

异步电动机定子绕组匝间短路故障检测新方法

李和明¹, 孙丽玲¹, 许伯强¹, 孙俊忠²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北省 保定市 071003;

2. 海军潜艇学院机电研究所, 山东省 青岛市 266042)

A Novel Detection Method of Stator Winding Inter-turn Short Circuit Fault in Induction Motors

LI He-ming¹, SUN Li-ling¹, XU Bo-qiang¹, SUN Jun-zhong²

(1. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China;

2. Institute of Electromechanical Technique, Navy Submarine Academy, Qingdao 266042, Shandong Province, China)

ABSTRACT: It is of great significance to investigate and improve the detection method of stator winding inter-turn short circuit fault in induction motors. The transient simulation of stator winding inter-turn short circuit fault, as well as broken rotor bar fault, has been completed. By thoroughly analyzing the simulation results, this paper points out that the detection methods of stator winding inter-turn short circuit fault, presented in the previous literature, may misinterpret broken rotor bar fault as stator winding inter-turn short circuit fault. And then, a novel detection method of stator winding inter-turn short circuit fault, which blends perfectly the spectrum correction and self-adaptive filter techniques, is proposed. Simulation and experimental results demonstrate that the novel method is immune to broken rotor bar fault and thus more reliable than those presented previously.

KEY WORDS: induction motor; stator winding inter-turn short circuit; broken rotor bar; spectrum correction; self-adaptive filter; detection method

摘要: 定子绕组匝间短路是异步电动机常见故障之一, 因此研究其检测方法具有重要意义。针对异步电动机定子绕组匝间短路与转子断条故障瞬态进行仿真并分析仿真结果, 指出异步电动机转子故障对定子绕组匝间短路故障检测存在不利影响, 甚至导致故障误判。提出计及转子故障时的异步电动机定子绕组匝间短路故障检测新方法, 该方法关键在于预先采用频谱校正与自适应滤波技术滤除定子电流中由转子故障所导致的特征频率分量。大量仿真与实验结果表明, 该方法可以避免将转子故障误判为定子绕组匝间短路故障,

使定子绕组匝间短路故障识别可靠性大幅提高。

关键词: 异步电动机; 定子绕组匝间短路; 转子断条; 频谱校正; 自适应滤波; 故障检测

0 引言

异步电动机定子绕组匝间短路故障往往导致相间短路或接地短路故障, 危害严重。此类故障的发生概率高达 30%^[1-3], 因此必须对其进行早期检测。

文献[4]以定子负序视在阻抗, 即定子负序电压与定子负序电流幅值之比作为故障特征量对异步电动机定子绕组匝间短路故障进行检测, 该方法对供电电源不对称具备鲁棒性。通过检测频率近似为 $\frac{1}{P}f_1, \frac{2}{P}f_1, \frac{3}{P}f_1, \dots$ 的定子电流谐波分量或某些槽谐波分量亦可实现匝间短路故障检测(P 为极对数, f_1 为供电频率)^[5]。文献[6]通过测量异步电动机定子电流负序分量判断匝间短路故障是否发生及其严重程度。文献[7]则对上述各种定子绕组匝间短路故障的特征量进行分析、比较, 指出定子负序视在阻抗最可靠并兼具较高灵敏度, 进而以定子负序视在阻抗低通滤波值作为故障特征量进行定子绕组匝间短路故障检测。文献[8-9]分别将多参考系理论、磁场空间矢量不定振荡理论应用于定子绕组匝间短路故障检测, 亦取得良好效果。

显然, 异步电动机定子绕组匝间短路故障检测方法研究已经取得长足进展。应用文献[4-9]的方法可以避免供电电源不对称、负荷波动等因素对定子绕组匝间短路故障检测的不利影响。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50407016)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50407016).

但是,异步电动机转子故障(断条、偏心)对定子绕组匝间短路故障检测同样存在不利影响,甚至导致故障误判^[10-11]。根据文献[10-11]可知:异步电动机存在转子故障时,在定子电流中将出现负序分量,且其数值伴随转子故障的进一步发展而增大,因此,基于定子电流负序分量或定子负序视在阻抗(低通滤波值)的异步电动机定子绕组匝间短路故障检测方法^[4,6-7]可能将转子故障误判为定子绕组匝间短路故障。对于其他的定子绕组匝间短路故障检测方法,同样存在不利影响。

另一方面,异步电动机转子故障是渐进性的,在其发展初期,异步电动机仍可继续运行。而且,异步电动机转子故障发生概率较高(以断条为例,大约 10%)^[1-3]。这表明:在异步电动机已经发生转子故障的情况下进行定子绕组匝间短路故障检测存在可能性。

