

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司
支持

周洋,王鸿鹄.
转子断条机理分析与检测准确度研究.
电机与控制应用,2021,48(12):71.



SEARI **NCMS**
上電科 上科電機

www.nems.com.cn

掌握电机行业制造核心技术,
辐射智能制造产业发展



· 业务范围 ·



异步电机装配线

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.nems.com.cn

地址: 上海市武宁路505号 手机: 18918357509 电话: 021-62574990-436

传真: 021-62163904

邮箱: wangcj@seari.com.cn

转子断条机理分析与检测准确度研究^{*}

周 洋, 王鸿鹄

(上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司, 上海 200063)

摘要: 随着产业升级、可靠性需求逐渐上升,电动机的故障检测成为当前研究的热点问题。由于电机可检测的信号较少、负载工况复杂、信号处理误差等原因,鼠笼型电机转子断条特征存在较难检测的问题。以电机转子断条(坏条)作为研究对象,经过断条故障有限元仿真建模,通过多种信号处理方法研究对比,提出一种准确率较高、抗干扰性较优的检测方法,达到甄别转子断条(坏条)故障类型及预测故障程度的目标。

关键词: 鼠笼型异步电机; 转子断条(坏条); 有限元仿真; 信号处理

中图分类号: TM 343⁺.3 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)12-0071-07

doi: 10.12177/emca.2021.137

Research on Mechanism and Detection Accuracy of Broken Rotor Bar^{*}

ZHOU Yang, WANG Honghu

(Shanghai Engineering Research Center of Motor System Energy Saving Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

Abstract: As the industry upgrades, the reliability demand has gradually increased, the fault detection of motor has become the current research hotspot. Since the available detecting signals of the motor are few, the load condition is complex, and there exists signal processing error, the characteristics of broken rotor bar of squirrel-cage motor is difficult to detect. Regarding the broken rotor bar (bad bar) as the research object, finite element simulation and modeling of broken rotor bar are carried out, a variety of signal processing methods are studied comparatively, and a detection method with high accuracy and anti-interference ability is proposed. It can achieve the goal of distinguishing the broken rotor bar (bad bar) type and predicting the fault degree.

Key words: squirrel-cage asynchronous motor; broken rotor bar (bad bar); finite element simulation; signal processing

0 引言

电机转子断条故障(主要包括导条断裂、端环损坏、导条气泡)是鼠笼型异步电机的一种常见故障类型。产生这种故障的原因是工艺性问题或工作条件恶劣、起动频繁。电机起动时会给转子导条和转子端环带来大电流冲击,加剧导条电流的不平衡,长期如此,导条断裂和端环损坏也就不可避免。对于鼠笼型异步电机,导致转子故障的原因通常是转子温度过高以及作用在鼠笼端环上的离心负荷过大。在制造过程中可能就已存在

的某些缺陷会导致电阻过高,从而引起过热。在高温条件下,铝的热膨胀系数比硅钢片大约大一倍,可能导致出现裂纹。鼠笼导条与转子的相对位移、连续的高温运行或停车同样可能引起鼠笼端环和鼠笼导条的变形,并最终导致端环与鼠笼导条断裂。需要指出的是,如果电机起动频繁,额外的起动力也可能引起绕组元件发生疲劳断裂故障^[1-3]。

近30年来,研究电机断条故障的相关文献有很多。

对于转子断条故障,Elkasabgy等^[4]研究表

收稿日期: 2021-09-14; 收到修改稿日期: 2021-11-17

*基金项目: 上海市服务业发展引导资金——绿色电机系统协同设计服务云平台建设

作者简介: 周 洋(1991—),男,博士,研究方向为电机设计、电机故障诊断。

明,通过对放置在电机内的探测线圈的感应电压进行时域和频域分析,是可以探测到转子断条故障的。在正常运行时,对称定子绕组激励频率为 f ,在转子导条内感应电流的频率为 sf (s 为转差率)^[5];当转子结构有了不对称后,逆旋转负序成分就在电机转子和定子之间开始了链式的机电相互作用。最初,频率为 $(1-2s)f$ 的感应定子电动势导致了转矩和速度的波动。后来,转矩和转速的波动以 $(1+2s)f$ 的振荡频率反映到定子线电流上。接下来,该 $(1+2s)f$ 频率的电流成分又感应出频率为 $\pm 3sf$ 的转子电流。这样的链式反应继续进行,直到高次谐波电流完全被转子的惯性滤掉为止。文献[6]提出了一种基于参数估计的转子断条检测方法。在电机停机瞬间的定子终端电压的谐波电压成分,可以用来作为转子断条故障的诊断方法^[7]。

