

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*

祝洪宇^{1,2,3,4}, 胡静涛^{1,2,3}, 高雷^{1,2,3}, 黄昊^{1,3}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学 北京 100049;
3. 中国科学院网络化控制系统重点实验室 沈阳 110016; 4. 辽宁科技大学 鞍山 114051)

摘要: 变频器供电侧电流比电机定子电流易于获取且较少受到噪声干扰。然而,由于基频频谱泄露的影响,基于变频器供电侧电流的电机电流信号特征分析方法无法诊断低负载或空载运行条件下的鼠笼电机转子断条故障。首先基于转移函数和调制理论建立了变频器供电侧电流谐波分析简化模型。在此基础上,提出了基于 Hilbert 解调制的空载电机转子断条故障诊断方法。该方法的核心是采用 Hilbert 变换提取电机稳态运行时的变频器供电侧电流信号包络线、构造基于包络线平方的解析信号并对该信号作 FFT 频谱分析。在 3 kW 电机实验台上对所提出的方法进行实验验证,实验结果表明了该方法的有效性。

关键词: 鼠笼电机; 希尔伯特变换; 解调制; 故障诊断

中图分类号: TM343 TH86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Fault diagnosis of broken rotor bars of inverter-fed squirrel-cage induction motor at no-load using supply-side current based on Hilbert demodulation technique

Zhu Hongyu^{1,2,3,4}, Hu Jingtao^{1,2,3}, Gao Lei^{1,2,3}, Huang Hao^{1,3}

(1. *Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *Key Laboratory of Networked Control System, CAS, Shenyang 110016, China*; 4. *University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China*)

Abstract: In comparison with stator current, supply-side current of inverter-fed squirrel-cage induction motor is convenient to acquire and immune to noise. However, when a motor operates under light load or no-load conditions, the motor current signature analysis (MCSA) method based on supply-side current can not diagnose the broken rotor bar faults of inverter-fed squirrel-cage induction motor due to the spectrum leakage submerging other spectral response in its vicinity. In this paper, a simplified model of supply-side current harmonic signal for squirrel-cage induction motor is firstly established using the transfer function concept and frequency modulation theory. A diagnosis method of broken rotor bar faults of inverter-fed squirrel-cage induction motor at no-load based on Hilbert demodulation technique is proposed. The core of the method is to extract the envelope of the supply-side current signal under the motor steady operation condition using Hilbert transform, construct the analytic signal based on the square of the envelope and perform the FFT spectrum analysis of the signal. The experiment verification was performed on a 3 kW motor experiment test bench; the experiment results prove the effectiveness of the proposed method.

Keywords: squirrel-cage induction motor; Hilbert transform; demodulation; fault diagnosis

收稿日期: 2013-08 Received Date: 2013-08

* 基金项目: 中国科学院重点部署项目(KGZD-EW-302)资助

1 引 言

近年来,变频驱动系统广泛应用于电机高性能调速控制及一般性能节能调速,成为现代工业生产的重要动力保证和节能降耗手段,对变频驱动系统进行状态监控,保证其健康、可靠运行意义重大^[1-2]。在变频驱动系统中,鼠笼电机转子断条故障是常见故障形式之一,常常造成电机运行效率下降、能源隐性流失、不可预测的设备停工或生产中断^[3-4]。然而,由于变频器供电的电机故障特征不易提取,为满足调速需要而采取的不同控制策略进一步限制了既有诊断方法的移植使用,因此变频器供电的转子断条故障早期检测诊断非常困难,是一个重要的研究方向^[1-2,5]。

电机电流信号特征分析(motor current signature analysis, MCSA)方法根据电机稳态运行时的单相定子电流信号 FFT 频谱中是否存在 $f_b = (1 \pm 2s)f$ 频率成分和幅值大小来判断故障发生与否及其严重程度(f_b 为故障特征频率, f 为电源频率, s 为转差率),是诊断转子断条故障的首选方法。该方法的缺陷在于无法克服负载波动导致的诊断歧义性,而且特征频率 f_b 的幅值、位置与故障严重程度及电机负载大小有关^[6],当电机空载运行时, MCSA 方法彻底失效。

空载是电机常见运行状态,在数控机床加工、机车牵引等场合经常出现,而性能优越的故障监测系统应该在包括电机空载在内的任何状态都能对电机健康状况作出评判^[7-9];从另一个角度看,新电机出厂及电机维修后经常需要作空载测试,发展空载状态下的故障诊断方法不仅节约诊断成本也将从根源上消除故障隐患,因此研究空载条件下的电机故障诊断方法非常必要。然而由于问题本身的难度,公开发表的文献中对这方面的研究很少且只局限于工频供电的情况^[10]。

