

一种新型的单瓣数字滤波器与傅立叶滤波器的比较研究

吕艳萍, 黄景光

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 对传统的傅立叶滤波器与一种新型的单瓣滤波器进行了比较研究。与傅立叶滤波器相比, 单瓣滤波器具有无旁瓣, 且数据窗不必限制为一个基频周期的整数倍的特点, 当窗长大于或等于基频周期的两倍时, 其滤波精度高于傅氏滤波器, 该滤波器适用于高精度的电气测量和故障定位。

关键词: 单瓣滤波器; 数据窗; 频率特性

中图分类号: TM714

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2001)04-0006-04

1 引言

今天的电力系统, 由于大量非线性元件的采用, 产生了较严重的谐波污染。发生短路故障时, 暂态过程引起的非周期指数分量和衰减的高频分量也会使电流、电压波形产生严重畸变。为了实现保护、控制、测量和监视的功能, 必须对输入装置的电流、电压信号进行处理, 提取其中的某些频率分量, 在数字式自动装置中这一工作是由数字滤波器来完成的。用于不同目的的数字滤波器具有不同的性能要求, 例如: 继电保护装置通常要求在大约一个基频周期的时间内提取基波分量, 即在满足一定精度的前提下, 还应满足速动性的要求; 而用于故障测距时, 提高测量精度是首要的。近30多年来, 已研究出许多用于电力系统继电保护数字滤波的算法, 其中以一周矩形窗傅立叶滤波算法使用最为广泛。

2 傅立叶滤波器

传统的傅立叶滤波器是把正弦波和余弦波限制在一作用时间为 T (基频周期) 的矩形窗内获得的, 其窗函数定义为:

$$p(t) = \begin{cases} 1 & -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \\ 0 & t \text{ 为其它值} \end{cases} \quad (1)$$

这种滤波器的冲激响应为:

$$h_c(t) = P(t) \cos(2 f_0 t) \quad (2)$$

$$h_s(t) = jP(t) \sin(2 f_0 t) \quad (3)$$

式中 $f_0 (f_0 = 1/T)$ 是基频, 对式(1)、(2)、(3)分别求傅氏变换, 可得它们的频率特性如下:

$$P(f) = T \frac{\sin(\frac{Tf}{2})}{\frac{Tf}{2}} \quad (4)$$

$$H_c(f) =$$

$$\frac{1}{2} \left\{ T \frac{\sin[\frac{T(f-f_0)}{2}]}{T(f-f_0)} + T \frac{\sin[\frac{T(f+f_0)}{2}]}{T(f+f_0)} \right\} \\ = \frac{1}{2} [P(f-f_0) + P(f+f_0)] \quad (5)$$

$$H_s(f) = \frac{1}{2} \left\{ T \frac{\sin[\frac{T(f-f_0)}{2}]}{T(f-f_0)} - T \frac{\sin[\frac{T(f+f_0)}{2}]}{T(f+f_0)} \right\} \\ = \frac{1}{2} [P(f-f_0) - P(f+f_0)] \quad (6)$$

这里 $H_c(f)$ 和 $H_s(f)$ 是矩形窗的傅氏变换分别与余弦波和正弦波的傅氏变换的卷积。矩形窗的幅频特性如图1所示 ($P(f)$ 以最大增益为基准)。

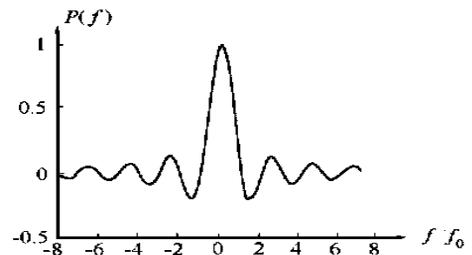


图1 矩形窗的幅频特性

傅立叶滤波器就是将正弦、余弦滤波器合成而得, 其冲激响应为:

$$h_F(t) = h_c(t) + h_s(t) =$$

$$P(t) [\cos(2 f_0 t) + j \sin(2 f_0 t)]$$

对应的傅氏变换为:

$$H_F(f) = H_c(f) + H_s(f) = P(f - f_0)$$

与式(4)相比较可看出, 其幅频特性可将图1中的 $P(f)$ 右移 f_0 获得, 如图2所示。

观察图2可知, 当取数据窗长等于基波周期 T 时, 滤波器的增益在倍频处均为零, 能很好地消除整次谐波, 但在非整次谐波段中有频率泄漏, 这是由于矩形窗的旁瓣引起的。这时主瓣的宽度是旁瓣的两倍, 旁瓣的宽度为 f_0 。我们知道频域中波瓣的宽度

