

# 基于双树复小波的相电流行波故障选线新方法

周登登, 刘志刚, 符伟杰, 韩志伟

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 在对配电网单相接地故障电流行波分析的基础上, 得出了各相电流初始行波之间的恒定关系式, 提出一种基于具有时移不变性的双树复小波的选线算法, 该算法避免了实小波的各种缺点, 防止选线失效, 同时也解决了仅含两相电流互感器的选线问题。另外, 考虑了母线分布电容对选线算法的影响, 得出分布电容不但不会削弱选线效果反而更有利于选线的结论。通过仿真实例验证了所提出的算法有效、可行、灵敏度高, 能够适用于任何出线线路类型相同的配电网。

**关键词:** 单相接地故障; 电流行波; 双树复小波; 时移不变性; 分布电容

## Fault line selection of phase current traveling wave based on dual-tree complex wavelet

ZHOU Deng-deng, LIU Zhi-gang, FU Wei-jie, HAN Zhi-wei

(College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Based on the analysis of the single-phase grounding fault current traveling wave of the distribution network, the constant function relation of current initial traveling wave of every phase is obtained. A new method of line selection using complex wavelet which possesses the advantage of shift invariant is proposed. Various disadvantages of real wavelet can be avoided by using complex wavelet, so the problem of line selection failure can't occur. This algorithm can also solve the line selection problem when the distribution network has only two-phase current transformer. The influence of distributed capacitance on the algorithm is also considered. The conclusion is that the distributed capacitance is beneficial to line selection rather than weak that. At last, the simulation example has proved the effectiveness and high sensitivity of the proposed algorithm. This method can be used at the distribution system which has the same type of outgoing lines.

**Key words:** single-phase grounding fault; current traveling wave; dual-tree complex wavelet; shift invariant; distributed capacitance

中图分类号: TM727.2 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)08-0019-07

## 0 引言

我国配电网中性点普遍采用不接地或经消弧线圈接地(统称非有效接地)的运行方式<sup>[1]</sup>。到目前为止, 虽然有部分选线装置在使用, 但选线成功率极低, 不少变电站将其停运, 中性点非有效接地系统的选线问题仍然是一个困扰电力工作者的难题。

近年来, 对配电网的选线问题研究越来越多, 出现了利用稳态分量, 暂态分量和注入法的三类选线方法, 比如幅比相法<sup>[2]</sup>, 有功分量法, 五次谐波法<sup>[3]</sup>, 首半波法<sup>[4]</sup>和信号注入法<sup>[5]</sup>。这些方法各有优缺点, 多数只能适用于中性点不接地或不直接接地系统, 具有局限性, 并且选线准确性受到一定质疑<sup>[6]</sup>。

配网行波选线法的思想是受输电系统行波测距原理所启发。国内对配电系统的行波选线原理研究较少, 但已有学者证明配电系统行波选线甚至测距都是可行的, 并且做了一些有意义的工作<sup>[7-12]</sup>。这些方法多使用零模或线模电流进行判断, 这在仅含有两相电流互感器的线路中选线算法失效。另外, 虽有人想出了适用于仅含两相电流互感器线路的选线方法, 但判断过程较繁琐, 还得分类讨论, 能否应用于两出线系统还有待考证。本文在前人工作的基础上, 仔细分析行波传输特征, 得出了简单有效的选线算法, 该法与前人方法最大的区别在于它是基于时域行波全电流的, 而非模域电流, 可以适用于含有三相、两相甚至是单相电流互感器线路, 该法在两出线系统中仍能正确选线, 精度很高, 由于本方法是基于复小波而非实小波进行分析, 因此也就避免了实小波分析时出现的各种幅值极性震荡不

**基金项目:** 教育部霍英东青年教师基金资助项目(101060); 四川省杰出青年基金项目(07ZQ026-012)

稳定情况,从而使本方法较实小波选线准确度更高。该法具有耐过渡电阻、过渡相角和故障距离能力,且与中性点接地方式无关,仿真结果证实了该法的有效性。

### 1 复小波简述

到目前为止用于选线的小波都属于实小波,但是实小波有几个突出的缺点:时移敏感性,缺乏方向性和缺少相位信息。由于本文选线算法与后两个缺点无关,因此主要考虑它的时移敏感性。造成实小波时移敏感性的主要原因在于实小波的下采样或者说实小波基函数不解析,而双树复小波<sup>[13]</sup>所设置的双树变换具有半采样点延迟关系,等价于加倍采样率,从而克服了下采样所导致的各种问题,或者说是复小波的解析性克服了时移敏感性。双树复小波具有近似解析性,双树正交性,线性相位,精确重构性,低复杂度(2倍于实小波变换),被认为是理想的小波变换工具。通过下边的仿真实例可以看到复小波的优点。