因此,研究异步电动机在转子故障情况下的定子绕组匝间短路故障检测问题具有必要性。本文即以这一问题作为研究重心,转子故障以断条为例(偏心与之类似)。

首先,在文献[10-11]的基础上,进一步讨论了转子故障对定子绕组匝间短路故障检测的影响问题;其次,基于频谱校正与自适应滤波技术,提出了计及转子故障时的定子绕组匝间短路故障检测新方法,仿真与实验结果验证了所得结论。

1 转子故障对定子绕组匝间短路故障检测的影响

由文献[10-11]可知:异步电动机存在转子故障时,在定子电流中将出现负序分量,且其数值伴随转子故障的进一步发展而增大。而定子电流负序分量恰恰是定子绕组匝间短路故障特征量之一,因此,异步电动机转子故障对定子绕组匝间短路故障检测存在不利影响。此处,以转子断条故障为例进行分析,转子偏心故障与之类似。

基于多回路数学模型,对一台 Y100L-2 型笼型异步电动机进行定子绕组匝间短路与转子断条故障瞬态仿真,其具体参数见表 1。该电机定子绕组为单层同心,线圈节距为 1~12、2~11。具体方法参见文献[12-13]。假定电机为理想电机且其供电电源理想对称。

图 1 表示电机在满载且定子 a 相绕组 1 匝金属性短路情况下的定子绕组匝间短路故障仿真结果。显然,异步电动机发生定子绕组匝间短路故障之

表 1 Y100L-2 型异步电动机参数

Tab. 1 Parameters of asynchronous motor

额定功率/kW	额定电压/V	额定电流/A	额定转差/%	定子相数
3	380	6.1	4	3
磁极极数	定子槽数	转子槽数	线圈匝数	
2	24	20	40	

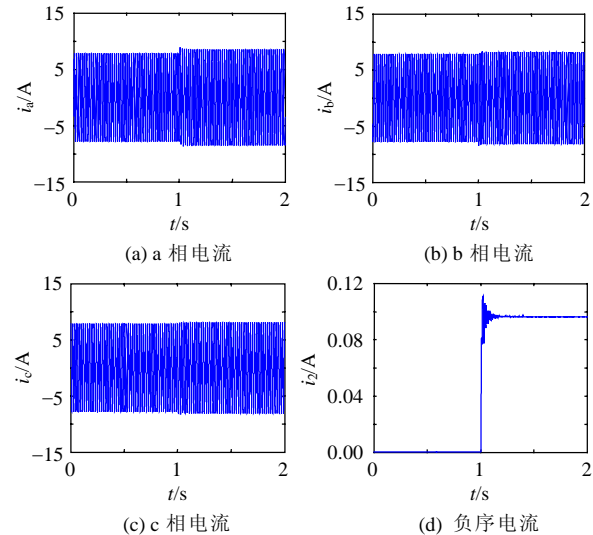


图 1 电机满载且定子 a 相绕组 1 匝金属性短路情况下的仿真结果

Fig. 1 Simulation results under the condition that the rated-load motor possesses 1 metallic-shortened turn in stator a-phase winding

后,在其定子电流中将出现负序分量,这就是文献[4,6-7]定子绕组匝间短路故障检测方法的基础之所在。

图 2 表示电机在满载且转子 1、2、3 号导条持续断裂情况下的仿真结果。显然,异步电动机发生转子断条故障之后,在其定子电流中将出现负序分量,且其数值伴随转子断条故障的发展而增大。因此,转子故障对定子绕组匝间短路检测存在不利影响。这与文献[10-11]结论吻合。

为了解决这一问题,必须明确转子故障时定子电流负序分量的产生原因。

定子电流负序分量算法一般是单(多)周期滑动窗傅立叶变换方法,基本步骤如下:

(1) 采集定子 A、B、C 三相电流瞬时信号,分别记作 i_A 、 i_B 、 i_C 。假设工频为 50 Hz,则工频周期为 0.02 s。采集频率为 1 000 Hz。

(2) 选取 i_A 中的连续 20 点(单工频周期)进行快速傅立叶变换以获得定子 A 相电流相量 \dot{I}_A 。

(3) 采用同样方法获得定子 B、C 相电流相量 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C 。

(4) 根据式(1)计算定子电流负序分量 I_2 , I_2 指

有效值。

(5) 对于所选取的 i_A 中的连续 20 点, 保留后 19 点, 顺序递补 i_A 中的后面 1 点(第 21 点), 从而再次获得 i_A 中的连续 20 点。再次进行快速傅里叶变换以获得 \dot{I}_A 。

