

# 基于暂态零序电流频带能量的配电系统接地选线方法研究

李健<sup>1</sup>, 卢继平<sup>1</sup>, 黎颖<sup>1</sup>, 何尔文<sup>2</sup>

(1. 重庆大学电气工程学院高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044;

2. 西昌电业局, 四川 西昌 615000)

**摘要:** 分析了配电系统单相接地的故障特征, 根据非故障线路故障电流行波能量只是故障线路分量的结论, 提出运用在时频空间皆具有良好聚焦特性的小波包, 以适当频率带宽, 对故障后的零序暂态电流信号进行处理, 自适应选择频带来实现配电系统接地选线的新方法。大量的 Matlab 仿真试验结果验证了本文提出的方法准确、可靠, 适合于接地方式不同的配电系统。

**关键词:** 配电系统; 故障选线; 暂态零序电流; 小波包

## Research on faulty line identification in distribution systems based on the frequency-band energy of transient zero-sequence current

LI Jian<sup>1</sup>, LU Ji-ping<sup>1</sup>, LI Ying<sup>1</sup>, HE Er-wen<sup>2</sup>

(1. The Key Laboratory of High Voltage Engineering & Electrical New Technology, Ministry of Education, Electrical Engineering College of Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Xichang Power Supply Bureau, Xichang 615000, China)

**Abstract:** A new method of faulty line identification in distribution system is proposed in this paper, in which the signal of zero-sequence transient current is dealt with the way of the wavelet package based on analyzing the characteristics of the single-phase earth fault in distribution system. The proposed method is validated by a great number of simulation experiments in Matlab accurately and reliably for various distribution systems with different neutral grounding modes.

**Key words:** distribution system; faulty line selection; transient zero-sequence current; wavelet package

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)11-0001-04

## 0 引言

在我国的中低压电网中,中性点一般采取不接地、经高电阻接地、或经消弧线圈接地等接地方式。这类电网在发生单相接地故障时,短路电流只能通过大地电容或阻抗形成小电流回路,所以又被称为小电流接地电网<sup>[1]</sup>。目前小电流接地系统故障选线方法按所用电量可以分为:利用注入信号和故障信号。其中利用故障信号的方法又可分为利用故障信号的稳态量和暂态量两种。注入法需要附加信号源且注入信号会给电网带来一定的影响;利用故障信号稳态量的方法存在检测信号偏小的问题,且不能判断瞬间接地和间歇性接地故障;故障信号暂态量较大,完整地反映了故障发生的过程和特点,单相故障可以视为由一系列持续时间很短的衰减的故障组成。应用适当的信号处理工具对暂态信号进行分析,不仅能判断稳定接地,而且能够判断瞬间接地和间歇性接地故障<sup>[2,3]</sup>。

本文研究了配电系统单相接地故障发生后的电

压和电流特点,提出利用小波包分解故障暂态零序电流,并在系统暂态电容电流的暂态自由振荡分量能量最集中的频带内比较各条线路暂态自由振荡分量能量大小的方法来选择故障线路。大量在 Matlab 仿真试验结果验证了方法的准确性、有效性,适合于接地方式不同的各种配电系统。

## 1 db (Daubechies) 正交小波包特性

本文中采用的 db 小波包是由 db 小波扩展而来,db 小波除了具有小波的一般性质外,由其构成的共轭正交滤波器组系统还有一个重要性质是能量无损性,即其输入信号  $x(n)$  和输出信号  $y(n)$  满足下列方程:

$$e_x = \sum_n x^T(n)x(n) = \sum_{i=1}^m \left[ \sum_n x_i^2(n) \right] \quad (1)$$

$$e_y = \sum_n y^T(n)y(n) = \sum_{i=1}^m \left[ \sum_n y_i^2(n) \right] \quad (2)$$

$$e_x = e_y \quad (3)$$

式中:  $e_x$  是输入信号能量,  $e_y$  是输出信号能量。式

(1) ~ (3) 表明: 原始信号经由 db 小波构成的一个共轭正交滤波器组系统滤波后, 能量较大的输出信号在原始信号中所占的比重也较大。因此, 通过比较各频段下 db 小波包分解结果的能量, 就可以确定原始信号的频率分布情况<sup>[4~7]</sup>。

## 2 单相接地故障选线

### 2.1 配电系统单相接地的特点

配电系统在发生单相接地故障后, 全系统都将出现零序电压, 其数值等于系统对地相电压, 利用零序电压突变量可以实现故障选线元件的可靠启动。

当中性点不接地系统发生单相接地故障时, 故障线路上的零序电流为全系统非故障线路和元件对地电容电流之总和, 数值较大, 电容性无功功率的实际方向为由故障线路流向母线。

