 男, 博士, 教授, 硕士生导师. E-mail: wangjiajun@hdu.edu.cn

它们分别针对 3 种不同的可控量:相电流、相电压、开关角,这 3 种控制方式都是通过间接的方式控制转矩,对转矩脉动的抑制十分有限<sup>[3]</sup>。目前,解决 SRM 转矩脉动问题应用最为广泛的控制方法是把转矩当做直接控制变量。本研究将直接瞬时转矩控制(DITC)方法应用于 SRM 的转矩控制。DITC 方法直接控制任意时刻的瞬时转矩,这就避免了优化电流波形所需的复杂算法<sup>[4]</sup>。

针对四相 8/6 极开关磁阻电动机,本研究给出 DITC 控制方案详细的设计过程,并依据该控制方案,实现 SRM 的速度控制仿真。

## 1 SRM 直接瞬时转矩控制系统的设计

### 1.1 SRM 的转矩特性

SRM 的运行原理为“磁阻最小原理”,即磁通总是沿着磁阻最小的路径闭合,通过磁力线扭曲产生的磁阻性质的电磁转矩使电机转动<sup>[5]</sup>。当忽略磁场饱和以及相互耦合的影响时,电磁转矩与相电流和电感对转子位置角的斜率有关。电磁转矩的方程可以表示为:

$$T(i, \theta) = \frac{1}{2} i^2(t) \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (1)$$

式中:  $T(i, \theta)$ —转矩,  $i(t)$ —相电流,  $L(\theta)$ —电感,  $\theta$ —转子位置角。

根据式(1)可知:电流是以平方的形式存在的,故电流的方向并不会影响转矩的方向,仅有电感对转子位置角斜率的正、负,来决定电磁转矩的方向。因此,只要在电感上升的区间打开功率驱动电路开关,即可获得正的电磁转矩。上述理论分析为各相导通角的选择提供了依据。

### 1.2 DITC 控制原理

DITC 最重要的特点是把瞬时转矩作为直接控制变量,根据速度环所产生的参考转矩与反馈转矩之间的偏差,来选择各导通相的状态即开通和关断,以实现瞬时转矩的控制<sup>[6]</sup>。

DITC 控制系统框图如图 1 所示。

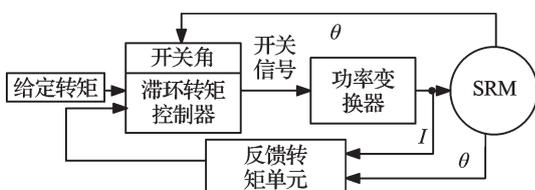


图1 开关磁阻电动机DITC系统框图

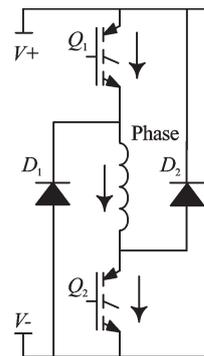
### 1.3 功率变换电路与各相导通区间选择

SRM 传统控制方式一般采用“硬开关”的功率变换模式,电路仅含有“ $S=1$ ”和“ $S=-1$ ”两种开关状

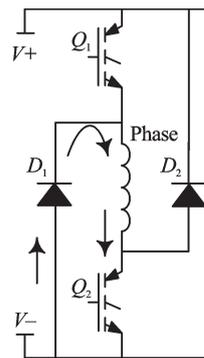
态。这种功率变换模式电流的脉动大,以至于转矩脉动较大。针对以上功率变换模式的缺点,在众多开关磁阻电动机的功率变换电路中,本研究选用了既简单可靠又可以对各相之间完全独立控制的经典不对称半桥回路。

