

考虑磁饱和特性下特殊位置电感的开关磁阻电机 无位置传感器控制*

冯 创¹, 颜建虎¹, 周 怡¹, 宋同月¹, 应展烽²

(1. 南京理工大学 自动化学院, 江苏 南京 210094;

2. 南京理工大学 能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 开关磁阻电机(SRM)在实际运行时由于负载增加导致电流增大,会使 SRM 进入磁饱和工作状态。传统的无位置传感器控制方法解决磁饱和问题需要进行大量离线测量。因此,提出一种基于特殊位置判断的 SRM 无位置传感器控制策略。该方法通过向非导通相注入高频脉冲电压以得到全周期电感,通过电感曲线非饱和段的线性变化关系在线得出 15°、30°、45°、60° 4 个特殊位置对应的非饱和相电感值,根据电感与角度对应关系,在一个周期内得到 4 个特殊位置,通过相邻 2 次位置估算电机转速与全周期转子位置。在此基础上,搭建了基于 Simulink 的仿真模型和基于 DSP 的试验平台,通过仿真与试验验证了该方法的正确性。

关键词: 开关磁阻电机; 无位置传感器控制; 磁路饱和; 电感计算; 在线测量

中图分类号: TM 352 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)10-0001-06

doi: 10.12177/emca.2020.114

Position Sensorless Control of Switched Reluctance Motor with Inductance Values at Special Positions Considering the Magnetic Saturation*

FENG Chuang¹, YAN Jianhu¹, ZHOU Yi¹, SONG Tongyue¹, YING Zhanfeng²

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: When the switched reluctance motor (SRM) is running, the increased current caused by the increased load will lead the SRM to the magnetic saturation status. The traditional sensorless control method to solve the problem of magnetic saturation for SRM requires a lot of off-line measurements. So, a sensorless control strategy of SRM based on special position judgment is proposed, which obtains the full cycle inductance by injecting high frequency pulse voltage into the non-conducting phase. The unsaturated phase inductance values corresponding to four special positions at 15°, 30°, 45° and 60° are obtained on-line through the linear variation relationship of the unsaturated section of the inductance curve. According to the inductance-angle function, four special positions are obtained in one cycle. The motor speed and the full cycle rotor position are estimated by two adjacent positions. On this basis, a simulation model based on Simulink and an experimental platform with DSP are built, with which the correctness of the proposed method is verified.

Key words: switched reluctance motor (SRM); position sensorless control; magnetic saturation; inductance calculation; on-line measurement

收稿日期: 2020-07-03; 收到修改稿日期: 2020-07-31

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51607091)

作者简介: 冯 创(1997—),男,硕士研究生,研究方向为开关磁阻电机无位置传感器控制技术。

颜建虎(1983—),男,博士,副教授,研究方向为新型电机的设计与控制技术。

周 怡(1996—),女,硕士研究生,研究方向为电机本体设计。

0 引言

开关磁阻电机(SRM)具有结构简单、转子无需绕组、运行效率高、调速范围宽、低速起动转矩大、适用于恶劣运行环境等优点^[1-2]。然而,SRM运行必须获得转子位置,而位置传感器的使用不仅增加了系统复杂程度,且传感器在恶劣环境下易损坏。因此,SRM无位置传感器控制的研究具有显著的研究意义。

