

基于解析导纳的感应电机故障诊断

王臻^{1,2}, 李承^{1,2}, 王蕾², 陈旭², 李惠章²

(1. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 提出了一种利用定子解析导纳辨识感应电机转子断条故障、偏心故障以及复合故障的方法。利用 Hilbert 变换相移作用获得解析电流和解析电压从而构造解析导纳, 并从中提取特征故障频率。为了最大限度地减少硬件开销, 利用迭代 Prony 算法, 精确地求出基波参数, 构造解析电压。理论和实验结果表明, 所提方法可有效在线识别感应电机单一故障和复合故障。

关键词: 电机; Hilbert 变换; 解析导纳; 故障特征频率; 复合故障; 迭代 Prony 算法

中图分类号: TM 307

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.08.026

0 引言

感应电机转子断条故障、偏心故障在电机全部故障中占有重要部分, 如何在故障早期有效辨别电机故障具有重要的意义^[1-2]。基于定子电流信号检测电机故障, 可以采用非侵入式, 适合在线监测, 是目前应用最为广泛的方法^[3-5]。当异步电机发生断条故障时, 会在定子电流基频附近产生特征故障频率: $f = f_1 \pm 2ksf_1$ (其中 $k = 1, 2, 3, \dots$; f_1 为外加电源频率; s 为异步电机转差率)。由于异步电机转差率通常在 0.02~0.05 范围内, 且故障早期故障信号较弱, 故障边频易被强大的基频频谱泄漏所淹没^[6], 所以如何有效提取特征故障频率成为关键。为了解决这个问题, 一种思路是对电流信号进行变换, 将基波分量变换为直流分量, 故障分量频率变成 $2sf_1$: Cruz 等先后提出了派克和扩展派克矢量^[7-8], 前者通过图形识别来诊断故障, 但难以发现早期异常, 后者通过 Park 变换, 构造模量平方将故障频率转换为频率 $2sf_1$, 但在电机复合故障情况下, 因平方出现交叉频率, 会使频谱复杂化, 而且同时采集三相电流信号会增大硬件的开销; 文献^[9]通过构造 Hilbert 模量, 得到断条故障频率为 $2sf_1$, 但对于复合故障, 平方的存在同样会使频谱复杂化; 瞬时功率法^[10]通过采集定子两端电压、电流, 得到单相或三相的瞬时功率频谱, 提取异步电机转子断条和偏心的特征故障频率, 但该方法需采集定子电压, 数据采集量和硬件开销较大, 诊断效果受电压影响。

另一种思路是利用各种算法抑制基波分量, 将基波分量从电流的频谱图中剔除, 如旋转 Park 变换滤波^[11]、Relax 算法^[12]、MUSIC 算法^[3]、混合骨干微粒群优化算法^[13]、小波-奇异值分解^[14]等。此外, 还有学者利用旋转不变参数估计技术和模式搜索算

法 (PSA) 结合^[15]、多重信号分类 (MUSIC) 和模拟退火算法 (SAA) 结合^[16] 等信号处理算法, 确定电流各频率的参数, 进而确定电机转子故障。此外, 小波变换在电机故障诊断方面有着极其广泛的应用^[2, 17], 如文献^[2]通过 Hilbert 变换和小波变换结合的方法, 可以较好地地区分电机负载波动与转子断条故障。

本文通过对定子电压电流信号进行 Hilbert 变换, 构造出定子解析导纳表达式, 通过解析导纳的特征故障频率, 有效地诊断电机转子断条、偏心以及复合故障。同时为了减小硬件开销, 利用迭代 Prony 算法获得构造给定电压的精确频率, 有效地诊断出了电机转子单一和复合故障。

1 基于定子解析导纳的电机故障诊断

1.1 Hilbert 变换

a. 对 $x(t)$ 进行 Hilbert 变换, 得到其共轭正交分量^[18]为:

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (1)$$

b. 信号经过 Hilbert 变换, 幅值不变, 负频率成分作 90° 相移, 正频率部分作 -90° 相移。故可由 $x(t)$ 和 $\bar{x}(t)$ 构造解析信号 $\tilde{x}(t)$ 为:

$$\tilde{x}(t) = x(t) + j\bar{x}(t) = ae^{j\theta} \quad (2)$$

其中, $\theta = \arctan \frac{\bar{x}(t)}{x(t)}$; $a = \sqrt{x^2(t) + \bar{x}^2(t)}$ 。

