

不同傅氏算法对衰减分量的抑制性能分析

张涛, 张项安, 张春锋

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 能否滤除衰减的直流分量是衡量保护算法抗干扰能力的重要特征。在对傅里叶算法及其改进算法分析的基础上, 通过大量的仿真计算并在 TMS320C32 上进行了对比实验, 对不同算法滤除谐波和衰减直流分量的能力进行了分析和比较, 最后给出了结论。

关键词: 继电保护; 保护算法; 1/4 周傅里叶算法

中图分类号: TM771 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004) 11-0025-04

0 引言

电力系统微机保护的一个基本问题是寻找合适的保护算法, 使运算结果的精度能满足工程要求并减少计算所耗费的时间。用于数字保护的算法可以分为两类: 一类是建立在电压、电流波形本身的模型化上的算法, 称为波形算法, 包括傅里叶算法、沃尔什算法和曲线拟合算法等; 另一类是包含一个系统模型而不是波形模型的算法, 如故障线路的 RL 串联模型, 它描述了端电压和电流所满足的一阶微分方程, 从中估计出系统模型中的 R、L 值。

常用的傅里叶算法虽然具有很强的滤除谐波分量的能力, 但它不能滤除衰减的直流分量。国内外的许多学者对傅里叶算法进行了大量的研究, 提出了一些克服衰减的非周期分量的改进型傅里叶算法。为了对这些不同的改进型傅里叶算法的特点有更全面的了解, 本文对不同的改进型傅里叶算法的频率特性和滤除衰减直流分量的能力进行了研究, 最后得出了适合于电力系统微机保护的方案。

1 波形算法

如果考虑到误差, 交流电压或电流波形的瞬时值的形式应写成

$$y(t) = a_1 \cos(\omega_0 t + \theta_1) + \sum_{n=2}^N z_n s_n(t) + \dots \quad (1)$$

其中: (t) 表示电压或电流中的非 50 Hz 信号, 它不仅限于含有系统基频 ω_0 的谐波, 还有其它频率成分。波形 $y(t)$ 的第 k 次采样值为:

$$y_k = a_1 \cos(k \omega_0 T_s + \theta_1) + \sum_{n=2}^N z_n s_n(k \omega_0 T_s) + \dots$$

如果用 k 个采样值进行估计 (数据窗为 $k \omega_0 T_s$), 则测量可以写成一个向量形式

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1(\cdot) & \dots & s_M(\cdot) \\ \vdots & & \vdots \\ s_1(k) & \dots & s_M(k) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ k \end{bmatrix}$$

或写成

$$Y = SZ +$$

S 有 k 行 (数据窗内的测量次数) 和 M 列 (需估计的参数个数), 显然要求 $k > M$, 误差向量的均值为 0, 即 $E\{\cdot\} = 0$; 更一般地, 误差向量的协方差矩阵为 $W = E\{\cdot \cdot^T\}$ 。

如将参数的估计值记为 \hat{Z} , 则无偏估计为:

$$E\{\hat{Z}\} = Z$$

参数估计的误差用方差表示:

$$E\{(\hat{Z}_m - Z_m)^2\}$$

衡量估计器的指标是

$$J = \sum_{n=1}^N E\{(\hat{Z}_m - Z_m)^2\}$$

使 J 最小的无偏估计器可由式(2)给出

$$\hat{Z} = (S^T W^{-1} S)^{-1} S^T W^{-1} Y \quad (2)$$

且协方差矩阵 $E\{(\hat{Z} - Z)(\hat{Z} - Z)^T\} = (S^T W^{-1} S)^{-1}$ 。

协方差矩阵 W 和信号 S 的不同假设, 就形成了由无偏估计器表达式所表示的不同算法。

2 傅里叶算法

如果信号 s 中不包含直流衰减项, 只包含基频

谐波分量的正弦和余弦分量,若每周期有 N 次采样,则信号 S 中只含有 $\frac{N}{2} - 1$ 次以下的谐波。

对于傅里叶算法的基频分量,有 $M=2, z_1 = b_1, z_2 = a_1, =_0 T_s = 2 / N$,而矩阵 S 是采样间隔的基频相角 和采样点数 N 的函数。

2.1 全周傅里叶算法

全周傅里叶算法是电力系统中经常采用的傅氏算法,它是由两个全周的正弦滤波器和余弦滤波器构成的,算法的数据窗为每周波的全部采样点。

矩阵 S 是采样间隔的基频相角 和采样点数 N 的函数,有:

$$S = \begin{bmatrix} s_1() & s_2() \\ \dots & \dots \\ s_1(N) & s_2(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin & \cos \\ \dots & \dots \\ \sin(N) & \cos(N) \end{bmatrix}$$