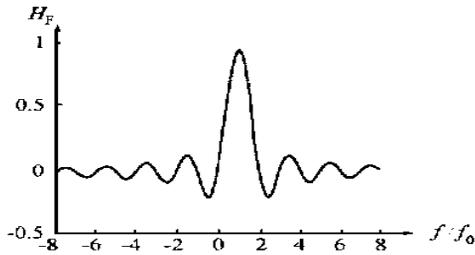


图2 傅立叶滤波器的幅频特性

与时域中数据窗的长度成反比,若数据窗的长度为 m 个基频周期 (m 为正整数),则旁瓣的宽度就是 f_0/m ,即在一个谐波间隔里有 m 个旁瓣;当数据窗长度短于一个基频周期时,主瓣和旁瓣的宽度就会分别大于 $2f_0$ 和 f_0 ,即在整次谐波处的增益不为零,从而不能滤除整次谐波;而当数据窗大于一周但不等于基波周期的整数倍时,增益过零点也不在整次谐波处,也不能滤除整次谐波。因此采用傅立叶滤波器滤除整次谐波的必要条件是:数据窗长必须是基波周期的整数倍。

数字式傅立叶滤波器的冲激响应是对式(2)和式(3)采样的结果:

$$h_c(k) = h_c(kT_s); \quad h_s(k) = h_s(kT_s)$$

式中 T_s 为采样周期。对连续函数 $h_F(t)$ 采样所得的序列 $h_F(k)$ 的傅立叶变换为:

$$H_F(e^{jT_s}) = f_s \sum_{n=-\infty}^{+\infty} H_F(f - nf_s)$$

这里 $H_F(f)$ 是 $h_F(t)$ 的傅氏变换, f_s ($f_s = 1/T_s$) 为采样频率, $H_F(e^{jT_s})$ 是把幅值为 $f_s H_F(f)$ 的波形复制,并以 f_s 为周期放置叠加而成的周期延拓函数。

3 新型的单瓣滤波器

为了改善传统的傅立叶滤波器的性能,尤其是消除其旁瓣中非整次谐波的泄漏,提出了一种新的滤波器,其思路为:首先提出滤波器理想频率特性的数学模型,求出对应的冲激响应,然后讨论数据窗的特性及其长度对滤波器性能的影响。

新型的滤波器的频率特性为:

$$H(f) = \begin{cases} \sin^2(\frac{f}{2f_0}) & 0 \leq f/f_0 \leq 2 \\ 0 & f/f_0 \text{ 为其它} \end{cases}$$

其波形如图3所示,显而易见,与一些经典的滤波器相比,该滤波器没有旁瓣,这就是该新型滤波器——单瓣滤波器名字的由来。它的冲激响应 $h(t)$ 应为 $H(f)$ 的傅立叶反变换:即

$$h(t) = \int_0^{2f_0} \sin^2(\frac{f}{2f_0}) e^{j(2ft)} df = \int_0^{2f_0} \sin^2(\frac{f}{2f_0}) \cdot [\cos(2ft) + j\sin(2ft)] df$$

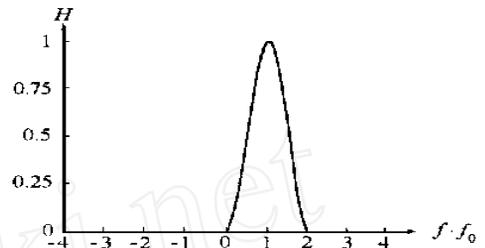


图3 单瓣滤波器的频率特性

冲激响应的实部:

$$h_R(t) = \int_0^{2f_0} \sin^2(\frac{f}{2f_0}) \cdot \cos(2ft) df = f_0 \left[\frac{\sin(2f_0 t)}{2f_0 t} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\sin(2f_0 t +)}{2f_0 t +} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\sin(2f_0 t -)}{2f_0 t -} \right] \cos(2f_0 t) \quad (7)$$

