

# 永磁同步电机轻微匝间短路故障的检测方法

吴娟娟, 皮薇薇

(郑州电力高等专科学校 电力工程系, 河南 郑州 450000)

**摘要:**提出了一种基于负序分量的用于永磁同步电机早期匝间短路故障的诊断方法。该诊断方法中的故障电流在轻微匝间短路故障时不受转子转速变化的影响。引入的负序分量故障指示器模型诊断轻微匝间短路故障的性能明显优于利用零序分量的故障指示器。设置了12种匝间短路故障以及永磁同步电机2种运行条件。通过试验表明,提出的方法能够有效地诊断早期轻微匝间短路故障。

**关键词:**故障诊断;匝间短路故障;模型分析;永磁同步电机

**中图分类号:**TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd19449

## Method for Detecting Short Circuit Slight Fault of the PMSM

WU Juanjuan, PI Weiwei

(Department of Engineering, Electrical Zhengzhou Electric Power College, Zhengzhou 450000, Henan, China)

**Abstract:** A diagnosis method based on negative-sequence component for diagnose slightly inter-turn short-circuit fault (ISCF) of permanent magnet synchronous motor (PMSM) was proposed. The fault current for the diagnosis method was not affected by the changed rotor speed when the it was on the early stage. The negative-sequence component fault indicator model introduced was better than the fault indicator with zero-sequence component. 12 kinds of ISCF with two different operation conditions of PMSM were set up. The results showed that the method can effectively diagnose the early slightly inter-turn short-circuit fault.

**Key words:** fault diagnosis; inter-turn short-circuit fault (ISCF); model analysis; permanent magnet synchronous motor (PMSM)

永磁同步电机匝间短路故障是对称三相交流电机中最常见的故障之一<sup>[1]</sup>。定子线圈匝间的绝缘劣化容易发生匝间短路故障,并且故障产生的过热会对交流电机定子绕组造成严重的损坏。匝间短路故障会引发定子其他类型的故障,如线圈、相对相或相对地故障<sup>[2-4]</sup>。此外,因为永磁同步电机的转子会由于局部过热而被消磁<sup>[5-7]</sup>,所以永磁同步电机的匝间短路故障比异步电机的匝间短路故障更危险。因此,匝间短路故障的早期诊断意义重大。

以往的研究仅集中于对在严重匝间短路故障条件下提出方法<sup>[8-10]</sup>;由于转子转速变化<sup>[1]</sup>,以往的大多数故障指示器的输出都会随之发生变化。先前的故障指示器无法分辨变化的来源是匝间短路故障还是转子转速变化<sup>[11-14]</sup>。永磁同步电机广泛地应用于转速不断变化的设备中,如洗

衣机、电动汽车等。因此,这就要求故障指示器的输出要在转子转速变化时保持不变,并更要求其在轻微匝间短路故障条件下适用。

本文提出了永磁同步电机的早期诊断方法,它主要实现2个目标。第1个目标是确定一种故障指示器,它在轻微匝间短路故障下不受转子转速变化的影响。故障指示器利用短路匝的电压方程确定故障电流与转子转速的关系。此外,通过故障电压分析,确定故障电流的幅值与在轻微匝间短路故障情况下的转子速度成正比。第2个目标是通过引入负序分量得到确定的故障指示器指标的计算表达式。本文发现利用负序方法得到的相电压故障分量总是比零序方法的结果要大。利用推导出的表达式进行早期匝间短路故障诊断。此外,提出的负序方法适用于任何大小漏电感的永磁同步电机。

# 1 匝间短路故障下的永磁同步电机动态模型

图1为串联绕组永磁同步电动机在a相发生匝间短路故障时的等效模型。对于a相,  $n$ 为单相绕组中的线圈数,  $N$ 为1个线圈的匝数,  $N_{\text{shorted}}$ 为1个线圈中短路的匝数。短路匝比  $\mu = N_{\text{shorted}} / (nN)$ , 它与匝间短路故障的严重程度有关。如图1模型所示, 故障电流是短路时产生的电流, 故障电阻  $R_f$ 表示绝缘失效时的电阻, 其值取决于故障的严重程度。