SRM 功率驱动电路“软开关”模式,开关分为  $S=1$ 、 $S=0$  和  $S=-1$  共 3 种状态<sup>[7]</sup>。

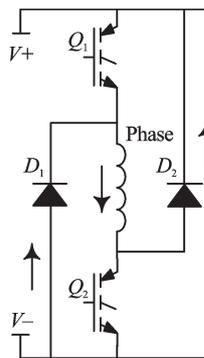
一相电路的 3 种开关状态如图 2 所示。



(a) “s=1”状态



(b) “s=0”状态



(c) “s=-1”状态

图2 功率变换电路的 3 种状态

(1)  $S=1$  代表上、下桥臂开关都导通,母线电压经过开关施加在绕组上,使绕组承受正压。

(2)  $S=0$  代表上桥臂开关断开,下桥臂开关导通,绕组与二极管  $D_1$ 、下桥臂开关形成闭合回路,绕组电压为零;此时处于续流状态,该状态的加入使得电流波动减小,有利于降低 SRM 转矩脉动。

(3)  $S = -1$  代表上、下桥臂开关都断开,绕组通过二极管  $D_1$ 、 $D_2$  续流,绕组承受负压。

根据四相 8/6 极 SRM 的结构,在对四相绕组轮流通电时,每一相导通过程转子转过  $15^\circ$  的机械角度。因此,可设置四相开关磁阻电动机的相导通循环周期为  $60^\circ$ 。由此可知,只要在  $0^\circ \sim 60^\circ$  之间确定相应的各相通断角度,即可以获得电机整个周期各相的通断角度。

在实际测量 SRM 的运行参数时,本研究设定了电机 A 相定子与转子之间的非对齐位置为  $0^\circ$ ,对齐位置为  $30^\circ$ 。同时,为了在换相时增加触发效率以及尽量减小转矩脉动,本研究设定换相重叠角为  $5^\circ$ 。因此,在  $0^\circ \sim 60^\circ$  相导通循环周期内可设置 A 相的导通区间为  $[39^\circ \sim 59^\circ]$ , B 相的导通区间为  $[0^\circ \sim 14^\circ]$ 、 $[54^\circ \sim 60^\circ]$ , C 相的导通区间为  $[9^\circ \sim 29^\circ]$ , D 相的导通区间为  $[24^\circ \sim 44^\circ]$ 。各相的开关角如图 3 所示。

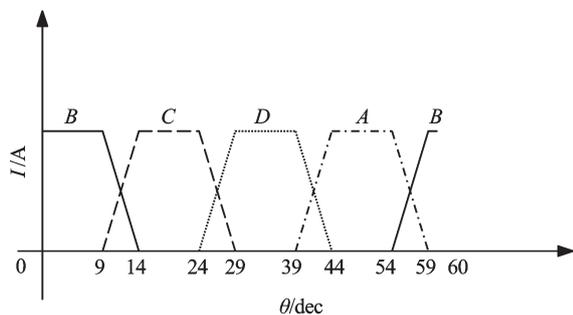


图3 定子各相开关角度

#### 1.4 滞环控制的设计

DITC 的核心是滞环控制的设计,本研究采用的是内外双滞环控制。其工作原理是根据转矩偏差(参考转矩与瞬时转矩的差值)的大小选择滞环区间,来实现对于 SRM 瞬时转矩的控制<sup>[8]</sup>。转矩偏差在不同的区间时,滞环设计也是有所不同的。根据开关磁阻电动机的导通模式,可将滞环控制分为两个运行状态,即单相导通状态和换相过程。

单相导通时,只有一相被激励。以某一相为当前相,该相可能有 3 种控制状态即  $S = 1$ 、 $S = 0$  以及  $S = -1$ 。单相导通时滞环控制设计:

(1) 在转矩偏差值  $\Delta T$  减小方向,偏差值大于  $-\Delta T_{\min}$  时,  $S = 1$  为当前相绕组提供正电压,从而保证有足够大的瞬时转矩输出;偏差值小于  $-\Delta T_{\min}$  时,此时瞬时转矩值过大,  $S = 0$  使当前相处于续流状态,降低瞬时转矩输出。

