

基于非二进小波变换的电力系统微机保护数字滤波器与算法

任震, 黄群古, 黄雯莹

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 提出了非二进小波变换方法。非二进小波变换方法简便, 不需要迭代, 可以提出信号的任何整数次和分数次谐波分量, 具有比二进小波变换更强的信号处理能力和灵活性, 因而适用于电力系统故障信号分析。此外, 文中利用非二进小波变换的原理, 提出了基于非二进小波变换的电力系统微机保护数字滤波器与算法, 这对于提高电力系统微机保护的可靠性具有重要意义。

关键词: 小波变换; 微机保护; 电力系统; 数字滤波器

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2001)02-0001-03

1 引言

数字滤波器与算法是电力系统微机保护重要基础内容^[1,2,3]。在传统的数字滤波器与算法中, 富里叶分析占有特别重要的地位。但是, 富里叶分析局部化性能差, 因而不适应于对非平稳信号进行分析与处理。然而, 实际运行中的电力系统电流电压信号, 其频率不可能总是 50Hz 或 60 Hz 工频, 总有这样或那样的干扰或振动而使得电力系统电流电压信号的频率在 50Hz 或 60 Hz 附近摆动。为了更准确地对这样的信号进行分析, 有必要借助于新型的分析工具——小波分析或小波变换。

在小波变换中, 二进小波变换和基于二进划分的多分辨分析起了非常重要的作用。这些变换能提取信号在尺度 j 及其附近的频率分量。但是, 当 j 较大时, 对于信号在尺度 j 与 $j+1$ 之间的频率分量, 用基于二进划分的多分辨分析或 Mallat 算法很难分辨或即使分辨也严重失真。解决这个问题的方法是用小波包算法。然而使用小波包算法需要进行多次迭代, 这样就增加了计算时间。本文提出的非二进小波变换方法, 是从另一个角度对信号进行小波变换, 目的是为了提高离散小波变换的速度, 以满足工程上实时性的需求, 而且在许多情况下, 尺度 j 只取 1 或 -1 即可。

在下面的讨论中, 要用到 Morlet 小波函数及其相应的小波变换。Morlet 小波函数是这样定义的:

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} e^{-iat}, \quad a > 5 \quad (1)$$

它是一个复值小波函数。

2 非二进小波变换方法

设为 $\psi(t)$ 小波函数, 且满足稳定性条件: 若存

在二常数 $0 < A < B < \infty$ 使得:

$$A \sum_{k=-\infty}^{\infty} |\psi(t - k)|^2 \leq B \quad \text{a.e.} \quad (2)$$

这里 A, B 为任意正的实数。

则其非二进小波变换的形式为:

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \psi(a^{-1}t - b) dt = \langle f, \psi_{a,b}(t) \rangle \quad (3)$$

其中 $\psi_{a,b}(t) = a^{-1/2} \psi(a^{-1}t - b)$, $R, 0, b$ 为整数。

同样可以得出非二进小波变换的逆变换形式为:

$$f(t) = \sum_{b=-\infty}^{\infty} \langle f, \psi_{a,b} \rangle \psi_{a,b}(t) \quad (4)$$

其中 $\psi_{a,b}(t)$ 与 $\psi_{a,c}(t)$ 互为对偶, 且满足

$$\langle \psi_{a,b}, \psi_{a,c} \rangle = \delta_{b,c} \quad b, c \in Z \quad (5)$$

把小波函数的频窗中心变换到基频 $f_1 = 2^{-j} f_0$ (f_0 为 50Hz, 文章中所涉及的时间 t 的单位为 s), 则当实数 j 取 2, 3, 4, 5 等数值时, 利用公式(2)等就可以提取信号的 2, 3, 4, 5 等次谐波分量。

非二进小波变换除了具有连续小波变换和二进小波变换的时频局部化特点外, 还具有以下特点:

- (1) 提取信号的谐波分量更具有针对性和准确性;
- (2) 非二进小波变换能提取信号的非整次谐波分量;
- (3) 避免了二进小波变换的多次迭代;
- (4) 缩短了计算时间。

3 基于非二进小波变换的电力系统微机保护数字滤波器与算法

在电力系统中, 待分析的信号除了基频信号分

量外,一般还含有谐波分量和直流分量(或衰减的直流分量)。在利用非二进小波分析(例如,应用类似的 Mallat 算法)进行数字信号滤波时,要注意几点:

(1) 直流分量属于低频部分,指数衰减的直流分量其大部分能量也是属于低频部分。

(2) 随着 α 值取 1、2、3、5 等数值,则可以分别提取信号的基频、二次、三次和五次谐波分量等。

(3) 如果信号的 k 次谐波分量的系数呈指数衰减,则该部分信号属于 $\alpha = k$ 的谐波范围内。然后再分离其正弦变化部分和指数衰减部分。

设某一信号

$$s(t) = \cos(2\pi f_1 t) + 0.5\cos(4\pi f_1 t) + 0.2\cos(6\pi f_1 t) + 0.1\cos(10\pi f_1 t)$$

