

基于二次差分的永磁同步电机电流传感器故障诊断方法^{*}

张 晗¹, 徐 帅², 马光同², 姚春醒², 李国华²

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 611756;

2. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘 要: 针对永磁同步电机(PMSM)驱动系统中电流传感器的典型故障, 提出一种基于二次差分的电流传感器故障诊断方法。该方法通过判断电流残差与阈值的关系定位故障传感器, 通过计算电流传感器输出电流的二次差分 and 周期电流积分识别故障类型。该方法能够准确识别出电流传感器的四种典型故障类型, 为故障后的容错及维修提供准确信息, 且由于对电流残差进行了周期性重构, 增强了算法的鲁棒性。仿真和试验结果表明, 该方法能够准确定位并识别故障传感器, 且对参数不匹配及电流扰动具有较好的鲁棒性。

关键词: 永磁同步电机; 电流传感器; 二次差分; 故障诊断

中图分类号: TM341 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)04-0095-08

doi: 10.12177/emca.2021.203

Fault Diagnosis Method of Current Sensor for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Second-Order Difference^{*}

ZHANG Han¹, XU Shuai², MA Guangtong², YAO Chunxing², LI Guohua²

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Aiming at the typical faults of current sensors in permanent magnet synchronous motor (PMSM) drive system, a fault diagnosis method of current sensors based on the second-order difference is proposed. The fault sensor is located by judging the relationship between the current residual and the threshold, and the fault type is identified by calculating the second-order difference and periodic current integral of the output current. The proposed method can accurately identify four typical current sensor faults, providing accurate information for fault tolerance and maintenance. Meanwhile, the robustness of the algorithm is enhanced due to the periodic reconstruction of current residual. Simulation and experimental results show that the proposed method can locate and identify fault sensors accurately, and it is robust to parameter mismatches and current disturbances.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); current sensor; second-order difference; fault diagnosis

收稿日期: 2021-12-31; 收到修改稿日期: 2022-02-17

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(52107059); 中国博士后科学基金项目(2020M673282)

作者简介: 张 晗(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为永磁电机驱动、故障诊断。

徐 帅(1986—), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为电机驱动、故障诊断与容错控制。(通信作者)

马光同(1982—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为超导磁浮、直线电机和永磁电机。

0 引 言

永磁同步电机(PMSM)具有起动特性好、功率密度高、噪声低等优点,在航空航天、新能源汽车等领域得到了广泛应用^[1-2]。PMSM 矢量控制对电流具有较好的控制效果,且输出电压电流谐波较少^[3],但其实现必须要至少两个电流传感器对定子电流进行采集,且采集信号的准确性将会直接影响控制性能^[4]。

随着电机的长时间高速运行,将产生较大的电热应力和电磁干扰,易导致电流传感器的故障,故障类型大致可以归纳为断线故障、卡死故障、增益故障和偏置故障^[5]。因此,对电流传感器进行故障诊断也成为了国内外的一大研究热点^[6-8]。目前,应用于电流传感器故障诊断的方法可以根据其应用范围分为仅应用于特定故障模式的诊断方法和可应用于多种故障模式的诊断方法。

文献[9]定义三个诊断变量,利用两个不同相电流的平均归一化值来实现对传感器断线故障的诊断。文献[10]通过计算电流传感器输出信号的三次差分来实现故障诊断,该方法不仅可以应用于断线故障模式,还适用于卡死故障模式。文献[11]提出了一种基于输出相电压偏差特征的电流传感器故障诊断方法。文献[12]提出了一种基于滑模观测器的电流传感器故障诊断方法,该方法适用于偏置故障和增益故障模式。文献[13]提出利用相电流信号特征定义两个诊断变量,可实现卡死故障、增益故障和偏置故障三种模式的诊断。上述方法均只能在特定故障模式下实现诊断,具有一定的局限性。

在文献[14-15]中,作者利用被测相电流与估计相电流在一个周期内最大幅值之间的误差来检测和隔离故障传感器,可应用于四种典型故障模式。文献[16]提出了一种基于坐标变换的故障诊断方法,该方法通过判断静止坐标系及其旋转坐标系下的电流残差来实现电流传感器的故障诊断^[17]。上述方法虽然适用于四种典型故障模式,但不能对故障类型进行识别,不利于后续的容错控制和维修决策。