(2) 在转矩偏差值  $\Delta T$  增大方向,偏差值小于  $\Delta T_{\min}$  时,  $S = 0$  时当前相所加电压为零,续流状态使瞬时转矩得以保持;大于  $\Delta T_{\min}$  时,  $S = 1$  瞬时转矩值过小

需要给当前相施加正电压,来提高瞬时转矩输出。

处于单相导通区域时,DITC 通过控制功率变换电路,使瞬时转矩能够跟随参考转矩移动的同时,把转矩偏差控制在滞环内。

单相导通区域滞环控制的设计如图 4 所示。

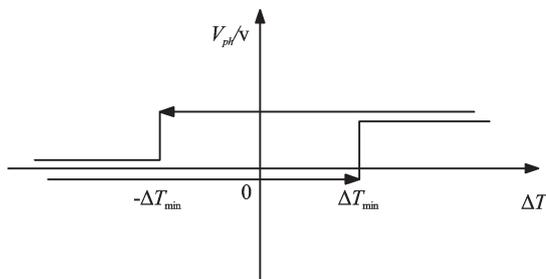


图4 单相导通区域滞环控制设计

两相同时导通区域为换相区,这个阶段瞬时转矩的控制相对于单相导通时要较为复杂,此时的总转矩是由当前导通相和即将导通相共同作用而产生的。在这个阶段研究者希望即将导通相产生的转矩能逐渐取代当前导通相产生转矩,为了达到这个目的应遵循下一相优先原则<sup>[9]</sup>。

换相区域时,当前导通相、即将导通相两相同样可能出现 3 种控制状态。对于即将导通相的控制策略,同单相导通时(如图 4 所示)相同,此处不再赘述。当前导通相在换相区域的滞环设计:

(1) 在转矩偏差值  $\Delta T$  减小方向,偏差值大于零时,  $S = 1$  给该相励磁以保证有足够的瞬时转矩输出;转矩偏差值在  $-\Delta T_{\max} \sim 0$  之间时,  $S = 0$  该相处于续流状态,结合图 4 可知此时电磁转矩主要靠即将导通相输出,符合下一相优先原则;转矩偏差值小于  $-\Delta T_{\max}$  时,此时瞬时转矩过大,为了尽快减小总的瞬时转矩值,令当前导通相  $S = -1$ ,施加反向电压迅速关掉当前导通相。

(2) 在转矩偏差值  $\Delta T$  增大方向,转矩偏差值小于零时,此时瞬时转矩偏大,令当前导通相  $S = -1$  不提供转矩,主要依靠即将导通相来提供转矩;转矩偏差值在零到  $\Delta T_{\max}$  时,瞬时转矩略小于参考值,  $S = 0$  使当前导通相工作在续流状态,以备瞬时转矩继续减小时得以开启,增加瞬时转矩输出;转矩偏差值大于  $\Delta T_{\max}$ ,  $S = 1$  瞬时转矩值过小必须当前导通相、即将导通相两相同时励磁,快速增加总转矩输出<sup>[10]</sup>。换相区域当前导通相与即将导通相的滞环设计如图 5 所示。

#### 1.5 $T(i, \theta)$ 转矩

瞬时输出转矩的检测精度,直接影响直接瞬时转矩控制的性能。由于开关磁阻电动机的转矩、相电流以及转子位置角度之间没有直接的函数关系。因此,

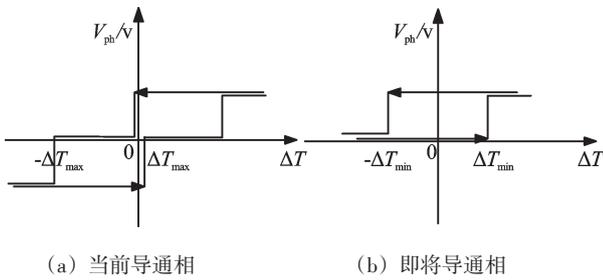


图 5 换相区域的滞环设计

根据这种特征选择查找表法是一种很好的在线获得反馈转矩的方法。

转矩查找表  $T(i, \theta)$  基本的特征是依赖于转子的位置角度以及相电流,如果能够得到精确连续的转子位置信号和准确的相电流值,通过查表  $T(i, \theta)$  (此表由实际测量 SRM 静态数据所得,相关电机参数如表 1 所示。即可获得相应的反馈转矩值。

