

开关磁阻电机的直接转矩控制技术研究

黄卓冕¹, 谭平¹, 瞿遂春^{1,2}

(1. 湖南工业大学, 湖南 株洲 412008; 2. 华中科技大学, 湖北 武汉 430074)

摘要: 开关磁阻电机具有结构简单、调速范围宽、性价比高等优点, 但其转矩脉动较大导致了振动和噪声比其他调速系统严重, 制约了它在一些场合中的应用。本文将直接转矩控制技术应用到开关磁阻电机中, 对电机转矩进行控制, 仿真结果证明, 此技术能够将磁链矢量幅值很好的控制在滞环带内, 从而有效地控制转矩脉动, 降低电机的振动和噪声。

关键词: 开关磁阻电机; 转矩脉动; 直接转矩控制

中图分类号: TM352

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2010)04-0088-04

Direct Torque Control Technology of Switched Reluctance Motor

Huang Zhuomian¹, Tan Ping¹, Qu Suichun^{1,2}

(1. Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China;

2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The switched reluctance drive system has simple structure, wide speed variation range, high cost performance and some other special property, and its greater torque ripple also results in more serious vibration and noise than other speed regulating systems, which restricts its application in some field. The direct torque control technology is used in switched reluctance drive system to control the torque of the motor. The simulation results prove that the technology does well in controlling the flux vector amplitude in hysteresis band and effectively controls the motor's torque ripple to inhibit its vibration and noise.

Keywords: switched reluctance motor; torque ripple; direct torque control

开关磁阻电机 (switched reluctance motor, 简称 SRM) 作为一种新型的调速驱动系统, 它具有成本低、调速范围宽、性能好、可靠性高等优点, 已经在很多领域得以应用。但是, SRM 的双凸极结构和局部磁路的高度饱和特性导致转矩脉动问题比其他传统电机更加严重, 制约了它在某些领域中的应用^[1]。为了获取更好的动态性能, 降低电机转矩脉动, 抑制振动和噪声是 SRM 系统值得研究的内容。

本文将直接转矩控制 (direct torque control, 简称 DTC) 策略应用到 SRM 中, 它以转矩控制为主要目的,

对转速和转矩进行直接控制, 在 Matlab/Simulink 中建立了 SRM 直接转矩控制系统仿真模型, 对 SRM 直接转矩控制进行了仿真。结果表明: 该技术可将转矩控制在 1 个滞环内, 以降低转矩脉动, 减少电机的振动与噪声。

1 开关磁阻电机转矩特性分析

据开关磁阻电机的基本工作原理知道, SRM 的绕组电流为单脉冲形式, 且各相之间相互独立, 故交流

收稿日期: 2010-04-09

通信作者: 黄卓冕 (1981-), 男, 湖南长沙人, 湖南工业大学硕士研究生, 主要研究方向为电力电子与电力传动,

E-mail: zhmhuang_1981@126.com

电机的旋转磁场理论不能直接用于 SRM 的分析中^[1]。

图 1 为四相 SR 电机工作原理图。由图 1 可知, 电机每相的基本电压方程为:

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

式中: $\psi(\theta, i)$ 为相磁链, 是相电流和转子位置的函数; θ 为转子位置角; i 为相绕组电流; R 为相绕组电阻。

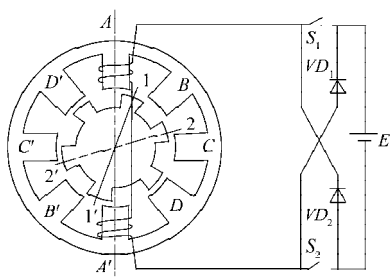


图 1 四相 SR 电机工作原理图

Fig. 1 Operating principle of four-phase SRM

将式 (1) 展开可得:

$$U = Ri + \frac{\partial\psi(\theta, i)}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial\psi(\theta, i)}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$

因功率表达式可以写成 $P=ei$, 而 $U=e+Ri$, 由于开关磁阻电机磁场的高度饱和特性, R 对电磁转矩的影响非常小, 可忽略不计, 综上分析则有

$$P = Ui = i \frac{\partial\psi(\theta, i)}{\partial i} \frac{di}{dt} + i \frac{\partial\psi(\theta, i)}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

那么 SRM 的电磁转矩可近似表示为:

$$T = \frac{P}{\Omega} = i \frac{d\psi(\theta, i)}{dt} \frac{d\theta}{d\theta} = i \frac{d\psi(\theta, i)}{d\theta} \quad (4)$$

