

基于电流阈值的开关磁阻电机位置估计容错分析*

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. 中国矿业大学 电力与动力学院, 江苏 徐州 221116;
3. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 在基于双电流阈值的位置估计基础上, 提出了一种考虑电流传感器故障和估计误差补偿的位置估计容错技术。通过双电流阈值与脉冲电流峰值比较估计位置检索脉冲信号, 利用开关磁阻电机相与相之间的独立性, 利用正常相的电磁信息间接估计传感器故障相的转子位置信号。通过仿真计算得到转速对位置估计误差的影响, 并提出了位置误差补偿措施。在一台 12/8 结构样机中进行了相关试验, 试验结果表明, 所提方法提高了无位置传感器技术的容错性, 验证了该算法的正确性和可行性。

关键词: 开关磁阻电机; 无位置传感器; 故障容错; 误差补偿; 电流阈值

中图分类号: TM 352 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)05-0058-06

Fault Tolerant Analysis of Sensorless for Switched Reluctance Motor Based on the Current Threshold*

ZHANG Lei^{1,2}, LIU Chuang³

1. School of Electronic Engineering, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China;
2. School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
3. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A position estimation fault tolerant technology for switched reluctance motor (SRM) was proposed under the condition of the sensor fault and estimation error compensation based on the double current thresholds. In this method, the position index pulses were estimated by comparing the double current threshold value and the pulse current amplitude, and the speed and position could also be estimated by the position index pulses signals. Using the independence of the SRM between the phase and the phase, the positions of the sensor fault phase were estimated using the electromagnetic information of the normal phase. The influence of the speed on position estimation error was obtained by simulation, and put forward the position error compensation measures. The experiment was carried out in a 12/8 structure prototype, the experimental results showed that the method could improve the fault tolerance of the sensorless sensor technology, and verify the correctness and feasibility of the algorithm.

Key words: switched reluctance motor (SRM); sensorless; fault tolerance; error compensation; current threshold

* 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。

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。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、成本增大。在高温、振动等恶劣运行环境下, 位置传感器有失效可能性, 降低了系统的可靠性, 因此 SRM 无位置传感器技术受到国内外很多学者的关注。

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。该方法不需要设置电流阈值, 但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, 该方法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]提出了电流斜率差的 SRM 位置估计方法, 利用非导通相电流斜率差与相电感的关系估计转子的位置信号。该方法巧妙地避开了运动反电动势对响应电流的影响, 但在起动和零速附近无法保证转速估计的精度。文献[6]结合了相电流斜率过零和相电感斜率过零的特性, 通过检测斜率正负交变这一特性, 实现电机转子位置信号的检测, 优点是避免了开通角的影响, 提高了位置估计的容错性, 但是高精度的电感计算较为复杂。文献[7]针对有位置传感器的控制系统, 提出了通过检测各项位置信号的双边沿触发顺序以及相邻触发边沿之间的角度差来实现故障检

测, 并利用位置传感器信号之间的位置角度关系实现故障后的容错控制。文献[8]在文献[7]的基础上, 针对 SRM 无位置传感器控制系统, 提出基于全周期电感法位置估计算法, 并通过检测相电感斜率过零的位置检索脉冲位置信号边缘触发来诊断位置信号故障, 实现其位置估计容错特性。文献[9]通过分析 SRM 方波位置信号, 提出一种基于边沿时刻预测的位置信号故障诊断方法。该方法利用相邻 3 个边沿时刻预测第 4 个边沿时刻, 与实际边沿时刻进行对比来判断位置信号是否故障。

从上述文献可以看出, 这些方法都是直接或间接利用电机的电、磁等信号间接估算转子的位置, 但是当电机发生故障时, 无法得到正确的电、磁等信息, 最终会导致位置估计失败。

本文在电流阈值的基础上提出一种在传感器故障情况下的开关磁阻电机无位置传感器容错技术, 对故障相位置信号恢复进行了研究。由位置检索脉冲信号的检测估计电机转子转速和转子位置角, 通过仿真计算得到电机转速对位置估计误差的影响, 提出位置误差补偿措施。构建了试验平台, 试验验证了该位置估计容错方法的正确性和可行性。