表 1 仿真参数的设定值

参数名称	设定值	参数名称	设定值
阻尼系数/(N·m·s)	0.000 02	定子阻值/ $\Omega$	0.18
额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	2 000	最大电流/A	7
最小/最大电感/mH	7.5/80	电机功率/kw	0.37
转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	0.000 2	最大磁链/(V·s)	0.27

$T(i, \theta)$  即相电流、转子位置角度以及瞬时转矩之间的对应关系图如图 6 所示。

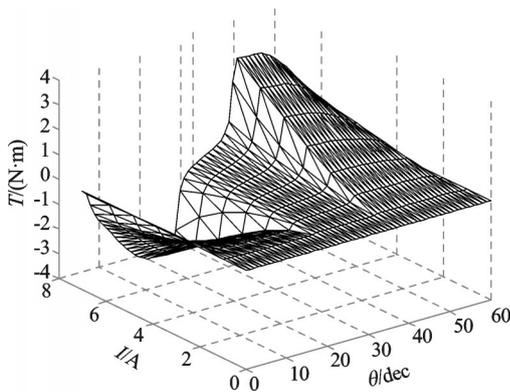


图 6 瞬时转矩、相电流与转子位置角对应关系图

## 2 DITC 控制系统仿真设计

四相 8/6 极 SRM 直接瞬时转矩控制系统的模型中 SRM、Converter 与 Theta 模块分别是电动机本体、功率变换器以及角度转换单元,3 个模块构成转矩闭环。控制系统根据转矩偏差,对各导通相施加相应的控制,使瞬时转矩跟随参考转矩变化。

整个仿真系统如图 7 所示。

本研究根据建立的 SRM 直接瞬时转矩控制系统仿真模型,设定仿真系统的参数值(如表 1 所示)。

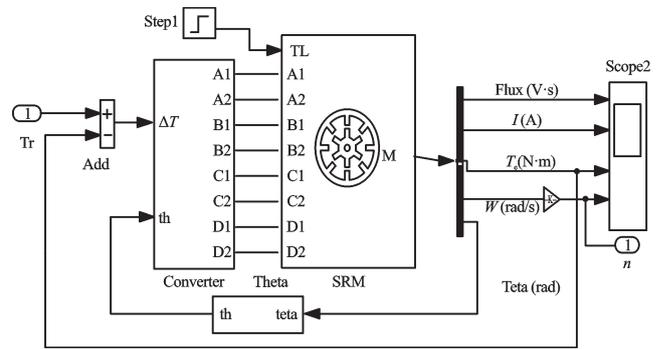


图 7 转矩闭环仿真系统

如前所述,四相 8/6 极 SRM 的相导通循环周期为 60°。为方便实现对电机连续的周期(0°~360°)控制,可以把转子位置角度转化到 0°~60°这个相导通循环周期范围内,再确定各相的通断情况。Theta 单元的作用即是完成角度转换这个功能。

底层结构如图 8 所示。

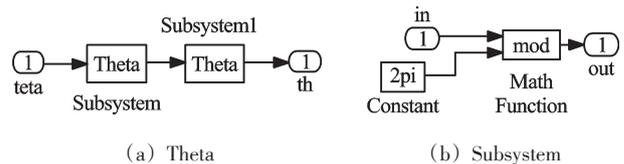


图 8 转子位置角度转换单元

功率变换器 Converter 中的 Matlab Function 即为滞环控制部分,它的输入变量有 3 个即转矩偏差、转矩偏差对时间的导数(确定偏差变化的方向)以及转子的位置角度。转矩滞环控制单元根据 3 个输入变量确定相应功率驱动单元的控制信号。滞环控制设计部分以及角度分配部分已详细说明其工作过程,此处不再赘述。Converter 的内部结构如图 9 所示,其中, BR\_CONVX 为功率变换电路,具体的仿真结构如图 10 所示。

