

匝间短路故障对永磁同步电机定子侧电流影响分析

张鹏, 赵国新*, 崔效源, 赵欣媛
(沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

Analysis of the Effect of Inter-Turn Short-Circuit Fault on the Stator Current of Permanent Magnet Synchronous Motor

ZHANG Peng, ZHAO Guoxin*, CUI Xiaoyuan, ZHAO Xinyuan

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: The inter-turn short-circuit (ITSC) fault of stator winding is one of the most common faults of permanent magnet synchronous motor (PMSM). A large current will be generated in the shorted portion of the winding when the fault occurs, which will pose a great threat to the safe operation of PMSM. In order to diagnose the ITSC fault, the effect of ITSC fault on the stator current of PMSM is analyzed. The stator currents of PMSM with different ITSC faults are obtained by finite element simulation and experimental measurements. And the effect of ITSC fault on stator current of PMSM is analyzed by current imbalance, negative-sequence current, and wavelet energy spectrum. The analysis results show that with the increase of short-circuited turns and the decrease of contact resistance, the current imbalance, negative-sequence current, and the energy gradient of D1 in wavelet energy spectrum increase. Thus, the increase of these three indicators can be used as the basis for diagnosing the ITSC fault.

Key words: permanent magnet synchronous motor; inter-turn short-circuit fault; current imbalance; negative-sequence current; wavelet energy spectrum

摘要: 定子绕组的匝间短路故障是永磁同步电机最为常见的故障之一,故障发生时被短路部分绕组中将会产生较大的电流,这将对电机的安全运行造成巨大威胁。为实现匝间短路的故障诊断,将分析匝间短路故障对电机定子侧电流的影响。通过有限元仿真和试验测试获取不同匝间短路严重程度下的定子侧电流,从电流不平衡度、负序电流和小波能量谱三个角度分析匝间短路故障

对电机定子侧电流的影响。分析结果表明,当短路匝数增加、故障点接触电阻减小时,电流不平衡度、负序电流和小波能量谱中的D1频段能量变化率都将增大。因此,这三个指标的增加可以作为匝间短路故障的判断依据。

关键词: 永磁同步电机; 匝间短路故障; 电流不平衡度; 负序电流; 小波能量谱

0 引言

与传统感应电机相比,永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)因具有结构较为紧凑、输出转矩相对较大以及效率较高等^[1]诸多优点,而被广泛应用于电动汽车、飞机和风力发电等^[2]领域。然而,在电机实际运行过程中可能受到诸多内部和外部不利因素的影响^[3],有可能引起定子绕组匝间短路故障、永磁体失磁故障以及转子偏心故障,其中匝间短路故障发生的频率较高^[4]。如果不能在匝间短路故障初期发现故障并采取相应的措施,将会导致电机烧毁甚至危及人身安全。因此对匝间短路故障时定子侧电流特征的分析是十分重要的。

国内外学者针对永磁同步电机匝间短路故障提出了多种分析和诊断方法。文献[5]将电机正常运行时和匝间短路故障时定子电流进行谐波分析和对比,并以5次谐波的含量作为判断匝间短路故障的依据;此外,文献[6-7]也采用快速傅里叶分析的方法对故障进行分析。文献[8]建立了匝间短路故障时永磁电机的数学模型,通过仿真发现当电机发生匝间短路故障时,故障相的相电流将会增大,并且故障相中谐波也会增大。文献[9]在在线检测

基金项目: 国家自然科学基金(51407119)
National Natural Science Foundation of China (51407119)

和离线检测方法的基础上,提出了一种新型匝间短路故障检测算法,该算法在不同转速下都有很好的辨识度。文献[10]在匝间短路故障时永磁电机定子绕组等效电路的基础上,对电机的有限元模型进行瞬态分析和参数化分析,分析了匝间短路故障对电机输出转矩和电流的影响。文献[11]分析了匝间短路故障对电机反电势的影响,并以此为特征量对匝间短路故障进行诊断;文献[12-13]也通过反电势对匝间短路故障进行研究。文献[14]利用小波分析的理论,分析定子电流各个小波频段能量的均方根值,并以特征频段能量的变化为依据进行故障检测。文献[15]采用改进小波包变换消除频谱干扰,将电流信号和振动信号的频谱特征融合作为故障诊断的依据。文献[16]将变分模态分解引入匝间短路故障的诊断中,对零序电压进行分析从而实现故障诊断。

为分析匝间短路故障对永磁同步电机定子侧电流的影响,本文以一台 12 槽 10 极的永磁电机为例,基于有限元仿真的方法,建立无故障和匝间短路故障下电机的模型。通过仿真获取不同短路匝数、不同接触电阻下电机定子侧的电流,并从电流不平衡度、负序电流和小波能量谱三个角度分析匝间短路故障对电机定子侧电流的影响,最后通过试验进行验证。

1 永磁电机有限元模型

为分析匝间短路故障对永磁同步电机定子侧电流的影响,本文基于 Ansys Maxwell 电磁场仿真软件进行研究,分别建立匝间短路故障前后的永磁同步电机二维模型,通过仿真分析得到定子侧电流的波形数据。

