第35卷 第10期
2007年5月16日

继电器
RELAY

Vol.35 No.10
May.16, 2007

智能保护算法的研究

陈燕坤， 王毅

（北京交通大学电气工程学院，北京 100044）

摘要： 介绍了目前在电力系统智能保护算法中广泛研究的几种算法，包括傅氏算法及其改进算法；最小二乘法及其递推算法；小波分析算法。文中详细介绍了这几种智能保护算法尤其是改进的傅氏算法，最小二乘法递推算法，小波分析算法的内容、应用场合及优缺点，并展望小波分析和傅氏算法相结合的新方法。最后通过对这些算法分析、比较，在需要快速切断的场合下，得出更优智能保护算法是改进的傅氏算法，最小二乘法递推算法。

关键词： 傅氏算法； 最小二乘法； 小波分析； 衰减直流分量； 智能保护

Study of intelligent protection algorithms in power net

CHEN Yan-kun, WANG Yi

（School of Electrical Engineering，Beijing Jiaotong University，Beijing 100044, China）

Abstract: Several intelligent algorithms of protecting electric power system, which are widely adopted and studied, are presented, including Fourier algorithm and advanced Fourier algorithm, Least square algorithm (LSA) and Recursive Least Square Correction Algorithm (RLSCA), wavelet transforms algorithm. The contents of these algorithms are described in detail respectively, specially introduced the advanced Fourier algorithm, RLSCA, wavelet transforms. And their applications, advantages and disadvantages are also given. The new method of compound of wavelet and advanced Fourier algorithm is prospected. Finally, by analyzing the algorithms and comparing their merits, the more efficient algorithms are advanced Fourier algorithm and RLSCA, applying in where it needs quickly cut-off the faults.

Key words: Fourier algorithm; least square algorithm (LSA); wavelet transforms; decaying DC component; intellectual protection

中图分类号： TM77　　文献标识码： A　　文章编号： 1003-4897(2007)10-0005-04

0 引言

智能保护算法是电力系统智能保护的重点。不同功能的系统智能保护，主要是因其软件算法而异。分析和评价各种不同算法优劣的标准是精度和速度。一般说来，精度和速度总是对立的，高精度的算法需要建立复杂的模型，进行大量的计算，因而速度肯定会受到影响；达到快速性，则可能牺牲高精度。在电力系统发生故障时，往往是在基波的基础上叠加有衰减的非周期分量和各种高频分量。对这些信号进行处理及保护动作、定性分析时，目前采用的算法有：傅氏算法及其改进算法；最小二乘法及其递推算法；小波分析等。

本文对目前广泛采用和研究的这一方面算法进行整理和总结，对各种算法的性能作了综合比较，为在不同场合下寻找满足特定性能要求的算法提供指导。

1 傅氏算法及其改进算法分析

设输入电流信号是周期函数，就可按下式展开成傅氏级数形式：

$$i(t)=\sum_{k=1}^{N} I_{mn}\sin(n\omega t+\varphi_n)=\sum_{k=1}^{N}[I_{Rn}\cos(n\omega t)+I_{In}\sin(n\omega t)] \tag{1}$$

其中：$I_{Rn}=I_{mn}\sin\varphi_n$，$I_{In}=I_{mn}\cos\varphi_n$

在傅氏算法中，全波傅氏算法和半波傅氏算法用的较多。

1.1 全波傅氏算法

根据傅氏级数理论，并加以离散化，可得到全周波傅氏算法的计算公式：

$$a_n=\frac{2}{T}\int_0^T i(t)\cdot\cos(n\omega t)\mathrm{d}t$$

$$b_n=\frac{2}{T}\int_0^T i(t)\cdot\sin(n\omega t)\mathrm{d}t \tag{2}$$

经采样后，连续量变为离散量，积分变为求离散和：

$$a_n=\frac{2}{N}\sum_{k=1}^{N}i_k\cos nk\frac{2\pi}{N}$$
$$b_n=\frac{2}{N}\sum_{k=1}^{N}i_k\sin nk\frac{2\pi}{N} \tag{3}$$

其中：N 为一个周期T中的采样数；K 为从故障开始时的采样点序号。

基波的有效值为：

$$I=\sqrt{\frac{a_n^2+b_n^2}{2}}$$

全波傅氏算法的优点是精度高、滤波效果好；能完全滤除直流分量2、3、...$N/2$次谐波分量；且稳定性好；对高频分量和按指数衰减的非周期分量所包含的低频分量也有一定的抑制作用。

1.2 半波傅氏算法

半波傅氏算法是在全波傅氏算法的基础上，利用正弦函数前半周期和后半周期的波形完全对称的特性，将数据窗缩减一半，将一个周期内的积分改为半个半周期内积分来进行计算的。半波傅氏算法的计算公式如下：

$$a_n=\frac{4}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} i(t)\cdot\cos(n\omega t)\mathrm{d}t$$
$$b_n=\frac{4}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} i(t)\cdot\sin(n\omega t)\mathrm{d}t \tag{4}$$