要实现 DITC 控制系统仿真,必须把建立的转矩查找表  $T(i, \theta)$  导入到仿真 SRM 中。本研究通过测得相电

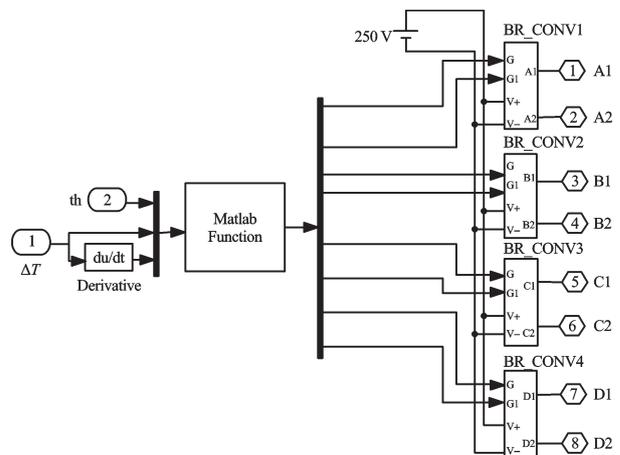


图 9 Converter 的内部结构

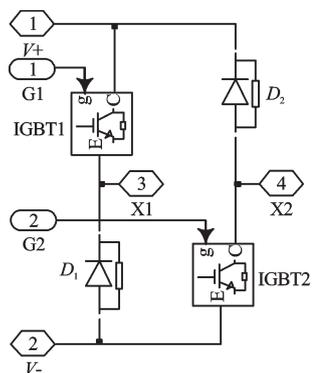


图10 BR\_CONVX功率变换电路仿真模型

流以及转子位置角,查表  $T(i, \theta)$  获得相应的瞬时转矩值。在仿真SRM中,表ITBL作用为由磁链以及转子位置角输入,获得相电流的输出;表TTBL的作用为由相电流以及转子位置角的输入,获得瞬时转矩的输出。