则估计值

$$\hat{Z} = \begin{bmatrix} \frac{2}{N} & 0 \\ 0 & \frac{2}{N} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N y_k \sin k \\ \sum_{k=1}^N y_k \cos k \end{bmatrix}$$

所以有基频分量

$$a_1 = \hat{z}_2 = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N y_k \cos k$$

$$b_1 = \hat{z}_1 = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N y_k \sin k$$

2.2 半周傅里叶算法

半周傅里叶算法是由两个半周的正弦滤波器和余弦滤波器构成的,算法的数据窗为每周波全部采样点的一半。

矩阵 S 同样是基频相角 和采样点数 N 的函数,但注意 N 应为原来的 $1/2$,故有:

$$S = \begin{bmatrix} s_1() & s_2() \\ \dots & \dots \\ s_1(N/2) & s_2(N/2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin & \cos \\ \dots & \dots \\ \sin(N/2) & \cos(N/2) \end{bmatrix}$$

则估计值

$$\hat{Z} = \begin{bmatrix} \frac{4}{N} & 0 \\ 0 & \frac{4}{N} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{N/2} y_k \sin k \\ \sum_{k=1}^{N/2} y_k \cos k \end{bmatrix}$$

所以有基频分量

$$a_1 = \hat{z}_2 = \frac{4}{N} \sum_{k=1}^{N/2} y_k \cos k$$

$$b_1 = \hat{z}_1 = \frac{4}{N} \sum_{k=1}^{N/2} y_k \sin k$$

2.3 1/4 周傅里叶算法

1/4 周傅里叶算法是由两个 1/4 周的正弦滤波器和余弦滤波器构成的,算法的数据窗为每周波全部采样点的 1/4。

矩阵 S 同样是基频相角 和采样点数 的函数,但应注意 为原来的 $1/4$,故有:

$$S = \begin{bmatrix} s_1() & s_2() \\ \dots & \dots \\ s_1(N/4) & s_2(N/4) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin & \cos \\ \dots & \dots \\ \sin(N/4) & \cos(N/4) \end{bmatrix}$$

则估计值

$$\hat{Z} = \text{Factor} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{N/4} y_k \sin k \\ \sum_{k=1}^{N/4} y_k \cos k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_a & F_b \\ F_c & F_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{N/4} y_k \sin k \\ \sum_{k=1}^{N/4} y_k \cos k \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中:系数 Factor 是一个 2×2 矩阵,若采样点数为 N ,则共有 N 个 2×2 的系数矩阵 Factor。所以有基频分量

$$a_1 = \hat{z}_2 = F_c \cdot \sum_{k=1}^{N/4} y_k \sin k + F_d \cdot \sum_{k=1}^{N/4} y_k \cos k$$

$$b_1 = \hat{z}_1 = F_a \cdot \sum_{k=1}^{N/4} y_k \sin k + F_b \cdot \sum_{k=1}^{N/4} y_k \cos k$$

2.4 差分傅里叶算法

差分傅里叶算法是先对信号进行一次减法滤波,然后再进行傅里叶计算。差分傅里叶算法的计算简单,能够完全消除直流分量,并在一定程度上能够抑制输入信号中的非周期分量。差分傅里叶算法的缺点是增强了傅里叶算法对高次谐波的响应。

差分傅里叶算法的计算公式为:

$$y(k) = x(k) - hx(k-1) \quad (4)$$

其中: h 是常数。

2.5 并联补偿傅里叶算法

所谓的并联补偿傅里叶算法,就是在原来傅里叶算法的基础上分别增加余弦分量补偿和正弦分量补偿,以减小非周期分量对傅里叶算法的影响。

在并联补偿傅里叶算法中,输入信号 $x(t)$ 的 n 次谐波分量的系数为:

$$a_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^N x_k \cos kn \frac{2}{N} - K_C \sum_{l=1}^N i^l$$

$$b_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^N x_k \sin kn \frac{2}{N} - K_S \sum_{l=1}^l i$$

$$K_C = \frac{\sum_{k=1}^N r^k \cos \frac{2k}{N}}{\frac{N}{2} \sum_{k=1}^N r^k}, \quad K_S = \frac{\sum_{k=1}^N r^k \sin \frac{2k}{N}}{\frac{N}{2} \sum_{k=1}^N r^k} \quad (5)$$

