

# 基于 Kaiser 自卷积窗的相位比较式输电线路故障定位方法

范国琛<sup>1</sup>, 朱永利<sup>1</sup>, 史金茂<sup>2</sup>, 周高<sup>2</sup>, 高艳丰<sup>1</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003;

2. 鄂尔多斯电业局, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

**摘要:** 长距离输电线路对地分布电容引起电流行波畸变, 不利于行波初始时刻的准确标定, 并且弧垂因素的累积加大了定位误差。为缩短行波双端间距, 保证在基频波动环境下可靠定位, 提高故障定位精度, 提出一种基于 Kaiser 自卷积窗 FFT 相位比较式输电线路故障定位方法。该方法设置多个电流测量点, 采用 FFT 程序求解电流故障分量的相位, 比较相邻测点的相位差以判别故障区段; 利用 Kaiser 自卷积窗优良可调的旁瓣特性, 充分抑制 FFT 相位求解时的频谱泄漏效应, 提高了相位比较的可靠性。理论分析了产生相位频谱泄漏的原因, 阐述了 Kaiser 自卷积窗的旁瓣特性, 最后通过仿真验证所提方法的正确性。结果表明方法可有效抑制频谱泄漏, 相位比较可靠性高, 基频波动下仍能可靠定位。

**关键词:** 输电线路; 故障定位; 相位比较; FFT; Kaiser 窗; 自卷积; 频谱泄漏; 基频波动

## Fault location scheme for transmission lines using Kaiser self-convolution windowed FFT phase comparison

FAN Guochen<sup>1</sup>, ZHU Yongli<sup>1</sup>, SHI Jinmao<sup>2</sup>, ZHOU Gao<sup>2</sup>, GAO Yanfeng<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Baoding 071003, China; 2. Erdos Power Supply Company, Erdos 017000, China)

**Abstract:** Current traveling waves attenuation caused by ground distributed capacitance of long-distance transmission lines goes against the calibration of initial fault traveling wave arriving times, and arc sag increases location errors. To shorten double ends distance and ensure reliability of fault location under the fundamental frequency fluctuations, and improve its accuracy, this paper proposes a novel fault location scheme for transmission lines based on phase comparison with Kaiser self-convolution windows FFT. This scheme uses FFT program to solve the phase current fault component of multiple current measurements which are compared for determining fault selection; uses excellent sidelobe characteristics of Kaiser self-convolution window to restrain spectral leakage, then the reliability of phase comparison is increased. This paper theoretically analyzes the causes of the phase spectrum leakage, then elaborates the sidelobe characteristics, and finally, verifies the correctness of the proposed method by simulation. The results show that the proposed method can effectively suppress spectral leakage with a high reliability.

**Key words:** transmission lines; fault location; phase comparison; FFT; Kaiser window; self-convolution; spectral leakage; fundamental frequency fluctuations

中图分类号: TM773

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)07-0143-06

## 0 引言

输电线路是电力系统中发生故障最多的元件, 线路故障后快速准确的故障定位对加快线路的故障修复, 保证供电可靠性具有实际意义<sup>[1]</sup>。在输电线路故障定位众多方法中, 双端行波法<sup>[2-4]</sup>具有显著的优势, 但由于双端的行波测距装置较贵, 行波测量点距离较远, 对地分布电容对电流行波的畸变效应和相间互感对波头的衰减效应以及线路弧垂等因素

的影响, 标定行波到达测点的初始时刻存在误差, 导致其适用范围和精度有待提高。

随着输电线路监测技术的发展, 目前在重要线路上实现基于罗氏线圈和无线传输的多电流测点监测已成为可能。罗氏线圈频率响应范围宽、测量动态范围大, 具有较好的行波转变能力<sup>[5]</sup>; 不易磁饱和、绝缘特性好<sup>[5]</sup>, 能够不失真地测量动态短路电流<sup>[6]</sup>; 而且价格便宜, 安装简便。文献[3]提出采用多个电流测量点以减小电容电流的影响, 同时由于