1.1 无故障时电机模型

本文选取一台 12 槽 10 极永磁同步电机进行仿真分析,无故障时电机的有限元模型如图 1 所示,电机参数如表 1 所示。

表 1 永磁同步电机参数

Tab. 1 Parameters of PMSM

参数名称	参数值
额定功率/W	500
额定电压/V	60
额定电流/A	6
额定转速/(r·min ⁻¹)	2 000
每槽、相绕组匝数	18、72
极对数	5



图 1 无故障时永磁同步电机有限元模型

Fig. 1 Finite element model of PMSM without fault

电机转速或负载变化时,匝间短路故障对定子侧三相电流的影响趋势相同,因此仿真时将其固定。通过仿真得到电机以 360 r/min 转速正常运行时定子侧电流的波形,如图 2 所示。通过图 2 可以看出,电机正常运行时电流波形接近正弦波,且各相电流幅值近似相等。

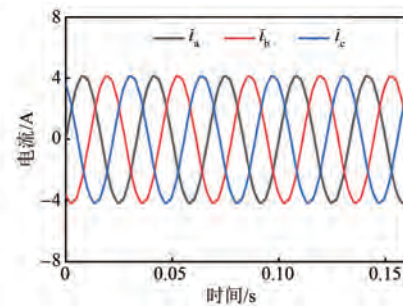


图 2 无故障时永磁同步电机定子侧电流

Fig. 2 Stator current of PMSM without fault

1.2 匝间短路故障时电机模型

假定匝间短路故障发生在 A 相,由于匝间短路故障的发生,在仿真时需要有限元模型进行修改,修改后的有限元模型如图 3 所示。图中,黑色部分绕组为被短路部分绕组。

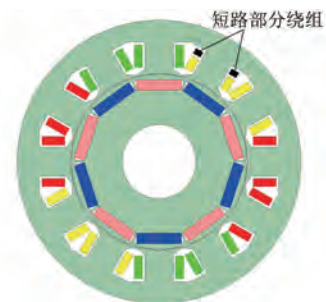


图 3 匝间短路故障时永磁同步电机有限元模型

Fig. 3 Finite element model of PMSM with ITSC fault

由于匝间短路故障发生时,故障相中被短路

部分绕组与未被短路部分绕组独立,绕组电压无法直接给定,因此在对其进行仿真时需要采用外电路驱动,外电路如图4所示。

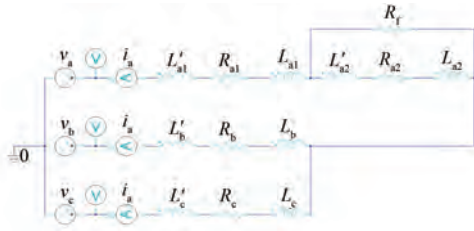


图4 绕组外电路

Fig. 4 External winding circuit

图中: L_{a1} 、 L_{a2} 分别为A相未被短路部分绕组和被短路部分绕组的相电感; R_{a1} 、 R_{a2} 分别为A相

未被短路部分绕组和被短路部分绕组的相电阻; L'_{a1} 、 L'_{a2} 分别为A相未被短路部分绕组和被短路部分绕组端部漏感; L_b 、 L_c 分别为B、C相绕组的相电感; R_b 、 R_c 分别为B、C相绕组的相电阻; L'_b 、 L'_c 分别为B、C相绕组的端部漏感; R_f 为模拟故障点的接触电阻,通过改变 R_f 的阻值可以模拟完全短路和未完全短路的情况。

仿真时将改变电机绕组的短路匝数和故障点的接触电阻以模拟不同的故障情况。短路匝数分别设置为5匝、10匝、15匝,接触电阻 R_f 分别设置为 $0\ \Omega$ 、 $0.03\ \Omega$ 、 $0.07\ \Omega$,仿真得到不同故障情况下永磁电机定子侧电流如图5、图6和图7所示。从图中可以看出,匝间短路故障时定子侧三相电

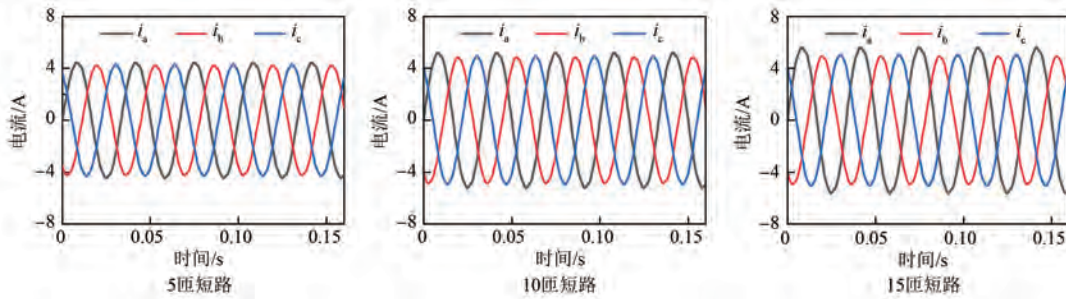


图5 $R_f=0\ \Omega$ 时不同短路匝数下永磁同步电机定子侧的仿真电流

Fig. 5 Simulation stator currents of PMSM with different short-circuit turns when $R_f=0\ \Omega$

