

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.07.019

基于高频脉冲注入法的开关磁阻电机转子初始位置判定研究

张 懿, 章 玮, 姚叔春

(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在判断转子初始位置时需要外接霍尔位置传感器,不仅增加了系统硬件成本,同时降低了系统的抗震动性等问题,对基于高频脉冲注入法技术无霍尔位置传感器电机转子初始位置判定进行了研究,提出了基于逐相注入高频脉冲比较三相电流响应幅值的得到初始位置的判定算法,在 12/8 极 1.5 kW 三相开关磁阻电机上对该方法的准确性进行了试验。研究表明:相比于利用霍尔信号确定初始位置的方法,采用改进后高频注入法的转子初始位置的判定算法精确度上提高了一倍,且从静止起动到初始给定转速过程中无反转或其他过渡过程,可实现电机的平滑起动。

关键词:开关磁阻电机;无位置传感器技术;高频脉冲注入;初始位置判断;

中图分类号:TM352;TP24

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)07-0755-05

Initial position judgment of switched reluctance motor's rotor based on high frequency pulse injection

ZHANG Yi, ZHANG Wei, YAO Shu-chun

(Electrical engineering college, Zhejiang university, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to solve the problems of the traditional switched reluctance motor needs to install the hall position sensor to determine the initial position of the rotor, which not only increases the cost of the system hardware, but also reduces the anti-seismic activity of the system. no hall position sensor with high frequency pulse injection technique for initial rotor position judgment is studied, the improved high frequency pulse was proposed based on phase-phase pulse injection. The initial position judgment algorithm was obtained by comparison of three phase current response amplitude. The accuracy of this method was tested on a 12/8-1.5kW three-phase switched reluctance motor. The results indicate that comparing with the way which use hall signal, the improved high frequency injection method is more accurate upon the determination of the initial position, there are no reversal or other transition process in process of rapid starting from 0 to the initial given speed. the smooth starting of motor can be realized.

Key words: switched reluctance motor; sensorless control; high frequency pulse; initial position judgment

0 引 言

开关磁阻电机(SRM)以其简单坚固的电机结构,起动转矩大而启动电流小、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,开关磁阻电机系统成为极具潜力的新一代电机调速系统。

在目前 SRM 系统的启动中,通常采用霍尔位置传

感器来获取转子初始位置,额外的硬件检测设备不仅增加了驱动系统成本和复杂度,同时降低了整个系统的可靠性^[1]。因此无霍尔位置传感器的开关磁阻电机驱动系统的研究受到国内外学者的关注,文献[2]采用电流波形检测法,利用增量电感所引起的相电流变化率解算出转子的位置,但该方法电感的计算时间较长,算法易受噪声信号的影响;文献[3]利用 SRM

收稿日期:2017-12-01

作者简介:张 懿(1992-),男,湖北孝感人,硕士研究生,主要从事开关磁阻电机控制方面的研究。E-mail: 2668675974@qq.com.cn

通信联系人:章 玮,女,副教授,硕士生导师。E-mail: weizhang@zju.edu.cn

的磁链-电流-转子位置之间的特性曲线来估计转子初始位置,但需要建立并查找三维表,占用内存大,算法复杂;文献[4]提出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,该方法无需外加硬件且简单可靠,但采用两相导通方式,准确度下降,且相间干扰误差较大。

本研究在文献[4]总结的高频脉冲注入方法的基础上,改变高频注入条件,在三相绕组上依序逐相注入高频信号,减少相间干扰影响;优化响应电流采集方法,提升初始位置判断的准确度和精度,实现无霍尔情况初始位置判断。

1 SRM 无位置传感器初始位置判定

1.1 开关磁阻电机定子相电感特性

开关磁阻电机转子转动时,随着定子磁极和转子磁极间相对位置变化,定子绕组电感会随位置发生相应变化。一个电感周期转子位置角度 θ 和相绕组电感 L 的关系与变化的规律如图1所示。