(6) 采用同样方法再次获得 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C 。

(7) 根据式(1)再次计算定子电流负序分量 I_2 。

(8) 重复步骤(5)~(7)。

$$I_2 = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + e^{j\frac{4\pi}{3}}\dot{I}_B + e^{j\frac{2\pi}{3}}\dot{I}_C) \quad (1)$$

显然, 此处“定子电流负序分量”的成因在于: 异步电动机发生转子断条故障后, 在其定子电流中将出现 $(1\pm 2s)f_1$ 频率的附加分量(s 为转差率, f_1 为供电频率)^[12-13], 并且该附加分量紧邻定子电流主要分量—— f_1 频率分量(电机正常运行时的转差率 s 很小)。因此, 在应用式(1)计算定子电流负序分量时, 定子三相电流 f_1 、 $(1-2s)f_1$ 、 $(1+2s)f_1$ 频率分量各自对称, 不会产生负序分量, 但是, 定子三相电流不同频率分量彼此之间相互作用, 例如, a相电流 f_1 频率分量、b相电流 $(1-2s)f_1$ 频率分量与c相电流 $(1+2s)f_1$ 频率分量相互作用, 导致计算结果出现“负序分量”。自然, 由于定子电流 $(1\pm 2s)f_1$ 频率分量的调制作用, 该“负序分量”是以频率 $2sf_1$ 交变的。此处, f_1 等于 50 Hz, s 约为 0.05, $2sf_1$ 约为 5 Hz, 参见图 2(d)。

由于定子电流负序分量是定子绕组匝间短路

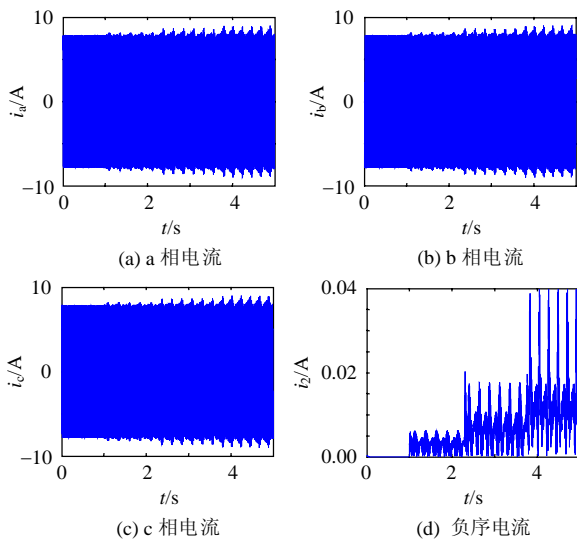


图 2 电机满载且 1、2、3 号导条持续断裂情况下的仿真结果

Fig. 2 Simulation results under the condition that the motor operates with rated load and the No. 1, 2, 3 rotor bar break successively

故障特征量之一^[4,6-7], 故转子断条故障对定子绕组

匝间短路故障检测存在不利影响。在进行定子绕组匝间短路故障检测时, 必须注意该问题以避免误判。

根据上文可知, 转子故障对定子绕组匝间短路故障检测的影响在本质上源于定子电流 $(1\pm 2s)f_1$ 频率附加分量的存在。为了解决这一问题, 可以先行滤除该附加分量, 但必须尽可能地避免衰减定子电流主要分量—— f_1 频率分量。由于电机正常运行时的转差率 s 很小(0.005~0.05), 定子电流 $(1\pm 2s)f_1$ 频率附加分量紧邻定子电流主要分量—— f_1 频率分量, 因此常规的模拟或数字滤波器无法实现这一目的。频谱校正技术、自适应滤波技术的发展与应用为该问题的解决提供了捷径。

2 基于频谱校正与自适应滤波技术的定子绕组匝间短路故障检测新方法

2.1 频谱校正

由于傅里叶变换仅能对有限时间区间内的采样数据进行分析, 因此不可避免地存在时域截断所产生的泄漏问题, 从而导致误差。为此, 必须引入频谱校正技术^[14-16]。

需要指出, 本文引入频谱校正技术的目的在于: 准确测量异步电动机定子电流信号中 $(1\pm 2s)f_1$ 分量的频率、幅值与相位, 进而应用自适应滤波技术予以滤除, 因此, 应预先估计异步电动机转差率当前数值, 判断 $(1\pm 2s)f_1$ 分量与 f_1 分量之间间隔, 并确定采用能量重心重合法抑或文献[16]方法。至于异步电动机转差率当前数值的估计, 可以采用定子电流转子齿槽谐波方法^[17]。