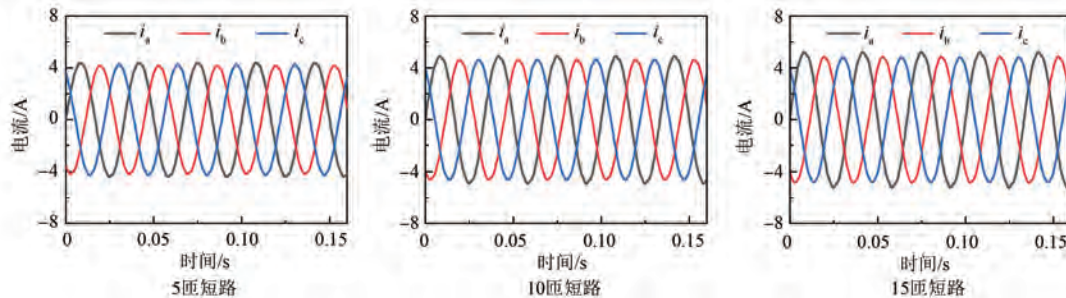


图6 $R_f=0.03\ \Omega$ 时不同短路匝数下永磁同步电机定子侧的仿真电流

Fig. 6 Simulation stator currents of PMSM with different short-circuit turns when $R_f=0.03\ \Omega$

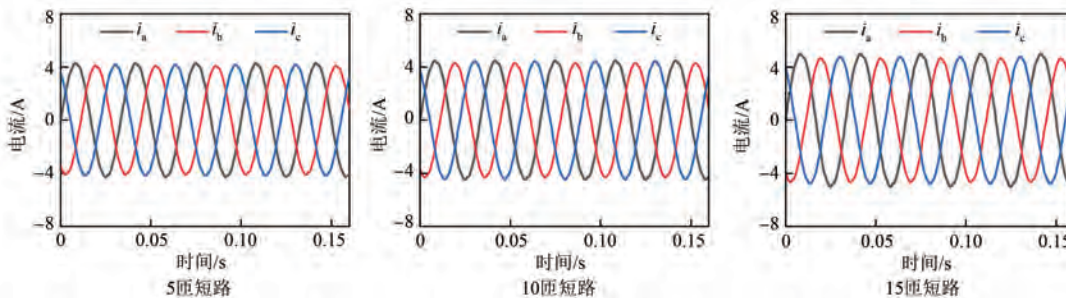


图7 $R_f=0.07\ \Omega$ 时不同短路匝数下永磁同步电机定子侧的仿真电流

Fig. 7 Simulation stator currents of PMSM with different short-circuit turns when $R_f=0.07\ \Omega$

流与无故障时相比在幅值和波形上都有较大变化。

2 匝间短路故障对定子侧电流影响分析

2.1 电流不平衡度分析

当匝间短路故障发生时, 定子侧的三相电流将产生较大偏差, 导致了十分明显的不对称现象。为了便于分析匝间短路故障所导致的偏差, 引入三相电流不平衡度的概念^[17]。电流不平衡度 ε :

$$\varepsilon = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: I_{\max} 、 I_{\min} 分别为三相电流中的最大相电流值和最小相电流值。

不同故障情况下电机定子侧三相电流幅值和电流不平衡度的对比如表 2 所示。

表 2 电流幅值及电流不平衡度

接触电阻/ Ω	0			0.03			0.07			
	5	10	15	5	10	15	5	10	15	
短路匝数/匝	5	10	15	5	10	15	5	10	15	
电流幅值/A	I_a	4.55	5.21	5.62	4.40	4.92	5.23	4.27	4.49	5.00
	I_b	4.24	4.85	4.96	4.22	4.67	4.91	4.14	4.35	4.71
	I_c	4.29	4.92	5.05	4.26	4.64	4.83	4.18	4.45	4.78
不平衡度/%	4.72	6.91	11.74	4.09	5.69	7.65	3.04	3.12	5.80	

从表 2 中可以看出, 当发生匝间短路故障时, 随着短路匝数的增加以及故障点接触电阻的减小, 电流不平衡度将增大。电机无故障运行时, 定子侧三相电流不平衡度仅为 0.24%, 因此电流不平衡度的增加可以作为匝间短路故障诊断的一个依据。

2.2 负序电流分析

电机发生匝间短路故障之后将会进入不对称运行状态, 对于不对称电路的分析可以采用对称分量法, 正负序电流与三相电流之间的关系为^[18]

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 分别为正、负序电流; $\alpha = e^{j120^\circ} = 1 \angle 120^\circ$ 。

不同故障情况下的正、负序电流如表 3 所示。从表中可以看出, 随着短路匝数的增多和故障点

接触电阻的减小, 匝间短路故障将会越发严重, 负序电流将会增大。无故障时负序电流仅为 0.01 A, 因此负序电流的增加可以作为匝间短路故障诊断的一个依据。

表 3 不同匝间短路故障下电机的正负序电流

Tab. 3 Positive and negative sequence current of PMSM with different ITSC faults

接触电阻/ Ω	0			0.03			0.07		
	5	10	15	5	10	15	5	10	15
短路匝数/匝	5	10	15	5	10	15	5	10	15
I_1 /A	4.33	4.99	5.20	4.29	4.74	4.99	4.20	4.43	4.83
I_2 /A	0.13	0.22	0.42	0.11	0.18	0.25	0.08	0.08	0.18