测点间距过短导致故障行波到达时刻难以分辨, 行波测距法失效, 而采用基于电流故障分量的相位差动原理实现故障定位, 定位精度显著提高。采用基于传统 Fourier 变换 (FFT) 或全相位 FFT(all phase-FFT)<sup>[7]</sup> 的相位频谱分析方法求解电流量的相位效果较好, 但在对电流故障分量进行频谱分析时存在着不同程度的泄漏效应<sup>[8]</sup>, 造成相位谱分析不准确, 使得相位相反与相同两种情况的界限不明显, 非故障段与故障区段的判别困难, 进而导致相位比较式故障定位方法的不准确<sup>[9]</sup>。所以相位测量的关键在于如何改进相位差求解算法。

本文提出一种基于 Kaiser 自卷积窗 FFT 相位比较的输电线路故障定位方法。该方法能够可靠判断故障区段, 缩短行波双端间距, 在此基础上的双端行波测距精度显著提高。

## 1 相位比较故障定位法的提出

基于分相电流相位比较原理<sup>[10]</sup>的故障定位法的原理, 是每隔一定距离在线路杆塔处的各相导线上, 装设一个由 Rogowski 电流传感器和自取能无线信号系统<sup>[6]</sup>组成的廉价电流测量点, 发生短路接地故障时, 现场测点将采集的电流数据无线传输到处理中心, 终端服务器的相位差求解程序求解故障电流的相位, 通过比较每一相的各相邻测点间故障后一定周波电流故障分量的相位关系来判断故障在哪两个测点之间, 即给出行波定位的区段。

由于系统阻抗角、罗氏线圈测量误差等的存在, 造成相位差并非为整  $0^\circ$  或整  $180^\circ$ , 而是有同、反相相位偏差  $\delta_0$ 、 $\delta_{180}$ , 在使用相位差的大小判别故障区间时需将其考虑在内。经各种不同故障情况下的大量仿真研究可知偏差  $\delta_0$  一般在  $[0^\circ, 5^\circ]$  内, 而偏差  $\delta_{180}$  在  $[0^\circ, 20^\circ]$  内。

## 2 频谱泄漏问题

频谱泄漏是指在频谱分析时一个频率处的分量不再是单一的谱线, 而是泄漏到临近的其他分量中去的现象<sup>[11]</sup>。导致频谱泄漏的根本原因是数据非周期截短和非同步采样<sup>[12]</sup>, 现分别加以分析。

### 2.1 非整周期采样下的频谱泄漏分析

考虑含  $h$  次谐波的时间连续故障电流信号

$$i(t) = \sum_{h=0}^{H-1} A_h \cos(2\pi h f_0 t + \varphi_h) \quad (1)$$

式中,  $A_h$ 、 $h f_0$ 、 $\varphi_h$  分别对应第  $h$  次谐波的幅值、频率和初相位。 $h=1$  时, 有基频  $f_0$ , 基波周期  $T_0=1/f_0$ 。对  $i(t)$  离散化, 取采样频率  $f_s$  (采样间隔  $T_s=1/f_s$ ):

$$i(n) = i(t)|_{t=n/f_s} = \sum_{h=0}^{H-1} A_h \cos(2\pi h f_0 n / f_s + \varphi_h) = \sum_{h=0}^{H-1} A_h \cos(\omega_h n + \varphi_h), -\infty < n < \infty \quad (2)$$

式中,  $\omega_h=2\pi h f_0 / f_s$  为  $h$  次谐波角频率。 $i(n)$  的离散傅里叶变换(DFT)为

$$I(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{h=0}^{H-1} \frac{A_h}{2} \left[ e^{j(\omega_h n + \varphi_h)} + e^{-j(\omega_h n + \varphi_h)} \right] e^{-j \frac{2\pi}{N} k n} \quad (3)$$

