

文章编号:1671-251X(2009)10-0050-04

# 基于 DSP 的全速度范围开关磁阻电动机 无位置传感器控制

宋宏志<sup>1</sup>, 谭国俊<sup>1,2</sup>, 张旭隆<sup>1,2</sup>, 尉松岩<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学信电学院, 2. 江苏省电力传动与自动控制工程技术研究中心, 江苏 徐州 221008)

**摘要:**传统的开关磁阻电动机(SRM)调速系统中的位置传感器导致系统结构复杂度加大、成本提高、可靠性降低等。针对该问题,文章提出了激励脉冲法和改进的简化磁链法相结合的新型无位置传感器控制方案,即静止与接近零速度时采用激励脉冲法,中高速时采用改进的简化磁链法。采用 TMS320F2812 DSP 对 12/8 极 SRM 的实验结果证实了该方案的有效性和可行性,SRM 转矩脉动小,启动转矩大,动态特性好,适用于工业现场全速度范围。

**关键词:**开关磁阻电动机; SRM; 调速; 无位置传感器; 全速度范围; DSP

**中图分类号:**TD614.3 **文献标识码:**A

## Sensorless Control of Switched Reluctance Motor in Full Range of Speed Based on DSP

SONG Hong-zhi<sup>1</sup>, TAN Guo-jun<sup>1,2</sup>, ZHANG Xu-long<sup>1,2</sup>, KUAI Song-yan<sup>1,2</sup>

(1. School of Information and Electrical Engineering of CUMT., Xuzhou 221008, China.

2. Jiangsu Electrical Drive & Control Engineering Technology Research Center, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** Mechanical position sensors of speed regulation system of traditional switched reluctance motor (SRM) have brought many restrictions to the system, such as increasing complexity of structure, raising cost and decreasing reliability. A novel sensorless control scheme combined with voltage pulses method and improved simplified stator flux linkage method was proposed, which uses the voltage pulses method at standstill and near-zero speed as well as the stator flux linkage method at medium and high speed. The experimental result of 12/8 SRM based on TMS320F2812 DSP verified the validity and feasibility of the scheme, which makes SRM have small torque ripple, large output torque and good dynamic performance. The scheme is suitable for industrial field in full range of speed.

**Key words:** switched reluctance motor, SRM, speed regulation, sensorless, full range of speed, DSP

### 0 引言

开关磁阻电动机(Switched Reluctance Motor, SRM)由于其固有的定子转子双凸极结构(定子上有集中励磁绕组,转子无绕组)而具有结构简单、工作可靠、可控性好、宽速度范围内效率高等优点,其在变频调速领域的巨大潜力和竞争力使其成为学术

界的研究热点,并在工业现场日益获得广泛应用。对于传统的 SRM 调速系统而言,实时而准确的转子位置信息是其可靠运行和高性能控制的必要前提<sup>[1]</sup>。然而位置传感器不仅提高了系统成本和复杂程度,更重要的是降低了系统结构的坚固性,影响系统运行的可靠性,尤其是在潮湿、振动、多尘等环境较恶劣的场合。

目前,国内外提出了许多无位置传感器检测方案,其中信号注入法利用空闲相,人为地注入低幅高频的测试信号,从而产生需要的电流等信息以得到转子位置信息,但其影响了电动机的出力效果,且只适用于低速范围。而磁链-电流法利用磁链、相电

收稿日期:2009-05-15

作者简介:宋宏志(1967-),男,山西阳城人,中国矿业大学信电学院在读博士研究生,研究方向为电力电子与电力传动。E-mail:zhoupeihua779@163.com