1 脉冲电流包络线分区

SRM 电感曲线包含转子位置信号, 但其曲线是非线性周期变化的, 所以在 1 个电周期里不可能利用电感曲线来估算转子位置信号, 为此学者们都用过电感曲线分区来解决。本文在前人分区原则的基础上进行改进, 针对试验样机 12/8 结构的三相 SRM, 将电感最大和最小区域分别作为 1 个分区, 在 1 个分区里有一相电感为上升区, 一相电感为下降区, 而另一相电感不是在最大区域, 如图 1 所示。

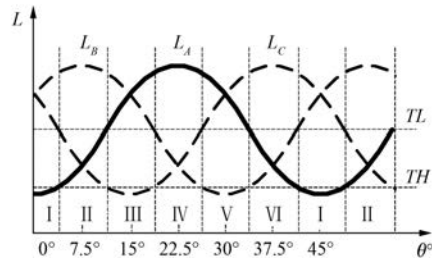


图 1 三相电感分区

在静止和低速状态,电磁饱和效应和绕组等效电阻压降可以忽略,因此在注入高频脉冲时,脉冲电流峰值与电感呈反比。图2为三相脉冲电流峰值包络线曲线波形,1个周期为6个分区。

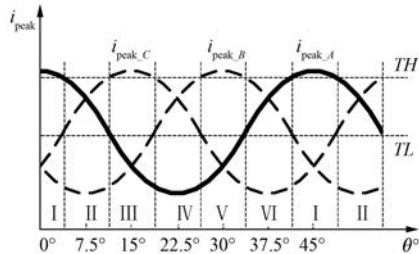


图2 脉冲电流包络线分区

各条分区线与三相脉冲电流峰包络线交点为分界点脉冲电流值,可以通过脉冲电流峰值与分界点脉冲电流峰值比较估计转子所在的分区及启动相。本试验选取如图2所示的两个分界点脉冲电流峰值作为高低电流阈值,分别为高电流阈值TH,低电流阈值TL。

2 位置估计策略

向非导通相电感下降的两个分区注入高频脉冲。位置估计策略的执行过程分两步:(1)初始位置判断,文献[10]已研究过;(2)根据初始相的估计结果,向估计相注入高频脉冲,采集脉冲电流幅值,并与高、低电流阈值比较,估计出换相导通信号和下一估计相的脉冲注入开始时刻。不妨以特例解释,当估计初始分区为IV时,C相为导通相,B相为估计相,如果B相脉冲电流峰值大于高电流阈值TH,则转子的当前分区为V,此时C相继续导通,B相停止脉冲注入,估计相由B相变为A相,即向A相注入高频脉冲;如果A相的脉冲电流峰值大于低电流阈值TL,则转子进入VI分区,此时关断C相,开通B相,而A相继续注入高频脉冲;当A相的脉冲电流峰值大于高电流阈值TH,则转子当前分区变为I,此时估计相由A相变为C相,停止A相注入高频脉冲,开始向C相注入高频脉冲,B相继续导通。如此循环判断,得到如表1所示的换相信号估计策略。

表1 换相信号的估计策略

分区	转子位置	估计相	导通相
I	$i_{C_peak} < TL, i_{A_peak} > TH$	B	C
II	$TL < i_{C_peak} < TH$	A	C
III	$i_{C_peak} > TH, i_{B_peak} > TL$	A	B
IV	$TL < i_{B_peak} < TH$	C	B
V	$i_{B_peak} > TH, i_{A_peak} < TL$	C	A
VI	$TL < i_{B_peak} < TH$	B	A

该位置估计算法的特点:换相信号由脉冲电流峰值与低电流阈值比较得到,脉冲注入信号由脉冲电流峰值与高电流阈值比较得到。脉冲电峰值最小和最大区域里不注入高频脉冲,不进行位置估计,不存在因脉冲电流幅值变化细微而影响微处理器处理的精度问题。

3 转速对位置估计的影响

本算法脉冲注入区间为电感下降区域的连续两个分区(电角度 $26.25^\circ \sim 41.25^\circ$),因为注入区间一定,所以随着转速提高,区间内的脉冲数减少。图3所示为注入的脉冲周期 $T=1e-4$ s,转速分别为400、800 r/min时, $26.25^\circ \sim 41.25^\circ$ 脉冲数电流波形仿真图。从仿真可看出,转速在800 r/min时,该区间的脉冲数比转速为400 r/min时少,电流传感器是在每个脉冲下降沿时刻采用一次脉冲电流峰值,因此随着转速提高,脉冲电流峰值采集数据减少,位置估计的精度会下降。

