

基于改进电流法的 PMSM 绕组开路诊断方法^{*}

李龚睿子, 陈超波, 张彬彬, 郎宝华, 高 嵩
(西安工业大学 电子信息工程学院, 陕西 西安 710021)

摘 要: 针对传统永磁同步电机(PMSM)绕组开路故障诊断方法效率低下、适应性差等问题,提出了一种基于改进平均电流法的自适应阈值 PMSM 绕组开路故障诊断方法。首先,获取 PMSM 三相正常状态和故障状态的电流信号。其次,为克服测量噪声影响,对该信号进行滑动窗口滤波处理。然后,提出了一种改进平均电流法的绕组开路故障诊断方法,该改进平均电流法可得到自适应阈值,将滤波后的电流值与阈值的比较结果作为故障判断依据。最后,通过仿真平台验证所提算法,结果表明所提方法快速性好,稳定性高。

关键词: 永磁同步电机; 绕组开路故障; 平均电流法; 自适应阈值; 滑动窗口滤波

中图分类号: TM341 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)07-0063-07

doi: 10.12177/emca.2022.048

PMSM Winding Open-Circuit Diagnosis Method Based on Improved Current Method^{*}

LI Gongruizi, CHEN Chaobo, ZHANG Binbin, LANG Baohua, GAO Song

(School of Electronic Information Engineering, Xi'an Technology University, Xi'an 710021, China)

Abstract: The traditional winding open-circuit fault diagnosis methods of permanent magnet synchronous motor (PMSM) have low efficiency and poor adaptability. An adaptive threshold PMSM winding open-circuit fault diagnosis method based on the improved average current method is proposed. Firstly, the current signals of the PMSM three-phase normal state and fault state are obtained. Secondly, to overcome the influence of measurement noise, the signal is filtered by a sliding window. Thirdly, an improved average current method for winding open-circuit fault diagnosis is proposed. The improved average current method can obtain the adaptive threshold, and the comparison result between the filtered current value and the threshold is used as the basis for fault judgment. Finally, the proposed algorithm is verified by the simulation platform. The results show that the proposed method has advantage of quickness and strong stability.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); winding open-circuit fault; average current method; adaptive threshold; sliding window filtering

0 引 言

永磁同步电机(PMSM)具有功率密度高、效率高和转矩大等优点,在航空、交通运输和可再生能源发电等领域中有着广泛的应用^[1]。50%以上

的电机绕组故障是由供电电压不稳定、集电环连接脱落等导致的^[2],其中由接触不良导致的电阻增加而引起的故障称为高电阻连接故障^[3-4]。若 PMSM 驱动系统中发生绕组开路故障,则会对整个驱动系统造成二次损坏,甚至造成严重的人身

收稿日期: 2022-05-12; 收到修改稿日期: 2022-06-02

^{*} 基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2021GY-149); 陕西省技术创新引导专项(基金)计划项目(2022QFY01-16)

