

# 故障测距中的差分傅氏滤波改进算法

黄飞腾, 陈明军, 郑慧

(浙江工业大学信息工程学院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 针对电力故障信号提出了差分傅氏滤波的改进算法, 用构造补偿角的思想, 解决了相角差值问题, 并提高了精度。Matlab 仿真实验比较了四种算法对仿真信号的滤波结果, 表明了该改进算法滤波计算量较少, 精度高, 滤除衰减直流分量和谐波分量的能力强; 追加实验表明了改进算法受非整数次谐波的影响较小。将各滤波算法应用于 Matlab 故障测距仿真系统, 验证了改进算法适用于各种故障类型信号的滤波, 计算量较少并能提高测距精度。

**关键词:** 傅氏滤波; 差分; 故障测距

## Improved difference FFT algorithms for fault location

HUANG Fei-teng, CHEN Ming-jun, ZHENG Hui

(Information Engineering College, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** For the power failure signal, this paper proposes an improved difference FFT algorithm with the idea of setting compensation angle to solve the problem of phase margin and increase accuracy. Compared the filtering results of four algorithms to the simulation signal, MATLAB simulation shows that this filtering algorithm is of less calculation, high precision, good at filtering decaying DC component and harmonic component. Additional experiment shows that the non-integral harmonic less affects this algorithm. Applied the filter algorithms to MATLAB fault location simulation system, it is verified the improved algorithm is appropriate for various types of signal failures of filtering with less calculation and the higher accuracy of location.

**Key words:** FFT; difference; fault location

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)11-0062-04

## 0 引言

电力输电线路故障时, 电压、电流信号除了正弦信号还叠加了衰减的直流分量和各次谐波。对电力故障信号的滤波, 直接影响到故障测距<sup>[1]</sup>的精度和速度。

滤波算法种类较多, 常用的有全周傅氏算法<sup>[2]</sup>、三数据窗改进傅氏算法<sup>[3]</sup>和差分傅氏算法<sup>[4]</sup>。滤波算法的主要指标是精度和速度。全周傅氏算法是电力系统中最常用的算法, 它对周期性信号有很好的滤波效果, 但较难滤除非周期分量。三数据窗改进傅氏算法是用连续三个数据窗的傅氏变换来消去中间变量, 求出第一个数据窗中衰减直流分量引入的误差。它虽然有较高的精度, 但数据窗的增加及中间变量消元, 使运算量也比较大。差分傅氏算法能够完全消除恒定分量, 并在一定程度上抑制输入信号中的衰减分量。差分傅氏算法的缺点是增强了傅氏算法对高次谐波响应, 对实际故障信号的滤波精度有待提高。

为了更好地滤除电力故障信号中衰减直流分量和各次谐波引起的误差, 提出了差分傅氏改进算法, 能更精确地求出基波的相角和幅值。

## 1 差分傅氏算法原理

差分傅氏算法是先对信号进行一次减法滤波, 用采样值之差 $x(n+1) - x(n)$ 代替傅氏变换中的 $x(n)$ 。进行傅氏计算出系数:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T [x(t + \Delta t) - x(t)] \sin(n\omega t) dt \quad (1)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T [x(t + \Delta t) - x(t)] \cos(n\omega t) dt \quad (2)$$

进而求出第  $n$  次谐波的相角和有效值:

$$\varphi = \arctan(b_n / a_n) \quad (3)$$

$$X = \sqrt{(a_n^2 + b_n^2) / 2} \quad (4)$$

差分傅氏算法的计算简单, 能够完全消除直流分量, 并在一定程度上抑制输入信号中的非周期分量。差分傅氏算法的缺点是增强了傅氏算法对高次谐波的响应, 并使傅氏算法的幅频特性变坏, 还存

在相角在一定范围出现差值  $\pi$  等问题。

另外一种差分傅氏算法的计算公式为  $y(n) = x(k+1) - hx(k)$ , 式中  $h$  为常数。如果时间常数为某定值  $\tau_0$ , 则令  $h = \exp(-\Delta t/\tau_0)$ , 可以较好地滤除衰减直流分量的影响。但缺点是故障时时间常数是无法预知的随机数, 难以确定, 且计算量相对有所增加。

## 2 差分傅氏滤波改进算法

经过一阶差分后的数据, 直接用傅氏滤波求出的相角和幅值误差较大, 对此提出改进算法。算法流程图如图 1。

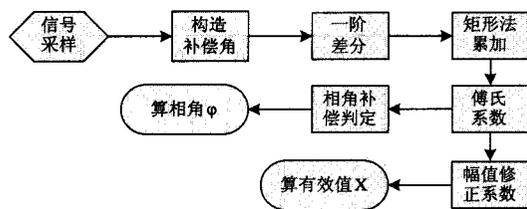


图 1 算法流程

Fig.1 Flow chart of algorithm

首先构造输入信号为:

$x(t) = \sqrt{2}X\sin(\omega t + \varphi - \Delta\theta)$ 。即设定相角为  $\varphi - \Delta\theta$ 。其中构造补偿角  $\Delta\theta = \omega\Delta T/2 = \pi/N$ , 表示相邻采样点相角差的一半,  $X$  为有效值。

对构造了补偿角的信号一阶差分, 下列各式中谐波次数  $n$  取 1 作为基波, 得

$$x'(t) = \sqrt{2}X[\sin(\omega t + \varphi + \Delta\theta) - \sin(\omega t + \varphi - \Delta\theta)] \quad (5)$$

化简得:

$$x'(t) = 2\sqrt{2}X\sin(\Delta\theta)\cos(\omega t + \varphi) \quad (6)$$

然后代入傅氏算法, 则傅氏系数  $a_n$  和  $b_n$  为:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x'(t)\sin(n\omega t)dt \quad (7)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x'(t)\cos(n\omega t)dt \quad (8)$$

并用三角函数转换求出积分:

$$a_1 = 2\sqrt{2}X\sin(\Delta\theta) \frac{2}{T} \int_0^T \cos(\omega t + \varphi)\sin(\omega t)dt = -2\sqrt{2}X\sin(\Delta\theta)\sin(\varphi) \quad (9)$$

$$b_1 = 2\sqrt{2}X\sin(\Delta\theta) \frac{2}{T} \int_0^T \cos(\omega t + \varphi)\cos(\omega t)dt = 2\sqrt{2}X\sin(\Delta\theta)\cos(\varphi) \quad (10)$$

将 (9) (10) 两式相除, 此时:

$$\tan(\varphi) = \sin(\varphi)/\cos(\varphi) = -a_1/b_1 \quad (11)$$

那么输入信号的基波相角:

$$\varphi - \Delta\theta = \frac{\pi}{2} - [\pi - \arctan(b_1/a_1)] - \Delta\theta = \arctan(b_1/a_1) - \left(\frac{\pi}{2} + \Delta\theta\right) \quad (12)$$

考虑反正切函数的取值范围, 作以下判定:

当  $a_1 > 0$ ;  $\varphi - \Delta\theta$  直接作为相角值;

当  $a_1 < 0$ ;  $\varphi - \Delta\theta + \pi$  补偿;

当  $a_1 = 0, b_1 > 0$ ;  $\arctan(b_1/a_1) = \pi/2$ ;

当  $a_1 = 0, b_1 < 0$ ;  $\arctan(b_1/a_1) = 3\pi/2$ 。

根据以上四点判定和式 (12) 可以求出修正后的输入信号相角。

将式 (9)、(10) 左右端平方求和, 化简得到

$$\frac{a_1^2 + b_1^2}{\sin^2(\Delta\theta)} = 8X^2[\sin^2(\varphi) + \cos^2(\varphi)] = 8X^2 \quad (13)$$

从而求得基波有效值

$$X = \sqrt{[a_1/2\sqrt{2}\sin(\Delta\theta)]^2 + [b_1/2\sqrt{2}\sin(\Delta\theta)]^2} \quad (14)$$

即对系数  $a_1$  和  $b_1$  进行除以幅值修正系数  $2\sqrt{2}\sin(\Delta\theta)$ , 再求有效值  $X$ 。

以上推导过程可以推广到各次谐波  $n$ , 然后求出各次谐波的有效值和相角。

该算法的实现, 采用矩形法累加编程求出:

$$a_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (x_{k+1} - x_k)\sin(2kn\pi/N) \quad (15)$$

$$b_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (x_{k+1} - x_k)\cos(2kn\pi/N) \quad (16)$$

再根据式 (12) 和四点判定求出相角, 根据式 (14) 求出有效值。

## 3 滤波算法的仿真

通过 Matlab 仿真对各滤波算法的误差进行分析。先构造仿真信号:

$$x(t) = A\sqrt{2}\sin(\omega t + \varphi_1) + 4\sqrt{2}\sin(2\omega t + \varphi_2) + 3\sqrt{2}\sin(3\omega t + \varphi_3) + 2\sqrt{2}\sin(5\omega t + \varphi_4) + 2\sqrt{2}\sin(7\omega t + \varphi_5) + 15\sqrt{2}e^{-t/\tau}$$

模拟故障测距时, 从故障后第二周波采样, 采样点数  $N=20$ 。分别取  $\varphi_1=60^\circ, A=30$ ;  $\varphi_1=150^\circ, A=20$  和  $\varphi_1=240^\circ, A=10$  三种情况进行验证。

其中  $\tau=30$  ms,  $\omega=100\pi$ ,  $\varphi_2=45^\circ, \varphi_3=60^\circ, \varphi_4=90^\circ,$

