



基于阶跃激励响应的牵引电机定子 早期匝间短路故障诊断方法

耿民¹, 秦嘉翼², 刘明杰³, 张川宝⁴, 王喜莲²

(1. 中车唐山机车车辆有限公司 动车检修部, 河北 唐山 063035;

2. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044;

3. 中国铁路济南局集团有限公司, 山东 济南 250000;

4. 唐山工业职业技术学院, 河北 唐山 063020)

摘要: 为了实现对牵引电机定子绕组匝间短路早期故障的可靠诊断, 文章提出了一种基于阶跃激励稳态响应电流的故障诊断方法。首先根据牵引电机三相定子绕组匝间短路模型, 对定子绕组任意两相施加阶跃激励, 推导出3种情况下的响应电流表达式, 并依据响应电流稳态值的变化特征提出新的故障特征分量; 然后, 搭建故障电机仿真模型, 分析短路电阻和短路故障严重程度对响应电流的影响, 研究故障特征分量对早期匝间短路故障诊断的有效性与可靠性; 最后搭建试验平台, 分析当电机固有不对称时, 匝间短路故障对故障特征分量的影响。仿真与试验结果表明, 该故障特征分量可以表示早期的匝间短路故障及其严重程度, 并且能滤除电机固有不对称的影响。基于阶跃激励稳态响应电流的诊断方法操作便捷, 结果可靠性高, 对保护牵引系统的安全具有极大意义, 且具备极大的工程应用价值。

关键词: 牵引电机; 定子绕组匝间短路; 故障诊断; 阶跃响应

中图分类号: U264.1; U266.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2024)02-0158-07

0 引言

三相异步电机是交通运输领域中广泛应用的牵引设备。随着现代交通的飞速发展, 电机的单机容量不断增加, 所驱动的负载也越来越复杂^[1]。牵引电机故障不仅会损坏电机本身, 严重时还会使电机突然停机、牵引系统崩溃, 造成巨大的安全隐患。统计数据表明, 定子绕组匝间短路是牵引电机最常见的故障, 占其全部故障数量的38%^[2]。因此, 研究定子匝间短路故障诊断技术以便在牵引电机故障早期及时发现并进行维修, 对于交通系统的安全具有重大的理论意义和社会经济

效益。

目前, 国内外针对牵引电机定子绕组匝间短路故障已展开许多研究。由于电机定子绕组匝间短路故障为不对称故障, 会引起电机气隙磁场不平衡, 从而在定子电流中产生负序分量, 因此定子负序电流可以作为故障特征量表示匝间短路故障。文献[3-4]通过有限元模型仿真和试验验证了分析负序电流可以有效诊断电机定子绕组匝间短路故障, 同时发现负序电流对负载变化具有鲁棒性。为了克服电压不平衡的问题, 国内外许多学者提出了与阻抗相关的特征分量, 阻抗抗与电机固有特性有关, 受工况影响较小。文献[5-6]选择负序视在阻抗作为故障特征值, 该方法对电压不平

通信作者: 王喜莲, 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为开关磁阻电机、无轴承电机及其控制, 电机故障诊断;

E-mail: xlwangl@bjtu.edu.cn

引用格式: 耿民, 秦嘉翼, 刘明杰, 等. 基于阶跃激励响应的牵引电机定子早期匝间短路故障诊断方法[J]. 机车电传动, 2024(2): 158-164.

DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.142.

Citation: GENG Min, QIN Jiayi, LIU Mingjie, et al. Diagnosis of early turn-to-turn short-circuit faults of traction motor stators based on step excitation response[J]. Electric drive for locomotives, 2024(2): 158-164. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.142.

