

基于电流斜率的 SRM 功率变换器故障诊断

王熔基¹, 刘勇智², 管振水³

(1. 空军工程大学研究生院, 西安, 710051; 2. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038;
3. 93705 部队, 河北遵化, 064200)

摘要 功率变换器是开关磁阻电机调速系统重要部件之一,同时也是系统可靠性最弱的环节。针对传统功率变换器故障诊断方法通用性差、需增加额外硬件、无法进行开路器件定位等问题,以不对称半桥式功率变换器为研究对象,改进传统电流传感器安装位置,各相检测电流为绕组和上续流二极管电流之和,通过分析电流斜率在不同故障下的特点,提出一种基于电流斜率的诊断方案。该方案以逻辑信号、检测电流及其斜率为输入建立了故障变量的数学模型,通过模型输出值,即可对功率管开、短路故障进行快速定位,且各相诊断相互独立、不受电机相数及控制方式限制,通用性强;无需增加额外硬件,诊断功能丰富且控制器负担小。仿真和实验验证了方案的有效性。

关键词 功率变换器;开关磁阻电机;故障诊断;电流传感器;电流斜率;逻辑信号

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2020.05.005

中图分类号 V242.44 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2020)05-0029-07

A Fault Diagnosis of SRM Power Converter Based on Current Slope

WANG Rongji¹, LIU Yongzhi², GUAN Zhenshui³

(1. Graduate School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Aeronautical Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
3. Unit 93705, Zunhua 0642001, Hebei, China)

Abstract Aimed at the problems that the traditional power converter fault diagnosis method is poor in versatility, the additional hardware is needed, and the open-circuit devices fail in location, taking an asymmetric half-bridge power converter as the research object, the installation position of the traditional current sensor is improved, through analyzing the characteristics of the current slope under different faults, a diagnostic scheme based on the current slope is proposed. A mathematical model of fault variables is built up based on the input of logic signals, detection current and its slope taken as input by the scheme. Through the output value of the model, the open and short-circuit faults of the power tube can be quickly located, and the diagnosis of each phase is independent of the motor phase. The number and control method are limited, and the versatility is strong; no additional hardware is required, and the diagnosis function is rich and the controller has a small burden. The scheme is valid.

Key words power converter; switched reluctance motor; fault diagnosis; current sensor; current slope; logic signal

收稿日期: 2020-04-14

作者简介: 王熔基(1995—),男,河南沈丘人,硕士生,主要从事开关磁阻电机故障诊断研究。E-mail:785655786@qq.com

通信作者: 刘勇智(1972—),男,湖南娄底人,教授,主要从事航空电气工程研究。E-mail:liuyz_kj@163.com

引用格式: 王熔基, 刘勇智, 管振水. 基于电流斜率的 SRM 功率变换器故障诊断[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(5): 29-35.
WANG Rongji, LIU Yongzhi, GUAN Zhenshui. A Fault Diagnosis of SRM Power Converter Based on Current Slope[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(5): 29-35.

开关磁阻电机 (switched reluctance motor, SRM) 以其结构简单、适合高速运行和良好的容错性能等优势, 在电/混动汽车、多/全飞机以及家用电器等诸多领域得到了越来越广泛的关注^[1-3]。然而, 由于电机长时间在高温、高振动等恶劣环境下工作, 驱动系统可能发生多种故障^[4-5]。若不及时处理, 部分故障会蔓延到其他健康器件使得系统无法工作。尤其对于安全关键系统, 微小故障也会导致大量的人员、财产损失^[6]。

在 SRM 系统中, 功率变换器是为电机提供电能的核心枢纽, 同时也是故障率最高、可靠性最薄弱的环节^[7]。提高功率变换器的可靠性对于提升 SRM 系统容错性能具有重要意义, 而准确地识别故障类型以及对故障进行精准定位是进行容错控制的首要条件^[8]。因此, 对 SRM 功率变换器进行在线故障诊断很有必要。

目前功率变换器的故障诊断方法较多, 主要有频谱分析^[9-11]、小波包分析^[12]、电流电压分布^[13-16]以及驱动信号辅助判别^[17-19]等方法。目前, 对于同相开关管发生开路故障的准确定位, 一般认为故障相开路后该相停止工作, 在线故障定位的意义不大, 因此鲜有研究。但对于具有特殊容错拓扑结构的功率变换器而言, 如文献^[20], 准确的开路故障定位是进行在线容错、重构拓扑结构的先决条件。对于安全关键系统, 开路故障定位对系统及时更换故障器件、减少停机时间也很有意义。

