

基于小波多尺度分析和 Kalman 滤波的微机保护算法

吕思颖, 裴 昂, 秦 昕, 要 航

(广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 提出了一种新的微机保护算法。采用小波多尺度变换对采集信号进行分解得到平滑信号和细节信号, 在细节信号上利用模极大值法确定异常发生与否及其产生时刻。异常产生后进入故障处理程序, 启动 Kalman 滤波器。利用平滑信号更新滤波器的观测值, 减少故障信号暂态噪声的干扰, 提高了滤波算法的收敛速度; 利用细节信号实时在线计算测量噪声的方差, 提高了滤波算法的收敛精度; 小波分析对故障进行初次检测和判断, 而滤波器估计出故障信号基波分量结合继电保护原理对故障进行再次判断, 提高了保护算法的可靠性。在 Matlab/Simulink 环境下搭建仿真模型对算法进行验证与测试, 仿真结果证实了算法的可行性和有效性。

关键词: 小波变换; 多尺度分析; 模极大值; Kalman 滤波; 微机保护算法

Microprocessor-based protection algorithm based on wavelet multi-scale analysis and Kalman filter

LÜ Siying, PEI Chan, QIN Xin, YAO Hang

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: A new microprocessor-based protection algorithm is presented. The sampling signals are decomposed to smooth signals and detail signals by multi-scale wavelet transform. Utilizing modulus maximum method for detail signals to determine whether or not an exception occurs and when it occurs. Entering the fault handler once the exception generates and activating the Kalman filter. The smooth signals are adopted to update the observations of the filter to reduce the interference of fault signals' transient noise, which can improve the convergence speed of the filter algorithm. Detail signals are adopted to calculate the measurement noise variance in real-time to improve the convergence precision of the filter algorithm. Wavelet analysis method can detect and judge the fault for the first time, while the estimated fundamental frequency component of fault signals combined with relay protection principle are adopted to judge the fault again, which can improve the reliability of the protection algorithm. The Matlab/Simulink simulation system is built and the results show the feasibility and effectiveness of the algorithm.

Key words: wavelet transform; multi-scale analysis; modulus maximum; Kalman filter; microprocessor-based protection algorithm

中图分类号: TM771

文章编号: 1674-3415(2015)21-0054-06

0 引言

电力系统微机继电保护装置从输入电气量的采样数据中计算出电参数的量值, 然后与整定值进行比较、判断, 完成保护功能^[1]。如何有效滤除故障信号中的暂态噪声并快速、准确地提取出电参量是国内外学者研究热点问题^[2-8]。目前, 在各种微机继电保护中, 普遍采用半波和全波 Fourier 算法^[9-11]求取故障信号的基波相量进行故障判断。全波 Fourier

可以有效滤除恒定直流分量和整数次谐波, 但对信号中的衰减直流分量、非整数次谐波分量滤波效果较差, 对频率偏移比较敏感, 且数据窗长度为一个周波, 响应时间较长。半波 Fourier 数据窗长度为半个周波, 运算量比全波 Fourier 减少一半, 响应速度快, 可以有效滤除奇次谐波分量, 但是不能抑制偶次谐波和衰减直流分量, 精度不高。Girgis 等人将 Kalman 滤波引入到微机继电保护领域, 以期提高 Fourier 算法的计算精度和速度^[12-13]。Kalman 滤波能够有效抑制各次谐波和衰减直流分量, 对频率偏移很好的适应性。且 Kalman 滤波只需要当前

基金项目: 广西研究生教育创新计划项目 (YCSZ2014041)

周期的采样值, 而不需要保存历史数据, 和其他滤波算法相比计算量和储存量大为减少, 能够实时在线计算。

Kalman 滤波因其较高的收敛精度和较快的收敛速度, 在微机保护中得到了越来越广泛的重视和应用^[14]。但是, 故障信号中的大量暂态噪声延迟了滤波器的收敛速度, 而故障信号模型和噪声统计特性的不精确降低了滤波器的收敛精度。小波变换^[15]在时域和频域上都有良好的局部化性质, 适用于突变信号的捕捉和干扰噪声的抑制。信号通过小波变换得到不同尺度下的平滑信号和细节信号, 平滑信号包含已经滤除了部分观测噪声的信号有效信息, 而噪声分布在细节信号中。模极大值点可反映函数的局部特异性^[16], 通过检测细节信号的模极大值点可判断是否发生异常及异常产生时刻。