衡具有鲁棒性, 但是易受故障初期系统固有不对称及负载变化的影响。文献[7-8]引入序阻抗的不对称矩阵, 提出了基于序阻抗矩阵的故障诊断方法。文献[9]基于前述已经推导的序分量数学模型, 将正序阻抗角作为故障辨识的参数, 并设置合理的阈值, 对电压不平衡具有鲁棒性, 提高了故障辨识的精度, 但是该方法需要大量的试验数据作为支撑, 实现较为困难。此外, 随着计算机和信号处理技术的发展, 基于信号监测的诊断方法也颇受学者们的关注。文献[10]对电机故障后的定转子电流进行了快速傅里叶分析, 总结了不同程度故障时电流的谐波变化规律, 提出可通过监测特定频率信号实现故障诊断。文献[11]采用与差分算法结合的Prony算法对转子电流进行频谱分析, 避免了傅里叶分析中的频谱泄露。文献[12]对定子、转子电流进行基于总体平均经验模态分解的希尔伯特黄变换, 由电压不平衡和匝间短路所呈现的结果不同, 判断是否发生匝间短路故障。文献[13]应用小波分析处理风力发电系统中双馈感应发电机的转子电流, 验证了小波分析在时变条件下仍然具有良好的故障诊断能力。但上述频谱分析技术不仅算法复杂, 而且具有各自的局限性, 如傅里叶分析的频谱泄露、经验模态分解中的模态混叠、小波分析时小波基函数的选择等。文献[14]采用Park's 矢量法对定子电流进行分析, 求取变换后的相量模值并进行频谱分析, 通过检测其2倍基频分量来判定电机是否发生故障, 然而该方法同样受电源电压不平衡和电机结构不对称的影响, 且矢量圆的畸变程度在故障初期较小, 难以检测。文献[15]提出将Park's 矢量轨迹椭圆度作为故障特征量, 分析了该特征值和负序电流的关系, 运用非线性最小二乘法滤除了定子电压不平衡和负载变化的影响, 可以精确辨识早期故障, 但是该方法受图像识别精度等因素影响, 容易导致误判和漏判。为克服电机运行工况对故障诊断的影响, 文献[16]提出利用驱动器在线输出等效单相激励, 通过分析定子侧三相响应电流的特征, 提出将特征矢量作为故障特征值进行匝间短路故障的诊断, 并通过试验验证了该方法的有效性和可靠性。但该方法需要测量的电流参数众多, 且需要进行矢量变换得到特征值, 计算过程较为复杂, 容易增大误差。

针对上述问题, 本文将提出一种基于阶跃激励响应电流稳态值的故障诊断方法。在电机静止时, 串联定子三相中的任意两相, 利用直流电源输入阶跃激励, 分析电路中响应电流的特点, 提出与响应电流相关的故障特征分量, 通过仿真与试验验证了该方法对发现早期匝间短路故障的有效性和可靠性。与传统的故障诊断方法相比, 该方法操作简单, 无须复杂的硬件设备, 且能有效滤除电机固有不对称的干扰, 实现牵引电机早期匝间短路故障的可靠诊断, 具有极大的应用价值。

1 电流谐波分析

1.1 故障相为被激励相

假设电机定子绕组为星形接线, A相发生匝间短路故障, 将定子三相中任意两相串联后添加阶跃激励, 另一相开路, 由此产生3种连接方式, 即A相与B相串联, A相与C相串联, B相与C相串联。其中, A相与B相串联、C相开路的等效电路如图1所示。此时的响应电流记为 i_{AB} , U 为阶跃激励的电压大小。

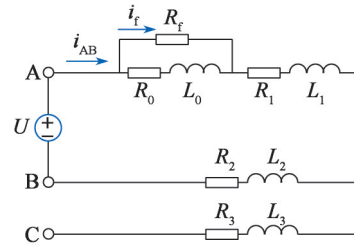


图1 故障相为被激励相的等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit where the fault phase is the excited phase

根据电路结构, 可以得到其电压方程如下:

$$\left. \begin{aligned} U &= (R_0 + pL_0)(i_{AB} - i_f) + M_{01}pi_{AB} - M_{02}pi_{AB} + \\ &\quad (R_1 + pL_1)i_{AB} + M_{10}p(i_{AB} - i_f) - M_{12}pi_{AB} + \\ &\quad (R_2 + pL_2)i_{AB} - M_{10}p(i_{AB} - i_f) - M_{21}pi_{AB} \\ 0 &= (R_0 + pL_0)(i_{AB} - i_f) + M_{01}pi_{AB} - M_{02}pi_{AB} - R_f i_f \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: p 为微分算子; R_0 为A相绕组被短路部分的电阻; R_1 为A相绕组未被短路部分的电阻; R_f 为短路电阻; R_2 、 R_3 分别为定子B相、C相电阻; $M_{ij}(i=0,1,2,3, j=0,1,2,3)$ 为各支路之间的互感; i_f 为短路支路电流。