1 ABS 功率变换器及其工作模式

ASB 功率变换器主电路的拓扑结构如图 1 所示。每相桥臂由 2 个开关管和 2 个续流二极管组成, ASB 结构保证了电机各相绕组可独立工作而不相互影响。每相绕组有 3 种工作状态: 励磁、续流及退磁, 分别如图 2 所示。

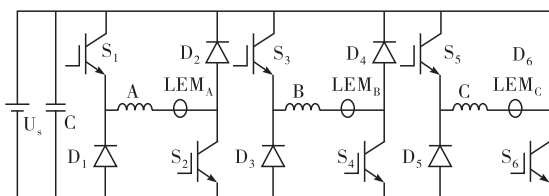


图 1 ASB 功率变换器拓扑结构

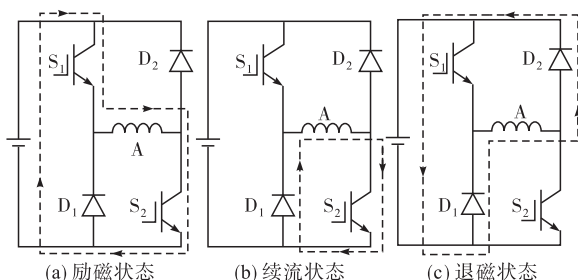


图 2 A 相工作状态

如图 2 所示, 当两开关管均闭合时, 绕组受正向电源电压作用, 进入励磁状态; 当 S_1 断开, S_2 闭合时, 绕组经 S_2 和 D_1 构成零电压续流回路, 进入续流状态; 当双管均关断时, 绕组承受反向电源电压作用, 相电流将迅速下降至抑制转矩脉动, 提高系统效率, 各相均使用软开关式斩波方式; 以 A 相为例, 导通区间内的 S_2 在位置信号控制下保持开通, S_1 受斩波信号调制, 以实现励磁状态和零电压续流状态的不断切换。可见两开关管是各相状态转换、保证各相正常工作的核心部件, 同时在高频工作状态下也极易发生损坏。

2 故障诊断方案

2.1 改进的电流传感器检测位置

准确的相电流检测是系统进行反馈控制的必要条件。传统的各相电流传感器的检测位置如图 3 (a) 所示。该检测方案不利于故障特征的提取以及定位, 尤其是对于开路故障的定位, 上下开关管开路时所检测到的故障电流完全相同。为了在保证不影响系统正常工作的前提下, 进一步提取明显的故障特征, 改进检测位置如图 3 (b) 所示。

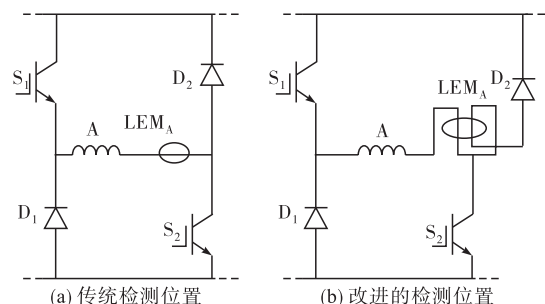


图 3 电流传感器检测位置

图中 LEM_A 为 A 相电流传感器, 在新的检测位置, 通过改变电流传感器中测量导线的绕线方向, 使得 A 相电流检测值 i_{am} 为 A 相绕组电流 i_a 和上续流二极管 D_2 电流 i_{D2} 之和, 即:

$$i_{am} = i_a + i_{D2} \quad (1)$$

开关管的逻辑信号定义为:

$$S_{Sk} = \begin{cases} 1 & \text{控制 } S_k \text{ 导通} \\ 0 & \text{控制 } S_k \text{ 关断} \end{cases} \quad k=1, 2, \dots, 6 \quad (2)$$

式中: S_{Sk} 为开关管 S_k 的逻辑信号。则 A 相电流检测值 i_{am} 可以写成:

$$i_{am} = (2 - S_{S2}) i_a \quad (3)$$

本文以实验室 550 W 三相 6/4 极开关磁阻样机为仿真对象, 设定各相开通角 $\theta_{on} = 0^\circ$, 关断角 $\theta_{off} = 29^\circ$, 参考转速 $n_{ref} = 500 \text{ r/min}$, 负载转矩 $T_{load} = 2 \text{ N} \cdot \text{m}$, 图 4 为重新配置各相电流传感器后, 功率变换器在

