

基于全周期电感法的无位置传感器 开关磁阻电机控制技术*

黄向慧, 贺帅帅, 程 勇

(西安科技大学 电气与控制工程学院, 陕西 西安 710000)

摘要: 针对开关磁阻电机在大电流下因磁路饱和造成转子位置估计不准确问题, 提出一种基于全周期电感交点与电感阈值相结合的转子位置估计法。该方法在高电感区设定相应相电感阈值, 当电感处于非磁路饱和时, 高电感区电感交点脉冲与设定相电感阈值脉冲采取相“与”的方式获取高电感位置估算脉冲; 而当电感处于磁路饱和时, 将所设定的电感阈值脉冲作为高电感区位置估算脉冲, 然后通过相邻脉冲信号估计出电机转速和转子位置。最后通过仿真对该方法的正确性进行验证。

关键词: 开关磁阻电机; 磁路饱和; 转子位置; 全周期电感; 电感阈值

中图分类号: TM 352 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)08-0019-05

doi: 10.12177/emca.2020.089

Control Technology of Sensorless Switched Reluctance Motor Based on Full-Cycle Inductance Method*

HUANG Xianghui, HE Shuaishuai, CHENG Yong

(College of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710000, China)

Abstract: In view of the inaccuracy of rotor position estimation of switched reluctance motor (SRM) due to the magnetic circuit saturation under the condition of high current, a rotor position estimation method based on the combination of full-cycle inductance adjacent intersection and inductance threshold is proposed. This method sets the corresponding phase inductance threshold value in the high inductance area. When the inductance is in the non magnetic circuit saturation, the “and” method is used to obtain the high inductance position estimation pulse between the intersection point pulse and the set phase inductance threshold pulse. When the inductance is in the magnetic circuit saturation, the set inductance threshold pulse is used as the high inductance position estimation pulse, and then the motor speed and rotor position are estimated by the adjacent pulse signals. Finally, the correctness of the method is verified by simulation.

Key words: switched reluctance motor (SRM); magnetic circuit saturation; rotor position; full-cycle inductance; inductance threshold

0 引言

开关磁阻电机 (SRM) 作为新型机电一体调

速系统, 在成本、效率、转矩、容错性等方面具有独特的优势。其中, 转子位置信息检测的准确性决定其可靠性和高性能, 但是位置传感器会增加系

收稿日期: 2020-04-29; 收到修改稿日期: 2020-07-02

* 基金项目: 陕西省科技厅工业攻关项目 (2016GY-064)

作者简介: 黄向慧 (1967—), 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电机与电器、检测技术与自动化装置。

贺帅帅 (1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

程 勇 (1979—), 男, 博士后, 副教授, 研究方向为开关磁阻电机、永磁同步电机系统及数字控制技术。

统成本,降低系统的可靠性,也限制了开关磁阻电机在高温、潮湿、多粉尘等恶劣条件下的应用。因此,无位置传感器技术的研究对开关磁阻电机推广具有极其重要的意义^[1-2]。

国内外针对无位置传感器技术提出多种控制方案。文献[3]采用向非导通相注入高频电压脉冲,由响应电流峰值来判断转子位置。文献[4]提出一种基于有限元分析电感的位置估算方法。文献[5]提出一种基于三相电感交点与角度相结合的无位置传感器方法,忽略磁路饱和,利用全周期电感相间的交点确定转子位置。文献[6]对文献[5]进行了改进,选取受磁路饱和影响较小的低电感区交点,但是位置分辨率较低,在低速时容易造成较大误差。文献[7-8]针对饱和电感对相邻两相电感交点位置偏移造成转子位置的位置估计误差,采用多项式拟合方法获取交点角度与电感的函数关系。文献[9-10]通过在线计算磁链数据对转子位置进行实时估计,具有更高的估计精度和转速适用范围。

本文针对 12/8 SRM 在大电流下因磁路饱和造成转子位置估计不准确的问题,提出一种基于全周期电感交点与电感阈值相结合的转子位置估计法。该方法在全周期电感交点估计转子位置方法的基础上设定相应相电感阈值,然后通过交点脉冲与阈值脉冲相互间逻辑关系估计出转子实时位置和转速。最后,通过仿真试验证明了该方法的正确性。