频谱校正技术对于提高异步电动机定子绕组匝间短路故障检测的可靠性具有重要意义。借助频谱校正技术可以准确确定定子电流 $(1\pm 2s)f_1$ 分量的频率、幅值与相位, 据此形成参考信号, 以对定子电流信号做自适应滤波处理。

2.2 自适应滤波

自适应滤波技术通过动态调整自身参数以达到最优的滤波效果^[18-19]。采用自适应滤波技术可以抵消电机定子电流信号中的 $(1-2s)f_1$ 分量与 $(1+2s)f_1$ 分量, 避免转子故障对定子绕组匝间短路故障检测产生不利影响。为提高可靠性, 应重复进行自适应滤波, 以滤除电机定子电流 $(1-2s)f_1$ 分量、 $(1+2s)f_1$ 分量及其他分量。

2.3 定子绕组匝间短路故障检测新方法

本文将频谱校正、自适应滤波技术有机结合,提出了异步电动机定子绕组匝间短路故障检测新方法,基本思路如下:①采集定子三相电流瞬时信号,分别记为 i_a 、 i_b 、 i_c (采样频率 1000 Hz, 采样点数 10000 点);②对 i_a 做傅里叶频谱分析、频谱校正,确定 $(1-2s)f_1$ 分量的频率、幅值和相位,据此形成噪声信号 u_s ;③根据 u_s 对 i_a 做自适应滤波,抵消其 $(1-2s)f_1$ 分量,结果记为 e_{Ta} ;④对 e_{Ta} 做傅里叶频谱分析、频谱校正,确定 $(1+2s)f_1$ 分量的频率、幅值和相位,据此形成噪声信号 u'_s ;⑤根据 u'_s 对 e_{Ta} 做自适应滤波,抵消其 $(1+2s)f_1$ 分量,结果记为 e'_{Ta} ;⑥对 i_b 、 i_c 做类似处理,获得 e'_{Tb} 、 e'_{Tc} ;⑦根据 e'_{Ta} 、 e'_{Tb} 、 e'_{Tc} 计算定子电流负序分量,检测定子绕组匝间短路故障。

2.4 仿真与实验结果

应用该方法对 Y100L-2 型电机进行故障检测仿真与实验。图 2 已经提供电机在满载且转子 1、2、3 号导条持续断裂情况下的仿真结果。根据图 2(d)可知,异步电动机发生转子断条故障之后,定子电流中将出现负序分量,且其数值伴随转子断条故障的发展而增大,因而,可能将其误判为定子绕组匝间短路故障。图 3 表示采用 2.3 节新方法所计算出的定子电流负序分量,其数值远小于常规方法的计算值,参阅图 2(d)。对比图 2(d)与图 3 可知,新方法可以避免转子故障对定子绕组匝间短路故障检测的不利影响。

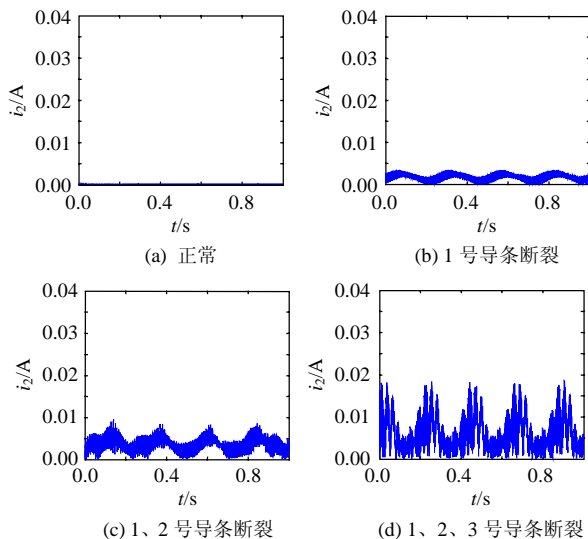


图 3 电机满载且 1、2、3 号导条持续断裂时的仿真结果

Fig. 3 Simulation results under the condition that the motor operates with rated load and the No. 1,2,3 rotor bar break successively