在故障检测方法上大致有定子电流检测法^[8-10]、希尔伯特变换法^[11-12]和派克矢量法^[12-13]。依据转子断条故障发生时,定子电流中产生 $(1-2s)f$ 频率的附加电流分量的原理,傅里叶变换频谱法、小波变换频谱法使用较多;希尔伯特变换法通过对定子电流信号进行解调来判断故障的发生;派克矢量法通过绘制定子电流的矢量复平面轨迹来判断故障的发生。

综上,目前的研究存在的问题是边频数值不确定,检测方法的准确度受信号处理方法影响较大。依照现行的分析和检测方法可能导致误判,而对于故障检测准确度的影响因素研究较少。本文考虑影响转子断条判断的主要因素,通过对比验证,提出一种准确率较高的检测算法。

1 理论分析

1.1 转子断条坏条故障的机理分析

断条、坏条故障只存在于鼠笼型转子异步电机中。以往的研究集中在断条故障的分析上。本文细化断条故障研究,对铸铝过程产生的气孔所引起的坏条(如图1所示)进行研究。建立不同面积的坏条故障模型,分析坏条对电机性能的影响。

由于坏条、断条故障,使得在气隙磁场中产生 $-sf$ 的负序分量,表现在定子电流中会有如下式所示的边频分量:

$$f_s = (1 \pm 2s)f \quad (1)$$

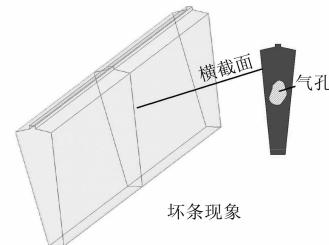


图 1 坏条故障

在转速上表现出 $2sf$ 的波动。但机械上的测量并不容易,常常对电参数进行分析。定子电流中断条所引起的边频分量通常很小,而且容易受到信号处理方法的影响,常常淹没在频谱的旁瓣中,这对于断条、坏条的检测是不利的。

本文针对这一问题,增加信号来源,设置定子齿上的检测线圈(如图2所示),通过线圈上的感应电压来检测断条所引起的边频分量。

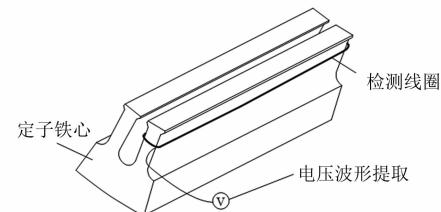


图 2 检测线圈示意图

在线圈上的感应电压频谱上,出现如下式所示的边频分量:

$$f_s = f \pm f/p \quad (2)$$

式中: p 为极对数。

考虑到随着断条情况加剧,转速波动明显,转子磁势随着转子导条的缺失(转速 $60f/p(1-s)$)而出现周期变化,磁通等于磁势除以磁阻,因此在线圈电压上呈现 f/p 的频率特征。相比较 sf 的频率成分,线圈由于检测的是局部的磁场信号,线圈电压对变化的磁阻敏感,因此线圈电压频谱中断条引起的 f/p 频率特征明显。

1.2 转子断条坏条故障的检测方法研究

一般来说,检测的故障信号是在电机稳态运行下采集的,断一条或者部分坏条对于整体鼠笼来说占比很低,又由于信号处理的误差,出现在定子电流的边频故障分量常常很小,傅里叶变换、小波变换、希尔伯特变换等频谱分析手段判断起来仍十分困难。主要原因在于故障的信号源和运行工况。

稳态工况没有放大故障现象,而且定子绕组相电流是空间上全包络的,没有空间分量。因此,提出如图 2 所示的检测线圈以检测磁场空间分量。

由于转子断条或者坏条,转子磁场在空间上分布不对称,因此在一个齿上检测感应电压以获取电机的磁场信号。检测线圈电压是对磁场信号高频部分的放大,可以用于判断断条故障。

1.3 定子齿部线圈检测步骤

本文所提出的线圈检测方法是将线圈绕制在定子某一个齿部。由于线圈是开路,没有电流通过线圈且通常定子绕组装配好后剩余空间狭小,可采用线径较细的漆包线。漆包线匝数控制在 5~10 匝即可。由于需要检测线圈的电压,把线圈的接头引至接线盒中。检测线圈的电压为穿过定子单个齿部的磁通所感应的电势差。从感应电势差的原理可知,电势为磁通的微分,使磁通的高频成分比例变大有利于检测出断条故障特征频率。