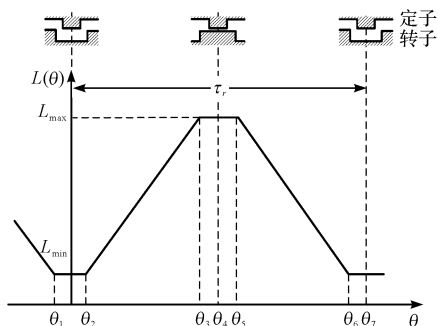


图1 定转子相对线性状态下相电感曲线

电感在最大和最小时均有一段时期的平稳期^[5]。

横坐标为转子位置角(机械角),设定坐标原点 $\theta=0$ 的位置对应定子凸极与转子凹槽中心重合^[6]。转子在零点处,此时相电感最小 $L_{\min}$,而磁阻最大。

转子在 $\theta_2 - \theta_3$ 期间,相电感线性增加直到 θ_3 位置处达到最大值 $L_{\max}$;在 $\theta_3 - \theta_4$ 的区域定、转子凸极中心逐渐完全对齐,相电感达到最大值 $L_{\max}$, θ_4 为转子极轴线和定子极轴线相重合的位置,此处磁阻最小。 θ_5 至 θ_6 期间为电感下降区,相电感线性下降,当转子旋转至 θ_7 时,完成一个电周期。

1.2 高频脉冲注入基本原理

对开关磁阻电机绕组等效电路进行化简。由电磁基本定律可知,开关磁阻电动机相绕组的电压、磁链方程为^[7-8]:

$$U = iR + \frac{d\psi}{dt} \quad (1)$$

展开磁链项 $\frac{d\psi}{dt}$ 得:

$$U = iR + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{d\theta} \omega \quad (2)$$

当转子处于静止状态,即 $\omega = 0$,反电动势项为0;向定子绕组注入高频脉冲电压时,定子绕组在 Δt 激励时间下将产生低幅电流。

忽略不计相电阻 R 的影响,那么在静止状态下其中一相绕组电压方程可以简化为:

$$U = L \frac{di}{dt} \quad (3)$$

假定导通 Δt 时间下电路中电流峰值为 I_{pk} ,高频脉冲下的响应电流差值即为:

$$\Delta i = i(\Delta t) - i(0) = I_{pk} \quad (4)$$

结合式(3,4)可推导出:

$$U_{dc} = L(i, \theta) \frac{I_{pk}}{\Delta t} \quad (5)$$

在开关磁阻电机中,相绕组电感随转子位置角 θ 呈周期性变化时,定子相绕组脉冲响应电流幅值与不饱和相电感呈反比关系,即 $I \propto 1/L$ 。

本研究对一台12/8三相SRM电机某一相绕组持续加入一定频率和幅值的电压脉冲,手动转动转子,可观察到的相电流波形如图2所示。

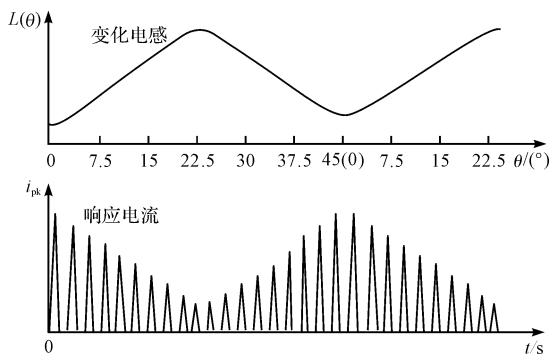


图2 手动转动转子时的电感估计原理图

由图2可见,在一个电周期内,随电感周期性的变化,电流的幅值也相应地改变。

对于三相12/8极开关磁阻电机来说,转子极数 $Nr = 8$,1个机械周期可分为8个完整的电角度周期(每45°机械角度),随电感周期性的变化,电流的幅值也相应地改变。

