

基于电流包络线线性分区开关磁阻电机 初始位置估计*

张磊^{1,2}, 刘闯³

- (1. 南京晓庄学院 电子工程学院, 江苏 南京 211171;
2. 南京信息职业技术学院 新能源学院, 江苏 南京 210014;
3. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 提出一种开关磁阻电机脉冲电流包络线线性三角形模型的初始位置角估计方法。该方法先将电机相电感进行分区, 通过比较每相脉冲电流峰值判断出转子初始分区, 再将每个分区的脉冲电流峰值包络线线性化组成三角形, 利用三角形的数学知识得到各分区脉冲电流峰值与初始位置角之间的数学模型, 将实测的脉冲电流峰值代入数学模型计算出转子初始位置角。该方法算法简单, 容易实现, 并通过试验验证了该算法的正确性和可行性。

关键词: 开关磁阻电机; 初始位置角; 三角形模型; 脉冲注入

中图分类号: TM 302 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)03-0112-05

Initial Position Estimation in Switched Reluctance Motor Drives Based on the Linear partition of current Envelope*

ZHANG Lei^{1,2}, LIU Chuang³

- (1. School of Electronic Engineering, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China;
2. College of Newenergy, Nanjing College of Information Technology, Nanjing 210014, China;
3. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A method of initial position angle estimation for switched reluctance motor is presented based on the pulse current linear triangular model. Firstly, the motor phase inductance is partitioned, the initial partition of the rotor is estimated by comparing the peak value of each phase pulse current. Second, the envelope of the each partition pulse current peak is linearized, and composition triangle, using the mathematical knowledge of triangle, the mathematical model between pulse current peak value and initial position angle is obtained. Thirdly, the measured pulse current peak are substituted into the mathematical model, and the rotor initial position angle is calculated. Last, the experimental results show that the proposed sensorless control methods is sufficiently accurate and works effective.

Key words: switched reluctance motor (SRM); initial position angle; triangle model; pulse injection

0 引言

开关磁阻电机 (Switched Reluctance Motor, SRM) 是典型的无刷双凸极结构电机。其结构简

单坚固, 转子上无绕组、无永磁材料, 成本低, 已在牵引提升、航空工业、电动汽车等领域得到应用。但在目前的应用系统中, SRM 都需要位置传感器获取转子的位置, 使得系统结构变得复杂、成本增

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51377076); 江苏省自然科学基金项目(BK20151574)

作者简介: 张磊(1974—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为开关磁阻电机无位置传感器技术。

刘闯(1973—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为特种电机及控制、新能源技术。

大,在高温、振动等恶劣运行环境下,位置传感器有失效可能,降低了系统的可靠性,因此 SRM 无位置传感器技术得到国内外很多学者的广泛研究。

SRM 初始位置判断和低速运行状态无位置传感器技术是 SRM 能否正确起动和运行的关键。其中,在 SRM 低速状态下,脉冲注入无位置传感器技术是一种常用方法。文献[1]在传统的脉冲注入法基础上对两相非工作相注入高频脉冲,比较脉冲电流的大小来估计换相时刻,不需要设置电流阈值,只需要判断续流电流是否下降到零,否则脉冲电流存在叠加问题。文献[2]研究了一种基于单阈值脉冲注入位置估计策略,是在母线电压变化情况下向某一非导通相注入脉冲,通过均值采样方法计算脉冲电流峰值,与电流阈值比较进行位置估计,再由阈值之间的间隔计算电机转速。文献[3]提出了仅对电机某一非导通相注入电压脉冲,注入的脉冲宽度逐渐增大,通过比较脉冲电流峰值与预设的电流阈值估计转子位置信号。文献[4]在脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)控制方式下,通过比较相邻两个脉冲电流峰值的大小,并记录前后两个关断时刻脉冲电流的时间,计算后一相关断时间,开通时间是通过脉冲数来估算,解决了传统的电流波形法存在检测电路参数设计繁琐的问题。文献[5]利用对非导通相注入高频脉冲,计算脉冲电流斜率差与相电感之间关系来实现转子位置的估计,避开了反电动势的影响,但在起动过程无法保证转速估计的精度。文献[6]提出全周期电感法实现无位置传感器初始定位和起动控制,通过计算非导通相和导通相两过程相电流上升和下降的斜率,获取全周期电感信息,建立电感与位置角的数学模型,再经过电感分区和设置电感阈值,估计起动相,从而完成位置的估计。文献[7]基于电感方法提出适合中高速范围的电感分区位置估计方法,通过电感分区计算各相电感之间的大小逻辑联系与转子位置关系,利用电感区间的识别,得到每一相位置检索脉冲,再通过位置检索脉冲边沿估算位置角。