1.2 无故障时的解析导纳

感应电机工作时, 其三相信定子电压为:

$$\begin{cases} u_a = U \cos(\omega_1 t) \\ u_b = U \cos\left(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_c = U \cos\left(\omega_1 t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (3)$$

其中, U 为相电压幅值。

无故障时定子电流为标准正序电流, 即:

$$\begin{cases} i_a = I_1 \cos(\omega_1 t - \varphi) \\ i_b = I_1 \cos(\omega_1 t - \varphi - 2\pi/3) \\ i_c = I_1 \cos(\omega_1 t - \varphi + 2\pi/3) \end{cases} \quad (4)$$

其中, I_1 为相电流幅值; φ 为相电压和相电流间的相位差。

分别构造 a 相的解析电压和解析电流为:

$$\begin{cases} \tilde{U} = U e^{j\omega_1 t} \\ \tilde{I} = I_1 e^{j(\omega_1 t - \varphi)} \end{cases} \quad (5)$$

定义定子解析导纳表达式为:

$$\tilde{Y} = \tilde{I} / \tilde{U} \quad (6)$$

因此,无故障定子解析导纳为:

$$Y_0 = \frac{I_1}{U} e^{-j\varphi} \quad (7)$$

显然,无故障定子解析导纳仅由一直流分量组成。

1.3 发生转子断条故障时的解析导纳构造

当感应异步电机发生转子断条故障时,定子电流会产生故障边频,其 a 相电流表达式为:

$$i_a = I_1 \cos(\omega_1 t - \varphi) + \sum_{k=1}^{\infty} \{ I_{1,k} \cos[(\omega_1 - k\omega_b)t - \varphi_{1,k}] + I_{r,k} \cos[(\omega_1 + k\omega_b)t - \varphi_{r,k}] \} \quad (8)$$

$$\omega_1 \pm k\omega_b = 2\pi(f_1 \pm kf_b), \quad f_b = 2sf_1$$

其中, $I_{1,k}$ 和 $\varphi_{1,k}$ 分别为 $\omega_1 - k\omega_b$ 故障分量的幅值和初相位; $I_{r,k}$ 和 $\varphi_{r,k}$ 分别为 $\omega_1 + k\omega_b$ 故障分量的幅值和初相位。

利用 Hilbert 变换构造解析电流为:

$$\tilde{I} = I_1 e^{j(\omega_1 t - \varphi)} + \sum_{k=1}^{\infty} \{ I_{1,k} e^{j[(\omega_1 - k\omega_b)t - \varphi_{1,k}]} + I_{r,k} e^{j[(\omega_1 + k\omega_b)t - \varphi_{r,k}] \} \quad (9)$$

由式(5)、(9)可得发生转子断条故障时定子解析导纳为:

$$Y_b = Y_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{I_{1,k}}{U} e^{j(-k\omega_b t - \varphi_{1,k})} + \frac{I_{r,k}}{U} e^{j(k\omega_b t - \varphi_{r,k})} \right] \quad (10)$$

发生转子断条故障时,定子解析导纳由两部分组成,一部分是由非故障成分引起的直流分量 Y_0 , 另一部分是故障分量,其特征故障频率为 $2ksf_1$, 由于 0Hz 频率满足 FFT 频谱分析中避免频谱泄漏的条件 $f_0 = mf_s / N$ (其中, $m = 0, 1, 2, \dots$; f_0 为信号频率; f_s 为采样频率; N 为采样序列长度), 避免了基波对故障特征频率的影响。同时滤除解析导纳中的直流成分,使故障特征频率不会淹没在直流分量中。

1.4 发生偏心故障时的解析导纳构造

感应电机的偏心故障主要是指定子和转子之间的气隙不均匀,即由定转子不同心造成,主要包括静态偏心、动态偏心,以及在两者基础上建立的混合偏心等^[19]。一般情况下,由于生产工艺的限制,无偏心的电机是很难实现的。当电机发生混合偏心故障时,定子电流中的谐波成分可以描述为^[18]:

$$f_{\text{exc}} = f_1 \pm mf_r \quad m = 1, 2, \dots \quad (11)$$

其中, f_r 为电机转子旋转频率。

发生混合偏心故障时的 a 相定子电流为:

$$i_a = I_1 \cos(\omega_1 t - \varphi) + \sum_{m=1}^{\infty} \{ I_{1,m} \cos[(\omega_1 - m\omega_r)t - \varphi_{1,m}] + I_{r,m} \cos[(\omega_1 + m\omega_r)t - \varphi_{r,m}] \} \quad (12)$$

$$\omega_1 \pm m\omega_r = 2\pi(f_1 \pm mf_r)$$

其中, $I_{1,m}$ 和 $\varphi_{1,m}$ 分别为 $\omega_1 - m\omega_r$ 故障分量的幅值和初相位; $I_{r,m}$ 和 $\varphi_{r,m}$ 分别为 $\omega_1 + m\omega_r$ 故障分量的幅值和初相位。

