

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.07.019

# 开关磁阻电机位置信号的容错控制研究

张 迁,任开春,秦 恺,蒋 侨,吴钊铭

(重庆通信学院 电力工程系,重庆 400035)

**摘要:**针对开关磁阻电机(SRM)位置信号可能出现的 8 种故障情况,对各故障可能产生的影响进行了分析,根据位置信号的脉冲时序及两路位置信号之间的相位关系,提出了有效的位置信号故障诊断与容错控制的方法;同时,在 DSP 实验平台上模拟了一路位置信号出现故障的情况,利用正常的一路位置信号实现了对故障信号的恢复与重构。研究表明,经容错控制后的 SRM 可在故障出现后继续保持正常运转,SRM 的性能得到了有效地提高。

**关键词:**开关磁阻电机;位置信号;故障诊断;容错控制

中图分类号:TH39;TP206+.3

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)07-0908-04

## Fault-tolerant control of switched reluctance motor position signal

ZHANG Qian, REN Kai-chun, QIN Kai, JIANG Qiao, WU Zhao-ming

(Department of Electrical Engineering, Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, China)

**Abstract:** Aiming at the eight type position faults of the switched reluctance motor (SRM), the affections of position faults were analyzed in detail, the methods were proposed for fault diagnosis and fault-tolerant control according to the sequence of position single and the relationship between two position singles. Fault-simulation of one position single was performed on the DSP experiment platform, the fault signal was recovered and reconstructed through the normal position signal. The experimental results show that the SRM could keep normal operation after fault-tolerant control during position malfunction, the performance of SRM is improved effectively.

**Key words:** switched reluctance motor(SRM); position single; fault diagnosis; fault-tolerant control

## 0 引 言

随着电力电子技术及控制技术的不断发展,开关磁阻电机(SRM)迎来了新的发展机遇。由于 SRM 具有结构简单、控制灵活、容错能力强等优点,而得到了广泛地应用,在军用以及民用领域均有一席之地<sup>[1-4]</sup>。然而,不论其应用于何种场合,SRM 控制系统的稳定性与容错能力都是必须考虑的重要问题。在一般的控制系统中,SRM 必须借助位置传感器检测转子位置信号,从而准确地实现换相功能<sup>[5]</sup>,当传感器出现故障时,SRM 控制系统将无法正常运转。

针对四相 8/6 极 SRM 稳态运行时可能存在的故障,笔者对位置信号故障检测与容错控制的方法进行研究,提出有效的容错控制方法,对提高控制系统的稳

定性具有重要的意义。

## 1 位置信号的故障分析

在传感器正常工作时通过 TMS320F28020/DSP 的 eCAP 端口捕获位置异或信号的上、下跳变沿,同时检测两路传感器的信号组合情况,可实现绕组的准确换相<sup>[6]</sup>。然而,当传感器出现故障时如继续按照正常情况下的信号进行换相判断,SRM 必然会出现故障,严重时可能损坏电机<sup>[7]</sup>。SRM 的位置信号与绕组换相时序如图 1 所示。

图 1 中, $S_1$ 、 $S_2$  分别为安装在定子盘上的两个位置传感器检测的位置信号,两传感器之间的夹角为  $75^\circ$ 。

当前通电相绕组典型的相电流波形如图 2 所示。忽略电机磁饱和与绕组等效电阻的影响<sup>[8]</sup>,各相绕组

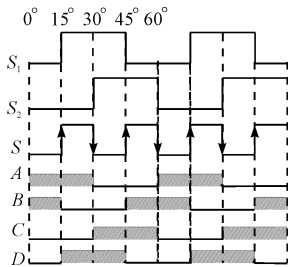


图1 传感器位置信号与绕组换相信号时序图

的端电压方程可表示为:

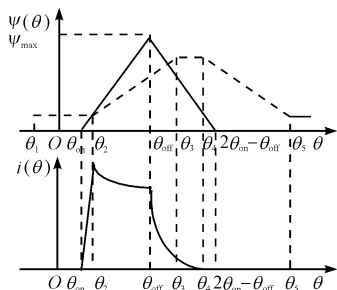


图2 典型相电流波形

$\theta_{on}$ —相绕组开通时刻对应的转子位置角,  $\theta_{off}$ —相绕组断电时刻对应的转子位置角。

$$\begin{cases} U_k = L(\theta)\omega \frac{di(\theta)}{d\theta} + i(\theta)\omega \frac{dL(\theta)}{d\theta} \\ \frac{U_k}{\omega} = \frac{d(i(\theta)L(\theta))}{d\theta} \end{cases} \quad (1)$$

忽略互感电流的影响<sup>[9]</sup>,当前开通相绕组的初始电流  $i(\theta_{on}) = 0$ ,通过对式(1)的求解可得绕组关断时的相电流为:

$$i(\theta_{off}) = \frac{U_k(\theta_{off} - \theta_{on})}{\omega L(\theta_{off})} \quad (2)$$

当  $\theta \geq \theta_{off}$  时,开关器件关断,绕组经续流二极管续流,此时的相电压方程为:

$$-U_k = L(\theta) \frac{di(\theta)}{dt} + i(\theta)\omega \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (3)$$

求解得到续流期间的绕组电流为:

$$i(\theta) = \frac{U_k}{\omega} \cdot \frac{(2\theta_{off} - \theta_{on} - \theta)}{L(\theta)} \quad (4)$$

以电机正转为例,两传感器的信号、异或信号及换相信号的时序图如图1所示。图1中的阴影部分代表当前通电相的通电区域,传感器  $S_1$ 、 $S_2$  输出信号之间存在  $15^\circ$  相位差,两信号之间存在4种高、低电平组合,以传感器  $S_2$  发生故障为例,正常情况下检测的信号时序与出现故障时的信号时序如图3所示。

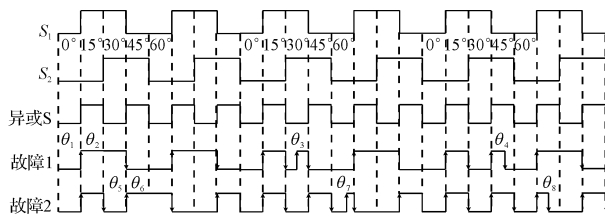


图3 信号故障时序对比图

$S_2$  出现故障的情况主要有两种,一种是在传感器为低电平时出现故障,另一种则是在高电平时出现故障。图3中,  $\theta_1 \sim \theta_8$  分别表示故障出现的位置,故障前后组合信号的时序如表1所示。

表1 故障前后组合位置信号时序

时序 故障位置	正常情况组合信号时序	故障情况组合信号时序
$\theta_1$ 、 $\theta_2$ 处发生故障	(01)→(00)→(10)→(11)→(01)→(00)	(01)→(00)→(10)→(00)→(10)→(00)
$\theta_3$ 处发生故障	(10)→(11)→(01)→(00)→(10)→(11)	(10)→(11)→(10)→(00)→(10)→(00)
$\theta_4$ 处发生故障	(10)→(11)→(01)→(00)→(10)→(11)	(10)→(11)→(01)→(00)→(10)→(00)
$\theta_5$ 、 $\theta_6$ 处发生故障	(11)→(01)→(00)→(10)→(11)→(01)	(11)→(01)→(11)→(01)→(11)→(01)
$\theta_7$ 处发生故障	(00)→(10)→(11)→(01)→(00)→(10)	(00)→(01)→(11)→(01)→(11)→(01)
$\theta_8$ 处发生故障	(00)→(10)→(11)→(01)→(00)→(10)	(00)→(10)→(11)→(11)→(01)→(11)