流与转子位置角的关系曲线进行估算,需要大量的磁链数据存储空间<sup>[2]</sup>,且数学模型过于简单,导致检测精度不高。状态观测器法通过引入相电感和转子位置的函数关系来实时计算转子位置,无需附加额外硬件检测设备,但对所建系统模型的精确度要求较高,算法复杂,要求CPU的处理速度较高。考虑到工业现场的要求和成本考虑,本文提出了一种基于激励脉冲法和改进的简化磁链法相结合的新型无位置控制方案,即静止与接近零速度时采用激励脉冲法,中高速时采用改进的简化磁链法,方案简单可靠、有效可行。实验结果证明,该系统允许加负载启动,转矩脉动小,动态响应快速,适用于工业现场全速度范围。

## 1 SRM无位置传感器调速系统结构

SRM无位置传感器调速系统为电流速度双闭环结构,内环为电流环,外环为速度环,如图1所示。其中给定速度 $\omega$ 与反馈速度 $\hat{\omega}$ 经速度PI调节器得到电流给定 $i_{ref}$ , $i_{ref}$ 再与SRM的反馈电流 $i_{ph}$ 比较形成电流偏差,控制PWM脉冲。SRM反馈的电压 $u_{ph}$ 和电流 $i_{ph}$ 通过磁链观测计算,得到真实磁链 $\Psi$ 。在已知磁链 $\Psi$ 和电流 $i_{ph}$ 的情况下,进一步由SRM模型得到转子位置角 $\hat{\theta}$ ,由速度估算模块得到反馈转速 $\hat{\omega}$ 。

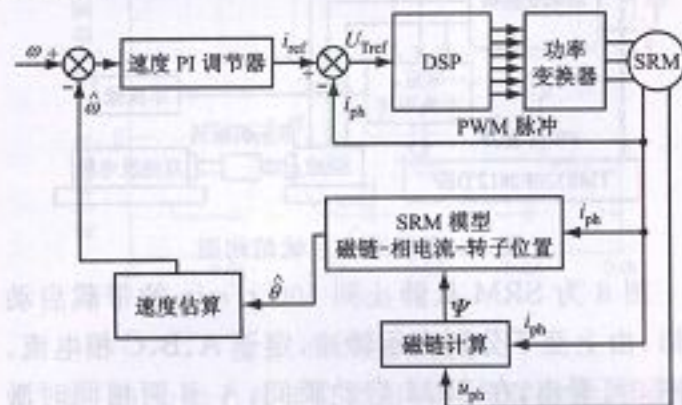


图1 SRM无位置传感器调速系统结构框图

图1中,系统样机为三相12/8极15kW SRM,功率变换器采用三相不对称半桥结构,由蓄电池或交流电整流后的直流电供电,如图2所示,其中主开关器件 $Q_1 \sim Q_6$ 为IGBT, $D_1$ 和 $D_2$ 为续流二极管。

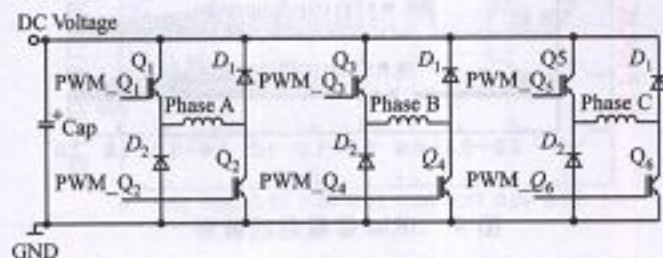


图2 功率变换器拓扑结构图

## 2 无位置传感器控制策略

### 2.1 激励脉冲法

在不饱和状态下,SRM的相电流变化速率取决于电感,而电感又是由转子位置来决定的,利用这一规律就可以解算出转子位置信息。当SRM由恒定直流电源 $U_s$ 供电时,定子相电压方程为

$$U_s = Ri + \frac{d\Psi(i, \theta)}{dt} = Ri + \frac{d[iL(i, \theta)]}{dt} \\ = Ri + l(i, \theta) \frac{di}{dt} + i \frac{\partial L(i, \theta)}{\partial i} \omega \quad (1)$$