根据绕组函数法, 可得上述各电路参数为:

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= (1 - \mu)R_s \\ R_0 &= \mu R_s \\ R_2 &= R_3 = R_s \\ L_1 &= (1 - \mu)L_{ls} + (1 - \mu)^2 L_{ms} \\ L_0 &= \mu L_{ls} + \mu^2 L_{ms} \\ L_2 &= L_3 = L_{ls} + L_{ms} \\ M_{01} &= M_{10} = \mu(1 - \mu)L_{ms} \\ M_{02} &= M_{20} = M_{03} = M_{30} = -\mu L_{ms}/2 \\ M_{12} &= M_{21} = M_{13} = M_{31} = -(1 - \mu)L_{ms}/2 \\ M_{23} &= M_{32} = -L_{ms}/2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: R_s 为定子电阻; L_{ls} 为定子漏感; L_{ms} 为定子励磁电感; μ 为短路系数, 即短路匝数与A相总匝数的比值。

求解式(1)可得以响应电流 i_{AB} 和短路电流 i_f 为变量的微分方程组:

$$\left. \begin{aligned} \tau_s pi_{AB} + i_{AB} + K_f i_f &= I_m \\ \tau_f pi_f + i_f &= I_f \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \tau_s &= (L_{1s} + 1.5L_{ms})/R_s \\ \tau_f &= [(2-\mu)L_{1s} + 0.5\mu L_{ms}] / [2R_f/\mu + (2-\mu)R_s] \\ I_m &= U(L_{1s} + \mu L_{ms}) / [R_s((2-\mu)L_{1s} + 0.5\mu L_{ms})] \\ I_F &= U / [2R_f/\mu + (2-\mu)R_s] \\ K_F &= [R_f\tau_s - \mu(\mu - 1.5)L_{ms}] / [(2-\mu)L_{1s} + 0.5\mu L_{ms}] \end{aligned} \right\} (4)$$

式中: τ_s 为定子时间常数; τ_f 为短路时间常数; I_m 为定子电流激励; K_F 为等效短路系数; I_F 为故障电流激励。

由于定子时间常数远大于短路时间常数, 故可以独立求解式(3)中第二行的解:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} i_f = \lim_{t \rightarrow \infty} I_F (1 - e^{-t/\tau_f}) \approx I_F \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)可得响应电流表达式为

$$i_{AB} = (I_m - K_F i_f) (1 - e^{-t/\tau_s}) \quad (6)$$

定子A相与C相串联, B相开路, 施加阶跃激励后的响应电流记为 i_{AC} 。在理想情况下, 根据电机的对称特性可得

$$i_{AC} = i_{AB} = (I_m - K_F i_f) (1 - e^{-t/\tau_s}) \quad (7)$$

1.2 非故障相为被激励相

将定子B相与C相串联施加激励, A相开路, 响应电流记为 i_{BC} , 等效电路如图2所示。

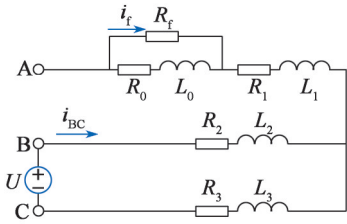


图2 非故障相为被激励相的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit where the non-faulty phase is the excited phase

根据电路结构可得电压方程:

$$U = (R_2 + pL_2)i_{BC} - M_{23}p i_{BC} + (R_3 + pL_3)i_{BC} - M_{32}p i_{BC} \quad (8)$$