为解决上述问题,本文在传统基于坐标变换的故障诊断方法基础上,提出了一种基于二次差分的故障诊断算法。该方法通过计算传感器输出

电流的二次差分 and 周期电流积分可以准确识别出四种典型故障。同时,为了避免由电流测量误差和参数不匹配等造成的故障误诊断,定义了一个电流传感器的状态变化量,通过判断一个基波电流周期内故障次数是否超过阈值来实现故障电流传感器的定位,增强了诊断算法的抗扰性能。

1 电流传感器故障特征分析

1.1 PMSM 驱动系统数学模型

图1为基于三电平T型逆变器的PMSM驱动系统结构图,其直流母线侧串联两个容量相同的电容 C_{d1} 、 C_{d2} ,每相桥臂包含功率开关管 $T_{x1} \sim T_{x4}$ ($x=a,b,c$);逆变器a、b两相输出端各串联一个电流传感器,为控制系统提供准确的电流采样信号。通过控制逆变器的开关状态 $S_{x1} \sim S_{x4}$,输出端可产生正电平、零电平和负电平三种电压状态,如表1所示。

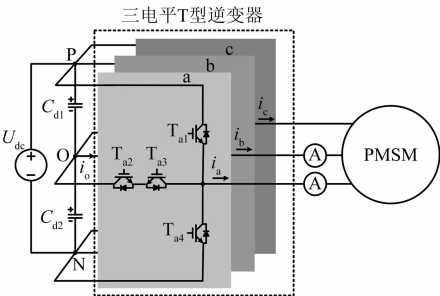


图1 基于三电平T型逆变器的PMSM驱动系统

表1 三电平T型逆变器开关状态和输出电压

S_{x1}	S_{x2}	S_{x3}	S_{x4}	输出端	
				状态	电压
1	1	0	0	正电平	$U_{dc}/2$
0	1	1	0	零电平	0
0	0	1	1	负电平	$-U_{dc}/2$

PMSM 在同步旋转坐标系下的电压方程为:

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \tag{1}$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e (L_d i_d + \psi_f) \tag{2}$$

式中: u_d 、 u_q 分别为 d 、 q 轴电压; i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴定子电流; L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴定子电感; R_s 为定子电阻; ω_e 为转子电角速度; ψ_f 为永磁体磁链。

PMSM 的电磁转矩方程表示为

$$T_e = \frac{3}{2} p i_q [i_d (L_d - L_q) + \psi_f] \quad (3)$$

式中: p 为电机极对数。

1.2 电流传感器故障建模

在正常运行模式下, a 相电流传感器输出电流 $i_{a,m}$ 表示为

$$i_{a,m} = I_m \cos(\omega_e t + \theta_0) \quad (4)$$

式中: I_m 为传感器正常状态下测量电流幅值; θ_0 为转子初始位置。

若 a 相电流传感器发生故障, 在四种典型故障模式下, a 相电流传感器输出的电流信号及其故障特征如表 2 所示。表 2 中, K 、 C_1 、 C_2 均为常数, 其中 K 表示电流增益系数; C_1 表示传感器发生卡死故障后输出的电流值; C_2 表示电流偏置系数。

表 2 四种典型故障下电流信号及其特征

故障类型	故障传感器输出信号	故障特征	
		波动性	半波对称性
断线故障	$i_{a,m} = 0$	改变	未改变
卡死故障	$i_{a,m} = C_1$	改变	改变
增益故障	$i_{a,m} = K I_m \cos(\omega_e t + \theta_0)$	未改变	未改变
偏置故障	$i_{a,m} = I_m \cos(\omega_e t + \theta_0) + C_2$	未改变	改变

1.3 电流传感器的故障影响分析

在正常运行模式下, 假定 d 、 q 轴电流分别为 $i_{d,ac}$ 、 $i_{q,ac}$, 四种典型故障模式下, d 、 q 轴电流测量值 $i_{d,m}$ 、 $i_{q,m}$ 分别表示如下。

(1) a 相电流传感器断线故障:

$$i_{d,m} = i_{d,ac} - \frac{2}{\sqrt{3}} \cos\left(\theta_e - \frac{\pi}{6}\right) I_m \cos(\omega_e t + \theta_0) \quad (5)$$

$$i_{q,m} = i_{q,ac} + \frac{2}{\sqrt{3}} \sin\left(\theta_e - \frac{\pi}{6}\right) I_m \cos(\omega_e t + \theta_0) \quad (6)$$