即 $s(t)$ 分别由一次、二次、三次和五次谐波分量构成,如图 1 所示。图 1(a) 表示信号 $s(t)$ 的特性,图 1(b) 分别表示构成信号 $s(t)$ 的各次谐波分量。

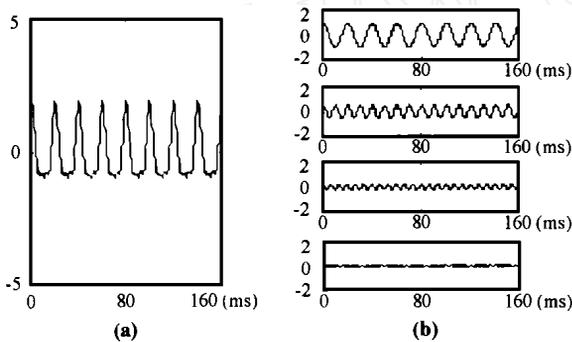


图 1 信号 $s(t)$ 及其组成成员的特性曲线

对该信号分别进行 α 等于 1、2、3、5 的非二进小波变换,其结果分别见图 2 所示。

图 2(a) 分别为信号 $s(t)$ 的时域和幅频特性;图 2(b1) 分别表示 Morlet 小波函数在 α 等于 1 时的时域(实部,下同)和幅频特性;图 2(b2) 分别为对信号 $s(t)$ 进行 α 等于 1 的非二进小波变换后的时域和幅频特性。显然图 2(b2) 中显示的是经过非二进小波变换后所提取的信号 $s(t)$ 的基频部分。

图 2(c1) 分别表示 Morlet 小波函数在 α 等于 2 时的时域和幅频特性,图 2(c2) 分别为对信号 $s(t)$ 进行 α 等于 2 的非二进小波变换后的时域和幅频特性。显然图 2(c2) 中显示的是经过非二进小波变换后所提取的信号 $s(t)$ 的二次谐波部分。

图 2(d1) 分别表示 Morlet 小波函数在 α 等于 3 时的时域和幅频特性,图 2(d2) 分别为对信号 $s(t)$ 进行 α 等于 3 的非二进小波变换后的时域和幅频特性。显然图 2(d2) 中显示的是经过非二进小波变换

后所提取的信号 $s(t)$ 的三次谐波部分。

图 2(e1) 分别表示 Morlet 小波函数在 α 等于 5 时的时域和幅频特性,图 2(e2) 分别为对信号 $s(t)$ 进行 α 等于 5 的非二进小波变换后的时域和幅频特性。显然图 2(e2) 中显示的是经过非二进小波变换后所提取的信号 $s(t)$ 的五次谐波部分。

当系统信号的幅值呈指数衰减时,利用非二进小波变换同样可以提取该信号的正弦部分和指数衰减的幅值部分。设信号 $s_2(t) = 0.5e^{-10t} + e^{-2t}\cos(\pi t)$, 这里 $\pi = 2\pi f_1, f_1 = 50\text{Hz}$ 。则对该信号经过 α 等于 1 的非二进小波变换后的时频域特性见图 3 所示。