针对基于 Fourier 变换或 Kalman 滤波的微机保护算法的不足, 本文提出了基于小波多尺度分析和 Kalman 滤波的微机保护算法。采用小波多尺度分析方法确定信号的异常点并初步滤除故障信号的暂态噪声, Kalman 滤波在检测到信号异常后启动, 利用小波分解后的信号更新观测模型, 滤波器估计出的基波分量结合继电保护原理对故障进行判断。在 Matlab/Simulink 环境下搭建仿真模型对算法进行验证与测试。

1 小波多尺度分析

1.1 小波变换

$L^2(\mathbb{R})$ 为 \mathbb{R} 上平方可积函数构成的函数空间, 设 $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$, $\psi(t) \in L^2(\mathbb{R})$, 若 $\psi(t)$ 的 Fourier 变换 $\hat{\psi}(\omega)$ 满足容许条件:

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} |\omega|^{-1} |\hat{\psi}(\omega)|^2 d\omega < \infty \quad (1)$$

则称 ψ 为母小波(或基小波)。母小波经过尺度伸缩和位置平移后生成小波序列:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

式中: a 是尺度因子; b 是平移因子; $a, b \in \mathbb{R}$ 且 $a \neq 0$ 。函数 $f(t)$ 关于母小波 ψ 的连续小波变换定义为

$$(W_\psi f)(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

式中, $\bar{\psi}$ 是 ψ 的共轭复函数。

实际应用采用小波变换的离散形式, 取 $a = a_0^m$, $b = nb_0 a_0^m$ ($m, n \in \mathbb{Z}$), 离散小波变换为

$$(W_\psi f)(a, b) = |a|^{-m/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \bar{\psi}(a_0^{-m} t - nb_0) dt \quad (4)$$

1.2 多尺度分析

多尺度分析(多分辨率分析)将信号用正交变换在不同的尺度上进行分解, 分解得到不同尺度下对原始信号连续逼近的平滑信号以及对原始信号连续细节的细节信号。采用 Mallat 快速算法将信号 $f(t)$ 分解成不同频率成分^[17]:

$$f(t) = A_j f + \sum_{j+1}^J D_j f \quad (5)$$

式中: J 是小波分解的层数, $j=1, 2, \dots, J$; $A_j f(t)$ 是在尺度 j 下的平滑信号, 即信号 $f(t)$ 的频率不超过 2^{-j} 的低频成分; $D_j f(t)$ 是尺度 j 下的细节信号, 即信号 $f(t)$ 的频率介于 2^{-j} 与 $2^{-(j-1)}$ 的高频成分。

1.3 模极大值

采用检测信号小波变换细节信号模极大值点的方法来确定信号异常点。在尺度 \tilde{a} 下, 若点 (\tilde{a}, \tilde{b}) 满足 $\partial(W_\psi f)(\tilde{a}, \tilde{b})/\partial b = 0$, 且 \tilde{b} 的某一邻域内的任意点 b 有 $|(W_\psi f)(\tilde{a}, b)| \leq |(W_\psi f)(\tilde{a}, \tilde{b})|$, 则 (\tilde{a}, \tilde{b}) 为小波变换的模极大值点。计算模极大值 W_{\max} 与设定的阈值 W_{set} 比较: 若 $W_{\max} > W_{\text{set}}$, 模极大值点是信号异常点, 启动 Kalman 滤波; 否则, 模极大值点不是异常点。

2 Kalman 滤波

2.1 算法原理

Kalman 滤波是一种高效率的自回归滤波器, 其基本思想是根据系统的状态方程和观测方程, 从一系列不完全及包含噪声的测量中估计出动态系统的状态^[9]。对电力系统故障后的暂态信号建立合适的状态方程和观测方程, 利用 Kalman 滤波算法能够估计出基波分量和谐波分量。设有线性系统, 其状态方程为

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{F}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{G}_k \mathbf{W}_k \quad (6)$$