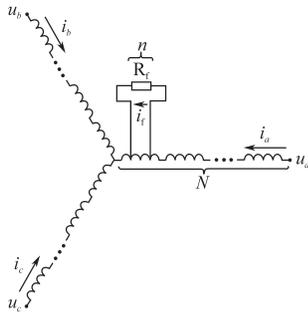


图1 串联绕组永磁同步电动机在a相发生匝间短路故障时的等效模型  
Fig.1 Equivalent model of series-connected PMSM with an ISCF in phase a

在静止参照系  $abc$  中, 发生匝间短路故障的永磁同步电机相电压方程为

$$\mathbf{u}_{abc} = \mathbf{R}_{sh} \cdot \mathbf{i}_{abc} + \frac{d}{dt} (\mathbf{L}_{sh} \cdot \mathbf{i}_{abc} + \boldsymbol{\lambda}_{PM,abc}) - \mathbf{R}_{sh} \cdot \mathbf{FP} \mu i_f - \frac{d}{dt} (\mathbf{L}_{sh} \cdot \mathbf{FP} \mu i_f) \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{abc} &= [u_a \quad u_b \quad u_c]^T \\ \mathbf{i}_{abc} &= [i_a \quad i_b \quad i_c]^T \\ \mathbf{R}_{sh} &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \\ \mathbf{L}_{sh} &= \begin{bmatrix} L_{ms} + L_{ls} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ms} + L_{ls} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ms} + L_{ls} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{\lambda}_{PM,abc} &= \lambda_{PM} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{FP} &= [1 \quad 0 \quad 0]^T \end{aligned}$$

式中:  $\mathbf{u}_{abc}$  为定子三相绕组电压矩阵;  $u_a, u_b, u_c$  分别为定子绕组  $a, b, c$  相的相电压;  $\mathbf{i}_{abc}$  为定子三相绕组电流矩阵;  $i_a, i_b, i_c$  分别为定子绕组  $a, b, c$  相

的相电流;  $\mathbf{R}_{sh}$  为定子电阻矩阵;  $R_s$  为定子电阻;  $\mathbf{L}_{sh}$  为定子电感矩阵;  $L_{ms}$  为自电感;  $L_{ls}$  为漏电感;  $\boldsymbol{\lambda}_{PM,abc}$  为相磁链矩阵;  $\lambda_{PM}$  为永磁体的磁链;  $\theta$  为电机的电角度;  $\mathbf{FP}$  为确定故障相位的向量矩阵。

如果匝间短路故障出现在  $b$  相或  $c$  相, 那么  $\mathbf{FP}$  分别为  $\mathbf{FP} = [0 \ 1 \ 0]^T$  或  $\mathbf{FP} = [0 \ 0 \ 1]^T$ 。

此外, 出现匝间短路故障的串联绕组永磁同步电机的故障电压方程<sup>[3]</sup>如下式:

$$\begin{aligned} u_f &= R_f i_f \\ &= \mu \mathbf{FP}^T \cdot \mathbf{u}_{abc} - \mu(1 - \mu) R_s i_f - \mu^2 \left[ \left( \frac{n}{1 - \gamma} - 1 \right) L_{ms} + (n - 1) L_{ls} \right] \frac{di_f}{dt} \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $u_f$  为故障电压;  $\gamma$  为影响同相线圈间磁链连接的耦合系数。

## 2 故障诊断方法

### 2.1 故障指示器

#### 2.1.1 故障分析

为了使该故障指示器在轻微匝间短路故障下不容易受到转子转速变化的影响, 分析了串联绕组永磁同步电机出现匝间短路故障时的电压方程, 式(2)可以进一步化为

$$R(\mu, R_f) \mu i_f + L_f \frac{d(\mu i_f)}{dt} = \mathbf{FP}^T \cdot \mathbf{u}_{abc} \quad (3)$$

