

基于瞬时频率分析的笼型电机转子断条故障诊断*

贾朱植^{1,2}, 杨理践¹, 祝洪宇³, 张吉龙⁴

(1. 沈阳工业大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

2. 辽宁科技大学 应用技术学院, 辽宁 鞍山 114051;

3. 辽宁科技大学 电子与信息工程学院, 辽宁 鞍山 114051;

4. 中国科学院 沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 电机电流信号特征分析方法诊断笼型电机转子断条故障时, 诊断效果受制于电机运行状态的影响, 甚至会发生误诊断。针对这一问题, 提出基于瞬时频率分析的笼型电机转子断条故障诊断方法。首先对起动电流进行 FIR 低通滤波, 以提取包含转子断条故障特征的单分量谐波信号, 然后采用相位微分方法计算该信号的瞬时频率, 并根据 $f-s$ 平面上的瞬时频率-滑差曲线判断故障发生与否。在 3 kW 电机试验平台上对所提出的方法进行验证, 试验结果表明了所提方法的有效性。

关键词: 故障诊断; 笼型电机; 转子断条; 瞬时频率

中图分类号: TM 343 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)08-0074-07

Diagnosis of Squirrel-Cage Motor Broken Rotor Bars Based on Instantaneous Frequency Analysis*

JIA Zhuzhi^{1,2}, YANG Lijian¹, ZHU Hongyu³, ZHANG Jilong⁴

(1. School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Institute of Applied Technology, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051, China;

3. School of Electronic and Information Engineering, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051, China;

4. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: The motor current signature analysis (MCSA) method for diagnosing broken rotor bars faults in squirrel-cage motor had some drawbacks that the diagnostic effects were subject to running state of the motor, which could even lead to a wrong diagnosis of the fault. A novelty approach based on the instantaneous frequency analysis of the start-up transient was presented. The proposed approach consists of extracting the mono-component signals from the start-up current by FIR low-pass filtering technique and calculating the instantaneous frequency of the obtained signal, via the derivative of the phase of the analytical signal, and according to the characteristic pattern of the IF-s on the $f-s$ plane, it was judged if the broken rotor bar defect occurs. The experiment verification was performed on a 3 kW motor test bench; the experiment results proved the effectiveness of the proposed method.

Key words: fault diagnosis; squirrel-cage motor; broken rotor bars; instantaneous frequency

* 基金项目: 中国科学院重点部署项目 (KGZD-EW-302); 辽宁省科学技术计划项目 (2015020140)

作者简介: 贾朱植 (1978—), 女, 博士研究生, 研究方向为设备状态监测与故障诊断。

杨理践 (1957—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为设备状态监测及相关理论、无损检测技术等。

0 引言

笼型电机广泛用于风机、泵类、压缩机等机械设备的动力驱动,是冶金、机械制造等行业重要的动力源。开展以笼型电机状态监测和故障诊断为内容的预防维护,对于提高电力驱动系统运行质量、保证生产连续性具有重要意义^[1-2]。由于结构上的特殊性,转子断条是笼型电机特有的故障形式。早期转子断条故障不会导致电机中断运行,但是会造成电机效率下降和电能的隐性流失;对于焊接结构的转子,还可能由于导条跳出导槽而造成定转子刮擦,进而导致生产中断。因此,早期转子断条故障一直是故障诊断领域重点研究内容之一^[2-5]。