式中: θ_e 为转子位置。

(2) a 相电流传感器卡死故障:

$$i_{d,m} = i_{d,ac} - \frac{2}{\sqrt{3}} \cos\left(\theta_e - \frac{\pi}{6}\right) \times [I_m \cos(\omega_e t + \theta_0) - C_1] \quad (7)$$

$$i_{q,m} = i_{q,ac} + \frac{2}{\sqrt{3}} \sin\left(\theta_e - \frac{\pi}{6}\right) \times$$

$$[I_m \cos(\omega_e t + \theta_0) - C_1] \quad (8)$$

(3) a 相电流传感器增益故障:

$$i_{d,m} = i_{d,ac} - \frac{2}{\sqrt{3}} (1 - K) \cos\left(\theta_e - \frac{\pi}{6}\right) \times I_m \cos(\omega_e t + \theta_0) \quad (9)$$

$$i_{q,m} = i_{q,ac} + \frac{2}{\sqrt{3}} (1 - K) \sin\left(\theta_e - \frac{\pi}{6}\right) \times I_m \cos(\omega_e t + \theta_0) \quad (10)$$

(4) a 相电流传感器偏置故障:

$$i_{d,m} = i_{d,ac} + \frac{2}{\sqrt{3}} C_2 \cos\left(\theta_e - \frac{\pi}{6}\right) \quad (11)$$

$$i_{q,m} = i_{q,ac} - \frac{2}{\sqrt{3}} C_2 \sin\left(\theta_e - \frac{\pi}{6}\right) \quad (12)$$

由式(5)~式(12)可知, 当电流传感器发生故障后, d 、 q 轴电流中会增加交流分量, 仿真结果如图 2 所示。当电流传感器发生断线故障时, d 、 q 轴电流中会增加一个频率为正常相电流两倍频的交流分量, 如图 2 中故障模式 I 所示; 同样地, 当发生增益故障时, d 、 q 轴电流中也会增加一个频率为正常相电流两倍频的交流分量, 其幅值与增益系数有关, 如图 2 中故障模式 III 所示; 当发生偏置故障时, d 、 q 轴电流中将增加一个频率与正常相电流相同的交流分量, 如图 2 中故障模式 IV 所示; 当发生卡死故障时, d 、 q 轴电流中则会增加以上两种频率的交流分量, 如图 2 中故障模式 II 所示。

由 PMSM 的电磁转矩方程式(3)可知, d 、 q 轴电流的变化会引起转矩的波动。对于表贴式 PMSM, 由于 d 、 q 轴电感相同, 电磁转矩仅受到 q 轴电流变化的影响; 对于内置式 PMSM, 当 d 、 q 轴电感为 mH 级时, 转矩的变化主要受到 $\frac{3}{2} p i_q \psi_f$ 部分的影响, 其变化如图 2 所示。同时, 电流的波动还会引起控制性能的下降, 从而造成中性点电压失衡、速度波动较大等问题。

2 电流传感器的故障诊断

本文所提出的 PMSM 电流传感器故障诊断方法主要包含两部分: 电流传感器故障定位和故障类型识别, 如图 3 所示。

2.1 电流传感器故障定位

根据图 4 所示的 $\alpha\beta$ 坐标系和 $\alpha'\beta'$ 坐标系与 abc 坐标系位置关系, 利用坐标变换可得到 $\alpha\beta$ 坐