式中:  $k=0, 1, \dots, N-1$ , 采样点数  $N$  与  $f_0$ 、 $f_s$  的关系为

$$N / f_s = l_h / h f_0 \quad (4)$$

式中, 周期倍数  $l_h$  为采样周期与电流各次谐波周期的比值, 如果  $l_h$  为正整数, 则采样为整周期采样, 否则为非整周期采样。由式(2)、式(4)得

$$l_h = N \omega_h / 2\pi \quad (5)$$

将式(5)带入式(3), 得

$$I(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{h=0}^{H-1} \frac{A_h}{2} \left[ e^{j\varphi_h} e^{j \frac{2\pi}{N} (l_h - k) n} + e^{-j\varphi_h} e^{-j \frac{2\pi}{N} (l_h + k) n} \right] = \sum_{h=0}^{H-1} \frac{A_h}{2} \left\{ \frac{\cos \varphi_h - \cos(2\pi l_h + \varphi_h) + \sin \frac{2\pi l_h}{N} [\sin(2\pi l_h + \varphi_h) - \sin \varphi_h]}{\cos \frac{2\pi k}{N} - \cos \frac{2\pi l_h}{N}} \right\} + j \frac{A_h}{2} \left\{ \frac{\sin \frac{2\pi k}{N} [\cos \varphi_h - \cos(2\pi l_h + \varphi_h)]}{\cos \frac{2\pi k}{N} - \cos \frac{2\pi l_h}{N}} \right\} \quad (6)$$

首先考虑非整周期采样, 保持  $f_s$ 、 $f_0$  不变, 采样点数  $N$  变为  $N'$ , 设  $N'=N+\Delta N$ , 则

$$N' / f_s = l'_h / h f_0 \quad (7)$$

式中, 周期倍数  $l'_h$  和周期倍数增量  $\Delta l'_h$  分别为

$$l'_h = N h f_0 / f_s + \Delta N h f_0 / f_s = l_h + \Delta l'_h \quad (8)$$

$$\Delta l'_h = \Delta N h f_0 / f_s \quad (9)$$

以基波为例,  $h=1$ ,  $l'_1=l_1+\Delta l'_1$ , 有基波频谱

$$I_1(k) = \frac{A_1}{2} \left\{ \frac{\cos \varphi_1 - \cos(2\pi l_1 + \varphi_1 + 2\pi \Delta l'_1) + \sin \frac{2\pi l_1}{N} [\sin(2\pi l_1 + \varphi_1 + 2\pi \Delta l'_1) - \sin \varphi_1]}{\cos \frac{2\pi k}{N + \Delta N} - \cos \frac{2\pi l_1}{N}} \right\} + j \frac{A_1}{2} \frac{\sin \frac{2\pi k}{N + \Delta N} [\cos \varphi_1 - \cos(2\pi l_1 + \varphi_1 + 2\pi \Delta l'_1)]}{\cos \frac{2\pi k}{N + \Delta N} - \cos \frac{2\pi l_1}{N}} \quad (10)$$

当  $1 < \Delta N < N$  时, 即  $0 < \Delta l'_1 < 1$ , 则  $I_0(k)$  在非整次

频率  $N+\Delta N$  处的能量值非零, 即存在泄漏。

## 2.2 非同步采样下的频谱泄漏分析

考虑基频波动的现象, 保持  $f_s$  和  $N$  不变, 而基波频率变为  $f_0'$ , 设  $f_0' = f_0 + \Delta f_0$ , 则

$$N / f_s = l_h'' / h f_0'' \quad (11)$$

式中, 周期倍数  $l_h''$  为

$$l_h'' = N h f_0' / f_s = l_h + N h \Delta f_0 / f_s = l_h + \Delta l_h' \quad (12)$$

当  $1 < \Delta f_0 < f_0$  时, 即  $0 < \Delta l_h'' < 1$ , 则  $\Delta l_h''$  与相对应的整数  $k$  不相等, 使得  $I(k)$  在非整次频率处出现非零假谱, 即存在泄漏。针对频谱泄漏问题, 本文提出 Kaiser 自卷积窗的 FFT 算法。

