

基于模极大值理论的配电网接地保护研究

肖白^{1,2}, 束洪春³, 穆钢², 黎平²

(1. 华北电力大学研究生处, 河北 保定 071003; 2. 东北电力学院电力工程系, 吉林 吉林 132012;

3. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650051)

摘要: 应用小波变换模极大值理论, 对故障后的电气量进行分析, 反应零序电流的突变情况, 根据其在各条线路上的极性和大小的不同变化规律实现故障选线。判据采用做内积的方法, 在对含有误差的信号进行处理时具有良好的容错性, 因而能够获得更高的选线精度。该方法适用于小接地电流系统的各种中性点运行方式, 并且现场安装简单、不需要定值整定。EMTP 仿真结果表明, 该方法是有有效的、可靠的。

关键词: 配电网; 故障选线; 小波变换; 奇异性检测

中图分类号: TM726 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)10-0036-04

0 引言

单相接地电弧能够自行熄灭的中性点非有效接地系统称为小接地电流系统^[1], 主要以中性点不接地、经高阻接地及经消弧线圈接地系统的形式出现。我国 3~60 kV 的配电网通常都属于小接地电流系统。

小接地电流系统发生单相接地故障时, 电源与故障点之间并不形成低阻抗回路, 短路电流很小, 同时线电压仍然保持对称, 不影响对用户的连续供电, 所以不必立即跳闸, 规程规定可以继续运行 1~2 h。但是, 为了防止故障进一步扩大, 必须及时、准确地选出故障线路, 并且予以切除。

为解决这一问题, 国内外学者进行了深入而广泛的研究, 提出了基于稳态分量、暂态分量及外施影响的多种选线方法(例如: 比幅、比相法, 谐波法, 补偿法, 零序导纳法, 功率法, 首半波法, 能量法, 谱功率法, 小波法, 拉路法, 残余电流增量法, 注入信号法)^[2], 并开发出了相应的保护装置, 先后推出了几代产品。然而迄今为止, 此类装置在实际运行当中的效果仍然不能令人满意。

本文提出应用小波变换模极大值理论, 找出故障后电气量的变化特点, 并把与之相对应的模极大值作为特征量来分析, 建立出简单、可靠的选线判据。大量的 EMTP 仿真数据表明, 该方法是正确的、可靠的。

1 基本原理

通过对小接地电流系统单相接地故障时的零序电压、电流进行奇异性检测, 可以确定出它们在故障

后突变部分的极性和大小, 比较其在各条出线上的不同变化情况, 可以识别出故障线路。

我们将无限次可导的函数称为光滑的或没有奇异性, 若函数在某处有间断或某阶导数不连续, 则称其在此处有奇异点。奇异性检测就是要将信号的奇异点识别出来并判断其奇异程度。数学上, 通常用 Lipschitz 指数来刻画信号的奇异性^[3]。由于小波变换模极大值在多尺度上的表现与 Lipschitz 指数之间存在对应关系^[4], 这为通过小波变换检测信号奇异点并区分奇异点提供了依据。即小波变换后的模极大值能够反应接地故障的某些特征, 所以本方法利用此理论实现故障选线。

1.1 小波函数的选取

小波函数在理论上无限多种, 由其引出的小波基所具有的性质也各不相同, 可以满足各种问题的需要。但对同一个信号利用不同的小波基进行处理, 取得的效果并不相同, 甚至差异较大。所以为了得到令人满意的结果, 就必须对小波函数进行适当的选取。虽然目前还没有一个成熟的方法来选择在解决具体问题时所需的最佳小波函数, 但通常的做法是把各种小波函数分类, 并总结出每类小波函数的性质和特点, 结合要解决的问题来确定使用哪一类, 并在该类中进行试验比较来确定使用哪一个小波函数^[5]。

如上所述, 针对小接地电流系统故障选线的具体问题: 为了减小频谱的泄漏和混叠, 要求小波函数具有好的频域特性。dbN 小波系是工程上应用较多的小波函数, 这一小波系的特点是随着序号 N 的增大, 时域支集变长, 时间局部性变差; 同时, 正则性增加, 频域局部性变好。但是当 N 增大到 10 以后, dbN 小

波在频域内的分频表现与 N 为 10 时很接近。

综合考虑在时频两域内进行分析的需要,并结合故障选线问题的特点,通过采用几种小波进行多次仿真计算,证明使用 db10 小波可以得到较为理想的结果。所以本文选用 db10 小波,其尺度函数和小波函数的波形分别如图 1(a)和(b)所示。

