

基于旋转滤波-矩阵束的异步电机转子断条故障诊断

林志芳

(华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 现有异步电机故障诊断技术存在短时数据分辨率低、硬件开销大等缺点。针对这一问题, 提出一种基于短时数据的旋转滤波-矩阵束的异步电机转子断条故障诊断新方法。利用矩阵束算法抗噪性能强的优点, 准确求出定子电流基频成分, 并通过逆、正同步旋转变换, 剔除了定子电流中的基频成分。利用矩阵束算法准确估算定子电流故障信号的频率和幅值, 突破传统基于快速傅里叶变换(FFT)分析算法分辨率不足的限制。仿真和电机试验共同表明: 旋转滤波-矩阵束算法可以在短时数据的基础上准确辨识转子断条故障。

关键词: 异步电机; 旋转滤波; 快速傅里叶变换; 矩阵束; 转子断条故障

中图分类号: TM 343 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)04-0110-05

Broken Rotor Bar Fault Diagnosis of Asynchronous Motor Based on Rotating Filter-Matrix Pencil

LIN Zhifang

(School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In the current fault diagnosis technology of asynchronous motors, frequency resolution for short time data was low and hardware overhead was high. For the sake of solving these shortcomings, a novel approach for rotor fault based on rotating filter-matrix pencil of short time data was proposed. Matrix pencil algorithm was used to accurately estimate the fundamental frequency component in stator current, and the fundamental frequency component was removed by inverse and forward rotation transform. Accurate estimation of frequency and amplitude in stator current was realized with the short time data by using matrix pencil algorithm, which broke through the limited resolution of traditional method based on fast Fourier transform (FFT) analysis. The simulation and experimental verification showed that rotating filter-matrix pencil method was valid for broken rotor bar faults with short time data.

Key words: asynchronous motor; rotating filter; fast Fourier transform; matrix pencil; broken rotor bar fault

0 引言

转子断条故障会使异步电动机出力下降, 运行状态恶化, 造成严重的直接和间接经济损失。转子断条故障是电机的常见故障, 在最短的时间内进行故障识别, 对其在线监测和经济运行具有重要意义^[1-2]。目前, 异步电机故障检测方法有定子电流检测、局部电磁力检测、振动信号检测、

定子残余电压检测等方法。定子电流信号检测技术因其具有非侵入式的优势, 可在线监测, 目前被广泛应用^[3-5]。异步电动机发生断条故障时, 定子电流基频附近将产生特征故障频率: $(1 \pm 2ks)f_1$ (其中 $k=1, 2, 3, \dots$; f_1 为电源基波频率, s 为异步电机转差率)。由于基频幅值相较故障成分太大, 直接检测难以得到故障信息。刘振兴等^[6-8]利用瞬时功率法、Park 矢量法、Hilbert 模量法等

作者简介: 林志芳(1990—), 女, 博士研究生, 研究方向为等离子体破裂与缓解、电气设备故障诊断。

将故障频率转移到低频 $2sf_1$, 从而避免了基频的影响。梁霖等^[9-11]利用小波-奇异值分解、Relax 算法和混合骨干微粒群优化算法, 获得剔除基频的频谱图, 从而达到诊断电机故障的目的。以上改进算法存在的问题有: (1) 因平方计算引入使频谱复杂化的其他成分; (2) 需要采集三相数据, 硬件开销大; (3) 无法避免快速傅里叶变换 (FFT) 对短时数据分辨率低的缺点。本文利用矩阵束 (MP) 算法检测出定子电流的基频, 并基于此使用同步旋转变换剔除基波成分, 再使用矩阵束算法进行转子断条故障频率的识别。该方法只需采集单相短时数据, 硬件开销小, 分辨率高。

1 基于旋转滤波技术的特征故障量提取

对 $x(t)$ 进行 Hilbert 变换, 可得其共轭正交分量为

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

信号经过 Hilbert 变换, 幅值不变, 负频率部分作 90° 相移, 正频率部分作 -90° 相移。故可由 $x(t)$ 和 $\bar{x}(t)$ 构造复数:

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

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

当异步电机发生转子断条故障时, 定子电流基频附近会产生故障边频, 定子电流 A 相表达式为

$$i_a = I_1 \cos(\omega_1 t - \varphi) + \sum_{k=1}^{\infty} \{ I_{l,k} \cos[(\omega_1 - k\omega_b)t - \varphi_{l,k}] + I_{r,k} \cos[(\omega_1 + k\omega_b)t - \varphi_{r,k}] \} \quad (3)$$

其中: $\omega_1 \pm k\omega_b = 2\pi(f_1 \pm kf_b)$; $f_b = 2sf_1$; $I_{l,k}$ 和 $\varphi_{l,k}$ 分别为故障分量 $\omega_1 - k\omega_b$ 的幅值和初相位; $I_{r,k}$ 和 $\varphi_{r,k}$ 分别为故障分量 $\omega_1 + k\omega_b$ 的幅值和初相位。

利用 Hilbert 变换构造电流的复数形式:

$$\tilde{i}_a = I_1 e^{j(\omega_1 t - \varphi)} + \sum_{k=1}^{\infty} \{ I_{l,k} e^{j[(\omega_1 - k\omega_b)t - \varphi_{l,k}]} + I_{r,k} e^{j[(\omega_1 + k\omega_b)t - \varphi_{r,k}] \} \quad (4)$$

对 $\tilde{i}_a$ 进行逆向同步旋转变换, 乘以一个单位逆旋转矩阵 $E_- = e^{-j\omega_1 t}$ 可得:

$$\tilde{i}_a = I_1 e^{-j\varphi} + \sum_{k=1}^{\infty} [I_{l,k} e^{j[(-k\omega_b)t - \varphi_{l,k}]} + I_{r,k} e^{j(k\omega_b t - \varphi_{r,k})}] \quad (5)$$

通过逆旋转变换可知, 式 (4) 基波分量 $I_1 e^{j(\omega_1 t - \varphi)}$ 变为直流分量, 滤除直流后可得:

$$\tilde{i}_a = \sum_{k=1}^{\infty} [I_{l,k} e^{j[(-k\omega_b)t - \varphi_{l,k}]} + I_{r,k} e^{j(k\omega_b t - \varphi_{r,k})}] \quad (6)$$

对式 (6) 进行正同步旋转变换, 乘以一个单位正旋转矩阵 $E_+ = e^{j\omega_1 t}$ 可得:

$$\tilde{i}_{br} = \sum_{k=1}^{\infty} \{ I_{l,k} e^{j[(\omega_1 - k\omega_b)t - \varphi_{l,k}]} + I_{r,k} e^{j[(\omega_1 + k\omega_b)t - \varphi_{r,k}] \} \quad (7)$$

由式 (7) 可知, 通过 2 次旋转变换, 定子电流中占最大比重的基波成分得以滤除, 故障成分 $(1 \pm 2ks)f_1$ 得以保留。

2 基于矩阵束的基波识别技术

基于旋转滤波技术提取故障分量的核心在于及时准确地获取定子电流的基波频率。对于采样频率为 F_s , 采样点数为 N 的信号, 传统的 FFT 的分辨频率为 F_s/N 。因 FFT 频率分辨率低, 局限于采样频率和采样数据长度, 本文采用矩阵束算法进行定子电流基波频率识别。矩阵束算法^[12-13]采用 m 个具有任意幅值、相位、频率和衰减因子的余弦函数对定子电流信号进行拟合:

$$y(t) = \sum_{i=1}^m R_i e^{\delta_i t} \cos(2\pi f_i t + \phi_i) + n(t) \quad (8)$$

式中: $n(t)$ ——系统噪声;

R_i ——幅值;

ϕ_i ——相位;

δ_i ——衰减因子;

f_i ——频率。

2.1 Hankel 矩阵的构造

利用定子电流实测信号 $y(k)$ ($k = 1, 2, 3, \dots, N$) 为采样信号, 构造 Hankel 矩阵:

$$Y = \begin{bmatrix} y(1) & y(2) & \cdots & y(L+1) \\ y(2) & y(3) & \cdots & y(L+2) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ y(N-L) & y(N-L+1) & \cdots & y(N) \end{bmatrix}_{(N-L)(L+1)} \quad (9)$$