可用于转子断条故障诊断的物理量包括电压、电流、磁通等,其中,以单相定子电流为基础的电机电流信号特征分析(Motor Current Signature Analysis, MCSA)是公认的诊断转子断条故障最有前途的方法^[6]。尽管如此,由于 MCSA 是以 FFT 为数学工具的稳态分析方法,因此其诊断性能严重受制于电流信号的平稳性以及决定该平稳性的电机运行状态:在基频频谱泄露和频率分辨率问题影响下,该方法无法诊断电机轻载运行条件下的转子断条故障^[3,7-8];对转速、负载连续变化条件下的转子断条故障诊断问题, MCSA 方法同样无能为力^[5,9];当电机驱动带有减速装置的风机、泵类、磨机、压缩机等负载时,传动系统转矩波动将导致定子电流信号中出现与转子断条故障特征频率相同的频率成分。这种由于特征频率歧义性而造成误诊断的实例已见诸文献报道^[4,10]。因此,近 20 年来,寻求性能稳定、适用性好的诊断方法以弥补 MCSA 的缺陷一直是转子断条故障诊断领域的努力方向^[11-13]。

相比于平稳运行,电机直接起动是一种暂态运行过程。由于起动转矩要显著大于负载转矩,因此这一过程可抑制或避免负载转矩波动、变化对故障特征识别造成的影响;同时,起动瞬间的定子电流高达额定电流的 5~7 倍,相比于稳态,其蕴含的故障特征也更加突出。电机的这一运行特点为采用规避策略诊断转子断条故障提供了思想源泉。在此思想启发下,文献[14]把整个起动时间分成若干时段,然后对每一时段的电流作时频

分析;文献[15]采用连续小波变换提取起动电流信号中左边频带谐波小波脊线;文献[10]利用离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT)的多分辨率分析功能,对起动电流信号直接运用 DWT,进而通过 $(1 \pm 2s)f$ 频谱在联合时间-尺度平面上的时间演变过程诊断转子断条故障。上述方法的共性特点是:采用时频分析数学工具描述起动过程中的转子断条故障特征统计规律,借以揭示故障存在与否。由于涉及到时频分析数学工具的运用,尽管所形成的诊断方法是有效的,但是都不同程度地存在着计算成本偏大^[15]或谱图复杂需要专业解释^[10]的缺憾。

已有研究结果同时表明:转子断条故障电机起动过程中,定子电流信号中的故障特征成分依然存在,但是其频率和幅值都随着滑差 s 不断演变,致使电流信号具有典型的时变性质^[5,9-10,14-16]。对于这种时变信号,基于无穷区间的 FFT 反映不出信号频率随时间变化的行为,相比之下,用于描述非平稳信号时频局域特性的瞬时频率物理量具有更好的适用性^[17]。基于上述分析,本文提出一种基于故障特征谐波瞬时频率分析的笼型电机转子断条故障诊断方法。该方法的核心思想是采用低通滤波提取起动电流信号中的转子断条故障左边频带谐波,构造该谐波的瞬时频率-滑差曲线,通过该曲线与理想特性曲线相似度对比完成诊断决策。本文所提方法的优势在于能够以较小的诊断成本获取故障特征,并采取图形比较的方式做诊断决策,故障特征描述清晰直观,便于实际应用。

1 起动阶段的转子断条故障特征描述

1.1 理论分析

当笼型电机发生转子断条故障时,导条中不再有电流流过,由此造成的定、转子之间气隙磁场畸变使定子绕组中产生一系列具有一定频率和幅值的谐波分量,即转子断条故障特征谐波分量。这时,定子电流仍然三相对称,且分别是由电源基频 f 及其边频带成分“构成”的多频信号,其中 a 相电流具有如式(1)所示的数学表达形式^[3]。

$$i_{\text{bb}} = \sqrt{2}I_0 \cos(\omega t + \varphi) + \sum_{k=1}^{\infty} \{ \sqrt{2}I_{k,l} \cos[(\omega + k\omega_0)t + \varphi_{k,l}] + \sqrt{2}I_{k,r} \cos[(\omega - k\omega_0)t + \varphi_{k,r}] \} \quad (1)$$

式中： i_{bb} ——故障电流，电源基波角频率 $\omega = 2\pi f$ ，故障特征角频率 $\omega_0 = 2\pi f_0 = 4\pi sf, f_0 = 2sf$ ；
 I ——基波电流有效值；
 φ ——电压和电流之间的相位差；
 $I_{k,l}, I_{k,r}, \varphi_{k,l}, \varphi_{k,r}$ ——边频带谐波幅值和初相角。