当中性点经消弧线圈接地的电网发生单相接地故障时, 流过故障线路的暂态电流  $i_f$  由暂态电容电流  $i_c$  和暂态电感电流  $i_L$  两部分叠加而成。

$$i_f = i_c + i_L \quad (4)$$

$$i_c = i_{cs} + i_{cs} = I_{cm} \left[ (\omega / \sin \phi \omega - \cos \phi \cos \omega t) e^{-\alpha t} + \cos(\omega t + \phi) \right] \quad (5)$$

$$i_L = i_{Ldc} + i_{Lst} = I_{Lm} \left[ \cos \phi e^{t/\tau_L} - (\omega t + \phi) \right] \quad (6)$$

式中:  $i_{cs}$  为电容电流暂态自由振荡分量,  $i_{Ldc}$  为电感电流暂态直流分量,  $i_{cs}$ 、 $i_{Lst}$  为稳态工频分量,  $\omega$ 、 $\tau_L$  为电容电流暂态自由振荡分量的角频率,  $\delta$  为自由振荡分量的衰减系数,  $I_{cm}$  为电容电流幅值,  $I_{Lm}$  为电感电流幅值,  $\tau_L$  为电感电流时间常数,  $\phi$  为初始相位。

暂态电容电流  $i_c$  由暂态自由振荡分量  $i_{cs}$  和稳态工频分量  $i_{cs}$  组成, 其中自由振荡分量  $i_{cs}$  的频率主要集中在高频段。而暂态电感电流  $i_L$  由暂态的直流分量  $i_{Ldc}$  和稳态的交流分量  $i_{Lst}$  组成, 及暂态电感电流主要是由工频量和非周期分量构成。这样暂态电流虽然由暂态电容电流  $i_c$  和暂态电感电流  $i_L$  叠加而成, 但由于  $i_c$  和  $i_L$  的频率差别较大, 所以不可能相互补偿。因此, 工频状态下关于残流、失谐度及和谐度等概念在暂态分析时都不适用。而且配电系统的中性点无论是经固定消弧线圈接地, 还是经响

应速度更快的自动跟踪消弧线圈接地, 持续时间很短并且频率主要集中在高频段的暂态电容电流自由振荡分量  $i_{cs}$  都是不可能被电感电流所补偿的<sup>[8~11]</sup>。

从文献[12]的分析可知, 在暂态过程的初始阶段, 配电系统的中性点不论为谐振接地还是不接地方式, 其暂态电流在高频段的频率、幅值特性都主要是由高频暂态电容电流的自由振荡分量  $i_{cs}$  所确定, 而  $i_{cs}$  的持续时间一般在 10 ms 左右。

### 2.2 故障选线原理

根据上述对各种接地方式的配电系统故障暂态过程分析, 再结合 db 小波构成的共轭正交滤波器组系统的特性可知, 当配电系统发生单相接地故障时, 利用 db 小波包将流过各条线路的暂态零序电流按一定频带宽度进行分解, 得到各条线路各子频带 ( $ij$ ) 的小波包分解系数  $C_{ij}(n)$ 。剔除工频所在最低频段后, 按式 (7) 计算各条线路各子频带 ( $ij$ ) 能量  $e_{ij}(m)$ , 再按式 (8) 计算有  $m$  条出线的系统各子频带 ( $ij$ ) 能量  $E_{ij}$ 。

$$e_{ij} = \sum_n [C_{ij}(n)]^2 \quad (7)$$

$$E_{ij} = \sum_m [e_{ij}(m)]^2 \quad (8)$$

式中:  $e_{ij}$  作为小波包分解子频带 ( $i, j$ ) 的频带能量,  $C_{ij}(n)$  是小波包分解子频带 ( $i, j$ ) 的系数。

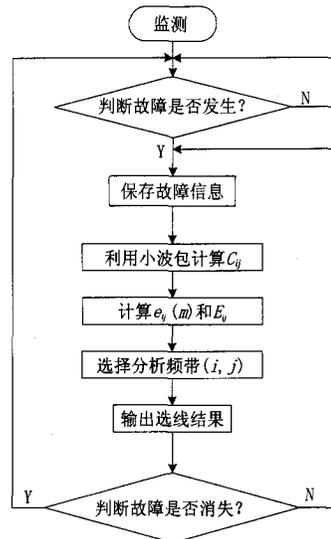


图 1 故障选线逻辑流程

Fig.1 Logical flow of faulty line selection

由于各线路暂态电容电流都是由对地电容经接地故障点构成回路的, 所以流经各非故障线路的暂态电容电流必然要流经故障线路, 加之小波包分解是一个线性变换。按能量最大原则确定最大  $E_{ij}$  对