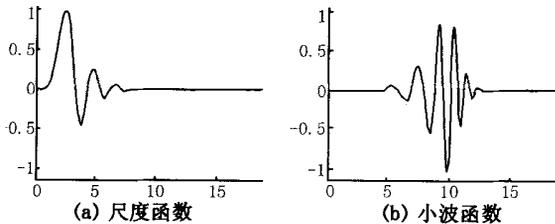


图 1 db10 尺度函数和小波函数

Fig. 1 Scale function and wavelet function of db10

1.2 选线判据

首先,对各出线上零序电流在故障前一个周波和故障后三个周波内的数据进行小波变换,得到相应的一组模极大值 W_{j0i} ,其中 n 表示线路编号, i 表示出现模极大值的序号。然后,任意选定一条出线作为参考线路,将其上零序电流的小波变换模极大值组分别与其它线路上的零序电流的小波变换模极大值组做内积,并把这一内积结果作为一种测度,用 S 来表示。

$$S_{jk} = [W_{j0}, W_{k0}] = \sum_{i=1}^m (W_{j0i} * W_{k0i}) \quad (1)$$

式中: j 是被任意选定的那条参考线路的编号; k 是剩余线路的编号,即 $k = 1, 2, \dots, n$,且 $k \neq j$; n 是总的出线数目; m 是模极大值的个数。

这样,就可以建立如下的选线判据:

1) 若 S_{jk} 不同时大于零或小于零,则使 $S_{jk} > 0$ 成立的线路是非故障线路;而使 $S_{jk} < 0$ 成立的线路是故障线路;

2) 若 S_{jk} 同时小于零,则线路 j 为故障线路;

3) 若 S_{jk} 同时大于零,则为母线故障。

1.3 选线判据的说明

首先,由于小波变换自身算法上的原因,在变换过程中会把数据窗的右边界当成突变点,使得各尺度分量在右边界附近会出现较大值,这就是小波变换的边界效应。为了克服边界效应给选线带来的不利影响,只取前两个周波内的模极大值做内积。

其次,做内积的实质是进行极性比较。幅值大的模极大值在比较过程中有利,结果可靠;而幅值小的模极大值在比较过程中就容易受误差的影响,以

至于得到错误结论。通过做内积的办法,就相当于使幅值大者的比较结果在测度中占有高权重,而幅值小者的比较结果在测度中占有低权重。这样就在很大程度上克服了误差的影响,从而提高了选线精度。

再次,小波奇异性检测反应的是信号的奇异性,不要求信号是跃变的^[6]。所以,尽管本方法使用暂态过程中的数值来分析,但是在相电压过零附近发生单相接地,本方法仍然有效。

另外,因本方法是基于暂态分量的选线方法,所以在实际使用中,虽然可以瞬时选出接地线路,但是为了区分瞬时性故障和永久性故障,还需要判断一个延时后故障是否仍然存在,才决定是否执行跳闸操作。

2 仿真分析

对某个 35 kV 的辐射状小接地电流系统(如图 2 所示)在中性点运行方式为经消弧线圈接地时进行仿真分析。顺便指出,本方法对中性点不接地、经高阻接地系统同样适用。

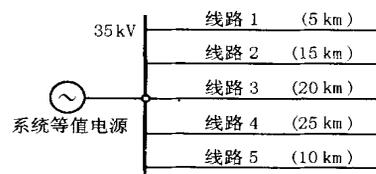


图 2 辐射状小接地电流系统

Fig. 2 Schematic diagram of a radial ungrounded neutral system

假设距线路 4 始端 24 km 处于 0.315 s 时 A 相发生接地,以过渡电阻为 1 欧姆、采样率为 10 kHz 为例,按照前边所述方法实现选线。限于篇幅,仅给出线路 2(正常线路)和线路 4(故障线路)的分析波形,如图 3、4、5 所示。

这里选定线路 1 为参考线路,线路 2、3、4、5 上零序电流的模极大值测度分别为 351.1、540.7、-1200.5 和 216.8,根据上述判据可知线路 4 为故障线路。

为了便于比较,在过渡电阻、采样率以及参考线路都同前的情况下,采用此方法对图 2 所示系统分别做短线路近端、短线路远端、长线路近端、长线路远端及母线接地时的仿真分析,所得的小波变换模极大值测度列于表 1。由于线路 1 是参考线路,其