式中: N 为周期采样点数; n 为谐波次数; K_C 和 K_S 分别为余弦分量补偿系数和正弦分量补偿系数。另外, 设 τ 为直流分量的衰减时间常数, T_s 为采样周期, 则常数 $r = e^{-T_s/\tau}$ 可以预先离线计算出来。

在图 1 中表示出了不同傅氏算法的频率响应特性, 其中曲线 1~5 分别表示全周傅氏算法、半周傅氏算法、1/4 周傅氏算法、差分傅氏算法和并联补偿傅氏算法的频率响应。

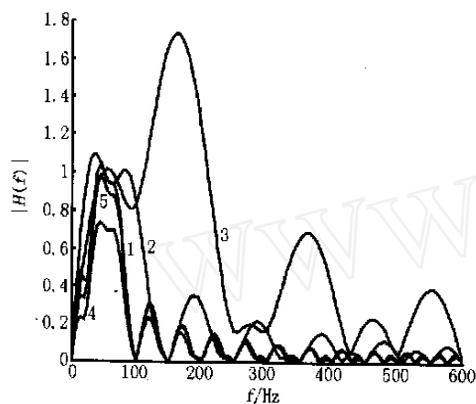


图 1 不同傅氏算法的频率响应

Fig. 1 Phase-frequency response of different Fourier algorithms

可以看出, 全周傅氏算法能够滤除直流分量和各种整次谐波, 即奇次谐波和偶次谐波, 但对衰减的非周期分量抑制能力较差; 半周傅氏算法不能够滤除直流分量和偶次谐波, 但它所需要的数据窗长度比全周傅氏算法减少了一半; 1/4 周傅氏算法对直流分量和偶次谐波响应很大; 差分傅氏算法对高频分量的响应较大; 而并联补偿傅氏算法除对直流分量略有响应外, 对其它谐波的响应与全周傅氏算法一样。

3 不同傅氏算法的计算结果

现在以某一电力系统暂态电流信号为例进行仿真计算, 设暂态电流信号为:

$$i(t) = 5e^{-t/\tau} + 20\sin(t + \pi/3) + 4\sin 2t + 10\sin 3t + 2\sin 4t + 6\sin 5t \quad (6)$$

其中: $\tau = 2$ ms, $f = 100$ Hz, $T_s = 30$ ms。暂态电流信号的波形如图 2 所示。

形如图 2 所示。

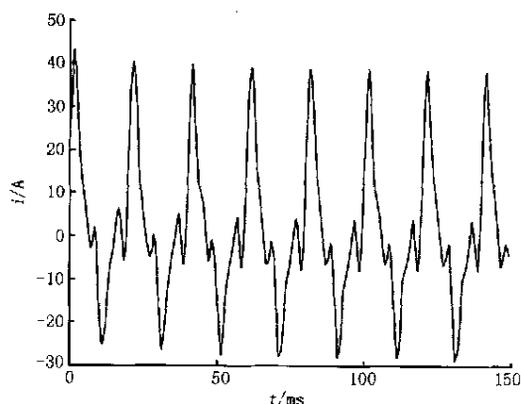


图 2 暂态电流信号的波形

Fig. 2 Waveform of transient current signal

计算时采用采样率分别为 $N = 24$ 点/周、 $N = 36$ 点/周和 $N = 64$ 点/周, 且数据窗长度为 1 周期时各算法的基频分量计算值。图 3 到图 5 示出了分别使用不同傅氏算法在不同采样率情况下的计算结果, 其中曲线 1~5 分别表示全周傅氏算法、半周傅氏算法、1/4 周傅氏算法、差分傅氏算法和并联补偿傅氏算法的计算结果。

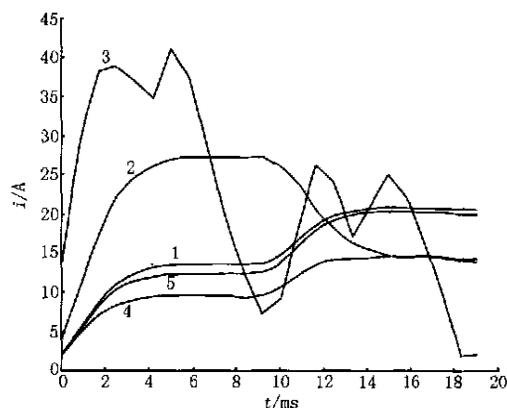


图 3 不同算法的计算结果 ($N = 24$)

Fig. 3 Calculation results of different algorithms ($N = 24$)