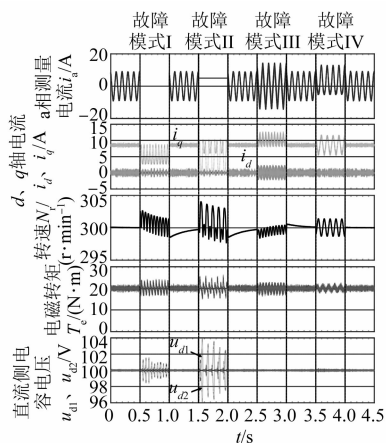


图2 电流传感器四种典型故障下的仿真结果

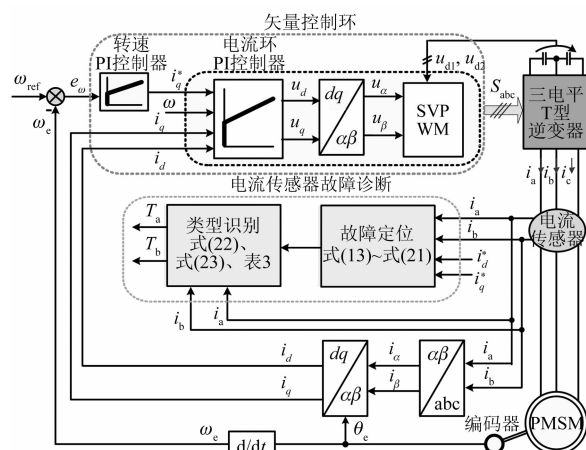


图3 永磁同步电机电流传感器故障诊断方法框图

标系和 $\alpha'\beta'$ 坐标系下的测量电流和参考电流分量:

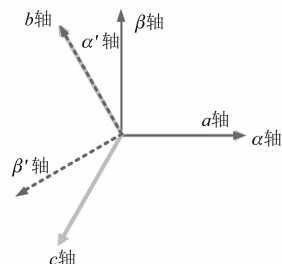
$$\begin{bmatrix} i_{\alpha,a} \\ i_{\beta,b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{2\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha',a} \\ i_{\beta',b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{2\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha,a}^* \\ i_{\beta,b}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & -\sin \theta_e \\ \sin \theta_e & -\cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha',a}^* \\ i_{\beta',b}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: i_a, i_b 分别为 a、b 两相传感器测量电流值; $i_{\alpha,a}, i_{\beta,b}$ 分别为测量电流在 α 轴和 β 轴的电流分量; $i_{\alpha',a}, i_{\beta',b}$ 分别为测量电流在 α' 轴和 β' 轴的电流分量; i_d^*, i_q^* 分别为 d、q 轴电流参考值; $i_{\alpha,a}^*, i_{\beta,b}^*$ 分别为参考电流在 α 轴和 β 轴的电流分量; $i_{\alpha',a}^*, i_{\beta',b}^*$ 分别为参考电流在 α' 轴和 β' 轴的电流分量。

图4 $\alpha\beta$ 坐标系和 $\alpha'\beta'$ 坐标系与 abc 坐标系位置关系

$i_{\alpha,a}$ 仅受到 a 相电流传感器输出电流 i_a 的影响,因此可利用 $i_{\alpha,a}$ 对 a 相电流传感器进行故障定位;同理可利用 $i_{\alpha',a}$ 进行 b 相电流传感器的故障定位。

为实现故障检测,计算电流残差,如式(17)所示。若 x 相电流传感器发生故障, ε_x ($x=a, b$) 值将大于预定义的阈值 ε , 否则 ε_x 将小于 ε 。 ε_x 定义如下:

$$\begin{cases} \varepsilon_a = |i_{\alpha,a} - i_{\alpha,a}^*| \\ \varepsilon_b = |i_{\alpha',a} - i_{\alpha',a}^*| \end{cases} \quad (17)$$

为了增强诊断算法的鲁棒性,定义一个电流传感器的状态变化量 $M_x(k)$, 其表达式如下:

$$M_x(k) = \begin{cases} 0, & \varepsilon_x < \varepsilon \\ 1, & \varepsilon_x \geq \varepsilon \end{cases} \quad (18)$$

$$M_x = \sum_{k=1}^N M_x(k) \quad (19)$$

式中:0 表示当前时刻电流残差小于阈值 ε , 1 表示当前时刻电流残差大于阈值 ε ; N 表示一个相电流基波周期内采样点的个数,由相电流基波周期 T 和采样周期 T_s 决定。

采样点个数 N 与相电流基波周期 T 如下:

$$N = \frac{T}{T_s} \quad (20)$$

$$T = \frac{60}{N_r p} \quad (21)$$

式中: N_r 为电机转速。

通过计算一个基波电流周期内故障次数 M_x ,

并将 M_x 的值与故障次数阈值 M_{th} 进行比较来定位故障电流传感器,可减少电流扰动以及参数不匹配产生的误诊断问题。电流传感器故障定位算法流程如图 5 所示。首先,计算 α 轴和 α' 轴上的测量电流 ($i_{\alpha,a}$ 、 $i_{\alpha',a}$) 和参考电流 ($i_{\alpha,a}^*$ 、 $i_{\alpha',a}^*$),并计算相应的电流残差。接着,计算一个基波电流周期内 N 个采样点的故障次数 M_x 。最后,将故障次数 M_x 与阈值 M_{th} 相比较,若 $M_x \geq M_{th}$,则 x 相电流传感器发生故障;若 $M_x < M_{th}$,则 x 相电流传感器无故障。