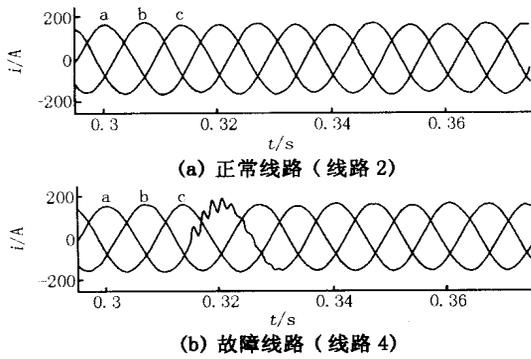


图3 线路上各相电流波形

Fig. 3 Current waveforms of each phase

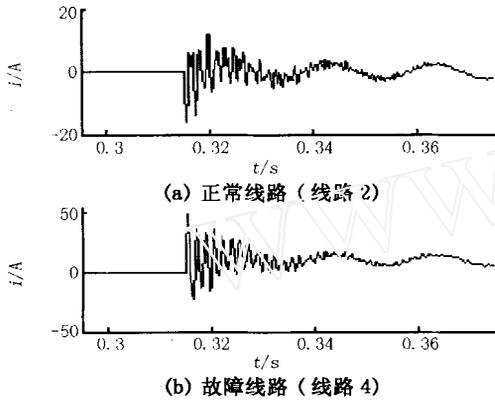


图4 各线路上零序电流波形

Fig. 4 Waveforms of zero-sequence current on all lines

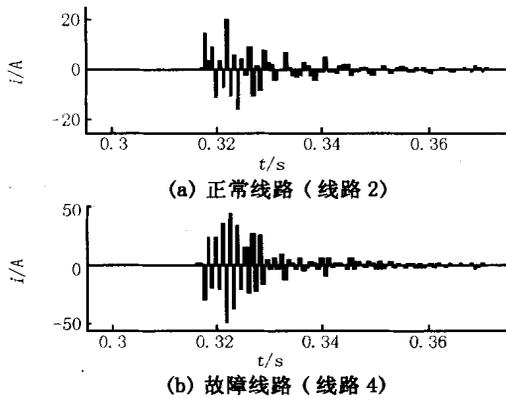


图5 小波变换模极大值分析结果

Fig. 5 Analysis results of modular maxima of wavelet transform

测度是与自身的小波变换模极大值做内积的结果(必然是正数),故该线路的小波变换模极大值测度不需要算出来,表中用“+”表示。这样,按照前述选线判据分析这些数据,都能够非常准确地选出故障线路。

表1 相对于线路1的小波变换模极大值测度

Tab. 1 Modular maxima measurement of wavelet transform based on line 1

小波测度	线路1	线路2	线路3	线路4	线路5
S(短近)	+	- 321.9	- 455.4	- 507.7	- 202.4
S(短远)	+	- 411.9	- 586.5	- 637.3	- 252.1
S(长近)	+	336.5	494.3	- 1 128.2	209.7
S(长远)	+	351.1	540.7	- 1 200.5	216.8
S(母线)	+	21.65	28.25	34.52	13.75

注:S(短近)表示线路1始端1 km处接地时的小波测度
S(短远)表示线路1始端4 km处接地时的小波测度
S(长近)表示线路4始端1 km处接地时的小波测度
S(长远)表示线路4始端24 km处接地时的小波测度
S(母线)表示母线的小波测度

以图2所示系统为例,在采样率仍为10 kHz,而过渡电阻增大到2 k、参考线路变为出线2的情况下,进一步检验该方法,所得仿真数据示于表2。其中的数值,一方面说明参考线路是可以任意选定的,同样都能够得到正确的选线结果;另一方面说明本方法抗过渡电阻的能力非常强。

表2 相对于线路2的小波变换模极大值测度

Tab. 2 Modular maxima measurement of wavelet transform based on line 2

小波测度	线路1	线路2	线路3	线路4	线路5
S(短近)	- 7.071	+	2.242	2.447	0.986 5
S(短远)	- 6.849	+	2.172	2.373	0.956 9
S(长近)	0.424 6	+	1.941	- 4.419	0.860 2
S(长远)	0.354 1	+	1.615	- 3.688	0.720 6
S(母线)	0.491 9	+	2.265	2.474	0.996 5

