

Morlet 复小波算法在自适应电流保护中的应用研究

揭林玲¹, 唐昆明¹, 张太勤²

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 重庆新世纪电气有限公司, 重庆 400030)

摘要: 自适应电流保护算法中关键之一是实时而准确地计算系统等值参数。一般傅氏算法在计算系统等值阻抗时受短路电流非周期分量和电网频率不稳定的影响, 会产生较大的误差。而 Morlet 复小波算法具有频率特性好, 不受非整数谐波、非周期分量及电网频率波动的影响, 因此本文提出了采用全周 Morlet 复小波算法计算系统等值参数的方法, 通过选择合理的 Morlet 复小波函数参数, 提取配电网典型故障电流电压的工频分量来计算系统等值参数。经仿真分析表明用该方法实时计算等值参数, 精度高, 能满足保护性能要求, 具有很高的工程实用价值。

关键词: 配电网; 电流保护; 自适应保护; 傅氏算法; Morlet 复小波

Study on application of Morlet complex wavelet on adaptive current protection

JIE Lin-ling¹, TANG Kun-ming¹, ZHANG Tai-qin²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipments & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing New Century Electrical Co, Ltd., Chongqing 400030, China)

Abstract: Real-time calculating system equivalent parameters is one of keys of adaptive current protection. Full-wave Fourier algorithm will cause high error because of the non-periodic component and unstable power frequency. A Morlet complex wavelet based algorithm is presented which is better than general Fourier algorithm in stability and robustness and is unaffected by non-integer harmonics, non-periodic component and fluctuant frequency. The algorithm is to choose proper parameters and filter out fundamental frequency components of typical faults voltages and currents. The results of simulation show that the complex wavelet algorithm is of high accuracy and can satisfy adaptive protection's need, so it is highly valuable for engineering practice.

Key words: distribution system; current protection; adaptive protection; Fourier algorithm; Morlet complex wavelet

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)22-0040-04

0 引言

电流保护是我国目前中低压配电网相间故障的主保护。随着对电流保护动作性能要求的提高, 在微机电流保护基础上提出了自适应电流保护, 它能根据电力系统运行方式和故障状态的变化而实时改变保护定值。自适应电流保护的实现需要解决两个关键问题: 实时监测系统运行状态和快速判定故障类型。实时监测运行状态与快速判定故障类型都需要精确提取稳态相量的幅值与相位。常用的方法有两点乘积法、半周积分算法、半周傅氏算法及全周傅氏算法等。前三种算法数据窗短, 计算量小, 反应快, 但是误差很大。全周傅氏算法以及改进的傅氏算法数据窗稍长, 但是计算精度高, 是目前常用的方法。但当电网频率不稳定或计算短路初始阶段的过渡过程含有非周期分量和丰富的谐波时, 也会出现较大的误差。

Morlet 复小波在时、频域具有良好的特性, 可精确获得信号某一频率的幅值与相位。本文将离散化的 Morlet 复小波应用于自适应电流保护的等值参数实时计算中, 为自适应电流保护的实时参数的精确计算提供了保证。

1 自适应电流保护原理

自适应电流速断保护能根据当前电力系统实际运行方式和故障状态实时、在线确定故障发生时的故障类型系数 K_d 和系统电源侧实际阻抗 Z_s , 进而计算出电流整定值, 其整定公式^[1]为:

$$I'_{op.1} = \frac{K_{rel}^1 K_d E_\phi}{Z_s + Z_K} \quad (1)$$

该式与传统速断保护整定公式的区别除了多出一个故障类型系数 K_d 之外, 还在于电源侧阻抗 Z_s 与系统等效电源的相电势 E_ϕ 都不再是常数, 这些参

数都需要根据实测的电流电压数据计算得到。

根据故障分量原理^[1], 保护安装处到电源处的等效阻抗 $Z_S = -\dot{U}_{mg} / \dot{I}_{mg}$, 如图 1 所示。

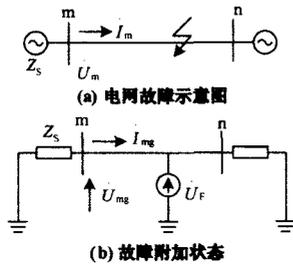


图 1 电网故障及其附加状态

Fig.1 Fault network and fault additional network of power system

\dot{U}_{mg} 和 \dot{I}_{mg} 为故障时保护安装处电压与电流的故障分量。当发生不对称短路时, 可利用电压、电流正序故障分量来计算。 \dot{U}_{mg} 和 \dot{I}_{mg} 是通过故障时保护设置处的测量值及正常运行时保护安装处的测量值间接计算得出。考虑到保护的速动性, 如何在短路后快速准确得到稳态电压故障分量 \dot{U}_{mg} 和稳态电流故障分量 \dot{I}_{mg} 是实现自适应电流速断保护的关键。