1 全周期电感获取

当 SRM 运行时,忽略相间互感、涡流和磁滞效应等非线性因素影响时,其单相电压平衡方程为

$$U_{dc} = iR + \frac{d\psi(i, \theta)}{dt} \quad (1)$$

将 $\psi(i, \theta) = L(i, \theta)i$ 代入式(1),可得:

$$U_{dc} = iR + \omega i \frac{dL(i, \theta)}{d\theta} + L(i, \theta) \frac{di}{dt_{on}} \quad (2)$$

式中: U_{dc} 为直流母线电压; i 为单相电流; R 为单相绕组电阻; $\psi(i, \theta)$ 为电机磁链; ω 为电机角速度; $L(i, \theta)$ 为单相电感; θ 为转子位置角; t_{on} 为功率开关开通时间。

当功率开关导通时,有:

$$U_{dc} = iR + \omega i \frac{dL(i, \theta)}{d\theta} + L(i, \theta) \frac{di}{dt_{on}} \quad (3)$$

当功率开关关断时,有:

$$-U_{dc} = iR + \omega i \frac{dL(i, \theta)}{d\theta} + L(i, \theta) \frac{di}{dt_{off}} \quad (4)$$

式中: t_{off} 为功率开关关断时间。

开关管从开通到关断的时间间隔很短,可以认为相电流 i 和反电动势 $\omega i dL/d\theta$ 在一个脉冲周期内均保持不变,那么由式(3)和式(4)可得:

$$L(\theta) = \frac{2U_{dc}}{dI/dt_{on} - dI/dt_{off}} = \frac{2U_{dc}}{\Delta i} \quad (5)$$

由式(5)可知,当直流母线电压 U_{dc} 一定时,相电感 $L(\theta)$ 与相电流斜率差 Δi 成反比,因此全周期电感值可以通过实时地检测全周期相电流斜率差 Δi 获取。

使用上述电流斜率差法获取电机三相全周期电感,只利用了电感与电感母线电压和相电感之间的关系,这样便间接地消除了反电动势的影响,不仅有效地提高了电感辨识精度,同时还扩展了转速适应区间。

2 全周期电感分析

在三相 12/8 结构 SRM 每相绕组参数一致的情况下,三相电感其大小随转子位置呈周期性变化,位置依次相互错开 15° (机械角度)。当忽略磁路饱和时,三相电感 L_A 、 L_B 、 L_C 曲线和转子位置 θ 的关系如图 1 所示。图 1 以定子凸极与转子凹槽中心相对为 $\theta = 0^\circ$, 在一个 45° 机械周期内,三相电感总共有 7.5° 、 15° 、 22.5° 、 30° 、 37.5° 和 45° 等 6 个交点。

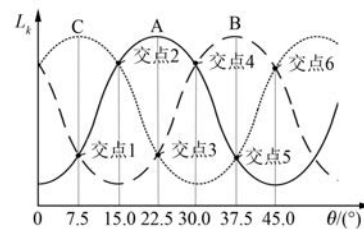


图 1 非饱和电感曲线交点示意图

但是,电机实际运行中,随着电流的增大,电感会逐渐趋于饱和。以 A 相为导通相,B、C 相为非导通相为例,给 A 相通入逐渐增大的电流得到三相电感与转子角度的关系曲线,如图 2 所示。

由图 2 可见,当 A 相电流小于饱和电流 10 A 时,电感曲线变化较小,相间电感交点基本保持不变。而当 A 相电流大于 10 A 时,导通相电感逐渐趋于饱和,并随着电流的增大而减小,此时非导通相 B、C 相电流较小仍处于非磁路饱和,因此 B、C 电感曲线也可近似认为保持不变。另外,由图 2 可见 A 相电感在低电感区交点对电流敏感度较低,交点受磁路饱和影响较小,而在高电感区随着饱和和电流的增大,交点受磁路饱和影响逐渐向右偏移,此时高电感区固定交点已不再适用于转子位置与转速估计。

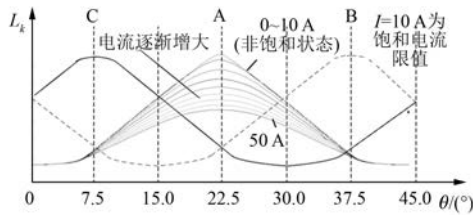


图 2 导通相饱和的全周期电感曲线图

3 全周期电感交点控制策略

在磁路饱和状态下,导通相电感在高电感区变化极大,造成高电感区电感交点偏移,而非导通相电感在高电感区受磁路饱和影响较小。因此,本文提出一种基于全周期电感相邻交点与电感阈值相结合的转子位置估计法。其原理如图 3 所示。