本文提出了一种基于脉冲电流包络线线性三角形的初始位置角估计方法。转子初始起动分区通过电感分区判断,将分区里的脉冲电流包络线进

行线性化,通过线性三角形数学知识列出各分区的脉冲电流峰值与转子位置角之间的数学模型。该算法简单、实用,不需要添加任何硬件系统。

1 电感分区基本原理

1.1 脉冲注入

对于 SRM,常见的功率变换器采用不对称半桥结构,为 SRM 各相分别注入脉冲提供了便利。当给电机的相绕组加上相电压时,忽略电机饱和和相间互感,在不考虑电机的磁滞损耗和涡流损耗等时,电机的电压平衡方程式为

$$u_k = R_k i_k + L_k(\theta) \frac{di_k}{dt} + i_k \omega \frac{dL_k(\theta)}{d\theta} \quad (1)$$

式中: u_k ——第 k 相绕组的端电压;

R_k ——第 k 相绕组的电阻;

i_k ——第 k 相绕组的相电流;

L_k ——第 k 相相电感;

ω ——电机的转速;

θ ——电机的转子位置角, $k=1, 2, \dots, m$;

m ——电机相数。

在电机低速情况下,向电机的各相注入高频脉冲,电机旋转电动势很小,开关管导通区间电流上升时间短,电流峰值小,忽略电机的绕组压降,则式(1)可简化为

$$u_k \approx L_k(\theta) \frac{di_k}{dt} \quad (2)$$

即

$$L_k(\theta) \approx U_k \frac{\Delta T}{i_{\text{peak}}} \quad (3)$$

式中: i_{peak} ——脉冲响应电流。

从式(3)可以看出,当端电压和注入的高频脉冲频率占空比固定时,电机的相电感和脉冲响应电流峰值成反比关系。

1.2 初始分区估计

电感包含了电机的位置信息,电感又与脉冲电流成反比,所以通过脉冲电流可以估计转子位置信号。可是电感成非线性周期性变化,所以需要通过电感分区来估计转子位置信号。

图 1 是 12/8 三相 SRM 电感与其对应的脉冲电流分区示意图。一个电感周期分为 6 个分区,通过比较三相脉冲电流峰值大小即可估计出当前分区,从而即可确定初始起动相。

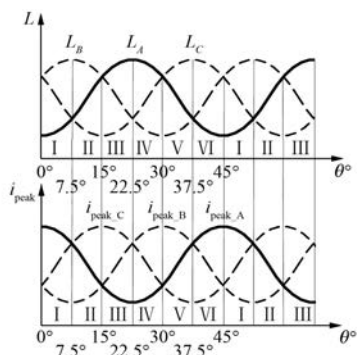


图1 电感、脉冲电流分区

2 线性三角形初始位置估计策略

通过电感分区可以估计出电机的初始分区和初始起动相,但仍然不能精确估计出电机初始位置角度。本文提出一种线性三角形模型估计转子初始位置角。

2.1 脉冲电流包络线性化

如图2所示,将每个分区的脉冲电流包络线进行线性化,连续的两个电感分区脉冲电流峰值包络线是关于7.5°对称的。在每一个分区里,脉冲电流峰值包络线与转子位置角是一一对应的关系,所以只要能建立每个电感分区里的脉冲电流包络线与转子位置角之间的数学模型,就可以进一步估算出转子初始位置角。

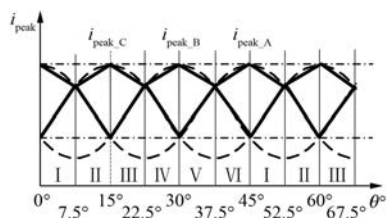


图2 脉冲电流包络线性化

脉冲电流包络线与转子位置角之间数学模型的建立采用拟合的方法,既采用选择若干个点位置,实测得到各个点位置的脉冲电流峰值,然后通过拟合的方法得到脉冲电流峰值包络线与转子位置角之间的数学模型。该方法得到的模型精确度高,但过程较繁琐,为此,本文将每个分区里的脉冲电流峰值包络线近似线性化,得到如图2中粗实线部分的三角形。