其中

$$R(\mu, R_f) = \frac{R_f}{\mu^2} + \left( \frac{1}{\mu} - 1 \right) R_s \quad (4)$$

$$L_f = \left( \frac{n}{1 - \gamma} - 1 \right) L_{ms} + (n - 1) L_{ls} \quad (5)$$

同时, 相电压与转子转速成正比, 则式(3)可写成下式:

$$R(\mu, R_f) \mu i_f + L_f \frac{d(\mu i_f)}{dt} = \mathbf{FP}^T \cdot \mathbf{u}_{abc} \propto \omega_m \quad (6)$$

式中:  $\omega_m$  为转子转速。

在式(6)中, 故障相相电压被表示成2部分的和。左边第1部分为  $R(\mu, R_f)$  和  $\mu i_f$  的积, 根据式(4),  $R(\mu, R_f)$  为关于  $\mu$  和  $R_f$  的函数, 它随着  $\mu$  的增加或  $R_f$  的减小而减小, 并且  $R(\mu, R_f)$  在正常状态的永磁同步电机中为无穷大, 在全匝间短路故障 ( $R_f = 0, \mu = 1$ ) 的永磁同步电机中为0; 第2部分是微分式,  $L_f$  在同一匝间短路故障情况下为固定值, 微分式在正常永磁同步电机中为0, 且随着匝间短路故障严重程度的增加而增加。

通过这些特征, 本文根据匝间短路故障的程度对式(6)左边2部分进行比较。若故障程度轻

微,则第1部分占主导,而微分式趋近于0;若故障严重,则微分式占主导,而第1部分变得很小。因此,在早期匝间短路故障中,第1项会远大于微分式,可忽略第2项的微分式。

因此,在轻微的匝间短路故障下,式(6)可以近似成:

$$R(\mu, R_f)\mu i_f \approx \mathbf{FP}^T \cdot \mathbf{u}_{abc} \propto \omega_m \quad (7)$$

忽略高阶谐波分量,将故障电流  $i_f$  表示为

$$i_f = I_f \sin(\theta + \theta_f) \quad (8)$$

式中:  $I_f$ ,  $\theta_f$  分别为故障电流  $I_f$  的幅值和初始相角。

将式(8)代入式(7)中,可得:

$$R(\mu, R_f)\mu i_f = R(\mu, R_f)\mu I_f \sin(\theta + \theta_f) \propto \omega_m \quad (9)$$

因此,在轻微匝间短路故障时,  $\mu I_f$  与电机转子转速的幅值成正比。

另外,  $R(\mu, R_f)$  随着匝间短路故障变严重而逐渐变小,则式(6)中的第2项的影响逐渐不能被忽略。通过式(8)计算式(6)的第2项,如下式:

$$L_f \frac{d(\mu i_f)}{dt} = p \omega_m L_f \mu I_f \sin(\theta + \theta_f) \quad (10)$$

式中:  $p$  为电机极对数。

基于式(10),发现当在轻微匝间短路故障时,故障电流与转子转速之间表现出强烈的线性关系;而当故障更严重时,不再为线性的关系。

### 2.1.2 故障指示器的特征

本小节确定了一种故障指示器,它在永磁同步电机发生轻微匝间短路故障时不受转子转速变化的影响。提出的故障指示器的指标如下式:

$$FI = \frac{\mu I_f}{\omega_m} \quad (11)$$

首先,在轻微匝间短路故障时,该故障指示器的指标在转子转速变化时是恒定的。其次,由于在严重匝间短路故障下式(10)的影响不能被忽略,该故障指示器在转子速度变化后不能保持恒定。在下一节中,本文提出了一种利用负序分量精确计算故障指标的新方法。