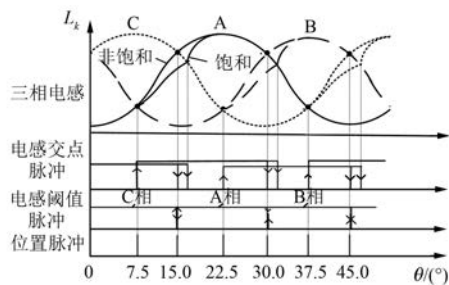


图 3 全周期电感与电感阈值相结合的位置估计

3.1 电感处于非磁路饱和时控制策略

因为三相电感均由非导通相注入脉冲和导通相电流计算获取,电感相等的点很难检索,所以通过相邻电感大小变化进行逻辑判断,从而获取电感交点检索脉冲。例如,当 $L_A > L_B$ 时,设置为高电

平,而 $L_A < L_B$ 时,设置为低电平,具体电感交点位置逻辑关系如表 1 所示。另外,在高电感区非导通相设置电感阈值,当非导通相电感值大于高电感区交点处电感时,设置为高电平,反之则为低电平,电感阈值脉冲如图 3 所示。最后,将电感交点脉冲信号和电感阈值脉冲信号相“与”,即可得到位置检索脉冲信号。该方法在磁路非饱和时由于具有电感阈值的设置,提高了位置检索信号的精确度。

表 1 电感交点位置逻辑关系表

相电感逻辑关系	导通相	非导通相	转子位置/(°)
$L_{B(k-1)} > L_{A(k-1)}$ $L_{B(k)} < L_{A(k)}$	A	BC	7.5
$L_{C(k-1)} > L_{A(k-1)}$ $L_{C(k)} < L_{A(k)}$	A	BC	15.0
$L_{C(k-1)} > L_{B(k-1)}$ $L_{C(k)} < L_{B(k)}$	B	AC	22.5
$L_{A(k-1)} > L_{B(k-1)}$ $L_{A(k)} < L_{B(k)}$	B	AC	30.0
$L_{A(k-1)} > L_{C(k-1)}$ $L_{A(k)} < L_{C(k)}$	C	AB	37.5
$L_{B(k-1)} > L_{C(k-1)}$ $L_{B(k)} < L_{C(k)}$	C	AB	45.0

3.2 电感处于磁路饱和时控制策略

当电感处于磁路饱和时,如图 3,在低电感区电感交点脉冲受磁路影响较小,可忽略不计。而在高电感区导通相电感受磁路饱和影响较大,非导通相受磁路影响较小,处于高电感区电感交点脉冲向右偏移,且滞后于设定的电感阈值脉冲,此时非磁路饱和时采取相“与”的方法已经失效,因此高电感区电感交点脉冲不可再作为位置检索脉冲信号。这时将所设定的电感阈值脉冲信号直接作为位置检测脉冲信号,然后结合低电感区获取的位置检索脉冲估算出任意时刻转子的速度与位置。该方法与传统的解决磁路饱和时采用曲线拟合得到 $\theta-L$ 关系相比,在保证提高检测精度的同时降低了计算的复杂性。

3.3 电感阈值范围的获取

上述电感阈值法需要预先知道高电感区电感交点处于非导通相的电感值才能准确地设定电感阈值,获取方法一般有有限元法和试验测量法。有限元法一般是通过电机本体详细参数用有限元分析的方法计算出电机不同位置时的磁化曲线,

然后用傅里叶函数得到电感曲线。本文只需要知道高电感区相交的电感值就可以设定阈值,因此采用试验测量法,其测量方法非常简单:首先手动转动电机到某相电感最小位置,即此相定子凸极与转子凹槽中心重合位置,固定电机转子不动,然后依序给其他两相通入合适高频检测脉冲,用所提电流斜率差法计算出该位置下的电感值,即可确定需要设定的电感阈值。本文选取注入高频测试脉冲频率为 10 kHz,其占空比为 0.2,最后通过计算得到电感阈值为 43.5 mH。