在这些特征谐波分量中，常用来诊断转子断条故障的，是出现在基频左侧的左边频带谐波分量。该分量频率如式(2)所示。

$$f_b = f(1 - 2s) \quad (2)$$

其中： $s = (n_0 - n) / n_0$ 。

式中： f_b ——转子断条故障特征频率；

s ——滑差；

n ——电机实际转速， $n_0 = 60f/p$ ，是由 f 和极对数 p 共同决定的电机同步转速。

从式(2)可知， f_b 是滑差 s 的单值函数。当电机稳态运行时， s 近似不变，因而 f_b 的值也近似稳定。这在电流 FFT 频谱中表现为基频 50 Hz 左侧的明显谱线。电机起动过程中， f_b 与 s 仍然服从式(2)的关系，但是由于 s 经历着从 1 到近似为 0 的变化，所以 f_b 不再恒定，而是以一定的规律随着 s 的变化逐渐演变。以空载起动为例，起动开始时，转速为 0，滑差 $s = 1$ ，此时故障特征频率 f_b 为 -50 Hz (f_b 的符号对应着气隙磁场与转子的相对运动方向)。随着电机转速增加， s 逐渐减小；当转速增加到额定转速约一半时， s 近似等于 0.5，特征频率 f_b 近似等于 0 Hz。随后，电机转速继续增加， s 继续减小， f_b 则从 0 开始逐渐增加。当起动过程结束、电机达到稳定转速时， s 接近 0，此时特征频率 f_b 的值接近基频 50 Hz。

上述特征频率 f_b 随滑差 s 变化而逐渐演变的过程可以用频率-滑差理想特性曲线加以描述。如图 1 所示，在 f - s 平面上， f_b 与 s 之间的变化关系表现为明显的“V”形曲线：“V”形曲线的起点、顶点和终点分别对应于电机刚刚起动、电机转速升至 1/2 同步转速以及起动结束的时刻。当电机带负载起动时，特性曲线的起点和终点会略有变化，但是其形状仍然与图 1 相类似。需要指出的是，图 1 所示“V”形曲线由式(2)所示函数关系唯一决定，因此，任何转子断条故障笼型电机在起动过程中的左边频带谐波频率 f_b 随滑差 s 演变的过程都符合这个

“V”形曲线的变化规律。换言之，只要在起动电流信号中找到符合上述演变规律的特性曲线，即可对电机故障状态做出确认，由此奠定了起动阶段转子断条故障诊断的理论基础。

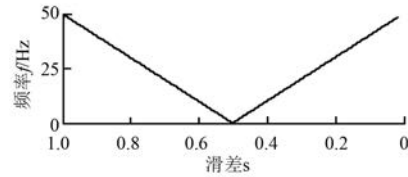


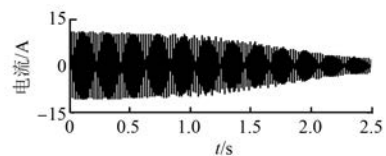
图 1 转子断条故障左边频带谐波频率-滑差理想特性曲线

1.2 仿真分析

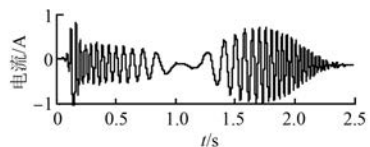
在 MATLAB 环境下对带有 1 根转子断条故障的笼型电机起动过程进行仿真，仿真电机参数如表 1 所示。图 2 是仿真得到的起动电流时域波形以及与之对应的转子断条故障左边频带谐波分量时域波形。从图 2 可以看到：对于不太快速的起动，电磁瞬态结束后，电机开始加速直至达到稳态。在此期间， f_b 经历着从 $\approx -50 \text{ Hz} \rightarrow 0 \text{ Hz} \rightarrow \approx 50 \text{ Hz}$ 的变化过程[对应于图 2(b)波形疏密程度的不同变化]； f_b 的幅值也有类似的变化规