式中: $L(i, \theta)$ 为相电感; $l(i, \theta)$ 为相增量电感,与 $L(i, \theta)$ 的关系为 $l(i, \theta) = L(i, \theta) + i \frac{\partial L(i, \theta)}{\partial i}$ ; $i \frac{dL(i, \theta)}{d\theta} \omega$ 为运动电势项。

在低速时采用激励脉冲法,因此,可忽略运动电势项,即:

$$U_s = Ri + l(i, \theta) \frac{di}{dt} \quad (2)$$

故低速时可通过 $l(i, \theta)$ 解算出转子位置信息。

电动机启动时,依次对电动机三相绕组通以 $100 \mu s$ 的激励脉冲,得到相应的3个响应电流,比较3个响应电流的大小决定导通相。工作相确定的同时,脉冲激励测试相也就确定了。SRM正向运行启动工作相和测试相选择如表1所示。

表1 SRM正向运行启动工作相和测试相选择表

响应电流比较	导通相	测试相
$I_a > I_b \geq I_c$	A相和C相	B相
$I_a \geq I_c > I_b$	C相	B相
$I_b \geq I_a > I_c$	A相	C相
$I_b > I_c \geq I_a$	A相和B相	C相
$I_c > I_a \geq I_b$	B相和C相	A相
$I_c \geq I_b > I_a$	B相	A相

从表1可看出,为了保证启动转矩,对于三相12/8极SRM来说,虽然运行时为单相轮流导通,但在启动时有两相绕组同时工作的情况。DSP获得工作相和测试相信息后就可以进入低速运行阶段,仍然采用激励脉冲法确定SRM换相控制。SRM启动流程如图3所示。

### 2.2 简化磁链法

SRM的双凸极结构使得其通常工作在磁饱和状态,因此,难以建立可以求解的精确数学模型<sup>[3]</sup>。SRM的磁链特性可以通过有限元分析或实验测量的方法获得,其表现形式为电动机磁链、相电流和转



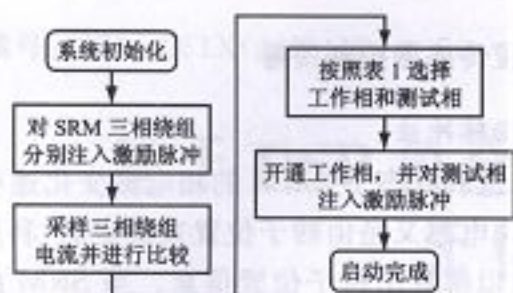


图3 SRM启动流程图

子位置之间的曲线族。对于三相12/8极结构的SRM,  $\theta=0^\circ$ 对应于定子凸极中心与转子凹槽中心重合的位置, 此处相电感最小;  $\theta=22.5^\circ$ 对应于定、转子凸极中心完全对齐的位置, 此处相电感最大<sup>[4]</sup>。图4为磁链特性的二维曲线, 图5为磁链特性的三维曲线。