这种采用线性化模型方法可以大大简化初始位置估计算法,省去了脉冲电流峰值包络线非线性模型的拟合过程。

由于任何相邻的两个分区脉冲电流峰值包络线相互对称,所以只要确定脉冲电流峰值包络线两个交点的电流峰值,就可以得到任意两相脉冲电流峰值包络线交点位置的坐标值,从而可以得到各个分区里脉冲电流峰值包络线的线性模型。该方法省去了实测若干个位置点的繁琐过程。

2.2 线性三角形模型的建立

将每个分区脉冲电流峰值包络线组成线性三角形,利用三角形模型来估计转子初始位置角。如图3为第III和IV分区里包络线性三角形示意图,GD和GE分别为B相C相的脉冲电流峰值包络线, $i_{\text{peak_MAX}}$ 是电感最小时的脉冲电流峰值, $i_{\text{E_peak}}$ 是两相电感曲线相交其中一个交点位置的脉冲电流峰值,两腰上任何一个位置的角度都可以通过三角形知识简易计算出来。具体来说,该方法初始位置角估算过程为:首先通过脉冲电流峰值的大小确定转子所在的当前分区,再根据当前分区选取相应的初始位置角数学模型估算出初始位置角。

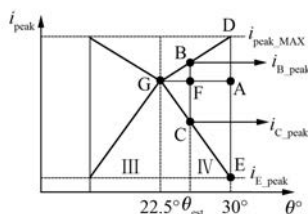


图3 脉冲电流包络线性三角形模型

下面以当前分区为第IV区间为例介绍初始位置角数学模型的推导过程。 θ_{est} 为初始位置估计角度。该初始位置对应B相和C相的坐标分别为 $(\theta_{\text{est}}, i_{\text{B_peak}})$ 和 $(\theta_{\text{est}}, i_{\text{C_peak}})$,A、G两点之间的角度差为7.5°,根据数学知识易知三角形BGC和三角形DGE相似,所以依据三角形相似原理容易得到第IV区间里转子初始位置角度 θ_{est} 数学模型为:

$$\theta_{\text{est}} = 22.5^\circ + 7.5^\circ \frac{i_{\text{B_peak}} - i_{\text{C_peak}}}{i_{\text{peak_MAX}} + i_{\text{E_peak}}} \quad (4)$$

同理得到其他分区初始位置估计角度数学模型。

第I区间转子初始位置角度 θ_{est} 数学模型为

$$\theta_{\text{est}} = 7.5^\circ - 7.5^\circ \frac{i_{\text{A_peak}} - i_{\text{C_peak}}}{i_{\text{peak_MAX}} + i_{\text{E_peak}}} \quad (5)$$

第 II 区间转子初始位置角度 θ_{est} 数学模型为

$$\theta_{\text{est}} = 7.5^\circ + 7.5^\circ \frac{i_{\text{C_peak}} - i_{\text{A_peak}}}{i_{\text{peak_MAX}} + i_{\text{E_peak}}} \quad (6)$$

第 III 区间转子初始位置角度 θ_{est} 数学模型为

$$\theta_{\text{est}} = 22.5^\circ - 7.5^\circ \frac{i_{\text{C_peak}} - i_{\text{B_peak}}}{i_{\text{peak_MAX}} + i_{\text{E_peak}}} \quad (7)$$

第 V 区间转子初始位置角度 θ_{est} 数学模型为

$$\theta_{\text{est}} = 37.5^\circ - 7.5^\circ \frac{i_{\text{B_peak}} - i_{\text{A_peak}}}{i_{\text{peak_MAX}} - i_{\text{E_peak}}} \quad (8)$$

第 VI 区间转子初始位置角度 θ_{est} 数学模型为

$$\theta_{\text{est}} = 37.5^\circ + 7.5^\circ \frac{i_{\text{A_peak}} - i_{\text{B_peak}}}{i_{\text{peak_MAX}} + i_{\text{E_peak}}} \quad (9)$$

