

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2013.03.021

基于 Simulink 的 8/6 极开关磁阻电动机的直接转矩控制仿真*

俞泉辰, 王家军*, 宋小川

(杭州电子科技大学 自动化学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 直接转矩控制(DTC)可以有效地抑制开关磁阻电动机的转矩脉动,但是当前三相开关磁阻电动机(SRM)的直接转矩控制方法并不适用于任意相的开关磁阻电动机。为实现四相 8/6 极开关磁阻电动机的直接转矩控制,在分析开关磁阻电动机数学模型的基础上,介绍了开关磁阻电动机直接转矩控制方法的基本原理,在 Matlab/Simulink 环境下利用基本模块建立了 8/6 极开关磁阻电动机的直接转矩控制仿真模型。基于功率变换电路的状态,给出了 8/6 极开关磁阻电动机电压矢量的选取规则,介绍了磁链矢量的计算方法以及扇区的判断方法,并利用 Matlab/Simulink 中的二维查表模块建立了开关表。最后,加入了速度 PID 控制器,并对该模型进行了仿真研究。研究表明,该控制方法是正确且有效的。

关键词: 四相 8/6 极开关磁阻电动机; 直接转矩控制; 电压矢量; 扇区判断

中图分类号: TM352; TH39 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2013)03-0333-06

Simulation on direct torque control of 8/6 switched reluctance motor based on Simulink

YU Xiao-chen, WANG Jia-jun, SONG Xiao-chuan

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

Abstract: Direct torque control(DTC) can effectively reduce the torque ripple of switched reluctance motor(SRM), but the current direct torque control method of three-phase switched reluctance motor can not be applied to arbitrary phase SRM. In order to realize the direct torque control of four-phase 8/6 SRM, based on the analysis of the mathematical model of SRM, the basic principle of DTC of SRM was introduced, and the simulation model of DTC of 8/6 SRM was built in Matlab/Simulink environment. On the basis of the states of the power conversion circuit, the selection rules of voltage vector were given, the calculation method of flux vector and the judgement method of flux sector were introduced, and the switch table was built through 2D lookup table in Matlab/Simulink. Finally, the model was simulated with speed PID control. The results indicate that the proposed method is correct and effective.

Key words: four-phase 8/6 switched reluctance motor(SRM); direct torque control(DTC); voltage vector; sector judgment

0 引 言

开关磁阻电动机(SRM)具有结构坚固、简单可靠、成本低廉、容错性好等优点^[1],如今已被广泛应用于各调速领域。然而开关磁阻电动机的双凸极结构与开关式供电方式使得磁链、电流等严重非线性化,

致使开关磁阻电动机具有较大的转矩脉动,由转矩脉动导致的噪声问题也尤为突出,这大大制约了开关磁阻电动机的应用场合。传统的开关磁阻电动机控制方式有 3 种,即电流斩波控制(CCC)、电压斩波控制(CVC)和角度位置控制(APC),它们分别针对 3 种不同的可控量:相电流、相电压、开关角^[2],但这 3 种控制

收稿日期: 2012-11-05

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: 俞泉辰(1988-),男,浙江杭州人,主要从事开关磁阻电机控制方面的研究. E-mail: 378165186@qq.com

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

方式对转矩脉动的抑制效果都十分有限。直接转矩控制(DTC)是目前针对开关磁阻电动机转矩脉动问题应用最为广泛的一种控制方法,通过使用该方法控制开关磁阻电动机,既无需复杂的数学模型和公式推导,又能有效抑制开关磁阻电动机的转矩脉动^[3]。但是直接转矩控制方法在各相电机之间并不具备统一模式,因为三相开关磁阻电动机的直接转矩控制往往是对交流电动机直接转矩控制^[4]的一种借鉴,三相开关磁阻电动机的直接转矩控制方法难以推广到任意相开关磁阻电动机。

本研究针对四相8/6极开关磁阻电动机,在分析其数学模型基础上给出电压和磁链矢量的处理方式,提出一种适用于任意相电动机的扇区判断的方法,并进行仿真研究,最终实现四相开关磁阻电动机的直接转矩控制。

