

微机继电保护中滤除衰减直流分量的算法研究

马磊, 王增平, 徐岩

(华北电力大学电气工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 全波傅氏算法是基于周期信号推导出来的, 当采样信号中含有衰减直流分量时, 将会产生误差。该文在全波傅氏算法的基础上, 提出一种改进算法, 仅增加一个采样点, 通过两次非递归全波傅氏变换, 消去衰减直流分量的影响。对微机保护中费机时的运算进行合理简化, 以提高计算速度。仿真实验表明, 改进算法具有消除衰减直流分量能力强, 计算量小, 速度快的特点。

关键词: 微机保护; 衰减直流分量; 全波傅氏算法

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)17-0011-03

0 引言

作为电力系统微机保护提取基波分量的一种算法, 傅氏算法在电力系统中应用十分广泛, 其能滤除整次谐波分量, 且稳定性好。傅氏算法的基础是假定信号为周期函数, 可以分解为恒定直流分量及整数倍频率的分量之和。而实际输入的信号由于混有衰减直流分量和复杂的谐波成分将产生畸变, 如果此时仍利用傅氏算法计算, 其精度必然受到影响^[1]。

为了消除衰减直流分量的影响, 许多学者提出了大量方法^[2-7], 但这些算法往往存在数据窗过长, 精度不高或运算过于复杂的缺点。本文提出一种在全波傅氏算法的基础上仅增加一个采样点的改进全波傅氏算法。算法对复杂的数学运算进行合理简化, 不仅能消除衰减直流分量的影响, 获得理想的精度, 还具有计算简单, 运算速度快的优点。

1 全波傅氏算法及直流分量带来的误差

全波傅氏算法可以滤除恒定的直流分量和基波整数倍频的谐波分量, 假定被采样的信号形式为:

$$x(t) = a + \sum_{n=1}^M X_m(n) \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (1)$$

式中: a 为直流分量的幅值, $X_m(n)$ 与 φ_n 为 n 次倍频的幅值和初相角, ω 为基波分量的角频率 ($\omega = 2\pi/T$)。

则 n 次倍频的实部模值 A_n 与虚部模值 B_n 分别为:

$$\begin{cases} A_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(n\omega t) dt \\ B_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(n\omega t) dt \end{cases} \quad (2)$$

式中: T 为基频分量的周期。

经离散后可得:

$$\begin{cases} A_n = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x(k) \cos(nk\frac{2\pi}{N}) \\ B_n = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x(k) \sin(nk\frac{2\pi}{N}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: k 为采样点的顺序号, N 为周波采样点数, 离散情况下有 $n\omega t = n2\pi \frac{k}{N}$, 因而得到 n 次倍频的幅值和初相角为:

$$X_m(n) = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (4)$$

$$\varphi_n = \arctan \frac{B_n}{A_n} \quad (5)$$

以上全波傅氏算法的分析是以周期分量为基础的, 对于含有衰减直流分量的信号:

$$x(t) = X_0 e^{-\nu t} + \sum_{n=1}^M X_m(n) \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (6)$$

利用式 (2) 分析有:

$$\begin{cases} A_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(n\omega t) dt = \\ \frac{2}{T} \int_0^T X_0 e^{-\nu t} \cos(n\omega t) dt + \frac{2}{T} \int_0^T \sum_{n=1}^M X_m(n) \sin(n\omega t + \varphi_n) \cos(n\omega t) dt = A + X_m(n) \sin \varphi_n \\ B_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(n\omega t) dt = \\ \frac{2}{T} \int_0^T X_0 e^{-\nu t} \sin(n\omega t) dt + \frac{2}{T} \int_0^T \sum_{n=1}^M X_m(n) \sin(n\omega t + \varphi_n) \sin(n\omega t) dt = A + X_m(n) \cos \varphi_n \end{cases} \quad (7)$$

而衰减直流分量中 X_0 和 φ_n 均不为零, 因而 A 和 B 在傅氏算法中带来了误差。为保证全波傅氏

算法的精度,就应该设法消除 A 和 B 的影响。

2 傅氏算法的改进

2.1 求取衰减时间常数的方法

对于含衰减直流分量的信号(6),经离散化可得:

$$x(k) = X_0 e^{-kT/\tau} + \sum_{n=1}^M X_m(n) \sin(nk\frac{2}{N} + \varphi_n) = X_0 r^k + \sum_{n=1}^M X_m(n) \sin(nk\frac{2}{N} + \varphi_n) \quad (8)$$