## 3 基于 Kaiser 自卷积窗的 FFT 算法

### 3.1 Kaiser 自卷积窗特性

窗函数的泄漏抑制性能与旁瓣特性有关, 旁瓣峰值电平越低且衰减速率越快, 对泄漏的抑制能力则越强。在电力系统谐波分析和介质损耗角检测领域<sup>[13]</sup>中, 为抑制泄漏多采用加窗法, 最具代表性的窗函数为 Hanning 窗<sup>[13]</sup>, 其旁瓣性能较好, 但参数固定, 泄漏抑制性能有限。对于有一定畸变的故障电流行波, 基于 Hanning 窗的相位求解方法泄漏问题严重, 难以满足定位的要求。与 Hanning 窗相比, Kaiser 窗函数参数可调, 通过调整主瓣宽度和旁瓣高度之间的比重(即改变主旁比重系数  $\beta$  的值), 选择需要的旁瓣性能, 可达到充分抑制泄漏效应的目的。Kaiser 窗的时域表达式  $w_k(n)$ <sup>[14]</sup>为

$$w_k(n) = I_0 \left\{ \beta \sqrt{1 - [2n / (N-1)]^2} \right\} / I_0(\beta) \quad (13)$$

式中,  $I_0(\beta)$  是修正的零阶贝塞尔函数<sup>[14]</sup>。对于 Kaiser 窗有两个重要参数: 窗长  $N$  和主旁比重系数  $\beta$ 。改变  $\beta$  的值, 可以对主瓣宽度和旁瓣衰减进行自由选择<sup>[15]</sup>。当 Kaiser 窗的参数达到一定数值时, 泄漏抑制性能的提高不再明显, 通过自卷积削弱边缘特征减小截断奇异, 可大幅提高泄漏抑制性能。 $m$  阶 Kaiser 自卷积窗是 Kaiser 窗通过  $m-1$  次自卷积运算得到的窗函数, 其递推公式为

$$w_k^{(m)}(n) = w_k^{(m-1)}(n) \cdot w_k(n) = \sum_{x=-\infty}^{+\infty} w_k^{(m-1)}(x) \cdot w_k(n-x) \quad (m \geq 1) \quad (14)$$

在参数一定的条件下, 随着卷积阶数的增加, Kaiser 自卷积窗的泄漏抑制性能成倍提高, 图 1 给出不同自卷积阶数的 Kaiser 窗旁瓣特性, 设置窗长  $N=32$ ,  $\beta=10$ 。分析可知主瓣宽度保持不变, 说明自卷积窗与 Kaiser 窗具有相同的频谱分辨能力。

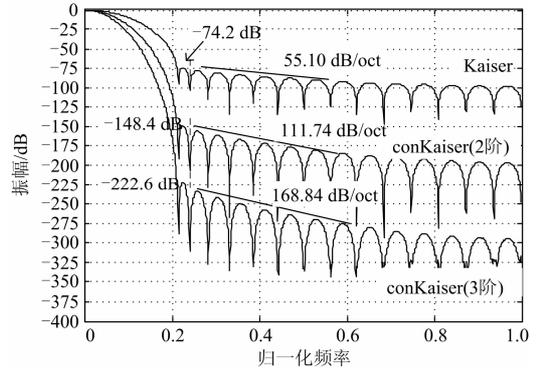


图 1 归一化频谱

Fig. 1 Normalized logarithm spectrum

### 3.2 Kaiser 自卷积窗的 FFT 相位比较方法

#### 3.2.1 电流故障分量加窗预处理

首先进行 Kaiser 自卷积运算并归一化幅值

$$\overline{w_k^{(m)}}(n) = \frac{\sum_{x=-\infty}^{+\infty} w_k^{(m-1)}(x) \cdot w_k(n-x)}{\sum_{i=0}^{N-1} w_k^{(m)}(i)} \quad (15)$$

然后对电流故障分量  $i(n)$  加窗处理, 得到  $i_{w_k}(n)$

$$i_{w_k}(n) = \frac{\sum_{h=0}^{H-1} A_h \cos(2\pi h f_0 n / f_s + \varphi_h) \cdot w_k^{(m)}(n)}{\sum_{i=0}^{N-1} w_k^{(m)}(i)} \quad (16)$$