1 SRM 直接转矩控制原理

1.1 开关磁阻电动机的数学模型

任意电磁式机电装置都可以用电路方程、机械方程、机电联系方程这3种微分方程来描述其数学模型,开关磁阻电动机也不例外。

对任意相SRM而言,其任意相电压平衡方程为:

$$U = Ri + \frac{d\Psi(\theta, i)}{dt} \quad (1)$$

式中: U, R, i, Ψ —该相绕组的电压、电阻、电流与磁链; θ —转子位置角。

根据力学定律,转子的机械运动方程为:

$$T - T_L - F\omega = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

式中: T —合成电磁转矩, T_L —负载转矩, F —摩擦系数, J —转子转动惯量, ω —转子角速度。

开关磁阻电动机的电端口和机械端口是通过电磁转矩耦合在一起的^[5],故机电联系方程就是转矩表达式。通常认为在控制器的一个周期内绕组电流的值不变,根据能量转换,开关磁阻电动机的瞬时转矩可以表示为:

$$T = \frac{dW_m}{d\theta} = \frac{d(W_e - W_f)}{d\theta} \quad (3)$$

式中: W_m, W_e, W_f —机械能、磁共能和磁储能。

直接转矩控制的核心思想是以转矩和磁链作为直接控制变量,通过用这种方法来控制开关磁阻电动机,可以有效地抑制其转矩脉动以及由此导致的噪声问题。

1.2 开关磁阻电动机直接转矩控制方法

开关磁阻电动机的直接转矩控制是指研究者将电机的瞬时转矩和磁链作为反馈量与转矩和磁链的

给定值进行比较,从而将电机的转矩和磁链值限制在一个滞环带中,再根据瞬时转矩值、磁链矢量的幅值和扇区信息通过查询开关表确定电机的开关状态,并由此触发开关器件进而驱动电机。

由于开关磁阻电动机的定子绕组阻值较小,其绕组压降可以忽略,故式(1)可以近似为:

$$U = \frac{d\Psi(\theta, i)}{dt} \quad (4)$$

由式(4)可知对绕组施加的电压矢量决定了绕组磁链矢量的变化^[6],在较短时间间隔内,如果对电机施加的电压矢量与当前磁链矢量夹角的绝对值 $|\varphi| < 90^\circ$,则磁链幅值增大;如果 $|\varphi| = 90^\circ$,则磁链幅值基本保持不变;如果 $|\varphi| > 90^\circ$,则磁链幅值减小。

同时根据开关磁阻电动机磁场的高度饱和性,其磁储能几乎不随转子变化,所以式(3)可以近似为:

$$T = \frac{dW_e}{d\theta} = i \frac{\partial \Psi(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (5)$$

由于开关磁阻电动机的绕组电流方向不变,可以认为式(5)中的 i 恒为正值,转矩值仅由磁链矢量随转子位置角的变化决定,对电机施加的电压矢量超前当前磁链矢量时,定子磁链将超前转子位置角,转矩提高;电压矢量滞后当前磁链矢量时,转矩就会降低。扇区判断的作用就是确定当前磁链矢量的方向,从而根据磁链矢量与转矩值,选择合适的电压矢量。

根据开关磁阻电动机直接转矩控制方法,控制系统框图^[7]如图1所示。

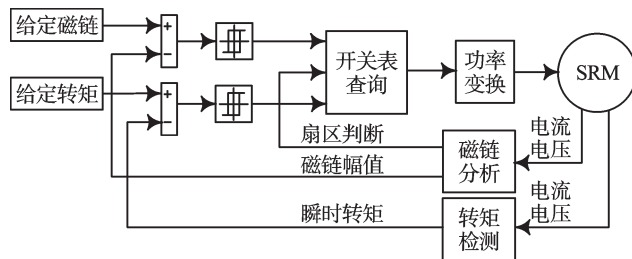


图1 开关磁阻电动机直接转矩控制系统框图

2 8/6极SRM直接转矩控制系统建模

由图1可知,开关磁阻电动机直接转矩控制系统的给定量包括转矩和磁链值,除了开关磁阻电动机本体和功率变换器外还应包括滞环模块、开关表、磁链分析、转矩检测等环节。本研究采用最常见的仿真软件Matlab/Simulink进行建模,四相8/6极开关磁阻电动机直接转矩控制系统的模型如图2所示,其中SRM与Converter模块分别是电动机本体与功率变换器,Flux analyse模块的作用是将磁链矢量从四相坐标转换到两相坐标下并输出磁链矢量的幅值与扇区信息,

Switch模块除了实现对磁链和转矩值的滞环比较输出外,还要实现开关表功能,决定施加的电压矢量。

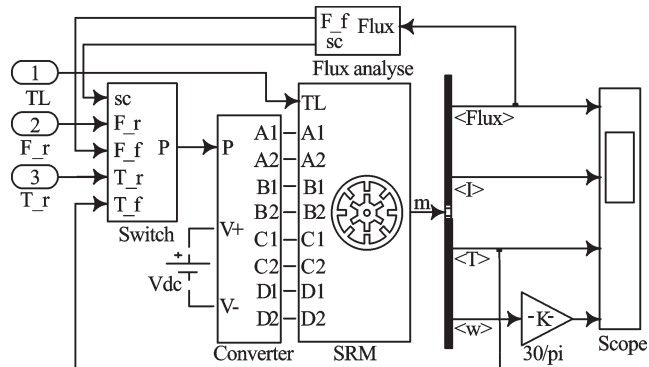


图2 四相8/6极SRM直接转矩控制模型

2.1 功率变换电路与电压矢量的选取

开关磁阻电动机的功率变换电路有很多,本研究采用经典不对称半桥回路,这种电路能够提供相与相之间完全独立的控制,简单可靠。以A相绕组为例,不对称半桥回路的电路与模型如图3所示,由两只开关管和两只续流二极管构成。