近些年来,国内外学者针对SRM无位置传感器控制开展了大量的研究,先后提出了一系列位置估计和无位置传感器控制方案。目前这些方案大多集中于通过测量SRM各相电流电压信号,计算磁链或电感来得到转子位置。文献[3]采用磁链-电流法,根据SRM的磁链特性,在检测电流磁链后通过查表法完成位置估计,该方法往往需要大量前期工作,并且控制时需要占用大量的内存空间存储表格。文献[4-5]改进了磁链-电流法,不再需要占用大量内存空间,但仍需要大量前期离线测量工作。文献[6]通过注入脉冲提前离线拟合电流幅值与角度关系估计SRM初始位置,该方法可实现SRM无反转起动。文献[7]提出建立SRM电感与位置关系,通过参数估算出增量电感值得到位置信息。文献[8]提出通过非导通相注入高频脉冲,得到导通相斩波计算全周期电感,通过设定电感阈值得到SRM转子位置。文献[9]提出线电感概念,利用各相电感作差求得线电感,利用线电感大小比较得出SRM转子位置。文献[10]通过磁路不饱和时电感矢量与转子位置的对应关系估计位置。文献[11]分析了相之间互感的影响对位置估计的影响。文献[12]提出全周期电感测量方法,将导通区和非导通区电感测量方法结合起来测量出真实的全周期电感,利用全周期电感位置交点处的特殊点得到转子位置,在磁饱和情况下通过特殊点的选取有效减小了磁饱和的影响。文献[13-14]改进了文献[12]特殊点位置选取导致的精度不足问题,使用多项式函数拟合的方式对磁饱和的影响进行优化。但是,该方法需要对不同电流下的电感进行提前测量,在一定程度上又增加了前期工作量。

本文提出一种在线计算特殊位置非导通相电感的无位置传感器控制方法,与目前针对SRM运

行时磁饱和问题的解决方法相比,减少了离线测量与函数拟合工作量,对进入磁饱和后电机中低速运行时的位置估计误差小。

1 全周期范围电感模型分析

以8/6极四相SRM为例来进行研究。由于SRM各相对称,因此四相电感对称分布相差15°。SRM每相电感前半个周期和后半个周期在定子转子凸极对齐处对称,如图1所示。

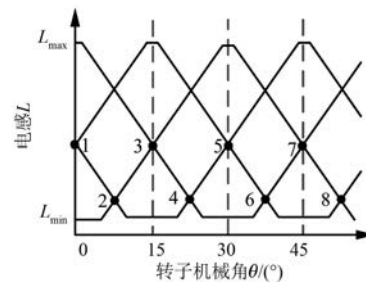


图1 8/6极SRM全周期电感

若不考虑磁路饱和特性,则电感计算式为

$$L = N \frac{\psi}{I} = N \frac{F}{R_m I} = \frac{N^2}{R_m} \quad (1)$$

$$R_m = \frac{l}{\mu s} \quad (2)$$

式中: N 为匝数; ψ 为磁链; I 为电流; F 为磁动势; R_m 为磁阻; l 为磁路长度; μ 为磁导率; s 为磁路截面积。

磁路长度变化较小,可认为是定值,则SRM在凸极由完全不重合向重合运行过程中,非磁饱和状态下电感变化与转子角度成线性关系,在完全重合位置或完全不重合位置电感基本不发生变化。由图1可知,四相电感曲线有8个特殊位置交点并且8个交点对应了确定的位置点。

2 全周期位置电感的获取

当SRM导通相流过电流时,受电流和当前位置的影响使导通相磁场饱和,导致导通相电感发生变化,因此全周期电感主要分为2个阶段获取,如图2所示。第1阶段为导通阶段。这个阶段电流较大,常常发生磁饱和。以A相为例,电感计算式为

$$U_a = \frac{d\psi_a}{dt} + I_a r_a \quad (3)$$

$$\psi_a(t) = \int_0^t (U_a - i_a r_a) dt + \psi_0 \quad (4)$$

$$L_a = \frac{\psi_a}{I_a} \quad (5)$$

式中： U_a 、 I_a 、 r_a 、 ψ_a 、 ψ_0 分别为 A 相的电压、电流、电阻、磁链、初始磁链。

第 2 阶段为不导通阶段。此时电流基本为零，无法采用第 1 阶段的方法进行计算，因此需要采用注入脉冲法。由电压导通相电压方程可知，当开关管导通时：

$$U_{dc} = Ri + L(\theta) \left. \frac{di}{dt} \right|_{on} + i\omega \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (6)$$

当开关管关断时进入续流环节：

$$-U_{dc} = Ri + L(\theta) \left. \frac{di}{dt} \right|_{off} + i\omega \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (7)$$