经采样后，积分变为求离散和：

$$a_n=\frac{4}{N}\sum_{k=1}^{N/2}i_k\cos nk\frac{2\pi}{N}$$
$$b_n=\frac{4}{N}\sum_{k=1}^{N/2}i_k\sin nk\frac{2\pi}{N} \tag{5}$$

半波傅氏算法的特点是所需的数据窗比较短，相当于全波傅氏算法的一半，因此其响应速度快，但其滤波功能较弱，不能完全滤除偶次谐波和直流分量。

1.3 改进傅氏算法综述

目前常用的改进傅氏算法有很多，介绍几种比较快速的算法：

算法一 滤除衰减直流分量误差的改进半波傅氏算法：按采样周期时间 $T_s(T_s=T/N)$，取三个数据窗 $k=[1,N/2],[2,N/2+1],[3,N/2+2]$ 按式（5）作半波傅氏变换，从而计算由半波傅氏算法中衰减直流分量引入的误差，最终得到基波分量的有效值[1]。该算法的数据窗为半周波加一个采样点，算法的程序和计算简单，适用于快速保护动作，但该算法无法求出$k=N/2$点准确值；在计算基波实部需要一个采样延时。

算法二 滤除衰减直流分量误差的改进全波傅氏算法：取两个数据窗 $k=[1,N],[N/2n,N/2n+N]$，n为所求谐波次数。按式（3）作全波傅氏变换，可求得n次谐波的实部和虚部的有效值[1]。若采用该算法同时计算几种谐波分量，则采样点N必须是它们的最小公倍数，否则无法计算。当计算基波时，数据窗是一个半周期，实时性较差。

算法三 克服衰减直流分量的傅氏递推算法：首先，在前一时刻计算第m-1次采样值的全波傅氏变换（此时序列从m-N到m-1）得到误差 $\delta_a(m-1)$，$\delta_b(m-1)$，然后再在第m次采样时，用递推的方法求出 $\delta_a(m)$、$\delta_b(m)$[5]。本算法计算量小，应用于实时保护要求比较高的场合。但它的精度相比较而言，略为逊色。

2 最小二乘法算法

设电网的电流信号，并经过将 $\mathrm{e}^{-\lambda t}$ 由泰勒级数展开后取前两项的处理，可得：

$$i(t)=p_0-p_0\lambda t+\sum_{k=1}^{m}p_k\sin k\omega_1 t\cdot\cos\theta_k+\sum_{k=1}^{m}p_k\cos k\omega_1 t\cdot\sin\theta_k+w(t) \tag{6}$$

为减少白噪声 $w(t)$ 的影响，采用最小二乘滤波原则对上式进行拟合，可得：

$$X=|A^{\mathrm{T}}\bullet A|^{-1}\bullet A^{\mathrm{T}}\bullet I \tag{7}$$

若取m=6，只要采样点数大于14，均可算出基波的参数。最小二乘法对数据窗口要求非常灵活，但误差比较大，而且计算量非常大，很难用于短路电流在线实时计算。为提高最小二乘法的实用性，减少计算量，下面介绍递推最小二乘法。

2.1 递推最小二乘校正算法描述

设采样的时间间隔T_s一定，以一条只含基波分量和某些谐波分量、不含非周期分量的函数对信号按最小二乘原则进行拟合，即：

$$\hat{i}(t)=\sum_{k=1}^{m}\hat{I}_k\sin(k\omega_1 t+\theta_k)=$$
$$\sum_{k=1}^{m}\hat{I}_{Rk}\sin k\omega_1 t\cdot\cos\theta_k+\sum_{k=1}^{m}\hat{I}_{Ik}\cos k\omega_1 t\cdot\sin\theta_k$$

$\hat{I}_{Rk}$和$\hat{I}_{Ik}$分别为第k次谐波的实部和虚部。由最小二乘法定义可知，$\hat{I}_{Rk}$和$\hat{I}_{Ik}$仍可由式(7)求得。

显然$\hat{I}_{Rk}$和$\hat{I}_{Ik}$与实际的I_{Rk}和I_{Ik}之间存在一个校正值K_{Rk}和K_{Ik}，即：

$$\begin{cases}\hat{I}_{Rk}=I_{Rk}+K_{Rk}\\ \hat{I}_{Ik}=I_{Ik}+K_{Ik}\\ I_k=\sqrt{I_{Rk}^2+I_{Ik}^2}\\ \theta_k=\arctan(I_{Ik}/I_{Rk})\end{cases}\tag{8}$$

