



## 基于转矩矢量控制的开关磁阻电机汽车驱动系统

雷淑英<sup>1,2</sup>, 张庆超<sup>2</sup>, 程晓玲<sup>1</sup>

(1. 天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222; 2. 天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 提出了一种基于瞬时电流控制的抑制开关磁阻电机转矩脉动的微步控制策略. 设计了以 TMS320LF2407 为主控制器的电动汽车用开关磁阻电机数字化驱动系统, 给出了系统的硬件电路和软件框图. 采用转矩矢量控制策略, 有效地抑制了转矩脉动. 仿真实验结果表明, 本系统具有良好的动态和静态特性, 可有效地抑制转矩脉动, 满足电动车控制需要.

**关键词:** 开关磁阻电机; DSP 控制器; 电动汽车

**中图分类号:** TP27      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-6510 (2008) 01-0042-04

### A Torque Vector Control System of Switched Reluctance Motor for Electric Vehicle

LEI Shu-ying<sup>1,2</sup>, ZHANG Qing-chao<sup>2</sup>, CHENG Xiao-ling<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation of Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The micro-step method based on the phase current aiming to reduce the torque ripple was proposed. The SRM driving system used in the electric vehicle was presented by TMS320LF2407 as main controller. The hardware circuit and the software block diagram were presented. The system adopted the novel torque vector control strategy, it can effectively reduce the torque ripple. The results from simulation and experiment show that this system possesses good dynamic and static characteristic, can effectively minimize the torque ripple and satisfy the demand of the electric vehicle performances.

**Keywords:** SRM; DSP controller; the electric vehicle

现代电动汽车集光、机、电、化各学科领域中的最新技术于一体, 是汽车、电力拖动、功率电子、智能控制、化学电源、计算机、新能源、新材料工程技术中最新成果的集成产物. 现在世界著名的汽车公司已经有多个电动汽车车型投入了小批量生产, 美国通用汽车公司和法国雪铁龙建立了电动汽车生产线, 本田、福特、克莱斯勒等公司的电动汽车生产线都已经启动. 在我国, 清华大学从 70 年代起就开始了电动汽车的研究, 国家科委先后把电动汽车的研究列入国家“八五”和“九五”计划重大攻关项目, 现已研制出部分样车. 电动汽车作为新型绿色环保交通工具, 其产业化所面临的关键问题是: (1) 世界至今还没有研制出实用的电动汽车电池, 也没有找到解决这一

问题的方案. 现有蓄电池大多容量小、质量大、寿命短、充电时间长、价格昂贵; (2) 电动汽车的最高车速、加速性能、续驶里程等性能都不如燃油汽车, 虽然已有行驶里程超过 200 km 的电动汽车<sup>[1,2]</sup>, 但绝大部分不超过 100 km. 开发低耗能、高效率的电动汽车驱动系统是解决问题的一条途径.

本文选用开关磁阻电机作为电动汽车的驱动电机, 以美国 TI 公司生产的 TMS320LF2407 数字信号处理芯片作为主控制器, 深入研究了 SRD 系统的调速特性及控制方式. 与传统的电动汽车相比该驱动系统具有硬件电路简单, 电动机调速范围宽, 并能够方便实现四象限运行.

收稿日期: 2007-09-07; 修回日期: 2007-11-15

基金项目: 天津市高等学校科技发展基金资助项目 (0214099)

作者简介: 雷淑英 (1964—), 女, 辽宁营口人, 副教授.