图1中左图是复小波对阶跃信号的变换结果,右图是实小波变换结果,d1~d4, a4分别表示各尺度重构信号。由图可见,当信号有时延时,复小波变换结果也有相类似的时延,不会像实小波变换那样出现震荡的情况。这说明复小波变换具有时移不变性,而实小波变换没有这个特点。可以预见,当分析信号时,若在时域或小波域对信号做了任何处理,打破了小波变换的平衡,那么实小波变换结果都是不准确的。而复小波变换就避免了这个问题。从而使分析结果更可信。图2是对同一个行波电流初始波头变换的结果,上边两图分别是实、复小波对电流行波*i<sub>b2</sub>*, *i<sub>b3</sub>*第1~512个数据点的变换结果(左实右复),下边两图分别是实、复小波对该电流行波第100~611个数据点的变换结果(左实右复)。由这四幅图对比可知当信号段选择不同但都包含所需要的区域时,对这个区域的变换结果,实小波表现出

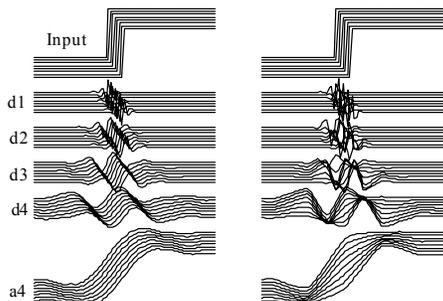


图1 实、复小波对阶跃信号的变换对比  
Fig.1 Comparison of real and complex wavelet transform towards step signal

来的是极性和幅值大小都有所改变而复小波变换结果不变,由此可见复小波变换结果更稳定,更可信,更适宜进行信号分析。由于对行波进行实际分析时,所选择的信号采样点数不是定值,因此若使用实小波进行分析所得的结果就可能不相同,从而无法做出正确判断,但用复小波分析的结果是相同的,与采样点数无关,因此应该使用复小波分析更稳妥。

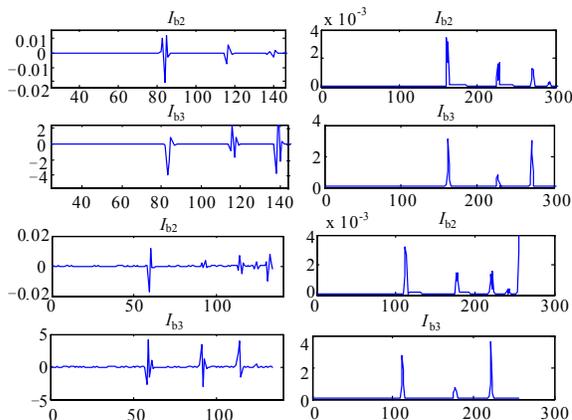


图2 当采样点数变化时,实、复小波对电流行波变换对比  
Fig.2 Comparison of real and complex wavelet transform on current traveling wave when the sampling number changes

### 2 考虑电容的故障选线算法

#### 2.1 不考虑电容的故障电流行波特征

图3是中性点经消弧线圈接地/不接地的配电系统示意图。图中设置的是C相线路经过渡电阻*R<sub>g</sub>*接地。

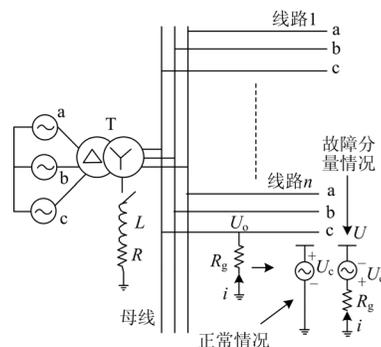


图3 配电网单相接地原理图  
Fig.3 Principle graph of single-phase grounding fault of distribution system

根据线性电路叠加原理,可知:

$$\begin{cases} U_0 = U_c + U \\ U_0 = -iR_g \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $U_0$ 为故障点合成电压;  $i$ 为故障支路电流;  $U_c$ 为故障前故障点的正常电压;  $U$ 为故障分量回路