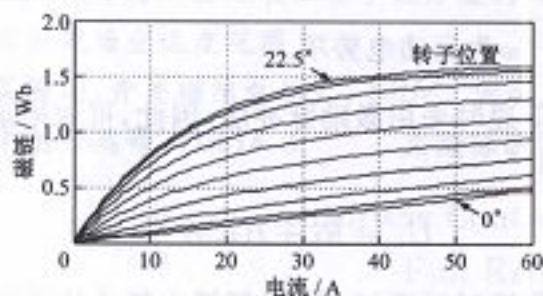


图4 磁链特性的二维曲线

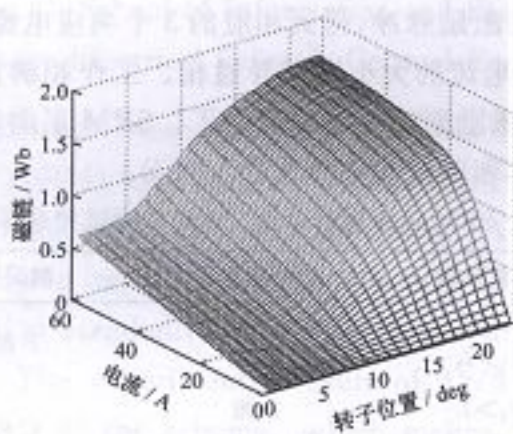


图5 磁链特性的三维曲线

SRM一相电压方程为

$$u = iR + \frac{d\Psi}{dt} \quad (3)$$

由式(3)可解得一相绕组磁链表达式:

$$\Psi = \int_0^t (u - iR) dt + \Psi(0) \quad (4)$$

将式(4)离散化, 得到磁链计算公式:

$$\Psi = \Psi(0) + \sum_{k=1}^N [u(k) - i(k) \times r(k)] \times T \quad (5)$$

式中:  $u(k)$ 、 $i(k)$ 、 $r(k)$ 分别为第  $k$  个离散周期里绕组的电压、电流和电阻值;  $T$ 为离散积分磁链的计算周期, 也即采样时间,  $T=100 \mu s$ 。

从图4可看出, 当转子位置角度  $\theta \in [0^\circ, 22.5^\circ]$ 、电流为定值时, 磁链随  $\theta$  的递增而递增, 在

$0^\circ$ 时的磁链最小, 在  $22.5^\circ$ 时的磁链最大。对于任何一台电动机, 这组曲线是由所表示的参数对应关系确定的。选取一个特定的  $\theta$  值作为参考角, 将参考角对应的电流-磁链曲线以数据表格的形式保存下来, 则可以实时判断电动机是否处于参考角位置, 以获得换相控制的参考基准, 最终实现电动机的正常运行控制。简化磁链法原理框图如图6所示。

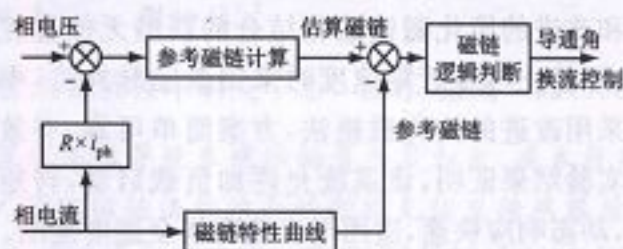


图6 简化磁链法原理框图

### 3 实验验证

以TMS320F2812 DSP为控制器, 采用激励脉冲法与简化磁链法相结合的无位置控制策略, 对SRM无位置传感器调速系统进行实验验证。实验平台系统结构如图7所示, 其中SRM参数: 三相12/8极结构, 额定功率为15 kW, 额定电压为514 V, 额定转速为1 500 r/min, 电动机绕组电阻为  $0.62 \Omega$ 。

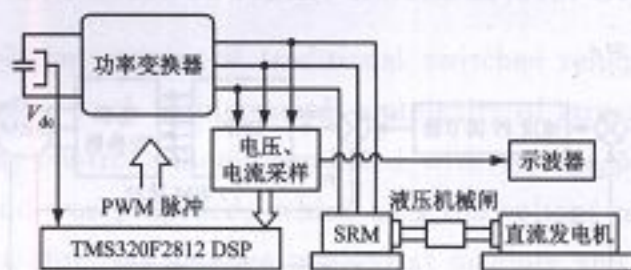


图7 实验平台系统结构图

图8为SRM从静止到500 r/min的带载启动波形, 由上至下分别表示转速, 定子A、B、C相电流。从图8可看出, 在SRM启动瞬间, A、B两相同时激励, 启动转矩大, 动态性能良好。

