

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.09.016

基于高频脉冲法的 SRM 无位置传感器控制研究^{*}

张 斌, 颜钢锋^{*}

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对传统开关磁阻电机(SRM)转子位置检测需要外接器件,增加了系统硬件成本和复杂性,降低了系统的可靠性等问题,对基于高频脉冲注入法无位置传感器控制方法进行了研究,根据脉冲注入相的不同,提出了两种基于电感分区法的非导通相注入高频脉冲估计转子位置的方法,总结了两种检测方法优缺点并结合运用;以12/8极4KW三相开关磁阻电机为实验对象搭建了基于stm32的驱动控制系统,对高频注入法的转子位置估计的准确性进行了测试,并研究了分别使用两种检测方法时电机的运行状况。研究表明,应用该无位置传感器控制策略的开关磁阻电机控制系统能够实现对转子位置的准确估计,两种检测方法的结合可以实现SRM的无反转启动,并使启动后的电机运转稳定、可靠。

关键词:开关磁阻电机;无位置传感器控制;高频脉冲法;电感分区法

中图分类号:TM352;TH39;TP24

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)09-1115-05

Sensorless control of SRM based on high frequency pulse

ZHANG Bin, YAN Gang-feng

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problem of the higher system hardware cost and complexity, the decrease of system reliability caused by external connection of rotor position estimation used in custom SRMs, the sensorless control based on high frequency pulse injection was studied. In consideration of the difference of the chosen injecting phase, two methods which can either estimate the position of the rotor by injecting the pulses into two different non-conducting phases were presented based on the phase inductance partition method. A drive control system based on stm32 was constructed using a 12/8 pole 4 KW three-phase SRM as experiment object to verify the accuracy of rotate position estimate with high frequency injection. The operation states of the motor using two kinds of detection methods respectively are observed. The results indicate that SRM system using sensorless control strategy can estimate the rotate position precisely. Combination of the two methods is only able to avoid reverse starting of the SRM, as well as make the rotating of the SRM more stably and efficiently.

Key words: switched reluctance motor(SRM); sensorless control; high frequency pulse; phase inductance partition

0 引 言

开关磁阻电机(SRM)以其电机结构简单坚固、启动转矩大启动电流小、调速范围宽、系统效率高等特点受到国内外广大专家学者的重视。随着电力电子技术与驱动控制技术的发展,开关磁阻电机系统成为继变频调速系统和无刷直流电机调速系统之后最具潜力的

新一代调速系统。然而,SRM特有的结构和运行方式使得电机运行时转矩脉动较大^[1],且需要转子位置检测电路的配合。

准确的转子位置判断是SRM正常运行的前提,传统的转子位置检测采用旋转变压器和光电传感器等器件。额外的硬件设备增加了驱动系统成本的同时,降低了系统的可靠性。因此,使用无位置传感器来估计转子位置,不仅能降低SRM的硬件成本,还能提高系

收稿日期:2016-04-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61175106)

作者简介:张 斌(1992-),男,浙江衢州人,硕士研究生,主要从事开关磁阻电机控制与驱动方面的研究。E-mail:18768116646@163.com

通信联系人:颜钢锋,男,教授,博士生导师。E-mail:ygf@zju.edu.cn

统可靠性,是当前 SRM 的研究热点之一。

继 1985 年 Acarnley 教授等提出“相电流波形法”以来,调制解调法、互感检测法、磁链/电流法、电流梯度法、电感模型法、反电势估计法、高频脉冲注入法等多种方法被提出^[2]。这些方法各有千秋,诸如调制解调法、互感检测法需要在驱动回路中增加额外的检测电路,增加了系统的复杂性,转子位置估计的准确性也有待商榷;而磁链/电流法、电流梯度法、电感模型法等需要对测得的电流电压信号进行复杂运算^[3-5],最终通过非线性模型对比或者查表来估计转子位置。这些方法对处理器的运算功能要求较高,单一算法只能对特定参数的 SRM 实现准确转子位置估计。

本研究针对上述方法的局限性,利用 12/8 极三相 SRM,提出一种基于高频脉冲电流法的改进型 SRM 无位置传感器控制技术,在不添加额外检测电路的基础上,进一步简化运算复杂度,并实现 SRM 的无反转启动与低中速运转。