健康状态下的仿真结果,其中 n 为电机的实时转速,可知电机稳定后在参考转速下运行,证明了电流传感器配置方案的有效性。

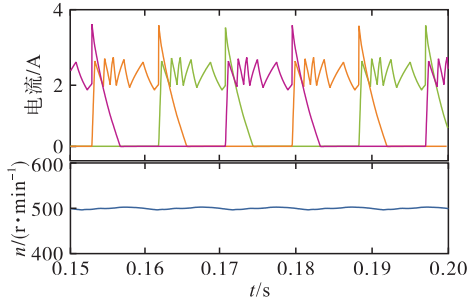


图4 电机正常工作仿真波形

图4中的电流尖峰是在各相关断瞬间,电流瞬间涌入上续流二极管,由式(5)可知,检测电流 i_{am} 瞬间变为2倍的 i_a 所导致。在导通区间内, D_2 中无电流, i_{am} 和相 i_a 相等,以 i_{am} 作为系统的反馈电流可保证系统的正常运行。

2.2 开关管开路故障

改变传感器检测位置后,位置导通管 S_2 在开通过程中发生开路故障的仿真波形如图5所示,“×”表示仿真设置的故障发生时刻。 S_2 开路瞬间, i_a 将立即在由 S_1 和 D_2 形成的回路中进行续流,电流涌入 D_2 后导致 i_{am} 提前跳变为2倍 i_a ,斜率 p 的尖峰出现在导通区间内, i_{am} 在反向旋转电动势作用下缓慢下降。进入关断区间后,在 S_{S2} 下降沿时刻,由于 D_2 中已有电流, i_{am} 不再发生瞬变, p 在该时刻并不出现尖峰,故障特征明显。

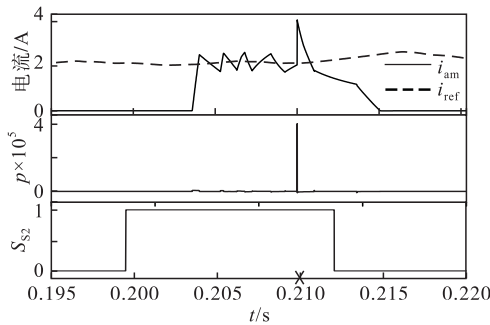


图5 S_2 开路故障仿真波形

斩波管 S_1 发生开路故障前后的仿真波形如图6所示。

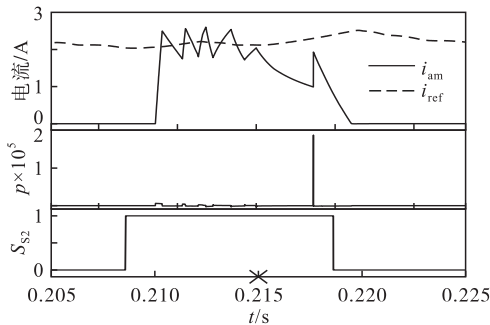


图6 S_1 开路故障仿真波形

S_1 开路瞬间, i_a 将在由 S_2 和 D_1 形成的回路中进行续流,并不流经 D_2 。因此导通区间内, i_{am} 和 i_a 保持一致,不发生跳变,斜率 p 不产生尖峰。进入关断区间后,在 S_{S2} 下降沿时刻, i_a 流向 D_2 , i_{am} 瞬间变为2倍 i_a , p 出现尖峰,和正常状态下相同。

为进一步提取故障特征,取变量 λ_1 为:

$$\lambda_1 = \frac{1}{2} [\text{sgn}(p - P_{\text{threshold}}) + 1] S_{S2} \quad (4)$$

式中: $\text{sgn}()$ 为符号函数; $P_{\text{threshold}}$ 为电流斜率阈值。

当且仅当 p 在导通区间内发生跳变时, λ_1 输出值为1,其他情况输出为0。由于跳变后的 λ_1 仅保持一个采样周期,表现为一个宽度为 T_s 的脉冲,因此为便于观测故障,将 λ_1 作为触发信号,当其输出为1时,触发 λ_1^* 恒为1,其余时刻 λ_1^* 为0,此触发规则记作 $\lambda_1^* = f_1(\lambda_1)$,触发示意图如图7所示。

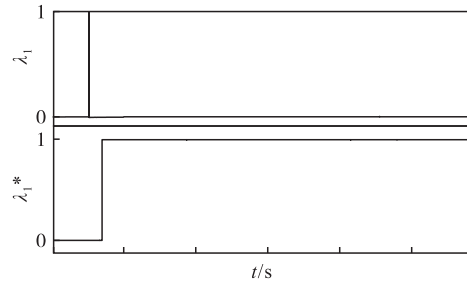


图7 λ_1^* 触发规则 f_1 示意图

2.3 开关管短路故障

图8是 S_1 短路前后的仿真波形。 S_1 短路后,在导通区间内, S_1 和 S_2 均处于导通状态, i_a 不受斩波控制的限制,在 U_s 的直接作用下迅速上升,大于参考电流。 S_{S1} 的下降沿时刻, i_a 流向 D_2 , 导致 i_{am} 发生跳变, p 出现尖峰。在关断区间, S_1 和 D_2 形成零电压续流回路,绕组在电感下降区受旋转电动势作用,导致 i_{am} 不断上升。就斜率 p 的尖峰出现的时刻而言, S_1 短路和系统正常状态下相同。