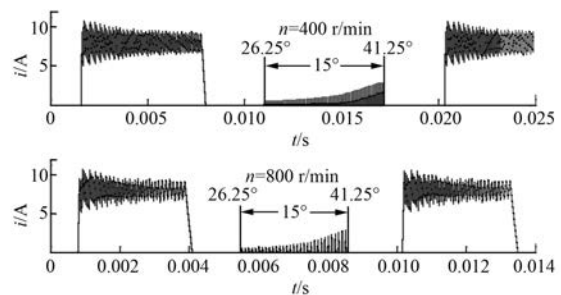


图3 脉冲电流波形

为此,需要对误差进行分析。图4所示为误差分析示意图。根据脉冲注入和双电流阈值的设置原则可知,每相 33.75° 位置为低电流阈值TL的位置, 26.25° 为开始注入高频脉冲位置,当脉冲电流的峰值大于 33.75° 位置的低电流阈值TL时进行换相,但实际过程中,采集到的脉冲电流峰值并

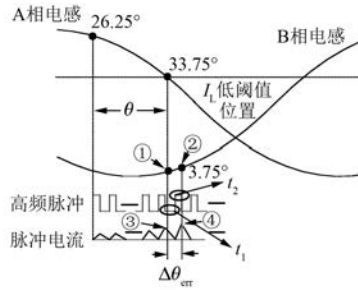


图4 误差分析示意图

非恰好在 33.75°位置,这样就产生估计误差。

根据位置估计算法的分析,由估计相 A 相判断出 B 相开通时刻应在图 4 中①处,即为 B 相的 3.75°位置,但实际采集到的脉冲电流峰值大于低电流阈值 T_L 的脉冲是在④处,从而估计出 B 相开通位置在②处,估计算法误认为②位置是 B 相的 3.75°。这样在控制系统中,每个判断点都会产生误差角度 $\Delta\theta_{err}$ 。

针对上述误差产生机理,可得电机转速 ω 和误差 $\Delta\theta_{err}$ 分别为

$$\theta = 6\omega \cdot T \cdot x \quad (1)$$

$$\Delta\theta_{err} = \omega \cdot (t_1 + t_2) \quad (2)$$

式中: $\theta = 7.5^\circ$;

T ——脉冲周期;

ω ——电机实时转速;

x ——7.5°之间的脉冲个数;

t_1 ——低电阈值位置 T_L 到下一个脉冲上升沿之间的时间;

t_2 ——脉冲电流高电平的时间。

假设电机转速 600 r/min、 $T = 1.0e-4$ s,通过上述计算得到此情况下 7.5°之间的脉冲个数为 20.8,此区间最后一个脉冲的脉冲峰值小于低电流阈值(图 4 中③),按照脉冲电流峰值大于低电流阈值换相原则,则换相位置应在图 4 中④处。此时误差 $\Delta\theta_{err}$ 通过计算可得:

$$\Delta\theta_{err} = \omega(t_1 + t_2) =$$

$$(0.2 + 0.15) \times 6 \times 600 \times 1.0e-4 = 0.126^\circ$$

为了减少位置估计的误差,在换相时刻应该补偿 0.126°。为了考虑算法的精度,根据上述的误差计算方法,计算出不同转速下的角度误差,如表 2 所示。存储在处理器的内存中,在实际控制系统中增加一个角度误差补偿环节,通过查表实

时调整位置角度。

表 2 不同转速下角度误差

转速/(r·min ⁻¹)	角度误差/(°)	转速/(r·min ⁻¹)	角度误差/(°)
50	0.009	600	0.126
100	0.009	700	0.227
300	0.088	800	0.216
400	0.216	900	0.146
500	0.045	1000	0.39

4 传感器故障分析

4.1 转速估算

根据表 2 的位置估计策略,通过脉冲电流峰值的比较,分别得到各相位置检索脉冲信号,如图 5 所示。

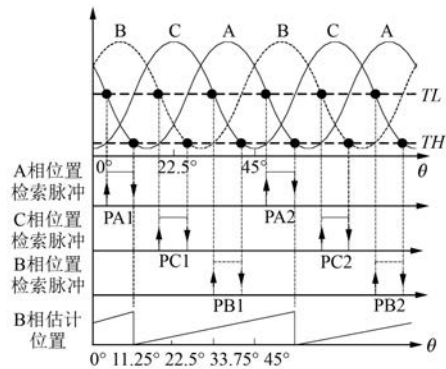


图5 检索脉冲信号

设每相相邻的电流阈值检索脉冲下降沿时间间隔为 Δt ,间隔角度为 $\Delta\theta$,则电机的转速 ω 为

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{60 \times \Delta\theta}{360 \times \Delta t} \quad (3)$$