观测方程为

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \quad (7)$$

其中: k 是采样次数; 过程噪声 \mathbf{W}_k 和观测噪声 \mathbf{V}_k 是均值为零, 服从高斯分布的白噪声; 协方差矩阵分别为 \mathbf{Q}_k 和 \mathbf{R}_k 。Kalman 滤波算法步骤如下:

Step1: 状态预测 $\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} = \mathbf{F}_k \mathbf{X}_{k-1|k-1}$

Step2: 观测值预测 $\mathbf{Z}_{k|k-1} = \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}$

Step3: 协方差预测 $\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{F}_k \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{F}_k^T + \mathbf{Q}_k$

Step4: 更新增益 $\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1}$

Step5: 更新状态 $\hat{X}_{k|k} = \hat{X}_{k|k-1} + K_k (Z_k - Z_{k|k-1})$

Step6: 更新协方差矩阵 $P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1}$

2.2 状态方程与观测方程

利用 Kalman 滤波估计故障信号基波分量的详细推导过程见文献[12-13], 主要有电压和电流两种模型。

(1) 两状态电压模型

设无噪声的电压信号 $s(t) = A \sin(\omega_0 t + \theta)$, A, θ, ω_0 分别为幅值, 相角, 基频角速度, 存在以下分解:

$$s(t) = [\sin \omega_0 t, \cos \omega_0 t] [x_1, x_2]^T \quad (8)$$

式中, $[x_1, x_2] = [A \cos \theta, A \sin \theta]$ 。对上式进行离散化并考虑观测噪声 V_k 得到观测方程:

$$Z_k = [\sin \omega_0 k T_s, \cos \omega_0 k T_s] [x_1, x_2]^T + V_k \quad (9)$$

式中, T_s 为采样周期。系统矩阵 F_k 取单位阵, 过程噪声 W_k 取零, 可得状态方程:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}_k \quad (10)$$

(2) 三状态电流模型

故障的电流信号中存在较大的衰减直流分量, 为提高估计精度, 在滤波器中增加一个状态量对其进行处理。设第 k 个采样周期的衰减直流分量为 i_k , 则有:

$$i_{k+1} = i_k e^{(-T_s/T_d)} = i_k e^{-\beta T_s} \quad (11)$$

式中: T_d 是衰减时间常数; $\beta = 1/T_d$ 。系统状态方程:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\beta T_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ w_k \end{bmatrix} \quad (12)$$

观测方程:

$$Z_k = [\sin \omega_0 k T_s, \cos \omega_0 k T_s, 1] [x_1, x_2, x_3]^T + V_k \quad (13)$$

2.3 基于小波多尺度分析的观测模型

将故障信号 $f(t)$ 进行 N 层小波分解, 得到 N 层平滑信号 $\{f_a^1, f_a^2, \dots, f_a^N\}$ 和细节信号 $\{f_d^1, f_d^2, \dots, f_d^N\}$, 根据多尺度分析可得以下关系:

$$f_a^i = f_a^{i+1} + f_d^{i+1} \quad (14)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, N-1$ 。小波变换具有低通滤波效应, 经过小波分解后的平滑信号测量噪声大大减少, 且分解层数越高噪声越少。因此, 选择第 $N-1$ 层平滑信号 f_a^{N-1} 更新 Kalman 滤波器的观测值, 利用第 N 层细节信号 f_d^N 实时在线计算观测噪声方差, 可

以减少故障信号暂态噪声对滤波器的干扰, 提高估计精度。观测噪声方差计算公式如下:

$$R_k = \alpha_1 R_{k-1} + \alpha_2 f_{d|k}^{N-1} (f_{d|k}^{N-1})^T \quad (15)$$

式中, α_1, α_2 为权重系数, 满足 $\alpha_1, \alpha_2 \geq 0$ 且 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 。