式中： U_{dc} 为相电压； R 为相绕组阻值； i 为各相电流； ω 为转子角速度。

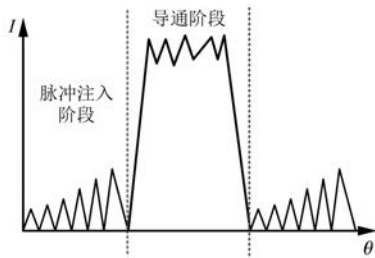


图 2 电机运行时电流

由于开通关断时间很短，相电流和相电感值变化很小，则由式(6)和式(7)得出：

$$L(\theta) = \frac{2U_{dc}}{\left. \frac{di}{dt} \right|_{on} - \left. \frac{di}{dt} \right|_{off}} \quad (8)$$

然而实际中电流变化率数值难以精确计算，一个脉冲周期内单相电感变化较小，因此采用一次脉冲导通阶段的电流最大值与脉冲注入时间的比值取代斜率：

$$L(\theta) = \frac{U_{dc}}{I_{max}} t_m \quad (9)$$

式中： I_{max} 为一个脉冲周期内激励脉冲电流最大值； t_m 为单次脉冲注入时间。

3 无位置传感器控制方法

3.1 不考虑磁饱和情况下位置估计

图 3 给出了电感曲线在图中形成 12 个交点，

但 A、C 点对应同一个位置。因此，在对转子位置进行估计时仅有 8 个交点起作用，8 个交点对应了 8 个特殊位置角。

由于在低电感区交点测量不够精准，选择 B 点作为特殊位置点，则一个电周期内有 4 个交点。

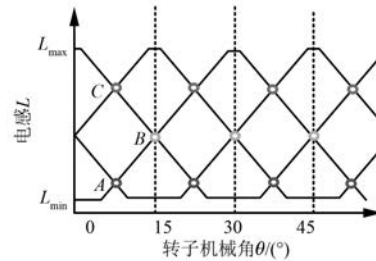


图 3 特殊位置点选取

3.2 考虑磁饱和发生时处理

当磁路饱和时，电流变化对 SRM 电感的影响如图 4 所示。其中， $I_a < I_b < I_c$ ，可以看出随着导电流的增加电感曲线会发生明显变化。对应图 3 中 B 点的交点位置发生明显的变化，由于 C 点未应用于位置估计仅考虑 B 点可以看出随着导通时电流的增加电感曲线出现变化，导致预估位置点比实际位置点落后了一定的角度，而且估算位置角度与实际角度的偏差与电流正相关。为了保证当导通相电流增大时位置估计的精准度，目前一般采用的方法有建立特殊位置点电流角度关系或转矩角度关系，即建立类似如下函数关系：

$$\theta_w = k_1 I + k_2 I^2 + k_3 I^3 \dots + k \quad (10)$$

$$\theta_w = k_1 T + k_2 T^2 + k_3 T^3 \dots + k \quad (11)$$

式中： θ_w 为饱和误差补偿角度； T 为转矩。

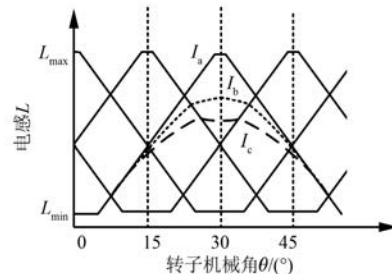


图 4 电流变化对电感的影响

式(10)、式(11)是通过提前测量交点位置角度与其他物理量的关系建立函数关系，从而估算出电流增加时对电感交点处进行误差补偿的量。

3.3 磁饱和时位置估计算法设计

采用函数拟合的方法可以解决发生磁饱和时

位置估计不精准的问题,但是这种方法需要提前进行离线测量,且对不同电机没有普遍性。由图5可以看出,SRM在运行时为了防止负转矩的出现,需要设置关断角度,使得在各相电感下降阶段电机当前相没有电流。因此,在电感下降阶段没有电感饱和现象,而在电感上升段发生饱和导致电感曲线变化。由图6可以看出,当发生磁饱和时, L_c 电感曲线变化导致误差, C 点和 B 点落后于实际位置。由于 L_{C1} 为 L_b 处于电感下降段, L_{A1} 为低电感区处电感,因此 L_{A1} 和 L_{C1} 均处于电感线性区。此时有线性关系:

$$L_k = \frac{L_{A1} + L_{C1}}{2} \quad (12)$$

式中: L_k 为特殊点对应的非导通相电感值。

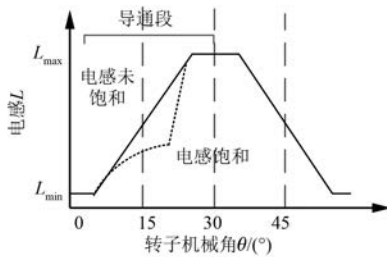


图5 电机实际运行时一相电感

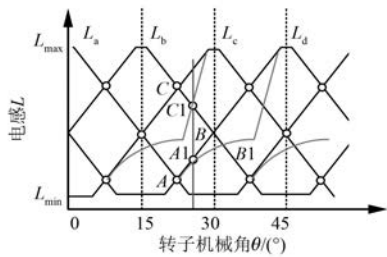


图6 实际运行时电感交点

通过多次计算求平均值方法可避免误差,得到较准确的特殊位置点非饱和相电感值。由表1中逻辑关系便可得到特殊位置角。全周期位置关系为

$$\theta = \theta_p + \frac{15^\circ}{\Delta t} T_z \quad (13)$$

表1 特殊位置与电感关系

逻辑关系	对应角度/(°)
$L_b > L_a = L_k > L_d$	15
$L_c > L_b = L_k > L_a$	30
$L_d > L_c = L_k > L_b$	45
$L_a > L_d = L_k > L_c$	60

式中: θ_p 为最近一次特殊位置点; Δt 为两次特殊位置点时间差; T_z 为中断周期。

4 仿真分析

根据上述理论分析,为了验证本文提出的对磁饱和时位置估计的正确性,在 MATLAB/Simulink 环境下按照实验室实际的电机参数进行SRM的无位置传感器控制仿真验证。四相8/6极SRM参数如表2所示。电机额定电压为220 V,仿真模型通过转速、电流双闭环控制改变负载大小,使电机进入磁饱和状态。图7为电机以300 r/min转速运行在1 A电流斩波值下时的仿真波形。图7(a)为15°特殊位置点更新位置与A相电感对应的位置关系,根据新的位置检测法估算得到的电机转子位置误差在1°以内。

表2 四相8/6极SRM参数

参数名称	参数值
额定功率/W	500
定子相电阻/Ω	8
相电感 L_{max} /mH	200
相电感 L_{min} /mH	25
转动惯量/($kg \cdot m^2$)	0.001