当SRM正常运转时,通过式(4)可知,选择合适的关断角使其满足  $\theta_{off} < \theta_3 + \theta_{on}/2$ ,可保证相绕组电流续流期间在相电达到最大区域之前降至0,在此期间的绕组续流作用产生正的转矩,当  $\theta_3 < \theta < \theta_4$  时,旋转电动势为0,如果此时绕组仍处于续流状态,绕组磁储能仅反馈给电源,此时电磁转矩为0,  $\theta > \theta_4$  时,绕组的续流作用将产生负的转矩,以A相绕组为例,假定SRM的各相绕组通电区间为  $(0^\circ, 30^\circ)$ ,结合图1、图3可知  $S_2$  产生下跳变沿时,A相绕组开通,在  $S_2$  产生上条边沿时,A相绕组关断,绕组进入续流阶段,如果此时  $S_2$

在  $\theta_1$  或  $\theta_2$  处发生故障,异或后的信号丢失了一个跳边沿,当下次跳边沿来临时位置为  $45^\circ$ ,此时通过检测两路传感器的信号得出的通电相为A相,即A相重新导通,但由于此时的相电感  $L(\theta)$  逐渐减小,根据式(4)可知,A相电流将迅速增加,对绕组和开关器件造成较大的冲击电流,同时产生较大的制动转矩,导致电机堵转,严重时将烧坏电机绕组或功率开关器件<sup>[10-11]</sup>。

## 2 位置信号容错控制

由于两路传感器信号之间存在  $15^\circ$  的相位差,当

一路传感器出现故障时,通过另一路检测到的信号可实现对故障信号的恢复重构。

以  $S_2$  发生故障为例:故障发生在  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  时,经前面分析得出了故障后的信号组合,在 SRM 稳定运行时,传感器检测到的相邻脉冲信号之间的宽度相同,在程序运行过程中对相邻跳变沿之间的宽度进行检测,同时比较前一时间与此刻的组合信号的顺序,可判断出故障出现的位置,两相邻跳变沿之间的宽度对应  $15^\circ$  转子极距角。正常情况下若上一触发中断中检测到的组合信号为(10),则下次触发中断中检测到的信号应为(11),故障时,(10)过后检测到的信号为(00),并且是在转子转过  $1/4$  转子极距角后才判断出信号出错。假定故障之前检测到的宽度为  $n_1$ ,信号组合为(10),而下次检测到的宽度大于  $n_1$  时,说明此时产生错误跳变,由于此时转子已转过  $1/4$  转子极距角,系统应判断此刻的信号组合是否为(01),若不是则强制将信号组合设为(01)执行相应操作。同时系统通过定时器定时  $15^\circ$ ,在定时器中断中检测此时的信号组合并与前一次的信号组合比较,若符合正常的顺序,则按正常情况处理,若不符合正常顺序,则强制将组合信号组合设为(11)后再执行相应操作。

故障发生在  $\theta_3$  时,正常情况下若上次触发中断中检测的信号为(11),则下次触发中断中检测到的信号应为(01)。故障时,(11)过后检测到的信号为(10),此时系统可立即判断出位置信号出现故障,在检测出故障时刻的这一触发沿,在触发中断中不执行任何程序,待下次中断时强制将信号组合设为(01)。同时系统通过定时器定  $15^\circ$ ,在定时器中断中检测此时的信号组合并与前一次的信号组合比较,若符合正常的顺序,则按正常情况处理,若不符合正常顺序,则强制将组合信号组合设为对应的组合信号后再执行相应操作。

故障发生在  $\theta_4$  时,正常情况下若上次触发中断中检测的信号为(10),则下次触发中断中检测到的信号应为(11),故障时,(10)过后检测到的信号为(00),并且是在转子转过  $3/4$  转子极距角后才判断出信号出错。与前面分析类似,当系统检测到的两跳变沿之间的宽度小于  $n_1$  时,可知此时为错误的跳变信号,在该信号触发的中断中只记录此刻的组合信号不执行其他任何程序。待下次中断到来,在该中断检测此时的组合信号并与前一时刻的信号比较,若符合正常顺序则按正常情况执行相应操作,若不符合则强制将组合信号设为正常值后再执行相应操作。同时系统通过定时器定时  $15^\circ$ ,在定时器中断中判断信号组合的顺序,若符合正常顺序,则按正常情况执行操作,若不符合则强制修正后再执行相应操作。

