

小波系数峰值极性法的配电网单相接地故障选线保护

黄景光¹, 吕艳萍², 刘帆¹, 杨力森¹

(1. 三峡大学, 湖北 宜昌 443002; 2 武汉大学, 湖北 武汉 430072)

摘要: 引入一种新的基于小波包分析的小接地系统单相接地短路故障选线方法: 利用各线路及母线零序电流的小波包系数的峰值极性, 构成新的故障选线保护判据, 通过判断峰值极性特征完成故障选线工作。利用 Matlab 仿真了一个典型的中性点经消弧线圈接地的小系统, 通过对仿真结果的分析 and 计算, 证明了此方法的正确和有效。

关键词: 小波分析; 故障选线; 峰值极性; 单相接地

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)12-0017-05

0 引言

电力系统中性点接地方式可分为直接接地和不直接接地两大类。35 kV 及以下电压等级的配电网中性点的常用接地方式有: 不接地方式, 经消弧线圈接地方式, 经电阻接地方式等。我国 66 kV 及以下的电网的中性点接地方式, 在单相接地时的电容电流不大于安全电流 (如: 35 kV 系统为 10 A, 10 kV 为 20 A) 时, 采用不接地方式, 否则通常采用经消弧线圈接地方式。通常选择消弧线圈的参数, 使其电感与系统对地电容接近于工频谐振 (一般选择 10% 左右的过补偿方式), 其作用就是补偿线路对地电容电流, 以消除单相接地短路时故障点电弧。

当中性点不接地或经消弧线圈接地系统中发生单相接地短路时, 零序电压作用于系统对地电容和消弧线圈, 产生零序电流, 并以故障点作为回路。在稳态下, 非故障线路的零序电流为本线路对地电容电流, 故障线路零序电流为系统所有非故障元件对地电容电流以及中性点感性电流的向量和。对于中性点不接地系统, 故障线路零序电流可能是非故障线路的几倍, 零序功率为感性, 而非故障线路零序功率为容性; 对于中性点经消弧线圈接地系统, 故障线路和非故障线路的稳态零序电流都很小, 零序功率都是电容性的。

通过对单相接地故障的分析, 对于中性点经消弧线圈接地系统, 稳态基波分量不能用来构成故障选线保护。存在于电源电压中的奇数整次谐波如 5 次、7 次等, 因远离消弧线圈与对地电容谐振频率而基本不受消弧线圈影响, 但由于在线路电流中仅占百分之几, 数值太小, 不易提取, 运用传统方法构成的基于 5 次、7 次谐波选线保护不很可靠。相比之

下, 暂态分量数值较大, 特别是故障瞬间的突变产生的暂态电流数值很大。但传统信号分析手段都不适合用于非平稳信号的处理, 小波分析是理想的非平稳信号分析与处理工具, 本文利用暂态分量, 构成了一种基于小波包分析的故障选线保护算法: 小波系数峰值极性法, 并证明了其优异的可靠性、灵敏性和适应能力。

1 基于 MATLAB 的系统仿真

为了能够全面地分析中性点不接地或经消弧线圈接地系统在各种条件下 (如线路参数、负荷大小、故障时刻、故障点位置以及过渡电阻等) 的单相接地故障, 本文建立了一个基于 MATLAB SIMULINK 的小型 35 kV 系统仿真模型, 原理图见图 1。这是一个有 1 条进线 5 条出线的 35 kV 变电站。电源为一个简化模型的同步发电机, 主变压器为 Yn - 11/ 接线。中性点不接地或经消弧线圈接地, 中性点消弧线圈电感的大小决定了系统的补偿方式。考虑到系统参数及运行状态的多样性, 仿真过程中, 各条线路的长度、参数和所带负荷都可以设置为互不相同, 并通过计算获得潮流平衡、系统仿真初始值以及消弧线圈电感值, 图 1 为一组典型的参数。负荷侧变压器全部为 /Yg - 11 接线, 以隔离零序网络。一个三相故障模型用来模拟经不同过渡电阻的、在不同时刻发生和切除的各种类型的短路故障。