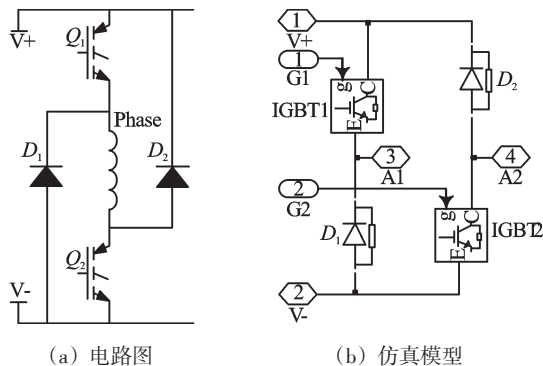


图3 A相绕组不对称半桥回路的电路与模型

开关磁阻电动机的直接转矩控制往往采用软开关的功率变换模式,根据开关管的通断状态,这种模式下开关磁阻电动机的任意一相的功率变换电路都具备3种状态^[8],其电路图如图4所示,当开关管 Q_1 、 Q_2 导通,母线电压通过开关加在绕组上,绕组承受正压,定义为“1”状态;当上臂开关管 Q_1 关断,下臂开关管 Q_2 导通,绕组与 D_1 、 Q_2 短路闭合,绕组电压为零,

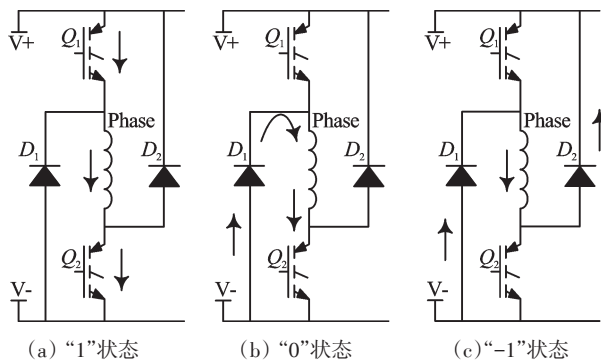
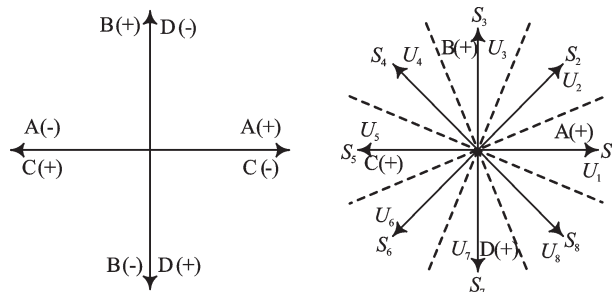


图4 功率变换电路的3种状态

定义为“0”状态;当两只开关管均关断,绕组通过二极管 D_1 、 D_2 续流,此时绕组承受负压,定义为“-1”状态。

传统的开关磁阻电动机控制方法往往采用硬开关模式,即功率变换电路只有“1”和“-1”两种状态。“0”状态的出现使得开关管关断时,绕组电流的下降得到了缓冲,因为“0”状态下回路中只有绕组的电阻,电流自然下降,所以较为缓慢。这有效地抑制了转矩脉动的产生,也是传统控制方式无法抑制开关磁阻电动机转矩脉动的主要原因。

电压矢量的选择取决于磁链矢量的分布,根据四相8/6极开关磁阻电动机的结构,在对四相绕组轮流通电时,每次通断电的过程中转子转过 15° 的机械角度,而磁链矢量转过 $1/4$ 周期,即 90° 的电角度,所以空间上相差 45° 的相邻两相在磁链矢量分布上相差 90° ,于是A相的正相与C相的负相重合,B相的正相与D相的负相重合,以此类推,这使得四相8/6极开关磁阻电动机的磁链矢量只存在4个方向,四方向的磁链矢量如图5(a)所示。仅仅使用这4个磁链矢量来确定施加给绕组的电压矢量,不仅会使仿真结果失去准确性,还会导致转矩脉动增大,本研究在4个磁链矢量方向的角平分线上增加4个方向,构成四相8/6极开关磁阻电动机的8个电压矢量,并命名为 $U_1, U_2, \dots, U_8$,再以这8个电压矢量作为中心线将电压矢量的空间分布分为8个扇区,记为 S_k ,其中 k 为扇区编号,与该扇区内的电压矢量编号一致,如图5(b)所示。