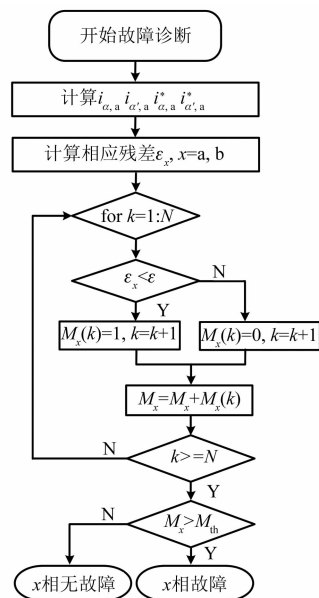


图 5 故障电流传感器定位算法流程图

2.2 电流传感器故障类型识别

根据表 2 所示电流传感器在四种典型故障下输出电流信号的特征,定义两个状态变量 $\Delta_{i_x}^2(k)$ 和 S_{i_x} 。 $\Delta_{i_x}^2(k)$ 为传感器输出电流的二次差分,当其值等于 0 时,表示输出电流为定值,不具有波动性。 S_{i_x} 为一个相电流基波周期内的电流积分,其值小于阈值 S_{th} 时,表示输出电流具有半波对称性。

$$\Delta_{i_x}^2(k) = i_x(k) - 2i_x(k-1) + i_x(k-2) \tag{22}$$

$$S_{i_x} = \left| \int_t^{t+T} i_x(t) dt \right| \tag{23}$$

式中: $i_x(k)$ 、 $i_x(k-1)$ 和 $i_x(k-2)$ 分别代表 x 相电流传感器在 k 、 $k-1$ 和 $k-2$ 采样点的电流值。

当 $\Delta_{i_x}^2(k) = 0$, 且 $S_{i_x} < S_{th}$ 时,表示故障传感器

输出电流具有半波对称性但不具有波动性,则故障类型为断线故障;当 $\Delta_{i_x}^2(k) = 0$, 且 $S_{i_x} \geq S_{th}$ 时,表示故障传感器输出电流既不具有半波对称性也不具有波动性,则故障类型为卡死故障;当 $\Delta_{i_x}^2(k) \neq 0$, 且 $S_{i_x} < S_{th}$ 时,表示故障传感器输出电流既具有半波对称性也具有波动性,则故障类型为增益故障;当 $\Delta_{i_x}^2(k) \neq 0$, 且 $S_{i_x} \geq S_{th}$ 时,表示故障传感器输出电流不具有半波对称性但具有波动性,则故障类型为偏置故障。故障类型识别方法原理如图 6 所示,基于差分算子的电流传感故障诊断结果如表 3 所示。

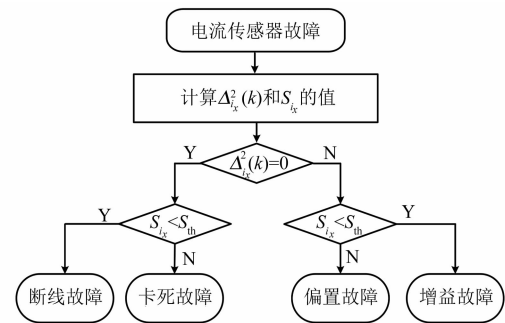


图 6 电流传感器故障类型识别算法流程图

表 3 基于差分算子的电流传感器故障类型识别结果

$M_x < M_{th}$	$\Delta_{i_x}^2(k) = 0$	$S_{i_x} < S_{th}$	故障类型	故障代码 T_x
否	—	—	无故障	0
是	是	是	断线故障	1
是	是	否	卡死故障	2
是	否	是	增益故障	3
是	否	否	偏置故障	4