根据叠加原理, 可将故障时的电网分解成一个正常运行状态的有源网络与一个故障附加的无源网络^[1]。故障信息蕴含在故障附加网络中, 则有故障分量=故障后实测信息-故障前实测信息, 即有

$$\begin{cases} U_{mg} = U_m - U_g \\ I_{mg} = I_m - I_g \end{cases} \quad (2)$$

写成采样值的形式为:

$$\begin{cases} u_{mg}(k) = u_m(k) - u_m(k-N) \\ i_{mg}(k) = i_m(k) - i_m(k-N) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $u_m(k)$ 和 $i_m(k)$ 分别为保护安装处故障时采样值, $u_m(k-N)$ 和 $i_m(k-N)$ 正常运行时电压电流的采样值, $u_{mg}(k)$ 和 $i_{mg}(k)$ 为电压电流故障分量的瞬时值, N 为每工频周期的采样点数。下面介绍采用不同的方法从采样值中得到稳态幅值。

2 常规傅氏算法及改进算法

常规全周傅氏算法具有良好的滤波作用, 在工程上有广泛的应用。根据傅氏级数理论, 并加以离散化, 可得到电压信号 $u(t)$ 基频余弦分量幅值和正

弦分量幅值的计算公式^[2]:

$$U_c = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cos(\omega t) dt = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N u(k) \cos \frac{2\pi k}{N} \quad (4)$$

$$U_s = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \sin(\omega t) dt = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N u(k) \sin \frac{2\pi k}{N} \quad (5)$$

幅值为:

$$U = \sqrt{U_s^2 + U_c^2} \quad (6)$$

全周波傅氏算法的数据窗是一个周波, 它可以完全消除直流分量和各整次谐波分量的影响, 但当输入信号中含有衰减直流分量和非整次谐波时, 将会给计算的基频分量带来很大误差。

一种方法是在进行傅立叶算法前先对输入信号进行一次一阶差分滤波^[3], 另一种方法是对基本傅立叶算法进行改进, 如引入补偿系数^[4]的改进算法可以减小衰减直流分量的影响, 但是若故障暂态信号中还含有大量的非整次谐波时以上两种改进算法仍会有一定误差, 并且在电网频率发生波动时, 也会给计算带来误差。

3 Morlet 复小波算法

傅立叶算法采用的是矩形窗函数, 若选择 Gauss 函数作为窗函数, 就是 Morlet 复小波算法^[5,6], 其形式为:

$$\begin{aligned} \psi(t) = & \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} e^{j\omega_0 t} e^{-t^2/f_b} = \\ & \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} e^{-t^2/f_b} (\cos \omega_0 t + j \sin \omega_0 t) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $\omega_0 = 2\pi f_c$, f_c 为中心频率; f_b 为带宽。实际工作中取 $\omega_0 \geq 5$, 以近似满足容许性条件。

Morlet 复小波由于采用的是时频窗面积最小的高斯窗, 时频域局部化性最好, 而且对称性好, 并且由于为复值小波, 其变换结果可同时反应信号的幅值和相位关系, 其离散表达式^[7,8]为:

$$\begin{aligned} \Psi(n) = & \tau \cdot \Psi_0(n) = \\ & \tau \cdot \exp\left(-\frac{6n}{mN} - 3\right)^2 / c \cdot \exp(j2kn\pi / N) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: τ 为满足归一化条件的比例系数,

$$\tau = mN / \sum_{n=0}^{mN-1} |\Psi_0(n)| n$$

m 为时间窗大小, $m=0.5, 1, 2, 3, \dots$, 当 m 分别取 1、2、3 时, 对应的小波为全周、2 周、3 周 Morlet 复小波; N 为一周采样点数; c 为频宽调节系数; k 为谐波次数, $k=1$ 时为基波; n 为小波函数的离散点数, $n=0, 1, 2, \dots, mN-1$ 。

由上式可得 Morlet 复小波的实部、虚部的离散表达式为:

$$\Psi_R(n) = \tau \cdot \exp\left(-\left(\frac{6n}{mN} - 3\right)^2 / c\right) \cdot \cos(2kn\pi / N) \tag{9}$$

$$\Psi_I(n) = \tau \cdot \exp\left(-\left(\frac{6n}{mN} - 3\right)^2 / c\right) \cdot \sin(2kn\pi / N) \tag{10}$$

