一种滤除衰减直流分量的快速算法

侯有韬,张 举

(华北电力大学,河北 保定 071003)

摘要: 针对全周傅氏算法在处理含有衰减直流分量的周期信号时会产生误差的问题,在全周傅氏算法的基础上提出了一种滤除衰减直流分量的快速算法,增加一个采样点,进行两次全周傅氏变换,经过理论推导,得到各周期分量的精确计算公式。并通过仿真证实,此算法具有速度快,精度高的特点。

关键词: 衰减直流分量; 全周傅氏算法; 快速算法

中图分类号: TM771; TM71　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1003-4897(2004)06-0006-03

0 引言

电力系统发生故障时,故障信号中除了基波分量以外还含有大量的高频分量和衰减的非周期分量。在微机保护中,通过相关算法对信号进行处理,得到基波或某次谐波分量的数值来实现故障检测功能。微机保护算法的计算可视为对交流采样信号中参数的估算过程,对算法性能的评价也取决于其是否能在较短数据窗内,从信号的若干采样值中提取出有用成分。传统的全周傅氏算法有很强的滤波能力。能够滤除周期信号中的整数次谐波分量和直流分量。但是,如果采样信号中存在衰减直流分量,其滤波效果就会受到影响。导致基波分量(或某次谐波分量)的计算产生误差。

文献[1]提出了在全周傅氏算法基础上通过延长数据窗来滤除衰减直流分量,延长的数据窗为 $\Delta T = T/2n$,数据窗过长。特别是在计算基波幅值时,需要的数据窗为 $1.5T$,不利于微机保护的快速动作。

因此,必须寻求一种数据窗短而精度又高的算法来有效滤除衰减的直流分量,进而精确地求出周期分量的估计值,保证微机保护快速正确动作。本文提出了一种快速算法,在全周傅氏变换的基础上,采用追加一个采样点的方法,便可消除衰减直流分量的影响。

1 传统的全周傅氏算法

假定被采样信号具有如下形式:

$$x(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + \sum_{n=1}^{M} I_m(n)\sin(n\omega t + \phi_n) \quad (1)$$

式中 I_0 为衰减直流分量初值; τ 为衰减时间常数, $I_m(n)$ 和 ϕ_n 分别为 n 次谐波的幅值和初相角。

各次谐波的实部和虚部的时域表达式为:

$$\begin{cases} A_n = \dfrac{2}{T}\displaystyle\int_0^T x(t)\cos n\omega t\,\mathrm{d}t & (2) \\ B_n = \dfrac{2}{T}\displaystyle\int_0^T x(t)\sin n\omega t\,\mathrm{d}t & (3) \end{cases}$$

式中: T 为基频分量的周期; ω 为基频分量的角频率 ($\omega = 2\pi/T$)。将式(2)、(3)离散化后可得:

$$A_n = \frac{2}{N}\sum_{k=1}^{N} x(k)\cos\left(\frac{2\pi}{N}nk\right) \quad (4)$$

$$B_n = \frac{2}{N}\sum_{k=1}^{N} x(k)\sin\left(\frac{2\pi}{N}nk\right) \quad (5)$$

式中: N 为周期采样点数。$n\omega t$ 将其离散化后得到 $\frac{2\pi}{N}nk$。因为

$$n\omega t = n2\pi f\frac{1}{fN}k = \frac{2\pi}{N}nk$$

最后求出 n 次谐波的幅值和初相角为:

$$I_m(n) = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (6)$$

$$\phi_n = \arctan\frac{B_n}{A_n} \quad (7)$$

当式(1)中不含有衰减直流分量时,得到的 $I_m(n)$ 和 ϕ_n 是真实值。以上即为全周傅氏算法的全过程,是基于被采样信号为周期信号的前提下进行推导的,而对于式(1)中存在衰减直流分量的情况再用全周傅氏算法进行计算,则会产生误差,分析如下:

将式(1)代入式(2)、(3)得:

$$A_n = \frac{2}{T}\int_0^T x(t)\cos n\omega t\,\mathrm{d}t = \frac{2}{T}\int_0^T I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}\cos n\omega t\,\mathrm{d}t + \frac{2}{T}\int_0^T \sum_{i=1}^{M}[I_m(i)\sin(i\omega t + \phi_i)]\cos n\omega t\,\mathrm{d}t = I_m(n)\cos\phi_n + \delta_a = A + \delta_a \quad (8)$$

$$B_n = \frac{2}{T}\int_0^T x(t)\sin n\omega t\,\mathrm{d}t = \frac{2}{T}\int_0^T I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}\sin n\omega t\,\mathrm{d}t + \frac{2}{T}\int_0^T \sum_{i=1}^{M}[I_m(i)\sin(iwt+\phi_i)]\sin n\omega t\,\mathrm{d}t = I_m(n)\sin\phi_n + \delta_b = B + \delta_b \tag{9}$$

$$\delta_a = \frac{2}{T}\int_0^T I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}\cos n\omega t\,\mathrm{d}t \tag{10}$$

$$\delta_b = \frac{2}{T}\int_0^T I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}\sin n\omega t\,\mathrm{d}t \tag{11}$$

其中:A 和 B 为信号中基波和各次谐波分量通过全周傅氏算法得到的实部和虚部,即理想值,δ_a 和 δ_b 为衰减直流分量通过全周傅氏算法得到的值,也就是实际值与理想值之间的误差。为了保证全周傅氏算法在这种情况下仍然具有很好的计算精度,必须对全周傅氏算法加以改进,以消除 δ_a 和 δ_b 的影响。

2　快速算法

2.1　衰减时间常数的求取

将式(1) 离散化可得:

$$x(k) = I_0 e^{-\frac{k\Delta T}{\tau}} + \sum_{n=1}^{M}[I_m(n)\sin(\frac{2\pi}{N}nk+\phi_n)] = I_0 e^{-\frac{k\Delta T}{\tau}} + \sum_{n=1}^{M}[I_m(n)\sin\phi_n\cos\frac{2\pi}{N}nk + I_m(n)\cos\phi_n\sin\frac{2\pi}{N}nk]$$

ΔT为采样时间间隔。令 $r = e^{-\frac{\Delta T}{\tau}}$,在一个周期内对 $x(k)$ 求和得:

$$\sum_{k=1}^{N}x(k) = \sum_{k=1}^{N}I_0 r^k + \sum_{k=1}^{N}\sum_{n=1}^{M}I_m(n)\sin\phi_n\cos\frac{2\pi}{N}nk + \sum_{k=1}^{N}\sum_{n=1}^{M}I_m(n)\cos\phi_n\sin\frac{2\pi}{N}nk$$

因为:

$$\sum_{k=1}^{N}\cos\frac{2\pi}{N}nk = \sum_{k=1}^{N}\sin\frac{2\pi}{N}nk = 0$$

所以:

$$\sum_{k=1}^{N}x(k) = \sum_{k=1}^{N}I_0 r^k = I_0\sum_{k=1}^{N}r^k \tag{12}$$

引入第 $N+1$ 点的采样值,将 $x(k)$ 从2到 $N+1$ 点这一周期内求和,因为同样有

$$\sum_{k=2}^{N+1}\cos\frac{2\pi}{N}nk = \sum_{k=2}^{N+1}\sin\frac{2\pi}{N}nk = 0 \tag{13}$$

所以

$$\sum_{k=2}^{N+1}x(k) = \sum_{k=2}^{N+1}I_0 r^k = I_0 r\sum_{k=1}^{N}r^k \tag{14}$$

由式(12)、(14) 得

$$r = \sum_{k=2}^{N+1}x(k) \Big/ \sum_{k=1}^{N}x(k) \tag{15}$$

所以 $\tau = -\Delta T/\ln r$。

2.2　快速算法

取 $t\in[\Delta T, T+\Delta T]$,即将第一个采样点去掉,在最后补上一个采样点,此时采样序列从2到 $N+1$,再对 $x(t)$ 进行全周傅氏变换,可得

$$\begin{cases} A'_n = \frac{2}{T}\int_{\Delta T}^{T+\Delta T}x(t)\cos n\omega t\,\mathrm{d}t = \delta'_a + A & (16)\\ B'_n = \frac{2}{T}\int_{\Delta T}^{T+\Delta T}x(t)\sin n\omega t\,\mathrm{d}t = \delta'_b + B & (17)\end{cases}$$