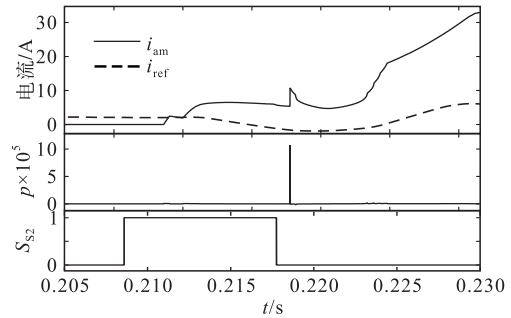


图8 S_1 短路故障仿真波形

S_2 发生短路前后的仿真波形如图9所示。

在导通区间内, S_1 仍受到斩波信号调制,相电流和健康状态保持一致,无故障特征。关断区间内,退磁通路将会被由 D_1 和 S_2 形成的续流回路所代替,无法实现快速退磁,且同样受到正向的旋转电动

势作用,导致 i_{am} 上升。由于关断区间内的零电压续流回路由 S_2 和 D_1 组成,始终无电流流经 D_2 ,因此, S_{S2} 下降沿时刻的 p 不会像正常工作时发生跳变。

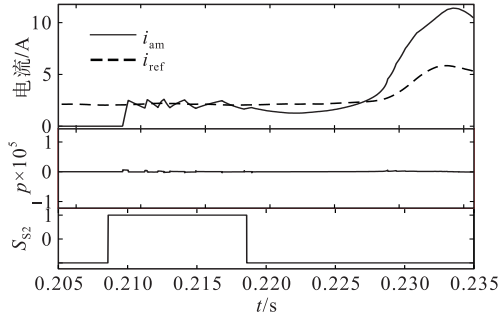


图9 S_2 短路故障仿真波形

为进一步提取故障特征,取变量 λ_2 为:

$$\lambda_2 = \frac{1}{2} [\text{sgn}(p - P_{\text{threshold}}) + 1] \cdot \overline{S_{S2}} \quad (5)$$

可知当且仅当 p 在关断区间内发生跳变时, λ_2 输出值为 1,其他情况输出为 0。因此 λ_2 在系统正常运行时表现为在 θ_{off} 时刻为 1,其余时刻为 0 的脉冲序列,脉冲宽度为 T_s 。为便于观测,以 λ_2 的上升沿和 S_{S2} 的上升沿作为触发信号,当 λ_2 上升沿到来时,触发变量 λ_2^* 保持为 1,当 S_{S2} 的上升沿到来时,触发 λ_2^* 保持为 0,记此触发规则为 $\lambda_2^* = f_2(\lambda_2, S_{S2})$,图 10 为其示意图:若 p 在关断时刻跳变,则 λ_2^* 在整个关断区间保持为 1,若未发生跳变,则始终保持为低电平。

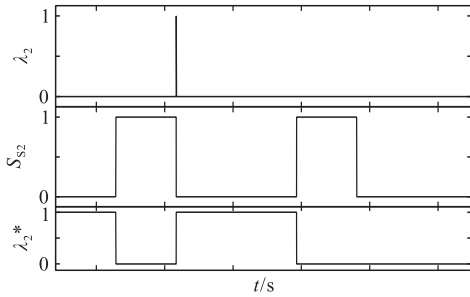


图10 λ_2^* 触发规则 f_2 示意图

2.4 故障特征建模

当开关管开路,相电流不可避免地下降为 0,故障相停止工作,因此开路故障的最明显故障特征为相电流在导通区间内为 0。因此,以 A 相为例,开路故障变量 F_{open} 可定义为:

$$F_{\text{open}} = [\text{sgn}(i_{am}) \oplus S_{S2}] S_{S2} \quad (6)$$

式中:“ $\oplus$ ”为异或运算,当且仅当 S_{S2} 为 1、 i_{am} 为 0 时, F_{open} 输出为 1,指示 A 相开路。再利用变量 λ_1^* 定位故障器件:当 $F_{\text{open}}=1$ 时,若 λ_1^* 也为 1,表示 i_{am} 曾在导通区间内发生跳变,A 相开路是由 S_2 开路导致;当 $F_{\text{open}}=1$ 时,若 λ_1^* 为 0,则表示 i_{am} 未曾在导通区间内发生跳变即衰减至 0,说明 A 相开路是由 S_1 开路导致。因此,对开路故障变量进行重新

定义为:

$$F_{\text{open}}^* = [\text{sgn}(i_{am}) \oplus S_{S2}] S_{S2} (\lambda_1^* + 1) \quad (7)$$

