

序分量滤波器的频率特性 及滤序滤波结合算法

FREQUENCY RESPONSES OF SEQUENCE COMPONENT
FILTER AND ALGORITHM OF DIGITAL FILTERS

熊小伏 叶一麟
Xiong Xiaofu Ye Yilin
(电气工程系)

摘要 在电力系统数字保护中,用基波序分量来构成的保护方案已很多。本文分析了三种滤序算法的频率响特性,在此基础上提出了根据滤序频响特性设计数字滤波器的思想,并导出了三种滤波算法,可使滤序滤波算法在总体上计算量小、响应速度快、精度高。文中分析还表明,响应时间为 $1/3T$ 和 $1/6T$ 的滤序算法,在滤序滤波总体响应速度上可做到相近。

关键词 频率响应;序量保护;滤波理论

中国图书资料分类法分类号 TM 771

ABSTRACT Power frequency sequence components have been much used in the digital relay of power system. In this paper, the frequency responses of three algorithms of filtering sequence component have been analysed. On these basis, the paper provides an idea to design the digital filter and two algorithms of digital filter have been developed, which have the advantages of fast response, high accuracy and less calculation amount. It has been pointed out that the responses of the filtering sequence component algorithms of $1/3T$ and $1/6T$ with the developed digital filter are very similar.

KEY WORDS frequency response; phase sequence protection; filtering theory

0 引 言

在电力系统继电保护中,应用对称分量变换提取出正序、负序或零序分量电流、电压来构成保护,具有很多优越的性能。利用负序和零序分量构成的许多保护已为人们所熟悉,近年来利用正序分量的保护也显示出较好的前景[1],[2]。为了获得各序基波分量,在数字保护中多采用数字滤序和数字滤波。如果先进行数字滤波后进行数字滤序,建立在工频基础上的数字滤序器可得出正确的序分量。然而,为了避免对三相信号进行滤波计算,可采用先滤序后滤波的方法来减小计算量。此时滤序器的输入是包含多种频率成分的信号,我们有必要了解该信号经过数字滤序器后有何改变;另一方面,为了快速地提取出基波分量,过去的研究中对如何缩短数字滤波器的响应时间做出了努力[2,3],使其由 $\frac{2}{3}T$ 缩短到了 $\frac{1}{6}T$,滤序滤波总体响应时间

* 收文日期 1989-12-25

本课题由重庆大学青年基金资助

缩短到了23.33ms左右。在过去的研究中,也曾有滤序滤波结合在一起求取基波序分量实部虚部的算法[5,6],这些算法是基于对滤序因子 a 进行某种处理后实现的,有较快的响应和较好的精度。但它们不适于利用基波分量瞬时值的场合,且计算量也较大。

事实上,通过对滤序器频率特性的分析表明,某些滤序器本身已具有一定的滤波能力,数字滤波器的设计可充分利用这个特点来简化设计,使滤序滤波的总体响应时间最短,同时计算量较小,且具有较高精度。本文根据这个思想选择的数字滤波算法,可使总体响应时间小于一个周波,取得了较好的效果。

1 滤序算法的频率响应特性

对称分量变换的复平域表达式为

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_0 \\ \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_a \\ \dot{X}_b \\ \dot{X}_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

上式是针对某一频率(通常指工频)的三相输入信号而言的。故障后的输入信号中包含着多种频率成分,此时的滤序输出是否仍为所希望得到的序分量以及包含的频率成分有无变化,通过对频率响应特性的分析,即可了解。

1.1 三种滤序算法

(1)式的时域表达式为

$$\begin{cases} 3x_0(t) = x_a(t) + x_b(t) + x_c(t) \\ 3x_1(t) = x_a(t) + x_b(t - \frac{2}{3}T_1) + x_c(t - \frac{1}{3}T_1) \\ 3x_2(t) = x_a(t) + x_b(t - \frac{1}{3}T_1) + x_c(t - \frac{2}{3}T_1) \end{cases} \quad (2)$$