则对于某一信号 $f(n)$ 的离散小波变换为:

$$W_f(n) = f(n) * \overline{\Psi(n)} = |W_f(n)| \exp(j\varphi_f(n)) \tag{11}$$

其中: $\varphi_f(n) = \arg(W_f(n))$, “*” 表示卷积。

假设 $f_s=1\ 200$ Hz, $f=50$ Hz, 则 $N=24$; 取 $c=2$, 当 m 分别取 1, 3 即全周和 3 周时 Morlet 复小波的频域波形如图 2 所示。

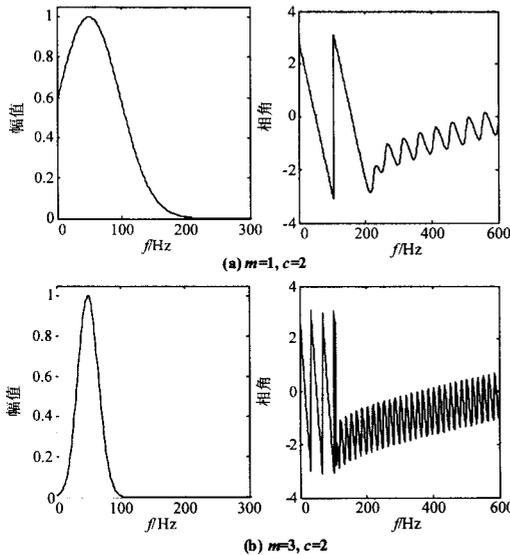


图 2 Morlet 复小波幅频特性图

Fig.2 Amplitude frequency response characteristics of Morlet complex wavelet

由图 2 可以看出, Morlet 复小波在时频域的支撑能力很好, 因此可适应信号频率的小范围波动。在中心频率 50 Hz 附近的频宽内, 相频响应保持线性, 而在其他频段则畸变为非线性。同时与傅里叶

算法相比, Morlet 复小波算法对高频和非整次分量的抑制能力更好。

在实际计算中, 通常先确定式(8)中的 m, c, N 值, 再求取式(9)、式(10)中实部与虚部, 最后根据(11)求取基波或各次谐波幅值与相位。 m 为所选取的时间窗宽度, 全周 Morlet 复小波数据点为 24 点, 而三周 Morlet 复小波数据点为 72, 即随 m 的增加, 算法的计算量增加, 收敛时间变长。 m 越大, 算法的频率特性越窄, 对其他频率的抑制能力越强。另外 m 对算法的稳定性没有影响。参数 c 用来调节 Morlet 小波频宽, 有限的窗宽 m 必然会带来频率特性中旁瓣的问题, 进而导致旁瓣频率对中心频率幅值、相位特性的极大干扰, 从而影响算法的稳定性, 但与收敛时间及计算量无关。

取 $N=24, m=3$, 当 c 分别取 4, 6 时, Morlet 复小波的幅频特性如图 3 所示。

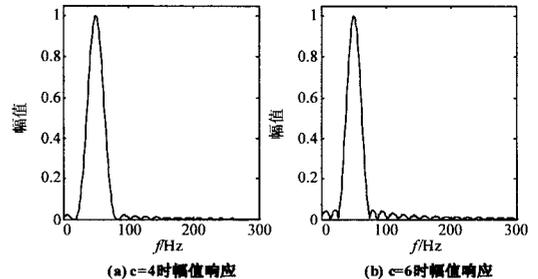


图 3 Morlet 复小波的幅频响应 ($m=3$)

Fig.3 Amplitude response characteristics of Morlet complex wavelet ($m=3$)

由图 2(b)和图 3 可见, 随着 c 的增大, 幅频响应曲线中中心频率两侧上升和下降的斜率变陡, 频带宽度变窄, 另一方面又会导致旁瓣增加, 使得幅值估算值的波动率变大。

在后面的计算中取 $m=1, c=4, N=24$ (即采样频率为 1 200 Hz)。 m 取 1 时即为全周 Morlet 复小波算法, 数据窗为一个工频周期, 计算量与全周傅氏算法相当, 那么在下面的仿真分析中, 比较两种算法的精度。

4 算例分析

为了深入分析 Morlet 复小波算法在自适应电流保护中应用的可行性, 分下面两步仿真验证。

(1) 假设短路故障电流信号不仅含有衰减的直流分量, 而且电网的频率也发生了波动, 为了放大频率波动的影响, f_0 取为 52 Hz, 输入信号如下:

$$x = 10 \cdot \exp(-t \cdot 100/3) + 40 \cdot \sin(104 \cdot \pi \cdot t + \pi/6) + 4 \cdot \sin(208 \cdot \pi \cdot t) + 10 \cdot \sin(312 \cdot \pi \cdot t) + 2 \cdot \sin(416 \cdot \pi \cdot t) + 6 \cdot \sin(520 \cdot \pi \cdot t)$$

