

文章编号:1001-1609(2005)06-0449-03

基于线调频小波变换能量谱的电机故障信号处理

胡国胜^{1,3}, 朱锋峰², 任震³, 涂用军¹

(1. 广东科学技术职业学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学理学院, 广东 广州 510640;
3. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

Electric Machine Fault Diagnosing Based on Energy Spectrum of Gauss Chirplet Transforms

HU Guo-sheng^{1,3}, ZHU Feng-feng², REN Zhen³, TU Yong-jun¹

(1. Guangdong Vocational College of Science & Tech., Guangzhou 510640, China; 2. Maths School, South China Univ. of Tech., Guangzhou 510640, China; 3. Electric Power School, South China Univ. of Tech., Guangzhou 510640, China)

摘要: 提出了一种基于高斯线调频小波变换诊断电机故障的新方法。线调频小波变换是信号的时间-频率-尺度变换, 具有比小波变换及其它时频分析更强的非平稳信号分析功能。利用高斯线调频小波变换作电机故障信号的能量谱估计, 可提取电机故障信号的频率成份。试验结果表明, 这种方法比 Fourier 变换和小波变换频率分布的能量更集中。

关键词: 电机; 故障诊断; 线调频小波变换; 能量谱
中图分类号: TM307.1; TM711 **文献标识码:** A

Abstract: In this paper, a new method of diagnosing electric machine fault, which based on gauss chirplet transforms, is presented. Chirplet transforms (CTs) are variation of the time, the frequency, and the scale of the signal. CTs have more effective than wavelet transforms in time-frequency analyzing of non-stable signals. Energy spectrums of electric machine fault signal can be gauged by using Gauss CTs, so the frequencies of the signal can be extracted. Experiment results show this method is more concentrated in energy than fourier transform and wavelet transform.

Key words: electric machine; fault diagnosing; chirplet transform; energy spectrum

1 引言

在电机故障识别中, 经典的故障信号处理常采用以快速 Fourier 变换(FFT)为基础的相关分析、幅值分析、频谱分析等时频和频域分析方法。但经典的方法存在固有缺点, 即它虽然在频域范围内是完全局部化的, 但是它不包含任何时域信息, 因而不适于分析非平稳信号。由于电机故障信号为突变信号, 在故障发生时刻含有丰富的时变成分。因此, 快速 Fourier 变换谱估计方法不能满足电机故障信号分

析的需要。

近年来崛起的各种时频分析方法(短时 Fourier 变换、Wigner-Ville 分布、小波变换等)较好地解决了非平稳信号分析的问题。小波分析又是其中运用最成功的一种方法, 具有良好的时频局部性、多尺度性, 因而可以分析非平稳信号。然而, 小波分析只能适用于分析具有固定比例带宽(恒 Q)的非平稳信号^[1]。在实际应用中遇到的常常只是具有近似等宽或近似等 Q 的分析带宽的信号, 如电机故障早期的信号。这类信号的分析需要使用形状比矩形更灵活的时频网络。除了上述变换的时间平移、频率平移和时频拉伸外, 还应考虑矩形网络的斜方向的拉伸与旋转变化。线调频小波变换的时频窗口具有该特性。

线调频小波变换源于 19 世纪 20 年代的光学研究^[2-3], 但将其作为信号处理的数学工具来研究, 则只是最近几年的事^[4-6]。线调频小波变换优于小波变换, 对非平稳信号的分析功能更加强大。线调频小波变换使用的时频分析网格除了时移、频移、尺度变换外, 还有斜方向的拉伸与旋转变化, 这些复杂形状的网格所提供的分析功能是短时傅里叶变换、小波变换等各种方法所无法企及的^[7-8]。高斯线调频小波变换属于时间-频率-尺度变换, 利用其作信号的谱估计, 不仅具有小波变换谱估计方法高频域分辨率的优点, 而且可以根据需要自由地选择尺度参数, 谱估计值准确有效。

笔者对电机故障信号作高斯线调频小波变换能量谱分析, 从谱图上可以清晰地观察到信号的频率和其边频带, 并与基于 Fourier 自功率谱估计方法以及一般的小波分析方法进行了比较。

收稿日期:2005-08-07; 修回日期:2005-09-08

基金项目:国家自然科学基金资助(50077008) 广东省自然科学基金资助(033044)

