

小电流接地电网的一种故障选线方法

我国中压配电网的中性点接地方式多采用小电流接地。此类电网的单相接地故障，特别是经消弧线圈补偿后的单相接地故障，因故障点稳态特征信号相对微弱，造成了故障选线困难。为解决该难题，提出了基于小波理论、利用故障暂态信号进行选线的方法，即：首先对电网暂态信号进行小波变换，采用小波奇异性检测原理确定故障发生的时刻，然后提取故障发生前后一个周波内的零序电流数据，由小波变换后的模极大值关系判断故障线路。该方法的有效性在多个现场实例中得到验证。

白雪松 刘震宇 王 轶/国网冀北电力有限公司承德供电公司 牛云涛/河北工业大学电气工程学院 端木永光/中钢集团工程设计研究院有限公司石家庄设计院



白雪松/高级工程师

关键词/Keywords

配电网 ·
小电流接地 ·
消弧线圈 ·
故障选线 ·
小波变换 ·

据统计，配电网故障中约80%为单相接地故障。中性点经消弧线圈接地电网又称谐振接地电网，这种接地方式属于小电流接地，是非有效接地方式中的一种。当谐振接地电网发生单相接地故障时，虽然线电压仍对称，但非故障相的相电压升高较多，故电网在此故障下不能长时间运行，需迅速找出故障线路^[1-3]，进而采取相应措施消除故障。然而包括谐振接地电网在内的小电流接地系统，其故障点稳态特征信号都很微弱，不利于降低故障线路的误选率^[4]，因此对此类电网的故障选线方法进行研究十分必要，国内外专家对此提出了多种可行方案^[5-8]。利用小波变化后故障和噪声会导致信号具有奇异性的特点，基于小波模极大值原理实现奇异点检测，确定奇异点位置与奇异性大小，进而实现故障选线。

河北省科技支撑计划项目（13212104），天津市高等学校科技发展基金计划项目（20130423）。

基于小波变换模极大值检测的故障选线

函数 $\Psi(t) \in L^2(R)$ 称为基本小波或小波母函数，其满足

$$\int_R \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

式中， $\hat{\Psi}(\omega)$ 为 $\Psi(t)$ 的傅里叶变换。

依赖于伸缩因子 a 和平移因子 b 的小波基函数为

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

在小波变换中，小波基函数是不唯一的，常用的有Haar小波、db N 小波和Mexican Hat小波，本文选择db N 小波。 N 是小波的阶数，取 $N=10$ 。db10小波函数和尺度函数波形如图1所示。

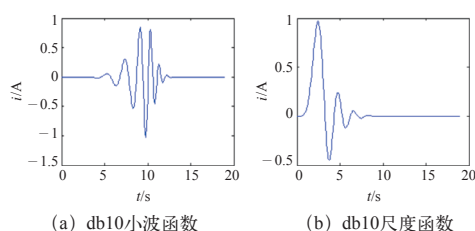


图1 db10小波函数和尺度函数近似波形

当发生单相接地故障时，谐振接地电网故障相的对地电压降低，非故障相的对地电压升高，故障线路零序电流等于其他所有非故障线路零序电流以及消弧线圈的补偿电流之和。因故障处的暂态零序电容电流和消弧线圈的暂态电感电流幅值和频率都不同，故两者不能相互抵消，甚至两者还有可能叠加，使暂态接地电流变大，另外暂态分量的频率也较高。这些有利用价值的故障暂态信

息可用来服务于故障选线,故障暂态信息的提取在本文中是基于小波变换实现的。

设函数 $f(x) \in L^2(R)$,称 $f(x)$ 在 x_0 处具有Lipschitz指数 α ;对于 $\forall x \in Cx_0$ (Cx_0 为 x_0 任意邻域的开区间),都存在常数 K 使下式成立

$$|f(x) - f(x_0)| \leq K|x - x_0|^\alpha \quad (3)$$

可以看出,阶跃信号在突变点处的Lipschitz指数 α 为0,脉冲函数的 α 为负值。 α 的大小代表函数的奇异性,若 α 较大则函数的光滑性较好;反之,若 α 较小则奇异性较大,即函数在该点处的变换较剧烈。

函数 $f(x)$ 在某点存在突变,则函数在此点处的小波变换模极大值。信号奇异点可以通过跟踪细尺度下小波变换模极大值点检测出来,其模极大值与原始信号的突变特征一致,且故障线路与非故障线路的原始关系在小波变换后是不变的。模极大值是小波变换奇异性分析的一大特性,噪声的模极大值随尺度的增加而衰减,经过对信号做适当尺度的分解后,可有效屏蔽干扰信号,放大故障信号,十分便利地选出故障线路。