分别用全周傅立叶算法与Morlet复小波算法计算该信号的基波幅值, 结果如图4所示。

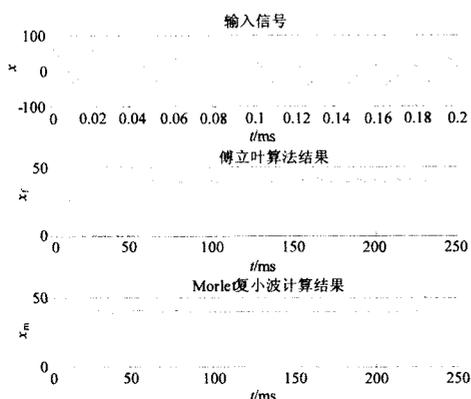


图4 仿真计算结果

Fig.4 Results of simulation

由图4的仿真结果可以看出, 当输入信号含有衰减直流分量或电网频率不为50 Hz时, 计算基波幅值时全周傅立叶算法波动较大, 最大误差为6.235%, 而Morlet复小波算法趋于稳定, 最大误差为3.25%。而当 $f_0 = 50 \pm 0.5$ Hz时, Morlet复小波算法的最大误差也小于全周傅立叶算法。

(2) 以图5所示的电网^[9]计算系统侧等效阻抗

在图5的模型中, 等效电源阻抗 $Z_S = 3 + j10 \Omega$, 线路 $Z_1 = Z_2 = 4 + j11 \Omega$, 负荷 $Z_F = 124 + j60 \Omega$, 电

源电势 $e(t) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times 38.5 \sin(\omega t + \theta_e)$, θ_e 为相电势初始相角。

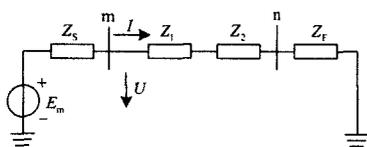


图5 算例模型

Fig.5 Example model

设在线路mn上 Z_1 、 Z_2 之间发生三相短路, 通过程序记录保护安装处故障前后的相电压、相电流采样数据, 然后根据前文所提到的公式, 利用Matlab计算程序进行仿真计算系统阻抗, 计算结果如表1所示。

由表1的计算结果可见, 在计算系统侧等效阻抗时, Morlet复小波算法准确度比全周傅立叶算法高, 尤其是在 θ_e 取 120° 时, 傅立叶算法计算误差高达24.4%, 这对继电保护来说是不容许的, 而此时Morlet复小波算法的误差只有4.1041%, 精度较高。

表1 仿真计算结果

Tab.1 Results of simulation calculation

θ_e /($^\circ$)	傅氏算法		Morlet 算法	
	Z_S	ΔZ_S / (%)	Z_S	ΔZ_S / (%)
0	10.997 9	5.3409	9.979 9	-4.410 3
30	9.794 7	-6.184 0	9.845 2	-5.700 2
60	9.854 7	-5.608 9	10.144 2	-2.8364
90	11.143 5	6.735 9	10.659 1	2.095 8
120	12.987 2	24.395 0	10.868 8	4.104 1
150	12.891 6	23.478 8	10.479 2	0.372 9
180	10.997 9	5.340 9	9.979 9	-4.410 3

(注: 当 θ_e 取 $180^\circ \sim 360^\circ$ 时, 结果与 $0^\circ \sim 180^\circ$ 类同, 不再列出。)

5 结论

在自适应电流速断保护中, 系统侧等效阻抗、等效相电势等变量都需要实时计算, 它们的准确与否直接决定了保护性能好坏。Morlet复小波算法在计算信号的基波幅值上比傅立叶算法具有更好的频率特性和稳定性, 受频率波动影响较小, 对整次及分数次谐波的抑制能力更好, 且计算工作量增加不大, 能够完全满足自适应电流速断保护中参数计算的实时性与精确性要求。

参考文献

- [1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
- [2] 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.
- [3] 陈皓. 微机保护原理及算法仿真[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [4] 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): 6-8.
HOU You-tao, ZHANG Ju. A Fast Algorithm for Decaying DC Component Filtration[J]. Relay, 2004, 32(6): 6-8.
- [5] 黄群古, 任震, 黄雯莹. 基于幅频特性的复值小波构造及其在电力系统信号分析中的应用[J]. 继电器, 2001, 29(5): 1-4.
HUANG Qun-gu, REN Zhen, HUANG Wen-ying. The Construction of Complex Wavelets Based on Amplitude-frequency Characteristics and their Application for Fault Signal Analysis in Power Systems[J]. Relay, 2001, 29(5): 1-4.
- [6] 苏鹏声, 王欢. 短窗 Morlet 复小波用于电力系统信号处理的探讨[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(9): 36-42.