作者简介: 李龚睿子(1996—),女,硕士研究生,研究方向为智能控制、故障诊断。

陈超波(1978—),男,硕士,教授,研究方向为故障诊断及容错控制。

张彬彬(1990—),男,博士,讲师,研究方向为风力发电、智能控制。

财产安全事故。因此,为电机安全可靠的运行,及时准确地检测 PMSM 绕组故障显得尤为重要。

传统的电机驱动系统缺相故障诊断方法可分为基于模型和信号的方法^[5]。基于模型的故障诊断方法无需额外的传感器就能检测出电机的开路故障。文献[6]通过比较区间滑模观测器估计的电流值与实际电流值得到的残差进行开路故障诊断,故障定位准确,但是严重依赖于精确的数学模型。因为实际工作中电机运行环境恶劣、元件老化等因素影响,获取精确的数学模型非常困难,所以基于模型的故障诊断方法的实用性较差^[7]。目前电机绕组开路故障诊断的主流方法是基于信号的故障诊断方法,又包括基于电流和电压两种方法。文献[8]提出一种 PMSM 驱动系统开路故障检测与判断方法。该方法可以准确区分出开路故障是定子绕组故障还是逆变器开关故障,但是抗干扰能力较差,易受外部影响。文献[9]是通过将测量电压和参考电压进行比较获得残差信号,进而对残差信号进行评估来检测和识别电源开关的故障情况,但是该方法不能准确识别是绕组内部开路故障还是逆变器开路故障。文献[10]利用参考电压中包含的故障信息,通过电压观测器估计实际电压进行开路故障诊断,该方法无需额外的电压传感器。文献[11]提出了一种从诊断特征值中提取故障特征的预处理方法,通过电压偏差进行故障诊断。但是这种方法降低了逆变器运行的可靠性。虽然基于电压的方法在诊断速率上具有一定的优势,但是这类方法通常需要额外的硬件电路^[12]。基于电流的故障诊断法不需要额外的传感器,可以大大简化诊断过程,提高诊断效率,但是电流容易受到外部因素影响,往往不能直接地反映出系统的故障特征^[13]。文献[14]提出的开路故障诊断方法不需要考虑谐波分量和负载变化,但是在构成二维向量以及归一化的过程中涉及到复杂的运算,极大地增加了处理器的负担。文献[15]通过对 $\alpha\beta$ 静止坐标系下 PMSM 定子电流矢量动态变化响应的研究,可以近似得出电流矢量变化的三个主要影响分量,从而得出 PMSM 电流矢量变化的动态估计方法。但是,该方法需在获取一个或者多个电流周期数据后才能诊断故障且易受干扰影响。

综上,为了进一步提高系统的可靠性,缩短故

障诊断的时间,本文提出了一种基于自适应阈值的 PMSM 绕组开路故障检测方法,该方法是在传统平均电流法的基础上进行改进,进一步提高了故障诊断效率。首先,通过分析 PMSM 的数学模型得到正常状态下的三相电流。其次,分别对得到的三相电流通过滑动窗口滤波算法求得各相电流的平均值。然后,通过比较三相电流的平均值与自适应阈值的关系确定故障相。最后,通过仿真和试验结果验证了该方法的有效性与可行性。

1 PMSM 数学模型

1.1 正常状态的数学模型

传统三相 PMSM 的基本组成框图如图 1 所示。PMSM 是一种典型的机电一体化电机,包括电机、位置传感器、逆变器、驱动电路等。

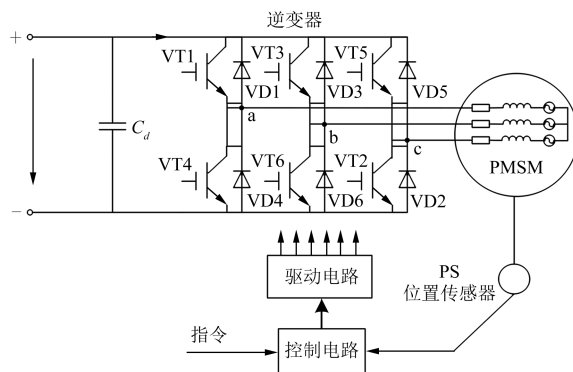


图 1 三相 PMSM 的基本组成框图

永磁同步电机在 $d-q$ 坐标系下的电压方程可表示为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_r \psi_q \\ u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_r \psi_d \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为 $d-q$ 坐标系下定子的电压; i_d 、 i_q 为 $d-q$ 坐标系下定子的绕组电流; R_s 为 $d-q$ 坐标系下的定子电阻; ψ_d 、 ψ_q 为 $d-q$ 坐标系下的绕组磁链; ω_r 为电角速度。

$d-q$ 坐标系下定子的磁链方程可表示为

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: ψ_f 为永磁体产生的磁链; L_d 、 L_q 为 $d-q$ 坐标系下的定子电感。