故障点的残压;  $R_g$  为过渡电阻。据此可得故障分量回路伏安关系:

$$U = -U_c - iR_g \quad (2)$$

对故障情况, 采用一般的时域法由于存在三相之间的耦合导致求解困难, 多数均选用模域变换法。在此选择应用最广泛的凯伦贝尔 (Karrenbauer) 变换用于相分量之间解耦:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a(t) \\ X_b(t) \\ X_c(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $x_0$  为零模分量;  $x_1, x_2$  为线模分量;  $X_a, X_b, X_c$  为相分量。

当采用上述变换后, 三相之间的关系就演变成成为三个模分量之间的关系。这三个模分量是相互独立的, 可以单独用来分析, 因此三相系统的问题就转化成单模系统的分析。

根据模量关系的独立性有以下模域欧姆定律成立:

$$\begin{cases} U_1/Z_1 = i_1 \\ U_2/Z_2 = i_2 \\ U_0/Z_0 = i_0 \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $Z$  表示模阻抗;  $U$  为模电压;  $i$  为模电流。由于行波阻抗与线路长度无关, 而一般故障点发生在电缆线路与架空线交界处的情况不太多, 因此, 故障点两侧完全可以等价于与两个大小相同的波阻抗相连。对于稳态情况是不会有行波出现的, 只有在发生故障后, 在故障分量回路会出现一个由故障点向两侧行进的行波, 根据电压行波的连续性可知, 两个向两侧行进的电压行波是相同的, 而波阻抗又相同, 因此两个行波电流是相等的。若以  $i_0, i_1, i_2$  分别表示故障支路的行波模电流,  $Z_0, Z_1, Z_2$  表示输电线路 (非故障支路) 的各模波阻抗 (对于均匀换位线路,  $Z_1 = Z_2$ ), 可得C相故障时的各种关系:

$$\begin{cases} U = -U_c - iR_g & \text{纯故障支路} \\ U = -U_c - iR_g & \text{时域伏安关系} \\ i_c = i, i_b = i_a = 0 & \text{边界条件} \\ \frac{U_1}{Z_1} = \frac{i_1}{2}, \frac{U_2}{Z_2} = \frac{i_2}{2}, \frac{U_0}{Z_0} = \frac{i_0}{2} & \text{输电线路模} \\ & \text{域伏安关系} \end{cases} \quad (5)$$

结合相模变换矩阵 (3), 可得

$$\begin{cases} i_1 = 0 \\ i_0 = -i_2 = \frac{-2U_c}{Z_0 + 2Z_2 + 6R_g} \end{cases} \quad (6)$$

## 2.2 相电流行波选线判据

设配电系统有  $n$  条出线, 当故障发生后故障行波就会由故障点向两侧行进, 朝左方行驶的行波遇到不连续点 (母线) 时, 就会发生波的折射与反射, 折射波进入其他出线, 反射波与入射波叠加形成故障线路的测量行波, 当反射波行进到故障点时又会发生折射反射, 此时的反射波开始向左端的母线行进, 而故障点右侧的初始行波在对端母线 (或不连续点) 所产生的反射波也会透过故障点 (折射) 朝左端母线行进, 当故障点选择不同时, 这两个反射波的波头谁先到达左端母线是不确定的, 因此本文就着手提取第一个初始行波波头, 这就避免了各种反射波的影响, 从而使所提出的算法更准确。请注意: 本文以后的各种分析, 结论都是基于初始行波的。

由于初始行波频率很高 (达  $10 \sim 100$  kHz), 配电变的阻抗与频率成正比, 因此配电变很少有行波通过, 可视为开路。由于母线尺寸很小, 行波在其内的传播过可以忽略不计。这样当不考虑母线分布电容时, 行波的流通过程就只有各条出线。根据彼德逊法则可得故障行波的流通示意图如图4。

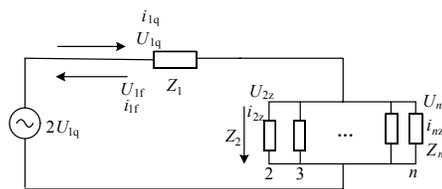


图4 配电网行波传输原理图

Fig.4 Principle graph of traveling wave transmission of distribution system

根据电流电压连续性关系可得

$$\begin{cases} \frac{U_{1q}}{Z} = i_{1q}, \frac{U_{1f}}{Z} = -i_{1f} \\ i = i_{1q} + i_{1f} = i_{2z} + \dots + i_{nz} \\ U = U_{1q} + U_{1f} = U_{2z} = \dots = U_{nz} \end{cases} \quad (7)$$