1 开关磁阻电机的数学模型

开关磁阻电机磁路呈严重的非线性特征,其精确数学模型也是一个多变量、强耦合、的时变非线性方程组。

为简化分析,本研究将 SRM 分为电气子系统和机械子系统。

开关磁阻电机控制框图如图 1 所示。

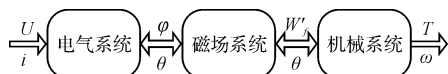


图 1 开关磁阻电机控制框图

电气系统与磁场系统间通过电机转子位置 θ 和磁链 φ 联系,磁场系统与机械系统间通过电机转子位置 θ 和磁共能联系。

描述电气系统的数学方程为:

$$u_k = R_k i_k + \frac{d\varphi_k(i, \theta)}{dt}, k = 1, 2 \cdots m \quad (1)$$

描述机械系统的数学方程为:

$$T_k(i, \theta) = \frac{\partial w'_f(i, \theta)}{\partial \theta} \Big|_{i=\text{const}}, k = 1, 2 \cdots m \quad (2)$$

$$\dot{\theta} = \omega$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J}(T_k(i, \theta) - B\omega - T_l) \quad (3)$$

式(1 ~ 3)完整地描述了开关磁阻电机数学模型^[6]。

然而,上述方程以及方程组是多变量、非线性、复

杂的。为得到开关磁阻电机的可用一般模型,实际分析过程中对上述模型进行一定的简化。

忽略不同相之间的磁耦合关系,可以得到简化后的磁链方程:

$$\varphi_k(i, \theta) = L_k(i_k, \theta) i_k \quad (4)$$

假设当电流 i_k 恒定时,电机电感 L_k 与电机转子位置 θ 呈线性关系,则有:

$$T_k(i, \theta) = \frac{1}{2} \frac{dL_k(i_k, \theta)}{d\theta} i_k^2 \quad (5)$$

分析式(5)可知,SRM 产生转矩正负由励磁时相电感变化率的正负决定,而与励磁电流方向无关。

2 高频脉冲注入法

脉冲注入法由剑桥大学的 Harris 和 Lang 在 1990 年首先提出^[7]。通过向非导通相注入高频电压脉冲,检测响应电流的幅值,进而估计转子位置。非导通相注入脉冲可以避免磁通饱和的情况;由于注入脉冲时开关管开通时间短,响应电流幅值很小,可以忽略电机反电势与绕组压降,因此,SRM 的电压方程简化为:

$$u = L(\theta) \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (6)$$

由于响应电流幅值小,对绕组电感的影响小到可以忽略;而较高的频率使得响应电流产生的周期内,转子转过很小的角度,角度变化对绕组电感的影响也可以忽略。因此,注入高频脉冲的一个周期内,响应电流波形为一个三角波脉冲形式;同时,影响电感的最主要因素是转子位置,绕组电感随着转子位置的变化而呈现周期性变化,相应的响应电流幅值也呈周期变化。

波形图如图 2 所示。

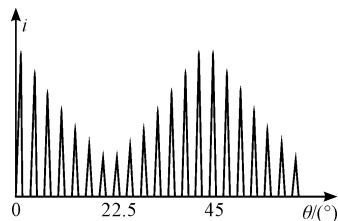


图 2 理想状态下转子旋转时响应电流波形图

笔者研究的是 12/8 极开关磁阻电机,驱动开关管的 PWM 频率较高,为了减小非导通相脉冲注入对电机运行效率的影响,本研究将注入脉冲的占空比设置为 12% ~ 20% 之间。

3 基于脉冲注入法的 SRM 启动策略

对于电机未启动状态,本研究采用三相同步注入

高频脉冲的方法,得到三相响应电流信号。结合电感分区法实现SRM的无反转启动。

3.1 电感分区方法

随着转子转动,SRM三相电感呈现周期性变化。在一个电周期内,三相电感值对应唯一的电角度,这就为通过相电感估计转子位置提供了理论可能。电周期内通过相电感交叠处实现分区^[8]。三相SRM电机电感分区图如图3(a)所示。这里,以B相定子与转子凸极重合位置为初始位置。理想状况下,整个周期平均地分为6个扇区。