当且仅当 S_1 开路时, F_{open}^* 在 A 相导通区间内输出为 1,指示 S_1 发生了开路故障;当且仅当 S_2 开路时, F_{open}^* 在 A 相导通区间内输出为 2,指示 S_2 发生了开路故障。

由 SRM 运行原理可知,某一相的电流在其前一相的单独导通区间内必为 0,如在三相电机中,当 C 相单独导通时, i_a 必为 0。因此短路故障最明显的故障特征为故障相的电流在其前一相的单独导通区间内不为 0。以 A 相为例,短路故障变量 F_{short} 可定义为

$$F_{\text{short}} = \text{sgn}(i_{am}) S_{S6} \overline{S_{S2} S_{S4}} \quad (8)$$

当且仅当 i_{am} 大于 0、 S_{S6} 为 1、 S_{S2} 和 S_{S4} 均为 0 时, F_{short} 输出为 1,指示 A 相短路。再利用变量 λ_2^* 定位故障器件:当 $F_{\text{short}}=1$ 时,若 λ_2^* 也为 1,表示 i_{am} 在关断区间曾发生跳变,A 相短路是由 S_1 短路导致;当 $F_{\text{short}}=1$ 时,若 λ_2^* 为 0,则表示 i_{am} 未曾在关断区间内跳变,A 相开路是由 S_2 短路导致。因此,可对短路故障变量进行重新定义为:

$$F_{\text{short}}^* = \text{sgn}(i_{am}) S_{S6} \overline{S_{S2} S_{S4}} (\lambda_2^* - 2) \quad (9)$$

当且仅当 S_1 短路时, F_{short}^* 在 C 相单独导通区间内输出为 -1,指示 S_1 发生了短路故障;当且仅当 S_2 短路时, F_{short}^* 在 C 相单独导通区间内输出为 -2,指示 S_2 发生了短路故障。

综上分析,联立式(4)~(9)可得到故障变量 F 的数学模型为式(10)所示。通过故障变量 F 的输出即可判断故障类型并定位故障器件,对应关系见表 1。

表1 故障变量 F 与各故障器件的对应关系表

故障模式	S_1 开路	S_2 开路	S_1 短路	S_2 短路
故障变量 F	1	2	-1	-2

$$F = F_{\text{open}}^* + F_{\text{short}}^* = [\text{sgn}(i_{am}) \oplus S_{S2}] S_{S2} (\lambda_1^* + 1) + \text{sgn}(i_{am}) S_{S6} \overline{S_{S2} S_{S4}} (\lambda_2^* + 2) \quad (10)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \lambda_1^* = f_1(\lambda_1) \\ \lambda_2^* = f_2(\lambda_2, S_{S2}) \\ \lambda_1 = \frac{1}{2} [\text{sgn}(p - P_{\text{threshold}}) + 1] S_{S2} \\ \lambda_2 = \frac{1}{2} [\text{sgn}(p - P_{\text{threshold}}) + 1] \overline{S_{S2}} \\ P_{\text{threshold}} = 2 \frac{U_s}{L_{\text{min}}} \end{cases}$$

3 实验验证

3.1 实验平台介绍

本文利用一台额定功率为 550 W 的三相 6/4

结构的开关磁阻样机对所提方案进行实验验证。图11为实验装置结构框图,按照所提出的电流检测方案在指定位置安装了3个额定电流为100 A的LA-100P霍尔效应电流传感器,并采用16位的A/D转换芯片AD7606进行电流采样;为便于观测,检测电流、故障变量等输出信号使用TLC5615进行D/A转换;位置传感器采用分辨率为1 000脉冲/转的增量式旋转编码器E6B2-CWZ6C;控制系统以TMS320-F28335为核心并辅以必要的高速逻辑电路,外加驱动电路,以实现基于CCC系统的模糊PI转速闭环控制和故障诊断功能,控制系统框图如图12所示。ASB功率变换器中的主开关采用FQA160N08型的金属氧化物半导体场效应管,并通过外部继电器来人为控制各开关管的驱动信号,从而实现故障模拟。以电机定、转子不对齐位置的中点为各相转子位置的参考零点,并设定电机开通角 $\theta_{on}=0^\circ$,关断角 $\theta_{off}=28^\circ$ 。由于各相诊断方案相同且相互独立,实验以A相为例进行分析。