估算的位置角度为

$$\theta(k+1) = \theta(k) + \omega\Delta T \quad (4)$$

式中: $\theta(k)$ ——上次采样时间估算的位置角;

$\theta(k+1)$ ——本次采样时间估算的位置角;

ΔT ——采样时间。

4.2 故障分析

如果是电流传感器发生故障,而不是缺相故障,因为功率开关管和绕组都正常,所以如果能够间接估计出故障相的位置信号,故障相仍具有驱动功能,电机仍能保持与无故障状态下一样的运行状态。本文采用通过正常相的位置检索脉冲信号估计故障相位置信号。下面根据电流传感器故

障类型不同进行具体分析。

(1) 一相传感器故障:假设 C 相电流传感器发生故障, A、B 相正常。系统无法得到 C 相的位置检索脉冲信号,从图 5 可以看出,正常相 B 相的位置检索脉冲上升沿对应故障相 C 相的 3.75° 位置,所以可以通过估计正常相 B 相的位置检索脉冲估计出 C 相 3.75° 特定位置信号,再利用式(3)、式(4)估算出 C 相的位置信号。

(2) 两相传感器故障:假设 A、C 两相电流传感器发生故障, B 相为正常相。由图 5 可以看出,正常相 B 相的位置检索脉冲上升沿不但对应故障相 C 相的 3.75° 位置,而且还对应故障相 A 相的 18.75° 位置,所以只需通过 B 相的位置检索脉冲信号即可估计出故障相 A、C 的 18.75° 和 3.75° 两个特定位置信号,再利用式(3)、式(4)估算出故障相 A、C 相的位置信号。

5 试验验证

5.1 试验系统平台

为了验证本文提出的位置估计方法的可行性,在 1 台 12/8 结构的 SRM 样机平台上进行了试验。试验平台如图 6 所示。

图 6 中,控制器采用 dSPACE1104 + CPLD。双电流阈值位置估计算法、故障类型判断、位置容错估计策略等都在 dsPACE1104 控制器中实现,无需增加额外的硬件资源,脉冲注入脉冲周期为 $1.0e-4$ s, 占空比为 38%。

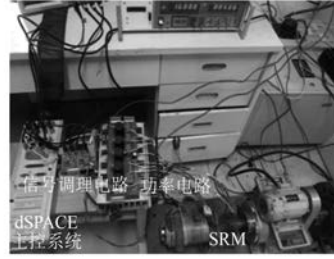


图 6 试验平台

5.2 试验分析

图 7(a) ~ 图 7(c) 分别为一相电流传感器发生故障下故障相位置估计容错过程试验波形。从波形可看出,在故障发生之前,故障相 3.75° 特定位置信号已由正常相的位置检索脉冲信号上升沿得到,因此以特定位置 3.75° 为起点,根据电机实时转速可计算出故障相的转子位置角。图 7(d) 所示为 A、C 两相电流传感器发生故障下故障相的位置估计容错过程试验波形。其中,故障相 C 相的位置估计与一相电流传感器发生故障估计方法一样,而故障相 A 相的 18.75° 特定位置信号由正常相 B 相的位置检索脉冲上升沿估计得到,所以以 A 相 18.75° 为起点通过电机转速同样能估计出故障相 A 相的位置信号。综合试验结果表明,所提的位置估计容错方案在电流传感器发生故障时仍能正确估计出三相位置信号,保证了电机正常运行,提高了无位置传感器的容错性能。