表 1 仿真试验电机参数

参数	数值	参数	数值
额定功率/kW	3.0	定子电阻 R_s/Ω	1.85
额定电压/V	380	定子电感 L_s/H	0.294
额定电流/A	6.8	转子电阻 R_r/Ω	2.658
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 420	转子电感 L_r/H	0.289
频率/Hz	50	定转子互导 L_m/H	0.284
极对数	2	转动惯量/(kg·m ²)	0.128



(a) 仿真故障电机起动电流信号时域波形



(b) 左边频带谐波时变信号波形

图 2 仿真故障电机起动电流信号时域波形和左边频带谐波时变信号波形

律:从 $t=0$ 开始,幅值相对固定,随着时间 t 的推移,幅值逐渐减小,在 f_b 为 0 时幅值接近为 0。此后,随着 f_b 频率值增加其幅值也逐渐增大,并在某一点达到最大值,甚至超过前半部分幅值极大值,随后幅值再逐渐降低直到稳态时为一固定值。

图 2 表明,起动阶段的转子断条故障左边频带谐波是一个频率和幅值随时间变化的时变信号。对于该时变信号,由 FFT 求出的傅里叶频率反映不出信号频率随时间变化的特点。为了提取出前述“V”形曲线特征以便对转子断条故障状态予以识别,需要借助于瞬时频率的概念才能完成。但是,众所周知,瞬时频率是与单分量信号相对应的物理概念。前文理论分析表明:起动阶段的定子电流是由电源基频 f 及其边频带成分“构成”的多分量信号,这无疑对瞬时频率概念的使用造成了障碍。因此,从物理实现的角度,为了运用瞬时频率概念提取出如图 1 所示的“V”形曲线继而实现诊断过程,必须首先解决 2 个问题:(1)获得图 2(b)所示的左边频带谐波时变信号;(2)求出该时变信号瞬时频率 f_i 与滑差 s 之间的对应关系。

2 基于起动电流左边频带谐波瞬时频率分析的转子断条故障诊断方法

所提出的诊断方法主要由滑差标度子模块、单分量信号提取子模块、瞬时频率计算子模块、故障特征识别与诊断子模块 4 部分组成,原理图如图 3 所示。其中,滑差标度子模块的主要功能是根据实测转速 n 获取滑差 s 的时变信号,用以构建“V”形曲线标度基础;单分量信号提取子模块用以提取起动电流信号中的左边频带谐波,消除高频成分以避免后续求取瞬时频率过程中的噪声干扰;在瞬时频率计算子模块,确定单分量信号瞬时频率,转化成瞬时频率-滑差“V”形曲线,并将