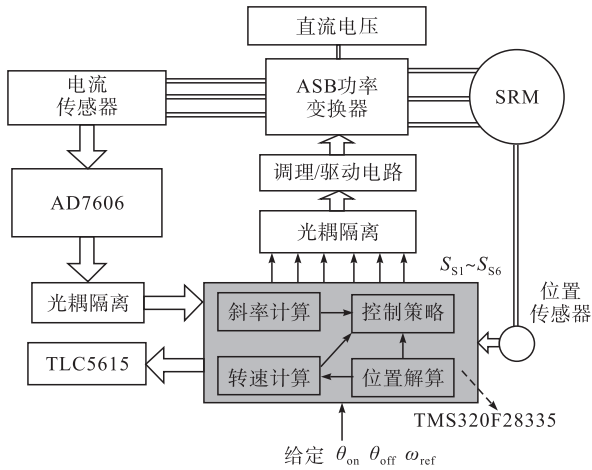


图11 实验结构框图

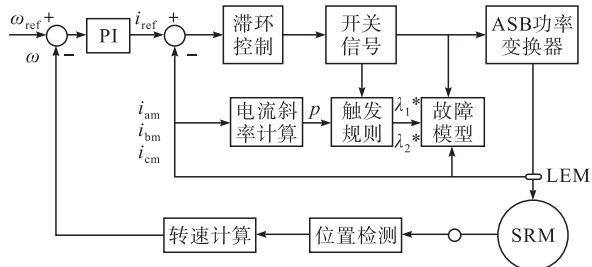


图12 控制系统框图

3.2 正常工作状态

电机的起动负载设置为 $2\text{ N}\cdot\text{m}$,起动转速设置为 500 r/min ,在正常工作状态下,三相解算电流波形及故障变量 F 如图13区域I所示。运行稳定后设置转速突变为 700 r/min ,电流变化如图13区域II所示。转速稳定后设置负载突变为 $4\text{ N}\cdot\text{m}$,电流变化如图13区域III所示。图13中电流波形

中的尖峰为各相关断瞬间检测电流瞬变为绕组电流的2倍导致,运行过程中故障变量 F 始终为0,可知其未因转速、负载突变干扰而发生误判,稳定性较好。

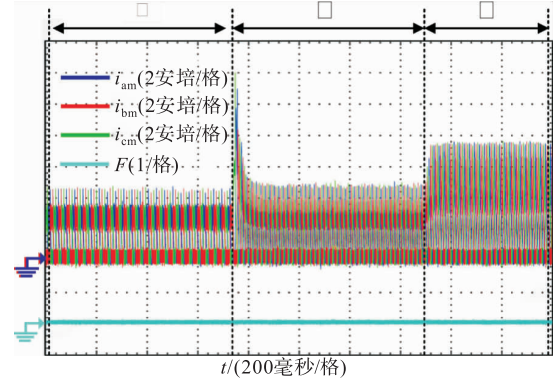
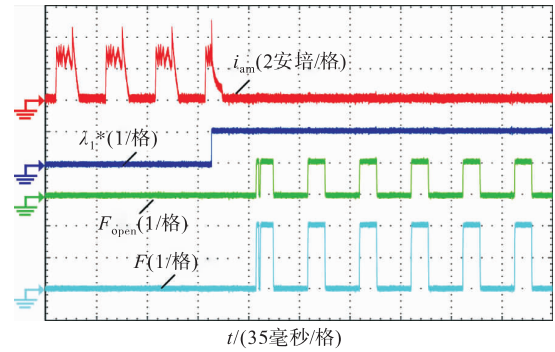


图13 正常运行时转速、负载突变实验波形

3.3 开关管开路故障实验

图14为开关管 S_2 发生开路前后的实验波形。未故障时, λ_1^* 始终为0,说明 i_{am} 仅在 θ_{off} 时刻跳变为2倍 i_a , p 的尖峰值仅在 S_{S2} 下降沿、而未在导通区间内产生。 S_2 在导通时发生开路瞬间, i_{am} 产生尖峰, λ_1^* 跃升至1,说明在故障后 i_a 涌入 D_2 中使得 i_{am} 翻倍, p 在导通区间内产生尖峰。 S_2 开路使得绕组无法励磁, i_{am} 始终为0, F_{open} 在故障后的导通区间内输出幅值为1的脉冲序列,指示A相开路,又由于 λ_1^* 始终保持为1,故障变量在导通区间内输出幅值为2的脉冲序列,指示 S_2 发生了开路故障,实验结果和理论分析保持一致。

图14 开关管 S_2 开路实验波形

开关管 S_1 发生开路前后的波形如图15所示。当 S_1 在导通区间内发生开路故障时, λ_1^* 始终保持为0,说明 p 的尖峰值未在导通区域内出现,即 i_{am} 未曾在导通区域内跳变为2倍 i_a , D_2 中没有电流流过。但 S_1 开路同样导致绕组无法励磁, F_{open} 在导通区域内输出为1,表现为幅值为1的脉冲序列,指示 i_a 在故障后始终为0,A相发生开路故障。又由于 λ_1^* 此时输出为0,故障变量 F 在A相导通区间内输出为幅值为1的脉冲序列,指示 S_1 开路,实验结果