基频频谱泄露是造成 MCSA 方法无法诊断空载运行鼠笼电机转子断条故障的主要原因。目前常用的削弱或消除基频频谱泄露的方法包括加窗方法、陷波滤波方法、多输入的电压和电流信号特征分析方法、基于数学变换的解调制方法^[11-17]等。调制理论认为:调制后的电流信号包络线中包含丰富的故障信息,因此对该信号进行解调处理就可以消除基频频谱泄露影响。在诸多基于数学变换的解调制方法中, Hilbert 变换能够以较小的计算量实现信号的幅值解调,有效抑制基频频谱泄露,本文将在第 3 节详细介绍该方法。另外,基于电机启动电流的暂态电机电流信号特征分析方法不受电机负载变化影响,但是现代变频器大都具有的软启动功能限制了启动电流的变化,因此该方法并不适用于变频器供电的转子故障诊断^[18]。

综上所述,提出一种基于变频器供电侧电流 Hilbert 解调制的空载鼠笼电机转子断条故障诊断方法。首先建

立变频器供电侧电流谐波分析简化模型,在此基础上,采用 Hilbert 变换对供电侧电流作解调制处理,借以提取故障电流包络线消除基频成分,然后构造基于包络线平方的解析信号并对该信号作 FFT 频谱分析,最后通过实验验证所提方法的有效性。

2 变频器供电电流谐波分析简化模型

2.1 变频器供电侧电流基本特征

变频器供电的鼠笼电机定子电流有 3 种获取方式:变频器输出侧(电机定子电流)、变频器逆变电路输入侧和变频器供电侧。目前,基于 MCSA 的变频器供电鼠笼电机故障诊断大都是采用变频器输出侧电流开展研究。事实上,由于变频器中电力电子开关频繁关断作用以及变频装置中电磁干扰(electromagnetic interference, EMI)和电磁兼容(electromagnetic compatibility, EMC)干扰的影响,定子电流会受到严重的噪声污染,突出表现为电流信号中明显含有较多的高次谐波。如果采用该信号作故障分析必须对信号进行烦琐的预处理。相比之下,由于变频器前置二极管整流电路和大滤波电容的作用,变频器供电侧电流不是正弦波,在每半个周期也只有等量的部分电流流过,但是供电侧电流的频率总是等于 50 Hz 且基本上不受噪声信号干扰,从图 1 所示的变频器供电侧和输出侧电流时域波形可清晰地看出两者的差别。

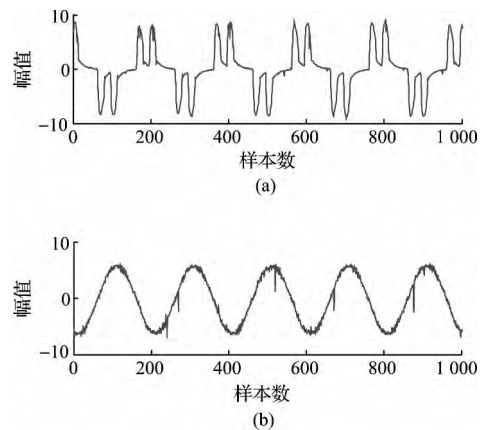


图 1 变频器供电电流 (a) 和电机定子电流 (b) 时域波形
Fig. 1 Supply-side current waveform (a) and motor stator current waveform (b)

在工业现场,用于控制或保护的电流互感器常安装在变频器供电侧,电流信号获取非常方便。因此,当鼠笼电机由变频器供电时,采用变频器供电侧电流替代传统的电机定子电流作转子断条故障分析,避免了重复安装电流互感器造成的成本浪费,降低了数据处理的软、硬件开销,且可以方便地构成非侵入式电机运行状态监测系统,更具有实际应用意义。

2.2 变频器供电电流谐波分析简化模型

转移函数(transfer function)方法继承了开关函数法思想,将晶闸管换流过渡过程进行线性化处理,可显著降低开关函数分析模型误差,常用于变频器供电电流谐波分析^[19-20]。在如图2所示的脉宽调制(pulse width modulation, PWM)电压型变频驱动系统中, $s_{ia}、s_{ib}、s_{ic}$ 为变频器整流电路 $a、b、c$ 相开关函数, $s_{ua}、s_{ub}、s_{uc}$ 为变频器逆变电路 $a、b、c$ 相开关函数; $i_a'、i_b'、i_c'$ 为变频器整流电路输入电流(即变频器供电电流), $i_a、i_b、i_c$ 为变频器逆变电路输出电流(即电机定子电流); $u_a'、u_b'、u_c'$ 为变频器整流电路输入电压(即变频器供电电压), $u_a、u_b、u_c$ 为变频器逆变电路输出电压(即电机定子电压); $u_d、i_d$ 分别为变频器逆变电路直流输入电压和直流输入电流, Z 为变频器输出端到鼠笼电机中性点的阻抗,开关器件采用绝缘栅双极型晶闸管。假定变频器由理想三相对称电压供电,系统阻抗为零,开关器件工作在理想状态。根据如图2所示的电路结构和调制理论,得到如式(1)所示的变频器供电电流谐波分析简化模型。由该模型可知,变频器供电电流表达式取决于开关函数,选择不同的开关函数也就对应着不同的供电电流表达式。

$$\begin{cases} (i_a' \ i_b' \ i_c') = i_d (S_{ia} \ S_{ib} \ S_{ic}) \\ i_d = (i_a \ i_b \ i_c) (S_{ua} \ S_{ub} \ S_{uc})' \\ u_d = (u_a' \ u_b' \ u_c') (S_{ia} \ S_{ib} \ S_{ic})' \\ (u_a \ u_b \ u_c) = u_d (S_{ua} \ S_{ub} \ S_{uc}) \\ (i_a \ i_b \ i_c) = (u_a \ u_b \ u_c) / Z \end{cases} \quad (1)$$