作者简介:胡国胜(1965-),男,副教授,从事小波理论、SVM 理论研究及其在电力系统中的应用研究。

2 高斯线调频小波变换

在信号的线性变换中,基函数的选取至关重要。为了有效地刻画信号的特征,将基函数报成与待分析信号的性态相类似的信号。高斯线调频小波是一个与小波相仿的术语,意即“用一小段基波对线性调频波振荡调制后得到的信号波”,它是小波的重要推广^[17-8]。用线调频小波作基信号的线性变换称为线调频小波变换。

短时 Fourier 变换写成内积形式: $G_b^\omega f(\omega) = \langle f(t), g_a(t-b)e^{j\omega t} \rangle$, 小波变换写成内积形式为: $WT_f(b, a) = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle$, 其中: $\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为小波。从形式上看,窗函数 $g(t)$ 原先的对应分析参数 (b, ω) 在短时 Fourier 变换发生时间平移和频率平移(或称调制)的变化,而在小波变换中则发生了时间平移和时频坐标轴的尺度变换(简称时频拉伸)。

可以将各种时频变换中的基信号统一表示成^[2-3,7-8]: $g_{b,\omega,\alpha,p,q}(t) = M_{b,\omega,\alpha,p,q}(t)$, 并称之为分析函数。它与窗函数 $g(t)$ 的时间平移、频率平移、时频拉伸、时间倾斜和频率倾斜等 5 种仿射时频变换之间存在关系: 时间平移算子 $M_{0,\omega,0,0,0}g(t) = g(t-b)$, 频率平移算子 $M_{0,\omega,0,0,0}g(t) = e^{j\omega t}g(t)$, 时频拉伸算子 $M_{0,0,\alpha,0,0}g(t) = e^{-\alpha t}g(e^{-\alpha}t)$, 时间倾斜算子 $M_{0,0,0,p,0}g(t) = (-jp)^{-1/2} e^{j\pi \frac{1}{p} t^2} \times g(t)$ (\times 表示卷积) 和频率倾斜算子: $M_{0,0,0,0,q}g(t) = e^{j2\pi \frac{q}{2} t^2} g(t)$ 。

将短时 Fourier 变换和小波变换中的基函数统一表示成分析函数:

$$g_{b,\omega,\alpha,p,q}(t) = M_{b,\omega,\alpha,p,q}(t) \quad (1)$$

由此可见, $g_{0,\omega,0,0,0}(t)$ 为连续 Fourier 变换基函数, $g_{b,\omega,0,0,0}(t)$ 为短时 Fourier 变换基函数, $g_{b,0,\alpha,0,0}(t)$ 为小波变换基函数。

高斯小波包定义为具有高斯包络的所有小波的集合:

$$g_{b,\omega,\sigma,0,0}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-b}{\sigma}\right)^2 + j\phi\right] \exp(j\omega t) \quad (2)$$

其中: 小波的相移 $\phi \in R$ 为常数, 而 $\sigma > 0$ 控制高斯波形“宽窄”, 即尺度参数。通常要求小波包具有单位能量, 单位能量的高斯小波包由下式定义:

$$g_{b,\omega,\log(\Delta t),0,0}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-b}{\sigma}\right)^2\right] \exp(j\omega t)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\sqrt{\pi}\Delta t}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-b}{\Delta t\sqrt{2}}\right)^2\right] \exp(j\omega t) \quad (3)$$

其中: $\Delta t = \sqrt{2}\sigma$ 。将高斯小波包加以推广, 便得到高斯线调频小波包:

$$g_{b,\omega,\log(\Delta t),0,q}(t) = \frac{1}{\sqrt{\sqrt{\pi}\Delta t}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-b}{\Delta t}\right)^2 + j\phi\right] \exp[j(qt^2 + \omega t)] \quad (4)$$

式中: $q \in R$ 代表线性调频斜率, $\log(\Delta t)$ 为对数时宽, 调频斜率 q 可正可负。它是一类具有高斯复包络的线性调频函数族, 频率中心为 ω , 频宽 $\Delta\omega = \sqrt{\frac{2}{\Delta t^2} + 64\pi^2\Delta t^2q^2}$ 。小波可以看作是调频斜率为零的线调频小波, 线性调频波则是窗函数无穷大的线调频小波。

仿照短时 Fourier 变换和小波变换的内积表示法, 利用高斯线调频小波包得到的变换称为高斯线调频小波变换, 表示为:

$$CCT_f(b, \omega) = \langle f(t), g_{b,\omega,\log(\Delta t),0,q}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{\sqrt{\pi}\Delta t}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-b}{\Delta t}\right)^2\right] \exp[j(qt^2 + \omega t)] dt \quad (5)$$