3 微机保护算法流程

以 A 相为例, 基于小波多尺度分析和 Kalman 滤波的微机保护算法流程图如图 1 所示。

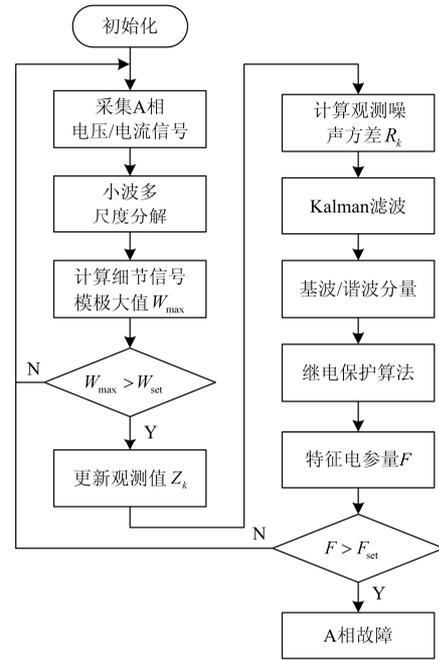


图 1 微机保护算法流程图

Fig. 1 Flow chart of the microprocessor-based protection algorithm

将采集的 A 相电压或电流信号利用小波多尺度分解得到 N 层平滑信号和 N 层细节信号, 求取细节信号的模极大值 W_{\max} 与设定值 W_{set} 比较, 判断模极大值点是不是异常点: 若 $W_{\max} > W_{\text{set}}$, 是异常点, 立即启动 Kalman 滤波; 否则不是异常点, 继续采样进行小波多尺度分析。检测到是异常点后, 利用小波分解得到的平滑信号更新 Kalman 滤波器的观测值, 利用细节信号计算观测噪声方差, 滤波器估计出基波或谐波分量的幅值与相角, 再根据继电保护算法(过电流保护, 距离保护, 差动保护等)计算出表征运行对象特征的电参量 F , 然后与整定值 F_{set} 比较判断 A 相是否故障。B 相和 C 相执行相同的算法流程, 此外, 通过检测零序电流幅值是否大于阈值判断是否存在接地故障, 从而实现故障检测及选相功能。该微机保护算法能够结合电流、距离、差

动等多种继电保护方案实现对输电线路、变压器、发电机等对象的保护。

4 算例分析

在 Matlab/Simulink 仿真环境下搭建如图 2 所示的双端电源系统输电线路故障仿真模型, 仿真模型参数为 E_M 端电源电压 $E_M = 525\angle 0^\circ$ kV, E_N 端电源电压 $E_N = 525\angle 30^\circ$ kV, 两端电源内阻 $Z_M = Z_N = 5.74 + j14.193 \Omega$, 系统频率 50 Hz, 线路长度 $L_1 = L_2 = 50$ km, 线路正序阻抗 $Z_1 = 0.02083 + j0.2821 \Omega/\text{km}$, 线路零序阻抗 $Z_0 = 0.1148 + j0.7186 \Omega/\text{km}$, 线路对地正序电容 $C_1 = 12.94 \times 10^{-3} \mu\text{F}/\text{km}$, 线路对地零序电容为 $C_0 = 5.23 \times 10^{-3} \mu\text{F}/\text{km}$ 。仿真时间 0.2 s, 0.08 s 时刻在 f 处设置故障, 采样频率为 2000 Hz, 即每个周波采样 40 点。

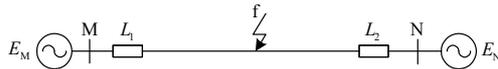


图 2 输电线路故障模型

Fig. 2 Model of transmission line fault

以 f 处发生 AB 两相接地短路故障为例对算法效果进行说明, 从母线 M 处保护装置采集三相电流 i_a, i_b, i_c 和零序电流 i_0 分别如图 3 和图 4 所示。从图中可知, 故障发生后的短路电流 i_a, i_b 和零序电流 i_0 的幅值都远大于正常状态下的电流幅值, 并且都含有衰减的直流分量。

使用 db5 小波对三相电流 i_a, i_b, i_c 和零序电流 i_0 进行多层分解, 为减少计算量, 只进行 3 层分解。以 i_a 为例, 分解得到的三层平滑信号 a_1, a_2, a_3 和三层细节信号 d_1, d_2, d_3 如图 5 所示。从图中可知, 平滑信号和原始信号基本一致, 是滤除部分噪声后对原始信号的连续逼近, 而滤除的噪声分布在同层的细节信号中。三层细节信号在 0.08 s 处都存在较大的突变, 采用模极大值法能够快速、准确地确定系统的异常点为 0.08 s。