3 仿真结果

为验证所提出的故障诊断算法的有效性,在 MATLAB/Simulink 环境下建立了 PMSM 驱动系统仿真模型,分别在电流扰动和参数不匹配下进行了仿真验证。PMSM 参数如表 4 所示。PMSM 运行于 300 r/min 参考转速和 20 N·m 的负载工况下。电流残差阈值 ε 、半波对称性阈值 S_{th} 和故障次数阈值 M_{th} 分别被设置为 1 A、0.04 和 200。

图 7 为故障诊断算法对电流扰动鲁棒性测试仿真结果。在传统的基于坐标变换的算法中,电流残差阈值被设置为 1.5 A,本文改进后的诊断方法中阈值被设置为 1 A。由图 7 可以看出,当 $t =$

0.5 s 时,电流突发扰动,传统算法出现了误诊断,而采用本文改进的诊断算法,故障标志未使能,仍保持正常状态。

表 4 PMSM 参数

参数名称	参数值
额定功率 P/kW	11
定子电阻 R_s/Ω	0.383
d 轴电感 L_d/mH	14.6
q 轴电感 L_q/mH	20.5
极对数 p	2
永磁体磁链 ψ_f/Wb	0.827
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.094
额定转矩 $T_{\text{Load}}/(\text{N}\cdot\text{m})$	70

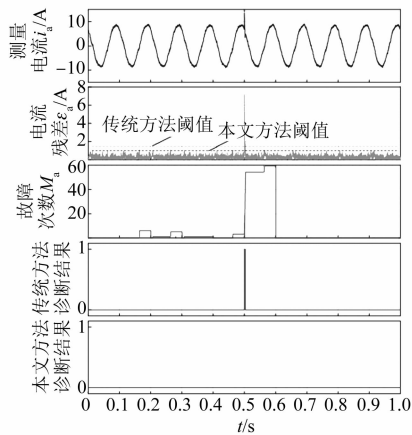


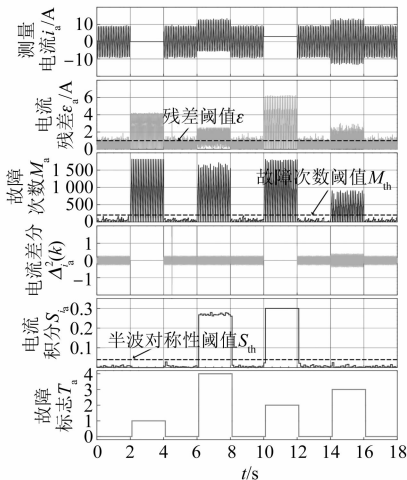
图 7 电流扰动鲁棒性仿真验证结果

图 8 为故障诊断方法对阻感参数鲁棒性验证仿真波形。在图 8(a) 仿真中,将 d 、 q 轴电感参数设置为 $L_{d0}=0.5L_d, L_{q0}=0.5L_q, L_d、L_q$ 为电机实际电感参数;在图 8(b) 仿真中,将电阻参数设置为 $R_{s0}=0.5R_s, R_s$ 为电机实际电阻参数。

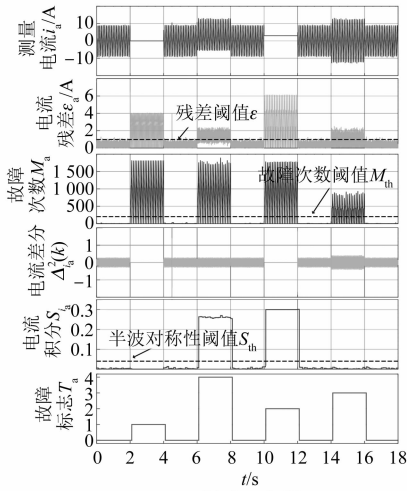
从图 8 中可以看出,当阻感参数不匹配时,在正常状态下电流残差在部分采样点超过阈值,但一个电流基波周期内故障次数并未超过故障次数阈值,因此未发生误诊断现象。在故障发生后,故障标志使能,准确定位并识别故障类型;故障恢复后,故障标志能够迅速恢复,使系统恢复到正常状态。

4 试验结果

为进一步验证本文提出的故障诊断方法的可行



(a) $L_{d0}=0.5L_d, L_{q0}=0.5L_q$



(b) $R_{s0}=0.5R_s$

图 8 阻感参数鲁棒性验证仿真

行性,搭建了基于 dSPACE 的 PMSM 驱动系统试验平台,如图 9 所示。通过编译 Simulink 程序,生成 dSPACE 可识别的代码,对 PMSM 驱动系统进

