

非故障相暂态电流特性分析及其在故障定位中的应用

王 铭 ,徐玉琴

(华北电力大学电气工程学院,河北 保定 071003)

摘要: 单相接地故障在小电流接地系统中出现的比较频繁,此时必须尽快地找到故障点以避免两相对地短路。针对小电流接地系统单相接地故障定位的研究现状,提出基于非故障相暂态电流的单相接地故障定位的思想。应用小波变换中信号奇异性检测的理论进行分析,总结出非故障相暂态电流随故障点位置变化的规律,从而论证了该思想的可行性。

关键词: 配电网; 故障定位; 非故障相暂态电流; 小波变换; 奇异

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)24-0020-04

0 引言

我国 6~35 kV 配电系统的中性点一般采用不接地或经消弧线圈接地两种方式,统称为小电流接地系统。该类系统发生单相接地故障时,流过故障线路的电流很小甚至反相,而系统的线电压仍然是对称的,不影响对负荷的连续供电。有关规程规定,小电流接地系统发生单相接地故障时可以继续运行 1~2 h。但是由于发生故障时非故障相的电压上升至线电压,长时间运行会使单相接地变成多点短路,弧光接地还会引起全系统的过电压,损坏设备,破坏系统的安全运行。

长期以来,国内外电力领域的专家学者对小电流接地系统单相接地故障选线和定位问题进行了大量的研究。过去的研究多是基于系统稳态分量。但由于稳态分量电气量幅值偏小,再加上电网本身和负载的复杂性,致使在实际的工程应用中难以提取出有效的故障信号。小电流接地系统发生单相接地故障时,由于系统对地电容与故障点之间的充放电,将产生振幅比稳态基频大许多倍的高频暂态分量,此过程包含有丰富的故障信息,而且按照基频计算的消弧线圈,对于高频分量其对地阻抗将成倍的增加,因此对故障后暂态电流的影响较小。近年来单相接地故障定位问题的研究多是围绕故障馈线故障相的暂态量进行的。但是单相接地故障发生时,故障馈线故障相上流过的是系统所有非故障相暂态电流的总和,不可避免的要受到相关系统非故障线路对地电容的大小、故障馈线的不对称性以及系统运

行方式和结构等诸多不确定因素的影响,因此利用故障相的暂态电流分量进行故障定位并没有解决故障定位的精确度问题。

1 非故障相暂态电流特性分析及小波理论的应用

1.1 非故障相暂态电流特性分析

小电流接地系统发生单相接地故障时,故障线路故障相及各出线非故障相的电流 I_k 和 I_{B_i} 、 I_{C_i} 分别为:

$$I_k = -j\omega \sum_{i=1}^n C_{0i} (U_B + U_C) = -j\omega \sum_{i=1}^n C_{0i} U_0$$

$$I_{B_i} = U_B j\omega C_{0i}, (i = 1, 2, \dots, n)$$

$$I_{C_i} = U_C j\omega C_{0i}, (i = 1, 2, \dots, n)$$

式中: C_{0i} 为第 i ($i = 1, 2, \dots, n$) 个非故障元件的对地电容。

可见故障馈线故障相上流过的是系统所有馈线非故障相的暂态电流之和,因此当母线上出线数目或线路参数变化时都要影响到其取值,而故障馈线非故障相上流过的只有本条线路自身的暂态电流,此电流流经接地电容注入接地故障点,自然包含有故障位置的信息^[1,2]。在综合分析和研究了目前国内外的理论和实践成果的基础上,本论文提出了基于故障馈线非故障相暂态电流进行单相接地故障定位的思想。下文将采用小波变换中奇异性检测的理论对该思想的可行性进行论证。

1.2 基于小波变换的奇异性检测理论

小波分析 (Wavelet Analysis) 是上世纪 80 年代后期发展起来的应用数学分支,它汲取了傅里叶变换、数值分析、泛函、样条等众多分支的精华,在时、频域同时具有优良的局部化性质,可以观察信号的

基金项目: “电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室 资助项目

任意细节。暂态电流分量成分复杂而且衰减快,持续时间短,采用小波可以完整有效将其提取。

小波变换的极大值检测法是多尺度边缘检测。多尺度边缘检测是在不同尺度上先对信号进行平滑,再由光滑信号的一阶导数检测信号的突变点^[3]。

设 $f(t)$ 为光滑函数,记其一阶导数为: $f'(t) = d f(t) / dt$,则由它产生的小波族为:

$$\frac{((t-b)/a)}{\sqrt{|a|}} = \frac{d((t-b)/a)}{\sqrt{|a|} dt}$$

根据小波变换定义有:

$$W_{a,b} f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \frac{d}{dt} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

由上式可知, $f(t)$ 经 $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 小波变换后,变成了 $f'(t)$ 与光滑函数卷积后求的一阶导数。因此小波变换的局部模极大值点就对应信号的突变点。据此原理,暂态信号的模极大值点可以用来刻画单相接地故障的信息。

2 仿真结果分析和论证

2.1 ATP仿真模型的建立

本文使用 ATP (Alternative Transients Program) 来模拟小电流接地系统单相接地故障,以便获得所需要的故障暂态信息。仿真所采用的系统结构模型如图 1 所示。线路参数:正序阻抗为 $(0.17 + j0.38) / \text{km}$,零序阻抗为 $(0.23 + j1.72) / \text{km}$,正序容纳为 $3.045 \mu\text{S}/\text{km}$,零序容纳为 $1.884 \mu\text{S}/\text{km}$ 。4条 10 kV 馈线长度分别为 25 km, 10 km, 30 km, 12 km。