3 结论

由于本方法取用故障点附近几个周波的数据实现选线,此时电气量的变化通常很明显,特征量幅值较大,所以具有很高的选线精度。同时,小波奇异性检测反映的是信号的奇异性,不要求信号是跃变的。所以,即使在相电压过零附近发生单相接地,暂态过程不明显,本方法仍然有效。

选线判据中采用做内积的方法,实质是在进行优化的极性比较,对含有误差的信号具有良好的容错性,而且不需要设置阈值。不论是中性点不接地、经高阻接地还是经消弧线圈接地的系统,本方法都适用。在系统不同位置、经不同过渡电阻接地的情况下,所得到的选线结果也都很精确,可见,此方法具有很强的鲁棒性。

需要指出,本方法适用于母线上至少有三条出线,而在只有两条出线的时候将会失效。

参考文献:

- [1] 要焕年,曹梅月(YAO Huan-nian, CAO Mei-yue). 电力系统谐振接地(The Resonant Earth in Power System) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 2000.
- [2] 肖白,束洪春,高峰(XIAO Bai, SHU Hong-chun, GAO Feng). 小接地电流系统单相接地故障选线方法综述(Survey of the Method of Fault Line Selection for Single-phase-to-earth Fault in Networks with Ungrounded Neutral) [J]. 继电器(Relay), 2001, 29(4): 16-20.
- [3] 李威,王建勋,冉启文,等(LI Wei, WANG Jian-xun, RAN Qi-wen, et al). 一种新的电力系统暂态波形检测方法(A Novel Measurement Method for Power System Transient Waveforms) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(5): 45-48.
- [4] 杨福生(YANG Fu-sheng). 小波变换的工程分析与应用(Engineering Analysis of Wavelet Transform and Its Application) [M]. 北京:科学出版社(Beijing: Science Press), 2000.
- [5] 束洪春,肖白(SHU Hong-chun, XIAO Bai). 配电网单相电弧接地故障选线暂态分析法(A Transient-based Study of Fault Line Selection for Single-phase to Ground Faults on Distribution System) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(21): 58-61.
- [6] 贾清泉,刘连光,杨以涵,等(JIA Qing-quan, LIU Lian-guang, YANG Yi-han, et al). 应用小波检测故障突变特性实现配电网小电流故障选线保护(Abrupt Change Detection with Wavelet for Small Current Fault Relaying) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2001, 21(10): 78-82.

收稿日期: 2003-07-29; 修回日期: 2003-09-26

作者简介:

肖白(1973-),男,博士研究生,讲师,从事电力系统稳定性及继电保护方面的研究;

束洪春(1961-),男,博士后,教授,博士生导师,从事电力系统新型继电保护与故障测距、故障录波等方面的研究;

穆钢(1957-),男,博士,教授,博士生导师,从事电力系统稳定与控制及输电网网损与负荷预报等方面的研究。

Study of grounding fault protection in distribution system based on the theory of modular maxima

XIAO Bai^{1,2}, SHU Hong-chun³, MU Gang², LI Ping²

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Northeast China Institute of Electric Power Engineering, Jilin 132012, China; 3. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

Abstract: In this paper, the method to obtain the modular maxima of wavelet transform is employed to analyze the electrical components after the fault, respond the abrupt change of zero sequence current, and determine the fault line by comparing the change of the zero sequence currents on all lines polarities and magnitudes. With the using of scalar product, the criteria has good property of bearing error and can get higher precision of fault line selection. This method is suitable for various distribution systems with different neutral grounding modes. Moreover, it can be easily used on site without adjusting protective setting. EMTP simulations show that the method is effective and reliable.

Key words: distribution system; fault line selection; wavelet transform; singular detection

(上接第 13 页 continued from page 13)

Abstract: Conventional current instantaneous trip protection (CCITP) and developed adaptive current instantaneous trip protection (DACITP) cannot protect the whole range of the line and the protection ranges vary with the change of operational mode of power system. On analyzing protection range of the two types of relay protection, adaptive current instantaneous trip protection (ACITP), which can protect the whole range of the line is described. It can transfer orientation signals of short-circuit power in communication way to ensure protection favorable selectivity. Additionally a briefly comparison of performances is presented between ACITP with CCITP and DACITP.

Key words: current instantaneous trip protection (CITP); adaptation; orientation of short-circuit power; communication way; performance analysis