函数 $g(t)$ 称为线调频母波。变换核 $\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-b}{\Delta t}\right)^2\right] \exp[j(qt^2 + \omega t)]$ 可以视为 3 个核函数的集成。核函数 $\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-b}{\Delta t}\right)^2\right]$ 相当于小波变换中的高斯小波核函数, $\exp[j\omega t]$ 为 Fourier 变换的核函数, 见图 1, 而 $\exp[jqt^2]$ 则为解线调中的核函数, 见图 2。

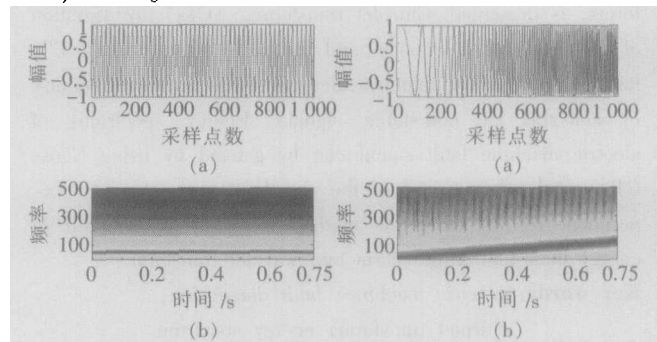


图1 Fourier 变换的核函数及其频谱图

图2 线调频小波的核函数及其频谱图

连续 Fourier 变换、短时 Fourier 变换以及小波变换均为线调频小波变换的特例。连续 Fourier 变换定义为: $FT_f(\omega) = \langle f(t), g_{0,\omega,0,0,0}(t) \rangle$, 短时 Fourier 变换定义为: $STFT_f(b, \omega) = \langle f(t), g_{b,\omega,0,0,0}(t) \rangle$, 小波变换定义为: $WT_f(b, \sigma) = \langle f(t), g_{b,\omega,\sigma,0,0}(t) \rangle$ 。短时 Fourier 变换 FFT、小波变换等时频分析方法都是在时频或时间-尺度的二维平面上描述信号, 高斯线调频小波变换则是信号的四维空间表示, 其刻画信号局部特征的能力是小波变换无法企及的。

3 高斯线调频小波变换能量谱

二次型的时频表示是一种直观和合理的描述信

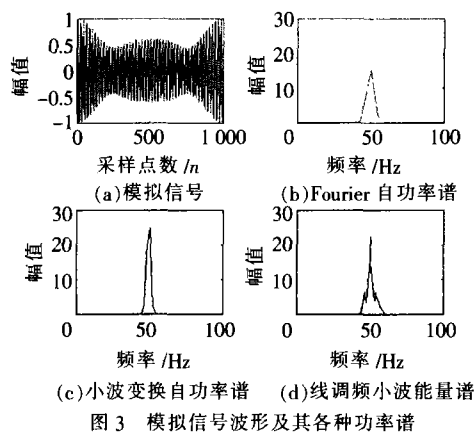
号的时间-频率能量分布的方法,而得到二次型(即能量化)时频表示最简单的一种方法就是直接取某时频变换幅值的平方形式。因此,时间和频率的联合函数 $|CCT_f(b, \omega)|^2$ 表示了信号在时间 b 和频率 ω 处的能量密度, $|CCT_f(b, \omega)|^2 db d\omega$ 表示在 b, ω 时频点处,时间-频率网络 $db \cdot d\omega$ 内的能量。对于时间采样间隔为 T_s 、采样长度为 N 的信号 $f(t)$, $T_s \Delta\omega \sum_{i=1}^N |CCT_f(b, \omega)|^2$ 可以理解信号在 ω 频率点处整个时间范围内的能量,由此定义高斯线调频小波变换能量谱:

$$E(\omega) = T_s \Delta\omega \sum_{i=1}^N |CCT_f(b, \omega)|^2 \quad (6)$$

通过改变式(6)中控制时频拉伸的 Δt 值,可以根据需要作不同尺度选择;通过频率平移,可以获得所需频率点的谱估计值。因此,高斯线调频小波变换使得信号的谱估计具备了多尺度性。