上面表达式中, T_1 为工频周期。若直接用上式计算,滤序暂态响应时间为 $\frac{2}{3}T_1$,这将使反应序分量的保护动作时间较长。对上式作一简单变换,可得下面计算式:

$$\begin{cases} 3x_0(t) = x_a(t) + x_b(t) + x_c(t) \\ 3x_1(t) = x_a(t) - x_b(t - \frac{1}{6}T_1) + x_c(t - \frac{1}{3}T_1) \\ 3x_2(t) = x_a(t) + x_b(t - \frac{1}{3}T_1) + x_c(t - \frac{1}{6}T_1) \end{cases} \quad (3)$$

上式中滤出正、负序的暂态响应时间为 $\frac{1}{3}T_1$ 。

文献[3]提出的响应时间更快的滤序算法为

$$\begin{cases} 3x_0(t) = x_a(t) + x_b(t) + x_c(t) \\ 3x_1(t) = x_a(t) - x_b(t - \frac{1}{6}T_1) - \frac{1}{\omega_1}x'_c(t - \frac{1}{12}T_1) \\ 3x_2(t) = x_a(t) - \frac{1}{\omega_1}x'_b(t - \frac{1}{12}T_1) - x_c(t - \frac{1}{6}T_1) \end{cases} \quad (4)$$

其滤波暂态响应时间为 $\frac{1}{6}T_1, \omega_1 = \frac{2\pi}{T_1}$ 。

设每周采样点数为 N , 将上面三式离散化可得数字滤波表达式如下:
对应(2)式有

$$\begin{cases} 3x_0(n) = x_a(n) + x_b(n) + x_c(n) \\ 3x_1(n) = x_a(n) + x_b(n - \frac{2}{3}N) + x_c(n - \frac{1}{3}N) \\ 3x_2(n) = x_a(n) - x_b(n - \frac{1}{3}N) + x_c(n - \frac{2}{3}N) \end{cases} \quad (5)$$

对应(3)式有:

$$\begin{cases} 3x_0(n) = x_a(n) + x_b(n) - x_c(n) \\ 3x_1(n) = x_a(n) - x_b(n - \frac{1}{6}N) + x_c(n - \frac{1}{3}N) \\ 3x_2(n) = x_a(n) + x_b(n - \frac{1}{3}N) - x_c(n - \frac{1}{6}N) \end{cases} \quad (6)$$

对应(4)式有:

$$\begin{cases} 3x_0(n) = x_a(n) - x_b(n) + x_c(n) \\ 3x_1(n) = x_a(n) - x_b(n - \frac{1}{6}N) - x_c(n) + x_c(n - \frac{1}{6}N) \\ 3x_2(n) = x_a(n) - x_b(n) + x_b(n - \frac{1}{6}N) - x_c(n - \frac{1}{6}N) \end{cases} \quad (7)$$

1.2 滤波算法的频率响应特性

序分量滤波器是一多输入单输出系统, 但对于某种序分量, 三个输入量之间有特定关系, 可转化为单输入与单输出的关系。

若以 a 相为基准, 则对于信号中某个频率为 ω 的正序分量, 有下述关系:

$$\begin{cases} x_b(t) = x_a(t - \frac{2\pi}{3\omega}) = x_a(t - \frac{1}{3}T) \\ x_c(t) = x_a(t - \frac{4\pi}{3\omega}) = x_a(t - \frac{2}{3}T) \end{cases} \quad (8)$$

对于负序分量则有

$$\begin{cases} x_u(t) = x_s(t - \frac{4\pi}{3\omega}) = x_u(t - \frac{2}{3}T) \\ x_v(t) = x_c(t - \frac{2\pi}{3\omega}) = x_s(t - \frac{1}{3}T) \end{cases} \quad (9)$$

对于零序分量则有

$$x_0(t) = x_c(t) = x_s(t) \quad (10)$$

由上式可见, $x_b(t)$ 、 $x_c(t)$ 都可化为以 $x_u(t)$ 表示的函数。因此分别考查滤波器对信号中不同序分量的频率响应, 即可知道该滤波器的频率响应特性。