冲激响应的虚部:

$$h_I(t) = j \int_0^{2f_0} \sin^2(\frac{f}{2f_0}) \cdot \sin(2ft) df = j f_0 \left[\sin \left(\frac{2f_0 t}{2f_0 t} + \frac{1}{2} \frac{\sin(2f_0 t +)}{2f_0 t +} + \frac{1}{2} \frac{\sin(2f_0 t -)}{2f_0 t -} \right) \right] \sin(2f_0 t) \quad (8)$$

$$\text{令: } w(t) = f_0 \left[\frac{\sin(2f_0 t)}{2f_0 t} + \frac{1}{2} \frac{\sin(2f_0 t +)}{2f_0 t +} + \frac{1}{2} \frac{\sin(2f_0 t -)}{2f_0 t -} \right] \quad (9)$$

则式(7)、(8)可写成

$$h_R(t) = w(t) \cos(2f_0 t) \quad (10)$$

$$h_I(t) = jw(t) \sin(2f_0 t) \quad (11)$$

与式(2)、(3)比较,可看出这种单瓣滤波器就是对余弦和正弦函数加了一个由式(9)表达的新的数据窗而获得的。图4就是这一窗函数标准化后的图形, $w(t)$ 在 $t = T, 1.5T, 2T, 2.5T$ 等处过零,并在 $t = T$

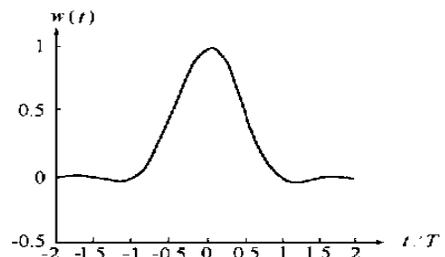


图4 单瓣滤波器的窗函数

之后的增益都很小,因此实际使用时,可将数据窗取为 $2T$,这样做并不破坏其主要的频率特性。

图5是这一数据窗标准化后的频谱 $W(f)$,显然这个数据窗也没有旁瓣,与矩形窗、图基窗、汉宁窗等传统窗函数的频谱相比,这一特性显得尤为可贵,它不仅能够滤除整次谐波,还能滤除各分次谐波。

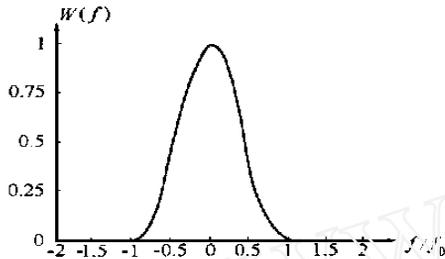


图5 单瓣窗的频率特性

$h_R(t)$ 和 $h_I(t)$ 的傅氏变换分别对应于式(5)和(6)中 $h_c(t)$ 和 $h_s(t)$ 的傅氏变换,将其中的 $P(f)$ 改为 $W(f)$ 就可得到 $H_R(f)$ 和 $H_I(f)$:

$$H_R(f) = \frac{1}{2} [W(f - f_0) + W(f + f_0)] \quad (12)$$

$$H_I(f) = \frac{1}{2} [W(f - f_0) - W(f + f_0)] \quad (13)$$

图6、图7为两周数据窗时的 $H_R(f)$ 和 $H_I(f)$ 的图形。

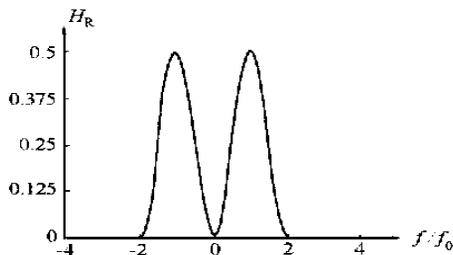


图6 $h_R(t)$ 的幅频特性

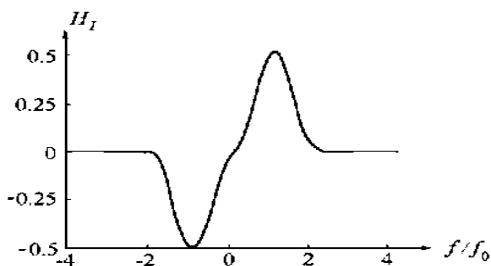


图7 $h_I(t)$ 的幅频特性

由式(12)、(13)得知,它们是将 $\frac{1}{2}W(f)$ 复制在 $f = \pm f_0$ 处分别求和所得,可见它们也都没有旁瓣,这样即使单独使用 $w(t)\cos(2f_0t)$ 或 $w(t)\sin(2f_0t)$ 作为滤波器,其数据窗都不必再以基波周期的整数倍作为滤除整次谐波的条件了。

数字式单瓣滤波器得自对式(10)、(11)的采样:

$$h_R(k) = h_R(kT_s) = w(kT_s) \cos(2f_0kT_s)$$

$$h_I(k) = h_I(kT_s) = w(kT_s) \sin(2f_0kT_s)$$

这两个序列的傅立叶变换是将图6、图7以 f_s 为周期无限延拓叠加而成(只是幅值上相差一个 f_s),由于特性没有旁瓣,可将 f_s 取得较小,复制波形拉得很近,也不会产生频率混叠现象,这是传统滤波器做不到的。

上述的研究都是在数据窗长取为 $2T$ 的条件下进行的,下面讨论数据窗长的改变对频率特性的影响。

(1)当取数据窗长为一周时,所得单瓣滤波器的频率特性如图8所示,显然,数据窗的缩短使得波瓣变宽,这时的主瓣宽度为 $4f_0$,虽然没有旁瓣,但在 $f = 0$ 和 $f = 2f_0$ 处,增益都不为零,会产生直流分量和二次谐波的泄漏。也就是说,一周窗单瓣滤波器不能象一周窗傅立叶滤波器那样滤除直流和二次谐波,这是它的一个缺陷。

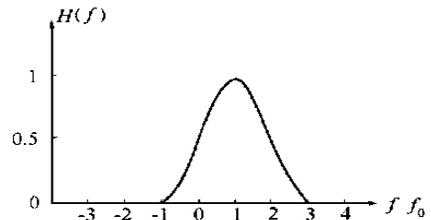


图8 一周窗单瓣滤波器幅频特性

(2)加宽数据窗可使波瓣变窄,提高矢量估算的精度。图9所示为数据窗长为 $4T$ 的幅频特性,这时的主瓣变得更陡峭,且基本上仍以基频为中心,因此具有更好的滤除非基频分量的能力。传统的滤波器虽然随着数据窗的加长,主瓣也会变窄,但旁瓣的影响仍不容忽视。

(3)由于新的滤波器没有旁瓣,其数据窗长也就不必再以基波周期的整数倍作为条件了。实验证明,只要窗长大于或等于 $2T$,即使不是基波周期的整数倍,单瓣滤波器仍能保持无旁瓣的优势。这样,

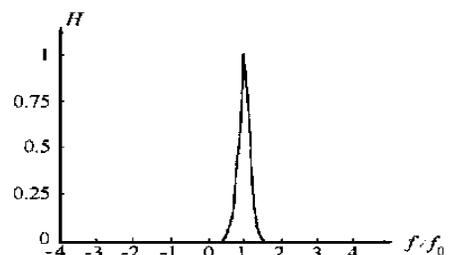


图9 四周窗单瓣滤波器幅频特性

我们就可把窗长调整到覆盖整个可用的信号信息,即单瓣滤波器的窗长可等于故障持续时间(不一定是 T 的整数倍),从而进一步提高计算精度。

4 结论

(1) 当窗长是一个基波周期时,传统的傅立叶滤波器性能比单瓣滤波器优越,而当窗长等于或大于 2 倍的基波周期时,即使窗长不是 T 的整数倍,单瓣滤波器则拥有不可替代的优势。

