

# 基于幅频特性的复值小波构造 及其在电力系统信号分析中的应用

黄群古,任震,黄雯莹

(华南理工大学电力学院,广东 广州 510640)

**摘要:** 提出了基于幅频特性的复值小波函数构造方法及其相应的复值小波变换。该方法构造的复值小波具有频率局部化性能好、提取故障信号特征分量较准确的优点。复值小波变换能准确分辨出信号中所包含的幅值信息和相位信息,因而,适用于电力系统的故障信号的检测。利用基于幅频特性的复值小波变换,对发电机转子部分故障信号进行了分析,显示了基于幅频特性的复值小波变换的电力系统故障信号分析方法,是一种有效的方法。

**关键词:** 复值小波变换; 电力系统; 信号分析

**中图分类号:** TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2001)05-0001-04

## 1 引言

运行中的电力设备(包括传输网络)发生故障时,总要伴随电流电压信号的变化,其变化的幅度与故障的严重程度直接相关;由于闪烁或者温度压力等原因造成电力设备的绝缘损坏时,其电流电压信号也要发生一定的偏移;此外,由于电力系统规模的扩大,再加上电力电子设备的引入,电力信号的谐波成分增加,使得电力系统的控制和保护更加复杂。因此,及时地反映现代电力设备的运行状态,准确地进行电力设备的故障检测和故障诊断,对提高电力系统的运行水平和供电可靠性具有十分重要的社会效益。但是,Fourier分析由于时频局部化性能差,因而不适合于对复杂多变的非平稳瞬态信号进行处理<sup>[1,2]</sup>。小波分析由于具有良好的时频局部化性能,克服了Fourier分析的不足,因而适合于对现代电力系统的故障信号进行分析和处理。但是,利用小波变换方法进行电力系统故障检测和故障诊断,其准确度与所选取或构造的小波函数有很大的关系。本文提出的基于幅频特性的复值小波函数的构造方法,由于所构造的小波函数具有良好的频域局部化特性,因而适用于对故障信号进行分析和处理。此外,本文通过与Fourier变换和Morlet小波变换比较,证实了利用基于幅频特性的复值小波变换处理故障信号所具有的优势。

## 2 基于幅频特性的复值小波函数构造方法

首先确定函数  $\psi(t)$  的 Fourier 变换  $\bar{\psi}(f)$ 。 $\bar{\psi}(f)$  的特性是所要求的,即它具有紧支撑和一定的光滑性。再根据  $\bar{\psi}(f)$  进行逆傅立叶变换,得到的

函数  $\psi(t)$ 。若  $\bar{\psi}(f)$  还满足容许性条件,则可以证明  $\psi(t)$  就是满足要求的小波函数。

图1示出了部分基于幅频特性的复值小波函数及其相应的频谱特性。图1左为所构造的复值小波函数的实部特性曲线,图1中为该复值小波函数的虚部特性曲线,图1右为相应的复值小波函数的幅频特性。

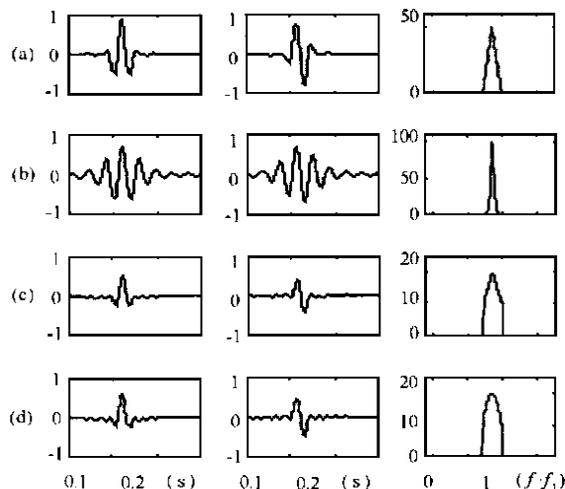


图1 基于幅频特性的小波函数特性曲线

图1(a)表示频率特性为三角形的复值小波函数特性;图1(b)表示频率特性为矛形的复值小波函数特性;图1(c)表示频率特性为劈形的复值小波函数特性。图1(d)表示频率特性为舌形的复值小波函数特性。

此外,还可以构造频率特性为其他形状的复值小波函数。

从图1可以看出,基于幅频特性的复值小波函数及其相应的复值小波变换具有下列性质:

- (1) 满足容许性条件
- (2) 频域具有紧支撑,时域具有快的衰减速度
- (3) 选频能力强

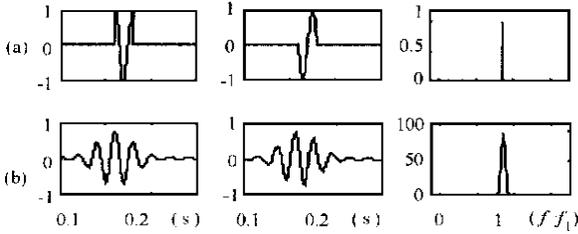


图2 Fourier 变换基函数和 Morlet 小波函数特性曲线

### 3 基于幅频特性的复值小波变换的电力系统故障信号分析

本节应用基于幅频特性的复值小波函数对电力系统的畸变故障信号进行检测。

在下面的分析比较中,除了 Fourier 变换外,还利用了 Morlet 小波变换。

在对信号  $s(t)$  的所有变换中,都可以表示为:

$$W(s, a, b, \dots, k) = \int_{R^n} s(t) w(t, a, b, \dots, k) dt,$$

$w(t, a, b, \dots, k)$  为变换函数,也可以称其为权函数。对于  $n$  维变换,  $t$  为  $n$  维矢量,此时  $dt = dt_1 dt_2 \dots dt_n$  在一维的情况下,权函数为  $w(t, a, b, \dots)$ ,对于 Fourier 变换,  $a = \omega, b, c$  等为 0,从而  $w(t, a, b, \dots) = e^{-j\omega t}$ ;对于小波变换  $w(t, a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi(\frac{t-b}{a})$ 。在应用离散 Fourier 变换时,不可避免地要对变换函数  $e^{-j\omega t}$  进行截断,相当于加一个

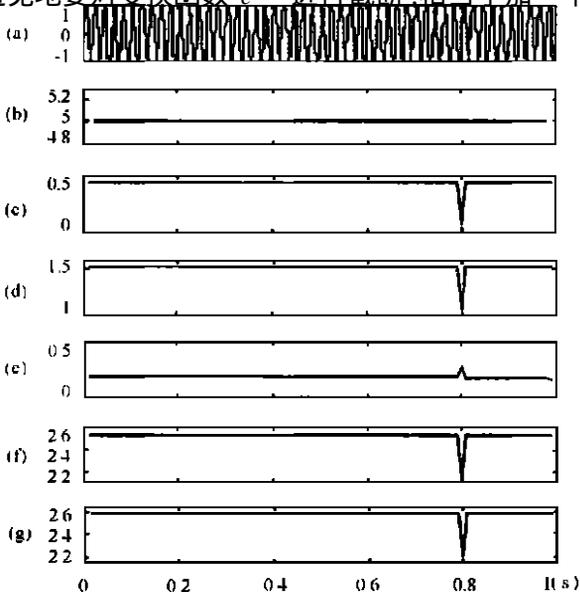


图3 信号频率突变时几种变换特性比较(49.9Hz)

矩形窗。图 2(a) 示出了矩形窗为一个周波的情形,它们分别为函数  $e^{-j\omega t} (u(t) - u(t-2))$  的实部、虚部和幅频特性曲线。这里  $u(t)$  为单位阶跃函数。Morlet 小波函数在许多文献中均有叙述<sup>[2]</sup>,其具体表达式为:

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} (e^{-i\omega_0 t} - e^{-i\omega_0^2/2}) e^{-t^2/2}$$

在通常情况下, Morlet 小波函数使用下列形式:

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} e^{-i\omega_0 t} e^{-t^2/2}, \quad \omega_0 \approx 5.$$

图 2(b) 示出了 Morlet 小波函数的实部、虚部和幅频特性曲线。

对于电力系统的工频信号  $s(t)$  (电流或电压等),在正常情况下的频率为 50Hz。当由于某种原因(如负荷的抖动、水轮发电机水压的波动、调速器过调或欠调、变频装置的突然投入等)使得信号  $s(t)$  的频率突然发生波动时,能及时而有效地检测到这种变化的特征,对电力系统的运行和微机保护都是非常重要的。

情形 1:设定一起始时刻  $t_0 = 0$ ,某一待检测的其频率为 50Hz 的信号  $s(t)$ ,在时刻 0.8s 时频率突然变化到 49.9Hz(以后保持该 49.9Hz),如图 3(a) 所示。对于这样一个频率畸变的信号,分别对其进行 Fourier 变换、Morlet 小波变换以及本文构造的基于幅频特性的小波变换。图 3(b) 为对该信号进行 Fourier 变换后的模值(绝对值)特性;图 3(c) 为对该信号进行 Morlet 小波变换后的模值(绝对值)特性;图 3(d)、图 3(e)、图 3(f) 和图 3(g) 则为对该信号进行本文构造的基于幅频特性的小波变换后的模值(绝对值)特性,它们分别对应于图 1 所示的三角形复值小波变换特性、矛形的复值小波变换特性、劈形的复值小波变换特性和舌形复值小波变换特性。