证明了故障变量模型的正确性。

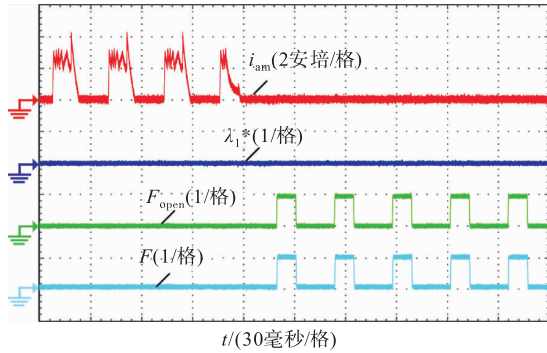


图 15 开关管 S_1 开路实验波形

3.4 开关管短路故障实验

图 16 为斩波管 S_1 短路故障前后的实验波形。不论 S_1 短路与否, λ_2^* 在 S_{S2} 上升沿触发为 0, 在 S_{S2} 下降沿处, 即 p 的尖峰处, 触发为 1。这是由于不论 S_1 是否发生短路故障, 导通区间的 D_2 中均没有电流而在关断瞬间内, 绕组电流涌入到 D_2 中, 使得 i_{am} 翻倍, p 产生尖峰。因此, 即使 S_1 短路, λ_2^* 在导通区间内输出为 0, 关断区间内为 1, 表现为幅值为 1 的脉冲序列, 证明了触发规则 f_2 的有效性。此外, F_{short} 输出幅值为 1 的脉冲序列, 表示 S_1 短路使得 i_{am} 在整个工作区间内始终不为 0, 指示 A 相发生了短路故障, 又因为 λ_2^* 在 A 相关断区间内为 1, 故障变量 F 输出为幅值为 -1 的脉冲序列, 指示 S_1 发生了短路故障。

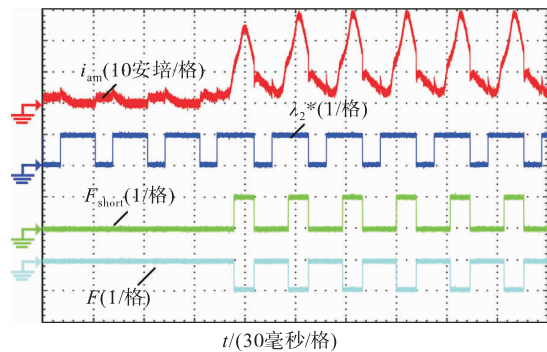


图 16 开关管 S_1 短路实验波形

图 17 为位置导通管 S_2 短路前后的实验波形。故障前, λ_2^* 在 S_{S2} 上升沿触发为 0, 在 S_{S2} 下降沿处, 即 p 的尖峰处, 触发为 1, 因此 λ_2^* 在 A 相导通区间内保持为 0, 在关断区间内保持为 1。故障后, λ_2^* 始终为 0, 这是由于 A 相在关断区间内的退磁通路被由 S_2 和 D_1 组成的零电压续流回路所代替, 无电流流经 D_2 , i_{am} 始终和 i_a 一致, 不会瞬间翻倍, p 不产生尖峰。此外, F_{short} 在故障后输出为 1 的脉冲序列, 表示 i_{am} 蔓延到了整个工作区间, 指示 A 相发生短路, 结合此时 λ_2^* 输出为 0, 故障变量在故障后输出幅值为 -1 的脉冲序列, 指示位置导通管 S_2 短路。

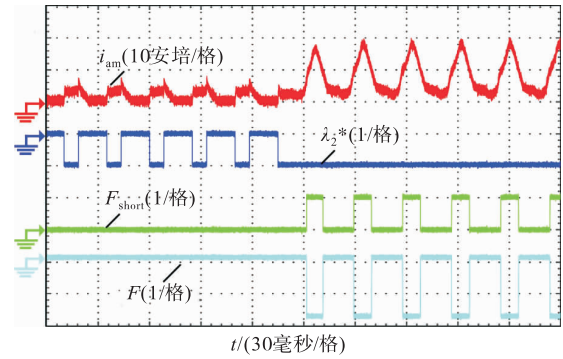


图 17 开关管 S_2 短路实验波形

实验结果表明, 改进的电流传感器检测位置可保证系统的正常工作, 且开关管 S_1 和 S_2 开路、短路故障特征明显, 实验结果与理论、仿真分析保持一致, 通过故障变量 F 指示即可判断 4 种故障类型。因选取电流瞬变时的斜率尖峰作为故障特征, 而外界负载转矩变化以及电机开通角度变化等因素均不会使电流发生瞬间跳变, 方案抗干扰性较强。