## 2.2 故障指示器指标的计算

### 2.2.1 负序分量的近似表达式

匝间短路故障使得相间的电压电流不平衡,此不平衡可以通过负序分量(NSC)来描述,关系如下:

$$i_{NSC} = \frac{1}{3}(i_a + \alpha^2 \cdot i_b + \alpha \cdot i_c) \quad (12)$$

$$u_{NSC} = \frac{1}{3}(u_a + \alpha^2 \cdot u_b + \alpha \cdot u_c) \quad (13)$$

其中

$$\alpha = e^{j \cdot 2\pi/3}$$

式中:  $i_{NSC}$  为三相电流 ( $i_a, i_b, i_c$ ) 的负序分量,  $u_{NSC}$

为三相电压 ( $u_a, u_b, u_c$ ) 的负序分量。

通过式(1)、式(12)和式(13),永磁同步电机发生匝间短路故障后相电压负序分量用  $a$  相表示如下:

$$u_{NSC,a} = R_s i_{NSC} + \left(\frac{3}{2}L_{ms} + L_{ls}\right) \frac{di_{NSC}}{dt} - \frac{1}{3}R_s \mu i_f - \frac{1}{3}\left(\frac{3}{2}L_{ms} + L_{ls}\right) \frac{d(\mu i_f)}{dt} \quad (14)$$

为了处理匝间短路故障,相电压方程的负序分量分成正常和故障2部分:

$$u_{NSC,a} = u_{NSC,h,a} + u_{NSC,f,a} \quad (15)$$

其中

$$u_{NSC,h,a} = R_s i_{NSC} + \left(\frac{3}{2}L_{ms} + L_{ls}\right) \frac{di_{NSC}}{dt} \quad (16)$$

$$u_{NSC,f,a} = -\frac{1}{3}R_s \mu i_f - \frac{1}{3}\left(\frac{3}{2}L_{ms} + L_{ls}\right) \frac{d(\mu i_f)}{dt} \quad (17)$$

式中:  $u_{NSC,h,a}$  和  $u_{NSC,f,a}$  分别为正常和故障状态下以  $a$  相来表示的相电压负序分量方程。

同样地,发生匝间短路故障时永磁同步电机的相电压方程可用  $b$  相、 $c$  相来表示,且  $b$  相、 $c$  相可分成正常和故障2部分。此外,  $b$  相和  $c$  相的正常部分项与  $a$  相正常部分项完全相同,故障部分有所不同,如下式:

$$u_{NSC,h,b} = u_{NSC,h,a} = u_{NSC,h,c} \quad (18)$$

$$u_{NSC,f,b} = -\frac{1}{3}\alpha^2 R_s \mu i_f - \frac{1}{3}\alpha^2 \left(\frac{3}{2}L_{ms} + L_{ls}\right) \frac{d(\mu i_f)}{dt} \quad (19)$$

$$u_{NSC,f,c} = -\frac{1}{3}\alpha R_s \mu i_f - \frac{1}{3}\alpha \left(\frac{3}{2}L_{ms} + L_{ls}\right) \frac{d(\mu i_f)}{dt} \quad (20)$$

若忽略高次谐波分量,则可通过式(8)来计算式(17)、式(19)和式(20)的幅值。计算得到的  $a$  相、 $b$  相、 $c$  相的电压幅值都相等,如下式所示:

$$U_{NSC,f} = \frac{1}{3}\mu I_f \sqrt{R_s^2 + \omega_c^2 \left(\frac{3}{2}L_{ms} + L_{ls}\right)^2} \quad (21)$$