对于电机故障信号,选取适当的 q 和 Δt 值,利用式(6)即可获得信号的能量谱估计。

考虑模拟信号 $x(t) = \frac{3}{5} \sin(2\pi f_0 t) + \frac{1}{5} \sin(2\pi f_1 t) + \frac{1}{5} \sin(2\pi f_2 t)$ ($0 \leq t \leq 1$), 其中: $f_0 = 50$ Hz, $f_1 = 48$ Hz, $f_2 = 52$ Hz, 采样频率为 1 000 Hz, 采样时间为 1 s。图 3(a)为模拟信号的时域波形,图 3(b)为模拟信号的 Fourier 变换的自功率谱,图 3(c)为模拟信号的小波变换的自功率谱,图 3(d)为式(7)计算得到的模拟信号的高斯线调频小波变换能量谱。从图中可以看出, Fourier 变换的功率谱没有小波变换的功率谱集中,效果比不上小波变换。而高斯线调频小波的能量谱能量更集中,能反映出在基频 50 Hz 处的频率的微小变化。显示出高斯线调频小波变换能量谱在频率检测中的优势。



4 电机故障信号实例分析

笔者进行了发电机单根转子断条时定子电流信号故障试验。动模实验为直流发电机输出电流 3.0 A,

电压 114 V, 经调压器接电动机, 调压器付方电压 380 V。测取电机转子断条时负载 30 Ω 时定子电流信号见图 4(a)。采样频率为 1 024 Hz。图 4(b)是电流信号的时 Fourier 自功率谱。从图上可明显看出调幅信号特征,但要识别故障类型还需进一步分析。从图 4(b)上可看到,基频 $f_0 = 50$ Hz 周围存在间距为 20 Hz 的边频带。

图 4(c)为高斯线调频小波变换能量谱,通过它了解该频率段的能量发布细节情况。由式(6)可知,高斯线调频小波变换时间倾斜算子为 0, 在选取控制时频网络频率倾斜的参数 q 时,试验采用不同的 q 时,结果基本相同,图 4(c) $q=1$ 时的高斯线调频小波变换能量谱图,与图 4(b)比较可知,它的边频带要窄得多,能量集中,更清楚地反映出故障信号的频率分布情况。

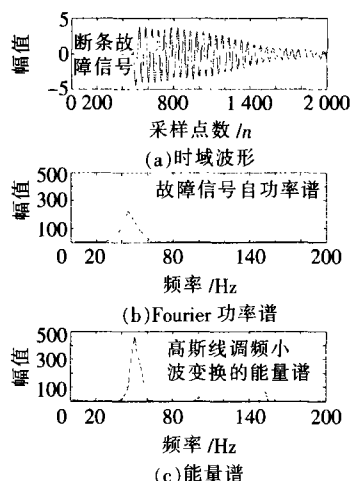


图 4 电机断条故障信号和谱图

5 结语

(1)提取电力系统故障信号频率变化的方法有很多种:如 Fourier 变换、快速 Fourier 变换以及小波变换等。但是这些变换功率谱能量不够集中。

(2)引进的高斯线调频小波是 Fourier 变换和小波变换的更一般形式,它具有比小波变换更灵活的时频窗口。

(3)基于高斯线调频小波变换的能量谱被应用于电机故障信号的频率跟踪,它比 Fourier 变换和小波变换的效果好,能量更集中,显示出高斯线调频小波在电机故障信号频率分析的实用性。

参考文献

- [1] Charles K. An Introduction to Wavelets [M]. Academic Press, Inc. 1992.
- [2] Mann S, Haykin S. Chirplets and Wavelets: Novel Time-frequency Methods [J]. Electronics Letters, 1992 (28): 114-116.
- [3] Mann S, Haykin S. The Chirplet Transform: Physical Considerations [J]. Signal Processing, 1995, (下转第 455 页)

极为有利。对于 3.3 kV 电网,其分布电容在 0.1~0.6 μF 之间,故 R_0 应选择在 1.77~10.6 kΩ 之间。

7 电弧接地过电压

当电网中发生单相接地故障时,由于变压器中性点电阻形成电流通路,中性点对地电压不等于相电压,所以对于间隙性电弧接地过程,由 Petesen 理论可知,中性点对地电压可以表示成^[4]:

$$U_0 = E_0' \cdot e^{-\frac{t}{C_0}} \quad (17)$$

Petesen 理论认为,严重的弧光接地过电压产生是由于系统中能量的积聚所致。只要在系统中性点安装适当的泄漏电阻,使电弧在点燃熄灭到重燃前的一段时间内泄漏释放,即可降低过电压幅值。