#### 3.2.2 电流故障分量的相位求解

对  $i_{w_k}(n)$  FFT 运算, 得到  $I_{w_k}(k)$ , 求其实、虚部

$$\text{Re} I_{w_k}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{\sum_{h=0}^{H-1} A_h \cos(W_N l_h n + \varphi_h) w_k^{(m)}(n)}{\sum_{i=0}^{N-1} w_k^{(m)}(i)} \cos W_N^{kn} \quad (17)$$

$$\text{Im} I_{w_k}(k) = - \sum_{n=0}^{N-1} \frac{\sum_{h=0}^{H-1} A_h \cos(W_N l_h n + \varphi_h) w_k^{(m)}(n)}{\sum_{i=0}^{N-1} w_k^{(m)}(i)} \sin W_N^{kn} \quad (18)$$

FFT 的相位响应公式为

$$\phi I_{w_k}(k) = \arctan \left[ \text{Re} I_{w_k}(k) / \text{Im} I_{w_k}(k) \right] \quad (19)$$

#### 3.2.3 相位差求解与泄漏程度判断

得到测点的电流相位谱之后, 重复上述过程求相邻下一个测点的电流相位谱, 两个测点设为  $m, n$ , 对应的相位序列分别设为  $\phi_{mI_{w_k}}(k)$  和  $\phi_{nI_{w_k}}(k)$ , 二者做减运算, 得到相位差序列为

$$\Delta \phi_{mn}(k) = \left| \phi_{mI_{w_k}}(k) - \phi_{nI_{w_k}}(k) \right| \quad (20)$$

求解相位差 $\Delta\phi_{mn}(k)$ 的均值, 得到相位值为

$$\Delta\phi_{m-n} = M_{m-n} = \sum_{k=0}^{N-1} \Delta\phi_{mn}(k) / N \quad (21)$$

估计标准差 $std_{m-n}$ 判断泄漏程度为

$$std_{m-n} = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^{N-1} [\Delta\phi_{mn}(k) - M_{m-n}]^2}{N-1}} \quad (22)$$

若标准差在阈值 $std_{th}$ 之内, 说明频谱泄漏较小, 不影响相位的求解, 那么所求均值即为所求基频相位。若标准差超过 $std_{th}$ 则说明频谱泄漏严重, 均值可信度低, 需要调整 Kaiser 窗函数系数 $\beta$ 的值, 并重复上述过程求均值, 再次判断标准差大小, 直到标准差小于 $std_{th}$ 为止。经大量仿真研究,  $std_{th}$ 可设为 20, 若标准差大于 20, 则调整 $\beta$ 值。在电网基频波动情况下, 相位偏差较大,  $std_{th}$ 需要调整。

## 4 仿真分析

### 4.1 仿真模型

本文采用 PSCAD 进行 220 kV 输电线路故障仿真, 线路长度设为 200 km, 如图 2 所示。故障点设在距离 S1 端 124~126 km 之间, 对应的杆塔为: 248#、249#、250#、251#、252#; 杆塔间档距均设为 0.5 km, 杆塔上装设的测点设为测点 1~5。接地电阻设置为 4.5  $\Omega$ 。线路采用频率相关模型<sup>[16]</sup>, 采样频率取 200 kHz, 表 1 给出线路参数。

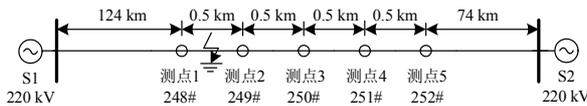


图 2 220 kV 系统模型

Fig. 2 Model of 220 kV system

表 1 线路参数

Table 1 Parameters of line

序别	$r/(\Omega/\text{km})$	$x/(\Omega/\text{km})$	$g/(\text{s}/\text{km})$	$b/(\text{s}/\text{km})$
正序	0.034 676	0.423 366	$1.0 \times 10^{-7}$	$2.725 6 \times 10^{-6}$
零序	0.300 023	1.142 641	$1.0 \times 10^{-7}$	$1.935 5 \times 10^{-6}$

### 4.2 故障定位和故障相别仿真

仿真将故障点设在 124.02 km、125.07 km 和 125.60 km 处, 取故障后第 3 个周波的 1/8 周波进行各相邻测点电流相位比较, 结果表 2 所示。