应子频带作为分析频带, 此频带对应系统暂态电容电流自由振荡分量分布最集中的频带, 也是故障特征最明显的特征频段, 从而为可靠、准确选线提供了基础。由于流经非故障线路的高频暂态电容电流自由振荡分量  $i_{\cos, \text{nonf}}$  是故障线路  $i_{\cos}$  的分量, 所以可以根据这一特性在分析频带内识别配电系统故障线路。按能量最大原则比较  $m$  条出线在分析频带 ( $i_{ij}$ ) 的  $e_{ij}$ , 故障线路的暂态电容电流自由振荡分量能量最大。故障选线逻辑流程如图 1 所示。

### 2.3 故障选线的实现

基于现有通信及自动化水平, 故障选线的实现如图 2 所示。为兼顾选线准确度和对硬件的要求, 用于小波包分解的零序暂态电流信号的采样频率定为 10 kHz, 可处理的最高谐波频率为 5 kHz, 并且利用零序电压突变量实现故障选线元件的可靠启动。故障暂态电容电流自由振荡分量持续时间在 10 ms 左右, 因此采集故障后 10 ms 的零序电流数据, 这段数据包含了暂态电流特征信号。为了避免在小波包分解过程中出现有效数据丢失的情况, 本文将故障前后 10 ms 的数据一起进行处理, 来实现故障选线。在数据处理环节主要包括: 小波包分解; 计算各子频带的线路能量  $e_{ij}$  和系统能量  $E_{ij}$ ; 系统最大能量子频带确定及比较选定频带各条线路能量的大小。

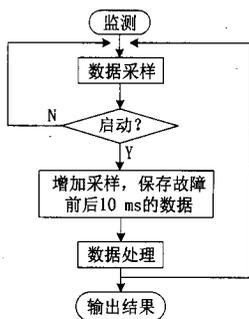


图 2 故障选线实现流程

Fig.2 Flow of faulty line selection

本文基于 Matlab, 采用其工具箱中 Daubechies8 正交小波生成的小波包, 对各条出线的零序电流进行分解。分解时, 要求最终用于故障选线的频带宽度应选择适当。若过细, 则频带对应采样点数过小, 不利于进一步信号分析; 若过宽, 则信息含量增加, 降低故障选线的可靠性。综合两方面, 选线频带宽度定为 150 Hz, 则根据数据采样频率及小波包的频率二分特性, 分解层数定为 5。

## 3 仿真及结果分析

### 3.1 Matlab 仿真

基于 Matlab 的仿真系统是一个有 5 条出线的 10 kV 配电网, 线路长度  $L_1=10$  km,  $L_2=15$  km,  $L_3=20$  km,  $L_4=25$  km,  $L_5=30$  km, 正序阻抗  $Z_1=(0.17+j0.38) \Omega/\text{km}$ , 零序阻抗  $Z_0=(0.23+j1.72) \Omega/\text{km}$ , 零序容纳  $b_0=1.884$  ms/km。K1, K2 断开, 为中性点不接地系统; K1 闭合, 为中性点经固定消弧线圈 X1 接地系统; K2 闭合, 为中性点经快速响应的自动跟踪消弧线圈 X2 接地系统, 如图 3 所示。

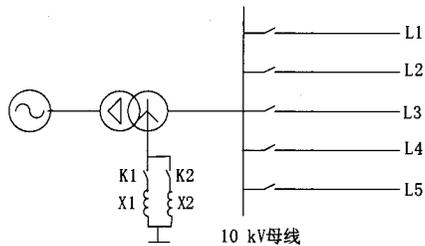


图 3 10 kV 配电系统结构

Fig.3 Structure of a 10kV distribution system

当中性点不接地系统 (K1, K2 断开) 的线路 1 发生距母线 1 km 处的 A 相接地故障, 过渡电阻 10  $\Omega$ , 计算并比较各频带的系统能量, 频带 (5,4) 被选作故障选线的分析频带。该频带下的小波包分解结果如图 4 所示, 横坐标为分解序列, 纵坐标表征幅值。计算得出 L1~L5 在频带 (5,4) 的能量依次是 14 058, 8 043, 12 912, 9 108, 5 500, 即得故障发生在线路 1。

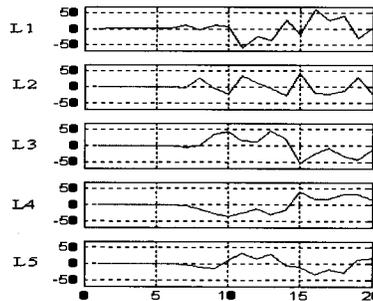


图 4 频带 (5,4) 下的小波包分解结果

Fig.4 Result of wavelet packet decomposition in band (5,4)