SRM三相电感分区图如图3所示。

12/8极SRM电机定子三相绕组在空间上相差120°排列,其电感值大小变化规律随位置角度的关系如图3(a)所示。当电机处于某一位置静止状态时,对三相绕组按ABC相序逐相注入高频脉冲,各相电流峰值包络线将呈现对应图3(b)所示位置的变化规律。

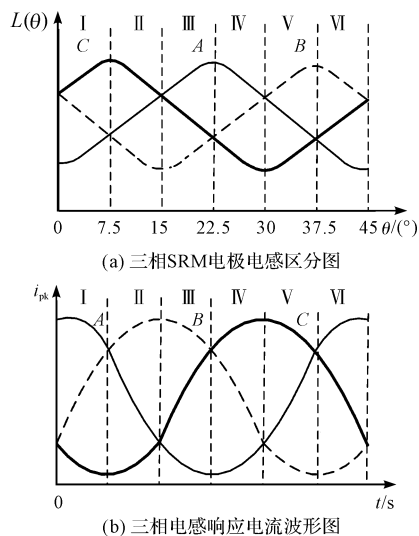


图3 SRM三相电感分区图

按比较一个电周期中各相电流大小的方法一个电周期可分为6个扇区,每个扇区中各相电流除在扇区临界状态外如上图3(b),其大小呈一定逻辑规律^[9],其规律总结如表1所示。

表1 静止时初始位置与扇区估计表

比较逻辑	位置区间	区间
$I_a > I_b > I_c$	$0^\circ < \theta < 7.5^\circ$	0
$I_b > I_a \geq I_c$	$7.5^\circ < \theta \leq 15^\circ$	1
$I_b > I_c > I_a$	$15^\circ < \theta < 22.5^\circ$	2
$I_c > I_b \geq I_a$	$22.5^\circ < \theta \leq 30^\circ$	3
$I_c > I_a > I_b$	$30^\circ < \theta < 37.5^\circ$	4
$I_a > I_c \geq I_b$	$37.5^\circ < \theta \leq 45^\circ$	5

因此,在转子静止时,利用对各相绕组施加脉冲电压后得到的各相电流大小进行判断,就可以确定转子初始位置所在的区域。

1.3 转子初始位置判断

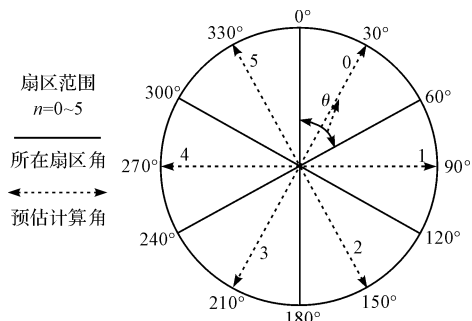
开关磁阻电机采用霍尔传感器检测转子位置时, U 相信号的上升沿和定子A相轴线对齐。定义A相定子凸极中心线与转子凹槽中心重合的位置,即非对齐位置为初始0位置,转子相对此位置转过的角度即为转子位置角 θ 。沿用此定义,分析采用基于高频注入法时,展开对转子初始角度的判断。

对于12/8极开关磁阻电机,当转子转过 360° 机械角度时, $L(\theta)$ 变化的频率正比于转子极数 N_r ,定转子磁极会重叠出现8次电感周期(45° 机械角度),因此在定子绕组端可重复检测到8组周期相同的脉冲响应电流。

本研究在一个完整周期内,对三相绕组分时依序注入高频脉冲PWM,并留有足够间隔裕量,使检测得到的脉冲互不影响和干扰。在 Δt_1 激励时间下,经过中

断寄存器赋值和磁阻延时效应 Δt_2 后,逐相捕获三相响应电流峰值 $I_{a_{\max}}, I_{b_{\max}}, I_{c_{\max}}$,在一个完整采样滤波周期后对滤波电流 $I_{a_{\max}'}, I_{b_{\max}'}, I_{c_{\max}'}$ 进行逻辑比较运算,通过表1的算法进而判断得出准确扇区。