采用全波 Fourier 算法, Kalman 滤波算法和本文提出的 Wavelet-Kalman 算法对故障信号基波幅值进行估计得到的结果分别如图 6~图 8 所示。从图中可知, 三种算法都有较高的收敛精度, 稳态误差都在 1% 以内。受到各次谐波、衰减直流分量等暂态噪声的影响, 全波 Fourier 算法经过多次振荡才在 0.14 s 左右收敛到稳态值, 而 Kalman 滤波算法收敛过程比较平滑, 但是延迟时间长, 在 0.15 s 左右才收敛到稳态值。Wavelet-Kalman 算法对暂态噪声有

较好的抑制作用, 在 0.1 s 即达到稳态值, 和另外两种算法相比, 有较快的响应速度。

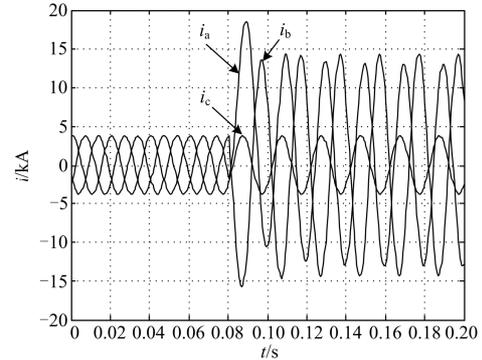


图 3 AB 两相接地短路故障三相电流波形

Fig. 3 Waveform of three phases' current with AB two-phase ground short circuit fault

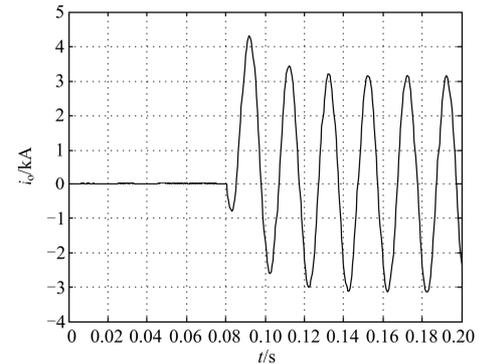


图 4 AB 两相接地短路故障零序电流波形

Fig. 4 Waveform of zero-sequence current with AB two-phase ground short circuit fault