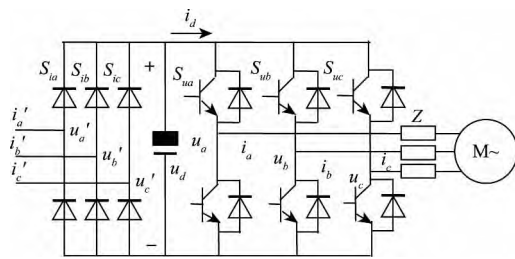


图2 PWM电压型变频驱动系统原理图
Fig.2 Schematic diagram of the PWM VSI-fed adjustable speed drive

2.3 鼠笼电机无故障时变频器供电电流模型

如图2所示的变频驱动系统中,二阶自然采样PWM电压型变频器各开关函数具有如式(2)~(7)所示的双重傅里叶变换表达式:

$$S_{ia}(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cos(\omega t - \alpha) + \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \sum_{n=1}^N \frac{1}{6n \pm 1} \cos[(6n \pm 1)\omega t - \alpha] \quad (2)$$

$$S_{ib}(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cos\left(\omega t - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \sum_{n=1}^N \frac{1}{6n \pm 1} \cos\left[(6n \pm 1)\left(\omega t - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right)\right] \quad (3)$$

$$S_{ic}(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cos\left(\omega t - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \sum_{n=1}^N \frac{1}{6n \pm 1} \cos\left[(6n \pm 1)\left(\omega t - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right)\right] \quad (4)$$

$$S_{ua}(t) = \frac{M}{2} \sin(\omega_s t) + \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} J_0\left(\frac{mM\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{2}\right) \sin(m\omega_c t) + \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=\pm 1}^{\pm \infty} \left\{ \frac{J_n\left(\frac{mM\pi}{2}\right)}{m} \sin\left[\frac{(m+n)\pi}{2}\right] \sin(m\omega_c t + n\omega_s t) \right\} \quad (5)$$

$$S_{ub}(t) = \frac{M}{2} \sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} J_0\left(\frac{mM\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{2}\right) \sin(m\omega_c t) + \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=\pm 1}^{\pm \infty} \left\{ \frac{J_n\left(\frac{mM\pi}{2}\right)}{m} \sin\left[\frac{(m+n)\pi}{2}\right] \sin\left[m\omega_c t + n\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right)\right] \right\} \quad (6)$$

$$S_{uc}(t) = \frac{M}{2} \sin\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} J_0\left(\frac{mM\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{2}\right) \sin(m\omega_c t) + \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=\pm 1}^{\pm \infty} \left\{ \frac{J_n\left(\frac{mM\pi}{2}\right)}{m} \sin\left[\frac{(m+n)\pi}{2}\right] \sin\left[m\omega_c t + n\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right)\right] \right\} \quad (7)$$

在式(2)~(7)中, α 为整流装置控制角; $\omega = 2\pi f$ 为供电电源角频率; $\omega_s = 2\pi f_s$ 为正弦调制波角频率(即变频器输出基波角频率); $\omega_c = 2\pi f_c$ 为三角载波信号角频率; m 为三角载波频率的倍数; n 为调制波的谐波次数; $M = U_s/U_c \leq 1$ 为调制度; $N = \omega_c/\omega_s \geq 1$ 为载波比; $J_0、J_n$ 是第一类贝塞尔函数。将式(2)~(7)代入式(1)即可得到变频器供电电流数学表达式如式(8)所示。这里只给出变频器 a 相供电电流 $i_a'(t)$ 表达式, $b、c$ 两相具有对称的形式。

$$i_a'(t) = \frac{\sqrt{3}M^2 E_d}{4\pi |Z_1|} \left\{ \cos(2\pi f t - \alpha) \cos(\pi - \varphi_1) + \cos(2\pi f t - \alpha) \cos(4\pi f_s t - \varphi_1) + \sum_{n=1}^N \frac{1}{6n \pm 1} \cos[(6n \pm 1)(2\pi f t - \alpha)] \cos(4\pi f_s t - \varphi_1) + \sum_{n=1}^N \frac{1}{6n \pm 1} \cos[(6n \pm 1)(2\pi f t - \alpha)] \cos(\pi - \varphi_1) \right\} + i_h(t) \quad (8)$$

由式(8)可知,当电机无故障时,变频器 a 相供电电流 $i_a'(t)$ 主要包含电源频率 f 、电源频率 f 的 $(6n \pm 1)$ 倍谐波;电源频率 f 的边频带成分 $f \pm 2f_s$ 、电源频率 f 的 $(6n \pm 1)$ 倍谐波的边频带成分 $(6n \pm 1)f \pm 2f_s$ 、与载波频率有关的高次谐波分量 $i_h(t)$ 。 Z_1 为基波角频率下的变频