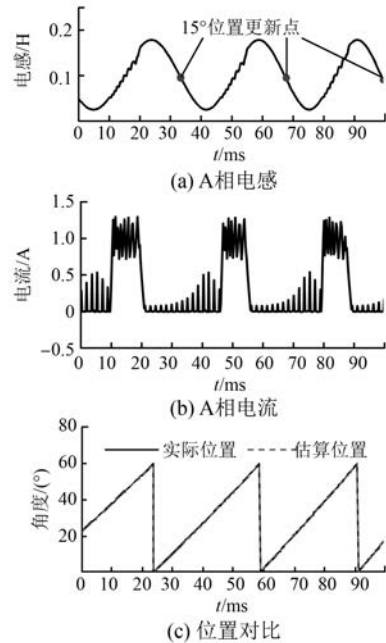


图7 非饱和和仿真波形

图8为增大电机负载、给定转速300 r/min、限流值为2.2 A情况下的仿真图。由图8(a)可看

出,15°位置更新点发生在电感下降段即不发生饱和和位置。由位置对比可以看出,电感进入磁饱和状态时位置跟踪正常,误差和未进入磁饱和状态时一致,在1°以内。

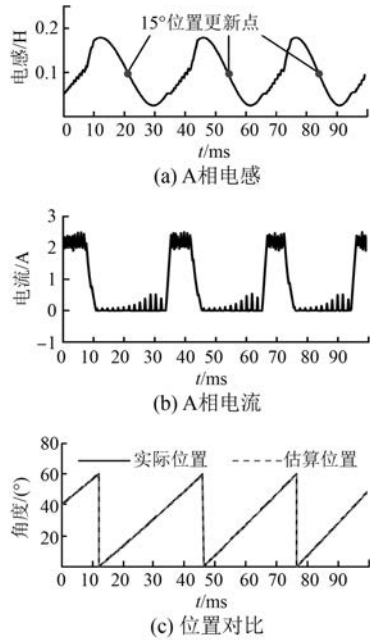


图8 饱和仿真波形

5 试验分析

为了充分验证该位置估算算法的有效性,对相关样机进行了试验。试验平台如图9所示。主控芯片采用TI公司的DSP 28335,转子实际位置采用一台2500线的多摩川光电编码器测量。为了使得激励脉冲电流足够电流传感器采样并防止电流过大,注入脉冲频率取1.5kHz,占空比为0.3。

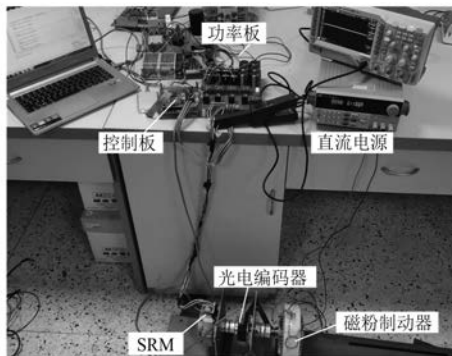


图9 试验平台

图10和图11分别为300 r/min时电机A相

实际位置与估算位置对比图以及电流波形。可以看出估算位置与实际位置误差最大为3°,精度满足电机运行要求。

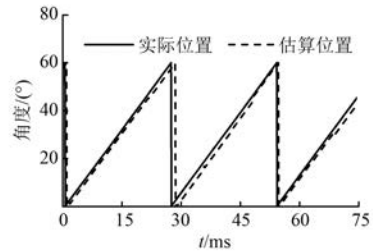


图10 低速非饱和位置对比

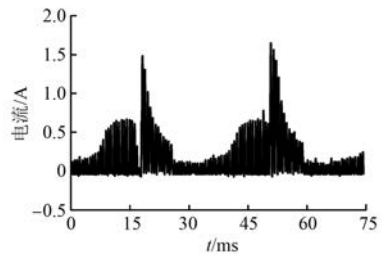


图11 低速非饱和电流波形

图12、图13为改变限流值至2.2A,转速给定300 r/min,逐渐增大电机负载使得电机在导通时电流变大以进入磁饱和状态的试验结果。通过位置对比和A相的电流波形可以看出实现了较好的位置跟踪,误差与非饱和时基本一致,最大误差约为3°。

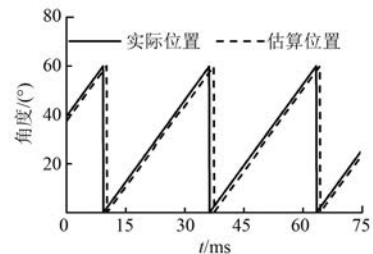


图12 低速饱和位置对比

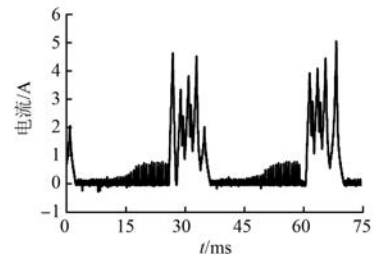


图13 低速饱和电流波形

为了验证该位置估算方法在高速时的性能,将转速给定为 1 000 r/min,限流值 2.2 A 调节负载。由图 14、图 15 可以看出,相比 300 r/min 运行时误差受转速影响增大。在相同时间内脉冲注入次数明显减少,影响估算精度,最大误差达到 5°,但电机还可以保持正常运行。