在得到电机转子位于某个扇区时,该扇区只能粗略表示 $0^\circ \sim 60^\circ$ 电角度范围,如图4所示。

图4 θ 位置判断预估图

取扇区中间值表示整个扇区位置的方法可减小误差范围。以0区间为例,取 30° 为当前角度,则转角 $\theta = n \times 60^\circ + 30^\circ$,这样使12/8极SRM电机位置判断误差最小化为 30° ,即 3.75° 机械角度。

目前,通用的霍尔传感器极数为4极,判断转子位置时,会在 $0 \sim \pi/2$ 机械角度内产生一个完整电角度周期,根据 U, V, W 三相磁极输出的高低电平信号,可判断出转子相对零位置所在的扇区 n ,在一个电周期内6编码状态代表输出的6个扇区。

霍尔传感器将1个机械周期分为4个完整的电周期(90° 机械角度)。参照无霍尔传感器对初始角度的判定,采用霍尔传感器的12/8极SRM电机位置判断误差最小化为 30° 电角度(7.5° 机械角度)。

通过对比,笔者分析两种初始位置判断的误差精度对比图如图5所示。

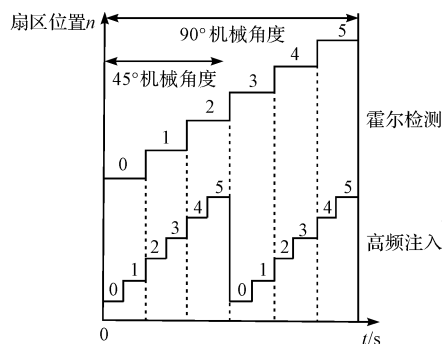


图5 两种检测方式下扇区周期划分对比

由结果可知:高频脉冲得到判定位置相比霍尔判定的位置精度提高一倍,具备更精准的扇区,优化了开关磁阻电机的初始启动条件。

2 实验及结果分析

为了验证以上推导与提出的判据、研究方法和算法的准确性,本研究在一台 12/8 极三相开关磁阻电机平台上进行实验验证。

实验电机主要参数如表 2 所示。

表 2 实验用 SRM 电机主要参数

参数	值	参数	值
定/转子极数	12/8	最大电感/mH	150
额定功率/kW	1.5	最小电感/mH	32
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 500	相绕组电阻/ Ω	4.7
额定电压/V	150	霍尔极数	4

电机控制系统实验平台如图 6 所示。



图 6 电机控制系统实验平台

控制系统主要由三相 PWM 可控整流器,电机逆变端的功率变换器,供电电源及开关磁阻电机本体组成。主控 CPU 芯片采用 TI 系列的 TMS320F28335 芯片。

软件算法中断流程图如图 7 所示。

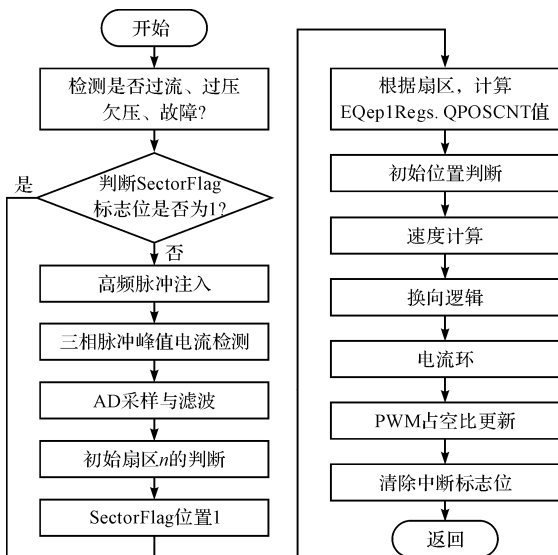


图 7 无位置启动中断流程图

在 SectorFlag 标志位为 0 模块中程序主要执行对高频脉冲的注入,三相电流的采集、各采样值的初步滤

波。AD 采样的不准确将导致扇区误差,从而影响扇区判断的精准性,为优化无位置启动效果,保证与霍尔有相同的稳定性。实验采用中位值平均滤波算法,在 N 次采样结果中去掉最大值和最小值,然后计算 $N-2$ 个数据的算术平均值,可获得新的较稳定的采样结果,此处 N 取 10。