其中:  $U_{1q}, i_{1q}$  为故障线路电压电流前行波;  $U_{1f}, i_{1f}$  为故障线路电压电流反行波;  $Z$  为故障线路波阻抗;  $i_{2z}, \dots, i_{nz}, U_{2z}, \dots, U_{nz}$  为正常线路电流、电压折射波。一般各出线线路类型一致, 因此各出线波阻抗相等。规定由母线流出的电流为正, 据此化简上式有:

$$i_z = \frac{2}{n} i_{1q}, i_{1\text{合}} = \frac{2}{n} (1-n) i_{1q} \quad (8)$$

式中:  $i_z$  为电流折射波;  $i_{1\text{合}}$  为故障线路电流合成波,  $n$  为出线条数。

当c相故障时，由于线模行波比零模行波传输速度要快很多而两个线模分量传输速度相同，因此电流互感器所传变的初始波头仅含有两个线模分量，将式(6)代入式(8)，再结合式(3)可得故障线路各相与非故障线路各相的比值关系：

$$i_{fa} : i_{fb} : i_{fc} : i_{normala} : i_{normalb} : i_{normalc} = -(n-1) : -(n-1) : 2(n-1) : 1 : 1 : -2 \quad (9)$$

其中： $i_{fa}$ ， $i_{normala}$ 分别为故障线路与正常线路的a相初始行波电流。其他符号类似讨论。当a相，b相，母线故障时分别得比值情况：

$$\begin{cases} i_{fa} : i_{fb} : i_{fc} : i_{normala} : i_{normalb} : i_{normalc} = 1 : 1 : 1 : 1 : 1 & \text{母线故障} \\ i_{fa} : i_{fb} : i_{fc} : i_{normala} : i_{normalb} : i_{normalc} = (n-1) : -2(n-1) : (n-1) : 1 : -2 : 1 & \text{b相故障} \\ i_{fa} : i_{fb} : i_{fc} : i_{normala} : i_{normalb} : i_{normalc} = 2(n-1) : -(n-1) : -(n-1) : -2 : 1 : 1 & \text{a相故障} \end{cases} \quad (10)$$

由上述三种情况的比值关系可知：

(1) 对同一线路来说，故障时三相初始电流行波之和等于0。

(2) 对同一线路而言，故障相初始电流行波幅值是非故障相初始电流行波幅值的2倍，极性相反。两个非故障相初始电流行波幅值相等，极性相同。

(3) 对不同线路来讲，故障线路与非故障线路同一相初始电流行波的比值是一个定值，等于 $-(n-1)$ 。

(4) 母线故障时，各相电流初始行波幅值相等，且同极性。

相初始电流合成行波幅值应理解为该相电流值的突变量，而非绝对量。通过仿真验证上述理论与仿真结果吻合。

通过对以上规律总结可得选线判据：

如果线路j的任意一相电流初始行波幅值是其它任何线路的相同相电流初始行波幅值的k倍( $k > n-1$ )，而其他所有线路相同相电流的初始行波幅值近似相等，则线路j为故障线路。如果所有出线相同相电流初始行波幅值近似相等，则母线故障。这在含三相电流互感器，两相电流互感器的线路中都能应用。为综合利用信息，本文构造 $\lambda = -(i_a + i_c)$ 来作为各出线的初始行波判别量。当采用复小波对各出线 $\lambda$ 量进行处理时，上述比值关系转换成相应行波电流复小波变换初始模极大值之比。即：若

$$\frac{w_j}{w_{i \neq j}} > n-1, \text{且 } w_{i \neq j} \approx w_{k | k \neq j}, j, i, k \in 1, \dots, n$$