基于小波原理选线的具体步骤

故障线路的选取需要准确有效的故障信息。在谐振接地电网发生单相接地的瞬间,电压和电流都会产生突变,但所有非故障线路的电压、电流突变的极性是相同的,而故障线路的电流突变的极性与非故障线路的极性是相反的;同时,故障发生时的电网零序电压值比非故障状态下的值会有较大幅度的增高,因此可以采用零序电压作为确定故障发生时间的原始信号,利用小波变换奇异值检测的特点,对电网发生单相接地的时刻进行准确判断,即零序电压信号经小波变换后的模极大值对应故障发生的时刻。

本文中,故障选线的步骤为:①根据电网零序电压是否突然大幅升高判断电网是否发生了接地故障,并根据零序电压的模极大值出现的时刻确定接地故障发生的时间点;②提取故障前后一个周波内的线路电流数据进行小波分解;③分析、比较电流信号小波分解后的结果,确定故障线路。若某条线路电流突变的极性与其他线路相

反,则判断该线路为故障线路;若各线路电流突变的极性都相同,则判断为母线故障。故障选线流程如图2所示。

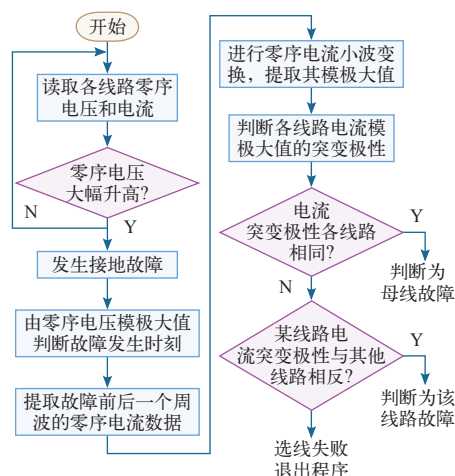


图2 故障选线流程

记录相关测量数据和分析结果,1 min后再次进行故障检测,若故障仍存在则为永久性故障,否则为瞬时性故障。

应用实例分析

一个电压等级为110/10 kV、母线带有4条出线的降压变电所,其电路模型如图3所示。图中,正序参数: $R_1=0.45 \Omega/\text{km}$, $L_1=0.9337 \times 10^{-3} \text{ H}/\text{km}$, $C_1=71.74 \times 10^{-9} \text{ F}/\text{km}$;零序参数: $C_0=47.90 \times 10^{-9} \text{ F}/\text{km}$, $R_0=0.74 \Omega/\text{km}$, $L_0=4.2146 \times 10^{-3} \text{ H}/\text{km}$;变压器电抗: $Z_T=(0.7017+\text{j}0.5121) \Omega$;各线路长度: $l_1=8 \text{ km}$, $l_2=15 \text{ km}$, $l_3=27 \text{ km}$, $l_4=18 \text{ km}$;电网中心点接地方式:经消弧线圈接地。

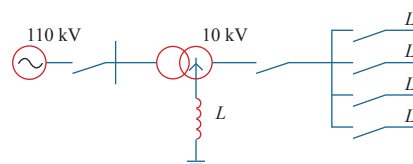


图3 降压变电所电路模型

利用故障时刻的暂态信息进行故障选线,往往会因不能准确判断故障发生的时刻而导致不能提取到有效的暂态信息。利用小波变换奇异值检测的方法,可准确判断发生单相接地故障的时间点,从而完整、有效地实现故障数据的采集和故障信息的提