通过中位值平均滤波算法克服了高频脉冲波动并抑制了周期性干扰,可消除由于偶然出现的脉冲干扰所引起的采样值偏差。然后通过表 1 的算法得到扇区,该模块完成后 SectorFlag 标志位为 1 进入启动运行模块。

笔者设计三角载波信号频率即高频注入的 PWM 中断频率为 20 kHz,中断时间 50 μ s。电流采样频率与中断频率同为 20 kHz,脉冲注入频率为 5 kHz 占空比 12.5%,同时满足硬件电路变压器和功率器件的频率承受值。

定子各相逐相依序注入高频脉冲,手动转动转子时三相定子绕组电流波形如图 8 所示。

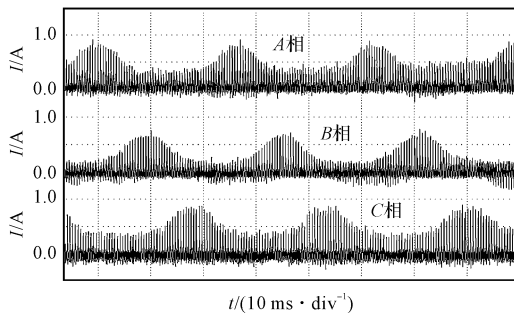


图 8 手动转动转子时响应电流波形图

三相响应电流脉冲的幅值会随转子改变而呈周期性变化。

电机某位置时检测得到的电流波形如图 9 所示。

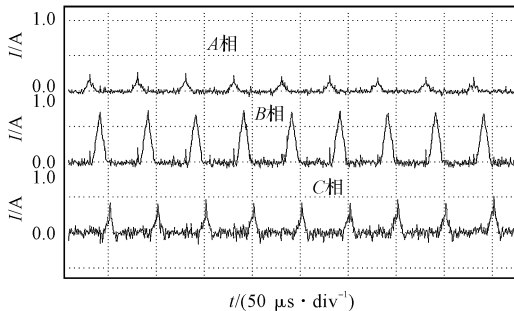


图 9 扇区 $n=2$ 位置注入脉冲响应电流

定性判断图中响应电流幅值大小可知 $I_b > I_c > I_a$, 依表 1 可得此时转子位于第 2 扇区,相对零初始位置转过的角度位于 $15^\circ < \theta < 22.5^\circ$,则取 $\theta = 18.75^\circ$ 机械角度为当前转子角度。

同理,在电机任意位置,可根据三相响应电流 I_a 、 I_b 、 I_c 的大小关系即可判断出的任意初始位置 θ 和所处扇区区间 n 。转动转子时 D/A 模块实时输出得两