在不同条件下运行仿真模型, 输出母线三相电压和零序电压以及各线路零序电流, 运用小波包方法进行分析, 实现故障选线。

2 小波包零序功率分量故障选线保护

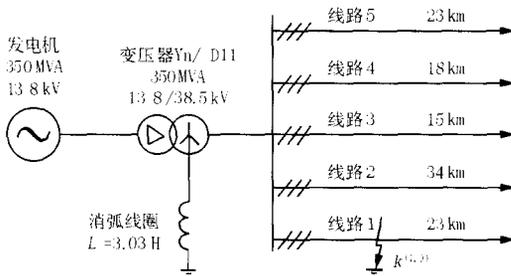


图 1 经消弧线圈接地系统的结构和参数
Fig 1 Structure and parameters of the Petersen coil grounded system

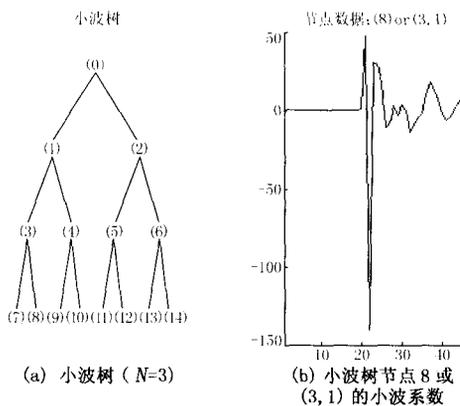


图 2 小波树

Fig 2 Wavelet decomposition tree (N = 3)

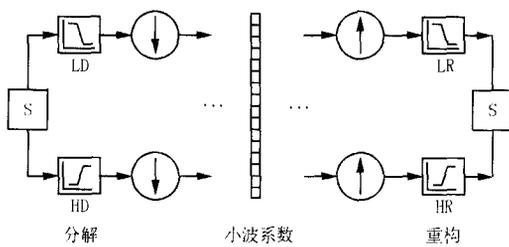


图 3 小波包分解与重构

Fig 3 Wavelet packet decomposition and reconstruction

2.1 小波包

设正交尺度函数 $\phi(t)$, 小波函数 $\psi(t)$, 且 $\phi_0(t) = \phi(t)$, $\psi_1(t) = \psi(t)$, 则双尺度函数关系:

$$\begin{cases} \phi_0(t) = \sum_k h_k \phi_0(2t - k) \\ \psi_1(t) = \sum_k g_k \phi_0(2t - k) \end{cases} \quad (1)$$

于是, 函数 ψ_n , $n = 2l$ 或 $2l + 1$, $l = 0, 1, \dots$ 且

$$\begin{cases} \psi_{2l}(t) = \sum_k h_k \psi_{2l-1}(2t - k) \\ \psi_{2l+1}(t) = \sum_k g_k \psi_{2l-1}(2t - k) \end{cases} \quad (2)$$

是关于 $\phi(t)$ 的小波包。

由于 $\phi_0(t)$ 是由序列 $\{h_k\}$ 唯一确定的, 所以 $\{\psi_n\}$ 是关于 $\{h_k\}$ 的正交小波包。紧支撑小波包分析就是用一组正交 (或双正交) 镜像 FIR 滤波器中的分解低通 LD 和分解高通 HD 滤波器, 把信号分解为低频部分 (近似像) 和高频部分 (细节), 并对分解后的所有分量继续重复这一过程, 得到一个二叉树结构, 见图 2。在此小波树的第 N ($N > 0$) 层, 信号被分解为 2^N 个带宽相等的频段的分量 (小波系数), 并由此实现在时域和频域上的局部化。小波系数经过重构低通 LR 和重构高通 HR 滤波器以后, 可以实现信号的完全重构。为了保持数据量不变, 分解时向下采样, 重构时向上抽样, 见图 3。其中,

$$\begin{cases} g_k = (-1)^k \bar{h}_{-k+1} \\ a_k = \frac{1}{2} \bar{h}_k \\ b_k = \frac{1}{2} \bar{g}_k \end{cases} \quad (3)$$