(a) 四方方向的磁链矢量 (b) 八方向的电压矢量

图5 四相8/6极开关磁阻电动机的磁链与电压矢量

电压矢量的值是通过各相功率变换电路的状态来表示的,根据功率变换电路状态的总数以及电机的相数,四相8/6极开关磁阻电动机的电压矢量总共存在 $3^4(81)$ 种,除去三相或四相全部导通等禁止状态以及四相全部关断等无效状态,电压矢量的选择仍然很多。为了较好地抑制转矩脉动,本研究在选择电压矢量时的首要原则是相邻两个电压矢量之间不能存在“-1”与“1”两种状态的直接切换,必须通过“0”状态来实现。在综合考虑开关管的运行效率以及电压矢量和四相正、负方向的位置关系后,本研究选取的8个电压矢量如表1所示。

表1 电压矢量的选取结果

电压矢量	取值	电压矢量	取值
U_1	(1,0,-1,0)	U_2	(1,1,-1,-1)
U_3	(0,1,0,-1)	U_4	(-1,1,1,-1)
U_5	(-1,0,1,0)	U_6	(-1,-1,1,1)
U_7	(0,-1,0,1)	U_8	(1,-1,-1,1)

虽然电压矢量从数值上表示了功率变换电路的状态,但它仍不能直接用于对开关管的控制,因为开关管模块只接受“0”和“1”两种信号。对此,本研究通过直接查表的方法对电压矢量进行处理,以A相为例,电压矢量处理环节模型如图6所示。

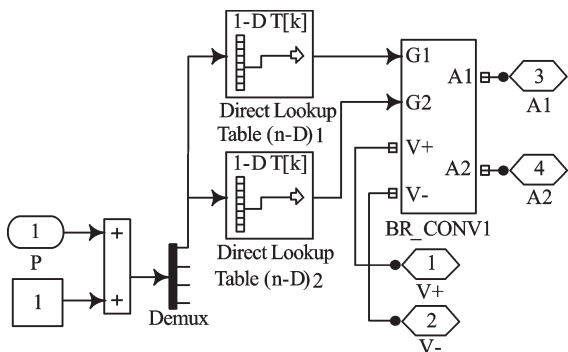


图6 A相电压矢量处理环节

在图6中, BR_CONV1 模块即为A相的不对称桥回路模型, 由于查表输入的值必须为自然数, 本研究先将电压矢量输入信号P作加1处理并分相, 再进行查表。由于本研究采取软开关模式, 不对称桥的上、下臂并不同开同断, 上、下臂的查表要独立进行。一维表Table1和Table2的输出分别接上臂和下臂开关管的触发端, Table1赋值为(0,0,1), 表示功率变换电路处于状态“-1”或“0”时上臂都关断, 只有在“1”状态时才开启; Table2赋值为(0,1,1), 表示功率变换电路处于状态“-1”时下臂关断, 而在“0”和“1”状态时都开启。

2.2 磁链矢量分析与扇区判断

本研究将四相磁链矢量先从四相坐标分解到两相坐标中, 再在两相坐标中将分解的磁链矢量合成, 计算幅值并进行扇区判断, 从而得到完整的磁链矢量与扇区信息。为了将两种坐标系联系起来, 本研究假设两相坐标系的 α 轴正方向与四相坐标系A相的正相重合, 磁链矢量的分解与合成如图7所示。

由图7可知, 经过分解再合成后^[9-10], 合成磁链矢量的幅值与各相单相磁链矢量的幅值之间的关系为:

$$\begin{cases} \Psi = \sqrt{\Psi_\alpha^2 + \Psi_\beta^2} \\ \Psi_\alpha = \Psi_A - \Psi_C \\ \Psi_\beta = \Psi_B - \Psi_D \end{cases} \quad (6)$$

为精确地定位磁链矢量, 除了计算四相合成磁链的幅值外还必须判断出当前磁链矢量所在扇区。扇区

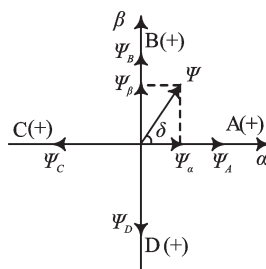
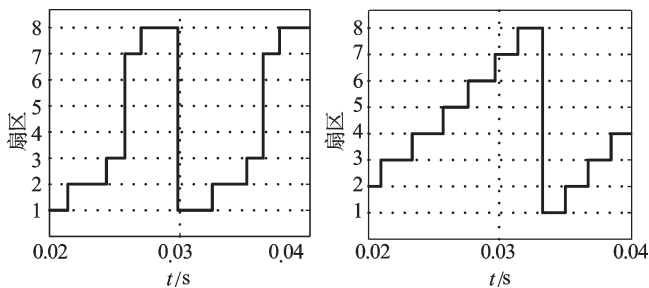