式中: T 为采样时间间隔, $r = e^{-T/\tau}$ 。

在一个采样周期 N 内,对序号为奇数的点求和:

$$ODD = X_1 + X_3 + \dots + X_{N-1} = \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}} X_0 r^{2k-1} + \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}} \sum_{n=1}^M X_m(n) \sin(n\frac{2(2k-1)}{N} + \varphi_n)$$

而对周期信号有:

$$\sum_{k=1}^{\frac{N}{2}} \sum_{n=1}^M X_m(n) \sin(n\frac{2(2k-1)}{N} + \varphi_n) = 0$$

故

$$ODD = X_0 \frac{r(\frac{N}{2} - 1)}{r^2 - 1} \quad (9)$$

同理,对序号为偶数的点求和:

$$OVEN = X_0 \frac{r(\frac{N}{2} - 1)}{r^2 - 1} \quad (10)$$

由式(9)、(10)易得:

$$r = OVEN / ODD = e^{-T/\tau}$$

有:

$$= -T / \ln(r) \quad (11)$$

而在微机保护算法编程中,对数运算往往难以实现,不得不占用大量机时。为避免式(11)的指数运算,提高运算速度,由泰勒级数:

$$e^{-x} = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

电力系统中,暂态时间常数通常与周期 T 可比,故 $T/\tau = T/N < 1$ 。此时可仅取泰勒级数的前两项,有: $r = e^{-T/\tau} \approx 1 - \frac{T}{\tau}$,因而式(11)可以简化为:

$$= \frac{T}{1 - r} \quad (12)$$

2.2 全波算法的改进

首先,在 $t \in [0, T]$ 对连续信号(6),取一个周波的采样值(采样序列从 1 到 N),做全波傅氏变换可得:

$$\begin{cases} A_n = A + A \\ B_n = B + B \end{cases} \quad (13)$$

式中:

$A = X_m(n) \sin \varphi_n, B = X_m(n) \cos \varphi_n$,对于信号中的周期分量来说, A, B 始终不变,不随数据窗起点的不同而不同。

然后,在 $t \in [T, T+T]$ 对连续信号(6),往后顺序推一个点取一个周波的采样值(采样序列从 2 到 $N+1$),做全波傅氏变换可得:

$$\begin{cases} A_n = A + A \\ B_n = B + B \end{cases} \quad (14)$$

$$A = \frac{2}{T} \int_0^{T+T} X_0 e^{-t/\tau} \cos(n t) dt =$$

$$\frac{2}{T} \int_0^T e^{-(t+T)/\tau} \cos(n t + n T) dt =$$

$$\frac{2X_0}{T} e^{-T/\tau} (k_1 A - k_2 B)$$

$$B = \frac{2}{T} \int_0^{T+T} X_0 e^{-t/\tau} \sin(n t) dt =$$

$$\frac{2X_0}{T} e^{-T/\tau} (k_2 A + k_1 B)$$

式中:

$k_1 = \cos(n T), k_2 = \sin(n T)$ 。 A 与 B 两式相比得:

$$\frac{A}{B} = \frac{k_1 A - k_2 B}{k_2 A + k_1 B} \quad (15)$$

由式(13)、(14)消除 A, B 得:

$$\begin{cases} A = A + A_n - A_n \\ B = B + B_n - B_n \end{cases} \quad (16)$$

$$A = \frac{2}{T} \int_0^T X_0 e^{-t/\tau} \cos(n t) dt = \frac{2}{T} X_0 \frac{1}{n} \cdot$$

$$\left[\sin(n t) e^{-t/\tau} \Big|_0^T - \int_0^T \left(-\frac{1}{\tau}\right) e^{-t/\tau} \sin(n t) dt \right] =$$

$$\frac{2}{T} X_0 \frac{1}{n} \int_0^T e^{-t/\tau} \sin(n t) dt = \frac{1}{n} B \quad (17)$$