以(2)式表示的正序滤波器为例, 在连续时域里:

i) 当加入频率为 ω 的正序分量时, 由(2)、(8)式可得

$$3x_{11}(t) = x_u(t) + x_c(t - \frac{2}{3}T_1 - \frac{1}{3}T) + x_a(t - \frac{1}{3}T_1 - \frac{2}{3}T) \quad (11)$$

对上式进行付里叶变换有:

$$3X_{11}(j\omega) = [1 + e^{-j\omega(\frac{2}{3}T_1 + \frac{1}{3}T)} + e^{-j\omega(\frac{1}{3}T_1 + \frac{2}{3}T)}]X_1(j\omega) \quad (12)$$

将 $T = \frac{2\pi}{\omega}$ 代入上式, 传递函数为

$$H_{11}(j\omega) = [1 + e^{-j\omega(\frac{2}{3}T_1 + \frac{1}{3}T)} + e^{-j\omega(\frac{1}{3}T_1 + \frac{2}{3}T)}]/3 \quad (13)$$

频率响应为:

$$\begin{cases} H_{1d}(\omega) = 1 + \cos(\frac{2}{3}T_1\omega + \frac{2\pi}{3}) + \cos(\frac{1}{3}T_1\omega + \frac{4\pi}{3}) \\ H_{1s}(\omega) = 1 + \sin(\frac{2}{3}T_1\omega + \frac{2\pi}{3}) + \sin(\frac{1}{3}T_1\omega + \frac{4\pi}{3}) \\ H_{1c}(\omega) = \frac{1}{3} \sqrt{H_{1d}^2(\omega) + H_{1s}^2(\omega)} \end{cases} \quad (14)$$

ii) 当加入负序分量时, 由(2)、(9)式可得

$$3x_{12}(t) = x_u(t) + x_s(t - \frac{2}{3}T_1 - \frac{2}{3}T) + x_v(t - \frac{1}{3}T_1 - \frac{1}{3}T) \quad (15)$$

求上式的付里叶变换,类似可得其频率响应为

$$\begin{cases} H_{2z}(\omega) = 1 + \cos(\frac{2}{3}T_1\omega + \frac{4\pi}{3}) + \cos(\frac{1}{3}T_1\omega + \frac{2\pi}{3}) \\ H_{2s}(\omega) = 1 + \sin(\frac{2}{3}T_1\omega + \frac{4\pi}{3}) + \sin(\frac{1}{3}T_1\omega + \frac{2\pi}{3}) \\ H_{12}(\omega) = \frac{1}{3} \sqrt{H_{2z}^2(\omega) + H_{2s}^2(\omega)} \end{cases} \quad (16)$$

iii)当加入零序分量时,由(2)、(10)式可得

$$3x_{10}(t) = x_0(t) + x_0(t - \frac{2}{3}T_1) + x_0(t - \frac{1}{3}T_1) \quad (17)$$

其频率响应为

$$\begin{cases} H_{0z}(\omega) = 1 + \cos \frac{2}{3}T_1\omega + \cos \frac{1}{3}T_1\omega \\ H_{0s}(\omega) = 1 + \sin \frac{2}{3}T_1\omega + \sin \frac{1}{3}T_1\omega \\ H_{10}(\omega) = \frac{1}{3} \sqrt{H_{0z}^2(\omega) + H_{0s}^2(\omega)} \end{cases} \quad (18)$$

类似地可推出负序、零序滤波器及另外二种滤序算法的频响表达式。图1~图3分别是

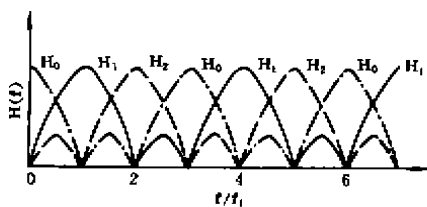


图1 2/3T正序滤波器频响特性

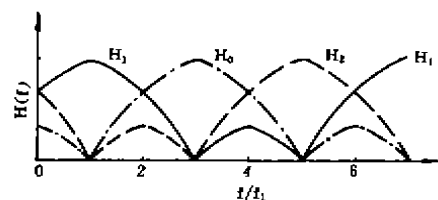


图2 1/3T正序滤波器频响特性

(2)、(3)、(4)式中的正序滤波器的频率响应曲线。对于负序滤波器,其频响特性曲线与图1、图2、图3所示形状完全一样,仅需将H1与H2的标号对调即可(图中未画出)。对于零序过滤器,很明显当输入任何频率的正序、负序分量时,其输出皆为零,当输入任何频率的零分量时,其输出为该零序分量。