4 转子转速与位置估算

根据上述方法只要确定相邻位置检索脉冲信号之间机械角度差(7.5°)和转子转过各自位置检索信号所对应的时间,即可计算出所对应区间的转子的平均转速:

$$\bar{\omega}_n = \frac{7.5^\circ}{t_{n+1} - t_n} \quad (6)$$

式中: $\bar{\omega}_n$ 为第 n 个至第 $n+1$ 个位置检索脉冲所对应的第 n 个区间转子的平均转速; t_n 、 t_{n+1} 为第 n 和第 $n+1$ 个位置脉冲信号所对应的时间。

SRM 属于大惯性负载,因此转子在第 n 个区间旋转至第 $n+1$ 个区间可认定转速基本恒定,则可以用 $\bar{\omega}_n$ 估算出电机在第 $n+1$ 个区间时刻所对应的转子位置角度 $\theta_{n+1}(t)$:

$$\theta_{n+1}(t) = \theta_{n+1}(t_0) + \bar{\omega}_n(t - t_0) \quad (7)$$

式中: $\theta_{n+1}(t)$ 为第 $n+1$ 个区间任意时刻 t 的转子位置角度; $\theta_{n+1}(t_0)$ 为电机在第 $(n+1)$ 个区间起始时刻 t_0 的转子位置角度值。

5 电感不对称情况

上述方法对转子位置检测的关键之处是通过相邻位置信号脉冲信号时间差来计算转子转速,其中每个区间转速由于 SRM 三相电感相互对称,检测出来的转速相差较小。但是,当电机由于制造问题或外界因素干扰出现某一相电感曲线发生平移致使三相电感出现不对称情况时,如果仍通过相邻位置信号脉冲时间差估算出的速度计算转子位置,则会出现较大误差。因此,在电机正常运行时估算的转速设定速度界限,当电机出现电感不对称情况导致估算出的速度不在限定值范围内时,则使用正常阶段估算的转速,直至检测到的速

度恢复到限定速度界限之内。

6 仿真分析

为了验证所提无位置传感器控制方法的可行性,在 MATLAB/Simulink 环境下搭建系统仿真模型。参数设置如下:电机功率为 3 kW,母线电压为 120 V,非导通相脉冲注入频率为 10 kHz,占空比为 0.2,开通角 $\theta_{on} = 5^\circ$,关断角 $\theta_{off} = 18^\circ$ 。

为了证明电机运行在非磁路饱和状态下位置估算的准确性,导通相电流采用给定 7.5 A 电流进行电流斩波控制。图 4 为基于全周期电感与电感阈值电机运行在给定 7.5 A 下的电流、电感、电感交点脉冲、电感阈值脉冲、位置估算波形。其中,电感交点脉冲通过表 1 电感之间的逻辑即可得到(低电感区交点为上升沿,高电感区为下降沿)。而电感阈值脉冲的获取是将前文测好的电感阈值 43.5 mH 作为阈值限,当 L_A 、 L_B 、 L_C 三相电感 >43.5 mH 区域设置为高电平, <43.5 mH 区域设置为低电平,再将高电感区电感交点脉冲和电感阈值脉冲信号相“与”通过捕捉下降沿脉冲得到高电感区下降沿脉冲,结合低电感交点上升沿脉冲最终得到转子位置检索脉冲信号。对比仿真

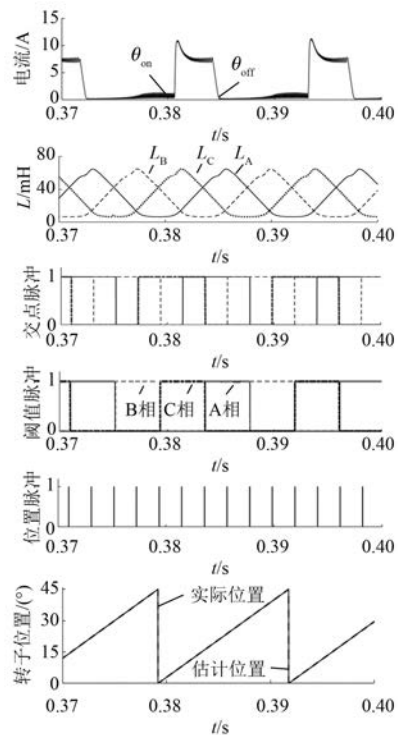


图 4 非磁路饱和和下位置估算仿真波形 ($i = 7.5 \text{ A}$, $n = 600 \text{ r/min}$)