3 试验验证

为了验证上述提出的位置估计策略的可行性,本文在一台 12/8 结构 SRM 样机上进行了试验。硬件平台如图 4 所示。样机额定功率 1.5 kW、额定转速 1 500 r/min; A 为辅助电源, B 为 dSPACE 主控系统, C 为采样、保护与调理电路, D 为功率变换器, E 为机械分度头, F 为 12/8 结构的 SRM。试验中,母线电压 10 V,注入脉冲频率 100 Hz,占空比 40%。dSPACE1104 基于 MATLAB/Simulink 的控制系统在实时环境下的开发及测试的工作平台,与 MATLAB/Simulink/RTW 完全兼容并实现了无缝连接。

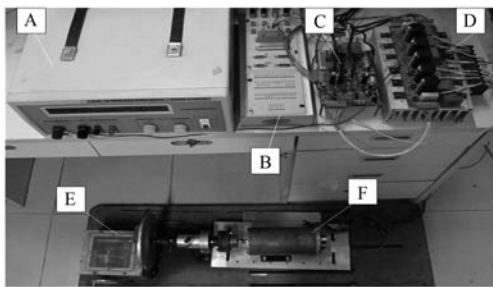


图 4 硬件平台

利用机械分度仪将电机静止在不同初始位置处,同时向三相注入高频脉冲,母线电压是 10 V,脉冲频率为 100 Hz,脉冲的占空比为 40%。由于注入的脉冲频率高,产生的脉冲电流小,摩擦转矩大于脉冲电压产生的起动转矩,所以电机不会转动。

图 5 为转子在不同初始位置下,注入高频脉冲测得的 A、B、C 三相脉冲电流峰值波形,并且实

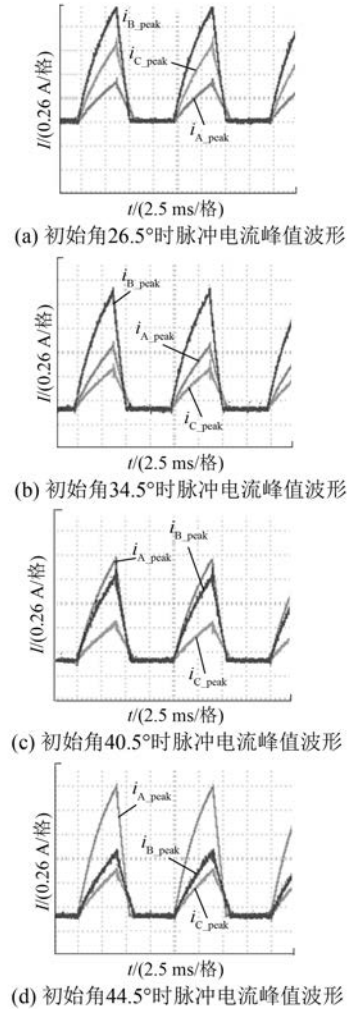


图 5 不同初始位置三相脉冲电流峰值波形

测到 $i_{\text{peak_MAX}}$ 、 $i_{\text{E_peak}}$ 的值分别为 1.420 A 和 0.45 A。从试验结果看出,不同初始位置三相脉冲电流峰值大小是不一样的,所以只要采集峰值电流并比较大,即可确定转子所在的当前初始分区。

为了验证本文所提的线性三角形初始位置角数学模型的正确性,将试验得到的三相脉冲电流峰值带入 θ_{est} 数学模型进行验算。例如:以图 5(b) A 相实际位置角 34.5° 为例,由实测知 A 相脉冲电流峰值为 0.638 A, B 相脉冲电流峰值为 1.248 A, C 相脉冲电流峰值为 0.385 A, 所以有 $i_{\text{B_peak}} > i_{\text{A_peak}} > i_{\text{C_peak}}$, 从而判断当前初始分区 V, A 相电感起动相,再将电流峰值和 $i_{\text{peak_MAX}}$ 、 $i_{\text{E_peak}}$ 的值代入式(8),估计出 A 相初始位置角为

$$\theta_{\text{est}} = 37.5^\circ - 7.5^\circ \frac{i_{\text{B_peak}} - i_{\text{A_peak}}}{i_{\text{peak_MAX}} + i_{\text{E_peak}}} = 35.05^\circ$$