器输出端到电机中性点阻抗 φ_1 是对应的阻抗角。

2.4 鼠笼电机转子断条故障时变频器供电电流模型

根据调制理论,当鼠笼电机出现转子断条故障时,电流、转速、转矩都将受到周期性的扰动影响,该扰动同时对定子三相电流信号 $i_a(t)$ 、 $i_b(t)$ 、 $i_c(t)$ 进行幅值和相位调制,并从变频器输出侧向变频器输入侧传递。如果只考虑幅值调制和扰动基波分量的影响,则调制后的变频器 a 相供电电流 $i'_f(t) = i'_a(t) [1 + a \cos(\omega_o t)]$ 。其中 a 为调制深度, ω_o 为扰动基波角频率且 $\omega_o = 2\pi f_o = 2s\omega_s = 4\pi s f_s$ 。结合式(8),可得到如式(9)所示的鼠笼电机转子断条故障时变频器供电电流 $i'_f(t)$ 表达式。

在式(9)中 E_d 是变频器整流侧输出直流电压, f_s 是变频器设定频率。由式(9)可知,当发生转子断条故障时,变频器 a 相供电电流 $i'_f(t)$ 中仍然包含电源频率 f 、电源频率 f 的 $(6n \pm 1)$ 倍谐波 f 和 $(6n \pm 1)f$ 的边频带谐波以及高次谐波。除此之外,还会出现故障特征频率 $f \pm 2sf_s$ 、 $f \pm 2f_s \pm 2sf_s$ 、 $(6n \pm 1)f \pm 2sf_s$ 、 $(6n \pm 1)f \pm 2f_s \pm 2sf_s$, 其中电源频率 f 对应的故障特征频率 $f \pm 2sf_s$ 的幅值要明显大于其他故障特征频率的幅值。如果只考虑电源频率 f 对应的故障特征频率,可以得到如式(10)所示的鼠笼电机转子断条故障时变频器供电电流 $i'_f(t)$ 的简化表达式。根据 $i'_f(t)$ 频谱中是否存在 $f \pm 2sf_s$ 频率成分及其幅值大小可判断转子断条故障发生与否和故障严重程度。

$$i'_f(t) = i'_a(t) + \frac{\sqrt{3}aM^2 E_d}{16\pi |Z_1|} \{ 2\cos(\pi - \varphi_1) \cdot \cos[2\pi(f \pm 2sf_s)t - \alpha] + \cos[2\pi(f + 2f_s \pm 2sf_s)t - \alpha - \varphi_1] + \cos[2\pi(f - 2f_s \pm 2sf_s)t - \alpha + \varphi_1] + \sum_{n=1}^N \frac{1}{6n \pm 1} \cos(\pi - \varphi_1) \cos[2\pi(6n \pm 1)ft + 4\pi sf_s t - \alpha] + \sum_{n=1}^N \frac{1}{6n \pm 1} \cos[2\pi(6n \pm 1)ft + 4\pi sf_s t - (6n \pm 1)\alpha - \varphi_1] + \sum_{n=1}^N \frac{1}{6n \pm 1} \cos[2\pi(6n \pm 1)ft - 4\pi sf_s t + 4\pi sf_s t - (6n \pm 1)\alpha + \varphi_1] \} + i_h(t) \quad (9)$$

$$i'_f(t) = I[\cos(2\pi ft - \alpha)] + I_f \{ \cos[2\pi(f \pm 2sf_s)t - \alpha] \} \quad (10)$$

式中: $I = \frac{\sqrt{3}M^2 E_d}{4\pi |Z_1|} \cos(\pi - \varphi_1)$ $I_f = \frac{\sqrt{3}aM^2 E_d}{8\pi |Z_1|} \cos(\pi - \varphi_1)$ 。

3 基于变频器供电电流 Hilbert 解调制分析的转子断条故障诊断方法

3.1 Hilbert 变换

在数学与信号处理领域中,连续时间信号 $x(t)$ 的 Hilbert 变换 $y(t)$ 定义为 $x(t)$ 与 $\frac{1}{\pi t}$ 的卷积:

$$y(t) = HT[x(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau = x(t) * \frac{1}{\pi t} \quad (11)$$

$y(t)$ 可以看成是信号 $x(t)$ 通过一个幅度为 1 的全通滤波器的输出。信号 $x(t)$ 经过 Hilbert 变换器后,幅值不变,其正频率成分作 -90° 的相移,负频率成分作 $+90^\circ$ 的相移。以信号 $x(t)$ 为实部, $x(t)$ 的 Hilbert 变换 $y(t)$ 为虚部,可以构造如式(12)所示的解析信号 $z(t)$:

$$z(t) = x(t) + jy(t) = |z(t)| e^{j\varphi(t)} \quad (12)$$

解析信号 $z(t)$ 的包络线 $E(t)$ 定义为 $z(t)$ 的绝对值,即 $E(t) = |z(t)| = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)}$,它代表信号 $x(t)$ 的瞬时幅值,反映了信号 $x(t)$ 的能量随时间变化的情况; $\varphi(t) = \arctan(y(t)/x(t))$ 是信号 $x(t)$ 的瞬时相角。