其中

$$\omega_c = 60f = p\omega_m$$

使用零序分量得到故障部分的电压幅值如下式:

$$U_{ZSC,f} = \frac{1}{3}\mu I_f \sqrt{R_s^2 + \omega_c^2 L_{ls}^2} \quad (22)$$

通过比较式(21)和式(22)可以发现,由于  $L_{ls}$  一般都小于  $L_{ms}$ ,则在相同的匝间短路故障情况下  $U_{NSC,f}$  总是大于  $U_{ZSC,f}$ 。若在轻微匝间短路故障时将  $U_{ZSC,f}$  与测量噪声相比较,则利用零序分量的  $U_{ZSC,f}$  将无法检测到匝间短路故障,而利用负序分量可以检测出匝间短路故障。如果在早期诊断中使用零序分量法,则它只适用在具有高漏电感的永磁同步电动机中(此时  $\omega_c^2 L_{ls}^2$  比较大)。因此,相比之下在永磁同步电机中采用负序分量法

检测匝间短路故障可以忽视漏感的大小。

### 2.2.2 故障指示器的表达式

由于在电机的使用中不能直接测量  $\mu I_f$ , 因此故障指示器的表达式如下:

$$FI = \frac{\mu I_f}{\omega_m} = \frac{3U_{NSC,f}}{\omega_m \sqrt{R_s^2 + \omega_c^2 (\frac{3}{2}L_{ms} + L_{ls})^2}} \quad (23)$$

其中,当故障相为  $a$  相时,  $U_{NSC,f} = |u_{NSC,a} - u_{NSC,h,a}|$  并且当故障相为  $b$  相或  $c$  相时  $U_{NSC,f}$  保持不变。

## 3 试验平台及结果

### 3.1 试验平台搭建

试验中使用的永磁同步电机的具体参数为:额定输出功率 2.2 kW, 额定转速 4 500 r/min, 额定转矩 4.7 N·m, 额定电流 8.2 A, 输出电压 220 V, 极对数 3,  $d$  轴电感  $L_d=3.093$  mH,  $q$  轴电感  $L_q=5.470$  mH, 漏感  $L_{ls}=0.663$  mH, 定子电阻  $R_s=0.44 \Omega$ 。本文采用 LSIS 制造的逆变器 SigVIET-IG5A 对永磁同步电机进行控制, 永磁同步电机与发电机相耦合, 实时生成和测量负载转矩, 并将 BEI-Ideacod 生产的 Encoder-CHO5-08 耦合到永磁同步电机的右侧, 来测量转子速度和转子位置。通过传感器 cDAQ-9178 并使用软件 LabVIEW 来测量和采集(频率为 100 kHz)电压电流信号。

本文在进行匝间短路故障相关的试验之前设置电机电流参数, 在正常情况下通过 RLC 测量计来测量定子电阻, 测得的值为  $0.44 \Omega$  并保持不变。对于电感的计算, 首先, 需要获得计算所需的信号值, 通过传感器测得电流、相角和转子转速, 以及通过逆变器的输出电压获得电压。其次, 利用  $dq0$  同步框架中正常的永磁同步电动机电压模型方程和定子电阻、电流、电压、相角和转子速度的测量值, 计算  $L_d$ ,  $L_q$  和  $L_{ls}$ 。最后, 在每个运行点通过  $L_{ms} = (L_d + L_q - 2L_{ls})/3$  计算得到  $L_{ms}$ 。

本试验使用正常和有故障的永磁同步电机在各种运行条件下进行。第 1 种运行情况为转子转速在恒负载转矩为  $4 \text{ N}\cdot\text{m}$  的情况下变化, 如图 2 所示。第 2 种运行情况如图 3 所示, 在 1 000 r/min, 2 000 r/min, 3 000 r/min, 4 000 r/min 和 4 500 r/min 转子速度下负载转矩分别发生变化。

文中匝间短路故障的程度通过表 1 和表 2 中的  $\mu$  和  $R_f$  来表现,  $\mu \in [0.042, 0.125]$ ,  $R_f \in [0.361,$

2.218]。其中, 当  $\mu=0.042$ ,  $R_f=2.128 \Omega$  时为极度轻微匝间短路故障; 当  $\mu=0.125$ ,  $R_f=0.361 \Omega$  时为最严重匝间短路故障。本文一共测试了 12 种匝间短路故障的情况。