从计算结果可以看出, 当故障电流信号中存在衰减的直流分量时, 如果已知直流分量的衰减时间常数, 并联补偿傅氏算法的计算误差为零, 计算精度最高; 其次是差分傅氏算法; 半周傅氏算法的误差非常大, 甚至达到精确值的一倍左右, 根本不能应用; 全周傅氏算法的误差也很大, 需要改进后才能应用。

对于直流分量的衰减时间常数的情况, 可以根据实际的线路情况给出估计值, 也可得到满意的计算精度。

采样率从 24 点/周提高到 36 点/周后, 各算法

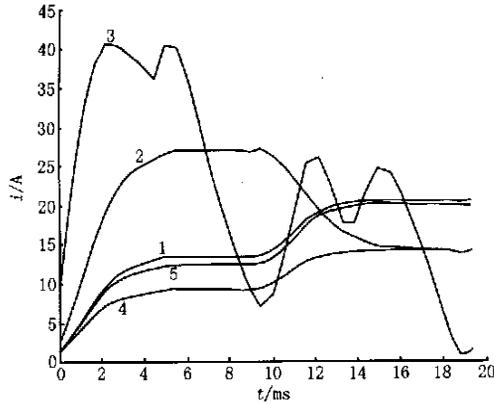


图 4 不同算法的计算结果 ($N = 36$)

Fig. 4 Calculation results of different algorithms ($N = 36$)

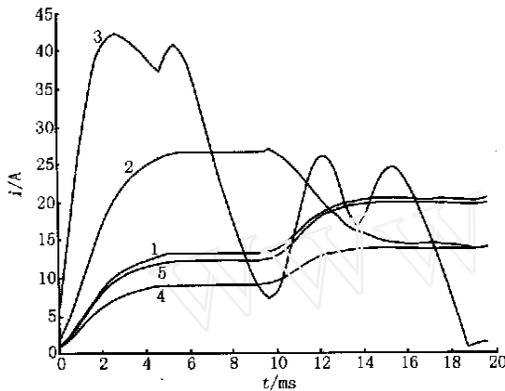


图 5 不同算法的计算结果 ($N = 64$)

Fig. 5 Calculation results of different algorithms ($N = 64$)

的计算误差都有一定程度的减小。但进一步提高采样率到 64 点/周时,对提高计算精度作用并不大,而相应的计算时间却要增加近 1 倍。

4 结论

实验表明,对于不含衰减直流分量和高次谐波

分量的正常输入信号,1/4 周傅氏算法具有最快的响应速度,只需要利用 1/4 周期的输入信号即可准确计算出输入信号的信息。但实际的输入信号不仅含有高次谐波分量,而且往往是含有衰减直流分量的故障输入信号,因而需要使用改进型的傅氏算法。

本文分析了不同傅氏算法对衰减直流分量的抑制效果,按照精度、速度和滤波功能等分析和评价算法的标准,本文认为采样率为 36 点/周的并联补偿傅氏算法是能够兼顾精度与速度的较好方案。

参考文献:

- [1] 张志竟,王汉忠(ZHANG Zhi-jing, WANG Han-zhong). 傅里叶算法和微分方程算法的改进(An Improved Fourier Algorithm and Differential Equation Algorithm) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1983, 7(5).
- [2] 陈德树(CHEN De-shu). 计算机继电保护原理与技术(Principle and Technology of Computer based Relay) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1992.
- [3] 张立华,徐文立,常成,等(ZHANG Li-hua, XU Wen-li, CHANG Cheng, et al). 一种适用于微机保护的新的递推 DFT 算法(New Recursive DFT for Computer Relay) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(5): 28-31.

收稿日期: 2003-07-10; 修回日期: 2004-03-19

作者简介:

张涛(1972-),男,博士,研究方向为自动控制、电力系统继电保护等;

张项安(1968-),男,高工,研究方向为电力系统分析、继电保护、自动化等;

张春锋(1973-),男,高工,研究方向为电力系统自动化、继电保护等。

Study of different Fourier algorithms for the elimination of decaying DC components

ZHANG Tao, ZHANG Xiang-an, ZHANG Chun-feng
(Xi Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China)

Abstract: A protection algorithm can be judged as a strong capability of anti-interference one if it can eliminate decaying DC components. On the analysis of Fourier algorithm and improved Fourier algorithm, this paper performs simulation calculations employing all kinds of algorithms and does comparison experiment on TMS320C32 DSP. After analyzing and comparing the ability of eliminating harmonic current and decaying DC components, the paper proposes the optimal algorithm for computer based protection of power system.

Key words: relay protection; protection algorithm; 1/4 cycle Fourier algorithm