当中性点经固定消弧线圈 X1 接地系统 (K1 闭合, K2 断开) 的线路 1 发生距母线 8 km 处的 B 相接地故障, 过渡电阻 100  $\Omega$ , 计算并比较各频带的系统能量, 频带 (5,4) 被选作故障选线的分析频带。该频带下的小波包分解结果如图 5 所示, 横坐标为分解序列, 纵坐标表征幅值。计算得出 L1~L5 在频带 (5,4) 的能量依次是 627, 312, 498, 216, 190, 即得故障发生在线路 1。

基于 Matlab 对不同故障状况, 如不同接地方式系统, 不同故障线路, 不同故障点, 不同过渡电阻等, 进行了大量的仿真测试。结果表明此选线方法

在各种故障模式下都能正确给出选线结果。表 1 示出了部分仿真选线结果。

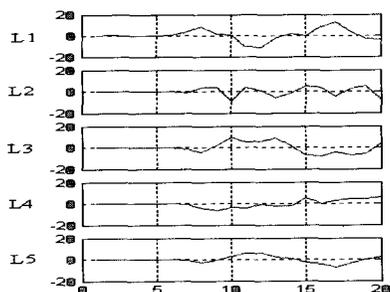


图 5 频带 (5, 4) 下的小波包分解结果

Fig.5 Result of wavelet packet decomposition in band (5,4)

#### 4 结论

小电流接地系统中, 只对基频分量进行分析很

表 1 配电系统单相接地选线结果

Tab.1 Result of signal-phase-to-ground fault in distribution system

故障线路	故障相	系统中性点接地模式	故障距离 /km	过渡电阻 /Ω	分析频带	各条线路分析频带能量					选线结果
						L1	L2	L3	L4	L5	
L1	A	不接地	1	10	(5,4)	14 058	8 043	12 912	9 108	5 500	L1
L1	B	X1 接地	8	100	(5,4)	627	312	498	216	190	L1
L2	C	X2 接地	12	500	(5,7)	4.12	7.6	2.91	6.19	0.87	L2
L3	A	X1 接地	18	400	(5,6)	7.59	62.31	651	106	128	L3
L4	B	X1 接地	20	200	(5,4)	114	124	68	132	58	L4
L5	C	X2 接地	25	600	(5,6)	0.86	8.36	19.6	35.5	67.6	L5

(注: X1 接地表示中性点经固定消弧线圈接地系统; X2 接地表示中性点经自动跟踪消弧线圈接地系统)

#### 参考文献

[1] 马珂,张保会. 中性点非直接接地系统故障选线原理的发展与展望[J].继电器,2003.  
MA Ke, ZHANG Bao-hui. Development and Prospect of the Single-phase Grounding Fault Detection in Unearthed or Compensated Neutral Networks[J].Relay,2003.

[2] 贾清泉,刘连光,杨以涵,等. 应用小波检测故障突变特性实现配电网小电流的选线时方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10):78-82.  
JIA Qing-quan, LIU Lian-guang, YANG Yi-han, et al. Abrupt Change Detection with Wavelet for Small Current Fault Relaying[J]. Proceedings of the CSEE,2001, 21(10):78-82.

[3] 苗友忠,孙雅明,杨华. 中性点不接地配电系统馈线单相接地故障的暂态电流保护新原理[J].中国电机工程学报, 2004, 24(2): 28-32.  
MAO You-zhong, SUN Ya-ming, YANG Hua. A New Principle of Transient Current Grounded Relay for Feeder in Ungrounded Distribution Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 28-32.

[4] Mallat S. Singularity Detection and Processing with

多情况下是不满足要求的。各出线故障电流含有对故障选线很有价值的暂态信息, 利用这些暂态信息进行分析比对基频分析更有效、准确。本文利用小波包的时频聚焦特性, 对配电网发生单相故障后的暂态电气量按照一定的频带宽度分解, 对应于不同的中性点接地方式以频带能量的观点选择适当的频带来实现准确选线。确保了暂态信号中强低频背景下高频分量的有效提取, 并且避免了现有选线方法凭经验选择高频分量所存在的盲目性。Matlab 仿真证明本方法的正确和有效。基于本方法的选线装置结构简单, 性能可靠, 安装方便, 操作简单, 目前已投入一变电站试运行。试运行结果表明了本装置对变电站不正常运行状态和故障状态有较强的识别能力。

Wavelets[J].IEEE Trans on Information Theroy,1992, 38(2):617-643.