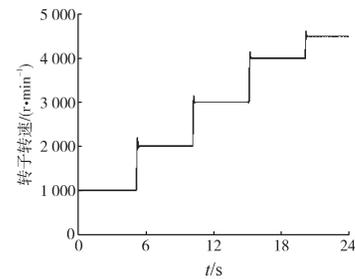


图2 当负载转矩为  $4 \text{ N}\cdot\text{m}$  时转子转速的变化

Fig.2 Change of the rotor speed when the load torque is  $4 \text{ N}\cdot\text{m}$

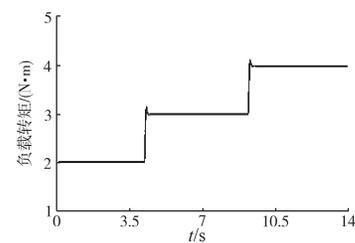


图3 当转子转速分别为 2 000 r/min, 3 000 r/min, 4 000 r/min, 和 4 500 r/min 时负载转矩的变化

Fig.3 Change of the load torque when the rotor speed is 2 000 r/min, 3 000 r/min, 4 000 r/min, and 4 500 r/min respectively

表1 用  $\mu$  表示的匝间短路故障的情况

	极度轻微	轻微	严重
$\mu$	0.042	0.083	0.125

表2 用  $R_f$  表示的匝间短路故障的情况

	极度轻微	轻微	中度	严重
$R_f/\Omega$	2.218	1.113	0.606	0.361

### 3.2 试验结果

#### 3.2.1 故障电流和转子转速的关系

图 4 是在恒定转子转速下, 轻微匝间短路故障以及最严重的匝间短路故障时的故障电流和转子转速之间的关系。从图 4a 中可知, 故障电流与转子转速成正比; 而图 4b 显示故障电流与转子转速不再呈线性正比的关系。试验结果与 2.1 节中讨论的内容相一致。

#### 3.2.2 转子转速变化的情况

图 5 是与图 2 相同条件下故障指示器的波形, 波形在前 100 个样本中使用移动平均滤波器得到。虚线表示利用  $\mu$  与测得的  $I_f$  和  $\omega_m$  通过式

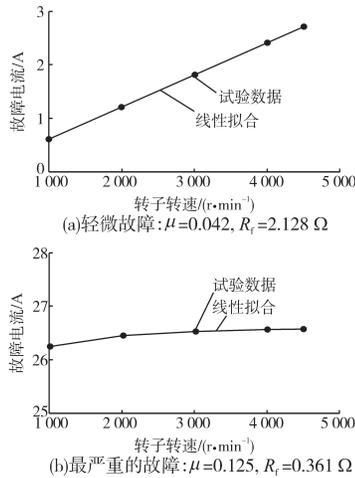


图4 永磁同步电机故障电流  
Fig.4 Measured fault current of a PMSM

(11)得到的理论值,实线表示通过负序分量的方法得到式(23)的估计值。从图5中可知,由于实线与虚线表达出良好的一致性,则负序的方法可以正确地估计理论值。

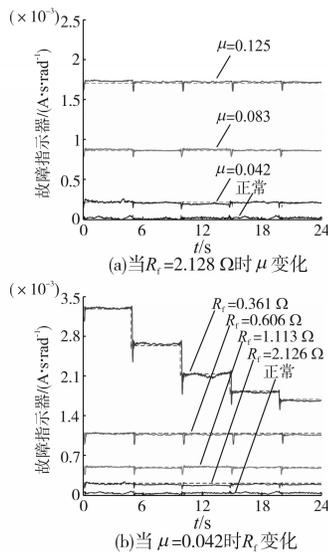


图5 转子转速变化下的故障指示器波形  
Fig.5 Fault indicator with varying rotor speed

在图5a中,故障指示器的波形在转子转速变化的情况下仍保持了鲁棒性。正常状态下故障指示器的波形趋近于0且随着 $\mu$ 的增加而增加,即故障指示器在永磁同步电机正常状态下的值接近于0,但它随着匝间短路故障的严重程度的增加而增加,并且本文的指标能够清楚地识别轻微故障( $\mu = 0.042$ )和正常状态。