从图 3 可以得知,当系统的信号在其频率发生微小变化时 ( $\pm 0.2\%$  以内),仅用 Fourier 变换检测不到这种细微变化特征(如图 3(b) 所示)。原因是 Fourier 变换只对单一频率(如 50 Hz 或 60Hz)敏感。但是 Morlet 小波变换以及本文提出的三角形复值小波变换、劈形和舌形复值小波变换均能有效地扑捉到信号的这种微小变化。图 3(e) 中对信号的矛形复值小波变换,效果较差,因为它的幅频特性类似于 Fourier 变换的单一频率特性,但它较 Fourier 变换要灵敏。

情形 2:起始时刻的设定和待分析的信号  $s(t)$  同情形 1。这里所不同的是,故障信号在时刻 0.8s 时,频率从 50Hz 突然变化到 49.75Hz(以后保持该

49.75Hz)时,频率的变化范围增大( $\pm 0.5\%$ 以上),如图4(a)所示。对该信号分别对其进行 Fourier 变换、Morlet 小波变换以及本文构造的基于幅频特性的小波变换。图4(b)为对该信号进行 Fourier 变换后的模值(绝对值)特性;图4(c)为对该信号进行 Morlet 小波变换后的模值(绝对值)特性;图4(d)、图4(e)、图4(f)和图4(g)则为对该信号进行本文构造的基于幅频特性的小波变换后的模值(绝对值)特性。

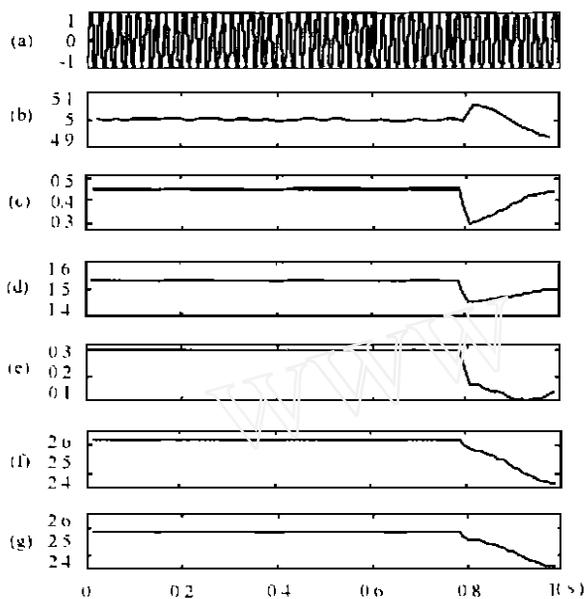


图4 信号频率突变时几种变换特性比较(49.75Hz)

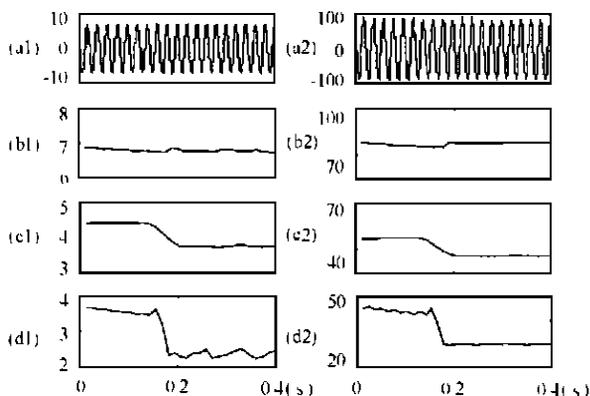


图5 发电机转子两点接地故障信号及其变换特性

从图4可以得知,当系统的信号在其频率发生较大变化时( $\pm 0.5\%$ 以上),用 Fourier 变换和小波变换都能检测到信号的这种变化特征。原因是 Fourier 变换尽管只对单一频率敏感,但当待变换的信号频率变化较大时,信号的幅值也要发生偏移,所以 Fourier 变换所能检测到的,只是这种幅值的变化,即

通过信号的幅值变化来反映频率的变化,并非说 Fourier 变换能捕捉到信号的频率畸变特征,这是 Fourier 变换同小波变换的重要区别之一。在图4(c)中,显示了对该信号的 Morlet 小波变换模值特性,但是由于该分析的信号在 0.8s 以后一直保持变化后的特征,图中的 Morlet 小波变换尽管检测到了频率的畸变,但没有保持这种变化,反而又有迅速恢复原频率(50 Hz 或 60Hz)趋势,这是它的不利的一面。本文提出的三角形复值小波变换、矛盾复值小波变换、劈形和舌形复值小波变换不但能有效地捕捉到信号的这种变化特征,而且基本上能保持这种变化特征,尤其是基于矛盾复值小波变换,检测到的特征较为理想。