式中: L ——矩阵束参数, 通常取 $N/4 \sim N/3$ 。

2.2 奇异值的分解及定阶

对 Y 矩阵进行奇异值分解

$$Y = UVD^T \quad (10)$$

式中: U —— $(N-L) \times (N-L)$ 的正交矩阵;

V —— $(N-L) \times (L+1)$ 的对角阵;

D —— $(L+1) \times (L+1)$ 的正交矩阵。

V 的主对角元素 σ_i 为 Y 的第 i 个奇异值。对于不含噪的信号, Y 有 p 个非零奇异值 $\sigma_i (i=1, 2, \dots, p)$, 按照下标从小到大构造一个非增序列, p 的值即为式(8)的阶数 $m^{[12-13]}$ 。

2.3 频率和衰减因子的求解

将 Y 阵奇异值分解后的前 m 个主导右特征向量 D^T 的最后一行删去, 构成一个 $L \times m$ 矩阵 D_1 , 前 m 个主导右特征向量 D^T 的第一行删去, 构成一个 $L \times m$ 矩阵 D_2 。定义 2 个 $(N-L) \times L$ 阶矩阵:

$$\begin{cases} Y_1 = UVD_1^T \\ Y_2 = UVD_2^T \end{cases} \quad (11)$$

由 Y_1 和 Y_2 组成矩阵束 $Y_2 - \lambda Y_1$, 并求解其广义特征值, 即求解:

$$G = Y_1^+ Y_2 \quad (12)$$

式中: Y_1^+ —— Y_1 的伪逆矩阵。

G 存在 m 个广义特征值, 记作 $\lambda_i (i=1, 2, \dots, m)$ 。由式(13)求解衰减因子和谐波频率, 其中 T 为信号的采样周期:

$$\begin{cases} \delta_i = \operatorname{Re} \frac{\ln \lambda_i}{T} \\ f_i = \frac{1}{2\pi} \operatorname{Im} \frac{\ln \lambda_i}{T} \end{cases} \quad (13)$$

2.4 幅值及相位的求解

在估计出最大阶数 m 和所有 λ_i 后, 通过最小二乘法, 求解式(14)可得幅值 R_i :

$$\begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \dots \\ y(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \dots & \lambda_m \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_1^{N-1} & \lambda_2^{N-1} & \dots & \lambda_m^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \dots \\ R_m \end{bmatrix} \quad (14)$$

3 算例验证

3.1 理想信号的算例验证

以仿真信号为例:

$$i_a(t) = I_0 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_0) + I_1 \cos[2\pi(1+2s)f_1 t + \varphi_1] + I_2 \cos[2\pi(1-2s)f_1 t + \varphi_2] \quad (15)$$

其中: $s=0.4\%$, $I_0=5$, $I_1=0.3$, $I_2=0.32$, 假设采样频率 5 000 Hz, 分别取 10、1、0.3 s 时长。1 s 时长的频谱和采样波形如图 1 所示。

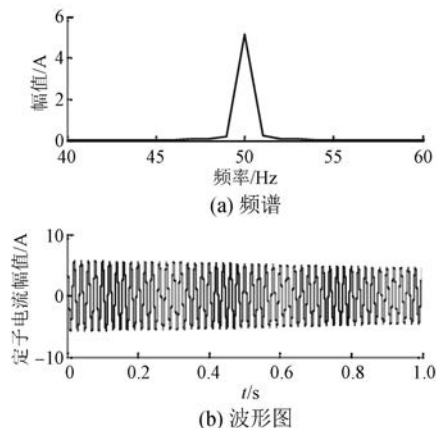


图1 仿真信号频谱和波形图

实际发生故障时, 基波频率可能会产生波动, 不恒定为 50 Hz, 因此, 分别设置不同的基波频率并分别使用 FFT 算法和矩阵束算法进行检测, 结果如表 1 所示。由表 1 可知, FFT 的检测精度受数据时长的影响, 10 s 时长时, FFT 频率分辨率为 0.1 Hz, 可以准确计算出基频, 但在 1 s 时长时, 分辨率低(只有 1 Hz), 不能满足旋转滤波所需的基波频率。矩阵束算法具有较高的频率分辨率, 在 0.3 s 时长也可以较好地检测出定子电流中的基波频率。