2 仿真验证

本文分析的电机是一款 5.5 kW、6 极的鼠笼式异步电机,具体参数如表 1 所示。转子断条、坏条是基于 ANSYS Electronics Desktop 进行的建模与电磁场有限元仿真。本文以 2D 电机模型进行计算。断条通过使导条赋予低电导率材料实现。

表 1 电机主要参数

基本参数	额定功率 P/kW	5.5
	额定电压 U/V	380
	极对数 p	3
	槽配合 Z_1/Z_2	36/34
	额定频率 f/Hz	50
	硅钢片牌号	50WW470
尺寸	冲片三圆/mm	210、148、48
	铁芯长 l/mm	180
	气隙长度 δ/mm	0.35

2.1 转子断条的仿真研究

鼠笼式转子导条相当于多相绕组,转子断条亦等于转子缺相,造成旋转转子磁势的不对称。经分析,一个对称定子绕组激励频率为 f ,在转子导条感应电流的频率为 sf ;当转子结构不对称后,逆负序成分 $-sf$ 就在电机转子和定子之间开始了链式的机电相互作用。最初,频率为 $(1-2s)f$ 的

感应定子电动势导致转矩和转速的波动。后来,转矩和转速的波动以 $(1+2s)f$ 的振荡频率反映到定子电流上。然而,在负载情况下,通常转差率 s 非常小(功率越大的电机其值越小),边频 $2sf$ 值也很小,即要求频率分辨率高、采样时间长。这样的情况对现场采集器提出了较高的存储和算力要求,且检测状态必须在电机的额定负载或者重载情况下进行,因为在轻载情况下,转子鼠笼提供的磁动势太小,对合成磁动势贡献弱,当发生断条 1 条或几条时产生的影响微乎其微,所以难以检测。

对于本文中的电机,额定工况下, $2sf \approx 3 \text{ Hz}$,仿真中采集了 1 s 的数据点,负载状态为满载 $50 \text{ N}\cdot\text{m}$,仿真步长为 $2 \times 10^{-4} \text{ s}$,最大频率分辨率为 1 Hz。为了进行详细的断条分析,对正常情况、断条 1 根、断条 2 根(相邻和间隔 1~5 根导条的情况)、断条 3 根、断条 4 根进行了仿真,针对 A 相电流、线圈电压和转速进行了分析采集,具体如图 3~图 12 所示。

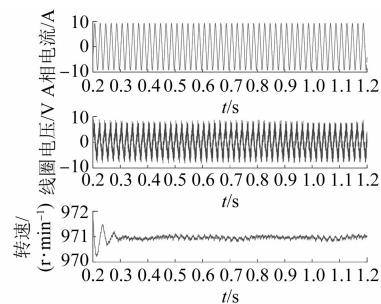


图 3 正常状态(不断条)原始数据

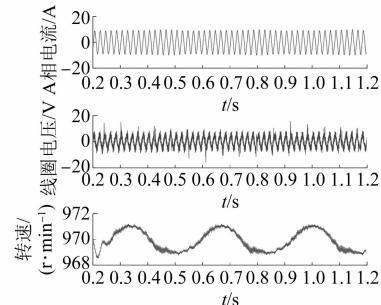


图 4 断条 1 根原始数据

对应图 3~图 12 中 A 相电流和线圈电压的频谱如图 13 所示。由图 3~图 12 可以看出,随着断条数的增加,转速波动增加。但由于转速传感器价格较高,一般不容易获得转速信号数据,这里仅

