基于小波变换的微机保护组合数字滤波器

张新勇[1],黄群古[2],任 震[1]

(1.华南理工大学电力学院,广东 广州 510640; 2.广电集团中山供电分公司,广东 中山 528400)

摘要: 数字滤波器与算法是电力系统微机保护中故障选相与故障判别的基础。本文提出的基于二进小波变换的组合滤波器,既充分利用了小波变换的优点,又克服了某些传统滤波器的缺点,因而在电力系统微机保护中,是一种行之有效的方法。该方法减弱了某些传统滤波器的干扰成分,保持了其有效分量,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; 组合数字滤波器

中图分类号: TM711 **文献标识码**: B **文章编号**: 1003-4897(2003)12-0048-03

1 引言

数字滤波器是电力系统微机保护的重要内容[1~3]。在传统的数字滤波器中,占有特别重要地位的通常有以下四种:低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器和带阻滤波器。这四种滤波器的显著优点是通带较宽,适合于对电力系统中故障信号进行分析与处理。电力系统实际运行中的电流电压信号,其频率不可能总是在 50 Hz 或 60 Hz 的整数工频上,总存在这样或那样的干扰或振动,而使得系统的电流电压信号的频率在 50 Hz 或 60 Hz 附近摆动。以上四种传统滤波器,可以设计成使其有效频带(通带)范围能覆盖电力系统所要求的频率范围,例如[48,52]或[58,62]的频率范围等。

然而,上述低通、高通、带通、带阻四种滤波器,有一个共同的不足,就是在它们的复频特性中,存在阻带波纹或吉布斯现象,如图 1 所示:其中图 1(a1)及图 1(a2)分别为低通滤波器的冲击响应和复频特性;图 1(b1)及图 1(b2)分别为高通滤波器的冲击响应和复频特性;图 1(c1)及图 1(c2)分别为带通滤波器的冲击响应和复频特性;图 1(d1)及图 1(d2)分别为带阻滤波器的冲击响应和复频特性。这种阻带波纹或吉布斯现象,给数字信号分析和处理带来不必要的误差。

为了保留上述四种滤波器的有效通带范围,同时克服所述的缺陷,本文提出了基于小波变换的小波组合低通滤波器、小波组合高通滤波器、小波组合带通滤波器和小波组合带阻滤波器。

2 小波变换方法

工程中,常用的小波变换是二进小波变换[4,5],

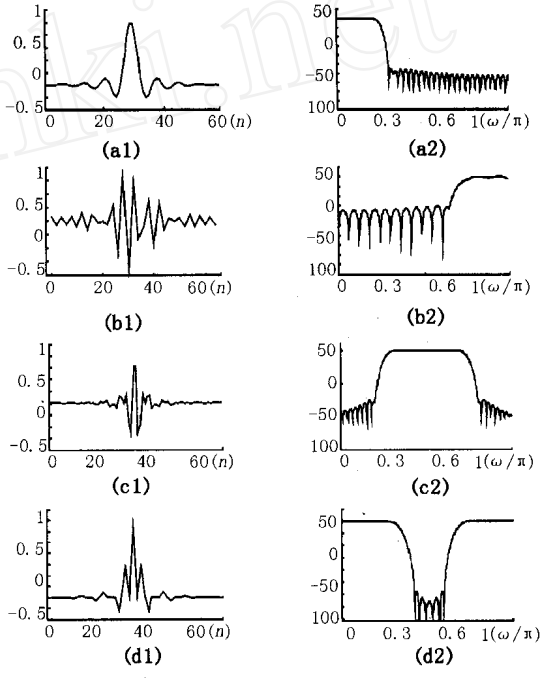

图 1 四种滤波器的冲击响应和复频特性

Fig. 1 Impulse response and frequency characteristics of 4 filters

为方便起见,本文仅以二进小波变换作为小波变换的代表。设 $\Psi(t)$ 为小波函数,且满足稳定性条件,若存在二常数 $0 < A \leq B < \infty$ 使得:

$$A \leq \sum_{k=Z} |\Psi(2^{-k}\omega)|^2 \leq B \quad \text{a.e.} \tag{1}$$

则其二进小波变换的形式为:

$$W_f(2,b) = (2)^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \overline{\Psi(2^{-1}t - b)}\, dt = \langle f, \Psi_{2,b}(t) \rangle \tag{2}$$

其中 $\Psi_{2,b}(t) = (2)^{-\frac{1}{2}} \Psi(2^{-1} - b)$, b 为整数。

同样可以得出二进小波变换的逆变换形式为:

$$f(t)=\sum_{b=-\infty}^{+\infty}\langle f,\Psi_{2,b}\rangle\Psi^{2,b}(t) \qquad (3)$$