取 $\tau = \pi/\omega, G = 1/3R_0$, 在不同的 R_0 值下,半个工频周期内中性点位移电压变化值见表 3。

表 3 中性点位移电压随 R_0 在半个工频周期内的衰减值

R_0	U_0/E_0'	R_0	U_0/E_0'
$\frac{5}{3\omega C_0}$	0.534	$\frac{1.5}{3\omega C_0}$	0.123
$\frac{4}{3\omega C_0}$	0.456	$\frac{1}{3\omega C_0}$	0.043
$\frac{3}{3\omega C_0}$	0.351	$\frac{0.5}{3\omega C_0}$	0.0017
$\frac{2}{3\omega C_0}$	0.208		

由表 3 中的数据可知,当取 $R_0 = 1/3\omega C_0$ 时,中性点位移电压在半个周期内降到过电压初始值的 4.32%,系统能量几乎全部泄漏掉,降低了故障相上的最大恢复电压值,使电弧重燃不致引起高幅值的振荡过电压。故对于 3.3 kV 电网,同样应选择在 1.77~10.6 kΩ 之间。

在高压试验室对变压器中性点经电阻运行方式进行了模拟测试,从实验观察到的现象并结合波形分析,过电压发生的过程较复杂,波形变化较大;中性点电阻值越大,电弧越易重燃,且过电压幅值越高,过电压波形也与不接地系统故障时相似;随着 R_0 值的减小,电弧能量逐渐减小,电弧重燃几率减少,过电压幅值也较低。

图 6 为中性点接地电阻 $R_0 = 1.0 \text{ k}\Omega$ 时各相电弧过电压概率 p_i 分布柱形图。与中性点绝缘运行系统

相比,在中性点接入电阻后,故障相上的电荷可以直接通过 R_0 泄放,减少了电弧重燃的可能性。电弧过电压的幅值和出现的概率明显降低,有利于电气设备的绝缘安全。

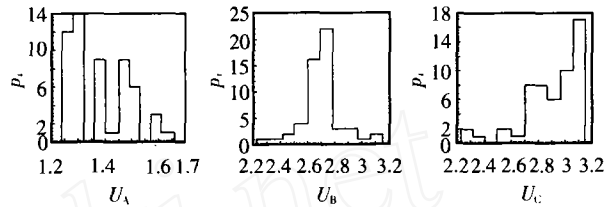


图 6 电弧过电压概率分布

8 结语

(1) 中性点接地电阻降低了整个绝缘电阻水平,使漏电电流和直接接地故障电流均增大。电网的分布电容越大,其所对应的漏电电流越大,对煤矿和人员安全构成的威胁也越大。

(2) 接地故障瞬态电流有效值远大于稳态电流有效值,因此在设计 3.3 kV 供电系统及设备时,必须考虑瞬态电流有效值和峰值的影响,以免漏电电流暂态冲击分量对系统及有关设备造成损坏。

(3) 中性点接地电阻较小时,可以有效限制串联谐振过电压;同时,接地故障相上的电荷泄漏速度越快,从而降低了故障相电压的恢复速度,与中性点绝缘运行系统相比,电弧过电压的幅值和出现的概率明显降低,有利于电气设备的绝缘安全。

(4) 对于 3.3 kV 供电系统,中性点接地电阻选择在 1.77~10.6 kΩ 之间。综合分析考虑,应取较小值为宜。

参考文献:

- [1] Thomas Novak. The Application of 4 160 V to Longwall Face Equipment [J]. IEEE Trans. Ind. Application, Mar/Apr 1996, 32(2): 471-479.
- [2] Seshaprasad B J. Investigation of Switching Transients in 3.3 kV Underground Mine Power System [J]. Mining Technology, 1997, 79(914): 267-270.
- [3] 胡天禄. 矿井电网的漏电保护 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1987.
- [4] 唐翔. 煤矿井下 3.3 kV 电网漏电保护系统及装置的研究 [D]. 北京: 中国矿业大学博士论文, 2003.

(上接第 451 页)

- [4] 任震, 胡国胜, 黄雯莹, 等. 基于线调频小波变换的电机故障信号消噪方法 [J]. 电工技术学报, 2002, 17(3): 59-62, 11.
- [5] 胡国胜, 任震, 黄雯莹, 等. 三角样条调频小波变换的电机轻微故障定位 [J]. 电网技术, 2002, 27(3): 28-31.
- [6] 刘希强, 周蕙兰, 曹文海, 等. 高斯线调频小波变换及其在地

- 震震相识别中的应用 [J]. 地震学报, 2002, 24(6): 607-616.
- [7] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [8] 胡国胜, 陈一天, 任震. Fourier 变换和小波变换一般形式——线调频小波变换和多普勒小波变换 [J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(5): 46-48.