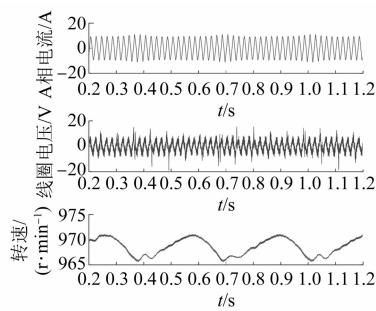


图 5 断条 2 根(相邻)原始数据

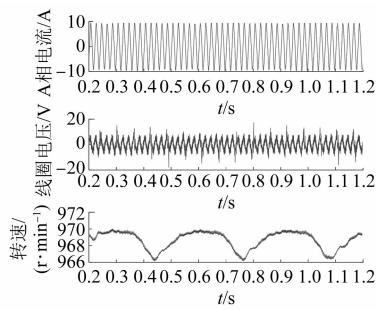


图 6 断条 2 根(间隔 1 根导条)原始数据

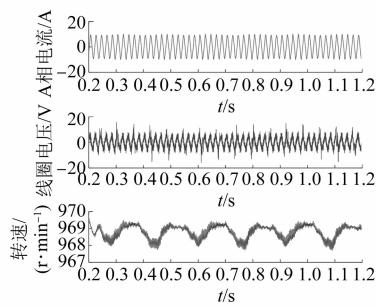


图 7 断条 2 根(间隔 2 根导条)原始数据

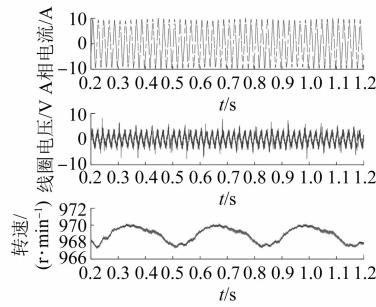


图 8 断条 2 根(间隔 3 根导条)原始数据

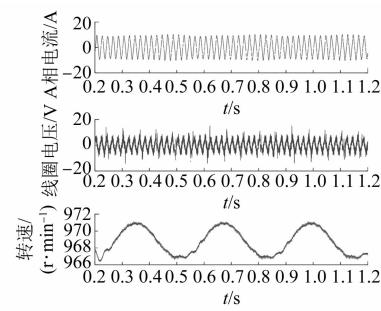


图 9 断条 2 根(间隔 4 根导条)原始数据

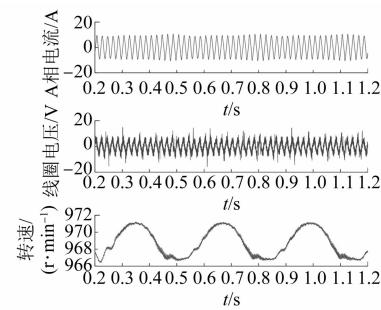


图 10 断条 2 根(间隔 5 根导条)原始数据

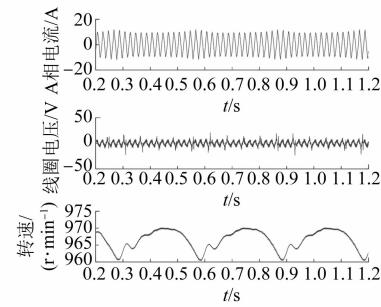


图 11 断条 3 根(相邻)原始数据

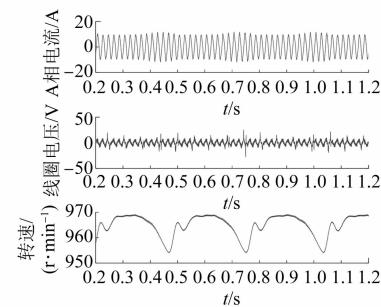


图 12 断条 4 根(相邻)原始数据

做分析参考。相电流一直作为判断转子断条的主要数据源,其包络幅值随断条变化,然而相隔导条

数[如图 13(c)~图 13(h)]对相电流的边频分量有较大影响。另外,本文提出在定子齿上加检测

线圈获取磁场信号, 线圈电压是对穿过磁通求导, 所得到的电压是对高频分量的放大显示。断条引起主谐波(50 Hz 的倍频)附近的边频分量, 因此断条时电压频谱显得杂乱。然而经研究发现在同