线路j故障；否则若

$$w_i \approx w_k, i, k \in 1, \dots, n$$

母线故障。其中 $w_i$ 表示线路i的 $\lambda$ 量的复小波变换模极大值。

从上述推导过程可以看到，这个比值与电压大小无关(从而与故障相角无关)，不受过渡电阻，出线长短影响，更不受中性点接地方式影响(通过仿真可以验证，消弧线圈支路电流行波为0)。当仅有2条出线时，从理论上讲本方法是无法区别线路故障与母线故障的，但由于复小波变换的特殊性和分布电容对非故障线路的平滑作用(分布电容对故障线路无平滑作用)，使故障线路与正常线路的差别仍然会很大，此时仍能选出故障线路。因此本方法适用于各类接地方式的配电线路。

在此没有考虑极性关系是因为当对含噪信号进行滤波重构后，如果去噪处理不当，在母线电容较大时就会出现复小波(或小波)变换的极性翻转，从而使极性关系不再成立。另外本文选用复小波是由于它幅值具有平移不变性(而非相位)，能够克服各类实小波变换中所出现的震荡失稳的情形。当用实小波对信号进行各种额外处理时(如去噪)，此时信号的变换结果与不进行额外处理时相比，结果迥异，尤其是极性关系。这也是学者们发展复小波的一个主要原因。正因为复小波有诸多的优越性，而其幅值关系比极性关系更稳定，因而仅采用幅值判据。

### 2.3 母线电容对选线判据的影响

由于母线一般情况都有补偿电容和对地分布电容，互感器、变压器高压绕组、套管、断路器等设备也都含有对地分布电容。它们可以用一个集中总电容C来等效<sup>[14]</sup>。不同的变电站这个值大小有别，据估算都在0.015  $\mu\text{F}$ 以上，因此当考虑各种分布电容时，行波的传播路径相当于多了一条出线，只是这条出线上接的是电容元件。据彼德逊法则有以下等效电路图(如图5)。

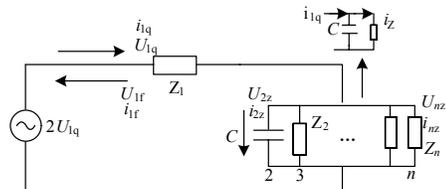


图5 考虑分布电容时配电网行波传输原理图

Fig.5 Principle graph of traveling wave transmission of distribution system considering the distribution capacitance

图中 $C$ 为母线电容;  $Z$ 为除电容外各正常出线的等效波阻抗;  $Z_1$ 为故障线路波阻抗;  $i$ 为 $Z$ 支路初始行波电流。其他参数同对式(7)的解释。

由图5可得:

$$\begin{cases} Z = \frac{Z_1}{n-1} \\ i_{1q} = i + C \frac{diZ}{dt} \\ 2U_{1q} = iZ + i_{1q}Z_1 \end{cases} \quad (11)$$

解得:

$$\begin{cases} i_{\text{合}} = 2i_{1q} \frac{(n-1 + e^{-\frac{m}{zc}})}{n} \\ i_z = \frac{2i_{1q}}{n} (1 - e^{-\frac{m}{zc}}) \end{cases} \quad (12)$$

当 $C$ 相接地短路时, 得此时的故障线路各相与非故障线路各相的比值:

$$i_{\text{fa}} : i_{\text{fb}} : i_{\text{fc}} : i_{\text{normala}} : i_{\text{normalb}} : i_{\text{normalc}} = \\ -(n-1+\varpi) : -(n-1+\varpi) : 2(n-1+\varpi) : (13)$$

$$1-\varpi : 1-\varpi : -2(1-\varpi) \quad \varpi = e^{-\frac{m}{zc}}$$

其他相短路时类似, 只需将公式里边的1换成 $(1-\varpi)$ 即可。观察此时的规律, 发现:

(1) 当考虑母线和设备分布电容时, 2.2节的(1), (2)关系仍成立, 与有无分布电容无关。

(2) 对不同线路而言, 故障线路与非故障线路同一相初始电流行波的比值仍然是一个定值, 等于 $-\frac{(n-1+\varpi)}{1-\varpi} = -(\frac{n}{1-\varpi} - 1)$ 。

可见, 考虑分布电容时, 由于(2)的原因使比值有所出入, 这将影响选线判据。为此考察 $(1-\varpi)$ 具体取值情况。由于影响 $\varpi$ 的有 $n$ 、 $C$ , 而 $Z$ 一般变化较小, 尤其是在出线较多时, 变化更小, 因此主要考察 $n$ 、 $C$ 对 $\varpi$ 的影响。下边列出当 $C$ 、 $n$ 取不同值时的关系曲线(如图6)。