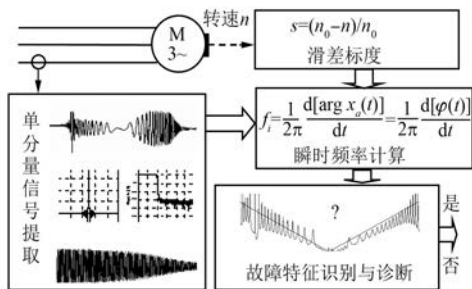


图 3 故障诊断原理图

所得结果传递给故障特征识别及诊断子模块。最后,在故障特征识别及诊断子模块中,根据实测“V”形曲线与理想特性曲线的相似度对比判断故障发生与否。

2.1 基于 FIR 低通滤波的单分量信号提取

提取故障特征“V”形曲线,需要准确计算信号的瞬时频率;而估计信号的瞬时频率,首先需要信号满足单分量要求。将信号分解为单分量信号的典型方法包括小波变换^[10]、经验模式分解^[18]、FIR 低通滤波^[19]等。尽管方法繁多,但是在方法的选择上需要同时兼顾信号特点和诊断要求两个方面。就本文所处理的问题而言,由于反映转子断条故障特征的左边频带谐波频率分布于低频带,因此只要具有低通滤波功能的方法即能满足应用条件;同时,由于转子断条属于渐进性故障类型,因此又可以适当放宽故障诊断的实时性要求。综合上述因素,本文采用线性相位精确、滤波性能稳定、设计步骤简单、易于物理实现的有限脉冲响应数字滤波器提取单分量信号。表 2 为采用窗函数法设计 FIR 低通滤波器的主要步骤。如表 2 所示,为了设计出满足性能要求的滤波器,需要考虑阻带最小衰减 A_s 、通带边界频率 ω_p 、阻带边界频率 ω_s 等参数;实际使用中,则只需设定 FIR 低通滤波器截止频率即可实现所需的滤波功能,操作非常方便。

表 2 FIR 低通滤波器设计步骤

FIR 低通滤波器设计步骤	
Step1	根据过渡带宽及阻带最小衰减要求,选定窗的形状和窗口大小 N ;
Step2	给定要求的频率响应函数 $H_d(e^{j\omega})$;
Step3	计算 $H_d(e^{j\omega})$ 的单位冲激响应 $h_d(n)$;
Step4	根据所选择的窗函数 $w(n)$ 修正 $h_d(n)$,得到所设计的 FIR 滤波器的单位响应 $h(n) = w(n)h_d(n), n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

2.2 瞬时频率计算

经 FIR 低通滤波器得到的谐波信号瞬时频率可通过相位微分方法^[20]计算。

定义单分量实信号 $x(t)$ 的 Hilbert 变换, $y(t)$ 为 $x(t)$ 与函数 $1/t$ 的卷积:

$$y(t) = HT[x(t)] = \frac{1}{\pi t} \cdot x(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (3)$$

通过 $x(t)$ 及其 Hilbert 变换 $y(t)$, 构成与 $x(t)$ 相对应的解析信号 $x_a(t)$:

$$x_a(t) = x(t) + jy(t) = A(t)e^{j\varphi(t)} \quad (4)$$

其中:

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \quad (5)$$

$$\varphi(t) = \arctan[y(t)/x(t)] \quad (6)$$

式中: $A(t)$ ——信号 $x_a(t)$ 的瞬时幅值, 反映信号 $x(t)$ 的能量随时间变化的情况;

$\varphi(t)$ ——信号 $x_a(t)$ 的瞬时幅角。

根据式(6), 瞬时频率定义为瞬时幅角 $\varphi(t)$ 对时间 t 的微分, 如式(7)所示。

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \frac{d[\arg x_a(t)]}{dt} = \frac{1}{2\pi} \frac{d[\varphi(t)]}{dt} \quad (7)$$

由式(7)给出的瞬时频率定义刻画了信号谱峰在 f - t 平面上的位置及其随时间的变化情况。从工程实用的角度, 为了利用式(2)揭示电机启动过程中转子断条故障特征频率 f_b 随滑差 s 的演变规律, 需要在式(7)计算基础上, 同时获得电机转速 n , 并利用滑差公式 $s = (n_0 - n)/n_0$ 得到滑差-时间曲线 s - t , 进而将 f - t 平面的瞬时频率定义转化为 f - s 平面的瞬时频率, 为实际应用瞬时频率概念诊断转子断条故障提供基础。

2.3 所提诊断方法的应用步骤

(1) 获取电机起动电流及转速信号 n , 得到 s - t 关系曲线;

(2) 设计 FIR 低通滤波器, 利用设计好的低通滤波器对起动电流信号进行低通滤波;

(3) 根据式(3)~式(7), 计算步骤(2)提取到的谐波信号瞬时频率, 并转化成 f_i - s 曲线;