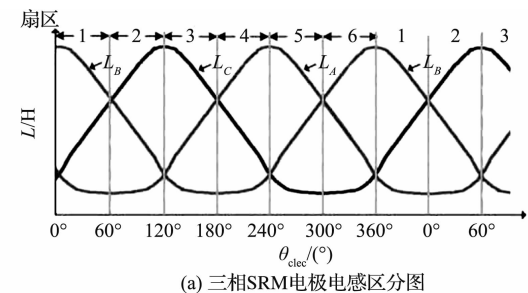
SRM电机采用直流供电,绕组两端电压稳定,而注入脉冲的占空比和周期均不变,则响应电流幅值与相电感成反比^[9],由式(6)可得:

$$i = \frac{k}{L(\theta)}$$

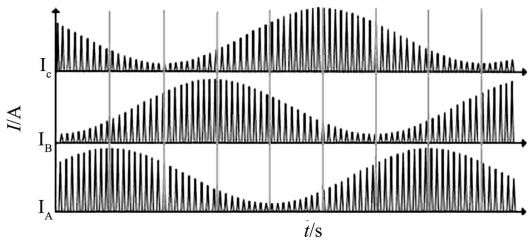
(7)

式中:K—与绕组电压*u*和导通时间*t*相关的常数。

对应三相电感的三相响应电流波形图如图3(b)所示。



(a) 三相SRM电机电感分区图



(b) 三相电感的三相响应电流波形图

图3 三相电感分区图

3.2 SRM启动转子位置估计

由式(5)可知,在电感上升区域施加电流就会产生正转矩,反之,在电感下降区域施加电流产生负转矩。本文默认电机正向旋转的励磁顺序为A-B-C,对应转子转过的扇区位置顺序为1-2-3-4-5-6。

启动时,对三相同时注入高频脉冲,根据检测到的响应电流大小关系判定励磁相。

判定逻辑如表1所示。

表1 启动励磁逻辑

扇区	电感关系	电流关系	励磁相
1	$L_B > L_C \geq L_A$	$I_A \geq I_C > I_B$	C
2	$L_C \geq L_B > L_A$	$I_A > I_B \geq I_C$	A
3	$L_C > L_A \geq L_B$	$I_B \geq I_A > I_C$	A
4	$L_A \geq L_C > L_B$	$I_B > I_C \geq I_A$	B
5	$L_A > L_B \geq L_C$	$I_C \geq I_B > I_A$	B
6	$L_B \geq L_A > L_C$	$I_C > I_A \geq I_B$	C

3.3 非导通相转子位置估计

电机经过启动转子位置估计后,判断励磁相并进行启动励磁。此时,已有至少一相进入励磁状态。若对导通相进行高频脉冲注入,响应电流容易受到磁通饱和的干扰,并且高频响应电流幅值也较难获得。

分析图3可以发现,三相绕组电感估计转子位置实际上是一种冗余检测。只需要对其中两相非导通相注入高频脉冲,通过其响应电流信息即可估算出转子位置^[10-11]。结合励磁相,在一相励磁区间内,两相非导通相电流检测也是一种冗余检测,此时,只需对一相非导通相注入高频脉冲,即可实现转子位置估计^[12]。因此,高频脉冲注入相的选择有两种,根据检测相对应励磁相的顺序,分别将这两种选择称为前相检测和后相检测。

后相检测即对励磁相的后一相注入高频脉冲信号,通过检测其响应电流来估计转子位置。一相励磁时,换相点正是后相响应电流幅值最大点。当检测到响应电流幅值到达最大点附近时,执行换相。后相检测电流阈值图如图4所示。

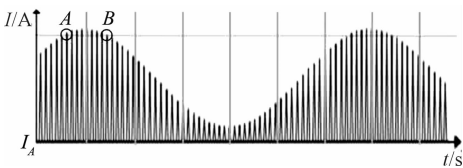


图4 后相检测电流阈值图

A、B点—电流幅值阈值点

前相检测即对励磁相的前一相注入高频脉冲信号,通过检测其响应电流来估计转子位置。相励磁时,换相点处在前相响应电流幅值上升区域,同样采用电流阈值比较方法,当电流幅值大于阈值,执行换相。此种换相方法可以避免后相检测法造成的启动反转现象。