(下转第 48 页 continued on page 48)

4 结论

考虑误差补偿的傅立叶测频法,与普通傅立叶算法相比,减小了泄露误差的影响,提高了测量精度。与采用高性能窗的傅立叶测频法相比,由于算法初始化后采样只需2周期,计算的时间复杂度仍为 $O(n\log(n))$,因此实时性更好。

参考文献

- [1] Phadke A G, Thorp J S, Adamiak M G. A New Measurement Technique for Tracking Voltage Phasors, Local System Frequency, and Rate of Change of Frequency[J]. Trans TIEE Power Apparatus and Systems, 1983, 102(5): 1025-1034.
- [2] Sachdev M S, Giray M M. A Least Error Squares Technique for Determining Power System Frequency[J]. IEEE Trans on PAS, 1985, 104(2):437-443.
- [3] 杜永忠, 牛金才. 一种基于 CROSS 原始算法的频率测量法[J]. 电气传动自动化, 2001, 23(3):34-35.
DU Yong-zhong, NIU Jin-cai. A Method of Frequency Measurement Based on CROSS Algorithm[J]. Electrical Drive Automation, 2001, 23(3):34-35.
- [4] 贺建闵, 黄治清. 基于相位差校正的电网频率高精度测量[J]. 继电器, 2005, 33(14):43-47.
HE Jian-min, HUANG Zhi-qing. Power System Frequency High-precision Measurement Based on Phase Different Correction Method[J]. Relay, 2005, 33(14):43-47.
- [5] 磨少清, 李啸骢. 一种高精度的改进傅里叶测频算法. 电力系统自动化, 2003, 27(12):48-49.
MO Shao-qing, LI Xiao-cong. An Improved High-accuracy Algorithm for Frequency Measurement Based on Fourier Transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12):48-49.
- [6] 王绍辉, 柯献辉, 许珉. 考虑负频分量影响的 FFT 插值算法[J]. 继电器, 2008, 36(11):33-36.
WANG Shao-hui, KE Xian-hui, XU Min. FFT Interpolation Algorithm Considering the Effect of Negative Frequency Component[J]. Relay, 2008, 36(11):33-36.
- [7] 刘益青, 袁文广. 一种用于频率偏移时有效值计算的修正方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2):81-83
LIU Yi-qing, YUAN Wen-guang. Modified Method for Virtual Value Measurement with Frequency Deviation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2):81-83.

收稿日期: 2008-11-26; 修回日期: 2009-01-08

作者简介:

朱旻捷(1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力设备在线监测、电能质量; E-mail:zmjie@sjtu.edu.cn

张君(1976-), 男, 博士研究生, 讲师, 上海电机工程学会、IEEE 会员, 主要研究方向为配电自动化与保护、电力设备在线监测与故障诊断;

秦虹(1978-), 女, 本科, 工程师, 从事继电保护远动技术管理工作。

(上接第 43 页 continued from page 43)

SU Peng-sheng, WANG Huan. Discussion of the Short-window Morlet Complex Wavelet Algorithm on the Power System Signal Process[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(9):36-42.

- [7] 程伟, 徐国卿, 牟龙华. 基于 Morlet 复小波的牵引网故障相量估算法研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(2): 108-113.

CHENG Wei, XU Guo-qing, MU Long-hua. Study of Morlet Complex Wavelet Based Phasor Estimation Algorithm for Traction Line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(2):108-113.

- [8] 李中伟. 供配电线路自适应保护系统的算法与通信研究(博士学位论文)[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

- [9] 袁兆强, 牛祖衡. 自适应电流速断保护中实时计算系统

参数算法研究[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(9): 21-23, 34.

YUAN Zhao-qiang, NIU Zu-heng. Algorithm Study of Real-time Calculating System Parameters for Adaptive Current Fast-tripping Protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(9): 21-23, 34.

收稿日期: 2008-11-12

作者简介:

揭林玲(1982-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护及自动化; E-mail: jielinling@126.com

唐昆明(1959-), 男, 副研究员, 主要研究方向为电力系统继电保护及自动化;

张太勤(1966-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护及自动化产品研发工作。