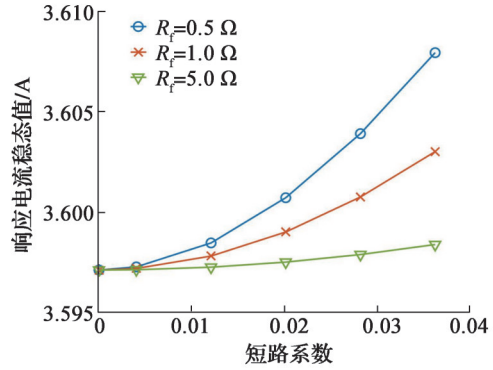
将式(2)代入上式, 求解微分方程可得

$$i_{BC} = (U/2R_s) (1 - e^{-t/\tau_s}) \quad (9)$$

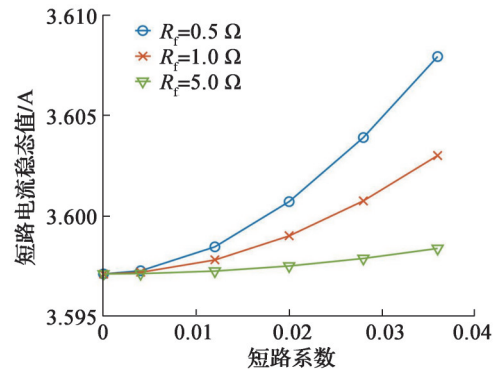
2 故障诊断方法

由式(7)可计算得出故障相为被激励相时的响应电流。由于故障早期定子绝缘未完全损坏, 此时短路电阻 R_f 较大, 对故障诊断的影响不可忽视。当故障相为被激励相时, 不同短路电阻下, 响应电流 i_{AB} (i_{AC}) 及短路电流 i_f 随短路系数的变化如图3所示。

由图3可知, 不同短路电阻下, 响应电流始终随短路系数的增加呈上升趋势。早期故障时, 短路电阻较大, 响应电流随短路系数的上升较为缓慢。由式(9)可知, 非故障相为被激励相时的响应电流 i_{BC} 与故障



(a) 响应电流的变化曲线



(b) 短路电流的变化曲线

图3 不同短路电阻与短路系数时响应电流和短路电流的变化曲线

Fig. 3 Variation curves of response current and short-circuit current with different short-circuit resistances and short-circuit coefficients

无关。

由以上分析可知, 若电机A相故障, 分别给电机A相和B相、A相和C相、B相和C相之间施加阶跃激励, 可以测得3个稳态电流, 其中 i_{AB} 、 i_{AC} 随故障严重程度增加, i_{BC} 始终不变。为了使故障特征分量对故障变化更加灵敏, 定义故障特征分量如下:

$$i_k = \begin{cases} (i_{AB} - i_{BC}) + (i_{AC} - i_{BC}), & \text{if A相故障} \\ (i_{AB} - i_{AC}) + (i_{BC} - i_{AC}), & \text{if B相故障} \\ (i_{AC} - i_{AB}) + (i_{BC} - i_{AB}), & \text{if C相故障} \end{cases} \quad (10)$$

对于理想对称的电机, 无故障时 i_{AB} 、 i_{AC} 及 i_{BC} 的稳态值相等, 即 $i_k = 0$ 。但实际制造的电机很难完全对称, 电机的固有不对称会导致无故障时的3个稳态电流值不相等, 即 $i_k \neq 0$, 将此时的故障特征分量记为 i_{k0} , 则故障诊断时所测的 i_k 应表示为

$$i_k = i_{k0} + i_{k1} \quad (11)$$

式中: i_k 为电机故障诊断时实际所测的总特征分量; i_{k0} 为电机固有不对称导致的特征分量; i_{k1} 为仅由故障引起的故障特征分量。

在故障诊断时, 先计算出电机无故障时的 i_{k0} 并储存, 再测出总的特征分量 i_k , 最后根据式(11)计算可以指示故障的故障特征分量。选取 i_{k1} 作为故障特征分量,

滤除了因电机固有不对称造成的影响, 并且无故障时其值为0, 易于设定预警阈值, 可有效实现异步电机定子早期匝间短路故障的诊断。

3 仿真及试验结果分析

3.1 仿真结果分析

根据异步电机定子绕组匝间短路后的数学模型, 使用SIMULINK中的S-function函数编写正常及故障电机模型的代码, 采用四阶龙格库塔法求解电机方程, 得到定子、转子电流。本文仿真中所用的电机型号为YE2-100L1-4型三相异步电动机, 基本参数如表1所示。