3.2 基于 Hilbert 变换的变频器输入电流包络线提取

考虑变频器 a 相供电电流 $i'_f(t)$ 、 $i'_f(t)$ 的 Hilbert 变换如式(13)所示。以 $i'_f(t)$ 为实部, $i'_f(t)$ 的 Hilbert 变换为虚部,构造如式(14)所示的解析信号 $z(t)$,并求得如式(15)所示的解析信号 $z(t)$ 的包络线 $e(t)$:

$$HT[i'_f(t)] = I[\sin(2\pi ft - \alpha)] + I_f \{ \sin[2\pi(f \pm 2sf_s)t - \alpha] \} \quad (13)$$

$$z(t) = i'_f(t) + jHT[i'_f(t)] = Ie^{j(2\pi ft - \alpha)} + I_f e^{j[2\pi(f \pm 2sf_s)t - \alpha]} = e^{j(2\pi ft - \alpha)} [I + I_f e^{\pm j4\pi sf_s t}] \quad (14)$$

$$e(t) = |z(t)| = |I + I_f e^{\pm j4\pi sf_s t}| \quad (15)$$

由式(15)可知,在采用 Hilbert 变换提取解析信号 $z(t)$ 包络线过程中,基波频率 f 被转换为直流分量 I ,因此在包络线 $e(t)$ 的 FFT 频谱中将不会出现基波频率 f ,也即消除了该频率成分频谱泄露的影响,这使得故障特征频率 $2sf_s$ 的识别变得非常容易。这时,根据包络线频谱中是否存在 $2sf_s$ 特征频率及其幅值大小就可以判断故障发生与否及严重程度。为改善频谱质量,可构造特征信号 $E(t) = e^2(t) - \text{mean}[e^2(t)]$,以 $E(t)$ 代替 $e(t)$ 做 FFT 频谱分析。

3.3 基于变频器供电电流 Hilbert 解调制的空载鼠笼电机转子断条故障诊断方法

该方法由数据采集、故障电流解调制、频谱分析、故障特征频率计算和故障识别诊断 5 个主要部分组成。主要原理是:对经过预滤波处理的变频器供电电流信号 $i'_f(t)$ 作 Hilbert 解调制分析,构造基于 $i'_f(t)$ 包络线的解析信号 $E(t)$ 并求 $E(t)$ 的 FFT 频谱;同时根据变频器设定频率 f_s 和对应的电机实际转速 n 计算转差率 s 和故障特征频率 f_b ,然后将 f_b 与已经得到的电流频谱作比较分析,根据电流频谱谱线中是否存在故障特征频率 f_b 确定转子断条故障发生与否,原理图如图 3 所示。

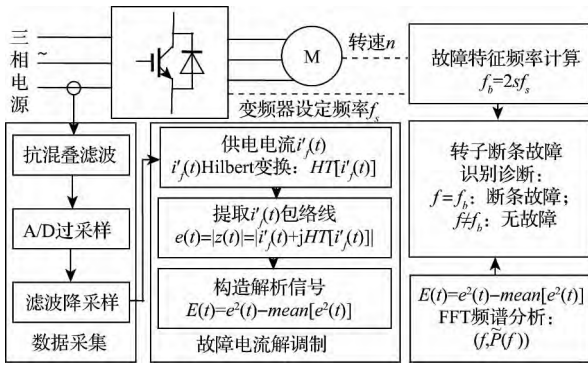


图3 故障诊断原理图

Fig. 3 Schematic diagram of fault diagnosis

4 实验及结果分析

4.1 实验装置及数据采集

实验装置由电源系统、电机拖动系统、数据采集系统、数据处理中心4部分组成。电源系统包括西门子M440变频器和工频电源;电机拖动系统包括实验电机和直流发电机负载;数据采集系统由TBC300LTP型电流互感器、自制调理电路、DSP数据采集卡构成。实验电机是3台额定功率3 kW、额定电压380 V、额定电流6.8 A的鼠笼电机,其中1台无故障电机用作实验参照,另2台电机分别带有2根、3根连续断条故障,用于算法验证。电机数据采集实验台和实验用故障转子如图4所示。

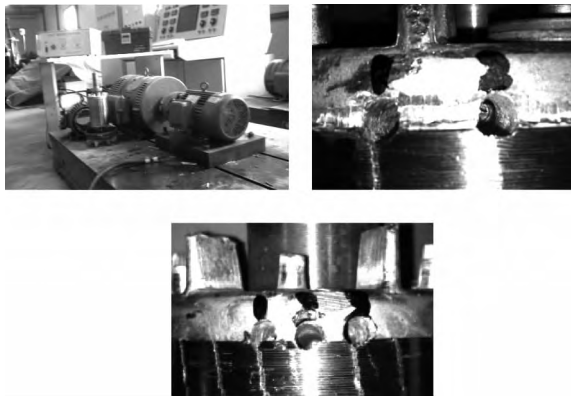


图4 电机数据采集实验台和实验用故障转子

Fig. 4 Experiment test bench for collecting motor data and the broken rotor used in the test