种状态下电机扇区波形如图 10 所示。

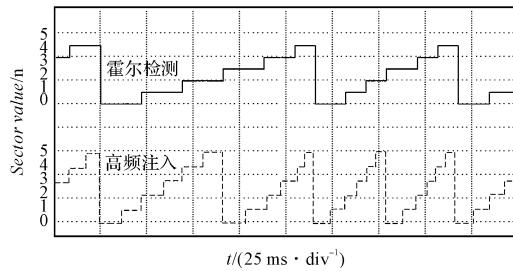


图 10 D/A 输出两种模式状态下扇区图

实验现象和初始位置判断精度与前述理论推导吻合。

电机从静止状态下通过采用高频脉冲注入法无霍尔传感器得到初始位置启动至正常运行时相电流波形如图 11 所示。

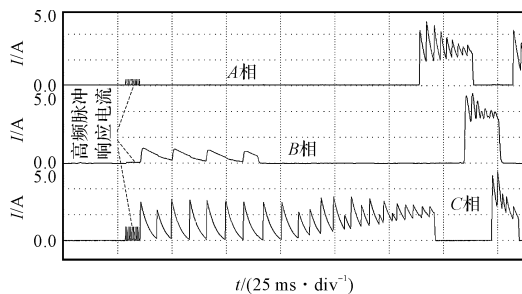


图 11 无位置启动运行时相电流波形

由图可见,三相逆变器控制电路处于轮流导通状态,启动运行状态良好。

电机从静止状态下利用无霍尔传感器起动的转速波形如图 12 所示。

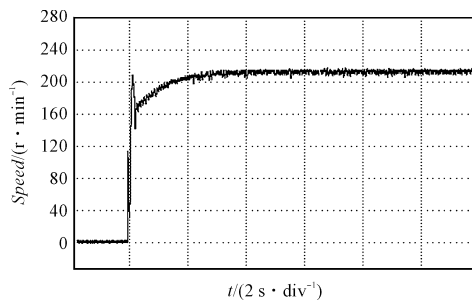


图 12 无位置传感器启动时转速波形

在从静止迅速启动到初始给定转速过程中,无反转或其他过渡过程。改进后的高频脉冲注入法可实现电机的无反转平滑启动,采用该方法的精度误差满足电机启动的要求。

改进优化后的高频脉冲电压判定法,相比使用霍尔传感器状态可以实现更加精确的初始定位,和前面推导分析的结果一致,能够稳定准确反映电机转子位置。

3 结束语

本研究以 12/8 结构的三相开关磁阻电机为研究对象,针对无霍尔位置传感器初始位置判断问题,对传统的高频脉冲注入算法进行了改进,优化了初始定位判断算法,基于 TMS320F28335 控制芯片进行了实验,并通过实验比较了霍尔传感器检测与采用高频脉冲检测的效果,验证了此方法的优点与可行性。

研究表明:该方法可提高转子初始定位精度,降低系统复杂度,节省部分硬件资源。该软件算法只需在电机已有的硬件平台上嵌入即可,具备较强的可移植性,在提高控制系统效率与容错性方面具有广阔的应用前景。

参考文献 (References):

- [1] 张 斌. 基于脉冲注入法的 SRM 无位置传感器控制系统研究[D]. 杭州:浙江大学机械工程学院,2017.
- [2] BU Jian-rong, XU Long-ya. Eliminating starting hesitation for reliable Sensorless control of switched reluctance motors [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2001, 37(1):59-66.
- [3] 刘卫国,宋受俊,SCHAFER V W E. 无位置传感器开关磁阻电机初始位置检测方法[J]. 中国电机工程学报,2009, 29(24):91-97.
- [4] 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.
- [5] 连 欢. 电动车驱动用开关磁阻电机转矩脉动抑制研究[D]. 大连:大连理工大学汽车工程学院,2016.
- [6] 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,1995.
- [7] 陈锋文,蔡卓剑,吴 敏,等. 基于 Maxwell 与 Simplorer 的三相异步电机变绕组调速系统仿真[J]. 轻机械,2017, 35(2):53-57.
- [8] 蔡 骏. 开关磁阻电机无位置传感器技术[D]. 南京:南京航空航天大学机电学院,2012.
- [9] 沈 磊,吴建华,杨仕友. 基于自举电路的开关磁阻电机初始位置估计方法[J]. 中国电机工程学报,2011, 31(6):98-102.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

张 懿,章 玮,姚叔春. 基于高频脉冲注入法的开关磁阻电机转子初始位置判定研究[J]. 机电工程,2018,35(7):755-759.

ZHANG Yi, ZHANG Wei, YAO Shu-chun. Initial position judgment of switched reluctance motor's rotor based on high frequency pulse injection[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(7):755-759.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>