图7 磁链矢量的分解与合成

Ψ —三相合成磁链矢量; $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_D$ —各相的单相磁链矢量; Ψ_α, Ψ_β — Ψ 在 α 和 β 轴上的分量; δ 角— Ψ 与 α 轴正方向的夹角

判断是通过计算角 δ 的值来完成的, 目前最常见的计算方法有两种: 一种是通过反正切函数“arctan”计算, 但是“arctan”的返回值为 $(-\pi/2, \pi/2)$, 无法判断第4、5、6扇区的信息, 扇区判断结果如图8(a)所示; 另一种是通过四象限反正切函数“atan2”计算, 但是“atan2”在一、二象限的返回值为 $(0, \pi)$, 在三、四象限的返回值为 $(-\pi, 0)$, 若要将返回值转换到 $(0, 2\pi)$, 需要将扇区重新分配, 所以也不能直接使用。为准确并直观地得到扇区信息, 本研究在“atan2”函数的计算结果上加以处理, 正确地判断出了扇区的信息, 扇区判断结果如图8(b)所示。



(a) 使用arctan函数

(b) 使用经过处理的atan2函数

图8 用不同函数判断扇区的结果

这种扇区判断方法不仅适用于四相开关磁阻电动机的直接转矩控制, 对于任意相SRM也同样适用。具体方法是: 将磁链矢量平面均分为16个小扇区, 每个小扇区的角度均为 $\pi/8$, 若将相邻的两个扇区合成一个大扇区, 这8个大扇区与电压矢量所分布的扇区完全相同, 所以研究者通过将atan2函数的计算结果和小扇区的边界进行比较, 就能判断出该磁链矢量属于哪个大扇区, 判断方法为:

$$\begin{cases} \Psi \in S_6 & -7 < e \leq -5 \\ \Psi \in S_7 & -5 < e \leq -3 \\ \Psi \in S_8 & -3 < e \leq -1 \\ \Psi \in S_1 & -1 < e \leq 1 \\ \Psi \in S_2 & 1 < e \leq 3 \\ \Psi \in S_3 & 3 < e \leq 5 \\ \Psi \in S_4 & 5 < e \leq 7 \\ \Psi \in S_5 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中: e —atan2的返回值与 $\pi/8$ 取商后的结果。

这样就解决了atan2函数在一、二和三、四平面返回不统一的问题。

根据式(6,7)可以建立磁链矢量分析模块,Flux analyse模块内部结构如图9所示,输入信号Flux为四相磁链,输出信号F_f与sc分别为合成磁链矢量的幅值与扇区值,Modulo是扇区判断模块,以实现式(7)的功能。

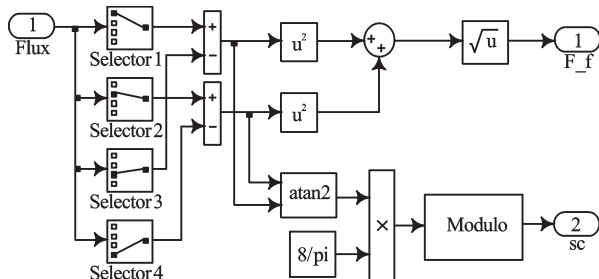


图9 Flux analyse模块内部结构

2.3 开关表的建立

开关表的作用是根据磁链和转矩的滞环输出,结合当前的磁链扇区选择合适的电压矢量作为功率变换模块的输入。根据开关磁阻电动机直接转矩控制原理与本研究中对电压矢量的选取以及扇区的划分可知,当前磁链矢量位于扇区 S_k 时,为控制转矩值 T 和磁链幅值 Ψ 的变化而采用的电压矢量选择方法如表2所示。

表2 电压矢量选择方法

控制目标	选择原理	选择结果
T 增大	电压矢量超前磁链矢量	U_{k+1} 或 U_{k+2} 或 U_{k+3}
T 减小	电压矢量滞后磁链矢量	U_{k-1} 或 U_{k-2} 或 U_{k-3}
Ψ 增大	电压与磁链矢量夹角 $ \varphi < 90^\circ$	U_{k+1} 或 U_{k-1}
Ψ 减小	电压与磁链矢量夹角 $ \varphi > 90^\circ$	U_{k+3} 或 U_{k-3}

若用“0”表示减小,“1”表示增大,则转矩值和磁链幅值存在4种变化状态:“00”状态表示两者都减小,“10”状态表示转矩增大而磁链减小,“01”状态表示转矩减小而磁链增大,“11”状态表示转矩磁链均增大^[11]。转矩和磁链的状态由滞环模块的输出决定,当转矩或磁链的反馈值高于滞环上限时输出为0,表示需要从开关表中选取合适的电压矢量使得转矩或磁链减小,反之则输出1。由此可得四相8/6极开关磁阻电动机直接转矩控制的开关表如表3所示。