4 结语

1) 改进的电流传感器检测位置, 可保证系统的正常运行。

2) 方案对各相不同开关管开路、短路等 4 种故障均可进行类型识别和准确定位, 故障诊断功能丰富。

3) 由电流斜率和逻辑信号所决定的故障变量 F 对负载转矩和电机转速具有较好的鲁棒性。

参考文献

- [1] SUN X, SHEN Y, WANG S, et al. Core Losses Analysis of A Novel 16/10 Segmented Rotor Switched Reluctance BSG Motor for HEVs Using Nonlinear Lumped Parameter Equivalent Circuit Model [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23, (2): 747-757.
- [2] SONG S J, FANG G L, ZHANG Z H. Unsaturated-Inductance-Based Instantaneous Torque Online Estimation of Switched Reluctance Machine with Locally Linearized Energy Conversion Loop [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65, (8): 6109-6119.
- [3] CHIBA A, KIYOTA K, HOSHI N, et al. Development of A Rare-Earth-Free SR Motor with High Torque Density for Hybrid Vehicles [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30, (1): 175-182.
- [4] GAN C, SUN Q G, WU J H, et al. A Universal Two-Sensor Current Detection Scheme for Current

- Control of Multiphase Switched Reluctance Motor Switch Multiphase Excitation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(2): 1526-1539.
- [5] WANG D H, ZHANG D X, DU X F, et al. Thermal Identification, Model, and Experimental Validation of A Toroidally Wound Mover Linear-Switched Reluctance Machine[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(3): 1-5.
- [6] GAN C, CEHN Y, QU R H, et al. An Overview of Fault-Diagnosis and Fault-Tolerance Techniques for Switched Reluctance Machine Systems[J]. IEEE Access, 2019, 7: 174822-174838.
- [7] CHEN H, LU S L. Fault Diagnosis Digital Method for Power Transistors in Power Converters of Switched Reluctance Motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(2): 749-763.
- [8] GAN C, SUN Q G, WU J H, et al. MMC-Based SRM Drives with Decentralized Battery Energy Storage System for Hybrid Electric Vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 34(3): 2608-2621.
- [9] AHN J W, LUKMAN G F. Switched Reluctance Motor: Research Trends and Overview[J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2018, 2(4): 339-347.
- [10] GAN C, WU J H, YANG S Y, et al. Fault Diagnosis Scheme for Open-Circuit Faults in Switched Reluctance Motor Drives using Fast Fourier Transform Algorithm with Bus Current Detection[J]. IET Power Electronics, 2016, 9: 20-30.
- [11] BOGUSZ P, KORKOSZ M, PROKOP J. Current Harmonics Analysis as A Method of Electrical Faults Diagnostic in Switched Reluctance Motors[C]//2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives. Poland: IEEE, 2007: 426-431.
- [12] 甘醇, 吴建华, 杨仕友. 基于小波包能量分析的开关磁阻电机功率变换器故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(9): 1415-1422.
- [13] PENG W, GYSELINCK J J, AHN J W, et al. Minimal Current Sensing Strategy for Switched Reluctance Machine Control with Enhanced Fault-Detection Capability[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(4): 3725-3735.
- [14] GAN C, CHEN H, SHI X Q, et al. Phase Current Reconstruction Strategy for Switched Reluctance Machines with Fault-Tolerant Capability[J]. IET Electric Power Applications, 2017, 11(3): 399-411.
- [15] PEIX J, NIE S S, CHEN Y, et al. Open-Circuit Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Strategies for Full-Bridge DC-DC Converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(5): 2550-2565.
- [16] 肖岚, 李睿. 逆变器并联系统功率管开路故障诊断研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 99-104.
- [17] YANG W H, GOU B, LEI Y, et al. Short Switch Fault Diagnosis Method for Power Converter Using A Model-Based Approach in Switched Reluctance Motor Drives[J]. The Journal of Engineering, 2019(16): 2137-2141.
- [18] SHIN H U, LEE K B. Fault Diagnosis Method for Power Transistors in Switched Reluctance Machine Drive System[C]//2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia). Hefei: IEEE, 2016: 2481-2486.
- [19] HAN G Q, CHEN H, GUAN G R. Generalized Fault Diagnostic Method for Power Transistors in Asymmetric Half-Bridge Power Converter of SRM Drive[J]. IET Electric Power Applications, 2019, 13(2): 168-180.
- [20] SUN Q G, WU J H, GAN C, et al. Modular Full-Bridge Converter for Three-Phase Switched Reluctance Motors with Integrated Fault-Tolerance Capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(3): 2622-2634.

(编辑: 姚树峰)