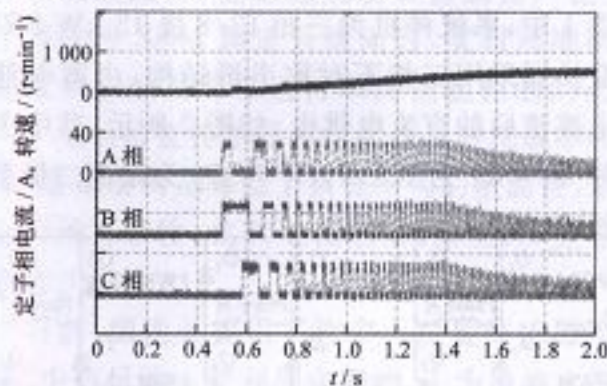


图8 SRM带载启动波形

图9为SRM运行波形, 由上至下依次为转子位置, 定子A、B、C相电流。从图9可看出, 在前



一相未关断时即提前开通下一相,相与相间有重合区域,输出转矩脉动小。

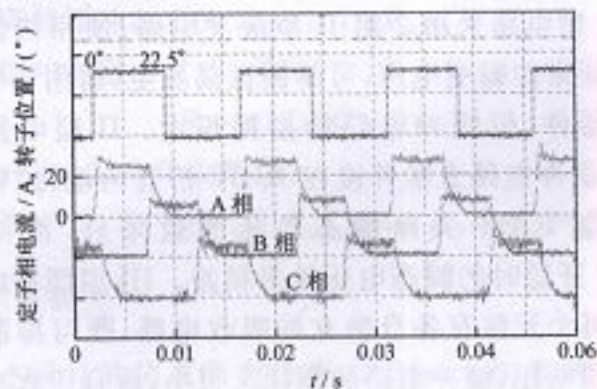


图9 SRM运行波形

图10为转子真实位置与估计位置的比较波形。从图10可看出,转子位置的估计位置与真实位置之间误差很小。

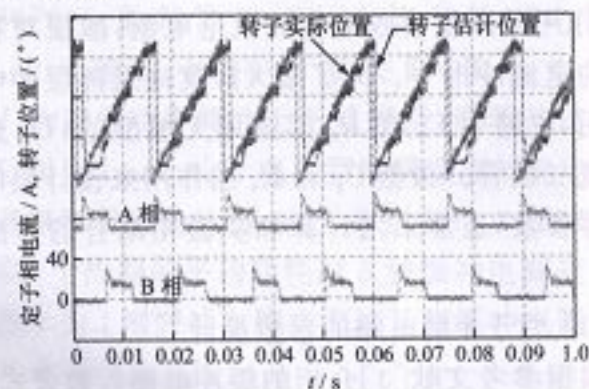


图10 转子真实位置与估计位置的比较波形

## 4 结语

本文从SRM非线性模型出发,采用激励脉冲法与简化磁链法相结合的SRM无位置传感器控制策略,实现了自静止到额定转速的速度控制,适用于工业现场,并以TMS320F2812 DSP为控制核心,对三相12/8极SRM进行了实验验证。实验结果证实了估计转子位置的准确性,输出转矩脉动小,启动转矩大,动态性能良好,方案有效可行。

### 参考文献:

- [1] ACARNLEY P P, HILL R J, HOOPER C W. Detection of Rotor Position in Stepping and Switched Motors by Monitoring of Current Wave Forms [J]. IEEE Trans. on IE, 1985, 32(3): 215-222.
- [2] 邱亦慧, 詹琼华, 马志源, 等. 基于简化磁链法的开关磁阻电动机间接位置检测[J]. 中国电机工程学报, 2001(10): 59-63.
- [3] KRISNAMURTHY M, EDRINGTON C S, FAHIMI B. Prediction of Rotor Position at Standstill and Rotating Shaft Conditions in Switched Reluctance Machines [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2006, 21(1): 225-233.
- [4] 蒋海波, 赵德安, 孙晓明, 等. 12/10开关磁阻电动机无位置传感器初始位置检测方法的研究[J]. 电动机与控制应用, 2006(4): 23-26.