对于信号中的周期分量来说,在$[0, T]$和$[\Delta T, T+\Delta T]$内的全周傅氏变换结果是相同的。令

$$\delta'_a = \frac{2}{T}\int_{\Delta T}^{T+\Delta T}I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}\cos n\omega t\,\mathrm{d}t = \frac{2}{T}\int_0^T I_0 e^{-\frac{t+\Delta t}{\tau}}\cos(n\omega t + n\omega\Delta T)\,\mathrm{d}t = \frac{2I_0}{T}e^{-\frac{\Delta T}{\tau}}(k_1\delta_a - k_2\delta_b)$$

$$\delta'_b = \frac{2}{T}\int_{\Delta T}^{T+\Delta T}I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}\sin n\omega t\,\mathrm{d}t = \frac{2}{T}\int_0^T I_0 e^{-\frac{t+\Delta T}{\tau}}\sin(n\omega t + n\omega\Delta T)\,\mathrm{d}t = \frac{2I_0}{T}e^{-\frac{\Delta T}{\tau}}(K_2\delta_a + k_1\delta_b)$$

式中:$k_1 = \cos n\omega\Delta T$, $k_2 = \sin n\omega\Delta T$。两式相除得

$$\frac{\delta'_a}{\delta'_b} = \frac{k_1\delta_a - k_2\delta_b}{k_2\delta_a + k_1\delta_b} \tag{18}$$

由式(8)、(9)、(16)、(17) 可得

$$\begin{cases}\delta'_a = \delta_a + A'_n - A_n\\ \delta'_b = \delta_b + B'_n - B_n\end{cases} \tag{19}$$

又因为:

$$\delta_a = \frac{2}{T}\int_0^T I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}\cos n\omega t\,\mathrm{d}t = \frac{2}{T}I_0\frac{1}{n\omega}[\sin n\omega t e^{-\frac{t}{\tau}}\big|_0^T - \int_0^T(-\frac{1}{\tau})e^{-\frac{t}{\tau}}\sin n\omega t\,\mathrm{d}t] = \frac{2}{T}I_0\frac{1}{n\omega\tau}\int_0^T e^{-\frac{t}{\tau}}\cdot\sin n\omega t\,\mathrm{d}t = \frac{1}{n\omega\tau}\delta_b$$

即:$\delta_b = n\omega\tau\delta_a$ (20)

由(18),(19),(20) 可得:

$$\begin{cases}\delta_a = \frac{qa' - pb'}{pn\omega\tau - q}\\ \delta_b = n\omega\tau\delta_a\end{cases}$$

式中各量为:$p = k_1 - n\omega\tau k_2$, $q = n\omega\tau k_1 + k_2$, $a' = A'_n - A_n$, $b' = B'_n - B_n$。对于某一谐波分量来说,k_1、k_2 为常量。最后由式(8),(9)得:

$$\begin{cases}A = A_n - \delta_a\\ B = B_n - \delta_b\end{cases}$$

以上是通过连续信号进行推导的。对于离散信号的情况也有类似推导。在对周期信号进行均匀采样的条件下,在任何一个周期内的全周傅氏变换结果都是一样的。以实部的求解为例:

$$A' = \frac{2}{N}\sum_{k=2}^{N+1} x(k)\cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) = \frac{2}{N}\left[\sum_{k=1}^{N} x(k)\cdot \cos\left(\frac{2\pi}{N}k\right) + x(N+1)\cos\frac{2\pi}{N}n(N+1) - x(1)\cos\left(\frac{2\pi}{N}n\right)\right]$$