联立式(15)、(16)、(17),得:

$$\begin{cases} A = \frac{q(A_n - A_n) - p(B_n - B_n)}{pn - tq} \\ B = n A \end{cases} \quad (18)$$

式中: $p = k_1 - n k_2, q = n k_1 + k_2$ 。

得到消除衰减直流分量后的实部模值和虚部模值:

$$\begin{cases} A = A_n - A \\ B = B_n - B \end{cases} \quad (19)$$

将式(19)带入式(4)、(5)即可方便地求出所需

要的幅值和初相角。

通过上述分析可见,新的方法仅需要 $N+1$ 个采样点,依次进行 2 次全波傅氏算法。且这两次全波傅氏算法不是独立的,可以采用递推傅氏算法的原理^[5],进一步减少计算量,提高运算速度。

3 算法验证

为验证本算法对滤除衰减非周期分量的良好效

表 1 算法验证结果 ($\tau = 10 \text{ ms}$, $\theta = 30 \text{ ms}$)

Tab 1 Test results of the algorithm ($\tau = 10 \text{ ms}$, $\theta = 30 \text{ ms}$)

/ms	算法	基波		二次谐波		三次谐波		五次谐波	
		幅值	相角	幅值	相角	幅值	相角	幅值	相角
10	全波傅氏	49.602 65	26.021 28	33.866 08	33.551 37	22.356 60	28.653 59	20.151 69	48.545 78
	改进算法	39.973 54	29.327 15	29.372 56	39.132 35	18.993 81	34.310 73	19.894 72	54.622 81
30	全波傅氏	45.308 19	25.973 31	31.990 97	35.638 92	21.222 05	31.288 29	20.009 59	51.237 57
	改进算法	39.763 04	29.969 37	29.571 83	38.973 93	19.708 26	34.762 95	20.011 75	55.021 79

可见,改进后的全波傅氏算法可以有效地滤除衰减直流分量的影响,对于基波分量的提取,效果尤其明显。

4 结论

本文分析了衰减直流分量对全波傅氏算法的影响,并提出了一种改进的全波傅氏算法。新方法仅需增加一个采样点进行两次全波傅氏变换就可以有效滤除直流分量的影响,新方法还对微机保护编程实现中耗费大量机时的对数运算进行合理的简化,从而大大减少了计算量,缩短了计算处理时间。仿真表明,该算法具备稳定性、精确性和快速性,符合微机保护应用的要求。

参考文献:

- [1] 陈德树. 计算机继电保护原理与技术 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1992
CHEN De-shu Principle and Application of Computer Relay Protection [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1992
- [2] 熊岗, 陈陈. 一种能滤除衰减直流分量的交流采样新算法 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21(2): 24-26
X DNG Gang, CHEN Chen A Novel Alternating Current Sampling Algorithm for Filtering Decaying Direct Current Component [J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(2): 24-26
- [3] 侯有韬, 张举. 一种滤除衰减直流分量的快速算法 [J]. 继电器, 2004, 32(6): 6-9
HOU You-tao, ZHANG Ju A Fast Algorithm for Decaying DC Component Filtration [J]. Relay, 2004, 32(6): 6-9

果,利用本算法对 $x(t)$ 中的各整倍次波进行计算,并与未改进的全波傅氏算法进行比较。设有如下采样信号:

$$x(t) = 40e^{-t/\tau} + 40 \sin(t + 30^\circ) + 30 \sin(2t + 40^\circ) + 20 \sin(3t + 36^\circ) + 20 \sin(5t + 55^\circ)$$

其中: $\tau = 100$, 分别取 $\theta = 10 \text{ ms}$ 和 $\theta = 30 \text{ ms}$, 结果见表 1。

- [4] 高婧, 郑建勇, 潘震东. 电力系统微机保护中改进傅氏算法综合性能研究 [J]. 继电器, 2002, 30(10): 16-20
GAO Jing, ZHENG Jian-yong, PAN Zhen-dong Study of Improved Fourier Algorithm for Microprocessor-based Protection in Power System [J]. Relay, 2002, 30(10): 16-20
- [5] 高婧, 郑建勇. 一种快速滤除衰减直流分量的新型递推傅氏算法 [J]. 电力系统自动化学报, 2003, 15(1): 54-57
GAO Jing, ZHENG Jian-yong A Novel Recursive Fourier Algorithm for Filtering Decaying DC Component [J]. Proceedings of the EPSA, 2003, 15(1): 54-57
- [6] 苏文辉, 李钢. 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, LI Gang An Improved Full-wave Fourier Algorithm for Filtering Decaying DC Component [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(23): 42-44
- [7] 黄恺, 孙苓生. 继电保护傅氏算法中滤除直流分量的一种简便算法 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 50-53
HUANG Kai, SUN Ling-sheng A Compact Algorithm for Filtering Decaying DC Component in Relay Protection Fourier Algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 50-53