等断条情况下线圈电压的边频分量和主波(50 Hz)分量之比比相电流的大, 因此本文着重研究断条情况下线圈电压的频谱。

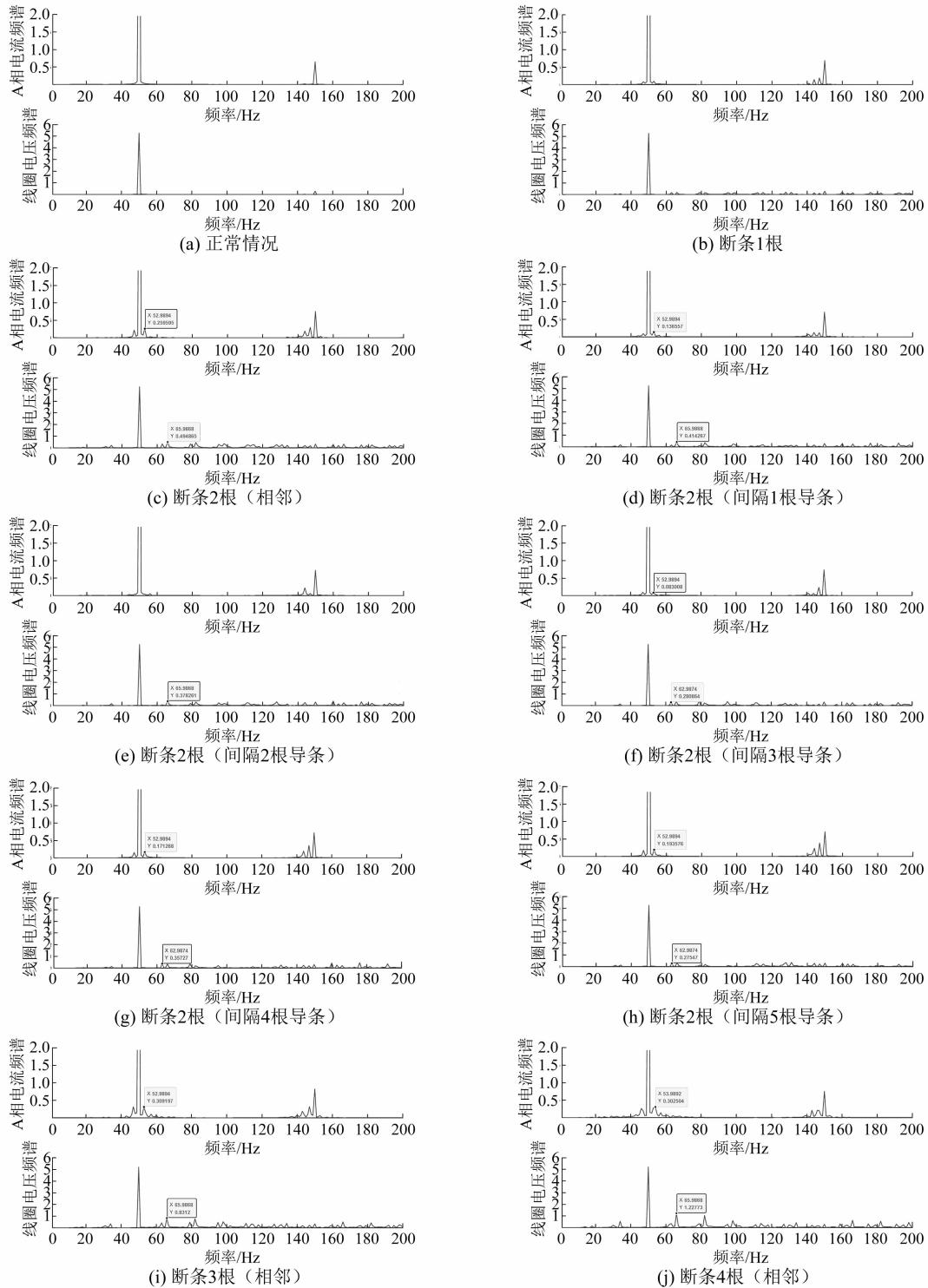


图 13 转子断条情况相应频谱

为了量化对比断条情况下信号的边频分量, 将线圈电压频谱的主要参数列于表 2, A 相电流频谱的主要参数列于表 3。这里的边频均小于 100 Hz, 分析的信号长度均为 1 s, 共 5 000 个点; 为了简化说明, bar1 表示断条 1 根, bar2-1 表示断条 2 根(间隔 1 根), 其他依次类推。

从表 2 和表 3 中明显看出检测线圈电压的边频分量占比要高得多, 更加容易对断条做出判断。可以看出, 右边频分量比左边频分量大得多。当断条间隔时, 边频分量要低于邻近时, 且随着断条间距增加而减小。如以线圈电压的最大右边频分量作为转子断条的判断条件, 其判断准确度相比电流频谱更有效。

表 2 线圈电压的边频分量(断条)