式中: Ω 为电机转动角速度。

2 SRM 直接转矩控制的基本原理

直接转矩控制方法是继矢量控制技术之后发展起来的一种新型交流变频调速技术。它是根据给定的电磁转矩指令与交流电机的实际电磁转矩观测值相比较得到转矩误差, 确定转矩的调节方向, 再根据定子磁链的大小与相位角选择合适的定子电压空间矢量, 从而确定三相电压源逆变器的开关状态, 使交流电机的电磁转矩快速跟踪外部给定电磁转矩指令值。也就是说, 在给定电磁转矩指令的同时, 还要根据电机的实际运行情况给定定子磁链指令值, 并采用滞环控制器控制定子磁链误差在限定的范围内变化^[2]。

2.1 定子磁链的控制

从上面的转矩特性分析可看出, SRM 转矩也是瞬时电流的函数, 与普通交流电机的直接转矩控制一样, 在开关磁阻电机的控制方法中, 定子电流相对定

子磁链变化具有一阶延迟, 那么在对转矩控制时就可以仅对磁链进行控制, 而无需考虑电流的变化。

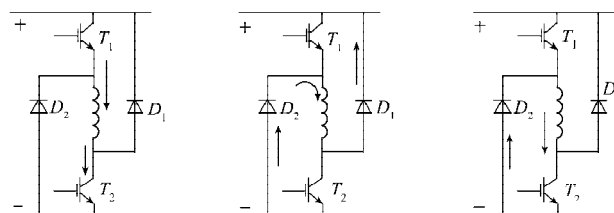
由式 (1) 变换可得:

$$\psi(\theta, i) = \int (U - iR) dt \quad (5)$$

SRM 同普通交流电机一样, 定子电阻很小, 可忽略不计。由 $\Delta\psi = u\Delta t$ 可看出, 定子磁链变化幅值与电压和定子所加电压的时间有关, 定子磁链增加的方向与所加电压方向一致。所以, 只要对电压进行合理控制, 就可以把磁链控制在一个给定的滞环带内, 确保磁链幅值的基本恒定^[3-6]。

2.2 电压矢量的确定

在开关磁阻电机中, 可分别对各相绕组进行独立控制。不同功率变换电路, 各相绕组可获取的电压状态种类不同。在直接转矩控制中, 必须使绕组能够获取尽可能多的电压状态, 这样才能更灵活地对电机进行控制。下面以不对称半桥功率变换器为例进行分析, 图 2 为 SRM 某一相绕组的 3 种不同电压矢量状态, 其中 a)、b)、c) 的绕组电压状态依次为 +1, 0, -1。



a) 电压状态 +1 b) 电压状态 0 c) 电压状态 -1

图 2 电压矢量的不同状态

Fig. 2 Different states of voltage vector

当 A 相绕组 2 个开关管同时导通时, 定义 A 相绕组的电压状态 S_A 为 +1, 此时绕组上的电压为正; 当 2 个开关管都关断, 绕组不存在电流或只通过续流二极管时, 定义 A 相绕组的电压状态 S_A 为 0, 此时绕组上加的电压是负电压^[2]; 当其中一个开关管关断, 绕组电流不为 0 时, 定义 A 相绕组的电压状态 S_A 为 -1。

由于每相电压有 3 种状态, 那么对于 1 个四相 SRM 来说就有 81 种电压状态。在异步电机的直接转矩控制中, 选取 6 个基本的电压空间矢量, 而这些电压空间矢量在开关磁阻电机控制中却不再适用, 为此, 本文重新定义了一组电压空间矢量如图 3 所示。

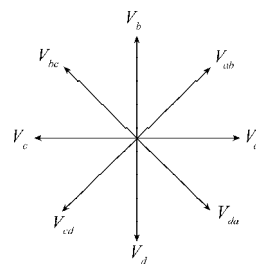


图 3 SRM 直接转矩控制的电压矢量图

Fig. 3 Voltage vector diagram of SRM direct torque control

在开关磁阻电机的调速系统中，为尽量减少开关状态变化引起的损耗，实现对电机的精确控制，不同开关状态的操作顺序必须遵守“每次切换开关状态时，只切换1个功率开关器件”的原则，也就是电压只能按照从+1→0→-1的顺序切换。因此，本文所选取的8个非零有效电压矢量对应的开关状态变化次序，如表1所示。

表1 电压矢量对应的开关状态

Table 1 Voltage vector corresponding switch states

电压空间矢量	开关状态	电压空间矢量	开关状态
V_1	1 0 -1 0	V_5	-1 0 1 0
V_2	1 1 -1 -1	V_6	-1 -1 1 1
V_3	0 1 0 -1	V_7	0 -1 0 1
V_4	-1 1 1 -1	V_8	1 -1 -1 1

各电压矢量依次相差 45° ，将圆周分为8个区，依次设定为 $S_1 \sim S_8$ ，在电机运行过程中，任意时刻的4相绕组在取得非零电压时，相对应的功率开关的状态只能取上述8种，如图4所示。