实验过程中,变频器设定频率 $f_s = 50$ Hz。首先在空载、25%、50%、75%、100%额定负载时采集无故障电机变频器供电电流数据,然后换上2根、3根转子断条故障电机,重复相同的实验步骤。表1为电机测试状态和相应的故障特征理论值。数据采集采用过采样方法,过采样后的信号经过8阶切比雪夫低通滤波器数字滤波并

降采样,最后得到采样时间30 s、采样频率为4 kHz的待分析信号。在MATLAB7.0环境下对测得的数据作离线分析,频谱图纵坐标采用对数分度,所有数据以基频分量幅值为基准作归一化处理。

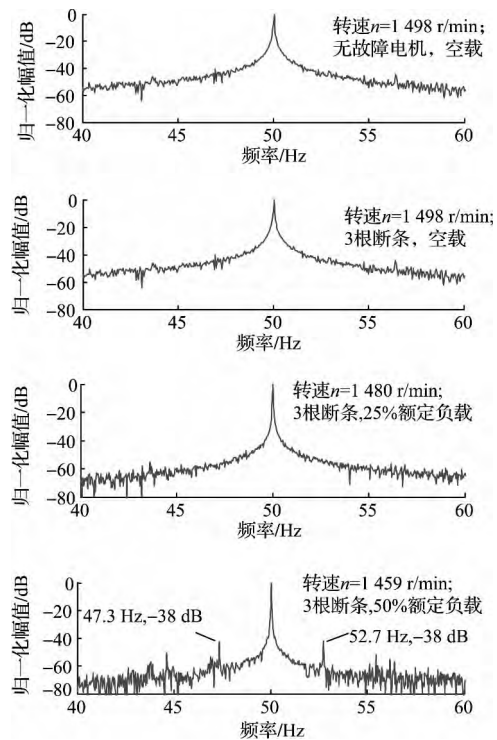
表1 电机故障特征边频带理论值

Table 1 Theoretical fault sidebands of the motor

电机类型	负载(%)	转速 ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	转差 率(%)	$2sf_s$	$(1 \pm 2s)f_s/\text{Hz}$
无故障	空载	1 498	0.001 3	0.13	—
2根断条	空载	1 498	0.001 3	0.13	49.87; 50.13
	空载	1 498	0.001 3	0.13	49.87; 50.13
3根转子断条故障	25	1 480	0.013 0	1.3	48.7; 51.3
	50	1 459	0.027 0	2.7	47.3; 52.7
	75	1 438	0.041 0	4.1	45.9; 54.1
	100	1 420	0.053 0	5.3	44.7; 55.3

4.2 变频器供电电流信号FFT频谱分析

图5对应无故障电机空载以及3根连续断条故障电机在空载、25%、50%、75%和100%额定负载运行时的变频器供电电流FFT频谱,图中标注为转子断条故障特征频率 $f_b = (1 \pm 2s)f$ 在频谱图中的位置和幅值(图6、7与此类似)。通过比较分析,可以看出基频频谱泄露对MCSA方法诊断转子断条故障的影响:当电机在100%额定负载运行时, f_b 谱线清晰可见,随着负载降低, f_b 逐渐向基频 f 靠近,且幅值逐渐减小。由于 f 频谱泄露的影响,在25%额定负载时, f_b 谱线已经看不清楚;在空载情况下, f_b 谱线完全被 f 频谱泄露所淹没,采用MCSA方法无法诊断转子断条故障。



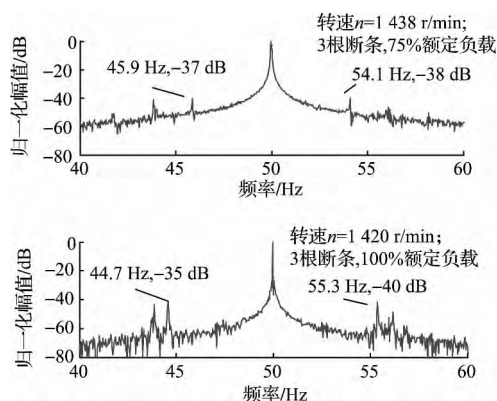


图 5 变频器供电电流信号 FFT 频谱

Fig. 5 FFT spectrums of the supply-side current signal

4.3 变频器供电电流 Hilbert 解调制信号 FFT 频谱分析

图 6 为空载运行时,无故障电机、2 根和 3 根转子断条故障电机的变频器供电电流 Hilbert 解调制信号 FFT 频谱。由于电机空载运行时故障特征频率 $2s_f$ 只有 0.13 Hz,且幅值较小,为便于识别,图中对频谱做了细化处理。由图 6 可见,实验结果与理论分析结果完全一致:由于消除了变频器供电频率 f 频谱泄露的影响,故障特征频率 $f_b = 2s_f$ 清晰可见,因此该方法是有用的。在故障严重程度不同的电流频谱图中 f_b 在频谱中的位置不变(都是 0.13 Hz),但是其幅值随着故障严重程度增加而增大,即 3 根断条时的故障特征频率幅值 -45 dB 要大于 2 根断条时的故障特征频率幅值 -50 dB,从而验证了所提出的方法对不同严重程度断条故障都能做出有效诊断,性能是稳定的。