PMSM 在 $d-q$ 坐标系中的电磁转矩方程可以

表示为

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

式中: T_e 为电机电磁转矩; p 为 PMSM 的极对数。

在同步旋转坐标系下, 机电运动方程可以表示为

$$T_e - T_L = \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

式中: T_L 为电机负载转矩; J 为转动惯量; ω 为转子的电角速度。

1.2 故障状态的数学模型

定子绕组故障包括高阻连接、短路、开路、接地等故障, 其中导致电机开路故障的原因也可能是定子绕组接触不良或者短路和接地故障较为严重^[16]。高电阻连接故障是电机绕组开路故障的一种早期故障, 在故障初期, 电机接口的温度会随着时间的逐渐增加, 高温使接触表面氧化加剧, 进而导致接触电阻增大^[17-18]。当电阻增大到一定程度后热过载会使绝缘层断裂, 最终导致开路故障。因此, 本文建立的是开路故障时的三相 PMSM 数学模型。

三相 PMSM 在两个或两个以上的断相故障情况下不能工作, 因此本文只针对单相(以 B 相为例)故障情况进行说明, 其余两相(A 相、C 相)故障时情况类似。假设 B 相定子绕组开路, 如图 2 所示, 此时 B 相电压方程不存在。

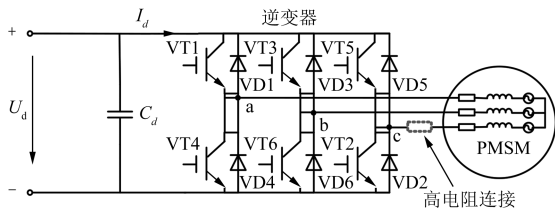


图2 B相故障时 PMSM 原理框图

因此, B 相故障时, A 相和 C 相在三相静止坐标系下 PMSM 的电压方程可表示为

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ac} \\ M_{ca} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: u_a 、 u_c 分别为 abc 坐标系下绕组的相电压; L_{aa} 、 L_{cc} 分别为定子绕组的自感; M_{ac} 、 M_{ca} 分别为定子绕组之间的互感; i_a 、 i_c 为 abc 坐标系下绕组的相电流; ψ_a 、 ψ_c 分别为各相绕组的定子磁链分量。

磁链方程如下:

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ac} \\ M_{ca} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_c \end{bmatrix} + \psi_f \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) \\ \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: θ 为电角度。

2 故障检测方法

2.1 传统平均电流法

传统的平均电流法^[19]会对电机的三相电流进行采样, 然后对获得的 N 个样本值求取电流均值, 得到三相电流平均值 I_{as} 、 I_{bs} 和 I_{cs} , 最后将得到的电流均值与阈值进行比较得到故障信号 FT_a 、 FT_b 、 FT_c 。以 a 相电流为例, 平均电流计算原理为

$$I_{as} = \frac{|i_{as}[n]| + |i_{as}[n-1]| + \dots + |i_{as}[n-N+1]|}{N} \quad (7)$$

故障信号结果为

$$FT_a = \begin{cases} 0, & I_{as} > I_{th} \\ 1, & I_{as} \leq I_{th} \end{cases} \quad (8)$$

式中: I_{th} 为设定阈值。

对于极数为 p 的三相 PMSM, 电机转速 ω_r 可表示为

$$T_r = \frac{1}{\left(\frac{\omega_r}{60} \cdot \frac{p}{2}\right)} = \frac{120}{\omega_r p} \quad (9)$$

采样周期为 T_s 根据式(9)电机额定转速 ω_{rat} 对应的周期为

$$T_{rat} = \frac{120}{\omega_{rat} p} \quad (10)$$

在额定条件下, 常数 N 的计算公式为

$$N = \frac{T_{rat}}{2T_s} = \frac{60}{\omega_{rat} p T_s} \quad (11)$$

假设电机的电流可表示为 $i_s = I \sin \theta$, 因此, 最小平均整流值 I_{min} 为

$$I_{min} = \frac{2 \cdot \int_0^{\frac{\omega_r \pi}{2\omega_{r, rate} d}} (I \sin \theta) d\theta}{2 \cdot \frac{\omega_r \pi}{2\omega_{r, rate} d}} =$$

$$I \frac{2\omega_{r, \text{rate d}}}{\omega_r \pi} \left[1 - \cos\left(\frac{\omega_r \pi}{2\omega_{r, \text{rate d}}}\right) \right] \quad (12)$$