其中 $\Psi^{2,b}(t)$ 与 $\Psi_{2,b}(t)$ 互为对偶,且满足

$$\langle\Psi_{2,b},\Psi^{2,c}\rangle=\delta_{b,c}\quad b,c\in Z \qquad (4)$$

可以把小波函数 $\Psi(t)$ 的频窗中心变换到基频 $\omega_1=2\pi f_1$(f_1 为 50 Hz,文章中所涉及的时间 t 的单位为秒 s),或者移到上述四种滤波器的通带中心,就可以设计成比较理想的小波组合滤波器。

3　基于小波变换的小波组合数字滤波器

在电力系统中,待分析的信号除了基频信号分量外,一般还含有各次谐波分量。这些谐波分量,在某些场合下是有用的,可以用来识别故障类型,或者可以作为保护动作的附加条件。如保护中的二次谐波制动,但这些谐波在很多情况下是影响动作准确度的干扰源,必须加以滤除。

一般的信号处理中,最常用的四种滤波器就是图 1 所示的低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器和带阻滤波器,它们分别用在不同场合。

但是从图 1 还看到,上述四种滤波器的复频特性中,存在对信号处理产生影响的阻带波纹或吉布斯现象。为了克服这种现象,本文提出了基于小波变换的组合滤波器,即:小波低通滤波器、小波高通滤波器、小波带通滤波器和小波带阻滤波器。小波组合滤波器在某种程度上大大减弱了原滤波器阻带上的波纹,同时保持了通带上的平稳特性,这对数字信号处理是很有用的。

图 2 表示出了小波低通滤波器的频率特性。为了便于比较,在图 2 中,图 2(a)为典型的低通滤波器频率特性;图 2(b)、图 2(c) 和图 2(d)分别为不同尺度上的小波组合低通滤波器。

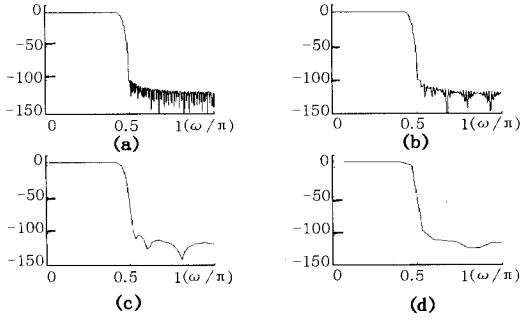

图 2　小波低通滤波器的复频特性

Fig. 2　Frequency characteristics of low - pass filter based on wavelet transforms

基于小波变换的组合滤波器的设计原理可用图 3 说明。

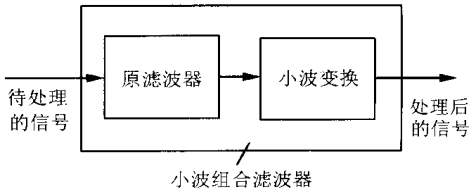

图 3　小波组合滤波器

Fig. 3　Combined filter based on wavelet transforms

图 4 表示出了小波带通滤波器的冲击响应和频率特性。图 4 用的小波是 daubechies 小波。为了便于比较,图 4(a2)为典型的带通滤波器冲击响应和频率特性;图 4(b2)为加窗的带通滤波器冲击响应和频率特性,这里所加的窗为 blackman 窗;图 4 (c2)则为基于小波变换的组合带通滤波器冲击响应和频率特性。从图 2 和图 4 可以看出,小波组合低通滤波器在削弱滤波器频率特性的波纹方面具有独特的作用,同时保持了通带上的通频能力。

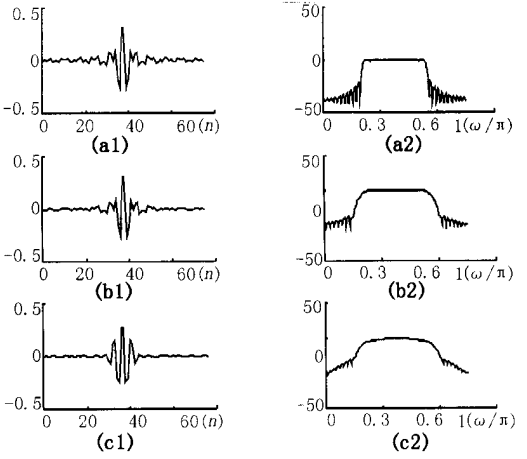

图 4　小波组合带通滤波器

Fig. 4　Combined band-pass filter based on wavelet transforms

4　实例分析

下面应用本文提出的基于小波变换的组合滤波器方法,对电力系统常用的信号进行分析。

设电力系统中某一正弦信号 $s(t)$ 含有 5、7 次谐波,即为:

$$s(t)=2\sin\omega t+0.5\sin 5\omega t+0.2\sin 7\omega t \qquad (5)$$

显然,信号 $s(t)$ 是由信号 $\sin\omega t$,5 次谐波分量 $\sin 5\omega t$ 和 7 次谐波分量 $\sin 7\omega t$ 组合而成。这里 $\omega=2\pi f$,其中 f 为基波频率 50 Hz。