故障发生在  $\theta_5$ 、 $\theta_6$  时,正常情况下若上次触发中断中检测的信号为(01),则下次触发中断中检测到的信号应为(00)。故障时,(01)过后检测到的信号为(11),并且是在转子转过  $1/4$  转子极距角后才判断出信号出错。出现该故障的容错办法与故障发生在  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  时类似。

故障发生在  $\theta_7$  时,正常情况下若上次触发中断中检测的信号为(00),则下次触发中断中检测到的信号应为(10),故障时,(00)过后检测到的信号为(01),此时可立即判断出位置信号出现故障。出现该故障的容错办法与故障发生在  $\theta_3$  时类似。

故障发生在  $\theta_8$  时,正常情况下若上次触发中断中检测的信号为(01),则下次触发中断中检测到的信号应为(00),故障时,(01)过后检测到的信号为(11),并且是在转子转过  $3/4$  转子极距角后才判断出信号出错。出现该故障的容错办法与故障发生在  $\theta_4$  时类似。

### 3 实验结果分析

以位置传感器  $S_2$  发生故障为例,当传感器  $S_2$  发生低电平故障时,容错前、后的实验波形如图 4 所示。

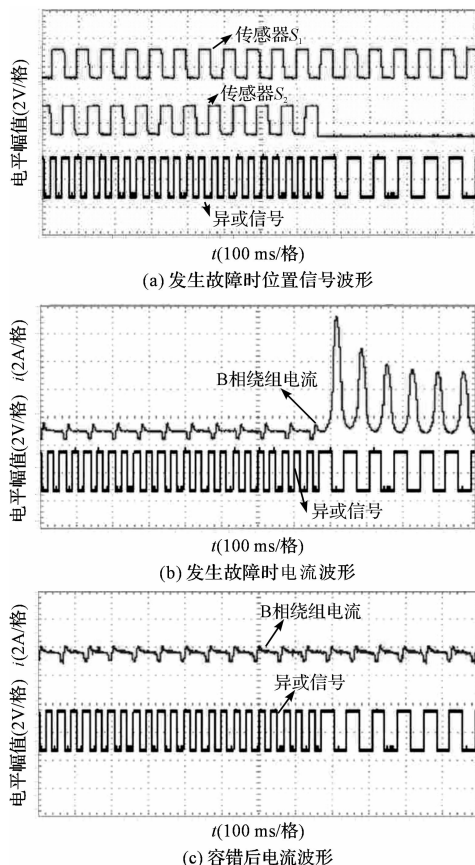


图 4 低电平故障容错前、后波形对比图

当  $S_2$  发生高电平故障时,容错前、后的实验波形如图 5 所示。

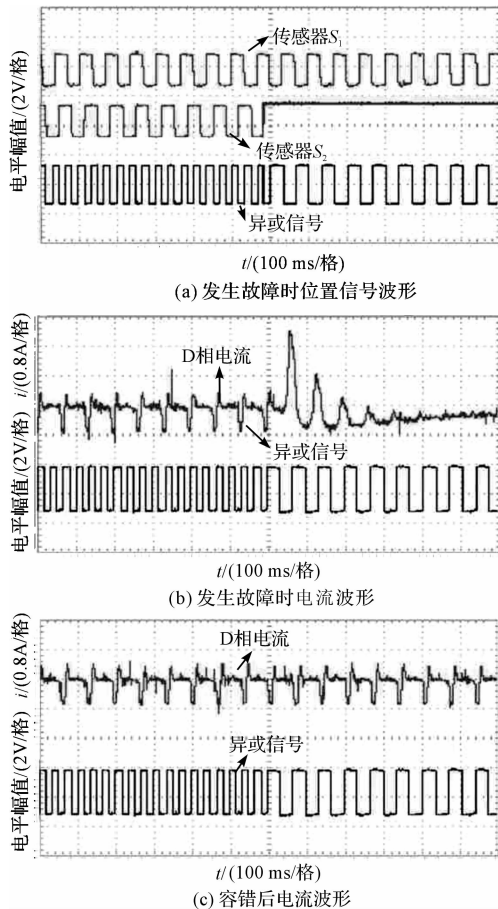


图5 高电平故障容错前、后波形对比图

$S_2$  发生低电平故障时的传感器  $S_1$  与  $S_2$  检测的位置信号及两路位置信号的异或信号如图 4(a) 所示。结合图 4(a)、4(b) 可知,故障发生前两个时刻的 eCAP 捕获中断中检测的信号组合为 00,根据前面的分析可知此时 B 相导通,在此之后的下一个捕获中断中检测的位置信号组合为 10,此时 A 相导通, $S_2$  出现故障时,捕获中断中检测的位置信号组合为 00,此时 B 相再次导通,此时电机的转子已经进入电感减小区域,电流迅速增加。经容错控制后的位置异或信号波形与相电流波形如图 4(c) 所示,从图 4(c) 中可以看出,容错后的 B 相电流波形保持不变。

$S_2$  发生高电平故障时的传感器  $S_1$  与  $S_2$  检测的位置信号及两路位置信号的异或信号如图 5(a) 所示。结合图 5(a)、5(b) 可知,故障发生前两个时刻的 eCAP 捕获中断中检测的信号组合为 11,根据前面的分析可知此时 D 相导通,在此之后的下一个捕获中断中检测

的位置信号组合为 01,此时 C 相导通, $S_2$  出现故障时,捕获中断中检测的位置信号组合为 11,此时 D 相再次导通,由于此时电机的转子已经进入电感减小区域,电流迅速增加。经容错控制后的位置异或信号波形与相电流波形如图 5(c) 所示,从图 5(c) 中可以看出,容错后的 D 相电流波形保持不变。

## 4 结束语

针对 SRM 位置传感器可能出现的 8 种故障情况,本研究对位置信号的故障诊断及容错控制进行了详细的分析,在 SRM 硬件平台上模拟了信号故障实验。实验结果表明,通过正常的一路信号实现了对故障信号的恢复与重构,故障发生后电机保持正常运转,SRM 控制系统的可靠性与稳性得到提高。