从式(8)可以看出,当最小值 $I_{\min}$ 小于阈值 I_{th} 时,会产生错误的故障信号。也就是说,当电流振幅的单位值 I_{pu} 满足式(13)时,会产生误报:

$$\frac{I}{I_{\text{rat}}} = I_{\text{pu}} < \left[\frac{\omega_{r, \text{pu}} \frac{\pi}{2}}{1 - \cos\left(\omega_{r, \text{pu}} \frac{\pi}{2}\right)} \right] I_{\text{th, pu}} \quad (13)$$

其中, $\omega_{r, \text{pu}} = \frac{\omega_r}{\omega_{\text{rat}}}$; $I_{\text{th, pu}} = \frac{I_{\text{th}}}{I_{\text{rat, peak}}}$ 。

式中: $\omega_{r, \text{pu}}$ 和 $I_{\text{th, pu}}$ 分别为电机转速 ω_r 和电流阈值 I_{th} 的单位值; $I_{\text{rat, peak}}$ 为额定电流振幅 I_{rat} 的峰值电流。

在传统平均电流法中, N 的取值越小,故障检测时的正常区域越小,故障信号的产生时间越短。但是在传统平均电流法中阈值设置固定不变,故障诊断结果不理想。

2.2 PMSM 缺相故障诊断策略

滑动窗口滤波算法原理图如图3所示,本文所提出的基于自适应阈值的故障诊断算法中采用了滑动平均算法。滑动平均算法顾名思义就是维护一定长的队列,当每次在队尾插入一个元素的时候,相应的在队列的头部就会删掉一个元素,然后对其求出均值。

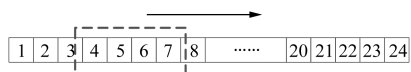


图3 滑动窗口处理原理图

图4中,对采样得到的电流取绝对值后,滑动求得 N 个三相电流的平均值 I_{as} 、 I_{bs} 和 I_{cs} ,再求得三相电流的自适应阈值 I_{th} :

$$I_{\text{th}} = \frac{I_{\text{as}} + I_{\text{bs}} + I_{\text{cs}}}{3} \quad (14)$$

故障诊断信号由 I_{as} 、 I_{bs} 和 I_{cs} 分别与 I_{th} 相减得到,故障诊断信号如下:

$$F_i = \begin{cases} 0, & I_{\text{th}} > \varepsilon \\ 1, & I_{\text{th}} < -\varepsilon \end{cases} \quad (i = a, b, c) \quad (15)$$

式中: F_i 为故障诊断信号; ε 为常数, $\varepsilon > 0$ 。

基于自适应阈值的 PMSM 单相绕组高电阻连接的故障诊断流程图如图5所示,针对传统平均电流法中阈值设定为固定值会导致故障诊断不

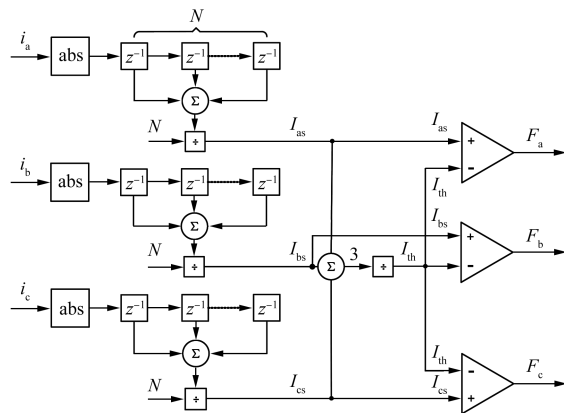


图4 基于自适应阈值平均电流法原理框图

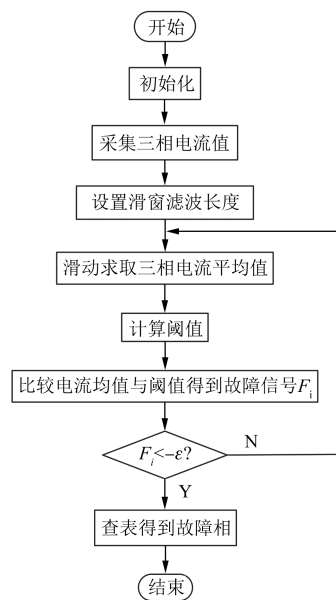


图5 故障诊断流程图

准确的问题,本文首先对采集到的三相电流进行简单处理,滑动求取电流的平均值,然后根据所求电流平均值得到自适应阈值 I_{th} ,其次通过比较电流均值与 I_{th} 的差值得到故障诊断信号 F_a 、 F_b 和 F_c 。考虑到系统存在干扰,为了抑制干扰信号本文引入一个小的正常数 ε ,故障发生条件如表1所示,当某一相故障诊断信号小于 $-\varepsilon$ 而其余相大于 ε 时,则故障发生。