取,为提高故障选线的正确率奠定了基础。关于确定故障发生时刻的方法,见以下实例分析。

电网在 $t=0.02\text{ s}$ 发生单相接地故障,接地电阻为 $100\ \Omega$,故障点距离母线 6 km ,电网零序电压波形如图4所示。

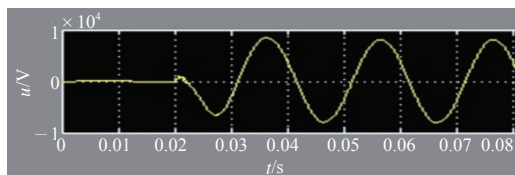


图4 电网单相接地时的零序电压波形

对零序电压信号采用db1进行3层小波分解,分解后的结果如图5所示。

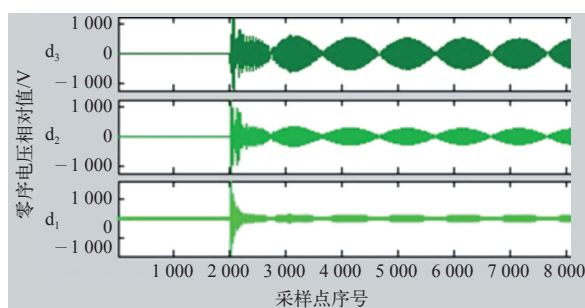


图5 零序电压小波三层分解图

根据小波分析结果,可找出信号不连续点出现的准确位置。图5中,接地故障发生在第2 006个采样点处,可计算出故障发生的时刻为 $0.020\ 06\text{ s}$,完全吻合现场实情。