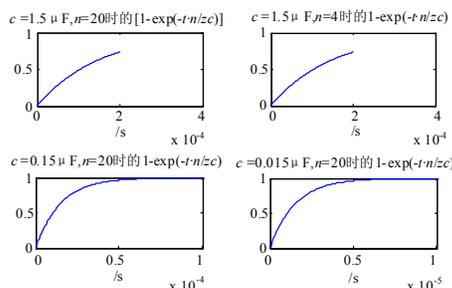


图6  $C$ 、 $n$ 取不同值时 $(1-\varpi)$ 的取值情况

Fig.6 Different values of  $(1-\varpi)$  when  $C$  and  $n$  take various values

由以上曲线变化情况可以知道, 当 $C$ 很大, 出线 $n$ 在20左右时, 上述绝对比值远大于 $(n-1)$ , 从而使选线判据更灵敏。 $n$ 减小时上述比值进一步加大。当 $C$ 较小时, 上述比值稍大于 $n-1$ 。由于不论 $C$ 、 $n$ 如何变化,  $(1-\varpi)$ 最大值为1, 最小为0, 因此上述比值永远大于 $n-1$ , 故母线和设备的分布电容对选线判据无影响。

### 3 仿真验证

按图1搭建四出线10 kV系统, 消弧线圈接地(10%过补偿), 线路参数如下: 变压器110/10 kV, 正序参数:  $R_1=0.48 \Omega/\text{km}$ ,  $L_1=0.9283 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $C_1=0.07038 \mu\text{F}/\text{km}$ , 零序参数:  $R_0=0.79 \Omega/\text{km}$ ,  $L_0=4.2146 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $C_0=0.0436 \mu\text{F}/\text{km}$ ; 四条出线的长度分别为6 km、16 km、24 km、20 km, 输电线路采用贝杰龙分布参数模型。限于篇幅现将结果列出。

算例一: 不计分布电容,  $R_g$ 为50  $\Omega$ , 故障相角为 $70^\circ$ 距母线20 km处线路3C相短路各线路 $\lambda$ 量复小波变换结果如图7(a)。从中可以看到线路3初始模极大值与其他线路初始模极大值之比为13.7, 远大于3, 而线路1、2、4初始模极大值比值为1, 证明这三条线路特性一致, 均与线路3特征相反, 由此判定为线路3短路接地。

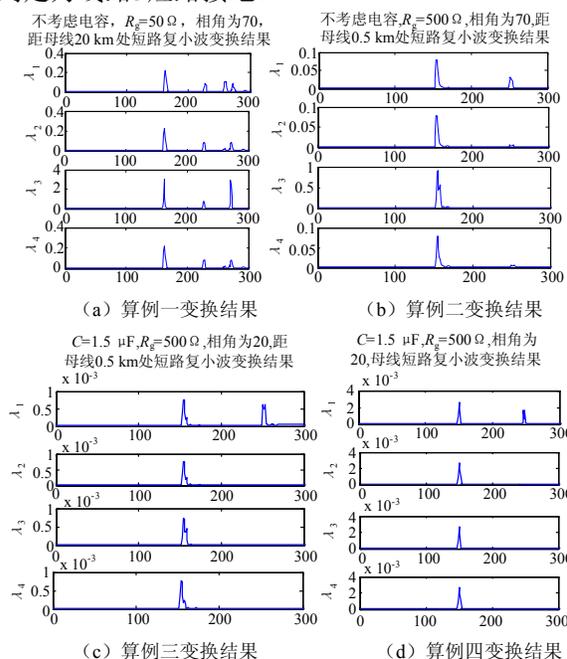


图7 各算例变换结果

Fig.7 Complex wavelet transform results of the four examples

算例二: 不计分布电容, 分析最恶劣情况即

距母线0.5 km经500 Ω 过渡电阻短路, 故障相角为20° 时判据的灵敏度。从图7 (b) 可以看到, 虽然此时距母线很近, 线模行波与零模行波到达母线的时不易区分, 但从各线路λ量的变换结果来看仍然区别明显: 故障线路与正常线路初始模极大值之比等于11.7, 非故障线路之间的比值仍为1。因此, 很容易判断出线路3故障。