构造偏心故障下的解析电流为:

$$\tilde{i}_a = I_1 e^{j(\omega_1 t - \varphi)} + \sum_{m=1}^{\infty} \{ I_{1,m} e^{j[(\omega_1 - m\omega_r)t - \varphi_{1,m}]} + I_{r,m} e^{j[(\omega_1 + m\omega_r)t - \varphi_{r,m}] \} \quad (13)$$

由式(5)和(13)可得偏心故障下的解析导纳为:

$$Y_{\text{exc}} = Y_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{I_{1,m}}{U} e^{j(-m\omega_r t - \varphi_{1,m})} + \frac{I_{r,m}}{U} e^{j(m\omega_r t - \varphi_{r,m})} \right] \quad (14)$$

由式(14)可知,偏心故障下的定子解析导纳频率成分是由一直流分量和反映偏心故障的特征频率 $m f_r$ 组成。

1.5 发生转子复合故障时的解析导纳构造

当电机发生转子断条+偏心的复合故障时,两特征故障频率对应的幅值与基频相比很小,在定子电流中,可以忽略两故障之间的交叉影响^[20],其 a 相定子电流可述为:

$$i_a = I_1 \cos(\omega_1 t - \varphi) + \sum_{k=1}^{\infty} \{ I_{1,k} \cos[(\omega_1 - k\omega_b)t - \varphi_{1,k}] + I_{r,k} \cos[(\omega_1 + k\omega_b)t - \varphi_{r,k}] \} + \sum_{m=1}^{\infty} \{ I_{1,m} \cos[(\omega_1 - m\omega_r)t - \varphi_{1,m}] + I_{r,m} \cos[(\omega_1 + m\omega_r)t - \varphi_{r,m}] \} \quad (15)$$

构造解析电流为:

$$\tilde{I} = I_1 e^{j(\omega_1 t - \varphi)} + \sum_{k=1}^{\infty} \{ I_{1,k} e^{j[(\omega_1 - k\omega_b)t - \varphi_{1,k}]} + I_{r,k} e^{j[(\omega_1 + k\omega_b)t - \varphi_{r,k}] \} + \sum_{m=1}^{\infty} \{ I_{1,m} e^{j[(\omega_1 - m\omega_r)t - \varphi_{1,m}]} + I_{r,m} e^{j[(\omega_1 + m\omega_r)t - \varphi_{r,m}] \} \quad (16)$$

同理得到发生复合故障时的定子解析导纳为:

$$Y_c = Y_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{I_{1,k}}{U} e^{j(-k\omega_b t - \varphi_{1,k})} + \frac{I_{r,k}}{U} e^{j(k\omega_b t - \varphi_{r,k})} \right] + \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{I_{1,m}}{U} e^{j(-m\omega_r t - \varphi_{1,m})} + \frac{I_{r,m}}{U} e^{j(m\omega_r t - \varphi_{r,m})} \right] \quad (17)$$

由上式可知,发生转子断条+偏心的复合故障时,定子解析导纳频率成分主要是由断条故障特征频率 $2ksf_1$ 以及偏心特征故障频率 $m f_r$ 组成,克服了 Hilbert 模量法和 Park 矢量法因平方项的存在而引入交叉干扰频率的缺点。因此,对于电机转子的复合故障而言,解析导纳法从算法上最大限度地避免了两故障相互干扰造成的交叉频率,使两特征故障频率易被辨识和分离。

1.6 实验验证

为了使实验数据更加完善,采用 2 种型号的电机

分别对不同故障情形进行验证,电机参数见表 1。利用型号为 Y132M-4 的电机验证转子断条故障,采集在正常状态和转子 1 根断条时的定子 a 相电压、电流。利用转子型号为 Y100L1-4 的电机验证转子偏心以及转子复合故障,依次采集了偏心、转子 1 根断条+偏心、转子 2 根断条+偏心、转子 3 根断条+偏心 4 种情况下定子 a 相电压、电流。两电机在额定负载下运行,定子电流的采集频率为 10 000 Hz。