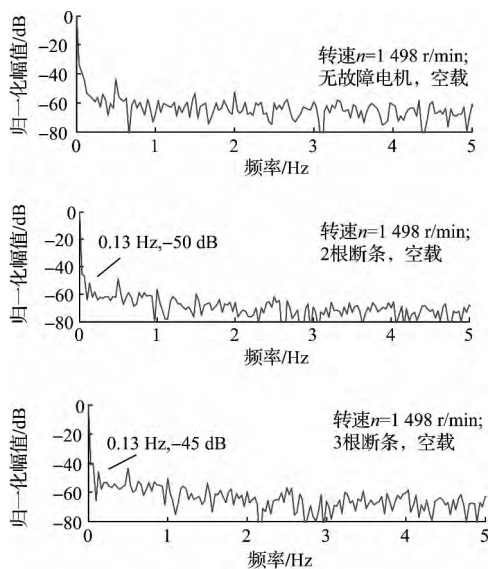


图 6 空载时变频器供电电流包络线解析信号 FFT 频谱

Fig. 6 FFT spectrum of the analytic signal based on the envelope of the supply-side current for the motor operating under no-load

为进一步评估所提出的方法在全负载范围内诊断转子断条故障的性能,对 3 根连续断条故障电机在 25%、50%、75%、100% 额定负载状态下进行测试,并与无故障电机 100% 额定负载状态运行时得到的变频器输入电流频谱图作对比分析,如图 7 所示。从图中明显看出:在各种负载状态,采用所提出的方法均能清晰地识别出转子断条故障特征频率 $2s_f$,而且 $2s_f$ 的幅值随着电机负载增大而逐渐增大。

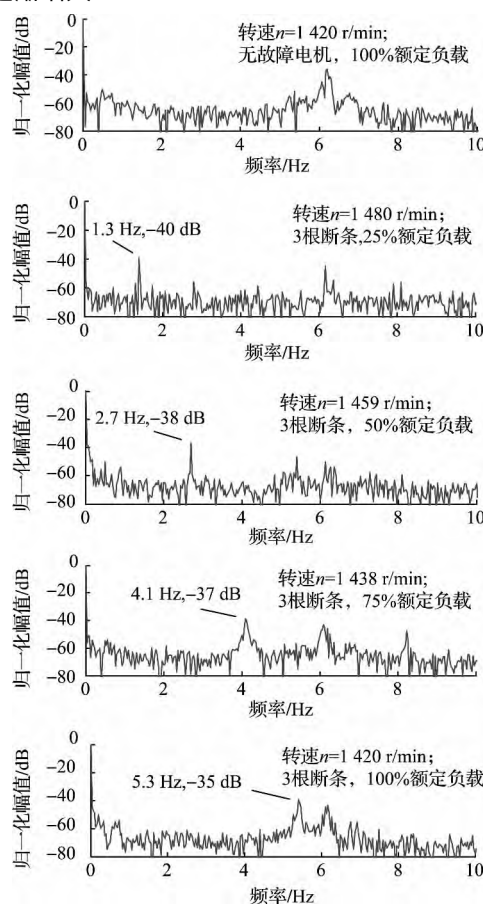


图 7 不同负载时变频器供电电流包络线解析信号 FFT 频谱

Fig. 7 FFT spectrums of the analytic signal based on the envelope of the supply-side current for the motor operating under different loads

5 结 论

本文通过对变频器供电电流谐波分析简化模型进行分析,得出了变频器供电电流中同样含有转子断条故障特征成分的结论。然而,由于基频频谱泄露的影响,基于变频器供电电流的 MCSA 方法仍然无法诊断空载运行条件下的鼠笼电机转子故障。因此,采用 Hilbert 变换提取变频器供电电流信号包络线,然后构造基于故障电流包络线平方的解析信号并对该信号作 FFT 频谱分析以解决这一问题。

实验结果表明:由于消除了基频频谱泄露的影响,在包络线 FFT 频谱中可以清晰地识别出转子断条故障特征频率 $2sf_s$,而且故障特征频率的幅值随故障严重程度增大而增大,因此所提方法的性能是稳定的。不同负载状况下的实验结果进一步表明,由于解决了空载运行条件下的故障诊断问题,因此当鼠笼电机在额定负载以下任何负载状态稳定运行时,采用本文方法都能对转子断条故障做出正确诊断。本文提出的诊断方法既可用工业现场电机状态实时监测,也可用于新电机出厂及电机故障维修后的质量测试。