算例三: 考虑分布电容时,  $C=1.5 \mu\text{F}$ , 此时仍选择与算例2相同的最不利情况来分析。从各线路λ量的时域仿真图形(图8(b)-  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_4$ )来看, 此时正常线路λ量与不考虑分布电容时见(图8(a)-  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_4$ )相比要平滑得多, 波头上升变得很平缓, 但仍然存在奇异点, 而故障线路λ(见图8(b)-  $\lambda_3$ 和图8(a)-  $\lambda_3$ )量基本上不会受到分布电容的影响。因此复小波变换结果使这两类线路的差别比不考虑电容时更大, 更有利于判别故障线路。从变换结果(图7 (c))看也可以知道, 此时故障线路模极大值是正常线路模极大值的1 000倍, 而正常线路之间几乎没有差别, 比值仍为1, 即分布电容会增加判据的灵敏度。

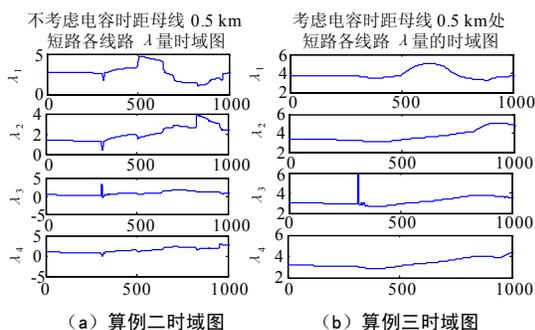


图8 算例二、三时域图

Fig.8 Time domain charts of example 2 and 3

算例四: 当母线短路时, 由于实际一般都有分布电容, 此时考虑存在分布电容, 且经大电阻  $R_g=500 \Omega$  接地, 故障相角较小为20° 的不利情形。此时分布电容对各条出线的影响相同, 都增加了阻尼, 使波头上升变缓(图略)。通过图7 (d) 可以看到四条出线的初始模极大值相同, 比值近似为1, 由此可知这些出线特性一致, 应判定为母线故障。

表1列出1~4算例所对应的模极大值情况与选线结果。

当仅有两条出线时, 下边给出最不易区分故障线路的情况: 距母线0.5 km处短路, 大过渡电阻接地, 故障电压相角很小。此时分别考察存在分布电容与不存在分布电容的情形。由仿真结果(图9) 可以看到, 考虑电容时, 故障线路与非故障线路复小

波变换比值为1 000, 不考虑电容时, 此比值为10.7, 可见只存在两条出线时, 本算法仍能正确选线, 精度仍然很高。

表1 四出线时的模极大值情况及选线结果

Tab.1 Mode maximum and line selection results of four outgoing lines

故障类型	线路1	线路2	线路3	线路4	选线结果
0.5 km 处短路, 不考虑 C	7.93e-2	7.79e-2	9.15e-1	7.86e-2	线路3
0.5 km 处短路, 考虑 C	7.45e-4	7.46e-4	7.44e-1	7.58e-4	线路3
20 km 处短路	2.24e-1	2.23e-1	3.034	2.24e-1	线路3
母线处短路	2.66e-3	2.65e-3	2.67e-3	2.64e-3	母线

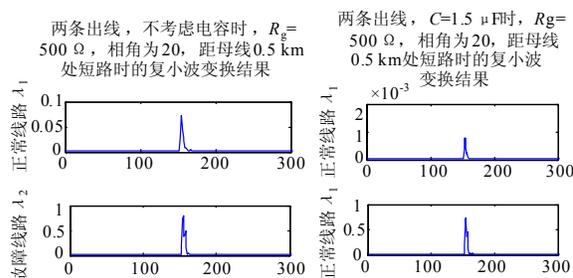


图9 两出线时的变换结果

Fig.9 Complex wavelet transform results of the two outgoing lines

表2列出了两出线时上段两个算例所对应的模极大值情况与选线结果。

表2 两出线时的模极大值情况及选线结果

Tab.2 Mode maximum and line selection results of two outgoing lines

故障类型	线路1	线路2	选线结果
0.5 km 处短路, 不考虑 C	0.073	0.779	线路2
0.5 km 处短路, 考虑 C	7.435e-4	7.442e-1	线路2