表 1 实验电机参数

Table 1 Parameters of generator for test

型号	额定参数				
	电压/V	电流/A	转速/(r·min ⁻¹)	功率/kW	s
Y132M-4	380	15.4	1440	7.5	0.04
Y100L1-4	380	5.0	1440	2.3	0.04

本文选择求均值去直流法滤除直流。设得到的解析导纳离散值为 $Y(n)$, 滤除直流后的值为 $\tilde{Y}(n)$, 即:

$$\tilde{Y}(n) = Y(n) - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Y(n) \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (18)$$

实验结果如图 1—6 所示。

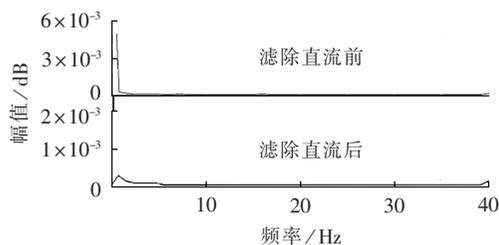


图 1 电机正常运行时的解析导纳频谱图

Fig.1 Spectrums of analytical admittance when generator operates normally

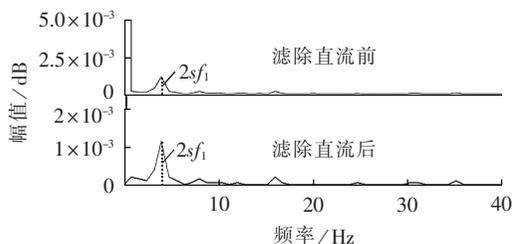


图 2 滤波前后,发生转子 1 根断条故障时的解析导纳频谱图

Fig.2 Spectrums of analytical admittance when single broken bar fault occurs, before and after filtering

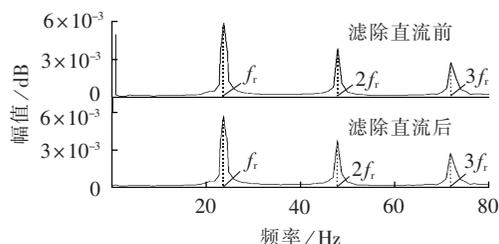


图 3 滤波前后,发生偏心故障时的解析导纳频谱图

Fig.3 Spectrums of analytical admittance when eccentricity fault occurs, before and after filtering

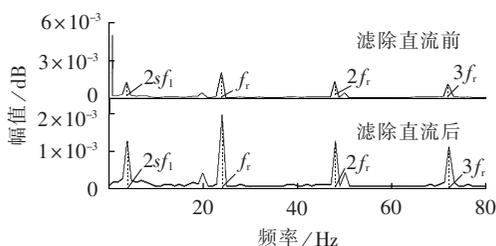


图 4 滤波前后,发生转子 1 根断条+偏心故障时的解析导纳频谱图

Fig.4 Spectrums of analytical admittance when single broken bar fault and eccentricity fault occur, before and after filtering

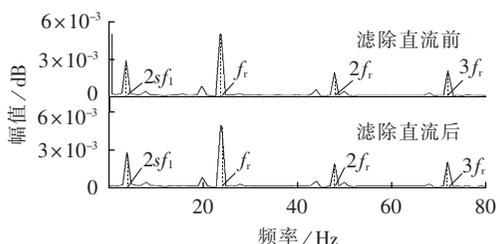


图 5 滤波前后,发生转子 2 根断条+偏心故障时的解析导纳频谱图

Fig.5 Spectrums of analytical admittance when double broken bar fault and eccentricity fault occur, before and after filtering

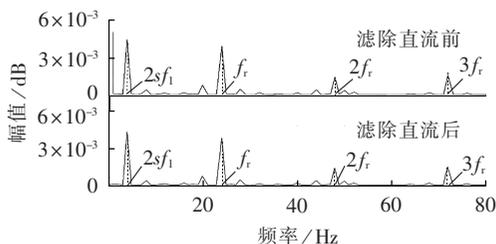


图 6 滤波前后,发生转子 3 根断条+偏心故障时的解析导纳频谱图

Fig.6 Spectrums of analytical admittance when triple broken bar fault and eccentricity fault occur, before and after filtering