表 2 线路故障定位结果

Table 2 Results of fault localization

故障距离/km	$\Delta\phi_{1-2}^A$	$\Delta\phi_{2-3}^A$	$\Delta\phi_{3-4}^A$	$\Delta\phi_{4-5}^A$	定位结果
124.02	176.603	0.538	0.495	0.498	248#-249#
125.07	0.453	0.419	172.498	0.376	250#-251#
125.60	0.355	0.363	0.370	172.56	251#-252#

注: 相位差单位为“度”。

由表 2 可知, 利用本文方法能够准确地将故障点定位到相邻两测点之间, 并且同相与反相相位差区别明显。为判别故障相与非故障相, 仿真十种常见故障, 故障点设在 124.73 km 处, 分别比较测点 2-3 的各相相位差, 结果表 3 所示。

表 3 测点 2-3 故障相别结果

Table 3 Results of fault phase measurement of points 2-3

故障类别	$\Delta\phi_{2-3}^A/度$	$\Delta\phi_{2-3}^B/度$	$\Delta\phi_{2-3}^C/度$	故障相别
Ag	165.853	1.224	1.541	A
Bg	2.467	166.429	0.987	B
Cg	1.908	7.252	172.399	C
AB	170.267	171.884	0.968	A,B
BC	1.377	169.737	168.250	B,C
AC	175.925	0.600	177.217	A,C
ABg	160.361	166.010	1.017	A,B
BCg	1.914	167.825	163.914	B,C
ACg	179.41	0.550	174.456	A,C
ABC	171.197	168.779	159.720	A,B,C
无	2.581	0.600	0.967	无

结果表明本文方法可有效判断故障相, 如若判断接地故障, 可通过求零序分量来判断。零序分量非零时判断为接地故障, 否则为相间不接地。

### 4.3 不同窗的相位差仿真

为比较 Kaiser 自卷积窗与 Hanning 窗的泄漏抑制性能, 仿真分析杆塔 249#-250# 之间线路上 A 相接地故障时的相位差图谱, 如图 3 所示。

图中每一列子图对应的是测点之间的相位差图谱, 由第二列(2-3 A 相相位差图谱)可知, 相位差谱的均值约为 180°, 而其他相邻测点 A 相相位差均值约为 0°。但是由于泄漏的存在, 图谱并不光滑, 当采样点数发生变化即非整周期采样时, 偏离周期越远, 基于 Hanning 窗的 FFT 得到的相位差谱泄漏越严重, 相位信息被临近假谱干扰所淹没, 相位差均值严重失真, 意味着测点间原本没有故障, 相位比较结果却判为存在故障, 导致故障区间的误判。而基于 Kaiser 自卷积窗的 FFT 得到的相位差谱泄漏基本得到完全抑制, 能够得到准确的相位比较结果, 实现故障可靠定位。

### 4.4 基频波动仿真结果

电网的基频波动导致难以实现同步采样<sup>[17]</sup>, 造成电流信号频谱泄漏量相应的变化, 偏离工频越大, 相位差的误差越大。为说明基频波动对相位差求解的影响, 仿真在基频不同波动程度下(49.5~50.5 Hz)相位差的绝对误差和标准误差。限于篇幅, 只给出杆塔 249#-250# 之间 A 相接地故障时的仿真结果, 并且为说明所提方法在基频波动情况下的测量误差较小, 对比基于两种窗函数(Hanning 窗、Kaiser 自