因为

$$x(N+1) = x(1)$$

$$\cos\frac{2\pi}{N}n(N+1) = \cos\left(\frac{2\pi}{N}n\right)$$

所以

$$A' = \frac{2}{N}\sum_{k=1}^{N} x(k)\cos\left(\frac{2\pi}{N}k\right) = A$$

A,A 分别为 1 到 N 点,2 到 $N+1$ 点采样值的全周傅氏变换的实部。对于虚部也有同样推导,即 $B' = B$。因此由连续信号得出的结果同样适用于离散化的信号。

上述分析可以发现,这种算法只增加了一个采样点就完成了滤除衰减直流分量的功能。

表 1 仿真结果

Tab. 1 Results of simulation(τ = 10 ms)

算法	基波				二次谐波			
	幅值	误差/ %	相角/ °	误差/ %	幅值	误差/ %	相角/ °	误差/ %
全周傅氏	87.764 5	9.705 6	28.975 6	3.414 7	152.621 1	1.747 4	38.807 0	2.982 5
快速算法	80.014 2	0.017 8	29.907 5	0.308 3	150.695 2	0.463 5	40.104 1	0.260 3
算法	三次谐波				五次谐波			
	幅值	误差/ %	相角/ °	误差/ %	幅值	误差/ %	相角/ °	误差/ %
全周傅氏	42.465 0	6.162 5	34.299 9	4.722 5	200.911 1	0.455 6	64.604 1	0.609 1
快速算法	39.892 2	0.269 5	35.035 5	2.679 2	199.667 4	0.166 3	64.882 9	0.180 2

3 仿真计算

设有如下采样信号:

$$x(t) = 30e^{-\frac{t}{\tau}} + 80\sin(\omega t + 30°) + 150\sin(2\omega t + 40°) + 40\sin(3\omega t + 36°) + 200\sin(5\omega t + 65°)$$

其中:$\omega = 100\pi$。用此快速算法提取 $x(t)$ 中的基波,二次谐波,三次谐波,五次谐波分量的幅值和相角,并与传统的全周傅氏算法进行比较,当 $\tau = 10$ ms 时,结果见表 1,当 $\tau = 30$ ms 时,结果见表 2。

表 2 仿真结果

Tab. 2 Results of simulation(τ = 30 ms)

算法	基波				二次谐波			
	幅值	误差/ %	相角/ °	误差/ %	幅值	误差/ %	相角/ °	误差/ %
全周傅氏	84.278 6	5.348 3	28.768 2	4.106 0	151.906 0	1.270 7	39.495 1	1.262 3
快速算法	79.978 7	0.026 6	29.950 0	0.166 7	149.905 1	0.063 3	39.934 8	0.163 0
算法	三次基波				五次谐波			
	幅值	误差/ %	相角/ °	误差/ %	幅值	误差/ %	相角/ °	误差/ %
全周傅氏	41.333 5	3.333 8	34.883 7	3.100 8	200.477 4	0.238 7	64.771 1	0.352 2
快速算法	39.922 9	0.192 7	35.763 9	0.655 8	199.878 7	0.060 6	64.974 0	0.040 0

以上数据表明,此算法可以大大提高各周期分量的提取精度,消除了衰减直流分量的影响,特别是基波分量效果更为明显。

4 结论

本文分析了衰减直流分量对全周傅氏算法产生的影响,在此基础上进行了改进,增加了一个采样点,进行了两次全周傅氏变换。既保留了全周傅氏算法的滤波功能,又增加了对衰减直流分量的过滤作用。这两次变换并不是孤立的,第二次变换可以利用第一次的变换结果,大大减少了计算量,也就是减少了数据处理时间,适用于微机处理。仿真结果表明此算法还具有较高的精度。因此这种快速算法符合微机保护的要求,具有一定的理论和应用价值。

参考文献:

[1] 熊岗,陈陈(XIONG Gang, CHEN Chen). 一种能滤除衰减直流分量的交流采样新算法(A New AC Sampling Algorithm for Filtrating and Decaying DC Component) [J]. 电力系统自动化(Automation of Elcetric Power Systems),1997,21(2):24-26.

[2] 陈德树(CHEN De-shu). 计算机继电保护原理与应用(Principle and Application of Computer Relay Protection) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press),1992.

