

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.05.010

SRM 的直接瞬时转矩控制 及其改进型的仿真研究^{*}

赵 超,王家军^{*},王 浩

(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的转矩脉动较大的问题,对直接瞬时转矩控制方法进行了研究,并将其与 PWM 控制方法相结合,进一步介绍了一种改进型的控制方法。对两种控制方法的工作原理展开分析,重点介绍了转矩差值控制环节,它是依据转子角度位置的不同,将电动机的相绕组电感分为三个区间,并通过编程实现各个区间内电动机的控制。通过 Matlab/Simulink 软件分别搭建了四相 8/6 极开关磁阻电动机的直接瞬时转矩控制和改进型直接瞬时转矩控制的仿真模型,其中,瞬时反馈转矩是由相电流、转子位置和转矩三者之间的关系表查表得到。研究表明,两种方法都能够对转矩脉动起到抑制作用,但相比较而言,改进型直接瞬时转矩控制方法的抑制效果更加明显。

关键词:开关磁阻电动机;直接瞬时转矩控制;改进型直接瞬时转矩控制;仿真

中图分类号:TH39;TM352

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)05-0626-06

Simulation of direct instantaneous torque control and advanced direct instantaneous torque control for switched reluctance motor

ZHAO Chao, WANG Jia-jun, WANG Hao

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

Abstract: Aiming at the high torque ripple of the switched reluctance motor (SRM), the direct instantaneous torque control (DITC) scheme and the advanced direct instantaneous torque control (ADITC) scheme which composed of the DITC and the PWM control method were presented in the paper. The operational principle of DITC and ADITC were analysed. According to the rotor position, the phase winding inductance was divided into three intervals. As the focus of DITC and ADITC, the torque hysteresis controller was implemented through programming at every interval. The control simulation models for the four-phase 8/6 SRM were built up in Matlab/Simulink environment. The instantaneous feedback torque was obtained through the lookup table, which shows the relationship between the phase current, rotor position and torque. The results indicate that the proposed two methods can all reduce the inherent torque ripple, but the ADITC scheme is proved to be more excellent.

Key words: switched reluctance motor (SRM); direct instantaneous torque control (DITC); advanced direct instantaneous torque control (ADITC); simulation

0 引 言

开关磁阻电动机 (switched reluctance motor, SRM) 具有结构简单、成本低廉、容错性好和调速性能优良等

突出优点^[1],是一种极具竞争力的新型调速电动机。SRM 的工作原理与传统交直流电动机有着本质的不同,其遵循磁阻最小原理,即磁通总是沿着磁阻最小的路径闭合,磁场扭曲产生切向拉力^[2]。由于 SRM 特有

收稿日期:2014-12-01

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:赵 超(1989-),男,山东聊城人,主要从事开关磁阻电动机控制方面的研究。E-mail:zhaochao_up@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

的双凸极结构,使得磁路易饱和,电动机的转子角度和相电流与磁链均为非线性关系,并且运行时转子上产生的电磁转矩是由一系列的脉冲转矩叠加而成,使得合成转矩存在较大的谐波分量,导致电动机在运行时尤其是低速运行时转矩脉动较大^[3]。另外,功率变换器中相开关器件的切换动作也并非瞬间完成,极易造成输出转矩的波动。这一问题在换相期间尤为突出,当前相绕组关断进入退磁状态,相电流下降,该相输出的瞬时转矩也随之下降,此时,由于下一相绕组电流还未增强至足够大,不能产生足够大的电磁转矩,造成总输出转矩的下降,引起转矩脉动。转矩脉动会引起电动机直接驱动的传动轴上机械部件的低频共振,从而产生噪声,同时较大的转矩脉动还会引起较大的转速波动^[4]。因此,如何有效地抑制转矩脉动一直以来都是SRM的研究热点。

传统的SRM控制方式有3种,即角度位置控制(APC)、电流斩波控制(CCC)和电压斩波控制(CVC),分别针对3种不同的可控量:开关角、相电流、相电压,这3种控制方式都是通过间接的方式控制转矩^[5],对转矩脉动和噪声的抑制效果都十分有限。对转矩直接进行控制,是目前针对SRM转矩脉动问题应用最广泛的方法。本研究将直接瞬时转矩控制(DITC)方法和改进型直接瞬时转矩控制(ADITC)方法应用于SRM的转矩控制^[6-9]。与传统SRM转矩控制方法不同的是,DITC方法舍弃了电流闭环控制,而是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^[10]。ADITC则是将DITC与PWM控制方法相结合而提出的改进型控制方法。