## 参考文献 (References):

- [1] 吴红星,嵇恒,倪天,等. 新型开关磁阻电机发展综述[J]. 微电机,2010,44(1):78-83.
- [2] KAMALAKANNAN C, KAMARAJ V, PARAMASIVAM S. Switched Reluctance Machine in Automotive Applications -A Technology Status Review[C]// Electrical Energy Systems (ICEES), 2011 1st International Conference on Newport Beach: [s. n.], 2011:187-197.
- [3] 陈小元,邓智泉,连广坤. 高容错性模块化定子开关磁阻电机[J]. 电机与控制学报,2010,14(6):8-12.
- [4] 王宏华. 开关型磁阻电动机调速控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [5] GOPALAKRISHNAN S, OMEKANDA A M, LEQUESNE B. Classification and Remediation of Electrical Faults in the Switched Reluctance Drive[J]. **IEEE Transaction on Industry Applications**, 2006,42(2):479-486.
- [6] 王晓明,王玲. 电动机的 DSP 控制[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2004.
- [7] 马长山,周波. 双凸极电机位置信号的故障诊断与容错控制[J]. 中国电机工程学报,2008,28(18):73-78
- [8] 邹东坡. 开关磁阻电机无位置传感器起动和低速算法的研究[D]. 南京:南京航空航天大学自动化学院,2012.
- [9] 王喜莲,王旭东. 开关磁阻电机角度最优控制[J]. 电机与控制学报,2006,10(6):588-590.
- [10] 吴红星. 开关磁阻电机系统理论与控制技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [11] 王洪诚,陈刚,王钰涵,等. 其于线性模型的开关磁阻电机控制系统[J]. 兵工自动化,2013,31(2):70-73.

[编辑:程浩]

## 本文引用格式:

张迁,任开春,秦恺,等. 开关磁阻电机位置信号的容错控制研究[J]. 机电工程,2014,31(7):908-911.

ZHANG Qian, REN Kai-chun, QIN Kai, et al. Fault-tolerant control of switched reluctance motor position signal[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(7):908-911.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>