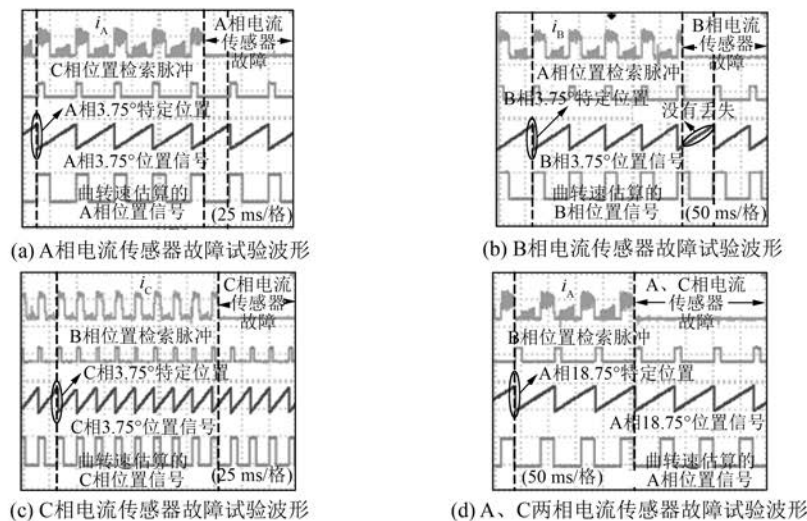


图 7 传感器故障位置估计容错试验

为了验证转速对电流阈值位置估计算法的影响,试验根据图 4 分析,对位置估计进行误差补偿。图 8 为转子转速 400 r/min 时,通过试验得到的有误差补偿环节和没有误差补偿环节下的位置估计误差比较图,其中虚线为增加了误差补偿环节,实线为没有误差补偿环节。由图 8 可以看出,增加了误差补偿环节,位置估计精度得到明显的提高。

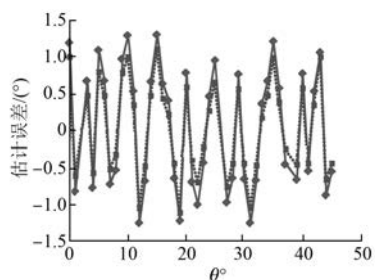


图 8 转速为 400 r/min 时误差比较图

6 结 语

(1) 与传统电感分区不同,本文电感分区以双电流阈值位置为基准,电感下降中连续两个分区设为位置估计区域,电感最大和最小区域不进行位置估计,这样就不会存在因为电感变化细微而导致位置估计精度不高的问题。

(2) 提出电机在传感器故障情况下的位置估计容错算法,并通过试验验证了该算法的正确性。

(3) 在电流阈值位置估计算法中,研究了转速对位置估计误差的影响,并采用了位置估计误差补偿的方法,提高了系统的精度和位置估计的容错性能。

【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,2011,26(9): 87-93.
- [6] 蔡骏,邓智泉.一种具有容错功能的开关磁阻电机无位置传感器控制方法[J].中国电机工程学报,2012,32(36): 109-116.
- [7] 许培林,邓智泉,陈小元,等.开关磁阻电机位置信号的故障检测与容错控制[J].中国电机工程学报,2011,31(33): 123-130.
- [8] CAI J, DENG Z Q, HU R G. Position signal faults diagnosis and control for switched reluctance motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(9): 1-11.
- [9] 胡荣光,邓智泉,蔡骏,等.一种开关磁阻电机位置信号故障诊断与容错控制方法[J].电工技术学报,2014,29(7): 104-113.
- [10] 张磊,刘闯,王云林,等.一种具有容错功能的开关磁阻电机初始位置估计方法[J].电工技术学报,2014,29(7): 123-132

收稿日期: 2017-11-06

(上接第 51 页)

- [10] 董伟杰,白晓民,宋晓辉,等.基于 PI 神经网络的三相四开关电力有源滤波器研究[J].中国电机工程学报,2014,34(24): 4068-4075.
- [11] FREIRE N M A, CARDOSO A J M. A Fault-tolerant direct controlled PMSG drive for wind energy conversion systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 61(2): 821-834.
- [12] 徐鹏,施火泉,刘会超.容错逆变器的三相四开关矢量控制策略[J].江南大学学报,2015,14(5): 601-605.
- [13] 黄传金,宋海军,陈铁军,等.三相四开关 APF 的

SVPWM 优化策略研究[J].电力电子技术,2012,46(8): 44-45.

- [14] ZENG Z, ZHU C. Adaptive suppression method for DC-link voltage offset in three-phase four-switch inverter-fed PMSM drives [J]. Electronics Letters, 2016, 52(17): 1442-1444.
- [15] 谭兴国,冯高明,王辉,等.兼顾有源滤波的三相四开关光伏并网逆变器[J].高电压技术,2014,40(11): 3590-3596.

收稿日期: 2017-10-20