2.3 基于小波能量谱分析

2.3.1 小波变换理论

小波变换的分析方法是一种时频域分析方法, 其基本思想与传统傅里叶变换既有相似也有不同。相似的是两种变换都是将一个信号分解为一族函数的叠加, 不同的是傅里叶变换中所选用的基函数为正弦函数, 而在小波变换中所选用的基函数是由基本小波函数经过平移和伸缩形成的。

对于任意实数空间平方可积的函数 $f(t)$, 对其进行小波变换, 则^[19]:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \zeta\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

式中: $\zeta(t)$ 为小波函数; a 为伸缩因子(或尺度因子); b 为平移因子。

小波变换克服了传统傅里叶变换时频窗固定的不足, 小波变换的时频窗可以根据信号频率的变化而自动做出调整, 在时间上具有很好的定位能力。在处理低频信息时, 由于低频信号的幅值随着时间变化的改变并不明显, 所以采用较宽的时间窗、较窄的频率窗。相反, 在处理高频信息时, 由于高频信号的幅值随着时间变化的改变较为明显, 所以采用较窄的时间窗、较宽的频率窗, 这样使得变换之后的信号更为精确。

2.3.2 小波能量谱

在小波能量谱中, 每个节点的能量占比能够反应原始信号在该频带内的能量占比, 所以可以根据信号在不同频段上能量占比的分布对永磁同步电机匝间短路故障进行分析。

当所选取的小波基函数是一组正交基函数时, 变换前后能量守恒^[20]。定义小波分解后任意

节点的能量为该节点信号的平方和,则:

$$E_j = \sum_k |C_j(k)|^2 \quad (4)$$

信号总能量为

$$E = \sum_j \sum_k |C_j(k)|^2 = \sum_j E_j \quad (5)$$

式中: $C_j(k)$ 为小波系数; j 为分解层数。

小波能量谱可表示为

$$P = \left[\frac{E_{A_j}}{E} \frac{E_{D_j}}{E} \frac{E_{D_{j-1}}}{E} \dots \frac{E_{D_1}}{E} \right] \quad (6)$$

式中: A_j 为分解后第 j ($j = 1, 2, 3 \dots, j$) 层的近似信号; D_j 为分解后第 j 层的细节信号。

2.3.3 基于小波能量谱的分析

选取 coif4 小波为基函数进行小波分析,对无故障和不同匝间短路故障情况的故障相电流进行 5 层分解,计算各个频段的小波能量记为

$$U = [E_{A_5}, E_{D_5}, E_{D_4}, E_{D_3}, E_{D_2}, E_{D_1}] \quad (7)$$

求取各个频段信号的能量总和,则:

$$E_{\text{total}} = E_{A_5} + E_{D_5} + E_{D_4} + E_{D_3} + E_{D_2} + E_{D_1} \quad (8)$$

表 4 小波能量谱及能量变化率

Tab. 4 Wavelet energy spectrum and energy rate index

接触电阻/ Ω	短路匝数/匝	A5	D5	D4	D3	D2	D1	能量变化率/%
∞	0	99.065	0.000 1	0.000 9	0.029 2	0.438 9	0.465 9	—
	5	98.951 5	0.000 1	0.000 8	0.029 1	0.492 7	0.525 8	12.85
0.00	10	98.922 1	0.000 1	0.000 8	0.032 2	0.506	0.538 9	15.66
	15	98.875	0.000 1	0.000 8	0.033 1	0.528 4	0.562 6	20.75
	5	99.028 7	0.000 1	0.000 8	0.029 9	0.456 4	0.484	3.88
0.03	10	98.938	0.000 1	0.000 8	0.030 3	0.498	0.532 8	14.35
	15	98.897 9	0.000 1	0.000 8	0.031 4	0.517 2	0.552 6	18.60
	5	99.065	0.000 1	0.000 8	0.029 4	0.438 3	0.466 3	0.08
0.07	10	98.966 8	0.000 1	0.000 7	0.03	0.486 2	0.516 2	10.79
	15	98.930 6	0.000 1	0.000 8	0.031 7	0.502	0.534 7	14.77

3 试验验证

3.1 试验平台

为验证匝间短路故障对电机定子侧电流的影响,选取一台永磁同步电机进行试验,电机参数如表 1 所示。为了模拟匝间短路故障,对电机定子绕组部分进行重新绕线,在电机绕组不同线圈引出抽头,使用短接线将这些抽头短接可以模拟完全短路的情况,将短接线替换为不同大小的电阻可以模拟未完全短路的情况。重新绕线后的电机如图 8 所示,试验平台如图 9 所示。

由于短路电流的幅值随着电机转速的增加

而增大,在较高转速下过大的短路电流将引起电机的严重发热甚至损坏被测电机,同时为与仿真相对比,在试验进行中将电机转速设置为 360 r/min。

小波能量谱可表示为式(7)与式(8)之比,即 U/E_{total} 。定义故障状态下相对于无故障时能量占比的变化率为

$$S_j = \frac{E_j^* - E_{j0}^*}{E_{j0}^*} \times 100\% \quad (9)$$

式中: E_j^* 为匝间短路状态下某一特征频段的能量占比; E_{j0}^* 为无故障时该特征频段的能量占比。

小波能量谱及不同匝间短路故障时 D1 频段能量相对于无故障时的能量变化率如表 4 所示。

通过表 4 可以看出,当电机无故障时,D1 频段的能量占比相对较低。当匝间短路故障发生之后,D1 频段的能量占比将会增大,且随着短路匝数的增多和故障点接触电阻的减小而增大。与无故障时相比,当匝间短路故障发生时,D1 频段的能量变化明显。因此,小波能量谱中 D1 频段能量占比的增加可以作为判断匝间短路故障的一个依据。