$\varphi_2=120^\circ$ 。

$\varphi_1=60^\circ$ ,  $A=30$  时信号滤波效果见图 2。

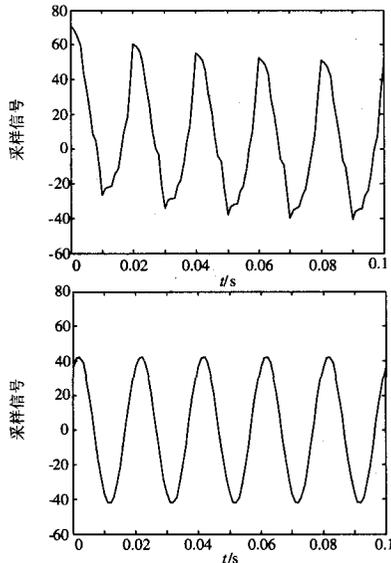


图 2  $\varphi_1=60^\circ$ ,  $A=30$  时信号滤波前后波形比较

Fig.2 The signal wave before and after filtering while  $\varphi_1=60^\circ$ ,  $A=30$

用四种算法对信号滤波, 仿真结果见表 1。

表 1 仿真计算结果

Tab.1 Simulation results

$\varphi_1=60^\circ, A=30$	相角, 误差		有效值, 误差	
	全周傅氏	59.172	1.38%	30.443
三数据窗改进	60.080	0.13%	30.052	0.17%
差分傅氏	55.631	7.28%	29.751	0.83%
差分傅氏改进	60.142	0.24%	30.103	0.34%
$\varphi_1=150^\circ, A=20$	相角, 误差		有效值, 误差	
	全周傅氏	148.712	0.86%	19.565
三数据窗改进	149.852	0.10%	20.042	0.21%
差分傅氏	145.262	3.16%	19.806	0.97%
差分傅氏改进	149.707	0.20%	20.075	0.37%
$\varphi_1=240^\circ, A=10$	相角, 误差		有效值, 误差	
	全周傅氏	242.633	1.10%	9.570
三数据窗改进	239.759	0.10%	9.948	0.52%
差分傅氏	55.414	76.91%	9.826	1.74%
差分傅氏改进	239.568	0.18%	9.898	1.02%

由仿真结果表 1 可以看出, 虽然差分傅氏改进算法的滤波精度仅次于三数据窗算法, 但相对的运算量要少很多; 即改进后的差分傅氏算法具有良好

的滤除直流衰减分量和各次谐波的能力。而且相对改进前的差分傅氏算法, 不仅解决了相角在一定范围出现差值  $\pi$  的问题, 而且提高了精度。另外, 随着有效值的变化, 高频谐波和衰减分量占的比重也随着变化, 但对改进算法的精度影响很小。

#### 4 滤波算法对故障测距影响的仿真

将各滤波算法应用于电力线路故障测距技术<sup>[5]</sup>来验证改进算法的优点。

仿真系统采用双端数据不同步故障测距<sup>[6]</sup>, 以 A 相故障电流为例, 由滤波前后的波形图 3 可看出滤波的效果。

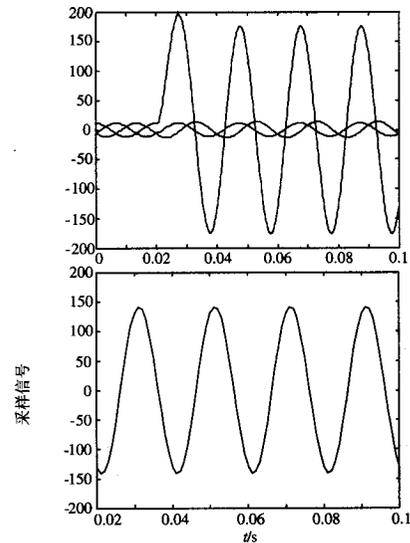


图 3 滤波前后 A 相故障电流波形比较

Fig.3 The current wave before and after filtering while A-phase fault

电力系统故障时会产生非周期分量和非整数次谐波以及整数次谐波, 由于傅氏算法对非周期分量和非整数次谐波不能够完全滤除, 因此其滤波精度要受到故障时非整数次谐波的影响。所以, 在非周期分量和非整数次谐波的共同作用下, 需要对改进方法滤波结果加以研究。对第 3 节中仿真信号追加非整数次谐波:

$$\sqrt{2}\sin(7.5\omega t + 15^\circ) + \sqrt{2}\sin(9.5\omega t + 30^\circ)$$

追加实验仿真结果如表 2。

对比表 2 和表 1, 可以发现追加的非整数次谐波对改进算法的影响较小, 仍保持较高的滤波精度。进而验证了改进算法适用于故障测距。

仿真系统中故障时, 用差分傅氏改进滤波算法对故障录波器记录的故障数据进行滤波, 将结果代入故障测距算法, 并与其他滤波算法进行比较。各

滤波算法对测距精度的影响, 仿真结果见表 3.