## 1 SR 电机矢量控制策略

### 1.1 SR 电机矩角特性

由 SR 电动机运行原理可以知道,其转矩是由磁路选择最小磁阻结构的趋势而产生的.由于 SR 电动机磁路的非线性,通常 SR 电动机的转矩根据磁共能来计算,即

$$T_k(\theta, i) = \frac{\partial W(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (1)$$

式中:  $\theta$  为转子位置角;  $i$  为绕组电流;  $k$  为电机相数.在忽略开关磁阻电机磁路饱和及边缘效应,且假定电感与电流无关,则式(1)可简化为

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

式中  $L$  为 SR 电动机相绕组的自感,其变化周期与转子的极对数成正比,利用傅里叶分解,且忽略高次谐波的影响,则  $L$  可表示为

$$L = L_0 + L_{\max} \cos(N_r \theta) \quad (3)$$

式中  $L_0$ 、 $L_{\max}$  为电感的恒定分量和谐波分量的幅值,据此电磁转矩可表示为

$$T_k(\theta, i) = -\left(\frac{1}{2} N_r L_{\max} i^2\right) \sin(N_r \theta) = -T_{\max} \sin(N_r \theta) \quad (4)$$

式(4)即为 SR 电机的矩角特性.在 SR 电动机中,当定转子中心线对准时,气隙很小,磁路是饱和的,而且从提高电机出力、减小功率变换器容量要求考虑,则磁路必须是饱和的.因此,电感实际上是转子位置  $\theta$  和相电流  $i$  的函数,故电磁转矩也是转子位置  $\theta$  和相电流  $i$  的函数.

### 1.2 SR 电机转矩矢量控制原理

在矩角特性分析中,每相绕组产生的基波电磁转矩是一种空间正弦波,其幅值与绕组磁动势平方成正比,稳定零位取决于该相磁极中心线的位置.因此,可以用空间矢量  $T_k$  代表  $k$  相绕组的电磁转矩,其相位和  $k$  相绕组磁极中心线一致.在开关磁阻电动机步进运动分析中,转矩星形图是一个强有力的分析工具.

对于四相 8/6 极 SR 电动机而言,  $A, B, C, D$  四相绕组产生的稳定零位在空间依次相差一个转子步进角,用机械角表示为  $15^\circ$ ,电角度为  $90^\circ$ ,如果依次给四相通入幅值相等的直流电,则转矩矢量  $T_A, T_B, T_C$  和  $T_D$  依次产生定位作用,开关磁阻电动机的转子将以步进角  $15^\circ$  一步一步旋转.

如果忽略 SR 电机互感,允许将定位转矩进行矢量叠加,则得图 1 所示的转矩星型图,其中  $T_{AB}$ 、

$T_{BC}$ 、 $T_{CD}$  和  $T_{DA}$  是两相同时供电时产生的合成转矩矢量.  $T_{AB}$  比  $T_A$  超前  $45^\circ$  电角度,相当于  $1/8$  转子齿距,按机械角度计算为  $7.5^\circ$ .可以理解为  $T_{AB}$  和  $T_A$  错开半个步进角.转矩星型图中转矩矢量间的相位关系只取决于定子磁极中心线间的距离.称  $T_A, T_B, T_C$  和  $T_D$  为基本转矩矢量,它们的相位取决于定子磁极中心线的空间位置,与各相绕组的电流大小无关.由基本转矩矢量合成的转矩  $T_{AB}, T_{BC}, T_{CD}$  和  $T_{DA}$  称为派生转矩矢量.派生转矩矢量的相位是可以通过绕组电流的控制加以调节.因此,可以通过调节  $A, B$  两相绕组的电流去控制派生转矩  $T_{AB}$  的相位,使它出现在基本转矩矢量之间的任何相位上,这就是微步细分控制原理<sup>[3]</sup>.

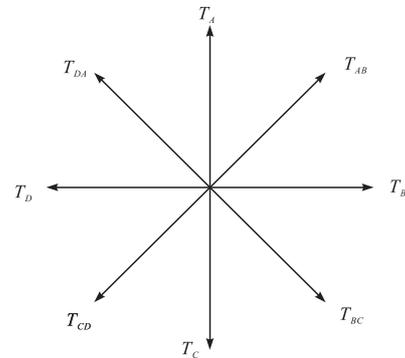


图 1 电机转矩星型图

Fig. 1 Diagram of the torque-star

### 1.3 转矩脉动的抑制

由于开关磁阻电动机本身的特点,即使采用最佳换相点方法,合成转矩在换相点之间依然存在转矩脉动,其根本原因在于,这种一相通电一相断电的换相方式必然在换相点附近产生转矩下凹区,从而产生转矩脉动.显然,开关磁阻电动机输出瞬时转矩的脉动性限制了其在伺服传动等要求低速运行转矩无脉动场合下的应用.