设 $d_l^{j,n}$ 为小波系数, 则小波包分解算法:

$$\begin{cases} d_l^{j,2n} = \sum_k a_{k-2l} d_k^{j+1,n} \\ d_l^{j,2n+1} = \sum_k b_{k-2l} d_k^{j+1,n} \end{cases} \quad (4)$$

小波包重构算法:

$$d_l^{j+1,n} = \sum_k [h_{l-2k} d_k^{j,2n} + g_{l-2k} d_k^{j,2n+1}] \quad (5)$$

表 1 双正交小波包镜像滤波器组

Tab 1 Biorthogonal wavelet filter set

重构		分解	
低通	高通	低通	高通
0	0	0	0
0	-0.033 1	0.033 1	0
0	-0.066 3	-0.066 3	0
0.353 6	0.176 8	-0.176 8	0.353 6
0.707 1	0.419 8	0.419 8	-0.707 1
0.353 6	-0.994 4	0.994 4	0.353 6
0	0.419 8	0.419 8	0
0	0.176 8	-0.176 8	0
0	-0.066 3	-0.066 3	0
0	-0.033 1	0.033 1	0

由于小波的正交性和对称性难以同时满足, 而对称性关系到是否能够进行精确重构。所以, 在要求精确重构时, 可以采用双正交小波, 它有两个满足双正交的小波函数, 一个作为分解小波, 一个作为重构小波。表 1 所列为本文采用的双正交小波包镜像滤波器组。

2.2 小波包零序功率分量

运用 MATLAB 建立的系统模型, 完成在各典型

故障点的不同条件下经过渡电阻的单相接地故障的仿真,取故障前后各约 $1/4$ 工频周期的数据(为计算方便数据点数取为 $2^8 = 256$),把零序电流分解为小波树,计算各节点上的小波系数。通过比较同一节点上的各线路的零序电流小波系数波形的对比特点,完成单相接地故障线路的判别,即故障选线。