本研究阐述DITC和ADITC的工作原理和实现方法,并针对四相8/6极SRM搭建其仿真模型,对仿真结果进行比较分析,为进一步改进和完善SRM的控制策略奠定基础。

1 SRM的DITC方法

1.1 DITC方法

SRM的DITC方法的核心思想是直接将任意时刻总的输出转矩作为控制对象,根据转矩偏差和转子位置角,通过控制导通相的工作状态,达到控制该相转矩的目的,进而控制总输出转矩^[11]。DITC控制系统框图如图1所示。

1.2 功率变换器的工作状态分析

SRM的功率变换器有很多种类,本研究采用了传

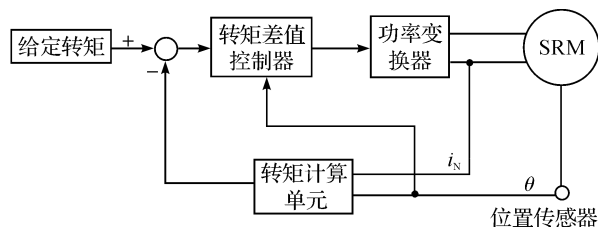


图1 开关磁阻电动机 DITC 系统框图

统的不对称半桥式功率变换器,它的电路由两只相开关管和两只续流二极管组成,能够提供相与相之间完全独立的控制,简单可靠。DITC方法采用软开关的功率变换模式,根据开关管的通断状态,可以将功率变换电路分为如图2所示的3种工作状态^[12]。当两个开关管同时导通时设为状态“1”,此时绕组两端电压为 $+U_s$,电路处于励磁状态,电流快速升高;当只有一个开关管导通时设为状态“0”,此时绕组两端电压为0,电路处于续流状态;当两个开关管同时关断时设为状态“-1”,此时绕组两端电压为 $-U_s$,电路处于退磁状态,电路向电源反馈能量,电流快速降低。

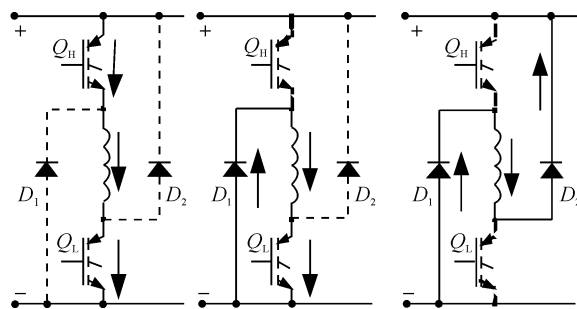


图2 功率变换器的3种工作状态

1.3 DITC转矩控制原理分析

根据角度位置的不同,相绕组电感被分为3个区间,其边界依次为 θ_{on1} 、 θ_1 、 θ_2 和 θ_{on2} ,DITC方法的分区如图3所示。 θ_{on1} 和 θ_{on2} 分别为前后相邻两相的开通角,图中设定A相为当前相,B相为下一相。 θ_1 是转子开始与定子重叠的位置, θ_2 是转子与定子的对齐位置,此时,相绕组的电感值最大。

在区间1中,A相的电感值较大,并快速增加,它的电流和转矩也均处于最大值,而B相的电感则处于最小值,电感变化率也非常低,电流逐渐增大,转矩接近于零。此时,电机的输出转矩主要由A相提供。在区间2中,转子开始与定子重合。此时,A相的电感逐渐增至最大值,但电感增长率和转矩都开始降低,并最终趋近于零。