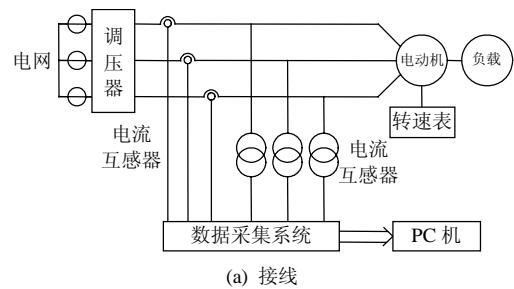
需要指出,图 4 中仍然存在定子电流负序分量,

这是由于未完全滤除电机定子电流 $(1-2s)f_1$ 分量、 $(1+2s)f_1$ 分量及其他分量。为提高可靠性,应重复进行自适应滤波,以滤除这些分量。

对星形接线 Y100L-2 型异步电动机进行实验,接线图示于图 4。为进行匝间短路实验,对电机定子三相绕组引出一些附加抽头,如图 5 所示(以 a 相为例)。另外,除正常转子外,配备故障转子以进行断条实验,如图 6 所示。

图 7 表示电机在满载且定子 b 相绕组 6 匝经过渡电阻短路情况下的实验结果,过渡电阻阻值为 1.791 Ω , 匝间短路环电流为 5 A。

对一台实际电机而言,定子电压、定子电流中均含有谐波分量,它们将对基波分量形成调制,从而导致定子电压、电流负序分量随时间波动。这对定子绕组匝间短路故障检测是不利的,为此对其做数字低通滤波处理,如图 7(e)、7(j)所示,具体参阅文献[7]。



(a) 接线



(b) 电机

图 4 实验接线

Fig. 4 Experiment system scheme

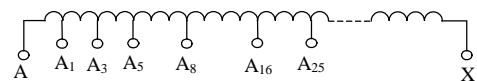


图 5 定子 a 相绕组抽头

Fig. 5 Taps of stator a-phase winding



图 6 故障转子

Fig. 6 Faulty rotor

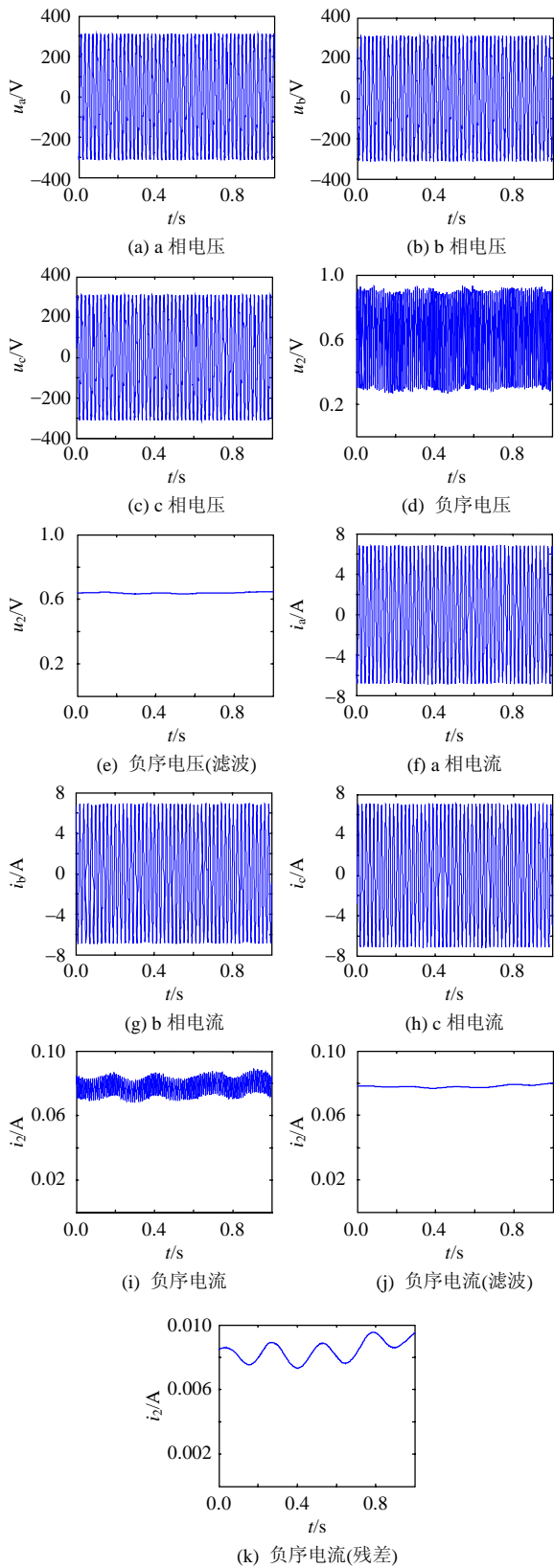


图 7 电机满载且定子 b 相绕组 6 匝短路情况下的实验结果

Fig. 7 Experimental results under the condition that the rated load motor is faulty with 6 shorted turns in stator b-phase winding