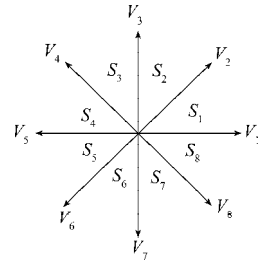


图4 电压空间矢量和扇区
Fig. 4 Voltage space vector and the distribution sector

3 SRM 直接转矩控制系统仿真研究

根据前文对开关磁阻电机直接转矩控制系统原理的分析，在Matlab/Simulink中建立SRM直接转矩控制系统仿真模型，如图5所示。

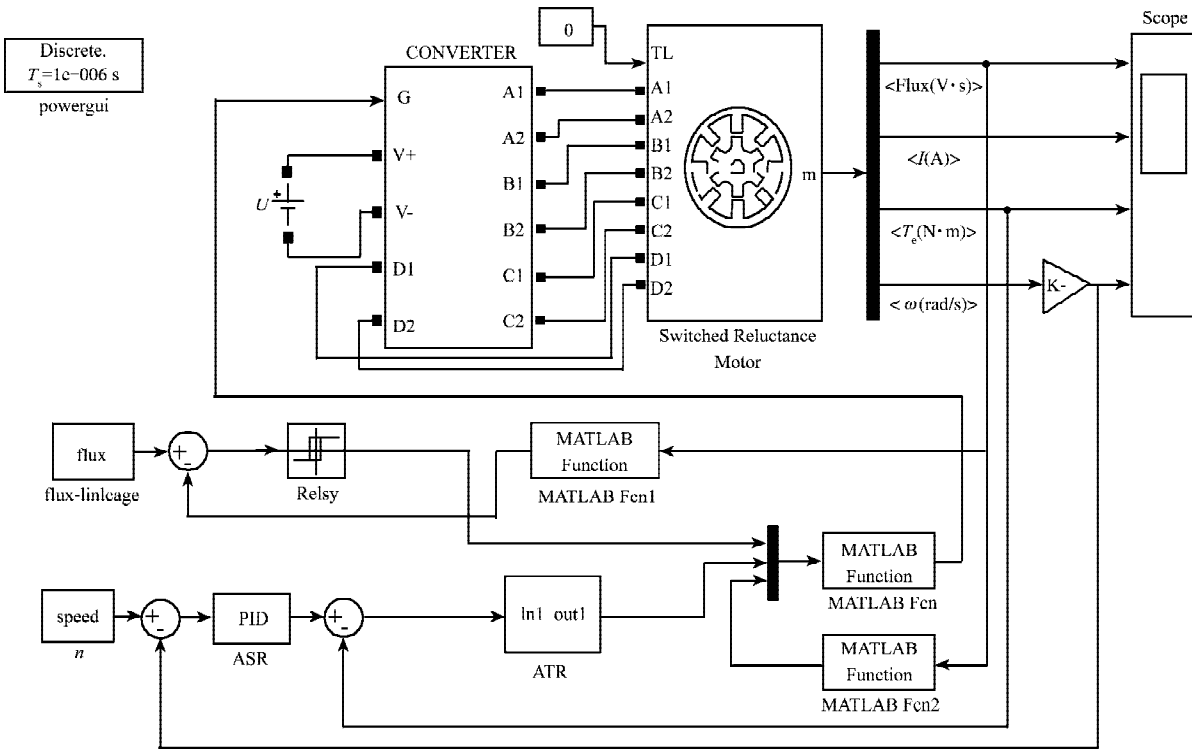
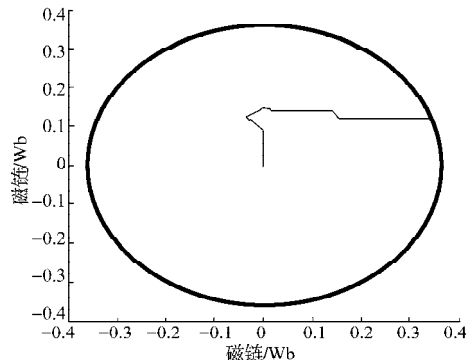


图5 SRM 直接转矩控制仿真图

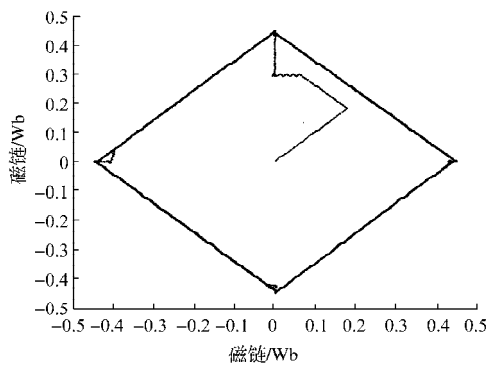
Fig. 5 Simulation diagram of SRM direct torque control