断条情况	50 Hz 左边频(最大)			50 Hz 右边频(最大)			基波(50 Hz)		
	幅值	占比/%	幅值	占比/%	幅值	占比/%	幅值	占比/%	幅值
正常	-	-	-	-	5.267				
bar1	0.078	1.5	0.191	3.6	5.259				
bar2	0.204	3.9	0.495	9.4	5.245				
bar2-1	0.178	3.4	0.414	7.9	5.251				
bar2-2	0.157	3.0	0.377	7.2	5.249				
bar2-3	0.145	2.8	0.375	7.1	5.252				
bar2-4	0.136	2.6	0.354	6.8	5.250				
bar2-5	0.130	2.5	0.330	6.3	5.252				
bar3	0.330	6.4	0.833	16.0	5.208				
bar4	0.547	10.5	1.228	23.6	5.205				

表 3 A 相电流的边频分量(断条)

断条情况	50 Hz 左边频(最大)			50 Hz 右边频(最大)			基波(50 Hz)		
	幅值	占比/%	幅值	占比/%	幅值	占比/%	幅值	占比/%	幅值
正常	-	-	-	-	8.557				
bar1	0.108	1.3	0.113	1.3	8.630				
bar2	0.220	2.5	0.235	2.7	8.773				
bar2-1	0.107	1.2	0.123	1.4	8.711				
bar2-2	0.021	0.2	0.040	0.5	8.708				
bar2-3	0.113	1.3	0.107	1.3	8.701				
bar2-4	0.180	2.1	0.194	2.2	8.707				
bar2-5	0.199	2.3	0.214	2.5	8.694				
bar3	0.284	3.1	0.324	3.6	9.090				
bar4	0.240	2.6	0.297	3.2	9.397				

表 4 线圈电压的边频分量(单根坏条)

导条面积占比/%	50 Hz 左边频(最大)			50 Hz 右边频(最大)			基波(50 Hz)		
	幅值	占比/%	幅值	占比/%	幅值	占比/%	幅值	占比/%	幅值
100	-	-	-	-	-	-	5.267		
90	0.007	0.1	0.013	0.3	5.267				
80	0.013	0.3	0.030	0.6	5.266				
70	0.021	0.4	0.047	0.9	5.266				
60	0.029	0.6	0.065	1.2	5.266				
50	0.037	0.7	0.085	1.6	5.265				
40	0.046	0.9	0.107	2.0	5.264				
30	0.056	1.1	0.131	2.5	5.264				
20	0.066	1.3	0.157	3.0	5.263				
10	0.076	1.5	0.184	3.5	5.261				

表 5 A 相电流的边频分量(单根坏条)

导条面积占比/%	50 Hz 左边频(最大)			50 Hz 右边频(最大)			基波(50 Hz)		
	幅值	占比/%	幅值	占比/%	幅值	占比/%	幅值	占比/%	幅值
100	-	-	-	-	-	-	8.557		
90	0.010	0.1	0.009	0.1	8.561				
80	0.018	0.2	0.018	0.2	8.562				
70	0.028	0.3	0.027	0.3	8.563				
60	0.038	0.4	0.037	0.4	8.567				
50	0.049	0.6	0.048	0.6	8.571				
40	0.060	0.7	0.059	0.7	8.577				
30	0.072	0.8	0.071	0.8	8.585				
20	0.084	1.0	0.083	1.0	8.594				
10	0.096	1.1	0.095	1.1	8.607				

2.2 转子坏条的仿真研究

对于鼠笼转子制造过程有可能产生气泡的情况, 即坏条情况, 本文为了简化分析, 以气泡面积占转子槽面积为研究对象, 对线圈电压、相电流进行了分析。所分析的电机参数和工况与上文相同。

表 4 和表 5 给出了坏条情况下线圈电压和相电流的边频分量数据。可以看出, 导条面积占比与右边频分量基本呈线性关系。通过检测线圈来检测坏条, 也具有良好的效果和区分度。表 4 和表 5 中导条面积占比指的是(转子槽面积-气泡面积)/转子槽面积。

3 结语

经过仿真研究发现, 断条情况下相电流的两

边频分量较为一致,而检测线圈的两边频分量中右边频分量要大得多。齿部检测线圈是开路的,并不会干扰电机的正常运行。通过与相电流频谱的对比分析可见,本文提出的齿部检测线圈法对于鼠笼型电机转子断条和坏条具有较好的分辨率,从信号源头上提高了检测转子断条故障的有效性,可为今后的电机故障诊断系统提供支撑。