表1 不同基波频率时的检测结果 Hz

算法	基波频率			
	49.8 Hz	49.6 Hz	49.4 Hz	49.2 Hz
FFT 算法(10 s)	49.800	49.600	49.400	49.200
FFT 算法(1 s)	50.000	50.000	49.000	49.000
MP 算法(0.3 s)	49.793	49.600	49.399	49.203

以基频为 49.6 Hz 和 49.4 Hz 时为例, 利用矩阵束算法检测出基波频率, 再利用第 1 节所述的旋转滤波技术剔除基波的影响。同时, 分别利用 FFT 算法和矩阵束算法识别转子断条故障成分, 算法流程如图 2 所示, 故障识别效果如图 3、图 4 所示。

由图 3、图 4 可知, 剔除基波成分后的信号, 在 10 s 数据长度下, FFT 分辨率为 0.1 Hz, 可以识

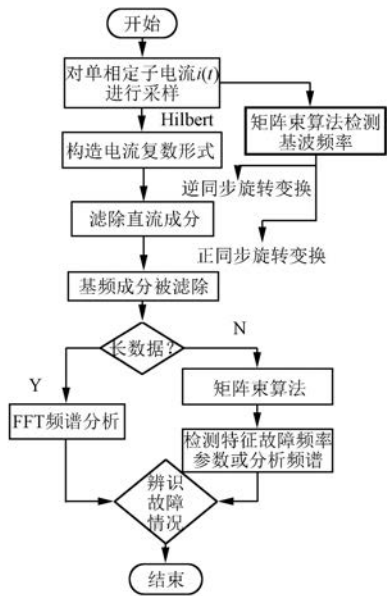


图2 旋转滤波-矩阵束算法流程图

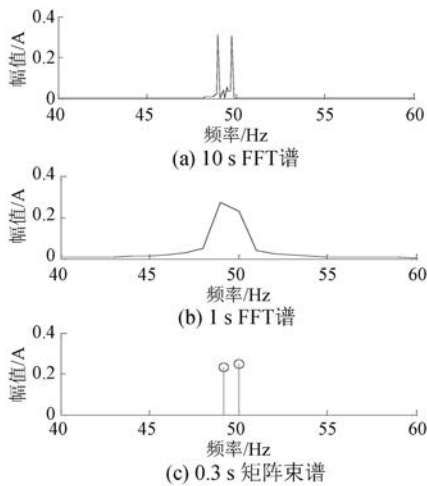


图3 基频为 49.6 Hz 时故障识别效果

别故障,1 s 数据长度时,分辨率为 1 Hz,难以区分故障,而矩阵束算法在 0.3 s 数据长度下,可以很好地识别转子断条故障,频率分辨率高。

3.2 试验算例验证

试验采用 1 台 7.5 kW 的 Y132M-4 型异步电机,采集电机 1 根断条时的单相定子电流信号,采集频率 5 000 Hz,数据长度 0.3 s,波形图如图 5 所示。利用矩阵束检测出基波频率,并基于此利用旋转滤波剔除基波成分,再利用矩阵束法进行转子断条故障特征频率检测,如图 6 所示。由图 6 可知,矩阵束算法在短时数据情况下的频率检测

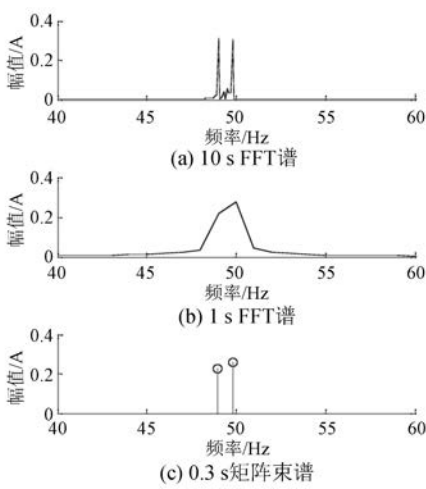


图4 基频为 49.4 Hz 时故障识别效果

精度高,可以很好地检测出基波成分和故障成分。因此,利用旋转滤波-矩阵束算法,可以在 0.3 s 数据长度下,准确计算出转子断条故障的特征频率以及幅值,从而达到准确识别转子断条故障的目的。