SRM内部仿真电路如图11所示。

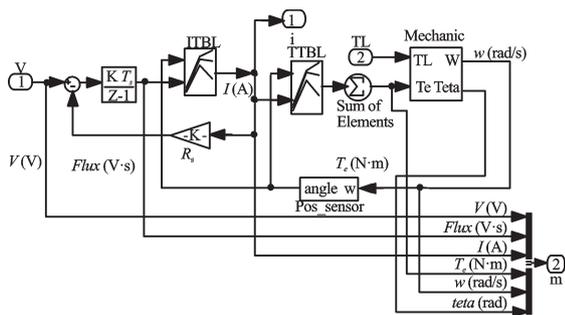


图11 SRM内部仿真模型

为验证四相8/6极SRM直接瞬时转矩控制系统的有效性,本研究利用速度PID控制器的输出,为转矩闭环仿真系统提供参考转矩。速度PID控制器仿真结构图如图12所示。

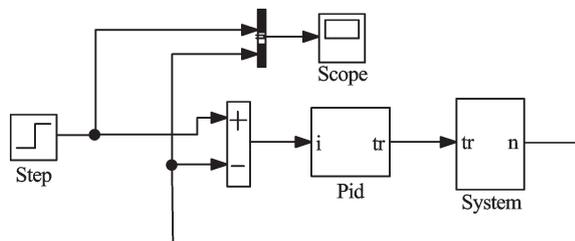


图12 外转速闭环仿真结构图

System—SRM和转矩直接瞬时转矩控制环节

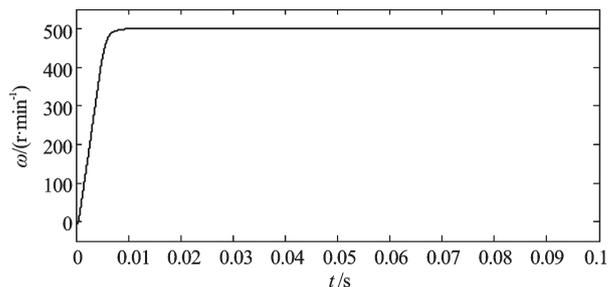
### 3 仿真结果与分析

本研究在设计部分建立的仿真模型上,选取一组仿真运行参数:转速500 r/min,负载转矩0.5 N·m,直流母线电压250 V,最大转矩为2.5 N·m,转矩控制器内外滞环限分别为0.02和0.03(其中内滞环限  $\Delta T_{min}$  以

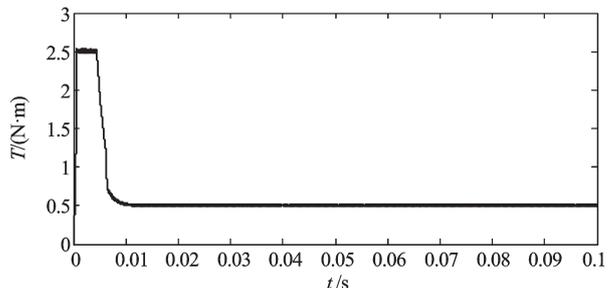
及外滞环限  $\Delta T_{max}$  为多次仿真所得经验值)。仿真结果与分析如下:

(1) DITC控制下SRM在起动过程中的瞬时转矩和转速的波形图如图13所示。由图13(a)可以看出电机转速快速、平稳地达到给定值而且没有超调,说明该控制方法具有良好的起动性能;由图13(b)可以看出瞬时转矩能够快速、准确地跟踪参考转矩,且波动很小,由此可见起动过程中瞬时转矩得到有效地控制。