设采样起点为t_1, $t_2=t_1+T_s$, $t_3=t_1+2T_s$为起点时，代入式(8)整理即可得校正后的实际拟合值：

$$\begin{cases}I_{Rk}=\hat{I}_{Rk}+K_{Rk}\\ I_{Ik}=\hat{I}_{Ik}+K_{Ik}\end{cases}\tag{9}$$

最小二乘校正算法的递推公式为：

$$\begin{cases}K(j)=P(j-1)x(j)\dfrac{1}{x^{T}(j)P(j-1)x(j)+1}\\ \hat{I}(j)=\hat{I}(j-1)+K(j)[i(j)-x^{T}\hat{I}(j-1)]\\ P(j)=[I-K(j)x^{T}(j)]P(j-1)\end{cases}\tag{10}$$

其中：$x(j)=[\sin(j\varpi_1T_s),\cos(j\varpi_1T_s),\ldots,\sin(j\varpi_1T_s),\cos(j\varpi_1T_s)]$；$P(j)$是$2m\times 2m$方阵，$2m$为待估计参数的个数；$\omega_1$为基波角频率；$T_s$为采样周期；$i(j)$为第$j$次采样值；$\hat{I}(j)$为第$j$次不计衰减分量的拟合值。

由式(3-6)可看出，$x(j)$，$K(j)$的计算过程与采样值无关，故在实时计算时，可离线算出$x(j)$，$K(j)$。这样，实时计算时只需在线计算式(10)，其计算量就很少。在递推最小二乘校正算法中，按该算法大约需要90次乘法和90次加法就可计算出基波。因此，只要CPU的存储空间足够大、采样速率足够快，就可增加一个周波采样的点数[6]。

3　基于小波分析的算法

基本小波$\Psi(t)$的伸缩平移系$\{\Psi_{a,b}(t)\}$通称为小波函数，记为$\Psi_{a,b}(t)=\frac{1}{\sqrt{a}}\Psi(\frac{t-b}{a})$其中，$a$、$b$分别称为尺度参数和位置参数。

任意函数$f(t)$的小波变换为该函数与小波函数的内积$W_f(a,b)=\langle f(t),\Psi_{a,b}(t)\rangle$。小波变换反映$f(t)$在尺度(频率)$a$和位置(时间)$b$的状态。

设信号$f(t)$的离散序列为$f(n)$，$n=1,2,\cdots,N$；其离散二进小波变换为：

$$\begin{aligned}C_{j+1}(n)&=\sum_{k\in Z}h(k-2n)C_j(k)\\ D_{j+1}(n)&=\sum_{k\in Z}g(k-2n)C_j(k)\end{aligned}\tag{11}$$

其中：$h(k)$和$g(k)$为小波函数$\Psi_{a,b}(t)$确定的滤波器系数，且$g(k)=(-1)^{1-k}h(1-k)$，C_j和D_j分别是信号在尺度j上的近似部分和细节部分。

原始信号可看作是尺度j=0时的近似值，即$C_0(n)=f(n)$。离散信号经尺度j=1，2，…，J的分解，得到D_1，D_2，…，D_J。若原信号的分析频率为f，则分解结果对应频带分别为$(2^{-1}f\sim f)$，$(2^{-2}f\sim 2^{-1}f)$，…，$(2^{-J}f\sim 2^{-J-1}f)$，$(0\sim 2^{-J}f)$包括了从高频到低频的不同频带的信息，而且各频带互不重叠。实际应用时，知道滤波器系数$h(k)$，就能进行分解和重构的计算。

小波变换具有时间域和频率域的局部性，而且时窗和频窗的宽度均可调，因此是检测信号局部性质突变的有效工具。当取小波基函数为平滑函数的一阶导数时，信号的小波变换的模在信号突变点取得局部极大值。

若$y(x)$是平滑函数，满足$\int_{-\infty}^{0}y(x)\mathrm{d}x=1$和$\lim_{|x|\to\infty}y(x)=0$。则可取$\Psi(x)=\mathrm{d}y(x)/\mathrm{d}x$作为检测的小波来检测电流信号的异常情况，引入尺度因子a，令$y_a(x)=\frac{1}{a}y(\frac{x}{a})$，则相应的小波变换为$Wf(a,x)=f^*\Psi_a(x)=f^*(a\frac{\mathrm{d}y_a}{\mathrm{d}x})(x)=a\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}(f*y_a)(x)$对固定尺度$a$，$|Wf(a,x)|$的局部极大值点对应于发生短路的时间点。

4　几种算法的比较

傅氏及其改进算法主要对周期信号进行处理。半波傅氏算法响应速度比较快，但其滤波功能弱，不能完全滤除偶次谐波和直流分量，故受衰减直流分量的影响极大，计算结果可能产生严重失真。全波傅氏算法精度高、滤波效果较好；能完全滤除直流分量