参考文献

- [1] WOLBANKT M. Monitoring of rotor-bar defects in inverter-fed induction machines at zero load and speed [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(5): 1468-1478.
- [2] GEORGAKOPOULOS I P, MITRONIKAS E D, SAFACAS A N. Detection of induction motor faults in inverter drives using inverter input current analysis [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(9): 4365-4373.
- [3] 胡为,高雷,傅莉. 基于最优阶次 HMM 的电机故障诊断方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(3): 524-530. HU W, GAO L, FU L. Research on motor fault detection method based on optimal order hidden Markov model [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(3): 524-530.
- [4] MEHRJOU M R. Rotor fault condition monitoring techniques for squirrel-cage induction machine——A review [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(8): 2827-2848.
- [5] BELLINI A. Advances in diagnostic techniques for induction machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(12): 4109-4126.
- [6] KIM Y H. High-resolution parameter estimation method to identify broken rotor bar faults in induction motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(9): 4103-4117.
- [7] 彭宇,刘大同,彭喜元. 故障预测与健康管理技术综述 [J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(1): 1-9. PENG Y, LIU D T, PENG X Y. A review: Prognostics and health management [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(1): 1-9.
- [8] 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. YANG T G, JIANG X H, FU Q. Study on motor fault diagnosis using ridgelet neural network observer optimized by shuffled frog leaping algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(1): 193-199.
- [9] 谢国民,王灿祥,佟莹. 采煤机电机故障诊断专家系统的研究与应用 [J]. 信息与控制, 2013, 42(3): 358-363. XIE G M, WANG C X, TONG Y. Research and application of expert system on fault diagnosis of shearer motor [J]. Information and Control, 2013, 42(3): 358-363.
- [10] PUCHE-PANADERO R. Improved resolution of the MCSA method via Hilbert transform enabling the diagnosis of rotor asymmetries at very low slip [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(1): 52-59.
- [11] 马伦,康建设,孟妍,等. 基于 Morlet 小波变换的滚动轴承早期故障特征提取研究 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(4): 920-926. MA L, KANG J SH, MENG Y, et al. Research on feature extraction of rolling bearing incipient fault based on Morlet wavelet transform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(4): 920-926.
- [12] 刘立君,王奇,杨克己,等. 基于 EMD 和频谱校正的故障诊断方法 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(6): 1278-1283. LIU L J, WANG Q, YANG K J, et al. EMD and spectrum correction-based fault diagnosis method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(6): 1278-1283.
- [13] 李晓晖,傅攀. 基于一维盲源分离的滚动轴承故障诊断 [J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(6): 535-542. LI X H, FU P. Rolling bearing fault diagnosis based on one-dimension blind source separation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(6): 535-542.
- [14] 姜万录,刘云杰,朱勇. 小波脊线解调与两次 EMD 分解相结合的故障识别方法及应用研究 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5): 1131-1138. JIANG W L, LIU Y J, ZHU Y. Research on wavelet ridge demodulation and twice EMD-based fault identification method and its application [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(5): 1131-1138.
- [15] 胡为,胡静涛. 改进的符号时间序列分析方法及其在电机故障诊断中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(4): 760-766. HU W, HU J T. Improved symbolic time series analysis method and its application in motor fault diagnosis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(4): 760-766.
- [16] BACHA K S, SALEM B, CHAARI A. An improved combination of Hilbert and Park transforms for fault detection and identification in three-phase induction motors [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 43(1): 1006-1016.
- [17] BIN G F. Early fault diagnosis of rotating machinery based on wavelet packets-Empirical mode decomposition feature

extraction and neural network [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2012 27(6): 696-711.

- [18] RIERA-GUASP M. A general approach for the transient detection of slip-dependent fault components based on the discrete wavelet transform [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2008 55(12): 4167-4180.
- [19] 刘宏, 焦连伟. 转移函数应用于变频器的谐波分析 [J]. *电工技术学报* 2005 20(9): 108-113.
LIU H, JIAO L W. Harmonic analysis using transfer function on the converter [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society* 2005 20(9): 108-113.
- [20] CHANG GW, SHIN-KUAN C. An analytical approach for characterizing harmonic and interharmonic currents generated by VSI-fed adjustable speed drives [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2005 20(4): 2585-2593.

作者简介



祝洪宇, 1993 年于兰州理工大学获得学士学位, 2006 年于沈阳工业大学获得硕士学位, 现为中国科学院沈阳自动化研究所博士研究生、辽宁科技大学副教授, 主要研究方向为电机状态监测与故障诊断。

E-mail: zhuhongyu@sia.cn

Zhu Hongyu received his B. Sc. degree from Lanzhou University of Technology in 1993 and M. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2006. He is currently working toward Ph. D. degree at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. Currently he is an associate professor in University of Science and Technology Liaoning. His primary research interests are condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines.



胡静涛, 分别于 1985 和 1988 年在大连理工大学获得学士和硕士学位, 现为中国科学院沈阳自动化研究所研究员, 中国科学院大学教授、博士生导师, 主要研究方向为设备远程监测与故障诊断。

E-mail: hujingtao@sia.cn

Hu Jingtao received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Dalian University of Technology in 1985 and 1988, respectively. Currently he is a research fellow in Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, and a professor and doctoral supervisor in University of Chinese Academy of Sciences. His main research interests include remote equipment condition monitoring and fault diagnosis.