表 2 仿真计算结果

Tab.2 Simulation results

$\varphi_1=60^\circ, A=30$	相角, 误差		有效值, 误差	
差分傅氏改进	59.390	1.02%	30.209	0.69%
$\varphi_1=150^\circ, A=20$	相角, 误差		有效值, 误差	
差分傅氏改进	149.204	0.53%	19.727	1.36%

双端数据 M、N 两端不同步角  $\delta=30^\circ$ , 接地电阻  $R_g=50 \Omega$ , 系统参数:

$$Z_{m1}=1.05+j43.18 \Omega, \quad Z_{n1}=1.06+j44.92 \Omega;$$

$$Z_{m0}=j29.09 \Omega, \quad Z_{n0}=j37.47 \Omega$$

线路参数:

$$r_1=0.0208 \Omega/\text{km}, \quad r_0=0.1148 \Omega/\text{km}; \quad l_1=0.8984 \text{ mH}/\text{km}$$

$$l_0=2.2886 \text{ mH}/\text{km}; \quad c_1=0.0129 \mu\text{F}/\text{km}, \quad c_0=0.0052 \mu\text{F}/\text{km}$$

用四种滤波算法代入三种故障情况进行故障测距仿真。

表 3 仿真计算结果

Tab.3 Simulation results

实际值 测量值	单相接地		两相接地		三相接地	
	100 km	误差	100 km	(%)	100 km	(%)
全周傅氏	103.44	1.14%	95.88	1.37	103.75	1.25
三数据窗	99.52	0.16%	101.60	0.53	101.17	0.39
差分傅氏	98.03	0.66%	102.43	0.81	97.84	0.72
差分改进	99.52	0.16%	101.64	0.55	101.20	0.40

由仿真结果表 3 可以看出, 改进算法比全周傅氏算法和改进前算法, 测距精度有了较大的提高, 用改进差分傅氏算法滤波的测距误差小于 2%, 和计算量较大的三数据窗改进算法比较, 故障测距的精度接近, 并且适用于各种故障类型信号的滤波。可以得出, 对于提高故障测距精度并满足电力系统对时间的要求, 该算法相对其他几种滤波更为出色。

## 5 结论

分析了电力系统常用的三种滤波算法, 并对差分傅氏算法进行改进, 提高了滤得的相角和幅值的精度。不仅解决了相角在一定范围出现差值  $\pi$  的问题, 而且滤除衰减直流分量和谐波分量的能力都很

强。Matlab 仿真计算表明了改进算法计算量远少于三数据窗算法, 而滤波精度比改进前高, 仅次于三数据窗算法; 追加实验表明了改进算法受非整数次谐波的影响较小。故障测距仿真系统验证了改进算法能相对提高故障测距精度, 而且它较少的计算量, 能充分满足时间要求。

## 参考文献

- [1] Kezunovic M, Mrkic J.An, Accurate Fault Location Algorithm Using Synchronized Sampling[J]. Electric Power Systems Research, 1994,(29): 161-169.
- [2] 姚亮. 常见傅里叶变换的滤波性能分析[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(1): 73-76.  
YAO Liang. Performance Analysis of Filtering Algorithms Based on Fourier Transform[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(1): 73-76.
- [3] 苏文辉. 一种能滤去衰减直流分量的改进全波傅氏算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(23): 42-44.  
SU Wen-hui. An Improved Full-wave Fourier Algorithm for Filtrating Decaying DC Component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(23): 42-44.
- [4] 刘毅. 差分与傅氏变换相结合算法在微机电流保护中的应用[J]. 继电器, 2000, 28(8): 36-38.  
LIU Yi. Applying the Algorithm of FFT with Difference Data in Microprocessor Based Current Protection[J]. Relay, 2000, 28(8): 36-38.
- [5] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007. 289-290.  
GE Yao-zhong. The Principle and Technology of New Relay and Fault Location[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007. 289-290.
- [6] 安艳秋. 基于分布参数线路模型的精确故障测距算法[J]. 继电器, 2003, 31(6): 42-45.  
AN Yan-qiu. An Accurate Fault Location Algorithm Based on Distributed Parameter Line Model[J]. Relay, 2003, 31(6): 42-45.

收稿日期: 2008-07-17; 修回日期: 2008-08-25

作者简介:

黄飞腾 (1984-), 男, 硕士研究生, 从事高压线路故障定位的研究; E-mail: hfthhftp@163.com

陈明军 (1962-), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统保护及控制、智能电气及自动控制系统;

郑慧 (1983-), 男, 硕士研究生, 从事电子式电流互感器的研究。