前相电流检测如图5所示。

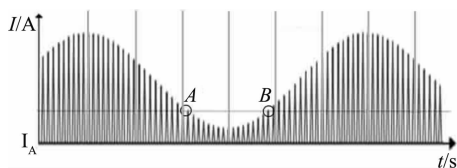


图 5 前相电流检测

前相检测法同样存在局限性,由图 5 可以看出,理想换相点对应的电流幅值过低,容易受到干扰,造成换相条件判断失误。若阈值过低,会出现一直触发换相,若将阈值调高,则会出现换相延迟。而过迟的换相会使电机产生反向转矩,从而严重影响电机运行的高效性。

综上所述,对比与电感分区法有相似之处的使用光电传感器控制方法,本研究采用启动初使用前相检测法进行换相,实现电机无反转启动;之后使用后相检测法进行换相,实现电机高效、快速运转。

4 实验及结果分析

SRM 驱动控制器采用基于 ARM Cortex-M3 架构的 STM32F103RCT6 芯片,该芯片具有采样速率较高,功能简单,性价比高的特点,满足 SRM 降低成本提高可靠性的研究目标。开关管选用 IR 公司的 IRFP4468 系列 MOSFET 实现高频开关。电机选用 12/8 极三相 4 KW 开关磁阻电机,额定转速为 3 000 r/min。为验证基于高频脉冲的无位置传感器控制方法的正确性,本研究使用光电对管来检测转子实际位置。

对三相绕组同时注入高频脉冲,同时手动转动转子,得到的三相响应电流波形图如图 6 所示。

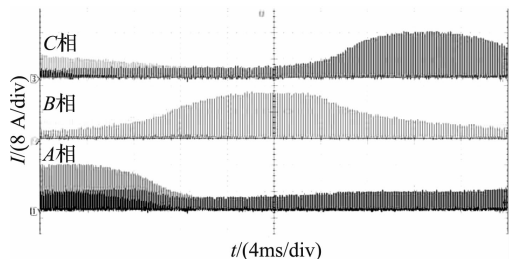


图 6 转动时三相响应电流波形图

实际测量得到的响应电流图与理论相似。

转子转动时 A 相电流与转子实际位置关系如图 7 所示,验证了高频脉冲注入法估计转子位置理论的正确性。

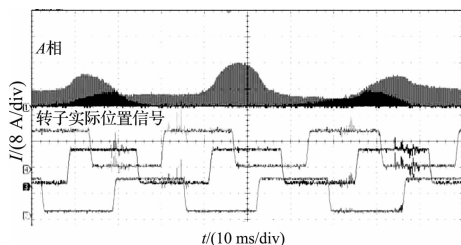


图 7 转动时 A 相电流波形与转子实际位置信号

由图 7 可以看出,响应电流低幅值所占角度较大,且上升速度缓慢。对于前相检测方法,换相阈值点所处位置正好是波谷处较为平滑的位置,因此对换相时机的判断较为困难。电机是否能持续运转与电流阈值的选取有直接联系,实验调试后可以接受的电机运转电流波形如图 8 所示。