## 4 结论

在对中性点非有效接地/不接地系统单相接地故障行波传输规律分析的基础上, 本文提出了基于复小波变换的相电流行波选线算法。由于复小波的时移不变性克服了实小波变换结果的不稳定性, 从而使本选线算法更可靠。本算法简单, 仅需判定幅值即可, 不必做大量计算, 适于在线分析。实际变电站母线端都含有分布电容, 而本文通过理论和仿真证明了分布电容对所提出的选线算法不但不影响选线效果, 反而能增强选线灵敏度, 从而使选线结果更准确。理论与仿真表明, 本算法不受过渡电阻、

补偿方式、故障相角和故障距离的影响, 在各类出线线路类型相同的变电站均适用。

### 参考文献

- [1] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [2] 郝玉山, 杨以涵, 任元恒. 小电流接地微机选线的群体比幅比相原理[J]. 电力情报, 1994, 5 (2): 15-19. HAO Yu-shan, YANG Yi-han, REN Yuan-heng. Principle of Magnitude & Phase Comparison for Micro-computer Based Small Current Fault Line Selection[J]. Information on Electric Power, 1994, 5 (2): 15-19.
- [3] 陈志亮, 范春菊. 基于5次谐波突变量的小电流接地系统选线[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(5): 37-41. CHEN Zhi-liang, FAN Chun-ju. Earth Fault Line Selection in Small Current Neutral Grounding System Based on Break Variable of 5th Harmonic[J]. Proceedings of Electric Power System Automation, 2006, 18 (5): 37-41.
- [4] 陈奎, 唐轶. 小电流接地系统电弧接地选线方法的研究[J]. 继电器, 2005, 33 (16): 5-9. CHEN Kui, TANG Yi. Study on Faulty Line Detection of Single Phase to Ground Fault in Arc Suppression Coil Grounded System[J]. Relay, 2005, 33 (16): 5-9.
- [5] 桑在中, 张慧芬, 潘贞存. 用注入法实现小电流接地系统单相接地选线保护[J]. 电力系统自动化, 1996, 20 (2): 11-13. SANG Zai-zhong, ZHANG Hui-fen, PAN Zhen-cun. Singal Phase Grounding Fault Protection by Injecting Currents in Ineffective Grounding Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20 (2): 11-13.
- [6] 徐青山. 电力系统故障诊断及故障恢复[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [7] 施慎行, 董新洲, 周双喜. 单相接地故障行波分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (23): 29-33. SHI Shen-xing, DONG Xin-zhou, ZHOU Shuang-xi. Analysis of Single Phase Ground Fault Generated Traveling Waves[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (23): 29-33.
- [8] 张帆, 潘贞存, 等. 基于方向行波的小电流接地系统故障选线[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (34): 70-75. ZHANG Fan, PAN Zhen-cun, et al. Fault Line Selection in Non-solidly Earthed Network Based on Direction Traveling Wave[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (34): 70-75.
- [9] 徐青山, 陈锦根, 唐国庆. 考虑母线分布电容影响的单端行波测距法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (2): 70-73. XU Qing-shan, CHEN Jin-gen, TANG Guo-qing. Single Ended Fault Location Approach Considering Bus Distributed Capacitance Effect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (2): 70-73.
- [10] 董新洲, 毕见广. 配电线路暂态行波的分析 and 接地选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (4): 1-6. DONG Xin-zhou, BI Jian-guang. Analysis of Transient Traveling Wave and Study on Fault Line Selection for Distribution Lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (4): 1-6.
- [11] 孔瑞忠, 董新洲, 毕见广. 基于电流行波的小电流接地选线装置的实验[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(5): 63-67. KONG Rui-zhong, DONG Xin-zhou, BI Jian-guang. Test of Fault Line Selector Based on Current Traveling Wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (5): 63-67.
- [12] 毕见广, 董新洲, 周双喜. 基于两相电流行波的接地选线方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (3): 17-21. BI Jian-guang, DONG Xin-zhou, ZHOU Shuang-xi. Fault Line Selection Based on Two-phase Current Traveling Wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (3): 17-21.
- [13] Kingsbury N G. Shift Invariant Properties of the Dual-tree Complex Wavelet Transform[A]. in: Proc ICASSP 99[C]. Phoenix: 1999.
- [14] Lou van der Sluis. 电力系统暂态[M]. 王一宇, 周于邦, 译. 北京: 中国电力出版社, 2003.

收稿日期: 2009-05-07; 修回日期: 2009-09-01

作者简介:

周登登(1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障诊断; E-mail: 376591816@qq.com

刘志刚(1975-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代信号处理及其在电力系统中的应用。