表3 四相8/6极SRM直接转矩控制开关表

扇区 状态	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
00	U_6	U_7	U_8	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
01	U_8	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7
10	U_4	U_5	U_6	U_7	U_8	U_1	U_2	U_3
11	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7	U_8	U_1

本研究采用二维查表模块与多重选择模块建立开关表,Switch模块内部结构如图10所示。

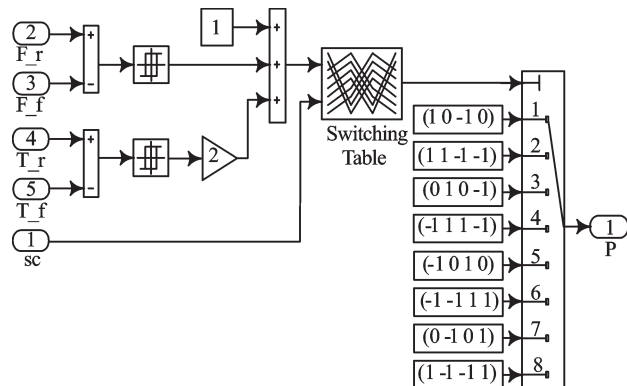


图10 Switch模块内部结构

F_r, T_r —磁链和转矩的给定信号; F_f, T_f —磁链和转矩的反馈信号; sc —当前磁链扇区信号

由于查表模块的行列编号均为十进制,本研究通过 $N=2A+B+1$ (式中: A —转矩滞环输出值, B —磁链滞环输出值)将二进制的转矩磁链变化状态换转为十进制的开关表的行号。最终的输出信号 P 为选择施加给绕组的电压矢量。

3 系统仿真与结果分析

本研究在四相8/6极开关磁阻电动机直接转矩控制系统的基础上加入了速度PID控制器,其模型示意图如图11所示。仿真系统参数初始化为:转速500 r/min,负载转矩10 N·m,给定磁链0.35 Wb,直流母线电压250 V,最大转矩40 N·m,最大电流50 A,转矩滞环宽度 ± 0.05 N·m,磁链滞环宽度 ± 0.02 Wb。

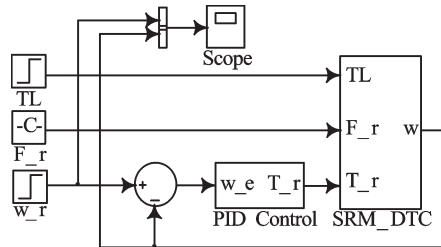


图11 8/6极SRM直接转矩控制系统速度PID控制模型

SRM_DTC模块—四相8/6极开关磁阻电动机直接转矩控制系统; TL, F_r, w_r —负载转矩给定、磁链给定和转速给定

仿真系统运行0.1 s后开关磁阻电动机的转速、转矩、磁链与电流随扇区变化的情况如图12所示,从图中可以看出,仿真系统运行稳定且仿真结果与本研究理论分析吻合,证明了该控制方法的正确性。

为研究系统的调速能力,本研究进行了两组速度跟踪实验,给定信号分别为滤波前后的方波信号,幅值为500 r/min。实验结果如图13所示,证明在速度PID控制下,仿真系统对于不同的速度给定信号都有快速且准确的速度跟踪能力,调速性能优良。