另外，对一台实际电机而言，其定子三相绕组

不可能理想对称。同时，三相供电电源亦存在一定程度的不对称性，必然存在负序分量，如图 7(e)所示。因此，对一台实际电机而言，即使其处于正常运行状态，定子电流负序分量仍然存在。为了保证定子绕组匝间短路故障检测的灵敏度与可靠性，必须从定子电流负序分量中进一步提取残差(故障)成分，如图 7(k)所示，基本思路如下^[6]：①根据电机堵转、负载实验结果估计定子负序视在阻抗 Z_{-} 并假设其值恒定；②实测定子三相电压、电流信号，计算定子电压负序分量 U_{-} 与定子电流负序分量 I_{-} ；③计算供电电压不对称所导致的定子电流负序分量 $I_{VOLTAGE-}=U_{-}/Z_{-}$ ；④计算定子负序电流残差 $I_{RESIDUAL-}=I_{-}-I_{VOLTAGE-}$ 并据此判断定子故障发生与否。

必须指出，实际计算出的定子电流负序分量 I_{-} 源于 3 个方面，即定子三相绕组本身所固有的不对称、三相供电电源不对称、定子绕组匝间短路故障。而定子负序电流残差是由定子绕组匝间短路故障引起的，因此需要从 I_{-} 中剔除定子三相绕组本身固有不对称、三相供电电源不对称所导致的定子电流负序分量。对于一台确定的电机而言，定子三相绕组本身固有不对称的程度是一定的，它所导致的定子电流负序分量也是确定的，可预先消除，但三相供电电源不对称情况是波动的，因此本文重点考虑剔除三相供电电源不对称所导致的定子电流负序分量 $I_{VOLTAGE-}$ 。

在图 7 中，定子电流负序分量采用常规的单工频周期滑动窗快速傅里叶变换计算。图 8 表示与

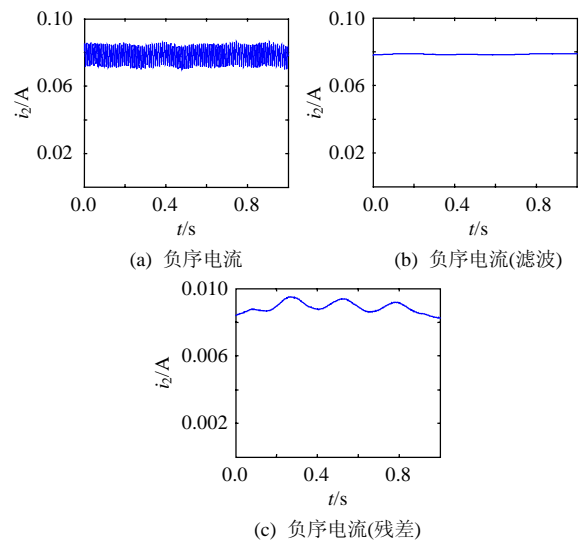


图 8 电机满载且定子 b 相绕组 6 匝短路情况下的实验结果

Fig. 8 Experimental results under the condition that the rated load motor is faulty with 6 shorted turns in stator b-phase winding

之对应的采用 2.3 节新方法计算出的定子电流负序分量。

由图 7(k)与图 8(c)可知:相对于常规的定子绕组匝间短路故障检测方法,本文所提出的新方法同样可以正确检测该故障。

图 9 表示电机在满载且转子 1、2、3 号导条断裂情况下的实验结果(稳态)。

在图 9 中,定子电流负序分量采用常规的单工频周期滑动窗快速傅立叶变换计算。图 10 表示与之对应的采用 3.3 节新方法计算出的定子电流负序分量。其他与图 7、图 8 类似。