(4) 将 f_i - s 曲线与理想频率-滑差特性曲线做图形对比, 得出诊断结论。

3 试验及结果分析

3.1 试验系统

自制试验系统由电源、试验电机、电机负载、数据采集电路组成, 如图 4 所示。试验电机包括用于试验参照的无故障电机和带有 1 根转子断条故障的故障电机各 1 台, 2 台电机型号相同, 额定功率 3 kW、额定电压 380 V、额定电流 6.8 A。数据采集系统由电流传感器、转速传感器、调理电路、自制 DSP 数据采集卡构成。试验过程中, 电流数据采样频率 5 kHz, 采样时间 3 s, 在 MATLAB



图 4 电机试验台及试验转子

7.0 环境下对测得的数据做离线分析。

数据处理过程中, 采用 Kaiser 窗设计 FIR 低通滤波器。表 3 为滤波器主要特性参数; 图 5 和图 6 分别为 Kaiser 窗时域幅值和幅频特性以及采用该窗函数设计的 FIR 低通滤波器时域幅值和幅频特性。

表 3 FIR 低通滤波器主要特性参数

主要参数	参数值
滤波器形式	低通
设计方法	FIR(Kaiser 窗)
采样频率/Hz	5 000
阻带最小衰减 A_r /dB	140
通带边界频率 ω_p/π	0.018 4
阻带边界频率 ω_s/π	0.019 6

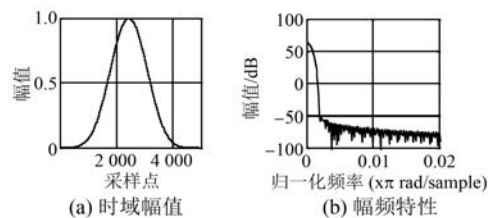


图 5 Kaiser 窗时域幅值和幅频特性

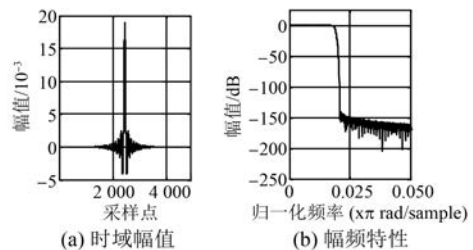


图 6 FIR 低通滤波器时域幅值和幅频特性

3.2 试验结果分析

图 7 所示为 1 根转子断条故障笼型电机起动电流信号时域波形以及与之对应的转速 n 和滑差 s 时变信号。该起动电流信号经 FIR 低通滤波处理后的谐波信号如图 8 所示。由图 8 可见, 谐波分量经历着与图 2(b) 所示类似的演变过程, 暗示

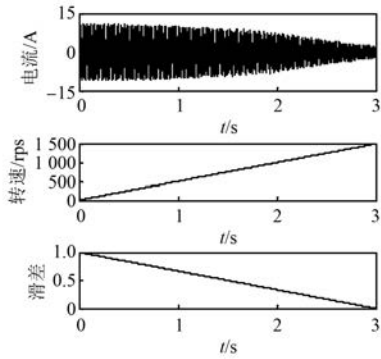


图7 故障电机起动电流时域波形及转速、滑差信号

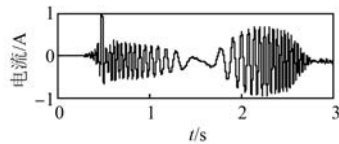


图8 起动电流信号中的转子断条故障特征谐波

着电机存在转子断条故障的可能,同时也表明 FIR 低通滤波方法能有效提取出起动电流信号中含有的故障特征谐波信号。对图 8 所示谐波信号求取瞬时频率 f_i ,并以图 7 所示的滑差 s 为标度基准绘制 f_i - s 关系曲线 1,如图 9 所示,为便于比较,同时绘制出根据 $f_i = (1-2s)f$ 得到的理想特性曲线 2。由图 9 可见:瞬时频率 f_i 随滑差 s 变化过程表现出非常明显的“V”形特征,且与同图所示的理想特性曲线 2 高度相符,表明电机发生了转子断条故障。这与电机的实际健康状况是完全一致的,从而验证了本文所提方法的有效性。