及各次谐波分量；对高频分量和按指数衰减的非周期分量所包含的低频分量有抑制作用，因此，能在很大程度上滤除衰减直流分量的影响。改进的傅氏算法都能较好地消除衰减直流分量的影响，它们结合了全波与半波傅氏算法的优点，因此应用广泛。

最小二乘法对数据窗口要求非常灵活，需要半个周波以上的采样窗口才能准确计算出基波或各次谐波分量值，但容易受直流衰减分量和白噪声的影响。递推最小二乘校正算法能够消除衰减分量对计算结果的影响，减少计算量，提高计算速度。但该算法对电网的时间常数不敏感，在不同时间常数下均能算出正确的结果，该算法受短路相位角的影响很小。

使用小波变换的算法处理短路电流信号可以缩短动作时间，提高抗干扰性。但是小波变换的算法为了得到理想的性能，需要足够多的信息，每周期采样点数达到几百个，造成微处理器的计算负担重，这是实际应用小波算法的障碍之一。另外，小波变换对于信号的非连续性很敏感，在实际应用中难以设计出合适的判据，容易发出误判信号，降低了脱扣器的可靠性。

目前有趋势使用基于小波分析和傅氏算法结合的算法。先小波算法判断出的信号不连续点为可疑故障点，再采用傅氏算法在可疑故障点处开始计算信号的有效值，根据是否超过门槛值确定真正的故障情况。这样使小波算法和傅氏算法的优缺点互补，达到精确判断的效果。

5 结论

本文对应用于电力系统智能保护的几种算法：傅氏算法及其改进算法；最小二乘法及其递推算法；小波分析算法分别进行了描述及分析，总结了它们的优缺点。根据应用的场合不同及选择的运算 CPU 不同，各种算法有各自优势。但在 CPU 运行速度较快的条件下，并根据实验数据，改进的傅氏算法及递推最小二乘法优于其他方法，更适用于要求快速切除故障的场合。文章最后提出的基于小波分析和傅氏算法的方法属于比较新的课题，这种方法的快速和精确性有待验证。

参考文献

[1] 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.

[2] 马磊，王增平，徐岩. 微机继电保护中滤除衰减直流分量的算法研究[J]. 继电器, 2005, 33(17): 11-13，34.
MA Lei, WANG Zeng-ping, XU Yan. Study of Filtering Decaying DC Component Algorithm for Microprocessor—based Protection[J]. Relay, 2005,33(17):11-13，34.

[3] YU Sun-li,GU Jyh-cherng. Removal of Decaying DC in Current and Voltage Signals Using a Modified Fourier Filter Algorithm[J].IEEE Trans on Power Delivery,2001 16(3),372-379.

[4] 赵新红，苏文辉. 一种能滤除衰减直流分量的改进半波傅氏算法[J]. 水力发电，2003, 29(6): 43-45.
ZHAO Xin-hong, SU Wen-hui. An Improved Half-wave Fourier Algorithm for Filtering the Decaying DC Component[J]. Water Power, 2003,29(6):43-45.

[5] 李晨，张杭，张爱民，等. 一种能滤除衰减直流分量的新递推离散傅氏算法[J]. 继电器，2005, 33(17): 17-20.
LI Chen, ZHANG Hang, ZHANG Ai-min,et al. A Recursive Discrete Fourier Algorithm for Filtering Decaying DC Component[J]. Relay，2005,33(17):17-20.

[6] 郑清水，马志瀛. 短路电流实时计算的递推最小二乘校正算法[J]. 高压电器，2004, 40(4): 241-244.
ZHENG Qing-shui, MA Zhi-ying. Recursive Least Square Correction Algorithm for Short-circuit Current Real-time Calculation[J]. High Voltage Apparatus, 2004,40(4):241-244.

[7] 王敬，张桂青，王建华. 小波分析应用于智能脱扣器算法的探讨[J].
WANG Jing, ZHANG Gui-qing, WANG Jian-hua. The Dicuss of Algorithm of Intellectual Trip Based on Wavelet Analysis[J].

[8] 陈德树. 计算机继电保护原理与技术[M]. 北京：北京水利电力出版社，1992.
CHEN De-shu. Principle and Technology of Computer Relay Proction[M].Beijing:Hydraulic and Electric Power Press,1992.

[9] 罗抟翼，程桂芳. 随机信号处理与控制基础[M]. 北京：化学工业出版社，2002.
LUO Tuan-yi, CHENG Gui-fang. Foundation Controlling and Disposal of Random Signal[M]. Beijing:Beijing Chemical Industry Press,2002.

收稿日期：2006-09-27　　收稿日期：2006-11-23

作者简介：

陈燕坤（1980-），男，在读硕士，研究方向为新电工理论与技术；E-mail: garrand@gmail.com

王　毅（1958-），男，教授，博士生导师，研究方向为电力系统监测、诊断与控制，真空开关理论和应用。