结果可知,电机运行在非饱和状态时,估计的转子位置角度与实际位置信号相比误差在 0.3° 以内,验证了所提方法在非饱和工况下的可行性。

图 5 所示为磁路饱和工况下位置估算仿真。将给定相电流设置为 15 A ,电感阈值设定不变。由图 5 可以看出,电感曲线已发生畸变,高电感区交点向右偏移,已不能作为固定交点继续估计转子位置,此时直接将电感阈值脉冲信号的下降沿脉冲信号作为高电感区电感交点位置检索信号,再结合低电感区上升沿脉冲可得转子位置检索脉冲信号。由实际转子位置与估计转子位置对比可以看出,角度误差保持在 1.1° 以内,验证了所提方法在饱和工况下也能够很好地跟踪实际转子位置。

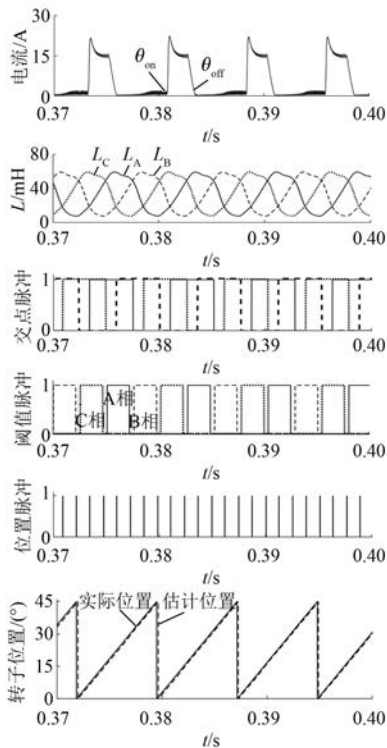


图 5 磁路饱和下位置估算仿真波形
($i = 15\text{ A}$, $n = 1000\text{ r/min}$)

图 6 所示为在 0.35 s 时给定速度由 600 r/min 变化到 1000 r/min 的位置和转速估计仿真结果图。由图 6 可以看出,在 0.35 s 转速调节后估计转速和位置出现抖振,但是经过 0.01 s 调节后又能够重新准确地跟踪实际值,验证了所提方法在动态工况下也能够准确地估计出转子位

置与转速。

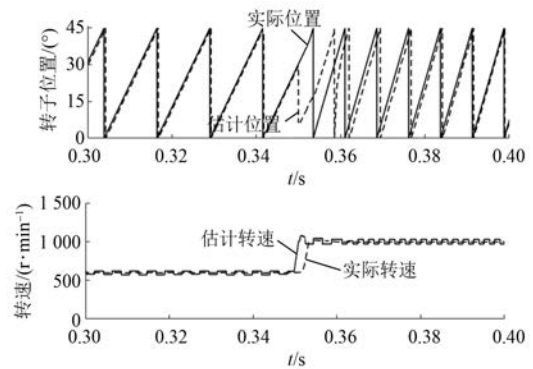


图 6 600 r/min 变化到 1000 r/min 的位置和转速估计

7 结 语

本文提出基于全周期电感相邻交点与电感阈值相结合的转子位置估计法,该方法在磁路不饱和时,将电感交点脉冲信号和电感阈值脉冲信号相“与”,提高了转子位置检索的精确度,而在磁路饱和时,将电感阈值信号直接作为位置检索信号,很好地解决了磁路饱和时相电感交点偏移造成的转子位置估算误差。该方法不需要增加任何的系统硬件,也避免了采用曲线拟合获取 $\theta-L$ 关系计算的复杂性。仿真结果验证了该方法的正确性和可行性。

【参考文献】

- [1] KRISHNAN R. Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2001: 6-7.
- [2] 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.
- [3] TRAKRANCHAROUNGSOOK K, KITTIRATSATCHA S. Position estimation technique of a switched reluctance motor at standstill [C] // 2007 Power Conversion Conference - Nagoya, 2007.
- [4] 蒯松岩, 赵帅, 张中, 等. 基于有限元分析的开关磁阻电机电感模型无位置传感器技术[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(2): 70.

(下转第 46 页)