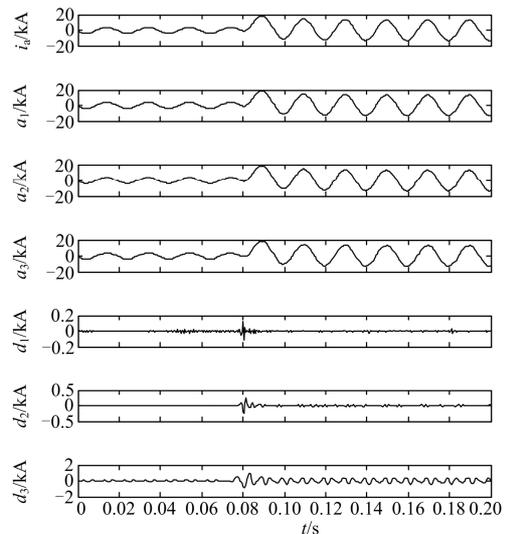


图 5 A 相电流小波变换

Fig. 5 Wavelet transforms of A phase current

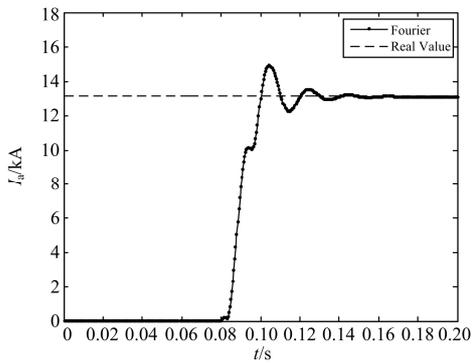


图 6 全波 Fourier 算法计算结果

Fig. 6 Result of full-cycle Fourier algorithm

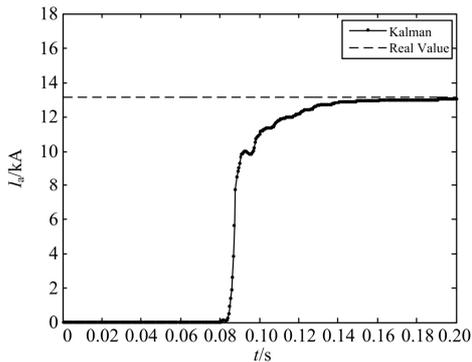


图 7 Kalman 滤波算法计算结果

Fig. 7 Result of Kalman filter algorithm

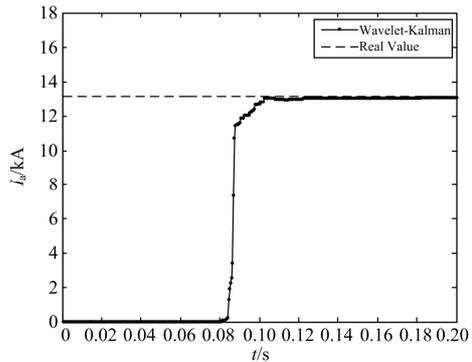


图 8 Wavelet-Kalman 算法计算结果

Fig. 8 Result of Wavelet-Kalman algorithm

Wavelet-Kalman 算法估计出故障信号基波幅值后, 结合电流、距离、差动等线路保护原理可对故障进行判断, 从而实现故障的检测和选相功能。以过电流保护为例, 在 f 处发生不同类型故障仿真结果见表 1。其中, I_a, I_b, I_c, I_0 是三相电流 i_a, i_b, i_c 和零序电流 i_0 的基波分量幅值估计值, t_f 是检测到异常点产生时刻, t_c 是算法收敛时间。从表 1 中可知, 对于不同类型的故障, 算法都能够在故障发生后的

3 ms 内快速、准确地检测并判断出故障点; 除三相短路故障收敛时间需要 50 ms 外, 其他故障在一个周波即收敛到稳态值; 此外, 故障相和非故障相电流幅值差异很大, 选择合适的整定值即可判断该相是否故障, 而接地故障会产生较大的零序电流值, 选择合适的整定值即可判断出是否接地。

表 1 不同类型故障仿真结果

Table 1 Simulation results of different fault types

故障类型	I_a /kA	I_b /kA	I_c /kA	I_0 /kA	t_f /ms	t_c /ms
AG	11.92	3.797	3.786	3.837	82	98
BG	3.786	11.96	3.796	3.798	82	98
CG	3.796	3.786	11.49	3.672	81	97
AB	11.05	14.75	3.791	0	82	96
AC	14.28	3.789	10.57	0	83	105
BC	3.789	10.6	14.28	0	83	106
ABG	13.15	14.41	3.791	3.051	82	102
ACG	14.19	3.793	12.56	3.155	82	103
BCG	3.791	13.01	13.82	3.189	83	102
ABC	14.71	14.73	14.17	0	83	130

5 结论

本文提出了基于小波多尺度分析和 Kalman 滤波的微机保护算法, 采用小波多尺度变换模极大值法确定信号的异常点并初步滤除故障信号的暂态噪声, Kalman 滤波利用小波分解后的信号更新观测模型估计出故障基波分量进行故障判断。在 Matlab/Simulink 环境下搭建输电线路故障仿真模型, 仿真结果证实了算法的有效性。对于各种类型的故障, 算法都能够快速、准确地确定系统的故障点, 在故障发生后一个周波即收敛到稳态值, 稳态误差在 1% 以内。算法具有较快的收敛速度和较高的收敛精度, 能够快速、准确地实现对故障的检测和选相功能, 可靠性较高。

参考文献

- [1] 杨奇逊. 微型机继电保护基础[M]. 北京: 水利水电出版社, 1988.
- [2] 张斌, 张东来. 电力系统自适应基波提取与频率跟踪算法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 81-88.
ZHANG Bin, ZHANG Donglai. Adaptive fundamental component extraction and frequency tracking algorithm for power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 81-88.
- [3] 李肖博, 肖仕武, 刘万顺, 等. 基于形态滤波的变压器电流相关保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 8-13.
LI Xiaobo, XIAO Shiwu, LIU Wanshun, et al. Study on