上面的频响特性是在连续时间域上推出的,采用(5)~(7)式的离散算法后,在 $f_s/2$ 频率范围内可以证明它具有与前述相同的频率响应特性。

观察图1~图3的频率响应曲线,可见有如下特征:

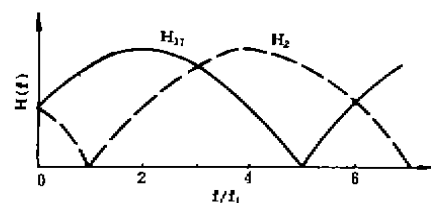


图3 1/6T正序滤波器频响特性

1) 对于正、负序滤波器, 当信号中不止包含有基波分量时, 则其输出可能不是纯的正序或负序分量。例如, 在前二种正序滤波器输出里, 都可能包含有五次谐波的负序分量。

2) 正、负序滤波器对某些频率分量有抑制作用, 即具有一定的滤波功能。例如, 图2表示出(3)式的快速滤波方法对三次谐波的正序和负序分量都有抑制作用, 同时对其它偶次谐波有一定的衰减作用。由于正、负序滤波器有这个特点, 这就为反应基波序分量的保护缩短数字滤波的数据窗提供了可能, 下面将讨论这个问题。

2 根据序分量滤波器频响特性设计数字滤波器

以(3)式表示的正序滤波器为例。

由图(2)知对于三次谐波的正序及负序分量其响应为零。因此如果输入信号中不含零序分量, 则相当于在三次谐波处已有一零点, 数字滤波器可不用考虑消除三次谐波; 此外, 对于某些偶次谐波, 如果信号中该谐波幅值很小, 数字滤波器也可不予考虑。

对于正、负序滤波器, 零序分量的剔除则较为容易。如果输入的是线电压或相电流之差, 则本身已不含零序分量; 如果输入的是相分量, 则可按下式予以剔除:

$$x_0(n) = (x_a(n) + x_b(n) + x_c(n))/3$$

则

$$\begin{cases} x_a'(n) = x_a(n) - x_0(n) \\ x_b'(n) = x_b(n) - x_0(n) \\ x_c'(n) = x_c(n) - x_0(n) \end{cases} \quad (19)$$

求得上述各量后, 即进行滤波(滤波计算)。

2.1 获取基波序分量幅值的数字滤波器设计

以提取正序基波分量为例。当用(3)式表示的 $\frac{1}{3}T$ 滤波算法, 取采样率为 $N=12$, 考虑到4次谐波幅值较小, 则仅需由数字滤波器滤掉直流、2次及5次谐波, 可采用文献[4]介绍的滤除指定频率分量的推广付氏滤波算法。

设信号有如下形式:

$$v = A_0 + \sum_{k=1}^{N/2} A_k \sin(i\omega k + \varphi_k) \quad (20)$$

利用采样矢量的概念, 基波和各次谐波均可用复平面上的离散旋转矢量表示, 矢量在纵轴上的投影就是相应的采样值。而直流分量可以用纵轴上的矢量表示。

对于一种算法

$$f = \sum_{k=1}^m \alpha_k v_k = \sum_{k=1}^m \alpha_k v_k^{(0)} + \dots + \sum_{k=1}^m \alpha_k v_k^{(i)} + \dots + \sum_{k=1}^m \alpha_k v_k^{(L)} \dots \quad (21)$$