表1 故障相与故障信号关系

故障相	F_i 与 ε 关系
A 相	$F_a < -\varepsilon, F_b > \varepsilon, F_c > \varepsilon$
B 相	$F_a > \varepsilon, F_b < -\varepsilon, F_c > \varepsilon$
C 相	$F_a > \varepsilon, F_b > \varepsilon, F_c < -\varepsilon$

3 仿真研究

为进一步验证本文所提方法的有效性,在 MATLAB/Simulink 仿真软件中搭建出本文所提的三相 PMSM 高电阻连接故障诊断仿真模型。PMSM 采用矢量控制,仿真原理框图如图 6 所示,搭建的仿真模型如图 7 所示。PMSM 的仿真参数如表 2 所示。

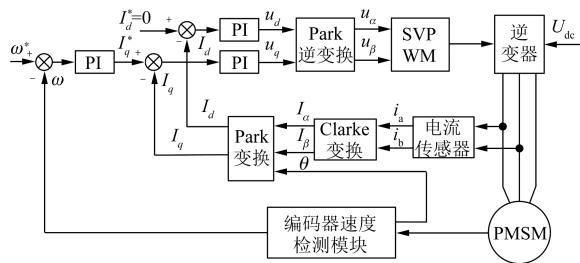


图 6 PMSM 驱动系统控制结构图

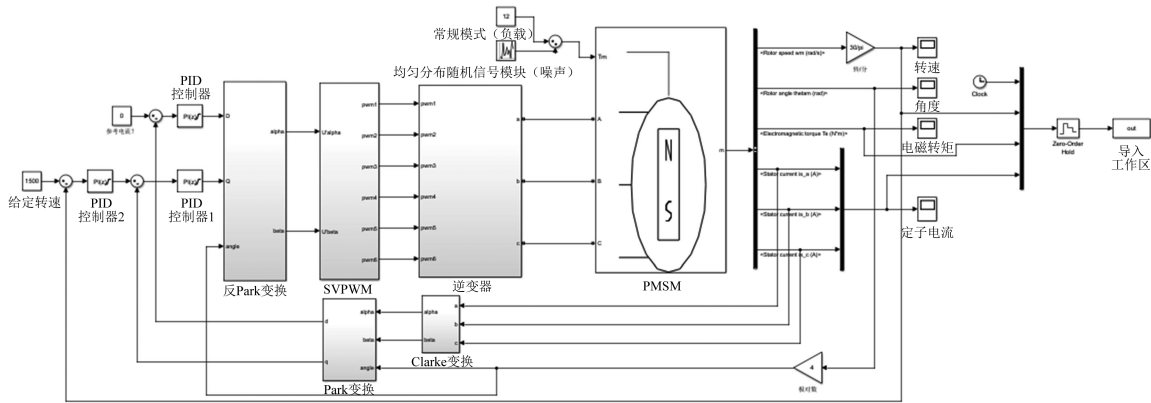


图 7 三相 PMSM 仿真模型图

表 2 PMSM 仿真参数

参数名称	参数值
三相定子电阻 $R_a=R_b=R_c=R_s/\Omega$	0.11
转子永磁体磁链 ψ_f/Wb	0.111 9
转子转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.001 6
极对数 p	4
速度给定值 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	1 500
直流母线电压 U_{dc}/V	360
功率开关频率 f_{sw}/kHz	3
负载转矩 $T_L/(\text{N}\cdot\text{m})$	8