为了更进一步检验基于幅频特性的复值小波变换的效果,下面对某模拟发电机转子两点接地动模实验数据进行分析(采样频率为 50kHz),并同时应用 Fourier 变换和 Morlet 小波变换进行比较。

在发电机转子发生故障时,从定子端看,三相电流和电压仍呈现一定的对称性。为了简单起见,下面仅对两点接地故障信号进行基于三角形幅频特性的复值小波变换,待分析的信号取相应的发电机转子发生两点接地故障时的定子端某一相的电流信号和电压信号,分别如图5(a1)和图5(a2)所示。图5(b1)和图5(b2)分别为上述电流电压信号的 Fourier 变换的时域特性;图5(c1)和图5(c2)分别为对上述电流电压信号进行 Morlet 小波变换后的时域特性;图5(d1)和图5(d2)则为对上述电流电压信号分别进行基于三角形幅频特性的复值小波变换后的时域特性。

从图5可以看出,当发电机转子发生两点接地时,发电机定子端的电流电压信号,在故障前后几乎看不出有什么变化,用 Fourier 变换也难以检测到这些故障信号的变化特征。当对这些故障信号进行 Morlet 小波变换时,却能检测到这些电流电压信号在故障前后的不同特征,这的确是小波变换优于 Fourier 变换之处<sup>[3,4,5]</sup>。但是,用 Morlet 小波变换检测故障信号,故障前后变化量值相差不大,而且变化较平缓。然而,当对这些电流电压故障信号进行基于三角形幅频特性的复值小波变换时,不仅能检测到故障前后的不同特征,而且故障前后变化量值相差较大,突变也较明显,这充分说明了基于幅频特性的复值小波变换,在检测电力系统故障信号特征分量方面,具有明显的优势。

## 4 结论

基于幅频特性的复值小波函数具有良好的时频域局部化特性,其相应的小波变换,具有较强的检测故障信号特征分量的能力。因此,基于幅频特性的复值小波变换能准确分辨出信号中所包含的幅值信息和相位信息,因而,适用于电力系统的故障信号分析和处理。若将其应用于电力系统微机保护,则对于提高电力系统安全可靠运行,具有重要的意义。

### 参考文献:

- [1] 崔锦泰. 小波分析导论. 西安:西安交通大学出版社, 1995.
- [2] 赵松年,熊小云. 子波变换与子波分析. 北京:电力工业出版社,1997.
- [3] Chaari O, Meunier M, Brouaye F. Wavelets: A New Tool for the Resonant Grounded Power Distribution Systems Relaying. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 11(3): 1301 ~

1308.

- [4] Zhang Chuanli, Huang Yizhuang, Ma Xiaoxu, et al. A New Approach to Detect Transformer Inrush Current by Applying Wavelet Transform. In: Electric Power Research Institute. POWERCON '98. Beijing: Wan Guo Xue Shu Publisher, 1998, 1040 ~ 1044.
- [5] 石志强,任震,等. 基于 B-小波的异步电机故障信号去噪和检测. 电力系统自动化, 1997, 21(6): 38 ~ 41.

收稿日期: 2000-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(50077008)和广东省自然科学基金(980608)资助

作者简介: 黄群古(1960—),男,博士研究生,主要研究方向:小波理论及其在电力系统中的应用,微机保护等; 任震(1938—),男,教授,博导,国务院学位委员会电气工程学科组成员,主要研究方向为小波理论及其在电力系统中的应用; 黄雯莹(1939—),女,教授,长期从事小波分析,可靠性数学等领域的科研与教学工作。

## The construction of complex wavelets based on amplitude-frequency characteristics and their application for fault signal analysis in power systems

HUANG Qun-gu, REN Zhen, HUANG Wen-ying

(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In this paper, a method of the construction of complex functions and their transforms are presented. The complex wavelet functions constructed by means of this method have advantages of good performance in frequency localization and better veracity in extracting characteristic parts of signals. Because complex wavelet transforms can exactly identify amplitude and phase information in signal to be dealt with, they are suitable for detection of fault signals in power system. In this paper, some of failure signals in rotor of generator are analyzed by making use of complex wavelets based on amplitude-frequency characteristic, it is shown that it is an effective method in fault signal analysis in power system.

**Keywords:** complex wavelet transform; power system; signal analysis