表1 异步电机基本参数

Table 1 Basic parameters of asynchronous motor

参数名称	参数值
额定电压/V	380
额定功率/kW	2.2
额定频率/Hz	50
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 420
极对数	2
定子电阻/Ω	3.306 4
转子电阻/Ω	2.2
定子漏感/H	0.011 3
转子漏感/H	0.012

对于正常电机和A相匝间短路故障电机分别在0 s、5 s、10 s时, 给定幅值为20 V、持续时间为3 s的电压阶跃激励, 获得的响应电流*i*_{AB}如图4所示。由图4可知, 电机发生匝间短路后, 响应电流*i*_{AB}稳态值相比于无故障时明显增加, 此电流增量便可作为故障诊断的依据, 同理论分析一致。

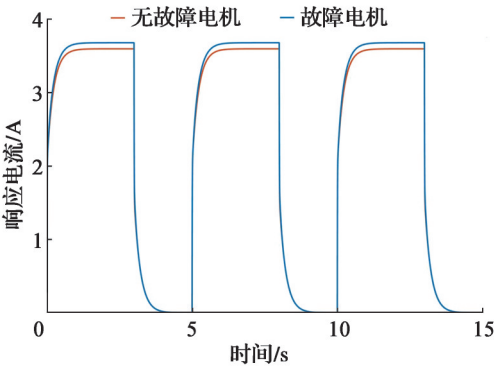


图4 阶跃激励响应电流的波形

Fig. 4 Waveform of step excitation response current

为了分析在不同短路电阻情况下, 故障严重程度变化对故障特征分量*i*_k的影响, 分别对短路电阻为0.5 Ω、1 Ω、5 Ω时的异步电机进行仿真, 故障特征分量*i*_k随短路系数的变化如表2所示。由表2可知, 故障特征分量*i*_k随短路系数μ的增加而增加, 且几乎不随短路电阻

变化。表明不论电机定子绕组匝间短路故障是处于早期还是处于末期, 该故障特征分量都可灵敏地指示故障变化, 有效实现异步电机匝间短路故障的诊断。

表2 不同短路电阻与短路系数下故障特征分量的变化

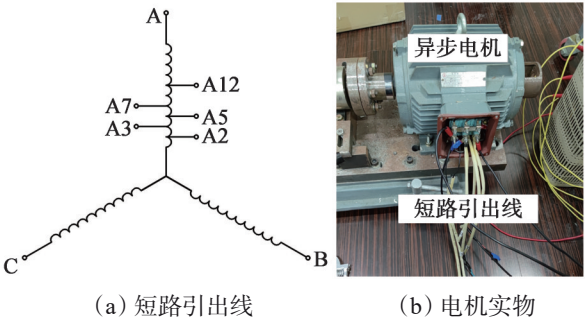
Table 2 Variation in fault characteristic components with different short circuit resistance

短路系数μ	短路电阻 <i>R</i> _f /Ω		
	and short circuit coefficient		
	0	1	5
0.000	0.000 000	0.000 000	0.000 000
0.004	0.002 827	0.002 827	0.002 827
0.012	0.018 307	0.018 307	0.018 307
0.020	0.039 784	0.039 784	0.039 783
0.028	0.064 131	0.064 131	0.064 130
0.036	0.090 139	0.090 139	0.090 137

综合上述仿真结果可知, 故障特征分量对匝间短路故障的变化表现出了高灵敏性, 即使在故障初期, 也能够灵敏地反应故障变化, 可以有效可靠地实现异步电机早期匝间短路故障的诊断。