图5b为 $R_f$ 变化情况下的波形。在轻微的匝间短路故障中,故障指示器与图5a有相似的趋势,而图5b的 $R_f=0.361 \Omega$ 虚线表明故障指示器的

波形不能保持恒定值。正如第2节所述,本文的结果表明该故障指示器能够有效地诊断轻微匝间短路故障。

### 3.2.3 变负载转矩情况

图6为负载转矩变化时的故障指示器。因为转子速度是固定的,所以故障指示器的波形不随负载转矩的变化而变化,但可以观察到,随着 $\mu$ 的增加(见图6a)或 $R_f$ 减小(见图6b),故障指示器波形的幅值增加。以上的现象证实了在2.1节中描述的故障指示器的特征。同样在图6中,可以清楚地区分轻微匝间短路故障( $\mu = 0.042, R_f = 2.128 \Omega$ )以及正常状态的情况。这说明了即使在负载转矩变化的情况下,永磁同步电机匝间短路故障的早期诊断也是可行的。

图6c为在与图3相同条件下发生轻微匝间短路故障呈现的故障指示器波形。由图6c可知,在1000 r/min,2000 r/min,3000 r/min,4000 r/min和4500 r/min的转速下波形仍旧保持鲁棒性。图5和图6的结果说明了提出的故障指示器可诊断早期匝间短路故障,并且它对转子转速的变化具有鲁棒性,它仅在 $\mu$ 和 $R_f$ 变化时发生变化。

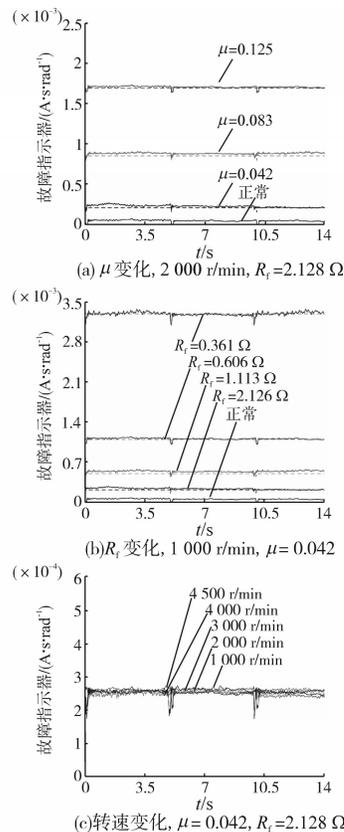


图6 负载转矩变化时的故障指示器  
Fig.6 Fault indicator with varying load torque

### 3.2.4 与零序分量法的比较

为了验证提出的负序分量方法的有效性,本文将其与零序分量法进行了比较,如图7所示。当采用零序分量的方法后,故障指示器的波形(图7中的实线)不能估计理论值(图7中的虚线),远达不到图5中使用负序分量法的效果。

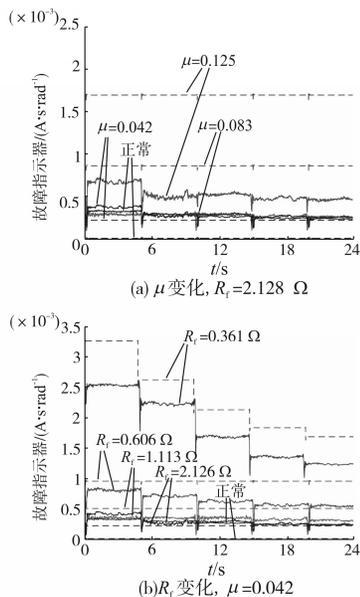


图7 在转速变化下使用零序分量法得到的故障指示器

Fig.7 Fault indicator using the ZSC method with varying rotor speed

此外,如图7所示,在匝间短路故障中使用零序分量方法,随着 $\mu$ 的增加或者 $R_r$ 的减小都使波形产生了堆叠,这说明了零序分量无法诊断匝间短路故障的程度。因此,使用零序分量的方法无法区分正常状态和轻微匝间短路故障,而如图5所示的使用负序分量的方法可以清楚地区分出这2种状态。