相反,B相的电感开始增强,电流增至最大值。但此时B相的电感值仍然较低,以至于不能独立提供输

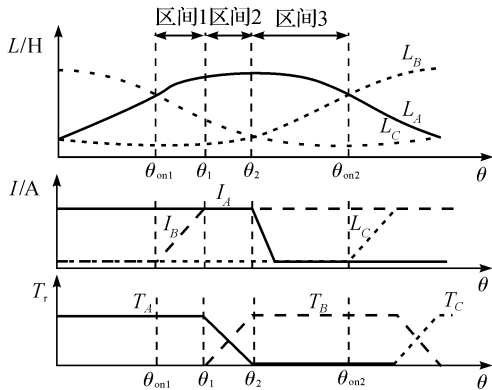


图 3 DITC 方法的分区

出转矩,所以电机的输出转矩仍由 A 相和 B 相共同提供。同时,为防止 A 相在下一区间产生反向电动势而输出负转矩,A 相只需少量电流即可,即由 B 相提供输出转矩中的大部分,A 相提供剩余部分。在区间 3 中,A 相在通过对齐位置后电感开始下降,并产生负转矩。为了减小负转矩,提高电机效率,必须使 A 相进入退磁状态,将磁场能反馈给电源,使其相电流尽快下降,消除负转矩的作用。此时,B 相的电感快速增强,电流和转矩都达到最大值,足以满足负载要求。

依据上文所介绍的分区方法,绕组电感被分为 3 个区间,每个区域中功率变换器的控制规则依次如图 4(a~c)所示。图 4 中,x 轴表示参考转矩与反馈转矩的差值,y 轴表示功率变换器的工作状态。

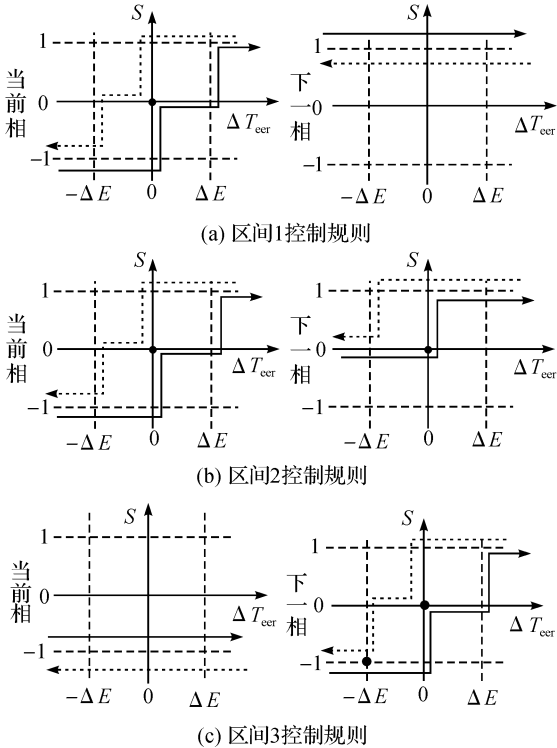


图 4 DITC 系统中功率变换器的控制规则

以区间 1 为例,如图 4(a)所示,无论转矩差值如何变化,下一相总是处于“1”状态,即励磁状态;当前相的转矩差值由超出上限减小至零又增加至超出下限时,功率变换器的工作状态由“1”变为“0”再变为“-1”,当前相的转矩差值由超出下限减小至零又增加至超出上限时,功率变换器的工作状态按相反的顺序,由“-1”变为“0”再变为“1”。

1.4 超前角的选取方法

开关角对 SRM 的控制尤为重要,由图 3 可知,下一相绕组必须在区间 2 中建立足够大的电流,以满足其在区间 3 中对输出转矩的要求。因此,合适的超前角对于下一相绕组获取足够的电流上升时间至关重要,过大或过小的超前角会相应地造成电流值的偏高或偏低,给电机的控制带来不利影响。绕组电流与位置角之间的关系如图 5 所示, θ_{on} 与 θ_1 之间的区域即为超前角 θ_{adv} 。为了保证足够的电流上升时间以获取期望相电流 i^* ,必须给定合适的超前角,而超前角可以由电机转速 ω_{rm} 和参考转矩 T^* 确定。

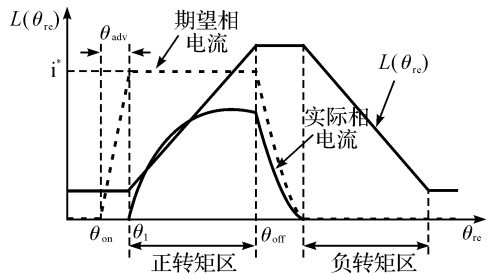


图 5 相电流与位置角之间的关系

θ_{on} —开通角; θ_{off} —关断角; θ_1 —电机相绕组开始进入正转矩区的位置角度

假设 SRM 相电流小于饱和电流值,单相电磁转矩方

程可以简化为 $T_{ek} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL_k}{d\theta}$,故期望相电流可以表示为:

$$i^* = \sqrt{\frac{2 \cdot T^* \cdot d\theta_{rm}}{dL(\theta_{rm})}} \quad (1)$$