而增大,在较高转速下过大的短路电流将引起电机的严重发热甚至损坏被测电机,同时为与仿真相对比,在试验进行中将电机转速设置为 360 r/min。

3.2 测试结果与分析

3.2.1 定子侧电流测试

通过改变短路匝数、故障点接触电阻来实现不同严重程度匝间短路故障的模拟。试验中分别将短路匝数设置为 5 匝、10 匝、15 匝,故障点接触电阻设置为 0 Ω 、0.03 Ω 、0.07 Ω ,试验测得的无故障时以及匝间短路故障时定子侧电流波形分别如图 10~图 13 所示。

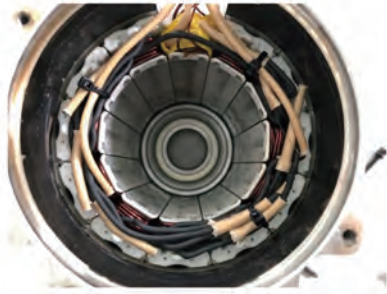


图 8 重新绕线后的电机
 Fig. 8 Re-wound PMSM

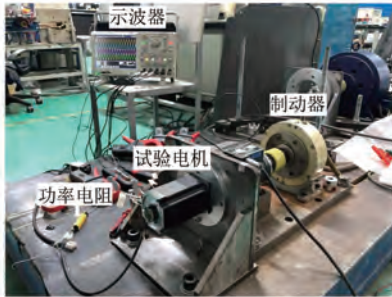


图 9 试验平台
 Fig. 9 Experimental platform

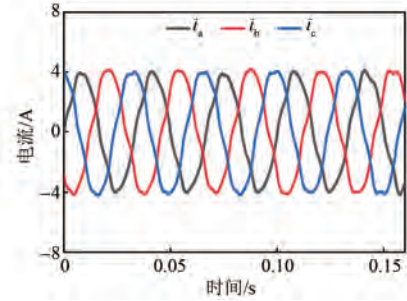


图 10 无故障时电机实测三相电流
 Fig. 10 Three phase currents of PMSM with no fault

3.2.2 电流不平衡度分析

试验中不同故障情况下的电流幅值与电流不平衡度如表 5 所示。

表 5 电流幅值及电流不平衡度试验值

Tab. 5 Experimental current amplitude and imbalance

接触电阻/ Ω	0			0.03			0.07		
短路匝数/匝	5	10	15	5	10	15	5	10	15
电流幅值/ I_a	4.40	5.04	5.5	4.36	4.83	5.18	4.22	4.42	4.9
I_b	4.27	4.75	4.95	4.24	4.57	4.87	4.19	4.36	4.73
I_c	4.30	4.81	5.11	4.24	4.58	4.96	4.18	4.40	4.82
不平衡度/%	2.95	5.75	10.33	2.75	5.38	5.98	0.95	1.36	3.47

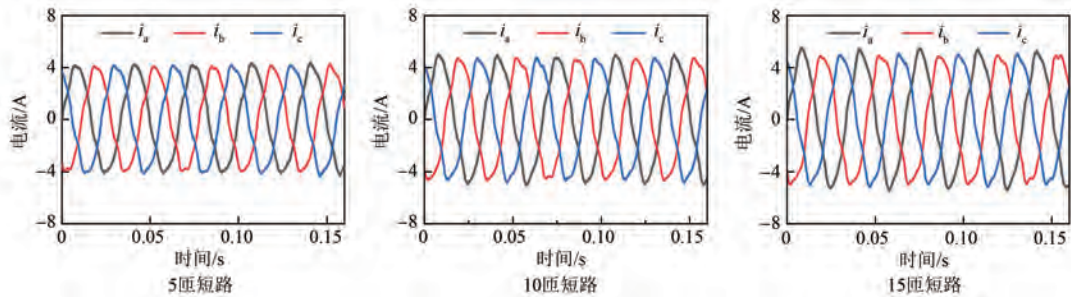


图 11 $R_t = 0 \Omega$ 时不同短路匝数下永磁同步电机定子侧的测试电流

Fig. 11 Test stator currents of PMSM with different short-circuit turns when $R_t = 0 \Omega$

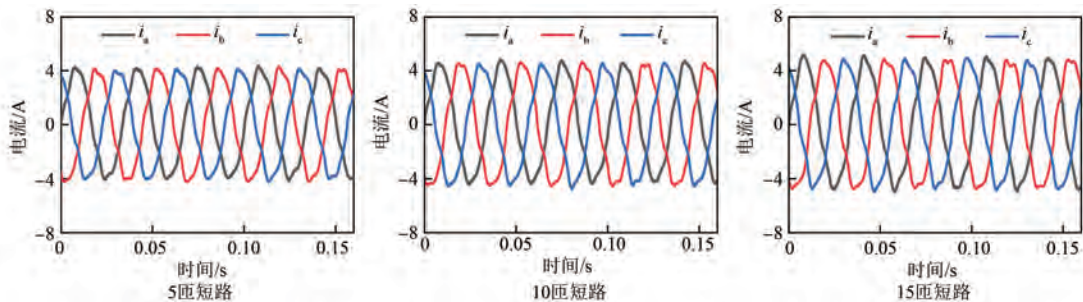


图 12 $R_t = 0.03 \Omega$ 时不同匝数情况下永磁同步电机定子侧的测试电流

Fig. 12 Test stator currents of PMSM with different short-circuit turns when $R_t = 0.03 \Omega$