在常规的开关磁阻电动机的运行中,步进角只有一种,即整步运行,而步进角是由电机本身的结构决定的.由微步细分控制原理可知,若要求电机有更小的步进角,可以在每次换相时,关断相电流时并不立即关断到零,而是按阶梯下降;导通相也并不是全压导通,而是按阶梯逐渐导通,反映到转矩上就是在换相期间导通相转矩线性减少,下一相转矩线性增加,但总的合成转矩恒定不变.这里,绕组电流不是一个方波而是阶梯波,在换相时电流分几个台阶,就可以合成出几个派生转矩矢量,同时电机的稳定零位增加几个,转子就以同样的次数转过一个步进角,也就是说转子的每步运行也只运行步进角的一部分.电机输

出转矩的平滑性得到了改善,从而有效地减小电机转矩的脉动。(8/6)极四相开关磁阻电动机的步进角为 15°。如果采用微步控制策略,其通电顺序为

正转时: A-AB1-AB2-AB3-B-BC1-BC2-BC3-C-CD1-CD2-CD3-D-DA1-DA2-DA3-A

反转时: A-AD1-AD2-AD3-D-DC1-DC2-DC3-C-CB1-CB2-CB3-B-BA1-BA2-BA3-A

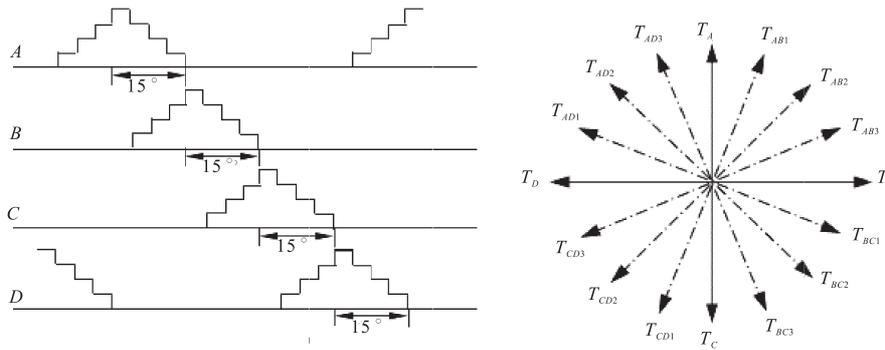


图 2 (8/6)极 SRM 微步控制绕组电流及对应的转矩星型图

Fig. 2 The winding current and the torque-star for the micro-step control

## 2 SR 电机驱动系统设计

### 2.1 硬件电路

系统的硬件结构如图 3 所示。

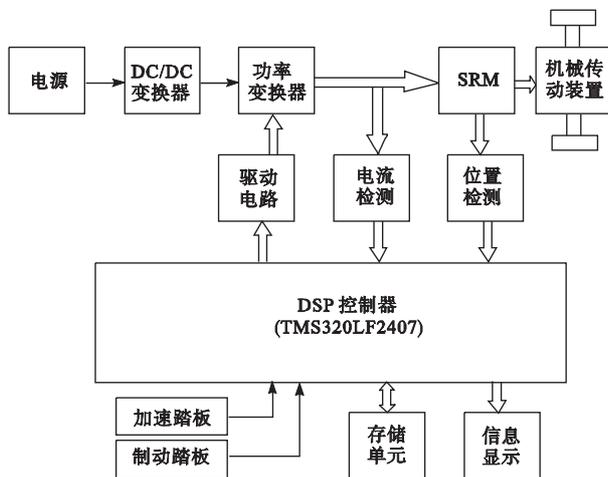


图 3 四相 SRM 驱动系统硬件结构图

Fig. 3 Hardware diagram of the drive system

控制系统以 TI 公司的 TMS320LF2407 为主控制器,主要由主控制器及其外围接口电路、电源、DC-DC 模块、功率变换器及其驱动电路、电流检测电路及位置检测单元等组成.其中外围接口电路主要包括控制信号输入和显示电路、I/O 接口电路、以及片外数据存储器 and 片外程序存储器.功率驱动电路 DSP