由于DTC是一种针对转矩的控制方法,系统的转矩响应能力也是该控制方法下系统性能的一大指

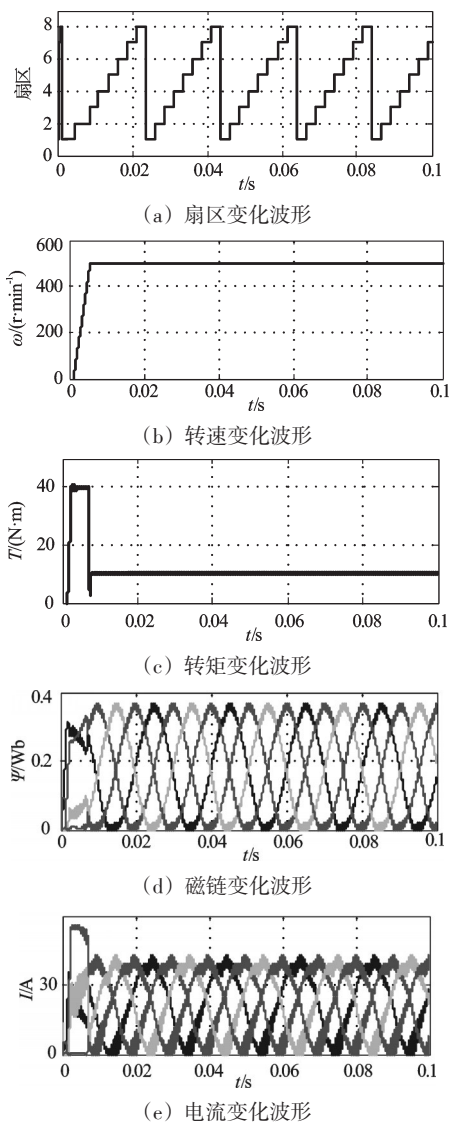


图12 各物理量随扇区变化的波形

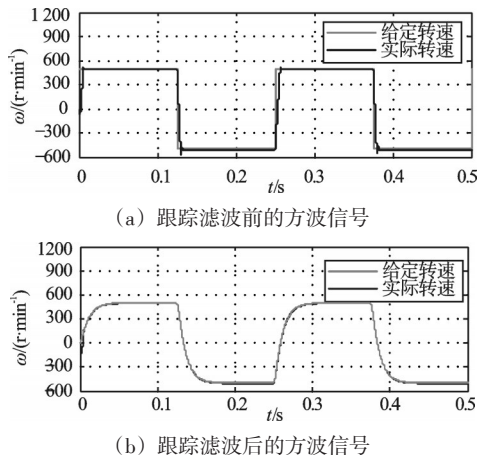


图13 不同给定信号下的速度跟踪波形

标。本研究在系统运行0.05 s时给予系统一个转矩干扰,使转矩从10 N·m突变为5 N·m,转矩响应波形如图14所示。从波形图可以看出,转矩脉动不会随转矩突然变化而增大并且转矩响应时间很短,说明在该方法控制下,四相8/6极SRM仿真系统的转矩响应具有

快速性与高抗干扰能力。

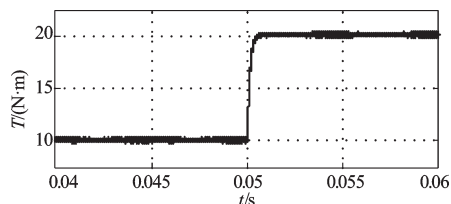
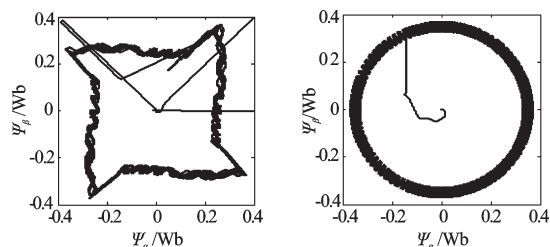


图14 突发干扰下的转矩响应波形图

为了更加明确该控制方法下系统性能的优越性,本研究在进行直接转矩控制仿真的同时,与传统的电流斩波控制仿真进行了对比分析。在两种不同方式控制下的磁链轨迹、磁链幅值波形和局部转矩波形如图15所示,从图中可以看出直接转矩控制下的磁链轨迹近似为圆形,磁链幅值稳定在0.35 Wb左右,而电流



(a) 电流斩波控制下的磁链轨迹 (b) 直接转矩控制下的磁链轨迹

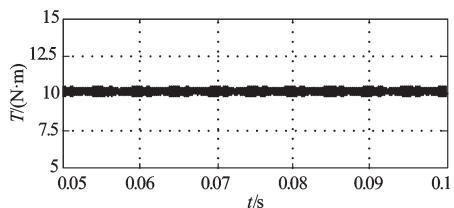
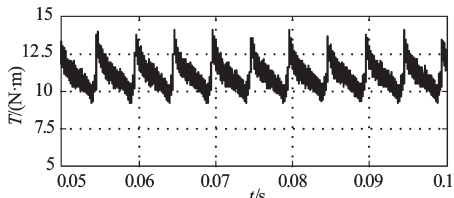
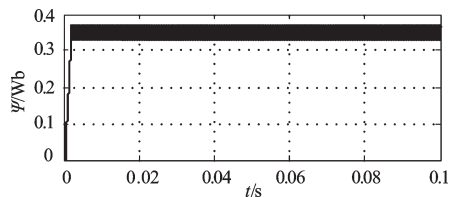
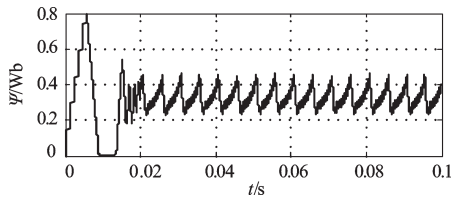


图15 不同控制方法下的磁链轨迹与转矩波形

(下转第342页)

表2 试验结果分析

项目 序号	不合格 毛豆数/个	移除毛 豆数量/个	准确率 /(%)
1	120	115	95.83
2	120	113	94.17
3	120	116	96.67
4	120	118	98.33
5	120	112	93.33
均值			95.67

机和下位机的结构和功能流程,定义了上位机与下位机的实时通信方式,并进行了实际测试。

实验结果表明:该挑选系统准确率达到95.67%,可为各类农副产品挑选系统的设计作参考。

参考文献(References):

- [1] 姚水琼. 欧美国家食品安全检验检测与监管的特点与启示[J]. 食品与机械, 2011, 27(1): 67-70.
- [2] 应义斌, 饶秀勤, 黄永林, 等. 水果高速实时分级控制系统[J]. 农业机械学报, 2004, 35(5): 99-103.