估计的位置角与实际初始位置角 34.5°误差为 0.55°。

再以图 5(a) A 相转子在 26.5°为例来验证。根据 A 相转子在 26.5°位置的三相脉冲电流峰值数据比较可知,A 相脉冲电流峰值为 0.418 A,B 相脉冲电流峰值为 1.285 A,C 相脉冲电流峰值为 0.583 A,此时转子当前分区为第 IV 区域,选择式(4)估算 A 相初始位置角 θ_{est} :

$$\theta_{\text{est}} = 22.5^{\circ} + 7.5^{\circ} \frac{i_{\text{B_peak}} - i_{\text{C_peak}}}{i_{\text{peak_MAX}} + i_{\text{E_peak}}} = 25.32^{\circ}$$

估计值 θ_{est} 与实际初始位置角相差 1.18°,用同样的方法可以得到其他位置初始角度估计误差,如表 1 所示。由表 1 可知,该算法估计出的初始位置角误差在 2°之内,具有较高的精度。

表 1 初始位置角估计误差

A 相实际位置角/(°)	A 相估计位置角/(°)	估计误差/(°)
24.5	24.00	0.5
26.5	25.32	1.18
28.5	26.94	1.56
30.5	31.78	1.28
32.5	34.36	1.86
34.5	35.05	0.55
36.5	36.61	0.11
38.5	38.38	0.12
40.5	39.95	0.55
42.5	40.63	1.87
44.5	43.22	1.28

4 结 语

针对脉冲电流注入方法需要预设电流阈值问题,本文在脉冲注入的理论基础上,提出了一种脉

(上接第 111 页)

统需要更大的绝缘距离,在设计氦气条件下的绝缘距离时应留有足够的安全裕度以保证绝缘系统的可靠性。

(5) 应用于氦气环境下的绝缘系统的电气绝缘性能必须通过评定,在以后的评定过程中可以增加不同气压、氦气纯度等评定条件,在积累足够数据的基础上逐渐形成该类绝缘系统的设计要求及评定规范。

【参 考 文 献】

[1] 尹清辽,孙玉良.从气冷反应堆发展历史看核能技术路线的战略选择[J].工程研究,2007,3(1):

冲电流峰值包络线线性三角形的初始位置角估计方法,通过电感分区估计转子初始位置分区,再通过初始分区选择对应的线性三角形数学模式,由模型计算出当前转子具体的初始位置角度。该方法不需要复杂运算和额外的硬件电路。最后在一台 1.5 kW SRM 控制平台上,通过试验验证了该方法的可行性和正确性。

【参 考 文 献】

[1] 李景男,王旭东,周永琴.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.
[2] 罗德荣,李亚雄,李孟秋,等.基于单阈值的开关磁阻电机无位置传感器技术[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(2): 94-100.
[3] 邵杰,邓智泉,胡荣光.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.
[4] 李珍国,王红斌,王江浩,等.基于电流波形检测法的开关磁阻电动机无位置传感器控制[J].电工技术学报,2016,31(11): 97-104.
[5] 毛宇阳,邓智泉,蔡骏,等.基于电流斜率差值法的开关磁阻电机无位置传感器技术[J].电工技术学报,2011,21(9): 87-93.
[6] 蔡骏,邓智泉.基于全周期电感法的开关磁阻电机无位置传感器技术[J].电工技术学报,2013,28(2): 145-153.
[7] 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): 35-40.

收稿日期: 2017 -08 -29

242-254.

[2] 岳珊,刘兴男,时振刚.高压氦气平行极板击穿电压实验研究[J].物理学报,2015,64(10): 1-7.
[3] 旋转电机绝缘结构功能性评定散绕组试验规程热评定与分级:GB/T 17948.1—2000[S].
[4] 交流电机定子成型线圈耐冲击电压水平:GB/T 22715—2008[S].
[5] 李伟明,姚洋.高压电动机电晕的原因及解决措施[J].工业设计,2012(3): 63.
[6] 郝艳捧,阳林,王晓蕾.含空气杂质大气压氦气介质阻挡放电中彭宁电离作用[J].电工技术学报,2009,24(8): 23-26.

收稿日期: 2017 -08 -29