式中: T^* —参考转矩, θ_{rm} —转子位置角。

忽略相绕组电阻,SRM 的第 k 相电压平衡方程可以简化为:

$$u_k = \frac{d\psi_k}{dt} = \frac{d(L_k \cdot i_k)}{dt} \quad (2)$$

式中: u_k, i_k, ψ_k, L_k —第 k 相的绕组电压、电流、磁链和电感。

由式(1,2)可得电流上升时间为:

$$\Delta t = L(\theta_1) \cdot \frac{i^*}{u_k} \quad (3)$$

因此,超前角可以由转速和上升时间确定为:

$$\theta_{adv} = \omega_{rm} \cdot \Delta t \tag{4}$$

2 SRM 的 ADITC 方法

2.1 ADITC 方法

尽管 DITC 方法能够比较有效地抑制转矩脉动的产生,但仍然存在一些不足之处。因为功率变换器的工作状态是根据给转矩差值的变化而改变,开关频率是不固定的,并且转矩脉动的抑制效果受采样周期和所设定的差值宽度影响很大。假使差值宽度较窄,而采样周期又相对较长,则当转矩误差超出设定范围时,就会出现因未到下一采样周期而使转矩脉动不能被及时地检测和反馈的情况。因此,为了有效地减小转矩脉动,将输出转矩控制在一定的范围内,转矩的采样频率必须固定且足够大。在 DITC 的基础上,本研究介绍了一种改进型方法,即在确定的导通角内,转矩差值作为转矩控制单元的输入,并通过 PWM 控制单元施加给功率变换器固定频率的开关信号,从而实现对瞬时转矩的精确控制,达到抑制转矩脉动的目的。ADITC 控制系统框图如图 6 所示。

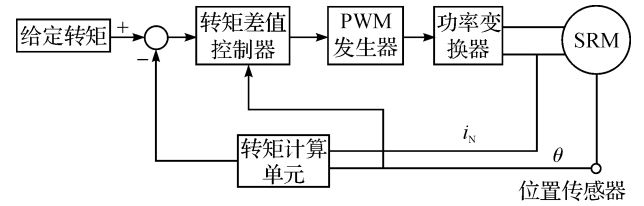


图 6 开关磁阻电动机 ADITC 系统框图

2.2 ADITC 转矩控制原理分析

ADITC 方法是 DITC 方法与 PWM 控制方法的结合,所以 ADITC 的相电感分区方法与 DITC 的分区方法相同,相绕组的电感、电流和转矩随转子位置角的变化情况如图 3 所示。其中,PWM 控制单元的频率值是依据转矩误差和 DITC 控制规则而设定的,功率变换器中开关管的工作频率与其直接对应。ADITC 中每个区间的控制规则如图 7 所示,图 7 中, x 轴表示转矩误差, y 轴表示当前相或下一相功率变换器的工作状态。

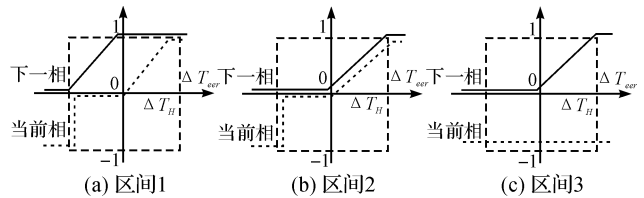


图 7 ADITC 系统中功率变换器的控制规则

2.3 转矩差值控制中工作状态的判断方法

DITC 中,根据所划分的不同区间内转矩误差的大

小,对功率变换器施加不同的触发信号,使其工作状态发生转换。因此,绕组在每个采样周期中只能有一种状态。但在 ADITC 中,每个采样周期内,根据转矩误差的不同,单相绕组可以有一种或两种工作状态。以区间 1 为例,如图 7(a) 所示,转矩误差大于 0 且小于差值上限时,当前相的工作状态在“0”~“1”之间随转矩误差的变化而改变;转矩误差小于 0 且大于差值下限时,下一相的工作状态在“0”到“1”之间随转矩误差的变化而改变,其工作状态的判断方法分别如图 8(a)、8(b) 所示。其中, $D_t = |T_{err}| / \Delta T_H$,式中: T_{err} —转矩误差, ΔT_H —转矩差值的设定宽度。