收稿日期: 2005-01-26; 修回日期: 2005-05-09

作者简介:

马磊 (1982-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统微机保护方面的学习与研究; E-mail: hd_malei@sohu.com

王增平 (1964-), 男, 博士生导师, 教授, 从事电力系统微机保护, 变电站综合自动化系统的研究与教学;

徐岩 (1976-), 男, 博士, 从事电力系统微机保护的研究。

(下转第 34 页 continued on page 34)

之一,其精确性直接关系到系统可靠性指标的可信度。由于在实际的元器件故障率统计中,浴盆曲线的耗损期故障率数据很难获得,本文只对早期故障率和偶然期故障率进行拟合并获得其分界点。本文采用的 Marquardt法其拟合精度较高,所求参数的精确性也较高。该方法不仅适用于电气设备,同样也适用于电子设备和机械设备。

参考文献:

- [1] 宋云亭,郭永基,程林. 电力系统可靠性基本数据的统计分析[J]. 继电器, 2002, 30(7): 14-16
SONG Yun-ting, GUO Yong-ji, CHENG Lin. Statistical Analysis of Reliability Data for Power System Units[J]. Relay, 2002, 30(7): 14-16
- [2] 郭永基. 工程可靠性原理[M]. 北京:清华大学出版社, 2002 9-11.
GUO Yong-ji. Principles of Reliability Engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002 9-11.
- [3] 陈凯,陆淑兰,李凤玲. 可靠性数学及其应用[M]. 吉林:吉林教育出版社, 1989. 52-75.
CHEN Kai, LU Shu-lan, LI Feng-ling. Reliability Math-

ematics and Its Application [M]. Jilin: Jilin Education Press, 1989. 52-75.

- [4] 袁亚湘,孙文瑜. 最优化理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 1997. 373-403
YUAN Ya-xiang, SUN Wen-yu. Theories and Methods of Optimization [M]. Beijing: Science Press, 1997. 373-403
- [5] 李树平. 用麦夸尔特法推求给水管道造价公式参数[J]. 西安建筑科技大学学报, 2004, 32(1): 16-19.
LI Shu-ping. Application of the Levenberg-Marquardt Method in Determining the Parameters of Water Pipe Cost Formula[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 2004, 32(1): 16-19.

收稿日期: 2004-12-13

作者简介:

张黎(1979-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统可靠性; E-mail: zlw19711153@163.com

张波(1963-),男,教授,主要从事电力系统分析与研究方面的工作。

An algorithm for optimal parameter estimation of the failure rate of electrical equipment

ZHANG Li, ZHANG Bo

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The accuracy of the failure rate of electrical equipment directly governs the availability and rationality of the reliability indices of power system. The Levenberg-Marquardt method is used to realize optimal parameter estimation of the failure rate function, and the strict boundary which specifically distinguishes different phases of the failure rate are effectively determined. An example shows the proposed method is of good practicability and high fitting accuracy.

Key words: failure rate function; parameter estimation; bathtub curve

(上接第 13 页 continued from page 13)

Study of filtering decaying DC component algorithm for microprocessor-based protection

MA Lei, WANG Zeng-ping, XU Yan

(School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The decaying DC component in the sampling signal will bring errors to the full-wave Fourier algorithm, which is derived with periodic signal. Based on the full-wave Fourier algorithm, an improved algorithm by adding only one sampling point with two full-wave Fourier algorithm transforms to eliminate the error caused by the decaying component is put forward. Furthermore, a simplified method is proposed to substitute the time-consuming calculation. The simulation results prove that the calculation of improved algorithm is simple and fast.

Key words: microprocessor-based protection; decaying DC component; full-wave Fourier algorithm