a. 图 1 表明,感应电机无故障时,其定子解析导纳主要以直流成分为主。图 2 表明当发生转子断条故障时,定子解析导纳的频谱出现故障特征频率 f_b (4 Hz)。滤除频谱中的直流成分后,转子断条故障的特征频率得到有效突出。转子 1 根断条时 f_b 的幅值依然较明显,说明了所提方法可较好地对早期故障进行在线监测。

b. 图 3 表明,发生偏心故障时,解析导纳的特征故障频率为 f_r (24 Hz)、 $2f_r$ (48 Hz)、 $3f_r$ (72 Hz), 以此作为诊断偏心故障的依据。

c. 由图 4—6 可见,当同时发生转子断条和偏心故障时,转子断条故障特征频率 $2sf_1$ 出现在解析导纳频谱 4 Hz 的位置,偏心故障特征频率 mf_r 出现在频谱的 24 Hz、48 Hz 和 72 Hz 等位置,所以根据这几个频率点的位置,可以判断出感应电机转子复合

故障。两故障特征频率相距较远,不受基频影响,同时不产生交叉频率,充分显示了所提方法对电机复合故障诊断的优势。同时,随着转子断条数的增加,2s_{f1}对应的幅值接近线性增加,与实际相符,有利于断条故障程度的量化和故障诊断机制的建立。

2 改进算法

为了减少硬件开销,提出了利用给定单位电压求解解析导纳的方法。通过对给定电压进行离散化,代替实验采集的电压数据,使整个诊断过程只需采集单相定子电流即可。给定单位电压表达式为:

$$u_a = \cos \omega_1^*(n\Delta t) \quad n=1,2,\dots,N \quad (19)$$

其中, N 为采样点数; ω_1^* 为定子电流实际工作时的基波角频率; 时间间隔 $\Delta t = 1/f_s$ 。可以得到无故障、断条故障、偏心故障、复合故障下的解析导纳分别为:

$$\begin{cases} Y_0^* = I_1 e^{-j\varphi} \\ Y_b^* = Y_0^* + \sum_{k=1}^{\infty} [I_{1,k} e^{j(-k\omega_1 t - \varphi_{1,k})} + I_{r,k} e^{j(k\omega_1 t - \varphi_{r,k})}] \\ Y_{ecm}^* = Y_0^* + \sum_{m=1}^{\infty} [I_{1,m} e^{j(-m\omega_1 t - \varphi_{1,m})} + I_{r,m} e^{j(m\omega_1 t - \varphi_{r,m})}] \\ Y_c^* = Y_b^* + Y_{ecm}^* - Y_0^* \end{cases} \quad (20)$$

式(20)中的频率和 1.2—1.5 节中的故障特征频率相同。由于电机在实际工作中,基波频率未必一直稳定在标准情况,如何获得精确的定子电流基波频率是给定电压的关键。为了获得精确的定子电流基波频率,本文采用迭代 Prony 算法对定子电流进行检测,获得定子电流主频率(基频)信息,算法流程图见图 7。

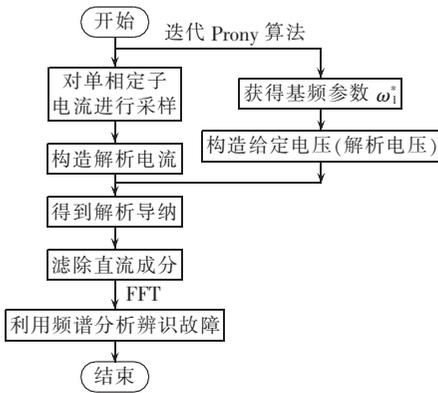


图 7 改进算法流程图

Fig.7 Flowchart of improved algorithm

2.1 迭代 Prony 算法

Prony 算法广泛应用于谐波信号分析^[21],其假设测量数据 $x(t)$ 是一组具有任意振幅、相位、频率和衰减因子的指数函数的组合, $x(n)$ 的离散时间的表达式为:

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^p b_i z_i^n \quad n=0,1,\dots,N-1 \quad (21)$$

$$b_i = A_i e^{j\theta_i}, \quad z_i = e^{(\alpha_i + j2\pi f_i)\Delta t}$$

其中, $\hat{x}(n)$ 为 $x(n)$ 的近似; A_i 为幅值; θ_i 为相位; α_i 为衰减因子; f_i 为频率; Δt 为时间间隔。

迭代 Prony 算法通过对观测数据矩阵进行奇异值分解和迭代,能够有效去噪,改进传统的 Prony 算法对噪声敏感的缺点。该算法的具体步骤如下^[22-23]。

a. 构造数据矩阵。

$$X_{ae} = \begin{bmatrix} x(0) & x(1) & \dots & x(p_e) \\ x(1) & x(2) & \dots & x(p_e+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(N-p_e) & x(N-p_e+1) & \dots & x(N) \end{bmatrix}$$