- transformer correlation protection based on morphological filtering[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6): 8-13.
- [4] 黄赢, 何奔腾. 基于高频噪声主频估计的自适应最小二乘算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 68-73.
HUANG Ying, HE Benteng. High frequency noise main frequency evaluation based adaptive least error square algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 68-73.
- [5] 梁远升, 王钢, 李海锋. 消除暂态过程影响的滤波算法及其在故障测距中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(22): 77-82.
LIANG Yuansheng, WANG Gang, LI Haifeng. A filtering algorithm for eliminating effect of transient component and its application on fault location[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(22): 77-82.
- [6] 张秋丽, 黄纯, 贺建辉, 等. 一种消除衰减直流分量影响的改进 DFT 递推算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 1-5.
ZHANG Qiuli, HUANG Chun, HE Jianhui, et al. An improved recursive discrete Fourier transform algorithm for eliminating decaying DC component[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 1-5.
- [7] 黄世年, 佟为明, 郭志忠, 等. 直接提取基频分量瞬时速度的快速滤波算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 44-49.
HUANG Shinian, TONG Weiming, GUO Zhizhong, et al. A fast filtering algorithm for extracting fundamental instantaneous value[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 44-49.
- [8] 王业, 陆于平, 徐以超, 等. 一种用于差动保护的的新型重采样方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 239-247.
WANG Ye, LU Yuping, XU Yichao, et al. A novel resampling method for differential protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 239-247.
- [9] 胡志坚, 张承学, 陈允平, 等. 滤除衰减非周期分量的微机保护算法研究[J]. 电网技术, 2001, 25(3): 7-11.
HU Zhijian, ZHANG Chengxue, CHEN Yunping, et al. Study on protective algorithm for elimination of decaying aperiodic component[J]. Power System Technology, 2001, 25(3): 7-11.
- [10] 张哲, 陈德树. 卡尔曼滤波与富氏算法的比较分析[J]. 电力系统自动化, 1990, 14(4): 8-16.
ZHANG Zhe, CHEN Deshu. Analysis and comparison of Kalman filter and Fourier algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 1990, 14(4): 8-16.
- [11] 张举, 董杰. 数字保护中两种算法的比较研究[J]. 华北电力大学学报, 2003, 30(4): 6-10.
ZHANG Ju, DONG Jie. Comparison of two algorithms in digital protection[J]. Journal of North China Electric Power University, 2003, 30(4): 6-10.
- [12] GIRGIS A A, BROWN R G. Application of Kalman filtering in computer relaying[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1981, 100(7): 3387-3395.
- [13] GIRGIS A A. A new Kalman filtering based digital distance relay[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1982, 101(9): 3471-3380.
- [14] 李江, 王义伟, 魏超, 等. 卡尔曼滤波理论在电力系统中的应用综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 135-144.
LI Jiang, WANG Yiwei, WEI Chao, et al. A survey on the application of Kalman filtering method in power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 135-144.
- [15] 王爱军, 李宏, 张小桃. 一种基于小波变换的超高压线路故障选相方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 92-97.
WANG Aijun, LI Hong, ZHANG Xiaotao. A scheme of faulted phase selection in EHV transmission line based on wavelet transforms[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 92-97.
- [16] 王铭, 王宏伟, 赵义明. 模极大值均方根比在配网暂态接地故障选线中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 50-54.
WANG Ming, WANG Hongwei, ZHAO Yiming. Application research for the root mean square ratio of modulus maxima in the distribution network transient fault line selection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 50-54.
- [17] 陈继开, 周志宇, 李浩昱, 等. 快速小波熵输电系统暂态信号特征提取研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 219-225.
CHEN Jikai, ZHOU Zhiyu, LI Haoyu, et al. Study of fast wavelet entropy's application in feature extraction of transient signals in transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 219-225.

收稿日期: 2015-01-18; 修回日期: 2015-03-14

作者简介:

吕思颖(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护、高压直流输电。E-mail: 369347928@qq.com

(编辑 张爱琴)