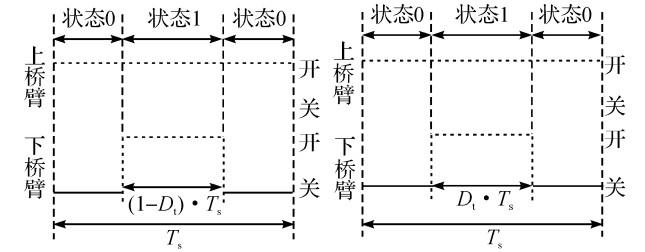


图 8 区间 1 中工作状态的判断方法

3 DITC 与 ADITC 的系统建模

3.1 仿真系统模型

本研究使用 Matlab/Simulink 软件分别对采用 DITC 和 ADITC 方法的四相 8/6 极 SRM 进行了仿真建模,其系统模型如图 9 所示。SRM 的 DITC 系统仿真模块主要包括 PI 调节器、功率变换器、开关磁阻电动机本体、角度位置计算模块和转矩差值控制模块。仿真系统的给定变量为电机转速,给定转速与反馈转速产生转速误差,转速误差经 PI 调节器后得到参考转矩,参考转矩与实际反馈转矩比较产生转矩控制指令。图 9 中,SRM 与 Converter 模块分别表示电动机本体与功率变换器,功率变换器采用传统的不对称半桥式功率变换电路。与 DITC 仿真模型相比,ADITC 仿真模型最大的不同是在前者的基础上在 Converter 模块中

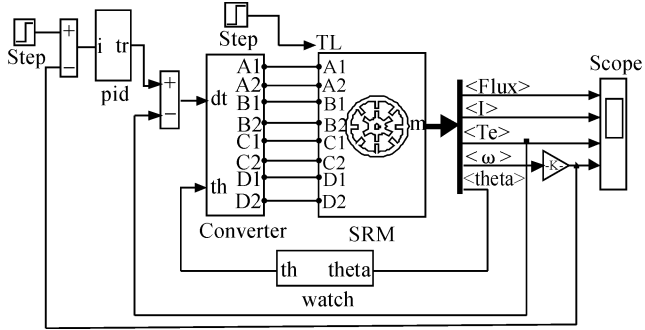


图 9 四相 8/6 极开关磁阻电动机仿真模型

增加了 PWM 发生器模块,实现了以固定频率控制功率变换器的开关。

3.2 转矩差值控制环节

转矩差值控制环节是 DITC 系统和 ADITC 系统的核心,它是采用上文分析的转矩差值控制方法,通过 Matlab 函数编程实现。DITC 和 ADITC 仿真模型中 Converter 模块的内部结构图分别如图 10、图 11 所示。其中,DITC 系统的输入控制信号为 θ_h 和 $d\theta$,分别表示转子位置角度和参考转矩与实际反馈转矩之差,ADITC 系统又增加了输入信号 du/dt ,它表示转矩误差的变化率。Matlab FA 模块是依据相应的转矩差值控制规则编写的函数,是实现转矩控制的关键所在,BR_CONV1 模块是不对称半桥回路。PWM 模块是 PWM 发生器,产生固定频率的 PWM 信号,控制功率变换器中相开关管的开关,并根据 Matlab FA 模块的输出信号改变 PWM 信号的占空比。