其中, $p_e \gg p$ 。

b. 对 X_{ae} 进行奇异值分解,求出其有效秩 p ,重新构造数据矩阵 X_a 。

c. 解矛盾方程组 $X_a a = 0$, 得 $a = [a_0, a_1, \dots, a_p]^T$ 的初值; 以 $Q^{(0)} = X^T X$ 作为噪声能量初始值。

d. 由 a 构造子空间 U_{A1} 和 U_{A2} , 记 $U_A = [U_{A1}, U_{A2}]$, U_{A1} 为 U_A 的第 1 列到 $N+1-2p$ 列子矩阵信号子空间。

e. 由式(22)得 X^* , 以 X^* 构造矩阵 X_a^* , 由方程组 $X_a^* a = 0$ 得 $a = [a_0, a_1, \dots, a_p]^T$ 的迭代更新。

$$X^* = U_{A2} U_{A1}^T X \quad (22)$$

f. 由式(23)得 Q 的迭代更新,然后转步骤 c 循环迭代,将 Q 和 a 改变量同时作为收敛的控制条件,直至 Q 的改变量趋于零。

$$Q = X^T U_{A1} U_{A1}^T X \quad (23)$$

g. 得出 a 并进行归一化,求得自回归参数 a_1, a_2, \dots, a_p 。

h. 求特征多项式:

$$1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_p z^{-p} = 0 \quad (24)$$

求得根 $z_i (i=1, 2, \dots, p)$, 然后求出频率:

$$f_i = \frac{\arctan[\text{Im}(z_i) / \text{Re}(z_i)]}{2\pi \Delta t} \quad (25)$$

i. 将 z_i 代入式(21),再利用最小二乘法求得信号的幅值,最大幅值对应的频率即为基波频率 f_1 。

2.2 实验验证

利用迭代 Prony 算法得到以下转子 1 根断条+偏心及转子 3 根断条+偏心故障情况下的定子电流基波参数见表 2,对应的解析导纳频谱图见图 8。

表 2 定子电流基波参数

Table 2 Fundamental parameters of stator current

故障情况	基波参数		
	幅值/A	频率/Hz	相位/rad
转子 1 根断条+偏心	6.4	50	-0.6
转子 3 根断条+偏心	6.8	50	-2.8

图 8 表明,利用迭代 Prony 算法求出基波参数,构造给定电压,进而得到解析导纳的频谱图,不仅有效地减少了硬件开销,而且可以有效地实时在线

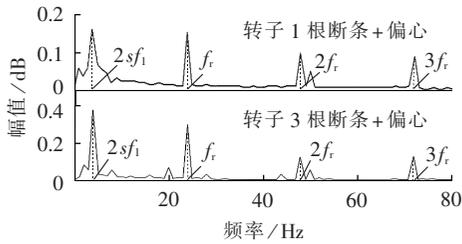


图 8 采用改进算法后的解析导纳频谱图

Fig.8 Spectrums of analytical admittance after improved algorithm is adopted

诊断电机转子断条和偏心故障,和 1.6 节中的诊断效果相当,不失为一种高效实用的诊断方法。需要指出的是,基频频率的确定很关键,故障诊断效果对给定基频频率精度非常敏感。图 9 为发生转子 3 根断条故障情况下,给定基频频率和实际基频频率相差 ± 0.1 Hz 时的诊断效果图,显然仅 0.1 Hz 的偏差已经极大地影响了故障诊断效果,甚至使算法失去故障诊断能力,因此利用迭代 Prony 算法得到精确的基频参数至关重要。