利用零序电流进行故障选线是讨论的重点,下面以3个实例进行说明。

实例1:线路1发生接地故障,故障点距离母线 6 km ,接地电阻为 $100\ \Omega$,现场录得各线路零序电流波形如图6所示。

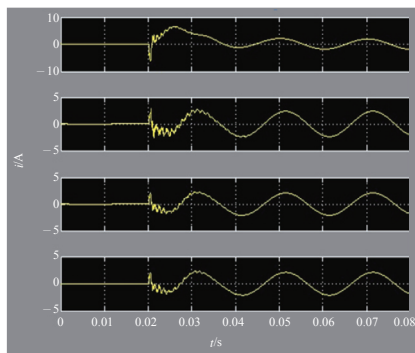


图6 实例1中各线路的零序电流波形

提取故障前后各线路零序电流现场数据,选择小波函数db10对电流进行分解,分解到第8层时的波形如图7所示。

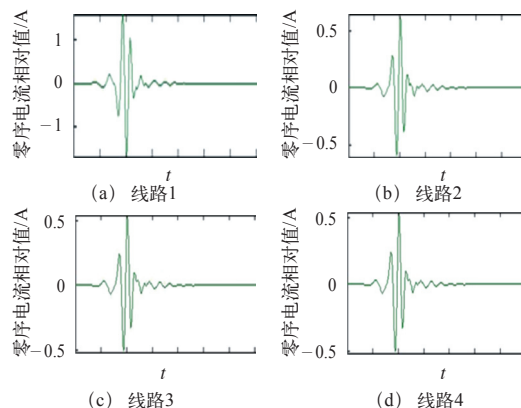


图7 实例1中各线路零序电流的小波分解图

从图7中可以看出,线路1的模极大值的极性与其它线路相反。根据前述的故障选线方法及相应的判据,可以判断线路1发生了接地故障。该结论与现场实际情况一致。

实例2:线路1发生金属性接地故障,故障点距离母线 18 km 。现场录得各线路零序电流波形如图8所示。

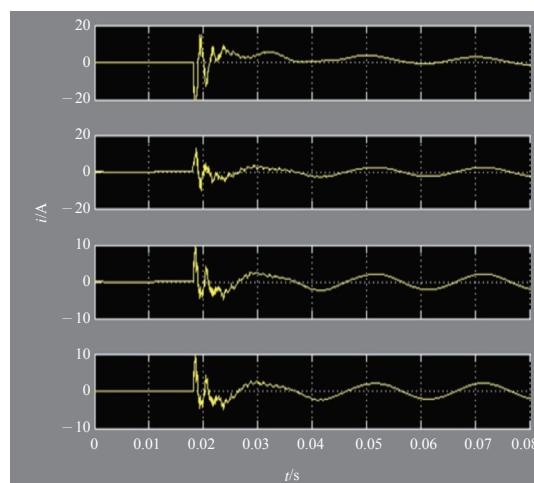


图8 实例2中各线路的零序电流波形

提取故障前后各线路的零序电流数据,经小波分解后得到的零序电流如图9所示。

对图9所示的小波分解图形进行分析,由于线路1的模极大值极性与其它线路相反,故可知故障线路1发生故障。该结论与现场实情一致。

实例3:母线在 $t=0.02\text{ s}$ 时刻发生接地故障,接地电阻为 $50\ \Omega$,现场录得各线路的零序电流波

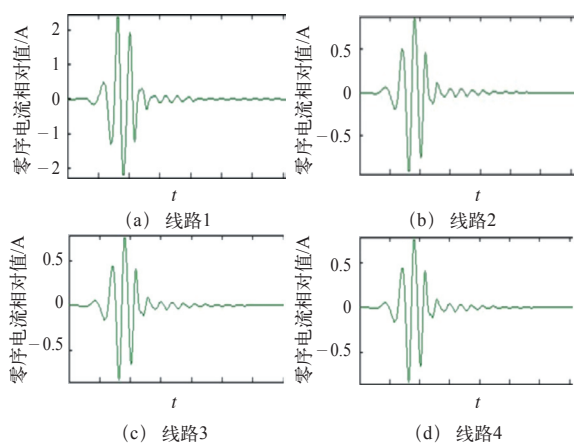


图9 实例2中各线路的零序电流小波分解图

形如图10所示。

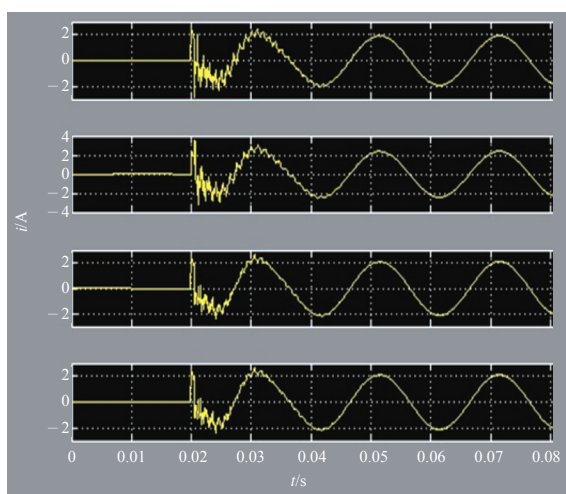


图10 实例3中各线路的零序电流波形

提取故障前后各线路零序电流数据, 经小波分解后结果如图11所示。

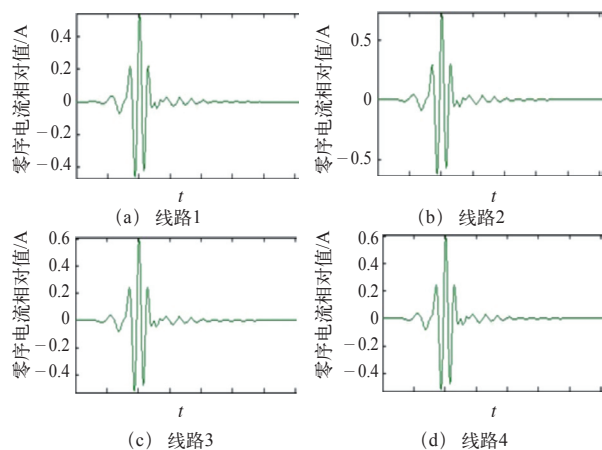


图11 实例3中各线路的零序电流小波分解图

由图11可以看出, 各条线路的模极大值极性相同, 故可判断发生接地故障的只有可能是母线。该结论与实情一致。

结束语

小电流接地电网的接地故障选线问题一直是国内外学者探索的一个难题。利用故障时的电网暂态特征, 提出了利用小波分析的奇异性检测原理以及模极大值理论进行故障选线的方法, 并对谐振接地电网的几个典型接地故障案例进行了仿真分析, 验证了该方法的有效性。该方法为提高故障选线的正确率提供了一条可行途径, 对保障电力系统的安全稳定运行具有积极意义。

参考文献

- [1] 徐丙垠, 薛永端, 李天友. 小电流接地故障选线技术综述 [J]. 电力设备, 2005, 6 (4): 1-7.
- [2] 张钧, 何正友, 贾勇. 基于S变换的故障选线新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (10): 94-99.
- [3] 王兴友, 丁卫华, 王双明. 小电流接地故障综合选线技术的研究与实现 [J]. 电气应用, 2009, 28 (17): 64-67.
- [4] 张保会, 段建东. 输电线路暂态量保护的研究进展 [J]. 电力科学与技术学报, 2008, 23 (4): 3-12.
- [5] 任震. 小波分析及其在电力系统中的应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [6] 郭黎利, 刘微, 叶桂林. 小波分析在信号奇异性检测中的应用 [J]. 信息技术, 2008, 40 (5): 58-60.
- [7] 李斌, 束洪春. 基于瞬时实功率和瞬时虚功率的谐振接地系统单相接地选线新方法 [J]. 电工技术学报, 2012, 27 (6): 183-190.
- [8] 田书, 梅广勇. 一种改进的配电网故障选线方法研究 [J]. 电气应用, 2012, 31 (9): 58-61.

(收稿日期: 2014-07-29) **EA**