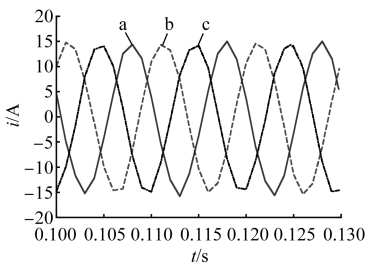


图 8 正常运行时的三相电流

图 8 和图 9 分别是 PMSM 正常状态运行时的三相电流波形图和电磁转矩波形图。

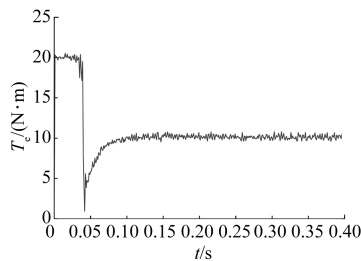
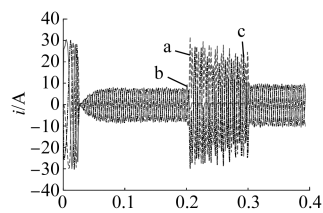


图 9 正常运行时电机转矩

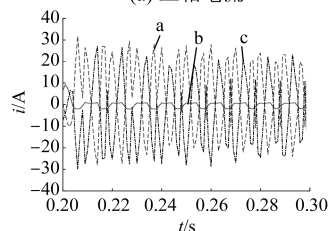
在 0.2~0.3 s 时间内,B 相发生高电阻连接故障,三相电流的波形如图 10(a) 所示。局部故障电流信号放大后如图 10(b) 所示,可以看出 B 相的电流明显减小。故障时转矩脉动波动明显,如图 11 所示。

图 12 为本文所提算法计算得到的三相电流平均值,以 B 相发生故障为例,可以看出当 0.2 s 电机发生故障时 B 相电流均值减小,A 相和 C 相电流均值增大。

图 13 为本文所提基于自适应阈值下的电流信号,图 14 为传统平均电流法中固定阈值下的电流信号。对比图 13 和图 14 可知,在 B 相发生故障时,传统平均电流法中固定阈值下电流信号变



(a) 三相电流



(b) 电流局部放大图

图 10 B 相故障时三相电流

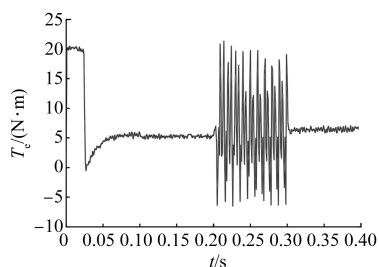


图 11 B 相故障时电机转矩

化不明显,无法准确及时地定位故障相,本文所提方法几乎在故障发生的同时 B 相的自适应阈值信号立刻发生突变,故障诊断特征明显,可以快速有效地提高故障诊断的效率。

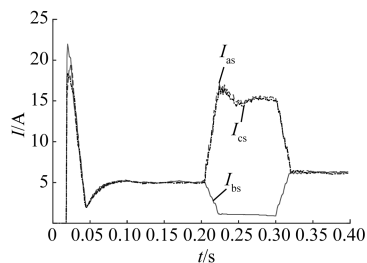


图 12 B 相故障时三相电流平均值

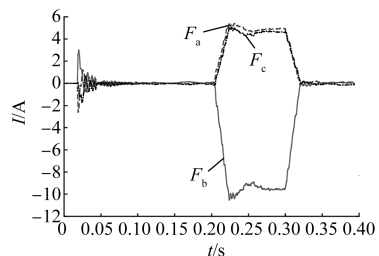


图 13 B 相故障时改进平均电流法的故障信号

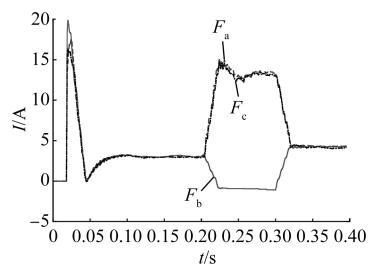


图 14 B 相故障时传统平均电流法的故障信号

图 15 中实线和虚线分别为改进平均电流法和传统平均电流法的故障诊断信号,显然,改进平均电流法的故障诊断速度更优,且传统平均电流法在 0.05 s 之前存在误诊的情况。经过仿真分析,本文所提方法可以实现故障的快速诊断。