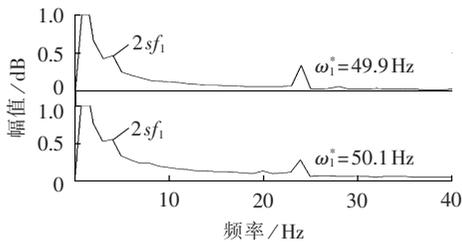


图 9 给定基波频率对故障识别结果的影响

Fig.9 Influence of given fundamental frequency on fault identification

3 结论

本文提出利用定子解析导纳诊断异步电机转子断条、偏心以及复合故障的方法。理论和实验结果均表明:发生转子断条故障时,解析导纳含有特征故障频率 $2sf_1$;发生偏心故障时,解析导纳含有特征故障频率 mf_r ;发生转子复合故障时,解析导纳含有特征故障频率 $2sf_1$ 和 mf_r ;以此可以作为诊断电机转子故障的有效依据。在转子复合故障中,两故障特征频率互不干扰,克服了 Hilbert 模量法和 Park 矢量法交叉干扰的引入。同时,利用迭代 Prony 算法构造出给定电压,明显减少硬件开销,克服了改进算法对给定基频频率极其敏感的缺点。基于解析导纳的转子故障诊断方法,能够有效诊断转子单一故障和复合故障,并对故障早期(如 1 根断条阶段)具有有效的在线监测能力。

参考文献:

[1] 杨存祥,朱琛,解豪杰. 基于 RPROP 神经网络算法的异步电动机故障诊断[J]. 电力自动化设备,2012,32(1):90-93.

YANG Cunxiang,ZHU Chen,XIE Haojie. Fault diagnosis based on RPROP neural network for asynchronous motor[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(1):90-93.

- [2] 李天云,李楠,赵妍. 基于解析小波变换方法的鼠笼型异步电动机转子断条检测新方法[J]. 电力自动化设备,2004,24(12):16-19.
- LI Tianyun,LI Nan,ZHAO Yan. New method based on analytic wavelet transform to detect rotor bar breaking fault of squirrel cage asynchronous[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(12):16-19.
- [3] 赵妍,李志民,李天云. 一种基于谱峭度的异步电机故障诊断方法[J]. 电工技术学报,2014,29(5):189-196.
- ZHAO Yan,LI Zhimin,LI Tianyun. A method for fault diagnosis of induction motors based on spectral kurtosis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(5):189-196.
- [4] NANDI S,TOLLIYAT H A,LI X. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—a review[J]. IEEE Transactions on Energy Conversions,2005,20(4):719-729.
- [5] 梁霖,徐光华,刘弹,等. 小波-奇异值分解在异步电机转子故障特征提取中的应用[J]. 中国电机工程学报,2005,25(19):111-115.
- LIANG Lin,XU Guanghua,LIU Dan,et al. A feature extraction method of rotor faults of induction motor based on continuous wavelet transform and singular value decomposition[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(19):111-115.
- [6] 张雄希,刘振兴. 基于倒频谱分析的电机故障检测[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(20):145-147.
- ZHANG Xiongxi,LIU Zhenxing. Fault detection for motor based on cepstrum analysis[J]. Power System Protection and Control,2010,38(20):145-147.
- [7] CRUZ S M A,CARDOSO A J M. Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors by extend Park's vector approach[J]. Electric Machines and Power Systems,2000,28(3):289-299.
- [8] CRUZ S M A,CARDOSO A J M. Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors by the extend Park's vector approach[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2001,37(5):1227-1233.
- [9] 刘振兴,尹项根,张哲. 基于 Hilbert 模量频谱分析的异步电动机转子故障在线监测与诊断方法[J]. 中国电机工程学报,2003,23(7):158-161.
- LIU Zhenxing,YIN Xianggen,ZHANG Zhe. On-line monitoring and diagnosis way based on spectrum analysis of Hilbert modulus induction motors[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(7):158-161.
- [10] 刘振兴,尹项根,张哲,等. 基于瞬时功率信号频谱分析的鼠笼式异步电动机转子故障在线诊断方法[J]. 中国电机工程学报,2003,23(10):148-152.
- LIU Zhenxing,YIN Xianggen,ZHANG Zhe,et al. On-line rotor fault diagnosis way based on spectrum analysis of instantaneous power in squirrel cage induction motors[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(10):148-152.
- [11] 方芳,杨士元,侯新国,等. 派克矢量旋转变换在感应电机定子故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报,2009,29(12):99-103.
- FANG Fang,YANG Shiyuan,HOU Xinguo,et al. Application of Park's vector rotating transformation for stator fault diagnosis in induction motor[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(12):99-103.
- [12] 刘振兴,尉宇,赵敏,等. 基于 RELAX 频谱分析方法的鼠笼式异