只要使其中 $\sum_{k=1}^m \alpha_k v_k^{(i)} = 0$, 计算结果 f 中就不含 i 次谐波分量, 即可达到滤除该分量的目的。而

$a_1 \sim a_n$ 可预先算好来满足该条件。

在要求滤除 0、2、5 次谐波情况下, 建立一滤波矩阵求 $a_1 \sim a_n$:

$$\begin{bmatrix} \cos \frac{2\pi}{N} 2 \times 1 & \cos \frac{2\pi}{N} 2 \times 2 & \cdots & \cos \frac{2\pi}{N} 2 \times 6 \\ \sin \frac{2\pi}{N} 2 \times 1 & \sin \frac{2\pi}{N} 2 \times 2 & \cdots & \sin \frac{2\pi}{N} 2 \times 6 \\ \cos \frac{2\pi}{N} 5 \times 1 & \cos \frac{2\pi}{N} 5 \times 2 & \cdots & \cos \frac{2\pi}{N} 5 \times 6 \\ \sin \frac{2\pi}{N} 5 \times 1 & \sin \frac{2\pi}{N} 5 \times 2 & \cdots & \sin \frac{2\pi}{N} 5 \times 6 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{bmatrix} = [0] \quad (22)$$

由上式解得:

$$\begin{aligned} a_1 &= -1, & a_2 &= 0.268, & a_3 &= 0.464, \\ a_4 &= -0.464, & a_5 &= -0.268, & a_6 &= 1 \end{aligned}$$

由此可推出滤波表达式如下:

$$\begin{cases} B = -v_1 + 0.268(v_2 - v_3) + 0.464(v_4 - v_5) + v_6 \\ C = -v_2 + 0.268(v_4 - v_5) + 0.464(v_1 - v_3) + v_7 \end{cases} \quad (23)$$

实部: $v_r = K(-0.928B + 1.268C)$

虚部: $v_i = K(-0.339B + 0.928C)$

幅值: $A = |K| \sqrt{v_r^2 + v_i^2}$ (24)

上式中 $K = -\frac{1}{0.86}$ 。滤序和滤波结合在一起的频率特性如图 4 所示。在 $N = 12$ 的情况下, 滤序滤波数据窗长度共 11 点。

2.2 获取基波序分量瞬时值的数字滤波器

仍以 $\frac{1}{3}T$ 正序滤过器为例, 仅需在 $\omega = 0$ 和 2 次、5 次谐波处设置三对零点即可满足要求。对应的零点滤波器传递函数为 ($N = 12$)

$$H(z) = A[1 + (\sqrt{3} - 1)(z^{-1} + z^{-2} + z^{-4} - z^{-5} - z^{-6})] \quad (25)$$

由上式可得滤波器的输入输出关系式

$$\begin{aligned} f_1(n) &= A[f(n) - (\sqrt{3} - 1)(f(n-1) - f(n-2) \\ &\quad - f(n-4) - f(n-5) - f(n-6))] \end{aligned} \quad (26)$$

滤序和滤波相结合的频率响应如图 5 所示。它对正序基波分量有很好的响应, 而对其它频

率和其它序分量有很好的抑制作用。整个滤序滤波的数据窗长度也为11点。

观察图3所示的 $1/6T$ 滤序算法频率响应,可见滤序算法本身的滤波功能不及 $1/3T$ 滤序算法,如果要提取基波序分量,其数字滤波器的数据窗必然更长,因此从总体上来看二者在获取基波分量的速度上是基本相同的。

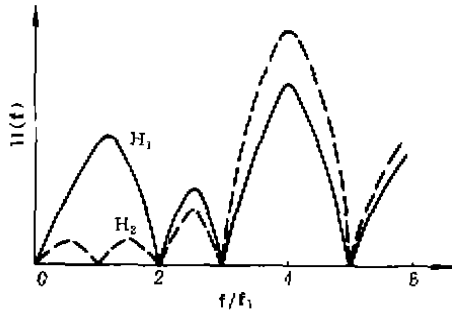


图4 T/3滤序滤波综合频响(求幅)

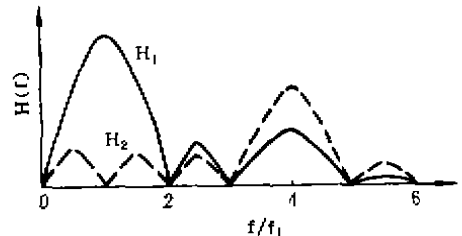


图5 T/3滤序滤波综合频响(求瞬时值)