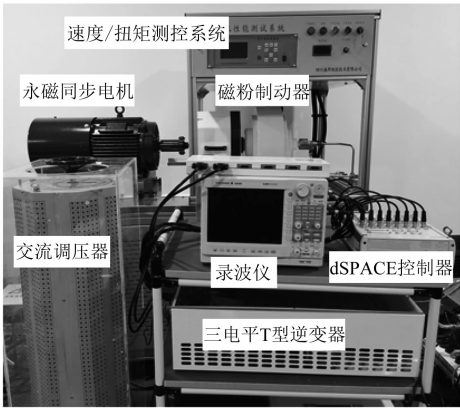


图 9 试验平台

行实时控制。三电平 T 型逆变器的直流母线电压 $U_{dc} = 250 \text{ V}$, 控制系统采样频率 $f_s = 20 \text{ kHz}$ 。PMSM 参数与仿真一致, 且同样运行于 300 r/min 参考转速和 $20 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的负载工况下。

图 10~图 13 分别为针对电流传感器四种典型故障, 采用基于二次差分的电流传感器故障诊断方法试验结果。电流残差阈值 ε 、半波对称性阈值 S_{th} 和故障次数阈值 M_{th} 分别设置为 1 A 、 0.04 和 200 。图中各试验结果的读数为: a 相电流 i_a , 10 A/格 ; 电流残差, 2 A/格 ; 故障次数, $500/\text{格}$; 电流的二次差分, $2/\text{格}$; 电流积分, $0.1/\text{格}$; 故障标志信号 T_a , $2/\text{格}$ 。

图 10 为 a 相电流传感器发生断线故障的试验波形。从图中可以看出, 断线故障发生后, 电流残差大幅增加, 并在一个周期内大部分采样点超过阈值; 故障次数在一个周期内不断增加(由于示波器可显示最大幅值的限制, 故障次数达到 $1\,000$ 后虽继续增加, 但其仍显示为 $1\,000$)。在一个相电流基波周期结束时, 故障次数超过其阈值 M_{th} , 电流积分小于半波对称性阈值 S_{th} , 并且电流的二次差分保持为 0 。根据表 3 可知, a 相电流传感器发生断线故障, 此时故障标志为 1 , 与理论分析一致。

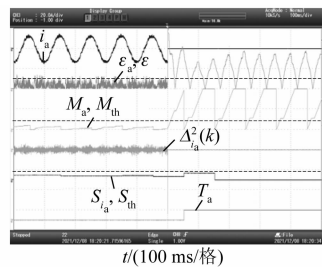


图 10 a 相电流传感器断线故障试验结果

图 11 为 a 相电流传感器在发生卡死故障前后的试验波形。从图 11 中可以看出, 卡死故障发生后, 电流残差 ε_a 、一个电流基波周期内的故障次数 M_a 、电流的二次差分 $\Delta i_a^2(k)$ 、电流积分 S_{i_a} 和故障标志信号 T_a 波形变化与理论分析一致。

图 12 为 a 相电流传感器在发生增益故障前后的试验波形。a 相电流传感器发生增益故障后, 电流残差超过阈值; 故障次数在一个周期内不断增加并超过阈值 M_{th} ; 电流积分仍小于阈值 S_{th} ; 与断线故障不同的是, 电流的二次差分仍保持波

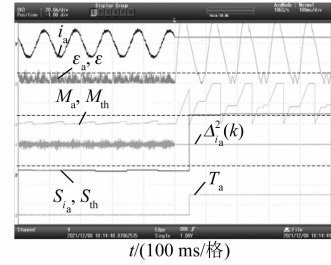


图 11 a 相电流传感器卡死故障试验结果

动, 且其幅值增加。 T_a 的值由 0 跳变为 3 , 由此可以诊断并识别出 a 相电流传感器发生增益故障。

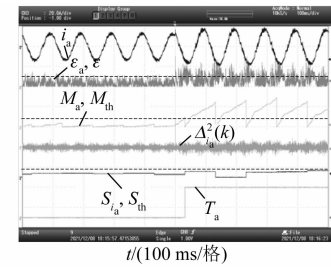


图 12 a 相电流传感器增益故障试验结果

图 13 为 a 相电流传感器发生偏置故障前后的试验波形。故障发生后, 电流残差 ε_a 增大, 一个电流基波周期内的故障次数 M_a 逐渐增加, 电流的二次差分 $\Delta i_a^2(k)$ 和电流积分 S_{i_a} 的波形变化与理论分析一致, T_a 的值由 0 跳变为 4 , 由此可以诊断并识别出 a 相电流传感器发生偏置故障。