## 4 结论

本文通过在永磁同步电机转子转速变化条件下使用负序分量法来对匝间短路故障进行早期的诊断。分析了具有各种程度的匝间短路故障的串联绕组永磁同步电动机的故障电压方程,确定了早期匝间短路故障的情况,并提出了一个在轻微匝间短路故障下不受转子转速变化影响的故障指示器。此外,通过使用负序分量法得到了故障指示器的计算表达式,并对其有效性进行了评价。使用推导出的表达式检测出了轻微匝间短路故障以及故障程度,并且所提出的早期

诊断方法在不同的匝间短路故障情况、转子转速和负载转矩下都进行了试验验证。试验结果表明,本文提出的方法能够有效诊断早期匝间短路故障。

### 参考文献

- [1] 张志艳,马宏忠,钟钦,等. 永磁同步电机不对称运行负序分量特性分析[J]. 电测与仪表, 2014, 51(16): 46-50.
- [2] 张志艳,马宏忠,赵剑镠,等. 基于负序分量和模糊逻辑相融合的永磁同步电机定子不对称故障诊断[J]. 电机与控制应用, 2014(6): 64-68.
- [3] Gu Bon-Gwan, Choi Jun-Hyuk, Jung In-Soung. Development and Analysis of Interturn Short Fault Model of PMSMs with Series and Parallel Winding Connections [J]. IEEE Trans. on Power Electron., 2014, 29(4): 2016-2026.
- [4] 梁伟铭,陈诚,任纪良,等. 永磁同步电机定子匝间短路故障诊断的研究现状及发展趋势[J]. 微电机, 2013, 46(2): 1-4.
- [5] De Angelo C H, Bossio G R, Giaccone S J, et al. Online Model-based Stator-fault Detection and Identification in Induction Motors [J]. IEEE Trans. on Ind. Electron., 2009, 56(11): 4671-4680.
- [6] 郭明明,杨瑞峰,张鹏,等. 永磁同步电机抗扰控制技术优化设计[J]. 电测与仪表, 2017, 54(10): 94-98.
- [7] Kim K H. Simple Online Fault Detecting Scheme for Short-circuited Turn in a PMSM Through Current Harmonic Monitoring [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(6): 2565-2568.
- [8] 王耀南,陈维. 无速度传感器的感应电机神经网络鲁棒自适应控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(33): 92-98.
- [9] 苟旭丹. 基于 Hilbert 模量与改进 BP 神经网络的电机转子断条故障诊断[J]. 电测与仪表, 2018, 55(3): 55-58.
- [10] 孙丹,贺益康,智大为. 基于模糊逻辑的永磁同步电动机直接转矩控制[J]. 电工技术学报, 2003, 18(1): 33-38.
- [11] 高凯,吴成琦. 基于神经网络的发电机定子模型线棒放电模式识别的研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(10): 64-67.
- [12] 宋珂,戴鹏,袁庆庆,等. 基于静态频域法的电励磁同步电机参数辨识[J]. 电测与仪表, 2012, 49(2): 32-36.
- [13] Sarikhani A, Mohammed O A. Inter-turn Fault Detection in PM Synchronous Machines by Physics-based Back Electromotive Force Estimation [J]. IEEE Trans. on Ind. Electron., 2013, 60(8): 3472-3484.
- [14] 王苏,崔杨,冯东东. 不对称故障下双馈感应发电机转子电压分析[J]. 电测与仪表, 2014, 51(13): 42-46.