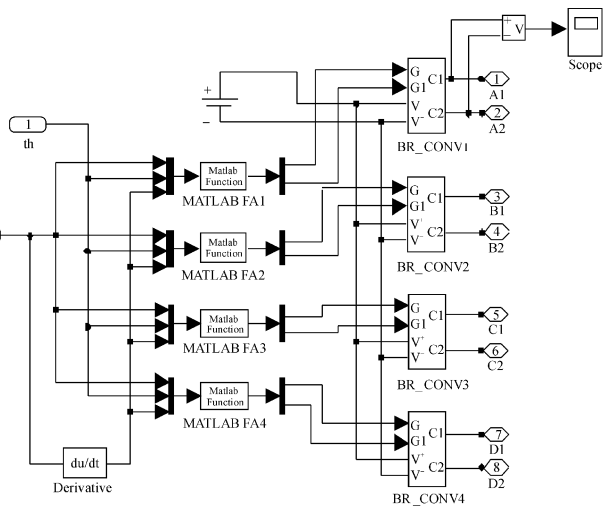


图 10 DITC 系统中 Converter 模块内部结构图

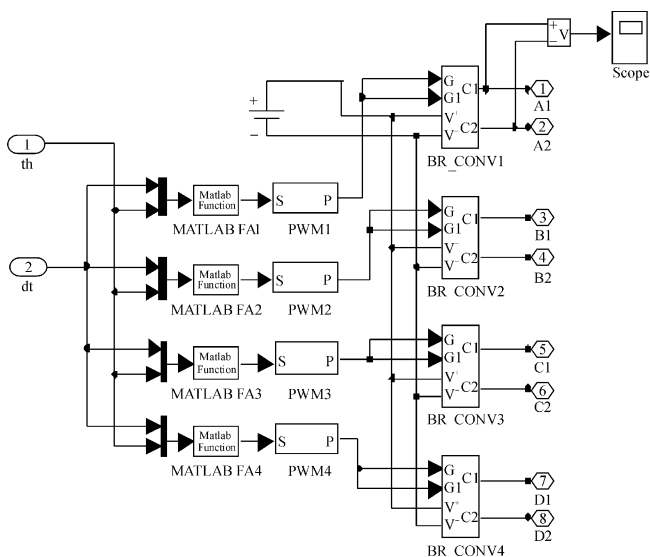


图 11 ADITC 系统中 Converter 模块内部结构图

4 仿真实验及结果分析

本研究在 Matlab/Simulink 环境下使用基本模块搭建了 SRM 的 DITC 和 ADITC 仿真系统,其仿真系统参数初始化为:转速 500 r/min,负载转矩 $0.5 \text{ N} \cdot \text{m}$,直流母线电压 250 V,转矩惯量 $0.0002 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,阻尼系数 $0.00002 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$,最大电流 7 A,最大磁链 $0.27 \text{ V} \cdot \text{m}$,转矩差值宽度 $\pm 0.05 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

SRM 的 DITC 和 ADITC 仿真系统的功率变换器模块的输入控制信号 $d\theta$ 如图 12 所示。输入信号 $d\theta$ 是参考转矩与实测反馈转矩之差,由于 DITC 仿真系统和 ADITC 仿真系统给定的初始参数相同,所以信号 $d\theta$ 本质上反应的是实测反馈转矩的变化。

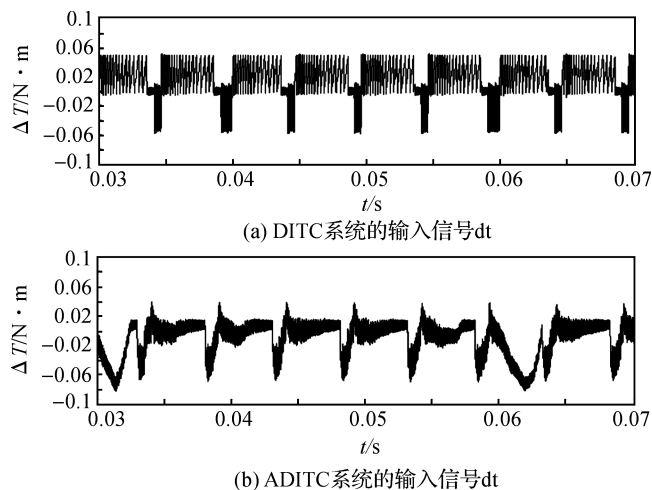


图 12 DITC 和 ADITC 系统中 Converter 的输入信号 $d\theta$

DITC 仿真系统和 ADITC 仿真系统的结果波形分别如图 13、图 14 所示,依次为相电流、相电压、总输出转矩和磁链。由结果波形可以看出,在两种控制方法的作用下,电机都能够输出稳定的相电流、相电压和磁链波形,并且输出转矩脉动基本都在允许的转矩差值宽度范围内。但相比较而言,ADITC 方法的转矩脉动抑制效果更加明显,输出转矩也更加平滑。同时,ADITC 仿真系统输出的电流和磁链的最大值也明显高于 DITC 仿真系统的输出值,波形也更加平滑,表明 ADITC 系统的动态性能更加优良。