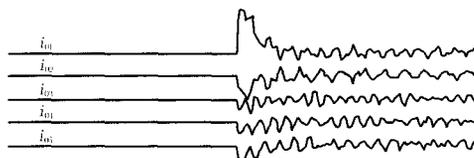


图 4 线路 1 单相接地故障时各线路零序电流波形

Fig 4 Zero-sequence current waveforms when single-phase grounding in line one

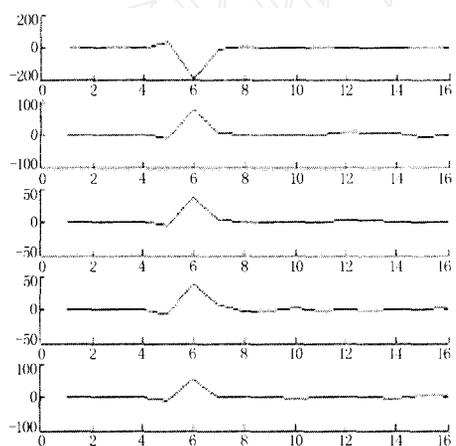


图 5 线路 1 单相接地故障时节点 32 小波系数

Fig 5 Node-32 wavelet coefficients when single-phase grounding in line one

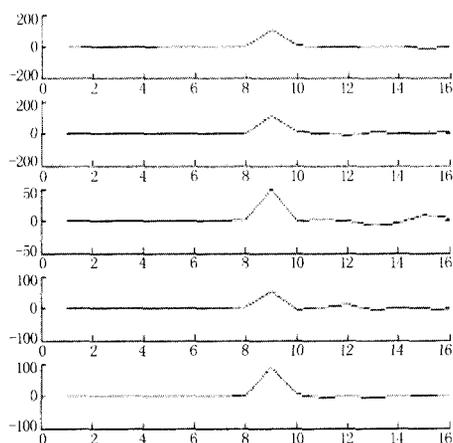


图 6 母线单相接地故障时节点 32 小波系数

Fig 6 Node-32 wavelet coefficients when single phase grounding in the bus

图 4 是线路 1 发生单相接地故障时的零序电流波形,运用双正交小波对零序电流进行分解,对比各节点上小波系数的波形特征,图 5 是各线路零序电流在小波树 32 号节点上的小波系数波形对比。从图中可以看到,在小波树的这个节点上,各线路零序电流小波系数呈现明显的波形差异:在图 5 中,4 条非故障线路零序电流小波系数波形峰值的极性(也就是系数绝对值最大值的正负极性)基本一致,有且仅有一个零序电流(正好是故障线路 1 的零序电流)小波系数波形峰值的极性正好与其它线路相反。

这会不会是一个偶然的巧合呢?我们做了大量的仿真计算,在不同的故障条件下:包括线路和系统参数条件、中性点(不接地或经消弧线圈接地)、负荷、故障点(各线路首端、中点、末端以及母线上的不同故障相)、过渡电阻(0、100、500)、故障发生相位角等,对各种条件下的故障结果进行分析,发现故障线路与非故障线路零序电流小波系数波形的峰值的极性都能够在小波树的某些节点上呈现相反的特征,也就是说,在系统线路条数大于 3 时,系统中如果发生了单相接地故障,各线路零序电流小波系数的波形峰值(系数绝对值最大的点),在对应的小波树某些节点上,其峰值极性有且只有一个与其它的相反,这个电流所在的线路就是发生接地故障的线路,而如果各线路零序电流小波系数的波形峰值极性一致,则故障发生在母线上。这个结论为我们提供了一个有价值的中性点不直接接地系统的单相接地故障选线保护的判据:零序电流小波系数波形的峰值极性法。

图 6 为上述系统中母线上发生 A 相单相接地故障时,节点 32 上各线路零序电流小波系数的波形峰值极性的情形,从图中可以看到各线路零序电流小波系数的峰值极性惊人的一致,这一特征可以作为母线单相接地故障的可靠判据。

2.3 选线保护程序设计

当小电流接地系统发生单相接地故障时,故障相对地电压下降到接近于零,非故障相电压升高到系统相间电压。本文利用零序电压突变量启动选线保护,再利用三相电压的特点判断故障类型及故障相,在确认是单相接地故障时,读取故障前后各约 $1/4$ 工频周期的数据,进入故障选线程序。

必须说明的是,由于电力系统运行方式和线路参数的多样性、故障时刻以及过渡电阻等因素的作用,并非在小波树的所有节点零序电流小波系数的

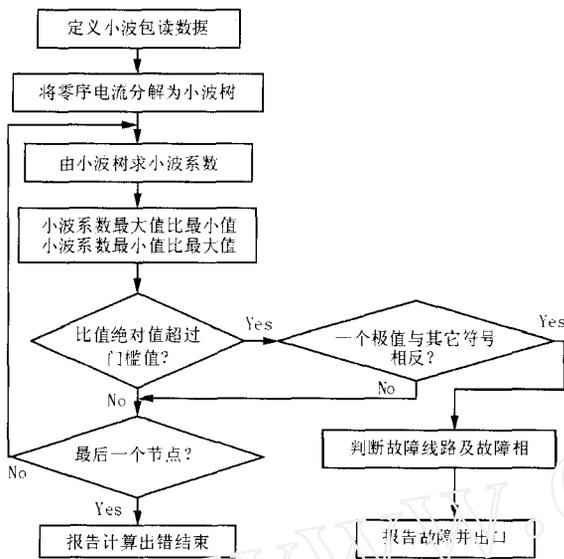


图 7 利用零序电流小波系数峰值极性选线流程图

Fig 7 Flow chart of the zero-sequence current wavelet coefficient peak polarities detection