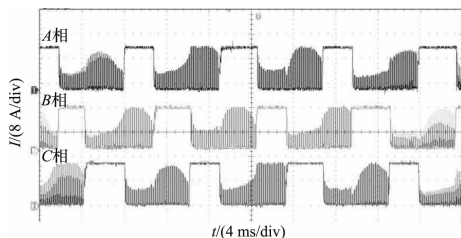


图 8 前相检测法三相电流波形图

使用前相检测法时 A 相电流与转子实际位置的对应关系如图 9 所示。

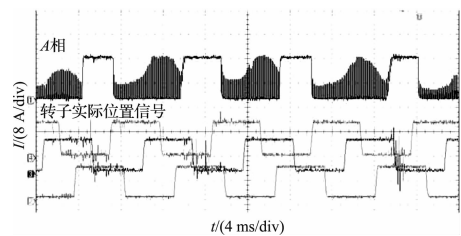


图 9 前相检测法 A 相电流波形与转子实际位置

电机转动时,绕组依次有序励磁,但是换相时间有明显延迟。

由于前相检测法具有明显的速度限制,并且换相不及时,启动成功后,采用后相检测法继续驱动电机。采用后相检测法时,电机运行的电流波形图如图 10 所示。

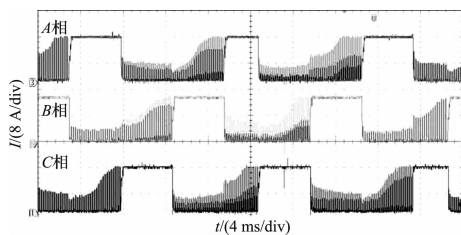


图 10 后相检测法三相电流波形图

使用后相检测法时 A 相电流波形与转子实际位

置的对应关系如图 11 所示。

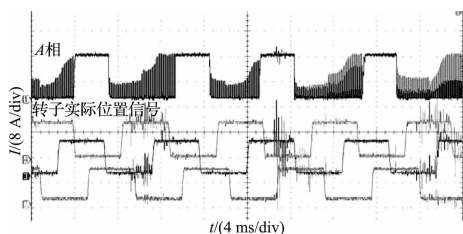


图 11 后相检测法 A 相电流波形与转子实际位置

由图可见,采用后相检测法后,换相延迟的现象得以解决。电机运行较为稳定。

5 结束语

本研究提出了一种基于高频脉冲注入法的开关磁阻电机无位置传感器控制方法,实现了开关磁阻电机的无位置传感器控制,基于 stm32 芯片搭建了电机驱动控制器,并进行实验比较了估计位置与实际位置,验证了方法的可行性。同时,根据检测相的不同提出了前相检测法和后相检测法,前相检测方法从理论上避免电机启动反转;后相检测方法对换相响应速度较快,换相逻辑正确,能够实现依次准确换相。合理选择高频脉冲的占空比,减小脉冲响应带来的能量损耗。

实验结果表明,将前相检测方法和后相检测方法相结合,利用前相检测法可以保证电机无反转启动,利用后相检测法可以避免换相过迟带来的负转矩,提高了电机长时间运转的可靠性和高效性。

参考文献 (References):

- [1] 邓智泉,蔡 骏. 开关磁阻电机无位置传感器技术的研究现状和发展趋势[J]. 南京航空航天大学学报,2012,44(5):611-620.
- [2] CAI JUN, DENG ZHI-QUAN. Sensorless control of Switched Reluctance Motor Based on Phase Inductance Vectors[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2012, 27(7): 3410-3423.

- [3] SURESH G, FAHIMI B, RAHMAN K M, et al. Inductance based position encoding for sensorless SRM drives [C]. Power Electronics Specialists Conference, charceston:1999. PESC 99. 30th Annual IEEE, charleston: 1999:832-837.
- [4] GAO HONG-WEI, SALMASI, F R EHSANI M. Inductance model-based sensorless control of the switched reluctance motor drive at low speed[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2004, 19(6): 1568-1573.
- [5] HOSSAIN S A, HOSAINI, KLODE H, et al. Four-quadrant and zero-speed sensorless control of a switched reluctance motor[J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2003, 39(5): 1343-1349.
- [6] 陈哲明. 开关磁阻驱动系统——控制策略研究与系统设计[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2006.
- [7] HARRIS W D, LANG J H. A simple motion estimator for variable-reluctance motors [J]. **Industry Applications, IEEE Transactions on**, 1990, 26(2): 237-243.
- [8] 周竟成,王晓琳,邓智泉,等. 开关磁阻电机的电感分区式无位置传感器技术[J]. 电工技术学报,2012,27(7): 34-40.
- [9] 邹东坡. 开关磁阻电机无位置传感器起动和低速算法的研究[D]. 南京:南京航空航天大学自动化学院,2012.
- [10] PASQUESOONE G, MIKAIL R, HUSAIN I. Position Estimation at Starting and Lower Speed in Three-Phase Switched Reluctance Machines Using Pulse Injection and Two Thresholds [J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2011, 47(4): 1724-1731.
- [11] 李景男,王旭东,周永勤. 基于两相脉冲激励的开关磁阻电动机无位置传感器转子位置检测[J]. 电机与控制学报,2002,6(1): 6-9.
- [12] 邵杰,邓智泉,胡荣光,等. 基于改进脉冲注入开关磁阻电机无位置传感器技术[J]. 电工技术学报,2015, 30(21): 147-153.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

张 斌,颜铜锋. 基于高频脉冲法的 SRM 无位置传感器控制研究[J]. 机电工程,2016,33(9): 1115 - 1119.

ZHANG Bin, YAN Gang-feng. Sensorless Control of SRM based on high frequency pulse[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(9): 1115 - 1119.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>