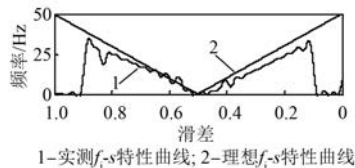


图9 转子断条故障特征谐波瞬时频率-滑差特性曲线与理想特性曲线对比

需要指出的是,图 9 所示的 f_i - s “V”形曲线主要集中在滑差 $s \in (0.1, 0.9)$ 之间,这与理想特性曲线 2 的全滑差范围分布略有出入。事实上,本文方法主要是根据瞬时频率 f_i 随滑差 s 演变趋势进行故障发生与否的判断,从确定电机健康状态角度来说,只要提取出 f_i 随 s 变化的“V”形曲线趋势即可实现诊断目的,因此上述微弱差异并不

会对诊断结论造成过多的负面影响。

为了通过试验对比进一步验证本文所提方法的有效性,对无故障电机重复同样的“诊断”步骤。图 10 为实测无故障电机起动电流信号以及在此过程中的转速 n 、滑差 s 时变信号。对比图 10 和图 7 可见,两者在外观上没有任何差异。图 11 为无故障电机起动电流经 FIR 低通滤波后的谐波信号。由于电机本身是健康的,因此除了电磁暂态造成的波动以及信号噪声引起的微小波动之外,图中所示信号基本平稳。对图 11 所示信号求取瞬时频率 f_i 并转化成 f_i - s 关系曲线如图 12 所示。图 12 中 f_i - s 关系曲线基本平坦,没有出现刻画转子断条故障特征的“V”形曲线,因此可以断定该电机是健康的,这与电机的实际健康状况完全一致。上述试验过程表明,所提出的诊断方法能正确区分出无故障电机和健康电机的健康状态,因而具有较好的诊断能力。

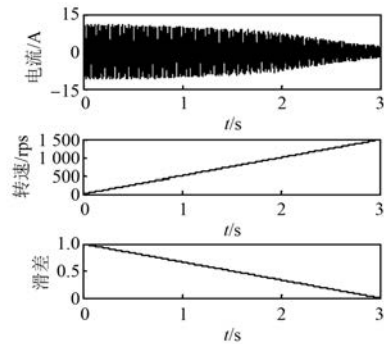


图10 无故障电机起动电流、转速和滑差信号

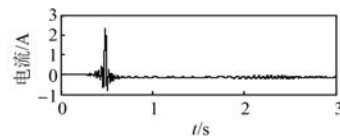


图11 无故障电机起动电流 FIR 低通滤波后谐波信号

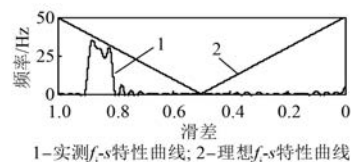


图12 无故障电机起动电流 FIR 低通滤波后谐波信号瞬时频率-滑差特性曲线与理想特性曲线对比

4 结 语

在转子断条故障笼型电机起动过程中,定子

电流包含的左边频带谐波瞬时频率在 f - s 平面上表现为明显的“V”形曲线变化过程。这一特征可用于起动状态下的转子断条故障诊断。理论分析及试验均表明:本文提出的方法可以方便地提取出该“V”形曲线,并据此对电机健康状态做出判断。相比于稳态 MCSA 分析中根据单一谱线识别故障的做法,所提方法根据故障特征的 f_i - s 演变过程进行故障发生与否判断,因而比稳态 MCSA 更具可靠性。从实际应用的角度,所提出的方法采取图形对比的方式进行诊断决策,具有简洁直观、便于操作的特点。对故障定性描述给出量化的标准,并在此基础上进行故障严重程度分析是下一步工作的努力方向。