【参考文献】

- [1] 杨海军,查学刚,赵玉桂,等.基于改进型HHT的转子断条故障诊断方法的研究[J].机械工程师,2021,(10): 85.
- [2] 李睿彧,刘飞,梁霖,等.基于参数优化变分模态分解的交流变频电机转子断条故障识别方法[J].电工技术学报,2021,36(18): 3922.
- [3] 林志芳.基于旋转滤波-矩阵束的异步电机转子断条故障诊断[J].电机与控制应用,2019,46(4): 110.
- [4] ELKASABGY N M, EASTHAM A R, DAWSON G E. Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1992, 28(1): 165.
- [5] FILIPPETTI F, FRANCESCHINI G, TASSONI C, et al. AI techniques in induction machines diagnosis including the speed ripple effect[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(1): 98.
- [6] CHO K R, LANG J H, UMANS S D. Detection of broken rotor bars in induction motors using state and parameter estimation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1992, 28(3): 702.
- [7] MILIMONFARED J, KELK H M, NANDI S, et al. A novel approach for broken-rotor-bar detection in cage induction motors [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(5): 1000.
- [8] ANTONINO-DAVIU J A, GYFTAKIS K N, GARCIA-HERNANDEZ R, et al. Comparative influence of adjacent and non-adjacent broken rotor bars on the induction motor diagnosis through MCSA and ZSC methods [C] // IECON 2015 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2015: 1680.
- [9] YU M, TAO X, XIN D, et al. Fault diagnosis and numerical simulation of broken rotor bars for small cage induction motors[C] // 2017 Chinese Automation Congress (CAC), 2017: 5355.
- [10] RAYYAM M, ZAZI M, HAJJI Y. Detection of broken bars in induction motor using the extended Kalman filter (EKF) [C] // 2015 Third World Conference on Complex Systems (WCCS), 2015.
- [11] 张正勇,苟旭丹,严居斌,等. Hilbert 模量与 MUSIC 相结合的感应电机转子断条故障检测方法[J].电气自动化,2018(1): 116.
- [12] 郭俊吉,宋东亚.三相笼型异步电动机转子断条故障诊断研究[J].煤矿机械,2018(11): 141.
- [13] 刘振兴,张哲,尹项根.异步电动机的状态监测与故障诊断综述[J].武汉科技大学学报,2001,24(3): 285.

(上接第 65 页)

- [10] 杜瀚霖,郭志达,李晓莉.基于 Python 的高负荷用电故障预警系统[J].科技创新与应用,2021(2): 36.
- [11] 李俊卿,陈雅婷,李斯璇.机器算法在电气设备故障预警及诊断中的应用[J].科学技术与工程,2020,20(9): 3370.
- [12] 李俊卿,李斯璇,陈雅婷.基于深度置信网络的同步发电机故障诊断方法[J].华北电力大学学报:自然科学版,2020,47(5): 48.
- [13] 李俊卿,陈雅婷.LSTM-CNN 网络在同步电机励磁绕组匝间短路故障预警中的应用[J].华北电力大学学报:自然科学版,2020,47(4): 61.
- [14] 李俊卿,李斯璇,陈雅婷,等.同步发电机定子故障预警模型[J].电力科学与工程,2020,36(5): 7.
- [15] 李俊卿,陈雅婷,李斯璇.基于深度置信网络的同步发电机励磁绕组匝间短路故障预警[J].电力自动化设备,2021,41(2): 153.
- [16] 李俊卿,李斯璇,陈雅婷,等.一种基于 CGAN-CNN 的同步电机转子绕组匝间短路故障诊断方法[J].电力自动化设备,2021,41(8): 169.
- [17] 蒲光杰.基于 Java Web 的信息采集及调试管理系统设计与实现[D].成都:电子科技大学,2020.
- [18] 袁仲雄,周钊,陆文宇.基于 Java EE 的电气设备状态检修管理系统[J].华东电力,2014,42(11): 2306.
- [19] 周庆.AJAX 技术在电力 GIS 项目中的应用[D].成都:电子科技大学,2008.
- [20] 敖丽敏,李林辉.基于 AJAX 的电力图形系统的实现[J].电力系统自动化,2007(9): 47.
- [21] 冯震,袁俊杰.基于 Django 的实验室故障申报系统的设计与实现[J].信息与电脑:理论版,2021,33(7): 151.