(2) 局部放大之后的转速、转矩波形图如图14所示。由图14(a)看出转速在499.92 n/min~500.04 n/min

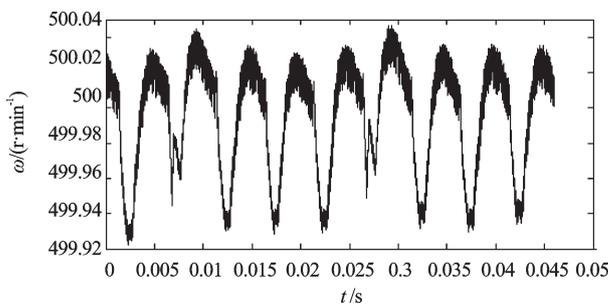


(a) 转速波形

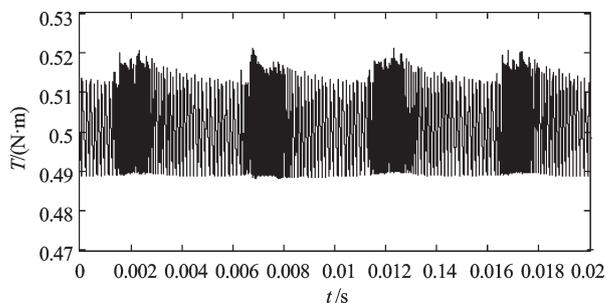


(b) 转矩波形

图13 仿真结果



(a) 局部转速

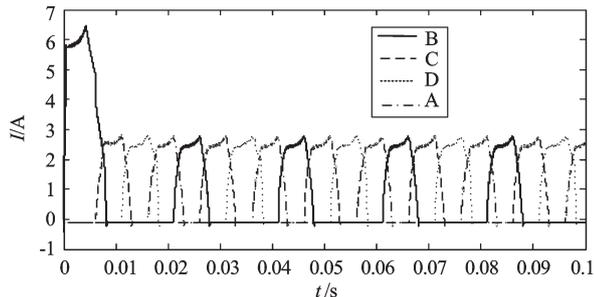


(b) 局部转矩

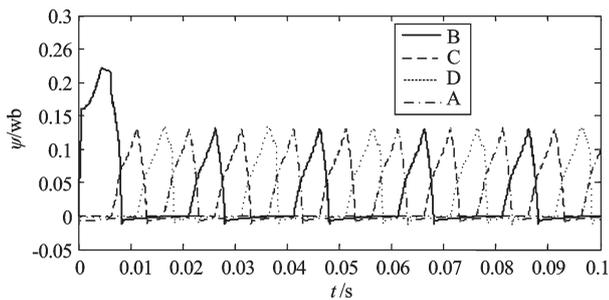
图14 局部仿真波形

之间波动,稳态时转速十分稳定。由图14(b)可以看出在换相区域时转矩值的大小为 $0.48 \text{ N}\cdot\text{m}\sim 0.52 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,单相导通期间转矩值在 $0.485 \text{ N}\cdot\text{m}\sim 0.515 \text{ N}\cdot\text{m}$ 之间波动,波动的范围在所设定的滞环限内,DITC有效地减小了转矩脉动。

(3) 运行过程中相电流和磁链的波形如图15所示,可以看出各相电流及磁链,按照前面理论分析的一样随着时间的变化(即为转子位置角度的变化)而有相应的改变,验证了前面所述控制理论的正确性。



(a) 相电流波形



(b) 磁链波形

图15 运行过程中相电流和磁链的波形

因此,由图13~15的仿真结果以及对结果的相关分析表明,本研究设计的DITC:

- (1) 在控制机理上,完全符合前述的相关理论描述;
- (2) 在工作性能上,能够有效地减小转矩脉动且能够提升SRM的动、静态工作性能。

## 4 结束语

本研究主要研究了SRM的直接瞬时转矩控制,详细介绍了DITC的控制原理及设计过程,建立四相8/6极SRM直接瞬时转矩控制系统的模型,并对控制系统进行了仿真研究。

由仿真结果表明,各波形符合理论分析,DITC控制下电机具有良好的起动性能且稳态时电机运行稳定。因此,可以得出结论:直接瞬时转矩控制能有效地减小转矩脉动,对SRM是一种有效的控制方法。

### 参考文献(References):

- [1] 孙建忠,白凤仙. 特种电机及其控制[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
- [2] 孙剑波. 开关磁阻电动机的减振降噪和低转矩脉动研究[D]. 武汉:华中科技大学电气与电子工程学院,2005.
- [3] 俞泉辰,王家军,宋小川. 基于Simulink的8/6极开关磁阻电动机的直接转矩控制仿真[J]. 机电工程,2013,30(3): 333-338.
- [4] 刘德兴,邓园,马志勋,等. 基于DITC的开关磁阻电机转矩脉动抑制[C]. 银川:全国煤矿自动化学术年会中国煤炭学会自动化专业委员会学术会议,2008:95-96.
- [5] 吴红星. 开关磁阻电机系统理论与控制技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [6] 陈鹏,张侃健. 开关磁阻电机直接转矩控制的仿真研究[J]. 工业控制计算机,2014,27(5):152-153.
- [7] CHEOK A D, FUKUDA Y. A new torque and flux control method for switched reluctance motor drives [J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2002, 17(4): 543-557.
- [8] 陈鹏,张侃健. 开关磁阻电机直接转矩控制的仿真研究[J]. 工业控制计算机,2014,27(5):152-153.
- [9] NISAI H, WARODSAKUL F, MENNE M, et al. High-Dynamic four-quadrant switched reluctance drive based on DITC[J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2005, 41(5):1232-124.
- [10] 李大威. 开关磁阻电动机的直接瞬时转矩控制系统研究[D]. 西安:西安科技大学电气与控制工程学院,2011.

[编辑:洪炜娜]

### 本文引用格式:

高营,王家军,杨森峰. 开关磁阻电动机直接瞬时转矩控制系统的设计与仿真[J]. 机电工程,2015,32(4):521-526.

GAO Ying, WANG Jia-jun, YANG Sen-feng. Direct instantaneous torque control system of switched reluctance motor [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(4):521-526.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>