【参考文献】

- [1] 阳同光,蒋新华,付强.混合蛙跳脊波神经网络观测器电机故障诊断研究[J].仪器仪表学报,2013,34(1): 193-199.
- [2] EREN L, ASKAR M, DEVANEY M J. Motor current signature analysis via four-channel FIR filter banks [J]. *Measurement*, 2016, 89(5): 322-327.
- [3] 贾朱植,徐建英,宋向金,等.鼠笼电机转子断条故障的定子电流信号平方解调分析诊断方法[J].仪器仪表学报,2015,36(9): 2097-2103.
- [4] VERUCCHI C, BOSSIO G, BOSSIO J, et al. Fault detection in gear box with induction motors: an experimental study [J]. *IEEE Latin America Transactions*, 2016, 14(6): 2726-2731.
- [5] 贾朱植,杨理践,祝洪宇,等.时变转速运行状态下鼠笼电机转子断条故障诊断[J].仪器仪表学报,2016,37(7): 834-842.
- [6] BELLINI A, FILIPPETTI F, TASSONI C, et al. Advances in diagnostic techniques for induction machines [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(12): 4109-4126.
- [7] 祝洪宇,胡静涛,高雷,等.基于变频器供电侧电流 Hilbert 解调制方法的空载电机转子断条故障诊断[J].仪器仪表学报,2014,35(1): 140-147.
- [8] 祝洪宇,胡静涛,高雷,等.Morlet 小波解调制方法诊断鼠笼电机转子断条故障[J].电机与控制学报,2014,18(7): 31-36.
- [9] 祝洪宇,胡静涛,高雷,等.负载连续变化时鼠笼电机早期转子断条故障诊断[J].仪器仪表学报,2014,35(7): 1646-1653.
- [10] ANTONINO-DAVIU J, GUASP M R, FOLCH J R, et al. Application and optimization of the discrete wavelet transform for the detection of broken rotor bars in induction machines [J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2006, 21(2): 268-279.
- [11] JAIN P, CHOPRA K, DARPE A K. Use of bispectrum in severity analysis of rotor bar cracks in induction motors [J]. *Advances in Vibration Engineering*, 2012, 11(3): 317-323.
- [12] SASAKI A, CONSTANTINOF A, PAN P, et al. Robust diagnosis algorithm for identifying broken rotor bar faults in induction motors [J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2014, 9(9): 37-44.
- [13] YIN Z, HOU J. Recent advances on SVM based fault diagnosis and process monitoring in complicated industrial processes[J]. *Neurocomputing*, 2016, 17(4): 643-650.
- [14] 邱阿瑞.用起动电流的时变频谱诊断鼠笼异步电机转子故障[J].中国电机工程学报,1995,15(4): 267-273.
- [15] ZHANG Z, REN Z, HUANG W. A novel detection method of motor broken rotor bars based on wavelet ridge[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2003, 18(3): 417-423.
- [16] RIERA G M, ANTONINO D J A, ROGER F J, et al. The use of the wavelet approximation signal as a tool for the diagnosis of rotor bar failures [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2008, 44(3): 716-726.
- [17] 魏云冰,崔光照,杨存祥,等.基于定子起动电流局域波分析的鼠笼异步电动机转子故障检测[J].仪器仪表学报,2007,28(6): 1108-1112.
- [18] FAIZ J, GHORBANIAN V, EBRAHIMI B M. EMD-based analysis of industrial induction motors with broken rotor bars for identification of operating point at different supply modes [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, 10(2): 957-966.
- [19] RIERA G M, ANTONINO D J, RUSEK J, et al. Diagnosis of rotor asymmetries in induction motors based on the transient extraction of fault components using filtering techniques[J]. *Electric Power Systems Research*, 2009, 79(8): 1181-1191.
- [20] TRAJIN B, CHABERT M, REGNIER J, et al. Hilbert versus Concordia transform for three-phase machine stator current time-frequency monitoring[J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2009, 23(8): 2648-2657.

收稿日期: 2016 -11 -01