卷积窗(conKaiser),  $\beta=0.5$ )FFT 方法的计算结果, 如图 4 所示。

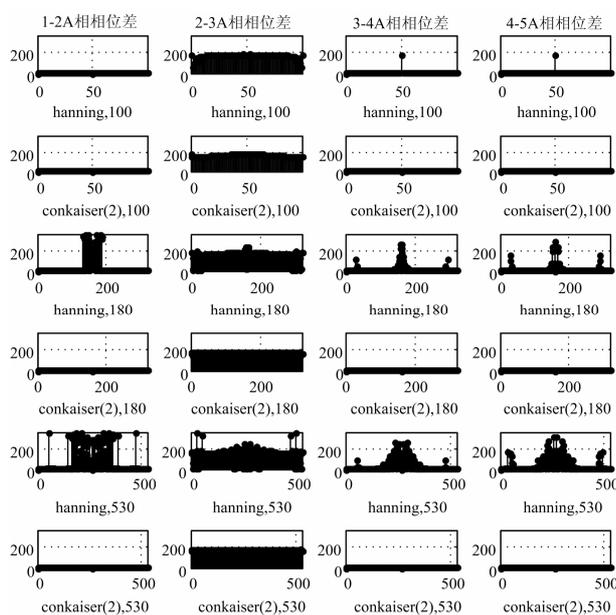


图 3 不同窗改变窗长的相位差

Fig. 3 Phases difference by changing windows length

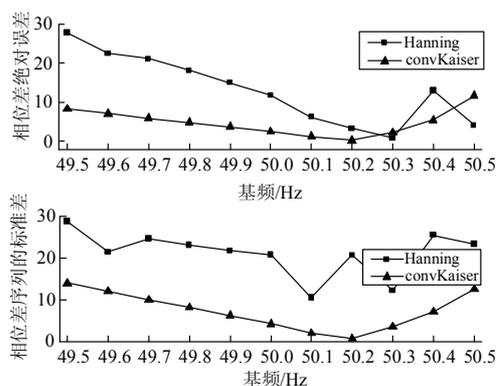


图 4 相位差绝对误差与标准差

Fig. 4 Absolute error and standard deviation of the phase difference

分析结果可知: (1) 基波值偏离工频值越大, 相位差误差越大, 且偏离程度相等条件下, 低频时的误差比高频时的要大; (2) 相同基频波动下, 采用 Kaiser 自卷积窗方法与采用汉宁窗相比求得的相位差序列的绝对误差小得多。但波动较大时, 相位比较结果误差较大, Hanning 窗函数参数不可调, 对基频波动带来的影响无能为力, 而 Kaiser 窗函数的参数可调, 通过调整主旁瓣比重系数 $\beta$ , 可大幅减小基频波动对故障定位的影响。表 4 给出了 49.5 Hz 基频条件下的仿真结果。

表 4 最恶劣基频条件下的相位差

Table 4 Phase difference between the fundamental frequency in the harshest conditions

比重参数 $\beta$	相位差 $\Delta\phi_{2-3}^A / ^\circ$	标准差 $std_{2,3}$
1.0	157.174	24.138
0.9	160.093	22.801
0.7	165.965	19.218
0.6	168.840	16.821
0.5	171.598	13.914
0.3	176.360	6.932
0.1	179.110	1.773
0.05	179.376	1.255
0.01	179.460	1.019

分析可知, 通过调整 Kaiser 窗函数的参数, 可有效抑制基频波动引起的频谱泄漏, 从而将基频波动对相位比较检测的影响降至最低, 即使在最恶劣条件下也可达到极高的精度。在低频环境下为准确测量相位差, 需要降低 $\beta$ 值, 高频下则相反。

## 5 总结

本文提出了数字式输电线路故障定位方法, 该方法目的是将长距离输电线路分段, 可靠地为双端行波测距缩短行波传播距离(即行波双端间距), 可减小对地分布电容对电流行波的畸变效应, 有利于行波初始时刻的准确标定, 提高小波、HHT 变换等其他方法的定位精度。基于 Kaiser 自卷积窗优良的泄漏抑制性能, 可有效解决电流故障分量的相位比较因频谱泄漏而误差较大的问题, 具有较高相位差求解精度和故障定位可靠性, 对提高当前故障测距精度具有重要意义。本文方法已得到内蒙古电力公司鄂尔多斯供电局-输电线路在线监测与故障分析系统现场数据的验证, 具有现实可行性。

## 参考文献

- [1] 梁睿, 靳征, 刘建华. 基于故障特征频率的单端行波测距新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 7-13.
- LIANG Rui, JIN Zheng, LIU Jianhua. A new single-ended traveling waves fault location method based on characteristic frequency[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 7-13.
- [2] 位韶康, 陈平, 姜映辉. 一种不受波速影响的单端行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 76-81.
- WEI Shaokang, CHEN Ping, JIANG Yinghui. A single-ended traveling wave ranging method avoiding wave speed influence[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 76-81.