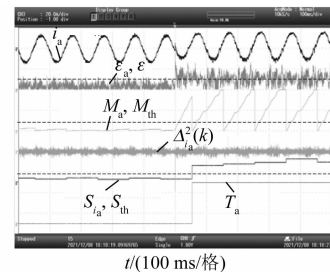


图 13 a 相电流传感器偏置故障试验结果

5 结 语

本文提出了一种基于二次差分的电流传感器故障诊断方法。该方法通过对电流残差进行周期性重构得到一个相电流周期内故障次数来定位故障电流传感器, 根据传感器输出电流的二次差分 and 周期积分值, 判断出传感器故障类型。该方法能够准确识别出四种典型的故障类型, 不需要额

外的硬件,且对电流扰动和参数不匹配具有较好的鲁棒性。仿真和试验结果验证了故障诊断方法的有效性和可实施性。

【参考文献】

- [1] KWON Y, SUL S, BALOCH N A, et al. Improved design of IPMSM for sensorless drive with absolute rotor position estimation capability [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(2): 1441.
- [2] 王金柯, 高强. 基于滑模锁相环永磁同步电机无传感器控制动态性能改进 [J]. 电机与控制应用, 2021, 48(10): 20.
- [3] 张伯泽, 宗剑, 钱平. 基于三电平逆变器的内置式永磁同步电机矢量控制研究 [J]. 电机与控制应用, 2019, 46(3): 41.
- [4] 应黎明, 杭翠翠, 舒乃秋, 等. 永磁同步电机传感器故障诊断及容错控制 [J]. 电机与控制学报, 2020, 24(1): 45.
- [5] 周洪雷. 内置式永磁电机驱动系统电流传感器故障容错控制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [6] GAO Z, CECATI C, DING S X. A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques-part I: fault diagnosis with model-based and signal-based approaches [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3757.
- [7] ZHANG X, FOO G, DON VILATHGAMUWA M, et al. Sensor fault detection, isolation and system reconfiguration based on extended Kalman filter for induction motor drives [J]. IET Electric Power Applications, 2013, 7(7): 607.
- [8] 李辉, 赵猛, 赵斌, 等. 双馈风电机组关键传感器的故障诊断方法 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 73.
- [9] EL KHIL S K, JLAASSI I, CARDOSO A J M, et al. Diagnosis of open-switch and current sensor faults in PMSM drives through stator current analysis [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 5925.
- [10] MANOHAR M, DAS S. Current sensor fault-tolerant control for direct torque control of induction motor drive using flux-linkage observer [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(6): 2824.
- [11] LI Z, WHEELER P, WATSON A, et al. A fast diagnosis method for both IGBT faults and current sensor faults in grid-tied three-phase inverters with two current sensors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(5): 5267.
- [12] HUANG G, FUKUSHIMA E F, SHE J, et al. Current sensor fault diagnosis based on sliding mode observer for permanent magnet synchronous traction motor [C] // 2018 IEEE 27th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2018.
- [13] GOU B, GE X, LIU Y, et al. Load-current-based current sensor fault diagnosis and tolerant control scheme for traction inverters [J]. Electronics Letters, 2016, 52(20): 1717.
- [14] NAJAFABADI T A, SALMASI F R, JABEHDAR-MARALANI P. Detection and isolation of speed-, DC-link voltage-, and current-sensor faults based on an adaptive observer in induction-motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(5): 1662.
- [15] FOO G H B, ZHANG X, VILATHGAMUWA D M. A sensor fault detection and isolation method in interior permanent-magnet synchronous motor drives based on an extended Kalman filter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 3485.
- [16] CHAKRABORTY C, VERMA V. Speed and current sensor fault detection and isolation technique for induction motor drive using axes transformation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(3): 1943.
- [17] 马雷, 陈宇航, 张云峰. 基于坐标变换的永磁同步电机电流传感器容错控制 [J]. 电机与控制学报, 2016, 43(11): 17.