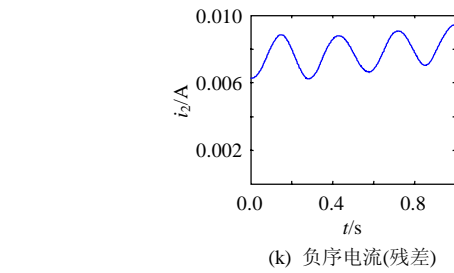
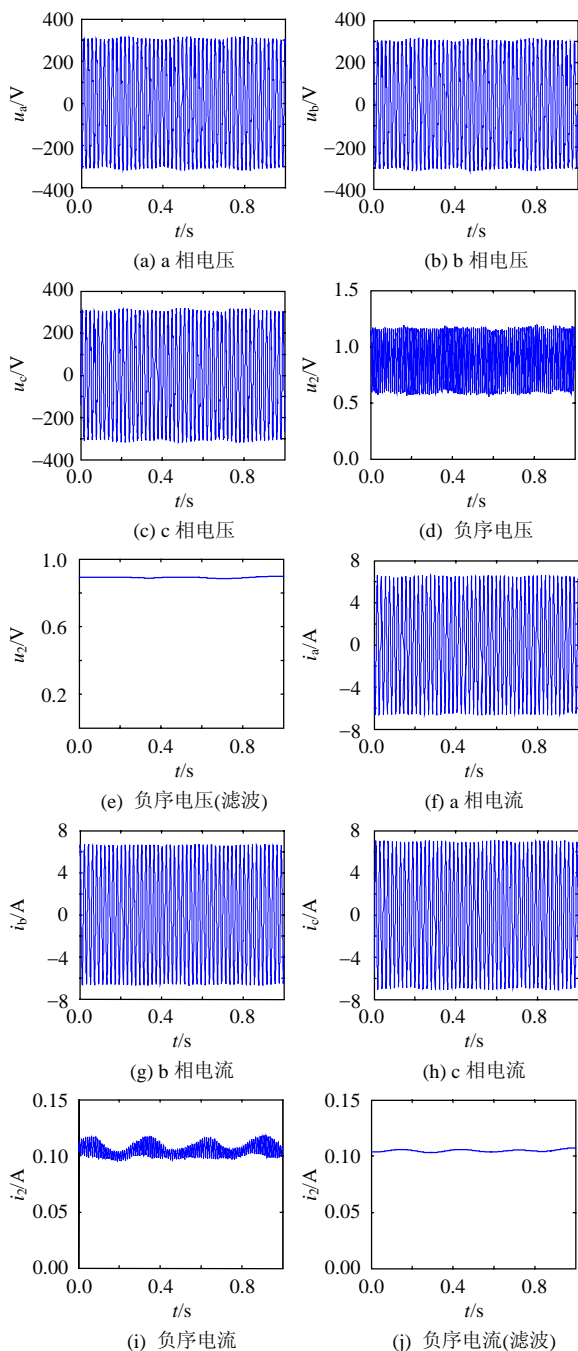


图 9 电机满载且转子断条情况下的实验结果

Fig. 9 Experimental results under the condition that the rated load motor is faulty with broken rotor bars

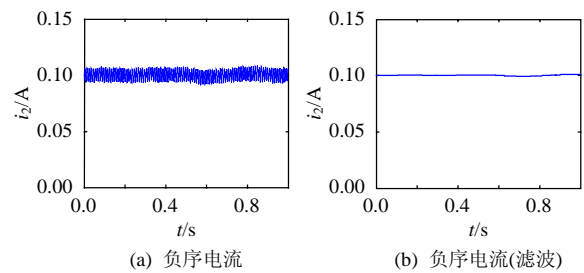


图 10 电机满载且转子断条情况下的实验结果

Fig. 10 Experimental results under the condition that the rated load motor is faulty with broken rotor bars

对比图 7(k)与图 9(k)可知:在定子绕组匝间短路故障与转子故障 2 种情况下,常规的定子绕组匝间短路故障检测方法所计算出的定子电流负序分量(残差)基本相等,因而可能对转子故障做出误判;对比图 8(c)与图 10(c)可知:在定子绕组匝间短路故障与转子故障 2 种情况下,采用本文新方法所计算出的定子电流负序分量(残差),后者远小于前者,因而可以避免将转子故障误判为定子绕组匝间短路故障。

大量仿真与实验结果表明,本文所提出的异步电动机定子绕组匝间短路故障检测新方法切实可行,且使其可靠性大幅提高。

3 结论

定子绕组匝间短路是异步电动机常见故障之一,因此研究其检测方法具有重要意义。

进行异步电动机定子绕组匝间短路与转子断条故障瞬态仿真并分析仿真结果,指出异步电动机转子故障对定子绕组匝间短路故障检测存在不利

影响,甚至导致故障误判。其原因在于异步电动机发生转子断条故障后,在其定子电流中将出现 $(1\pm 2s)f_1$ 频率的附加分量(s 为转差率, f_1 为供电频率),并且该附加分量紧邻定子电流主要分量—— f_1 频率分量。

基于频谱校正与自适应滤波技术,提出了计及转子故障时的异步电动机定子绕组匝间短路故障检测新方法。其实质在于预先采用频谱校正与自适应滤波技术滤除定子电流 $(1\pm 2s)f_1$ 频率分量。大量仿真与实验结果表明,该方法可以避免将转子故障误判为定子绕组匝间短路故障,使故障检测的可靠性大幅提高。