对上述的信号 $s(t)$ 进行滤波,以提取正弦分

量。得到的结果如图 5 所示。

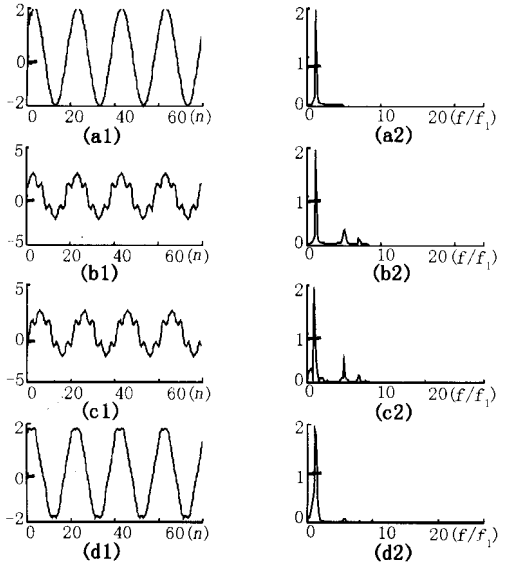

图 5 对信号 $s(t)$ 进行的滤波结果

Fig. 5 Results after signal $s(t)$ traversed filter

设存在理想滤波器。对 $s(t)$ 滤波后,提取到了信号 $2\sin \omega t$,其图形如图 5(a1)中,图 5(a2)为其 Fourier 变换的幅值特性。

图 5(b1)为原信号 $s(t)$ 的图形,图 5(b2)为对信号 $s(t)$ 进行 Fourier 变换后的幅值特性。显然,信号 $s(t)$ 有三个频率分量:1 次、5 次和 7 次频率分量。

图 5(c1)为对信号 $s(t)$ 进行一般滤波的结果,显然,对信号 $s(t)$ 只是进行简单的滤波,其效果并不理想。图 5(c2)是图 5(c1)的 Fourier 变换后的幅值特性。

图 5(d1)为对信号 $s(t)$ 进行基于小波变换的组合滤波的结果,图 5(d2)是图 5(d1)的 Fourier 变换后的幅值特性。显然,基于小波变换的组合滤波器,能有效地提取信号 $s(t)$ 的基频分量,抑制其它谐波分量。

5 结论

本文提出的基于二进小波变换的组合滤波器,既充分利用了小波变换的优点,又克服了某些传统滤波器的缺点,因而在电力系统信号处理中,是一种行之有效的方法。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的意义。

参考文献:

[1] 杨奇逊. 微型机继电保护基础[M]. 水利电力出版社, 1991.

[2] 陈德树. 计算机继电保护原理与技术[M]. 水利电力出版社,1995.

[3] 王维俭. 电力系统继电保护基本原理[M]. 清华大学出版社,1991.

[4] (美)催锦泰著,程正兴译. 小波分析导论[M]. 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[M]. 北京:电力工业出版社,1997.

收稿日期: 2003-03-26; **修回日期**:2003 - 05 - 14

作者简介:

张新勇(1971 -),男,硕士生,工程师,主要从事电力系统配网自动化、规划和电力系统可靠性等工作;

黄群古(1960 -),男,博士,工程师,主要从事电力系统故障检测与诊断、故障信号分析与处理和微机保护等工作;

任 震(1938 -),男,教授,博士生导师,主要研究方向为小波理论及其在电力系统中的应用,电力市场,电力系统可靠性,高压直流输电,谐波分析等。

Combined digital filters of microcomputer protection based on wavelet transforms

ZHANG Xin-yong[1], HUANG Qun-gu[2], REN Zhen[1]

(1. Electrical Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. Zhongshan Power Supply Bureau, Zhongshan 528400, China)

Abstract: Digital filters and algorithms are the foundations to distinguish failure and choose fault phase in microcomputer protection in power systems. In this paper, digital filters, which are presented based on wavelet transforms, not only make full use of the merits of wavelet transforms but also get rid of some traditional filters' disadvantages, thus they are very effective in microcomputer protection in power systems. The methods weaken some traditional filters' disturbing parts while retaining their effectual ones. It is of importance to improve reliability level of microcomputer protection in power systems.

Key words: wavelet transforms; microcomputer protection; power systems; combined digital filters