3.2 试验结果分析

试验电机和仿真电机为同一型号, 均为YE2-100L1-4型三相异步电动机。由于本研究需要模拟电机定子绕组匝间短路, 故所用的试验电机为经过特殊处理后的故障电机。将电机定子A相某线圈的2、3、5、7、12匝绕组选取一点破坏其绝缘, 利用导线将其引出至电机接线盒外, 正常运行时将这6个引出线端子通过绝缘胶带进行隔离。试验时仅需将其中两个抽头连接在一起, 便可模拟不同程度的匝间短路故障, 例如将第2匝和第7匝的引出线相连, 可以实现5匝的短路故障。阶跃激励采用可调直流电源实现。此外, 为了研究电机固有不对称对故障诊断方法的影响, 试验所用电机在无故障时定子三相绕组电阻具有轻微的不对称。电机引出线示意图及实物图如图5所示。



(a) 短路引出线 (b) 电机实物
图5 短路引出线示意及电机实物图

Fig. 5 Schematic diagram of short-circuit outgoing line and photo of motor

分别给电机A相和B相、A相和C相、B相和C相之间施加幅值为20 V的阶跃激励, 测得不同短路情况下的3个响应电流稳态值如图6所示。由图6可知, 无

故障时 i_{AB} 、 i_{AC} 及 i_{BC} 不相等, 这是由于电机的固有不对称所致。 i_{AB} 和 i_{AC} 随短路严重程度增加而逐渐增大, i_{BC} 不变, 故以阶跃激励响应电流 i_{AB} 和 i_{AC} 的增量之和作为故障特征分量 i_k , 可以更加灵敏地反映匝间短路故障及其严重程度, 同理论分析一致。

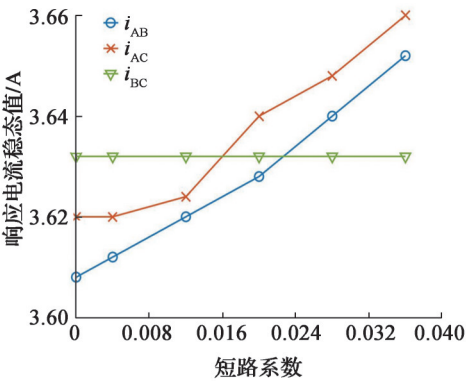


图 6 阶跃响应电流稳态值随短路系数的变化曲线
Fig. 6 Variation curve of steady-state value of step response current with short circuit coefficient

根据式(10)和式(11)分别计算出故障特征分量 i_k 和 i_{k1} , 其随短路系数的变化曲线如图 7 所示。由于仿真模型是在对称电机的基础上所建, 故仿真结果代表了理想情况下的计算结果。由图 7 可知故障特征分量 i_{k1} 同仿真结果基本一致, 而 i_k 偏离较远。这表明即使电机含有固有不对称, 以 i_{k1} 作为故障特征分量也可精确有效地诊断匝间短路故障, 具有较强的抗干扰能力。

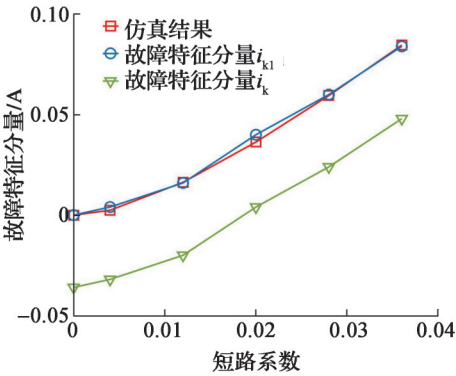


图 7 故障特征分量随短路系数的变化曲线
Fig. 7 Variation curve of fault characteristic component with short circuit coefficient

综合仿真和试验结果分析可知, 给电机定子任意两相之间施加阶跃激励, 得到 3 个稳态响应电流 i_{AB} 、 i_{AC} 和 i_{BC} , 据式(10)和式(11)计算出故障特征分量 i_{k1} , 通过将 i_{k1} 与阈值进行比较, 便可实现异步电机匝间短路的故障诊断。对于本试验所用电机, 可能出现的故障情况如表 3 所示。综合试验结果分析可知, 以 0.005 为本试验电机的匝间短路故障预警值, 可以实现轻微匝间短路故障的实时诊断, 同时也可防止灵敏度过高造成误判。