[5] 毛鹏,等.小波包在配电网单相接地故障选线中的应用. 电网技术,2000,24(6):9-13.  
MAO Peng,et al. Wavelets Packet Based on Detection of Phase-to-ground Fault in Distribution Automation System[J].Power System Technology, 2000,24(6):9-13.

[6] Chaari O, Meunier M, Brouaye F. Wavelets : A New Tool for the Resonant Grounded Power Distribution Systems Relaying[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(3): 1301-1308.

[7] Assef Y, Chaari O, Meunier M. Classification of Power Distribution System Fault Currents Using Wavelets Associated to Artificial Neural Networks[A]. In:Proceedings of the IEEE International Symposium on Time Frequency and Time Scale Analysis[C]. 1996. 421-424.

[8] 王坚,卢继平,等. 新型小电流接地故障选线装置的设计[J].继电器,2004.

(下转第 20 页 continued on page 20)

1993.  
SHEN Shan-de. Identification of Power System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.
- [6] 李敏强, 寇纪淞, 林丹, 等. 遗传算法的基本理论与运用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.  
LI Min-qiang, KOU Ji-song, LIN Dan, et al. Genetic Algorithm Basic Theory and Application[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [7] 张粒子, 舒隽, 林宪枢, 等. 基于遗传算法的无功规划优化[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 5-8.  
ZHANG Li-zi, SHU Jun, LIN Xian-shu, et al. Reactive Power Planning Based on Genetic Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 5-8.
- [8] 叶在福, 单渊达. 基于边界搜索策略的遗传算法在电网扩展规划中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(11): 41-45.  
YE Zai-fu, SHAN Yuan-da. An New Transmission Network Expansion Planning Using Improved Genetic Algorithm Based on Border Line Search Strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(11): 41-45.
- [9] 汪峰, 朱艺颖, 白晓民. 基于遗传算法的机组组合研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(6): 36-41.  
WANG Feng, ZHU Yi-ying, BAI Xiao-min. Study of GA-based Unit Commitment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(6): 36-41.
- [10] 玄光南, 程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.  
XUAN Guang-nan, Cheng Run-wei. Genetic Algorithms and Engineering Optimization[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [11] 高玮. 改进的快速遗传算法及其性能研究[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(11): 1427-1430.  
GAO Wei. An Improved Fast Convergent Genetic Algorithm and Its Performance Study[J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(11): 1427-1430.
- [12] 张志顺, 胡勇刚, 赵宏伟, 等. 基于改进形式的遗传算法研究[J]. 微电子学, 2002, 32(4): 273-275.  
ZHANG Zhi-shun, HU Yong-gang, ZHAO Hong-wei, et al. Research on an Improved Genetic Algorithm[J]. Microelectronics, 2002, 32(4): 273-275.

收稿日期: 2006-08-30; 修回日期: 2007-04-12

作者简介:

王晓伟(1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制; E-mail:wangxw\_nj@163.com

蒋平(1954-), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统运行控制和电力电子在电力系统中的应用;

曹亚龙(1979-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制。

(上接第4页 continued from page 4)

- WANG Jian, LU Ji-ping, et al. New Design of Fault Line Selection Device for Indirectly Grounding Power System[J]. Realy, 2004.
- [9] 索南加乐, 张超, 等. 基于模型参数识别法的小电流接地故障选线研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(19): 65-70.  
SUONAN Jia-le, ZHANG Chao, et al. Fault Line Selection in the Non-solid Earthed Network Based on the Model Identification Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(19): 65-70.
- [10] 陈忠仁, 吴维宁, 陈家宏. 配电网自动消弧装置的测量跟踪问题[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(10): 84-87.  
CHEN Zhong-ren, WU Wei-ning, CHEN Jia-hong. Measuring and Tracing of Automatic Arc-suppression Devices in Distribution Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(10): 84-87.
- [11] 王耀南, 等. 基于小波包的小电流接地系统故障选线的新判据[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 54-58.  
WANG Yao-nan, et al. A New Criterion for Earth Fault Line Selection Based on Wavelet Packets in Small Current Neutral Grounding System[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 54-58.
- [12] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 水力电力出版社, 2001.  
YAO Huan-nian, CAO Mei-yue. The Resonant Earth in Power System[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 2000.

收稿日期: 2006-12-11; 修回日期: 2007-01-19

作者简介:

李健(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail:jila2007@yahoo.com.cn

卢继平(1962-), 男, 副教授, 主要从事电力系统继电保护与控制的研究工作;

黎颖(1981-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。