- 步电动机转子故障诊断[J]. 中国电机工程学报,2006,26(22):146-150.
- LIU Zhenxing,WEI Yu,ZHAO Min,et al. Fault diagnosis way based on RELAX spectrum analysis in squirrel cage induction motors[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(22):146-150.
- [13] 王攀攀,史丽萍,张勇,等. 采用一种混合骨干微粒群优化算法的感应电机转子断条故障诊断[J]. 中国电机工程学报,2012,32(30):73-81.
- WANG Panpan,SHI Liping,ZHANG Yong,et al. Broken rotor bar fault diagnosis of induction motors using a hybrid bare-bones particle swarm optimization algorithm [J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(30):73-81.
- [14] 梁霖,徐光华,刘弹,等. 小波-奇异值分解在异步电机转子故障特征提取中的应用[J]. 中国电机工程学报,2005,25(19):111-115.
- LIANG Lin,XU Guanghua,LIU Dan,et al. Broken rotor bar fault diagnosis of induction motors using a hybrid bare-bones particle swarm optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(19):111-115.
- [15] 孙丽玲,许伯强,李志远. 基于 MUSIC 与 SAA 的笼型异步电动机转子断条故障检测[J]. 电工技术学报,2012,27(12):205-212.
- SUN Liling,XU Boqiang,LI Zhiyuan. A MUSIC-SAA-based detection method for broken rotor bar fault in induction motors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(12):205-212.
- [16] 孙丽玲,许伯强,李志远. 基于旋转不变信号参数估计技术与模式搜索算法的异步电动机转子故障检测新方法[J]. 机械工程学报,2012,48(13):89-95.
- SUN Liling,XU Boqiang,LI Zhiyuan. Detection of rotor fault in induction motors by combining estimation of signal parameters via rotational invariance technique and pattern search algorithm [J]. Journal of Mechanical Engineering,2012,48(13):89-95.
- [17] 彭志科,何永勇,卢青,等. 用小波时频分析方法研究发电机磁磨故障特征[J]. 中国电机工程学报,2003,23(5):75-79.
- PENG Zhike,HE Yongyong,LU Qing,et al. Using wavelet method to analyze fault features of rub rotor in generator[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(5):75-79.
- [18] YAN R,GAO R. Hilbert-Huang transform-based vibration signal analysis for machine health monitoring[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2006,55(6):2320-2329.
- [19] 鲍晓华,吕强. 感应电机气隙偏心故障研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报,2013,33(6):93-98.
- BAO Xiaohua,LÜ Qiang. Review and prospect of air-gap eccentricity faults in induction machines[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(6):93-98.
- [20] LIU Zhenxing,YIN Xianggen,ZHANG Zhe,et al. Online rotor mixed fault diagnosis way based on spectrum analysis of instantaneous power in squirrel cage induction motors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2004,19(3):485-490.
- [21] 方芳,杨士元,侯新国,等. Zoom-Prony 方法及其在转子断条故障严重程度定量估算中的应用[J]. 电工技术学报,2009,24(10):176-182.
- FANG Fang,YANG Shiyuan,HOU Xinguo,et al. Zoom-Prony's method and its application in quantitative evaluation of induction machine rotor broken-bar fault[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(10):176-182.
- [22] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,2002:119-125.
- [23] 黄云江,谢维波. 基于迭代 Prony 算法的高精度谐波检测[J]. 电气应用,2007,26(4):97-100.
- HUANG Yunjiang,XIE Weibo. Precise harmonic analysis based on iterative Prony method [J]. Electrotechnical Application,2007,26(4):97-100.

作者简介:



王 臻

王 臻(1989—),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要从事电机故障诊断和电力系统稳定分析方面的研究工作;

李 承(1957—),男,河南浚县人,教授,博士,通信作者,从事电力谐波治理、本周控制理论及应用、神经网络应用等方面的研究工作(E-mail:cheng_lub@163.com)。

Induction generator fault diagnosis based on analytical admittance

WANG Zhen^{1,2},LI Cheng^{1,2},WANG Lei²,CHEN Xu²,LI Huizhang²

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The stator analytical admittance is proposed to identify the broken bar fault, eccentricity fault and mixed faults of inductor generator rotor. The phase shift function of Hilbert transform is applied to obtain the analytical voltage and current for constructing the analytical admittance, from which, the fault characteristic frequency is extracted. For minimizing hardware cost, the iterative Prony algorithm is adopted to accurately obtain the fundamental parameters and construct the analytical voltage. Theoretical analysis and experimental results show that the proposed method can online identify single or mixed faults of inductor generator effectively.

Key words: electric generators; Hilbert transform; analytical admittance; fault characteristic frequency; mixed faults; iterative Prony algorithm