由图5可看到，整个系统主要包括功率变换器、SRM电机、转速调节器、转矩调节器、磁链调节器、电压空间矢量选择单元。

通过对SRM直接转矩控制和电流斩波控制的仿真，得到2种不同控制方式下的磁链轨迹和转矩波形如图6所示（其中a）图为直接转矩控制下的磁链轨迹，b）图为电流斩波控制下的磁链轨迹）。通过图形对比可看出，直接转矩控制达到了保持SRM磁链幅值基本恒定的目标，磁链轨迹是个圆形，且磁链幅值变化被限定在一定范围内，效果好于电流斩波控制。



a) 直接转矩控制

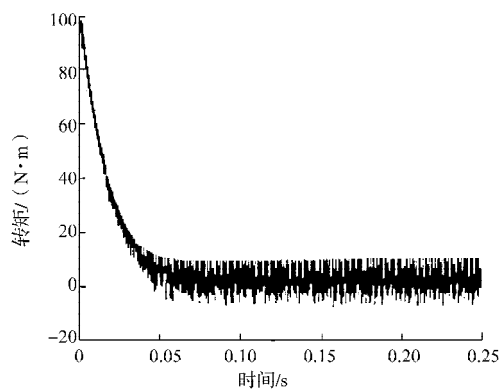


b) 电流斩波控制

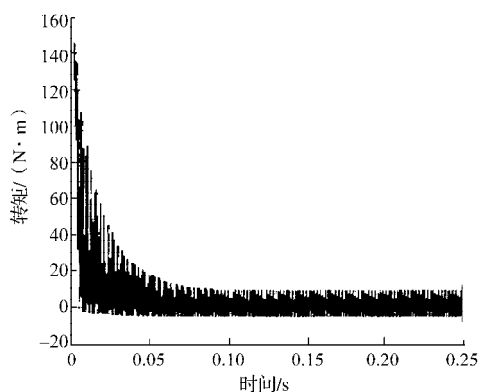
图6 不同控制方式下的磁链轨迹

Fig. 6 Flux linkage trajectory under different control modes

图7分别给出了2种不同控制方式下的转矩波形(其中a)图为直接转矩控制下的转矩波形,b)图为电流斩波控制下的转矩波形)。



a) 直接转矩控制



b) 电流斩波控制

图7 不同控制方式下的转矩波形

Fig. 7 Torque waveform under different control modes

由图7可以看出,在直接转矩控制方式下,转矩动态响应快,且SRM电机输出转矩波动明显减小,波

动幅值远远小于电流斩波时转矩的波动,改善了SRM电机转矩脉动,达到了抑制SRM电机转矩脉动和减小噪声的目标。

4 结语

本文将直接转矩控制理论应用到开关磁阻电机调速系统中,并对开关磁阻电机的直接转矩控制系统进行了仿真分析,给出了仿真结果图,同时将仿真结果与开关磁阻电机在电流斩波控制下的仿真结果进行了对比。对比结果表明,直接转矩控制在开关磁阻电机调速系统的应用,能够将磁链矢量幅值较好地控制在滞环带内,能够有效地抑制开关磁阻电机的转矩脉动,降低振动和噪声。

参考文献:

- [1] 王宏华. 开关磁阻电动机调速控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
Wang Honghua. The Control Technology of Switched Reluctance Motor[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [2] 宋桂英, 孙鹤旭, 郑易, 等. 开关磁阻电动机直接转矩控制的研究[J]. 电气传动, 2004, 34(5): 11-13.
Song Guiying, Sun Hexu, Zheng Yi, et al. Study on Direct Torque Control of Switched Reluctance Motor[J]. Electric Drive, 2004, 34(5): 11-13.
- [3] 阳细斌, 杨向宇, 刘德. 无位置传感器开关磁阻电机的直接转矩控制的研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2008(2): 79-81.
Yang Xibin, Yang Xiangyu, Liu De. A Study of the Direct Torque Control of A Switched Reluctance Motor with No Position Sensor[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2008(2): 79-81.
- [4] Zheng Hongtao, Jiang Jingping, Xu Dehong, et al. Switched Reluctance Motor Sensorless Drive with Energy Optimizing Control Strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 153-157.
- [5] 王勉华, 梁媛媛, 宋景哲. 直接转矩控制在开关磁阻电机中的应用与研究[J]. 电气传动自动化, 2008, 30(2): 20-23.
Wang Mianhua, Liang Yuanyuan, Song Jingzhe. Application and Research on Direct Torque Control in Switched Reluctance Motors[J]. Electric Drive Automation. 2008, 30(2): 20-23.
- [6] 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.

(责任编辑: 李玉珍)