将不同故障严重程度下电机定子侧三相电流不平衡度的仿真值与试验值对比,如图 14 所示。

从图中可以看出,随着短路匝数的增加以及故障点接触电阻的减小,仿真和试验中的电流不平衡

度都将增大,而无故障时试验中的三相电流不平衡度仅为0.48%。因此可以把电流不平衡度的增

加作为匝间短路故障的判断依据。

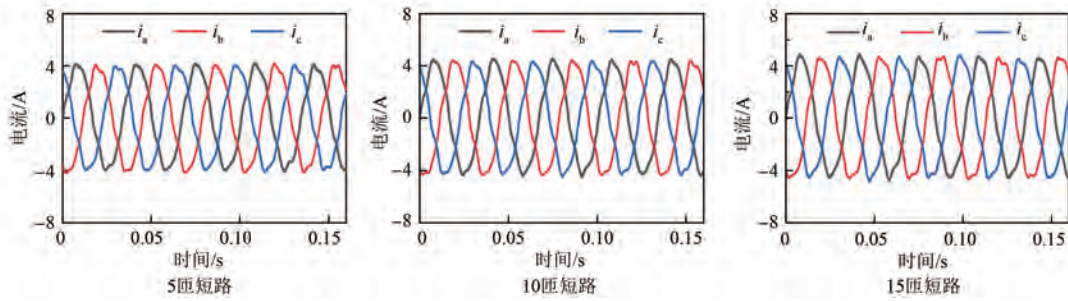


图 13 $R_f = 0.07 \Omega$ 时不同短路匝数下永磁同步电机定子侧的测试电流

Fig. 13 Test stator currents of PMSM with different short-circuit turns when $R_f = 0.07 \Omega$

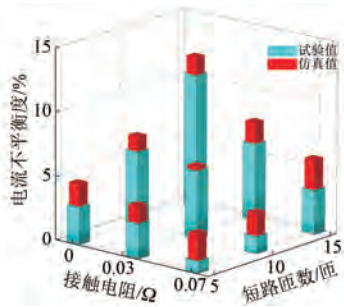


图 14 电流不平衡度对比

Fig. 14 Comparison of current imbalance

3.2.3 负序电流分析

试验中不同故障严重程度下的正负序电流如表 6 所示。

表 6 正负序电流试验值

Tab. 6 Experimental positive and negative sequence currents

接触电阻/ Ω	0			0.03			0.07		
短路匝数/匝	5	10	15	5	10	15	5	10	15
I_1/A	4.32	4.87	5.19	4.28	4.66	5.00	4.20	4.39	4.82
I_2/A	0.08	0.18	0.34	0.08	0.17	0.19	0.02	0.04	0.10

将不同故障情况下负序电流的仿真值和试验值对比,如图 15 所示。从图中可以看出,随着短路匝数的增加以及故障点接触电阻的减小,仿真和试验中的负序电流都将增大。而无故障时试验中的负序电流仅为 0.01 A,因此可以把定子侧负序电流的增加作为匝间短路故障的判断依据。

3.2.4 小波能量谱分析

将试验中无故障和不同匝间短路故障情况下的故障相实测电流数据采用 *coif4* 小波进行 5 层分解,计算各频段的能量占比,形成小波能量谱,

计算不同故障时 D1 频段能量占比相对于无故障时的变化率,如表 7 所示。

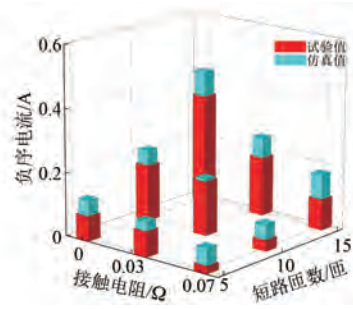


图 15 负序电流对比

Fig. 15 Comparison of negative sequence currents

将不同匝间短路故障严重程度下小波能量谱中 D1 频段的能量变化率进行对比,如图 16 所示。从图中可以看出,随着短路匝数的增加以及故障点接触电阻的减小,仿真和试验中 D1 频段的能量变化率都将增大,因此可以把小波能量谱中 D1 频段能量占比的增加作为判断匝间短路故障的依据。

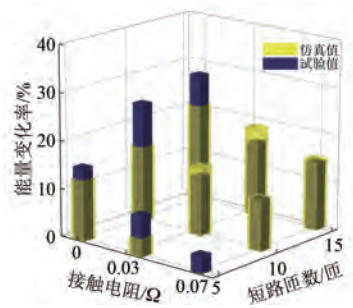


图 16 能量变化率仿真值与试验值对比

Fig. 16 Comparison of simulated and experimental values of energy rate index

表 7 小波能量谱及能量变化率试验值
 Tab. 7 Experimental wavelet energy spectrum and energy rate index