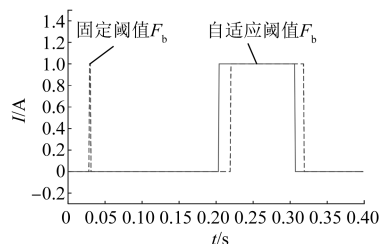


图 15 传统平均电流法与改进平均电流法故障诊断结果对比

4 结 语

本文针对 PMSM 单相绕组开路的早期故障,即高电阻连接故障提出了一种基于改进平均电流法的自适应阈值诊断方法。首先获取 PMSM 的三相电流信号,通过滑动窗口滤波算法求取三相电流的各相平均值,然后将求得均值与自适应阈值进行比较得到故障诊断信号,最后仿真结果表明此方法定位故障相的最快时间小于 10% 的电流周期,验证了该方法的快速性和稳定性。

【参考文献】

- [1] 苏晓杨,兰志勇,蔡兵兵. 永磁同步电机模型预测电流控制比较研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(10): 7.
- [2] 孟云平,周新秀,李红,等. 基于四桥臂拓扑的永磁同步电机断相容错控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(15): 3158.
- [3] MICHELE M, ZARRI L, TANI A, et al. Online detection of high-resistance connections in multiphase induction machines[J]. IEEE Transactions on Power

- Electronics, 2015, 30(8):4505.
- [4] YUN J, LEE K, LEE K, et al. Detection and classification of stator turn faults and high-resistance electrical connections for induction machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(2):666.
- [5] 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.
- [6] 陈超波, 王霞霞, 高嵩, 等. 基于区间滑模观测器的逆变器开路故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14):4569.
- [7] JLASSI I, ESTIMA J O, EL KHIL S K, et al. A robust observer-based method for IGBTs and current sensors fault diagnosis in voltage-source inverters of PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3):2894.
- [8] HANG J, ZHANG J, CHENG M, et al. Detection and discrimination of open-phase fault in permanent magnet synchronous motor drive system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7):4697.
- [9] DE ARAUJO RIBEIRO R L, JACOBINA C B, DA SILVA E R C, et al. Fault detection of open-switch damage in voltage-fed PWM motor drive systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(2):587.
- [10] FREIRE N M A, ESTIMA J O, CARDOSO A J M. A voltage-based approach without extra hardware for open-circuit fault diagnosis in closed-loop PWM AC regenerative drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(9):4960.
- [11] CHENG S, CHEN Y, YU T, et al. A novel diagnostic technique for open-circuited faults of inverters based on output line-to-line voltage model [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7):4412.
- [12] JIANG W, HUANG W, JIANG X. A novel open-circuit fault diagnostic method for dual-winding fault-tolerant permanent magnet motor drive system [C] // 2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2015.
- [13] KHLAIEF A, BOUSSAK M, GOSSA M, et al. Open phase faults detection in PMSM drives based on current signature analysis [C] // The XIX International Conference on Electrical Machines - ICM 2010, 2010.
- [14] TRABELSI M, NGUYEN N K, SEMAIL E, et al. Real-time switches fault diagnosis based on typical operating characteristics of five-phase permanent-magnetic synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(8):4683.
- [15] 荆锴, 孙鹤旭, 董砚, 等. 以电流矢量为目标的永磁同步电机定子电流动态预测 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(2):47.
- [16] 王慧. 无刷直流电机定子绕组不平衡故障诊断与评估研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2020.
- [17] DE LA BARRERA P M, BOSSIO G R, SOLSONA J A, et al. High-resistance connection detection in induction motor drives using signal injection [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(7):3563.
- [18] ZARRI L, MENGONI M, GRITLI Y, et al. Detection and localization of stator resistance dissymmetry based on multiple reference frame controllers in multiphase induction motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8):3506.
- [19] CHEN H, WU Z, LI C, et al. Average current method to detect open-winding fault of three-phase permanent magnet synchronous motors [C] // 2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe), 2016.