表 3 故障特征值表

Table 3 Fault characteristic values		
短路系数 μ	短路匝数	i_{k1}/A
0~0.004	0~1	0~0.005
0.008~0.020	2~5	0.005~0.050
0.024~0.036	6~9	0.050~0.100
≥ 0.040	≥ 10	≥ 0.100

4 结论

本文基于异步电机定子匝间短路的电路模型, 推导出对定子任意两相施加阶跃激励的响应电流表达式, 通过分析其变化特征提出新的故障特征分量, 并搭建仿真和试验平台分析该故障特征分量对早期匝间短路故障诊断的有效性, 仿真和试验结果表明:

- ①当故障相为被激励相时, 响应电流稳态值与短路严重程度成正比, 其变化率与短路电阻成反比。在故障早期, 短路电阻较大时, 响应电流稳态值仍随短路严重程度的增加而增加。
- ②故障特征分量 i_{k1} 可以有效指示匝间短路故障的变化, 与短路电阻无关。即使在故障早期, 该故障特征分量也具有较高的灵敏性, 且对电机固有不对称具备鲁棒性, 可靠性高。
- ③将故障特征分量 i_{k1} 的故障预警门槛设为 0.005, 便可实现异步电机早期轻微故障的精确诊断。基于故障特征分量 i_{k1} 的诊断方法操作简单, 无须复杂的硬件设备, 具备较强的抗干扰能力, 对牵引电机早期匝间短路故障诊断具有极大的实际意义。通过在机车和动车组每次启动前和停车后测量故障特征值, 便可监测牵引电机定子绕组的状态, 以维护整个牵引系统的安全与稳定。

参考文献:

[1] 马宏忠. 电机状态监测与故障诊断[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
MA Hongzhong. Motor condition monitoring and fault diagnosis[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.

[2] GANDHI A, CORRIGAN T, PARSA L. Recent advances in modeling and online detection of stator interturn faults in electrical motors[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2011, 58(5): 1564-1575.

[3] 马宏忠, 张志艳, 张志新, 等. 双馈异步发电机定子匝间短路故障诊断研究[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(11): 50-54.
MA Hongzhong, ZHANG Zhiyan, ZHANG Zhixin, et al. Research on DFIG stator winding inter-turn short circuit fault[J]. Electric machines and control, 2011, 15(11): 50-54.

[4] 张世聪. 大功率电力机车异步牵引电机的典型故障研究[J]. 北京交通大学学报, 2018, 42(2): 122-128.
ZHANG Shicong. Research on typical faults of asynchro-