5 结束语

本研究在分析 SRM 转矩脉动产生原因的基础上,引入了 DITC 方法,并将其与 PWM 控制方法相结合,介绍了 ADITC 方法,详细阐述了它们的实现原理,尤其是转矩差值控制环节。在此基础上,笔者采用 Matlab/Simulink 软件建立了四相 8/6 极 SRM 的 DITC 和

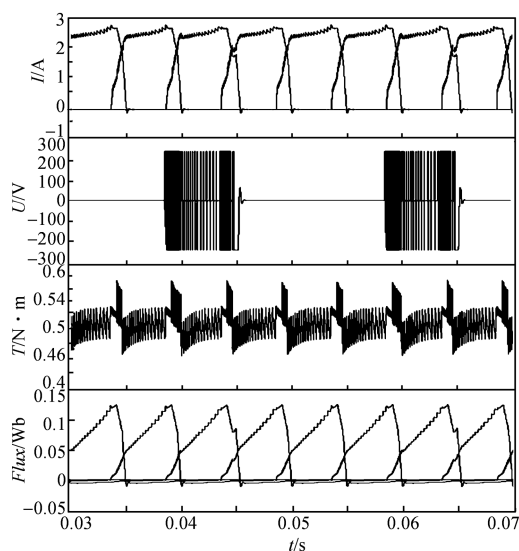


图13 DITC系统的仿真波形

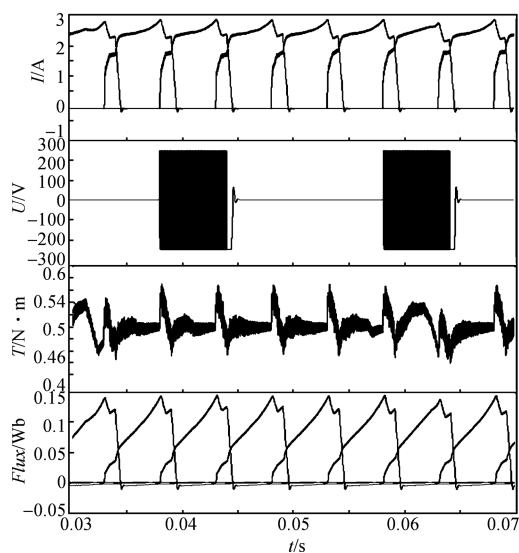


图14 ADITC系统的仿真波形

ADITC的仿真模型,并在相同系统参数的条件下进行了仿真实验与研究对比,研究结果表明,两种方法都能够有效地抑制SRM的转矩脉动,改善转矩输出性能。然而,ADITC方法对转矩误差的响应更加迅速,对转矩脉动的抑制效果也更为突出,同时还能够增强系统的动态性能,优化系统的控制效果。

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] 吴红星.开关磁阻电动机系统理论与控制技术[M].北京:中国电力出版社,2010.
- [3] 王笑非.开关磁阻电动机的直接转矩控制[D].成都:西南交通大学电气工程学院,2006.
- [4] 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.
- [5] 牛龙涛.基于滑模变结构的开关磁阻电机转矩脉动抑制[D].天津:天津大学电气与自动化工程学院,2009.
- [6] AHN J W. Torque control strategy for high performance SR drive[J]. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2008, 3(4): 538-545.
- [7] LEE D H, KIM T H, AHN J W. A hydraulic-oil pump system using SR drive with a direct torque control scheme[J]. *Journal of Power Electronics*, 2009, 9(3): 491-498.
- [8] WANG Hui-jun, LEE D H, AHN J W. Torque ripple reduction of SRM using advanced direct instantaneous torque control scheme[J]. *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2007, 1(4): 379-383.
- [9] LIANG J, LEE D H, AHN J W. Direct instantaneous torque control of switched reluctance machines using 4-level converters[J]. *IET Electric Power Applications*, 2009, 3(4): 313-323.
- [10] 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].第18届全国煤矿自动化与信息化学术会议论文集,2008:95-98.
- [11] 李大威.开关磁阻电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.
- [12] 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.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

赵超,王家军,王浩. SRM的直接瞬时转矩控制及其改进型的仿真研究[J]. 机电工程, 2015, 32(5): 626-631.

ZHAO Chao, WANG Jia-jun, WANG Hao. Simulation of direct instantaneous torque control and advanced direct instantaneous torque control for switched reluctance motor[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(5): 626-631.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>