收稿日期: 2003-06-20; 修回日期: 2003-08-24

作者简介:

侯有韬(1978 -),男,硕士,主要从事微机保护方面的研究;

张 举(1946 -),男,教授,主要从事微机保护方面的研究。

A fast algorithm for decaying DC component filtration

HOU You-tao, ZHANG Ju

(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

考虑网络约束的市场力判别方法

周 伟[1], 郑丹丹[2], 龚乐年[1]

(1. 东南大学电气系, 江苏 南京 210096; 2. 上海交通大学电信学院, 上海 200030)

摘要: 市场力是阻碍电力市场正常运行的最大因素之一,美国加州电力市场中的部分发电商行使市场力哄抬电价,在一定程度上导致了该州电力危机的发生。国内外对市场力判别方面的研究早已进行,但至今仍缺乏较为明确直观的方法。传统方法中,一般根据市场集中度来分析市场力,本文改变从发电侧根据机组所占份额来分析市场力的这一做法,试图从负荷侧根据线路对负荷的供电情况来进行分析,并提出一种简单可行的市场力判据。

关键词: 电力市场; 市场力; 网络约束

中图分类号: TM715 **文献标识码**: A **文章编号**: 1003-4897(2004)06-0009-04

0 引言

公平公正是电力市场的基本准则。随着我国电力市场改革的深入,区域电力市场已经进行到了正式实施阶段,然而保证市场公平公正的监管体系还没有完全建立起来,这将对区域电力市场的正常运行带来重大隐患。

市场力(Market Power)是破坏市场公平公正的主要因素之一,我们所要进行的电力监管也将主要从抑制市场力的作用来展开。对市场力实行有效监管的第一步就是要方便准确地判断市场力的存在,可惜现在还没有一个非常有效的方法来实现这项工作。传统方法中通过市场集中度来分析判断市场力,通过本文第1节的分析可见,这种方法并不十分有效。通过卖方价格大于其边际价格的比例来衡量市场力虽然最直观、准确,但卖方的边际价格常常不可知,因而实际运用比较困难。本文将分析市场力在我国形成的原因及实现方式,分析市场集中度标准在分析市场力方面的局限性,并给出市场力的一个实用判断标准。

1 电力市场中的市场力

通常市场力定义为市场参与者在某个时段拥有使市场价格显著高于完全竞争情况下价格的能力。由于长期受计划经济的影响,市场力毫无疑问地会对我国的电力市场化进程带来一定阻力:

1) 我国的电力资源和负荷分配非常不均衡,往往存在一部分地区电力过剩,另外部分供电不足的问题。对某个区域来说,买卖双方都有可能实行市场力来压低或抬高市场价格;

2) 由于我国电网结构比较薄弱,电力交易的完全市场化可能会给电网的安全运行带来确不定因素。另外,电力市场可能增加电网阻塞的发生,从而加大了市场力形成的可能性;

3) 发电商的规模参差不齐,由于历史或其他原因,在某些地方,一个或几个发电厂现在还担负着本地区大部分的电力供应任务,很容易形成市场力;

4) 壁垒问题严重。电力工业的初始投资非常大,现阶段社会资金的投入比较困难,造成市场参与者的数目有限。

通常情况下,市场力的行使有以下两种表现形式[3]:一种是直接以远高出边际价格的价格竞价,以提高最后的交易价格;另外一种是将自己的一小部分容量以较高的价格竞价,另一部分按正常方式竞价。按这种方式既可能提高结算价格,获得超额利润,又可以保证大部分容量能够进入市场,获得正常利润。

市场力的行使将严重扰乱市场秩序,甚至使整

Abstract: To solve the problem that the full-wave Fourier algorithm will bring errors when there is decaying DC component in the sampling signal, this paper gives a new fast algorithm based on the full-wave Fourier algorithm which can filtrate the decaying DC component by adding only one sampling point with two full-wave Fourier transforms. The precise calculation formula can be deduced theoretically, and the characteristics of its fastness and precision can be proved by simulation.

Key words: decaying DC component; full-wave Fourier algorithm; fast algorithm