峰值极性都会有前节所描述的显著特征和规律,因此本文采用了沿小波树逐节点搜索判断的方法来完成故障选线工作,其程序流程见图 7。由于小波系数平均值总是接近于零的,所以小波系数最大值与最小值之比总是为负的,如果系数峰值(系数绝对值最大值)为正,则此比值的绝对值大于 1,反之,此比值的绝对值小于 1。如果此比值的门限值设为 n (大于 1 的正数),那么,满足门限值条件的比值 c 应该在下列范围中:

$$1 < c < -n \quad (7)$$

或者

$$(-1/n) < c < 0 \quad (8)$$

满足式 (7) 的小波系数峰值为正,满足式 (8) 的小波系数峰值为负。显然 n 值越大,可靠性越高,灵敏度则会有所降低。

根据这一判据搜索小波树上的所有节点,就可以在一些节点上完成选线判断。

2.4 试验结果分析

我们知道,选择一定阶数消失矩的小波包,可以把信号的能量集中在小波树的少数节点,而使干扰得到有效的抑制。小波包把信号频域 $0 \sim f_s$ ($f_s = 2 f_s$) 划分为 2^N 个严密而无重叠的频带,通过多尺度分析,可以实现信号在时域和频域的局部化。

在理想情况下,消弧线圈在工频 50 Hz 与系统对地电容总和接近于参数谐振,对高频分量,感抗很

大而容抗较小,消弧线圈的作用是可以忽略的。因此,零序电流的小波系数,除了较深层次的低频近似部分外,基本是不受消弧线圈影响的,消弧线圈可认为是开路或者不存在的。因此,故障线路与非故障线路零序电流的高频分量,在相位上相反。但干扰以及同一频带中各频率成分的相位特性的非线性,使得我们不能在小波树的每个节点都能完成选线判断。

本文采用了双正交小波包,把故障暂态分量中的零序电流按频带分开,其中的一些频带较好保持了零序电流的相位特征,通过对各频带的零序电流的相位特征逐个进行严密逻辑判断,识别出发生单相接地故障的线路。

表 2 利用小波包系数峰值极性法故障选线结果

Tab 2 Results of fault detection with wavelet coefficient peak polarities

故障线路	故障位置	过渡电阻 /	小波系数最大值与最小值的比值					选线结果
			C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	
线路 1	首端	100	-0.022	-9.55	-6.86	-8.6	-26.8	
	中点	100	-0.0008	-34.89	-17.62	-30.21	-27.37	
	末端	500	-0.0286	-6.9715	-6.7872	-5.5159	-8.6722	
线路 2	首端	100	-0.0672	-30.42	-0.1325	-0.1363	-0.0325	
	中点	100	-15.63	-0.014	-6.128	-11.11	-24.34	
	末端	500	-0.2495	-406.8	-0.4222	-0.3941	-0.266	
线路 3	首端	100	-0.0697	-0.0812	-54.08	-0.0892	-0.0442	
	中点	100	-0.0305	-0.0901	-114.3	-0.0772	-0.0773	
	末端	500	-0.0746	-0.155	-18.54	-0.2041	-0.073	
线路 4	首端	100	-0.0697	-0.0812	-0.1622	-25.41	-0.0442	
	中点	100	-0.0111	-0.0659	-0.0724	-109.27	-0.0427	
	末端	500	-4.387	-3.05	-2.337	-0.129	-2.78	
线路 5	首端	100	-0.067	-0.124	-0.133	-0.136	-160.2	
	中点	100	-0.066	-0.101	-0.056	-0.081	-217.8	
	末端	500	-2.495	-2.91	-2.54	-2.22	-0.183	
母线		100	-14.63	-9.55	-6.86	-8.67	-26.49	

3 结论

本文仿真了一个小电流接地系统在下列条件下的单相短路:

故障点分别在母线和各线路首端、中点、末端;

金属性和经 100 以上过渡电阻的短路;

不同的线路长度、参数和负荷;

中性点不接地和经消弧线圈接地;

不同故障初始角即故障时刻。

运用小波系数峰值极性法,对各种条件下单相接地进行故障选线。表 2 是在系统采用消弧线圈过补偿方式时的一组实验数据(其中黑体数据对应线路零序电流的小波系数极性与其它相反),从中可以看到,在 100 以上过渡电阻条件下,特定节点上零序电流小波系数最大最小值差异明显,呈现出明

显的尖波特征,并且故障线路与非故障线路零序电流的小波系数峰值极性正好相反,保持了很高的灵敏度。对大量各种条件下的单相故障进行选线实验的结果表明:本方法可靠性好、灵敏度高,适应能力强,选线正确率为100%,完全能够满足电力系统的应用要求。

参考文献:

- [1] 黄景光,吕艳萍,等.应用小波包构成暂态零序功率分量的消弧线圈接地系统故障选线保护[J].继电器,2003,31(6):1-5.
HUANG Jing-guang, L ü Yan-ping, et al The Petersen Coil Grounded System Single Phase Fault Detection by the Wavelet Packets Zero Sequence Power Components[J]. Relay, 2003, 31(6): 1-5.
- [2] 崔锦泰.小波分析导论[M].西安:西安交通大学出版社,1995.
CU I Jin-tai An Introduction to Wavelets[M]. Xi an: Xi an Jiaotong University Press, 1995.
- [3] 黄家裕,陈礼义,孙德昌.电力系统数字仿真[M].北京:水利电力出版社,1995.
HUANG Jia-yu, CHEN Li-yi, SUN De-chang Power System Digital Simulation[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1995.
- [4] 刘万顺.电力系统故障分析[M].北京:水利电力出版社,1986.
L U Wan-shun Power System Fault Analysis[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1986.
- [5] 李福寿.中性点非有效接地电网的运行[M].北京:水

利电力出版社,1993.

LI Fu-shou Operation of a Power System with a Indirect Grounded Neutral Point[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1993.

- [6] Michel C O, Brouaye F. Wavelet: a New Tool for the Resonant Grounded Power Distribution Systems Relaying[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(3): 1301-1308.
- [7] 毛鹏,等.小波包在配电网单相接地故障中的应用[J].电网技术,2000,24(6):9-17.
MAO Peng, et al Wavelets Packet Based Detection of Phase-to-ground-fault in Distribution Automation System [J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 9-17.
- [8] 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接地故障选线保护[J].中国电机工程学报,2001,21(10):78-82.
J A Qing-quan, L U 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.

收稿日期: 2004-10-10; 修回日期: 2004-11-10

作者简介:

黄景光(1968-),男,讲师,主要从事信号分析和电力系统继电保护研究;E-mail: huangjingguang@xinhuanet.com

吕艳萍(1955-),女,副教授,主要从事电力系统继电保护及变电站综合自动化研究;

刘帆(1973-),男,讲师,从事电力系统自动化及电力电子应用研究。

Single-phase earth fault detetion by the wavelet coefficient peak polarities

HUANG Jing-guang¹, L ü Yan-ping², L U Fan¹, YANG Li-sen¹

(1. China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A new single-phase earth fault detection technique based on wavelet packet analysis is introduced. Zero sequence currents wavelet packets coefficient peak polarities of all lines and bus line are used to form a new criterion. As the signs of fault detection, the fault detection is accomplished by comparing the wavelet packets coefficient peak polarities. A small typical Petersen coil grounded system is simulated in the paper. After analysing and computing the simulation results, the rightness and availability is proved.

Key words: wavelet analysis; fault-line detection; coefficient peak polarity; single-phase earth fault

欢迎订阅继电器杂志 2004年合订本

订购热线: 0374 - 3212444

联系人: 付先生