(2) 单瓣滤波器消除了旁瓣,具有很好地滤除整次和非整次高次谐波的能力,且当数据窗加长时,主瓣变窄,选择性更好。但由于最小窗长度 ($2T$) 的限制,用于继电保护装置时,不能满足速动性的要求,因此该滤波器不适合用于保护功能。但数字保护继电器和故障录波器还有进行测量和故障定位的任务,这时更注重的是精度而不是速度,将窗长延长到整个故障持续时间 ($2 \sim 5$ 个周期),既能发挥单瓣滤波器杰出的滤波特性,又能充分利用故障时的全部信息,从而进一步提高估算精度。因此,单瓣滤波器

适用于面向测量和故障定位的信号参数计算。可在微机保护中设计两套滤波程序,分别采用传统滤波器和单瓣滤波器,前者用于保护,后者用于测量和故障定位。

参考文献:

- [1] Schweitzer E Q and Daqing Hou. Filtering for Protective Relays. 19th Annual Western Protective Relay Conference. Spokane, Washington, October 1992.
- [2] Jose A de la o, Hector J Altuve and Ismael Diaz. A New Digital Filter for Phasor Computation (Part 1). IEEE Transaction On Power Systems, 1998, 13(3).
- [3] 杨奇逊. 微型机继电保护基础. 北京:中国电力出版社, 1988.
- [4] 曾禹村,等. 信号与系统. 北京:北京理工大学出版社, 1992.

收稿日期: 2000-12-26

作者简介: 吕艳萍(1955-),女,副教授,主要研究方向为电力系统微机保护和变电站综合自动化; 黄景光(1967-),男,讲师,硕士研究生,主要研究微机保护算法。

A comparative research for a new single-lobe digital filter and the Fourier filter

LU Yarping, HUANG Jingguang

(Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: This paper focuses on the comparative research for a new single-lobe digital filter and the Fourier filter. Contrasting to the Fourier filter, the single-lobe filter has not side lobe, and its data window length is not restricted to multiples of one cycle. When the window length is greater than or equal to 2 cycles of the fundamental frequency, the single-lobe filter is more accurate than Fourier filter. It is suitable for precise measuring and the fault location.

Key words: single-lobe filter; data window; frequency characteristic

三大继电器厂家联手合作,最新推出工具书 《继电器检验调试手册》

为满足广大继电保护技术人员现场需要,以现场检验为依据,中国电器工业协会继电器及其装置分会和机械工业继电器及装置科技情报网组织十几位专家,编写了《继电器检验调试手册》一书。该手册收录了最新生产的二十类共 250 余种继电器产品,共 100 多万字,基本上覆盖了电力行业常用的继电器种类。

该手册具有以下特点:

1. 作者队伍力量强。该手册的编写得到了许昌电气股份有限公司、阿城继电器股份有限公司、上海继电器有限公司的大力支持,他们抽调了具有丰富经验的专家编写该书,力求简炼和实用,使手册具有较强的权威性。
2. 内容新。在继电器产品的选择上,选取了截至 1999 年的最新产品,淘汰了停产的产品,使手册具有较强实用性。
3. 结构合理。该手册对每一种继电器,均按用途、原理简介、检验项目及要求、检验、调试方法四方面进行介绍,并将一般性检查作为检验通则放在手册最前面,以便读者查阅。
4. 采用最新国标。为与国际接轨,贯彻国标,手册采用了最新的图形符号和文字符号,读者可直接引用。另外,在文前还列出了手册中使用的文字符号说明,便于读者使用。

权威的作者、全新的内容、翔实的介绍,使该手册成为继电器调试检验方面的必备工具书,可供电力系统继电保护现场运行、检修、调试技术人员使用,也可供相关专业的技术人员参考。

该手册现已出版,定价 98 元。有意购买者,可与中国电力出版社在各地的发行站联系,也可与北京全华电力书店联系。

地址:100044 北京西城区三里河路 6 号中国电力出版社北京全华电力书店 电话:(010) 68358031 - 367,326

联系人:何向明 冯永章 也可与中国电力出版社张涛联系。电话:(010) 63416429 (张涛)