- nous traction motor for high power electric locomotive[J]. Journal of Beijing jiaotong university, 2018, 42(2): 122-128.
- [5] TALLAM R M, LEE S B, STONE G C, et al. A survey of methods for detection of stator-related faults in induction machines[J]. IEEE transactions on industry applications, 2007, 43(4): 920-933.
- [6] 李俊卿, 康文强, 沈亮印. 基于多回路理论的双馈异步发电机定子绕组匝间短路故障分析[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(9): 99-104.
- LI Junqing, KANG Wenqiang, SHEN Liangyin. Analysis of stator winding inter turn short circuit fault in doubly fed induction generator based on multi loop theory[J]. Electric machines & control application, 2016, 43(9): 99-104.
- [7] 魏书荣, 张路, 符杨, 等. 基于拟序阻抗的海上双馈电机定子绕组匝间短路早期故障辨识[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 273-281.
- WEI Shurong, ZHANG Lu, FU Yang, et al. Early fault detection based on the quasi-sequence impedance for inter-turn faults in stator windings of offshore wind DFIG[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 273-281.
- [8] CHENG Siwei, ZHANG Pinjia, HABETLER T G. An impedance identification approach to sensitive detection and location of stator turn-to-turn faults in a closed-loop multiple-motor drive[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2011, 58(5): 1545-1554.
- [9] 魏书荣, 吴锐, 符杨, 等. 基于正序阻抗角的海上DFIG定子绕组匝间短路故障辨识[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 165-171.
- WEI Shurong, WU Rui, FU Yang, et al. Inter-turn short-circuit fault identification of stator winding for offshore DFIG based on positive sequence impedance angle[J]. Automation of electric power systems, 2019, 43(12): 165-171.
- [10] 李俊卿, 王栋, 何龙. 双馈式感应发电机定子匝间短路故障稳态分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 103-107.
- LI Junqing, WANG Dong, HE Long. Steady-state analysis on inter-turn short circuit fault of stator windings in doubly-fed induction generators[J]. Automation of electric power systems, 2013, 37(18): 103-107.
- [11] 朱锦山. 双馈异步电机绕组匝间短路故障特征量的提取[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- ZHU Jinshan. The extraction of fault feature of winding inter-turn short circuit in doubly fed induction generator[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [12] 李俊卿, 于海波, 张立鹏. 基于EEMD-HHT的双馈感应发电机定子匝间短路故障研究[J]. 电机与控制应用, 2015(2): 65-72.
- LI Junqing, YU Haibo, ZHANG Lipeng. Study on stator inter-turn short circuit fault in doubly-fed induction generators based on EEMD-HHT[J]. Electric machines & control application, 2015(2): 65-72.
- [13] GRITLI Y, STEFANI A, FILIPPETTI F, et al. Stator fault analysis based on wavelet technique for wind turbines equipped with DFIG[C]//IEEE. 2009 International Conference on Clean Electrical Power. Capri: IEEE, 2009: 485-491.
- [14] 罗昊. 基于扩展Park's矢量法的异步电机定子绕组匝间短路故障诊断技术研究[J]. 机电信息, 2020(33): 16-17.
- LUO Hao. Research on asynchronous motor stator winding turn-to-turn short circuit diagnosis technology based on extended Park's vector method[J]. Mechanical and electrical information, 2020(33): 16-17.
- [15] 魏书荣, 张路, 符杨, 等. 基于派克矢量轨迹椭圆度的海上双馈电机定子绕组匝间短路早期故障辨识[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 3001-3009.
- WEI Shurong, ZHANG Lu, FU Yang, et al. Early fault detection based on the Park's vector locus ovality for inter-turn faults in stator windings of the offshore wind DFIG[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 3001-3009.
- [16] 刘赫, 雷雨秋, 张心怡, 等. 基于阶跃激励稳态响应的感应电机匝间短路故障诊断方法研究[J]. 电气传动, 2021, 51(13): 75-80.
- LIU He, LEI Yuqiu, ZHANG Xinyi, et al. Diagnosis of stator inter-turn short-circuit fault in the induction machine based on the steady-state response of the step excitation[J]. Electric drive, 2021, 51(13): 75-80.

Diagnosis of early turn-to-turn short-circuit faults of traction motor stators based on step excitation response

GENG Min¹, QIN Jiayi², LIU Mingjie³, ZHANG Chuanbao⁴, WANG Xilian²

(1. EMU Overhaul Department, CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan, Hebei 063035, China;

2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

3. China Railway Jinan Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250000, China;

4. Tangshan Polytechnic College, Tangshan, Hebei 063020, China)

Abstract: In order to realize reliable diagnosis of early faults of stator winding turn-to-turn short circuits of traction motors, a fault diagnosis method based on steady-state response current of step excitation was proposed in this study. Firstly, on the basis of a three-phase stator winding turn-to-turn short-circuit model of traction motors, a step excitation was applied to any two phases of the stator winding to derive the response current expressions in three cases, and a new fault characteristic component was proposed on the basis of the change characteristics of the steady-state value of the response current. Then, a simulation model of the faulty motor was established to analyze the impact of short-circuit resistance and fault severity on the response current, and to investigate the validity and reliability of the fault characteristic components for the diagnosis of early turn-to-turn short-circuit faults. Finally, an experimental platform was built to analyze the impact of turn-to-turn short-circuit faults on the fault characteristic components when the motor is inherently asymmetric. The simulation and experimental results show that the fault characteristic component can represent the early turn-to-turn short-circuit fault and its severity, and can filter out the impact of the inherent asymmetry of the motor. The diagnosis method based on the steady-state response current of step excitation is easy to operate and the results are highly reliable. This method holds great significance for the protection of the traction system and offers great value for engineering applications.

Keywords: traction motor; stator winding turn-to-turn short circuit; fault diagnosis; step response