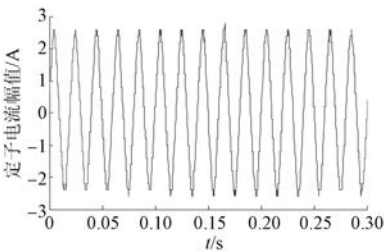


图5 1 根断条故障时定子电流信号波形图

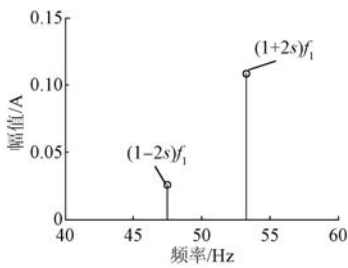


图6 1 根断条时利用旋转滤波-矩阵束算法的识别效果

4 结 语

(1) 本文提出了一种低硬件开销的旋转滤波提取转子断条故障边频的方法:利用矩阵束算法的高识别精度,精确识别定子电流基波成分,并通过 2 次旋转变换,可有效地滤除定子电流中的基

波成分,避免故障边频受到强大基频的影响。

(2) 结合旋转滤波和矩阵束可以对 0.3 s 短数据进行信号分析,识别转子断条故障特征频率和幅值,解决了 FFT 算法对短时数据分辨率偏低的缺点。

(3) 仿真算例和试验均表明,本文所提旋转滤波-矩阵束算法在短时数据时仍具有高分辨率能力,可有效识别异步电机转子断条故障。其采集数据时间短,有利于故障的在线监测。

【参考文献】

- [1] 许伯强,朱明飞.基于 ESPRIT 和扩展 Prony 算法的异步电机转子断条故障检测方法[J].电机与控制应用,2016,43(5): 59.
- [2] 方芳,杨士元,侯新国.基于改进多信号分类法的异步电机转子故障特征分量的提取[J].中国电机工程学报,2007,27(30): 72.
- [3] 向玲,朱永利,唐贵基.HHT 方法在转子振动故障诊断中的应用[J].中国电机工程学报,2007,27(35): 84.
- [4] 牛发亮,黄进,杨家强.基于电磁转矩小波变换的感应电机转子断条故障诊断[J].中国电机工程学报,2005,25(24): 122.
- [5] 贾朱植,杨理践,祝洪宇,等.基于瞬时频率分析的笼型电机转子断条故障诊断[J].电机与控制应用,2017,44(8): 74.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] KIM B, LEE K, YANG J, et al. Automated detection of rotor faults for inverter-fed induction machines under standstill conditions [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(1): 55.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 史丽萍,王攀攀,胡泳军,等.基于骨干微粒群算法和支持向量机的电机转子断条故障诊断[J].电工技术学报,2014,29(1): 147.
- [12] 李宽,李兴源,赵睿.基于改进矩阵束的高压直流次同步振荡检测[J].电网技术,2012,36(4): 128.
- [13] 党杰,李勇,徐友平,等.基于 WAMS 和奇异熵矩阵束方法的电网低频振荡仿真分析[J].电力系统自动化,2010,34(15): 14.

收稿日期: 2018-10-11

(上接第 86 页)

- [2] 暴杰,赵慧超,董秀辉,等.电动车用永磁同步电机的三相短路稳态分析与应用[J].微特电机,2014,42(3): 17.
- [3] 况金园,殷强.永磁同步电机稳态短路电流的形成及试验方法[J].现代制造技术与装备,2016(2): 72.
- [4] 国家铁路局.电力牵引 轨道机车车辆和公路车辆用旋转电机: 第 4 部分 与电子变流器相连的永磁同步电机: GB/T 25123.4—2015[S].北京: 中国标准出版社,2016.
- [5] 蒋文选.永磁同步电机的电枢反应电抗和同步电抗[J].贵州科学,1998(1): 52.
- [6] 杨松,石婷婷.永磁电机短路计算研究[J].船电技术,2011,31(11): 19.
- [7] 王北社,田德见.永磁同步发电机三相突然短路过渡过程的分析与探讨[J].东方电机,2013,41(1): 36.

收稿日期: 2018-11-04