接触电阻/ Ω	短路匝数/匝	A5	D5	D4	D3	D2	D1	能量变化率/%
∞	0	98.865 8	0.001 5	0.001 8	0.014 6	0.533 3	0.583 1	—
	5	98.733 2	0.002 8	0.003 3	0.014 8	0.573 7	0.672 3	15.30
0.00	10	98.689 3	0.001 7	0.002 3	0.023 6	0.555 3	0.727 7	24.81
	15	98.613 9	0.001 6	0.002	0.027 9	0.611 7	0.742 9	27.41
0.03	5	98.672 7	0.004	0.003 3	0.033 8	0.653 7	0.632 7	8.51
	10	98.660 2	0.002 2	0.002 4	0.038 6	0.641 8	0.654 9	12.32
	15	98.69	0.002 5	0.002 1	0.031	0.601 5	0.672 9	15.42
0.07	5	98.591 6	0.003 3	0.002 5	0.046 5	0.751 9	0.604 2	3.63
	10	98.543 1	0.003	0.002 8	0.039 6	0.766 1	0.645 3	10.68
	15	98.527 9	0.003 1	0.002 4	0.050 1	0.75	0.666 4	14.29

4 结语

本文以一台 12 槽 10 极永磁同步电机为研究对象,通过有限元仿真和试验测试获取无故障以及匝间短路故障时电机的定子侧电流,通过电流不平衡度、负序电流和小波能量谱三个角度分析匝间短路故障对电机定子侧电流的影响。仿真和试验结果表明,当短路匝数增加、故障点接触电阻减小时,电流不平衡度、负序电流和小波能量谱中 D1 频段的能量变化率都将增大,可以把这三个指标的增加作为匝间短路故障的判断依据。

参考文献

[1] 吴国沛,余银犬,涂文兵. 永磁同步电机故障诊断研究综述[J]. 工程设计学报, 2021, 28(5): 548-558.
 WU G P, YU Y Q, TU W B. Review of research on fault diagnosis of permanent magnet synchronous motor [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2021, 28(5): 548-558.

[2] 徐奇伟,孙静,杨云,等. 用于混合动力车的复合结构永磁电机电磁优化设计[J]. 电工技术学报, 2020, 35(增刊 1): 126-135.
 XU Q W, SUN J, YANG Y, et al. Electromagnetic optimization design of compound-structure permanent-magnet motor for hybrid electric vehicle [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S1): 126-135.

[3] 付彦伟,余建生,易建波. 永磁同步电机匝间短路故障匝数诊断方法[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(9): 42-48.
 FU Y W, YU J S, YI J B. Diagnosis method of turns of permanent magnet synchronous motor for inter-turn

short-circuit fault [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(9): 42-48.

[4] 魏东,刘侃,丁荣军,等. 基于多重同步压缩变换的永磁同步电机初期匝间短路故障检测[J]. 电工技术学报, 2022, 37(18): 4651-4663.
 WEI D, LIU K, DING R J, et al. A multi-synchrosqueezing transformation based early stage detection of inter-turn short circuit fault in permanent magnet synchronous machine [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(18): 4651-4663.

[5] 罗利祥. 永磁同步电机匝间短路故障特征量的分析[J]. 微电机, 2018, 51(7): 24-28.
 LUO L X. Analysis of inter-turn short-circuit fault characteristics of permanent magnet synchronous machines [J]. Micromotors, 2018, 51(7): 24-28.

[6] ZAFARANI M, BOSTANCI E, QI Y, et al. Inter-turn short circuit faults in permanent magnet synchronous machines: An extended review and comprehensive analysis [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(4): 2173-2191.

[7] ROSERO J A, ROMERAL L, ORTEGA J A, et al. Short-circuit detection by means of empirical mode decomposition and Wigner-Ville distribution for PMSM running under dynamic condition [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(11): 4534-4547.

[8] 周光亮,吴钦木. 永磁同步电机匝间短路故障电流分析[J]. 智能计算机与应用, 2020, 10(11): 56-60.
 ZHOU G L, WU Q M. Vector control of PMSM based on PI regulator [J]. Intelligent Computer and Applications, 2020, 10(11): 56-60.