即十六拍为一个周期,则步进角由 15° 变为 3.75°. 为了保证恒转矩,由转矩星型图很容易看出,对同时工作的两相可以通过改变相应的绕组电流大小来改变对应的电磁转矩,使对应每一步的合成转矩保持恒定.随着电机每转细分步数的增加,电机的步进角则逐渐减小,从而使电机输出转矩的平滑性得到了很好的控制,转矩脉动得到了抑制<sup>[4,5]</sup>.

输出采用低电平有效,经过光电隔离反相变为高电平有效.功率开关器件采用 PWM 电压斩波控制,每一相的开通角和关断角由绕组电流、转子位置和速度信号确定.其中 A 相和 C 相绕组共用一个电流传感器, B 相和 D 相共用一个电流传感器.这两路传感器输出的模拟电压信号经过放大滤波后接到 DSP 的 ADC 模数转换输入通道 ADCIN00、ADCIN01 作为电流环的反馈信号.

### 2.2 软件设计

本系统的软件部分采用矢量控制策略,对每个通电相采用变角度电压 PWM 控制方法,对 SRM 进行控制.本控制程序主要包括主程序和中断服务子程序.

主程序的主要功能是进行系统的初始化和事件管理器(包括定时器、A/D 转换器、PWM 通道)的初始化,SRM 参数的初始化以及当前转速显示等.子程序包括转子位置中断子程序和定时中断子程序.转子位置中断通过 QEP 单元来检测转子的位置,定时中断子程序是本控制系统的核心部分,此子程序中的 ADC 转换子程序用于完成导通相电流的 A/D 转换功能;电流 PWM 调节子程序实现对导通相电流的脉冲宽度调制控制;转速 PI 调节子程序根据速度给定量与实际值的偏差对转速进行 PI 控制;转向输入子程序根据电机要求的旋转方向及转速实现对各相绕组导通顺序及导通时间控制.

### 3 实验

为了实现转矩脉动的抑制,运用微步控制策略对系统进行了仿真研究,仿真软件采用 Matlab/Simulink. 采用的电机有关参数为:  $N_s=8$ ;  $N_r=6$ ;  $U=460$  V;  $P_N=0.75$  kW;  $J=0.0016$  kg·m<sup>2</sup>;  $L_{max}=110$  mH;  $L_{min}=10$  mH.