3 基波序分量的提取仿真试验

为了验证前述分析,假设一组三相信号如下:

$$\begin{cases} f_a = f_{a1} + f_{a2} + f_{a0} + f_{a4} \\ f_b = f_{b1} + f_{b2} + f_{b0} + f_{b4} \\ f_c = f_{c1} + f_{c2} + f_{c0} + f_{c4} \end{cases}$$

上式中各序分量包含有除4次谐波外的其它频率分量,非周期衰减时间常数为0.08秒,三相起始值分别为1,0.5,0.25。所获结果如图5、图7所示。滤序、滤波效果很好,具有精度较

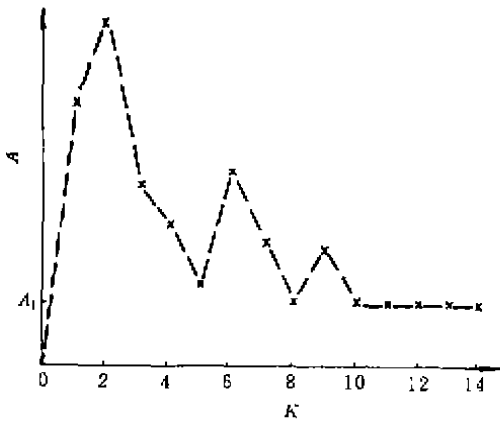


图6 滤取基波序分量幅值算例输出

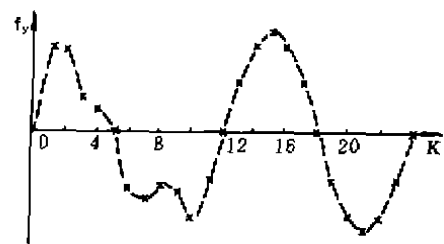


图7 滤取基波序分量瞬时值算例输出

高、响应速度快的特点。考虑最不利情况,在滤波输入迭加起始值与基波幅值相同的非周期分量,改变信号中非周期分量衰减时间常数 τ ,在系统机上的仿真误差情况如下表所示:

$\tau(\text{s})$	0.02	0.04	0.08	无非周期分量
滤取幅值	<9.2%	<7.3%	<4.7%	<0.19%
滤取瞬时值	<9.2%	<7.5%	<4.8%	<0.1%

由上表可见,所推导的二种滤波算法的精度与全周付氏算法相近,具有良好的滤波效果。

4. 结 论

为了快速简单地从故障后信号中提取出基波序分量,本文分析了三种滤序算法的频率响应特性,提出了综合利用滤序滤波频率响应的思想,可得如下几点结论:

1) 对于正、负序滤过器,当输入信号中不仅包含工频分量时,其输出不是纯的正序或负序分量;

2) $\frac{2}{3}T$ 滤序算法和 $\frac{1}{3}T$ 滤序算法对某些频率分量有抑制作用,即具有一定的滤波功能。在数字滤波器的设计中考虑到滤序算法的这一特点,可使数字滤波器的数据窗缩短,算法简化;

3) 采用 $\frac{1}{3}T$ 滤序算法和 $\frac{1}{6}T$ 滤序算法在获取基波序分量方面若利用上述思想,则具有基本相同的反应速度,而用 $\frac{1}{3}T$ 滤序算法和与之相配合的数字滤波算法可更简单。

参 考 文 献

- 1 王安定. 利用正序故障分量的方向元件. 西安交通大学硕士论文, 1984
- 2 熊小伏, 叶一麟, 龚志雄. 反映正序故障分量电流的微机光纤差动保护算法. 重庆大学学报, 1988, 11(1): 82~89
- 3 尹向根, 陈德树. 快速数字滤序方法初探. 全国高校电力系统自动化专业第二届学术年会. 武汉: 1986
- 4 杨晓建, 孙淑倍. 全周波付氏算法的推广. 全国高校电力系统自动化专业第二届学术年会. 武汉: 1986
- 5 Phadke A. G. A microcomputer based symmetric component distance relay. PICA, 1979
- 6 周大敏, 钟岷秀. 几种对称分量滤波算法的研究. 重庆大学学报, 1988, 11(4): 37~44