- [9] 陈慧丽,李杰. 永磁同步电机匝间短路故障检测技术研究[J]. 微特电机, 2017, 45(9): 41-48.
CHEN H L, LI J. Interturn short-circuit fault diagnosis technology for permanent magnet synchronous motor [J]. Small & Special Electrical Machines, 2017, 45(9): 41-48.
- [10] 王延峰,赵剑锸,黄建波,等. 永磁同步电机定子匝间短路故障阻抗参数分析[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(2): 105-109.
WANG Y F, ZHAO J E, HUANG J B, et al. Impedance parameters analysis of permanent magnet synchronous motor under inter-turn short circuit fault [J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(2): 105-109.
- [11] SARIKHANI A, MOHAMMED O A. Inter-turn fault detection in PM synchronous machines by physics-based back electromotive force estimation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 3472-3484.
- [12] 陈昊,张楠,高彩霞,等. 永磁同步电机匝间短路故障短路线圈定位方法[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(3): 124-134.
CHEN H, ZHANG N, GAO C X, et al. Fault coil location approach of permanent magnet synchronous motor with interturn short circuit fault [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(3): 124-134.
- [13] QI Y, ZAFARANI M, GURUSAMY V, et al. Advanced severity monitoring of interturn short circuit faults in PMSMs [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(2): 395-404.
- [14] 王芳. 基于小波分析永磁同步电机匝间短路故障检测[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 2019, 43(2): 123-128.
WANG F. The inter-turn short circuited fault detection based on wavelet analysis in PMSM [J]. Journal of Hebei Normal University (Natural Science), 2019, 43(2): 123-128.
- [15] 陈勇,梁洪,王成栋,等. 基于改进小波包变换和信号融合的永磁同步电机匝间短路故障检测[J]. 电工技术学报, 2020, 35(1): 228-234.
CHEN Y, LIANG H, WANG C D, et al. Detection of stator inter-turn short-circuit fault in PMSM based on improved wavelet packet transform and signal fusion [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(1): 228-234.
- [16] 茅宇,杨刘,颜亮亮,等. 基于VMD的永磁同步电机初期匝间短路故障检测方法[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(9): 66-74.
MAO Y, YANG L, YAN L L, et al. Detection method of incipient inter-turn short circuit fault of PMSM based on VMD [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(9): 66-74.
- [17] 吕新东,单强,刘辉,等. 三相不平衡对剩余电流保护器误动的影响分析[J]. 工业仪表与自动化装置, 2022, 2: 81-85.
LV X D, SHAN Q, LIU H, et al. Analysis of mal-operation of residual current device arose by three-phase imbalance [J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2022, 2: 81-85.
- [18] 季宇,卢琴芬. 空心永磁直线同步电机推力波动分析[J]. 微电机, 2023, 56(2): 1-6+11.
JI Y, LU Q F. Thrust ripple analysis of ironless permanent magnet linear synchronous motor [J]. Micromotors, 2023, 56(2): 1-6+11.
- [19] 王阳光,徐民,邓小亮,等. 基于小波变换的随机森林模型风力发电预测方法[J]. 电工技术, 2021, (8): 48-50+52.
WANG Y G, XU M, DENG X L, et al. Random forest model of wind power forecasting based on wavelet transform [J]. Electric Engineering, 2021, (8): 48-50+52.
- [20] 吴昊,肖先勇,沈睿佼. 小波能量谱和神经网络法识别雷击与短路故障[J]. 高电压技术, 2007, 33(10): 64-68.
WU H, XIAO X Y, SHEN R J. Lightning strike and fault identification by the wavelet energy spectrum and neural network method [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(10): 64-68.

收稿日期:2024-01-27

收到修改稿日期:2024-03-25

作者简介:

张 鹏(1996-),男,硕士研究生,研究方向为特种电机及其控制系统,1184699014@qq.com;

* 通信作者:赵国新(1979-),男,博士,副教授,研究方向为特种电机及其控制系统,zhaogx@sut.edu.cn。

Analysis of the Effect of Inter-Turn Short-Circuit Fault on the Stator Current of Permanent Magnet Synchronous Motor

ZHANG Peng, ZHAO Guoxin^{*}, CUI Xiaoyuan, ZHAO Xinyuan

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Key words: permanent magnet synchronous motor; inter-turn short-circuit fault; current imbalance; negative-sequence current; wavelet energy spectrum

Permanent magnet synchronous motor (PMSM) has been widely used in our daily work and life due to its merits of simple structure, small size, high efficiency, high power factor and so on. Generally speaking, the motor is a very important part of the electrical drive control system, and the reliability of the motor often determines the reliability of the whole system. However, the motor often operates in complex environments, such as thermal stresses, electrical stresses, mechanical stresses and so on. These factors can lead to inter-turn short-circuit (ITSC) fault, which will reduce the motor performance or even completely damages the motor. Hence, it is very important to analyze the stator current characteristics of PMSM with ITSC fault.

In order to diagnose the ITSC fault, the effect of ITSC fault on the stator current of PMSM is analyzed in this paper.

Firstly, the finite element model of a 12-slot 10-pole PMSM is established. The stator three-phase currents of PMSM with different ITSC fault conditions are obtained by finite element simulation.

Then, the effects of ITSC fault on the stator current of PMSM are analyzed from three perspectives: three-phase current imbalance, negative sequence current and wavelet energy spectrum. The current imbalance is calculated as:

$$\varepsilon = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} \times 100\% \quad (1)$$

where: I_{\max} is the maximum phase current and I_{\min} is the minimum phase current.

The negative sequence current is calculated as:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

where: \dot{I}_1 is the positive sequence current, \dot{I}_2 is the negative sequence current, $\alpha = e^{j120^\circ} = 1 \angle 120^\circ$.

The wavelet energy spectrum is calculated as:

$$\mathbf{P} = \left[\frac{E_{A_j}}{E} \quad \frac{E_{D_j}}{E} \quad \frac{E_{D_{j-1}}}{E} \dots \frac{E_{D_1}}{E} \right] \quad (3)$$

where: E_{A_j} , E_{D_j} , $E_{D_{j-1}} \dots E_{D_1}$ are the energy of each frequency band after wavelet analysis, E is the total energy of the signal.

Finally, the characters that can respond to ITSC fault are analyzed and verified by experiments.

The analysis results show that with the increase of short-circuited turns and the decrease of contact resistance, the current imbalance, negative-sequence current, and the energy gradient of D1 in wavelet energy spectrum increase. Thus, the increase of these three indicators can be used as the basis for diagnosing the ITSC fault.