图4(a)和图4(b)分别为没有采用微步控制策略和采用微步控制策略时的稳态转矩.从仿真结果

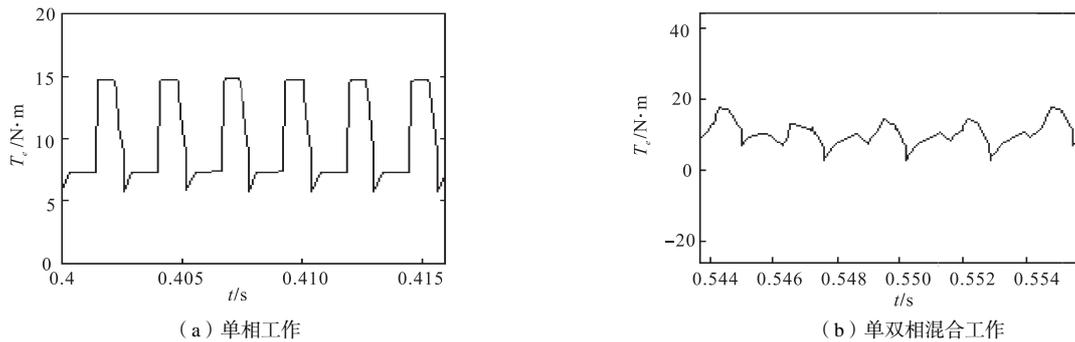


图4 单相和单相混合工作时转矩仿真曲线

Fig. 4 The curve of the basic torque and the composed torque

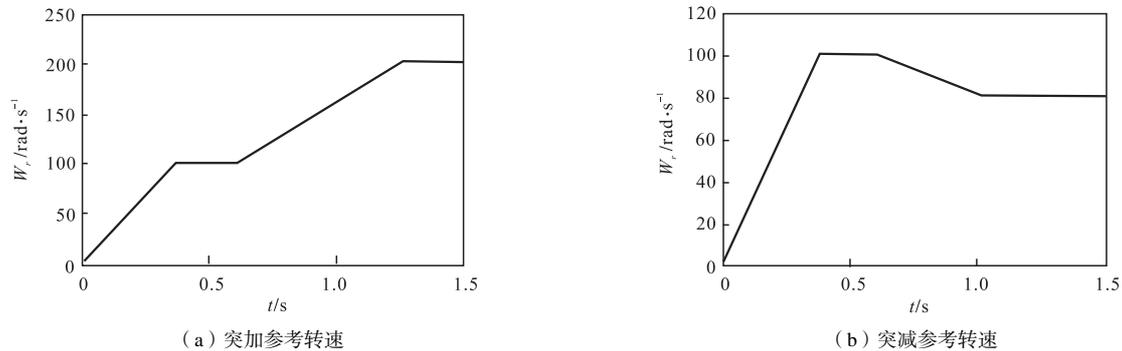


图5 参考转速突变时的转速变化

Fig. 5 Rotational speed as sudden change of the given speed

### 4 结语

基于开关磁阻电动机的线性模型,分析了SR电机的转矩矢量特性,将微步控制策略应用于电动汽车驱动系统控制中.设计了以TMS320LF2407数字信号处理芯片为核心的电动汽车驱动系统,理论分析和仿真结果表明,将微步控制理论应用于开关磁阻电机调速系统,能够在低速下有效地抑制开关磁阻电机的转矩脉动,大大提高了电机的动态特性.这种控制策略控制简单,为开关磁阻电动机向更广领域的实际应用提供了有利条件.

可以看出,运用微步控制策略的电机稳态合成转矩脉动大大减小,可见,采用微步控制理论能有效提高电机的动态特性,抑制电机的转矩脉动和噪声.

图5(a)和图5(b)分别为 $t=0.6$  s时,参考转速由100 rad/s突变为200 rad/s和参考转速由100 rad/s突变为80 rad/s的转速变化波形.从仿真结果可以看出,运用微步控制策略能够在低速下有效地抑制开关磁阻电机的转矩脉动,提高了电机的动态特性;在参考转速突变过程中,实际转速能迅速跟随,无静差,说明具有较高的控制精度.

### 参考文献:

- [1] 赵德安,刘东.一种新型车用开关磁阻电机启动/发电一体机系统[J].江苏大学学报,2006(1):59—62.
- [2] 程飞,过学迅.电动汽车用电机及控制技术[J].防爆电机,2006(5):14—19.
- [3] 李继生.开关磁阻电机微步控制系统的研究[D].阜新:阜新矿业学院,1995.
- [4] Krishnan R. Switched reluctance motor drives modeling simulation analysis design and applications [M]. USA: CRC Press, 2001.
- [5] Hussin L, Ehsani M. Torque ripple minimization in switched reluctance motor drive by PWM current control [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1996, 11: 83—88.