- [3] 王映龙, 徐辉辉, 刘道金, 等. 球形水果实时分级PLC控制系统[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 229-231.
- [4] 李庆中, 汪懋华. 基于计算机视觉的水果实时分级技术发展展望[J]. 农业机械学报, 1999, 30(6): 1-7.
- [5] 孙康岭, 杨兆伟, 张 晔. 基于PLC的自动门控制系统设计[J]. 机电工程, 2010, 27(11): 123-126.
- [6] 宋蕊辰, 庞之详, 李雁飞. 基于PLC和组态王的空压机监控系统设计[J]. 机电工程技术, 2012, 41(7): 13-15.
- [7] 李子彬, 赵志诚, 张井岗. 基于VC++6.0的PC机与PLC串口通信的实现及其应用[J]. 太原科技大学学报, 2008, 29(7): 193-195.
- [8] 彭庆海, 胡小强. Modbus协议及其在MCU与PLC通信中的应用[J]. 机电工程, 2010, 27(4): 52-55.
- [9] 高安邦, 田 敏, 俞 宁, 等. 西门子S7-200 PLC工程应用设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [10] 胡金华. 基于PLC自由通信的CRC校验算法实现[J]. 机电工程, 2007, 24(10): 20-21.
- [11] [美] LIPPMAN S B, MOO B, LAJOIE J. C++ Primer中文版[M]. 李师贤, 蒋爱军, 梅晓勇, 等, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2005.

[编辑: 罗向阳]

(上接第338页)

滞环控制下的磁链轨迹并不规则,磁链幅值波动大,并且电流斩波控制下的转矩脉动约为 $5\text{ N}\cdot\text{m}$,而直接转矩控制下的转矩脉动不超过 $1\text{ N}\cdot\text{m}$,这说明直接转矩控制将四相开关磁阻电机的磁链幅值与转矩值有效地限制在了各自的滞环宽度内,从而达到了抑制转矩脉动和降低噪声的目的。

4 结束语

本研究在分析四相8/6极开关磁阻电动机数学模型的基础上,根据直接转矩控制的原理,提出了四相8/6极开关磁阻电动机电压矢量的选取原则、磁链矢量的计算方式和开关表的建立过程,提出了一种新的扇区判断方法,这种扇区判断方法适用于任意相开关磁阻电动机,为将直接转矩控制推广到任意相开关磁阻电动机奠定了基础。

在此基础上,本研究在Matlab/Simulink环境建立了四相8/6极开关磁阻电动机直接转矩控制的仿真模型,并在速度PID控制下进行了仿真研究。仿真结果表明,系统仿真波形符合理论分析,系统运行稳定且具备优良的转速跟踪与转矩响应能力,并在与传统控制方式的比较下证明了该方法对磁链的限制能力更好,对转矩脉动的抑制效果也更为突出。

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: 86-89.
- [2] 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.
- [3] 宋桂英, 孙鹤旭, 郑 易. 开关磁阻电动机微步位置伺服控制[J]. 微特电机, 2006, 34(5): 36-39.
- [4] 徐生林, 郑 敏, 卢航远, 等. 永磁同步电机直接转矩控制的改进与仿真[J]. 机电工程, 2009, 26(2): 38-41.
- [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: 21-23.
- [6] 张国澎. 开关磁阻电机直接转矩控制系统研究[D]. 西安: 西安科技大学电气与控制工程学院, 2009.
- [7] 邓木生, 李华柏, 谭 平. 直接转矩控制在开关磁阻电机中的应用[J]. 电机技术, 2011, 3(6): 1-5.
- [8] 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.
- [9] 何 杰, 王家军. 基于SVPWM的永磁同步电动机系统建模与仿真[J]. 机电工程, 2009, 26(7): 77-82.
- [10] 李周清. 基于Ansoft的永磁同步电机建模与仿真[J]. 机电工程技术, 2012, 41(4): 35-39.
- [11] 王勉华. 四相开关磁阻电机直接转矩控制方法研究[J]. 电气传动, 2011, 41(4): 8-11.

[编辑: 李 辉]