参考文献

- [1] IAS Motor Reliability Working Group. Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations, part I-II [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1985, 21(4): 853-872.
- [2] IAS Motor Reliability Working Group. Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations, part III [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1987, 23(1): 153-158.
- [3] Olav V T, Magnus D. A survey of faults on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, 31(5): 1186-1196.
- [4] Sottile J, Kohler J L. An on-line method to detect incipient failure of turn insulation in random-wound motors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1993, 8(4): 762-768.
- [5] Andreas S, Howard G S, James P. Current monitoring for detecting inter-turn short circuits in induction motors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2001, 16(1): 32-37.
- [6] Kliman G B, Premerlani W J, Koegl R A, et al. Sensitive on-line turn-to-turn fault detection in AC motors[J]. Electric Machines and Power Systems, 2000, (28): 915-927.
- [7] 许伯强, 李和明, 孙丽玲, 等. 异步电动机定子绕组匝间短路故障检测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 177-182. Xu Boqiang, Li Heming, Sun Liling, et al. Detection of stator winding inter-turn short circuit fault in induction motors [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 177-182(in Chinese).
- [8] Sérgio M A, Cruz A J, Marques C. Multiple reference frames theory: a new method for the diagnosis of stator faults in three-phase induction motors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(3): 611-619.
- [9] Behrooz M, Richard J P, Nabeel A O D. Interturn fault diagnosis in induction motors using the pendulous oscillation phenomenon [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(4): 871-882.
- [10] 孙丽玲, 李和明, 许伯强. 笼型异步电动机转子断条与定子绕组匝间短路双重故障研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(4): 38-44. Sun Liling, Li Heming, Xu Boqiang. Research on rotor bar breaking and stator winding inter-turn short circuit double fault in squirrel cage induction motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(4): 38-44(in Chinese).
- [11] Tak S C. A new research for the symptoms and diagnosis schemes of the inner-faults for three-phase induction motors[C]. Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems, Nanjing, 2005.
- [12] 孙丽玲, 李和明, 许伯强. 基于多回路数学模型的异步电动机内部故障瞬变过程研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 35-40, 75. Sun Liling, Li Heming, Xu Boqiang. Transient analysis of inner faults in induction motors based on multi-loop mathematical model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(23): 35-40, 75(in Chinese).
- [13] 马宏忠, 胡虔生, 黄允凯, 等. 感应电机转子绕组故障仿真与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 107-112(in Chinese). Ma Hongzhong, Hu Qiansheng, Huang Yunkai, et al. Simulating and experiment studying on rotor winding fault of induction motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 107-112(in Chinese).
- [14] 丁康, 张晓飞. 频谱校正理论的发展[J]. 振动工程学报, 2000, 13(1): 14-22. Ding Kang, Zhang Xiaofei. Advances in spectrum correction theory [J]. Journal of Vibration Engineering, 2000, 13(1): 14-22(in Chinese).
- [15] 丁康, 江利旗. 离散频谱的能量重心校正法[J]. 振动工程学报, 2001, 14(3): 354-358. Ding Kang, Jiang Liqi. Energy centrobaric correction method for discrete spectrum[J]. Journal of Vibration Engineering, 2001, 14(3): 354-358(in Chinese).
- [16] 陈奎孚, 张森文. 利用三条谱线计算频率紧邻的两个成分的参数[J]. 振动工程学报, 2004, 17(2): 153-158. Chen Kuifu, Zhang Senwen. Computing parameters of two closely spaced components from three spectrum lines[J]. Journal of Vibration Engineering, 2004, 17(2): 153-158(in Chinese).
- [17] Hurst K D, Habetler T G. Sensorless speed measurement using current harmonic spectral estimation in induction machine drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1996, 11(1): 66-73.
- [18] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [19] 姜建国, 汪庆生, 杨秉寿, 等. 用自适应方法提取鼠笼式异步电机转子断条的特征分量[J]. 电工技术学报, 1996, 11(4): 176-179. Jiang Jianguo, Wang Qingsheng, Yang Bingshou, et al. Applying the adaptive noise cancellation to extract the features of squirrel cage induction motor with rotor defects[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1996, 11(4): 176-179(in Chinese).



李和明

收稿日期: 2007-11-14。

作者简介:

李和明(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 副校长, 主要从事电机建模、设计、监测与诊断以及电力电子技术应用等方面的研究工作;

许伯强(1972—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为大型电机的状态监测与故障诊断, xbqslxtz@163.net;

孙丽玲(1972—), 女, 副教授, 主要研究方向为大型电机的状态监测与故障诊断;

孙俊忠(1965—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为电机的过渡过程与电力电子控制技术。

(编辑 刘浩芳)