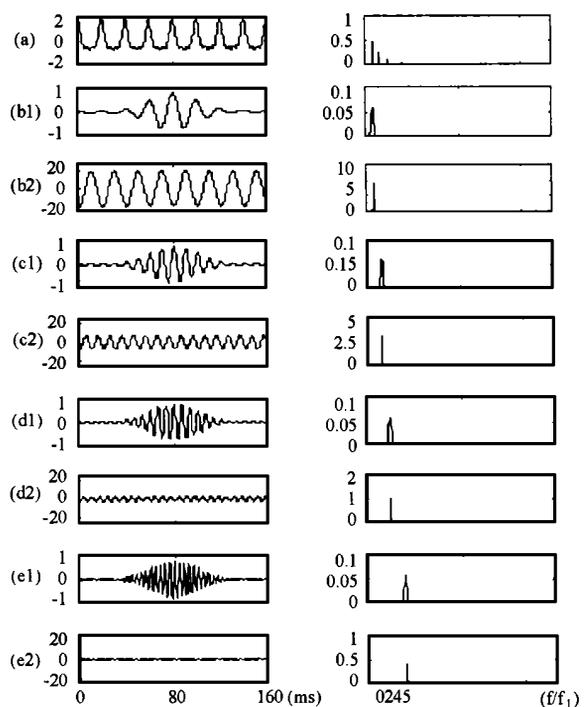


图 2 α 等于 1、2、3、5 时信号 $s(t)$ 的 Morlet 小波变换特性

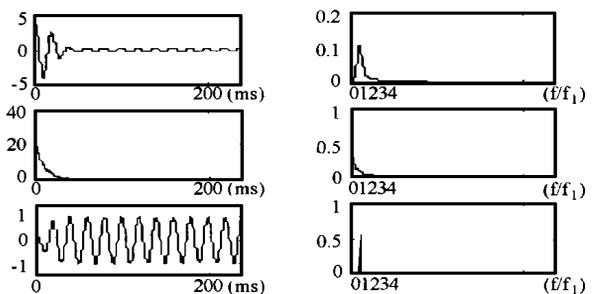


图 3 α 等于 1 时信号 $s_2(t)$ 的 Morlet 小波变换特性

图 3(a) 显示了 α 等于 1 时对信号 $s_2(t)$ 进行非二进小波变换后的信号的时频特性,图 3(b) 示出了图 3(a) 中的指数衰减的幅值部分的时频特性,图 3(c) 示出了图 3(a) 中的正弦部分的时频特性(起始时刻

的误差是小波变换的边界效应引起的)。

图3中信号的幅值部分和正弦部分基本上是按照下述算法求得的。

设 $s_2(t)$ 表示 等于1时对信号 $s_2(t)$ 进行非二进小波变换,即可设 $s_2(t) = R_{s_2}(t) + iI_{s_2}(t)$, 而 $R_{s_2}(t) = Ae^{-at} \cos(\omega t)$, $I_{s_2}(t) = Ae^{-at} \sin(\omega t)$, 并设对 $s_2(t)$ 进行的每基频周期的采样点数为 N , 固定某一时刻 t_0 , 并令

$$M(t_0) = R_{s_2}(t_0) / R_{s_2}(t_0 - N) \quad (6)$$

$$a = (1/N) \ln(M(t_0)) \quad (7)$$

$$b_1(t_0) = R_{s_2}(t_0) / e^{-at_0} \quad (8)$$

$$b_2(t_0) = I_{s_2}(t_0) / e^{-at_0} \quad (9)$$

$$A = \sqrt{b_1^2(t_0) + b_2^2(t_0)} \quad (10)$$

$$\omega(t_0) = \text{tg}^{-1} [b_2(t_0) / b_1(t_0)] \quad (11)$$

利用式(6)~(11)即可近似求出 $s_2(t)$ 中所包含的各个成分。

由此可见,在进行电力系统故障信号分析时,只需要进行一次非二进小波变换就能提取或消除信号中某次谐波分量。此外,非二进小波变换也能较好地提取信号中的直流分量或衰减的直流分量。

4 结论

本文提出的非二进小波变换方法计算简便,不需要迭代,就可以提出信号的任何整数次和分数次的谐波分量,具有比二进小波变换更强的信号处理

能力和灵活性。此外,该方法对提取信号中的直流分量或指数衰减的直流分量也有效,因而适用于电力系统故障信号分析。若将该方法应用到电力系统微机保护的数字滤波器与算法,则对于提高电力系统微机保护的可靠性和稳定性具有重要意义。

参考文献:

- [1] 杨奇逊. 微型继电保护基础. 北京:水利电力出版社,1991.
- [2] 陈德树. 计算机继电保护原理与技术. 北京:水利电力出版社,1995.
- [3] 王维俭. 电力系统继电保护基本原理. 北京:清华大学出版社,1991.
- [4] 催锦泰(美)著,程正兴译. 小波分析导论. 西安交通大学出版社,1995.
- [5] 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.
- [6] 李光琦. 电力系统暂态分析. 北京:水利电力出版社,1985.

收稿日期: 2000-09-11

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(980608)

作者简介: 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,电力系统可靠性、高压直流输电、谐波分析等; 黄群古(1960-),男,博士研究生,主要研究方向为小波理论及其在电力系统中的应用,微机保护等; 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和教学工作等。

Digital filters and algorithms of microcomputer based protection in power systems based on non-dyadic wavelet transform

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

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

Abstract: In this paper, method of non-dyadic wavelet transform is presented. The method is simple and iteration calculation free. Compared with dyadic wavelet transform, it possesses stronger abilities on signal processing and flexibility, therefore it is fit for fault signal analysis in power systems. Moreover, in this paper, digital filters and algorithms of microcomputer based protection in power systems based on non-dyadic wavelet transform are presented by using non-dyadic wavelet transform theory. It is of importance for reliability of microcomputer based protection in power systems.

Keywords: wavelet transforms; microcomputer based protection; power systems; digital filters

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告