- [3] 范新桥, 朱永利, 卢伟甫. 采用电流分布式测量和相位比较方式的输电线路故障定位[J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1341-1347.  
FAN Xinqiao, ZHU Yongli, LU Weifu. Fault location scheme for transmission lines using distributed current measurements and their phases comparison[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1341-1347.
- [4] LEE H, MOUSA A M. GPS traveling-wave fault locator systems: investigation into the anomalous measurements related to lightning strikes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3): 1214-1223.
- [5] 向岷江. 基于罗氏线圈的行波传变特性与应用技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.  
XIANG Minjiang. Study on traveling wave transfer characteristics and application techniques based on rogowski coils[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [6] 朱永利, 范新桥, 尹金良. 基于三点电流测量的输电线路行波故障定位新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 260-268.  
ZHU Yongli, FAN Xinqiao, YIN Jinliang. A new fault location scheme for transmission lines based on traveling waves of three measurements[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 260-268.
- [7] 王兆华, 黄翔东. 数字信号全相位谱分析与滤波技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 12-48.
- [8] 黄冬梅, 龚仁喜, 焦凤昌, 等. 莱夫-文森特窗三谱线插值的电力谐波分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 28-34.  
HUANG Dongmei, GONG Renxi, JIAO Fengchang, et al. Power harmonic analysis based on Rife-Vincent window and triple-spectral-line interpolation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 28-34.
- [9] 张姝, 何正友, 何文. 基于递归小波的相量测量算法[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 194-200.  
ZHANG Shu, HE Zhengyou, HE Wen. A recursive wavelet-based algorithm for phasor measurement[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 194-200.
- [10] 贺家李, 李永丽, 董新洲, 等. 电力系统继电保护原理[M]. 4版. 北京: 中国电力出版社, 2010: 199-205.
- [11] 马仁政, 陈明凯. 减少频谱泄漏的一种自适应采样算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(7): 55-58.  
MA Renzheng, CHEN Mingkai. An adaptive sampling algorithm for reducing spectrum leakage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(7): 55-58.
- [12] 温和, 滕召胜, 王永, 等. 改进加窗插值 FFT 动态谐波分析算法及应用[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 270-277.  
WEN He, TENG Zhaosheng, WANG Yong, et al. Improved windowed interpolation FFT algorithm and application for power harmonic analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 270-277.
- [13] 王刘旺, 黄建才, 孙建新, 等. 基于加汉宁窗的 FFT 高精度谐波检测改进算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 28-33.  
WANG Liuwang, HUANG Jiancai, SUN Jianxin, et al. An improved precise algorithm for harmonic analysis based on Hanning-windowed FFT[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 28-33.
- [14] 奥本海默 A V, 谢弗 R W. 离散时间信号处理[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 373-390.
- [15] 高云鹏, 滕召胜, 温和, 等. 凯塞窗差值 FFT 的电力谐波分析与应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 43-48.  
GAO Yunpeng, TENG Zhaosheng, WEN He, et al. Harmonic analysis based on Kaiser window interpolation FFT and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 43-48.
- [16] 姚致清, 张茜, 刘喜梅, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.  
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei, et al. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [17] 曾博, 滕召胜. 纳托尔自卷积窗加权电力谐波分析方法[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 134-139.  
ZENG Bo, TENG Zhaosheng. A Nuttall self-convolution window-based approach to weighted analysis on power system harmonic[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 134-139.

收稿日期: 2014-04-10; 修回日期: 2015-01-09

作者简介:

范国琛(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为输电线路故障定位和电力系统运行、分析与控制; E-mail: fanchenliusi@163.com

朱永利(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为输变电设备状态在线监测、智能分析和智能电网, 功率电子变换技术等。

(编辑 葛艳娜)