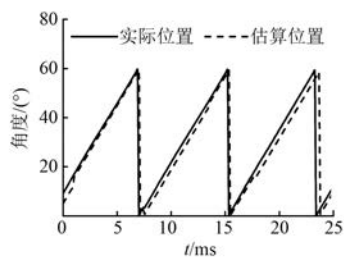


图 14 高速位置对比

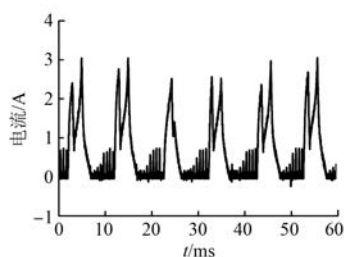


图 15 高速电流波形

6 结 语

本文针对 SRM 无位置传感器检测方法在磁饱和和段误差较大的问题,提出了一种新的位置估计方法,该方法不受电流增大时磁饱和的影响。通过仿真和试验验证了该方法的有效性。结果表明:

(1) 一个周期内有 4 个特殊位置点,个别位置点估算时丢失不会影响下个位置点的正常判别,保证了位置估计的准确度。

(2) 该方法受相导通时饱和影响较小,但随着电机转速增加,一个周期内非导通相注入脉冲数降低,使得转子估算精度降低,因此该方法适合中低速使用。

(3) 该方法无需进行离线测量、函数拟合等前期工作,减少了离线测量工作量。

【参 考 文 献】

[1] SONG S, GE L, ZHANG Z. Accurate position estimation of SRM based on optimal interval selection and linear regression analysis[J]. IEEE Transactions

on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3467.

- [2] HU K, CHEN Y, LIAW C. A reversible position sensorless controlled switched-reluctance motor drive with adaptive and intuitive commutation tunings[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(7): 3781.
- [3] KOBLARA T, SORANDARU C, MUSUROI S, et al. A low voltage sensorless switched reluctance motor drive using flux linkage method [C] // 2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment.
- [4] 李姗姗,李爱民,王青,等.基于特殊位置检测的开关磁阻电机无位置传感器控制策略[J].电机与控制应用,2018,45(12): 12.
- [5] 黄向慧,朱立群,周奇勋.一种开关磁阻电机无位置传感器控制效率优化策略[J].电机与控制应用,2019,46(8): 41.
- [6] 刘卫国,宋受俊,SCHAFER U.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.
- [7] GAO H, 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.
- [8] 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控制技术[J].电工技术学报,2013,28(2): 145.
- [9] 匡斯建,张小平,刘苹,等.线电感特征点定位的开关磁阻电机无位置传感器控制方法[J].控制理论与应用,2020,37(3): 551.
- [10] 蔡骏,邓智泉.基于相电感综合矢量法的开关磁阻电机初始位置估计[J].中国电机工程学报,2013,33(12): 145.
- [11] 蒯松岩,李奎,衡凤平,等.考虑互感影响的开关磁阻电机无位置传感器控制技术[J].电工技术学报,2017,32(8): 178.
- [12] 李孟秋,陈欣,任修勇,等.基于典型位置电感的开关磁阻电机无位置传感器控制策略[J].中国电机工程学报,2017,37(13): 3901.
- [13] 蔡辉,王辉,李孟秋,等.考虑饱和和电感特性的开关磁阻电机的无位置传感器控制方法[J].电工技术学报,2018,33(12): 2723.
- [14] 许爱德,任萍,陈加贵,等.基于电感特殊位置点的开关磁阻电机转子位置检测及误差补偿[J].电工技术学报,2020,35(8): 1613.