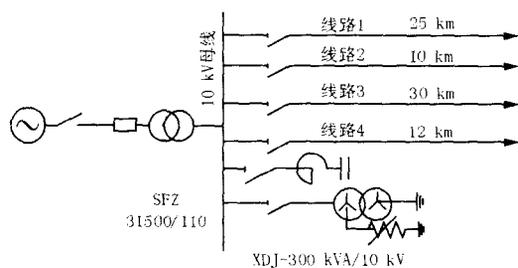


图 1 小电流接地系统仿真实例

Fig 1 Simulation model of power system with ungrounded neutral

假设线路 1 在距母线 8 km 处发生 A 相接地故障,采样频率为 200 kHz。数据窗取故障前 5 ms 至故障后 25 ms 共 30 ms。使用 ATP 仿真后得到的线路 1 去除负荷电流后的三相暂态电流如图 2 所示(横坐标为采样点数)。

单相接地故障时,故障线路故障相上的暂态电

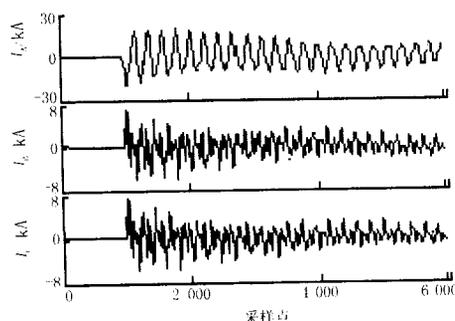


图 2 A 相接地故障时三相暂态电流

Fig 2 Transient current of three-phase when single-grounded fault in phase A

流为线路 1 至线路 4 所有非故障相的暂态电流之和,具有很大的不确定性。而线路 1 非故障相的暂态电流仅与自身线路的参数有关,且此电流中包含有故障距离的信息。这就证明了利用故障馈线非故障相的暂态电流进行单相接地故障定位的思想是可行的。

2.2 分析的过程和结论

理论证明,小电流接地系统单相接地故障绝大多数发生在相电压的峰值附近^[4,5]。对于架空线路来说,其能量主要集中在 300 ~ 1 500 Hz。本文选用 Daubechies (Db5) 小波进行分析, Daubechies 函数是由世界著名的小波分析学者 Inrid Daubechies 构造的小波函数。Daubechies 小波简称为 dbN。除了 Db1 (即 haar 小波) 外,其它小波没有明确的表达式。Db5 小波具有正交,紧支以及高阶消失矩,滤波效果较好。小波分解级数为 6 级,可识别的最大频率为 1 562.5 Hz,能够满足检测要求。

编制程序对线路 1 非故障相 B 相暂态电流进行分析,图 3 为在尺度 1 至尺度 6 上的分解波形。

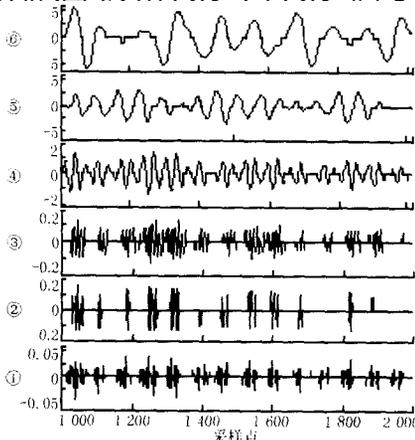


图 3 B 相暂态电流的小波变换

Fig 3 Wavelet transform for transient current of phase B

由图 3 的尺度 6 可以得到信号的模极大值点在第 1 080 个采样点处。其模极大值的尺度为 4.596 4。用 ad hoc 即算法准则搜索模极大值线,依次在尺度 5、4、3、2、1 上找到相应的传播点。最后找到尺度 1 上的传播点在第 1 062 个采样点处,算出此奇异点对应的时刻为 5 310 μ s。

3 非故障相暂态电流定位的主要影响因素分析

小电流接地系统发生单相接地故障时,影响非故障相暂态电流分量的主要因素有三个:故障距离、过渡电阻和故障瞬时角。以图 1 的小电流接地仿真模型系统为例,分析上述因素对非故障相暂态电流的影响(仍然假设 A 相为故障相)。

改变故障距离,按照上面的方法得到的多个不同故障距离时的模极大值尺度及奇异点发生的时刻如表 1 所示(限于篇幅,表中只列出 10 个点)。

表 1 不同故障点的检测情况

Tab 1 Results of different fault location

故障位置 /km	尺度 6 模极大值点	模极大值	奇异点发生时刻 / μ s
2	1 045	7.797 6	5 200
4	1 045	7.096 2	5 200
6	1 080	5.922 3	5 210
8	1 080	4.596 4	5 310
10	1 164	3.883 2	5 790
12	1 303	3.001	5 800
14	1 302	2.623 1	6 250
16	1 302	2.344 5	6 330
18	1 347	1.728 6	6 570
20	1 346	1.495 4	6 890

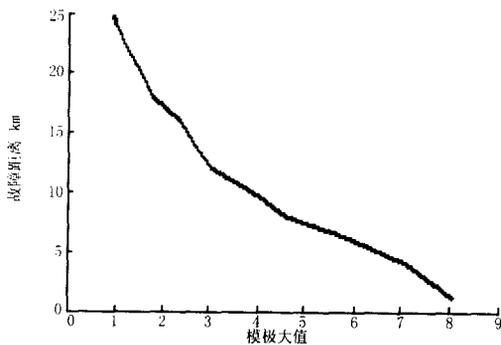


图 4 故障距离与模极大值的关系曲线

Fig 4 Relation curve of fault location and modulus maximum

由表 1 可以看出,随着故障点离母线距离的增加,在最高尺度上检测到的模极大值的数值逐渐减小,而在最低尺度上搜索到的奇异点发生的时刻呈现延迟的趋势。通过对大量仿真数据的分析,得到

故障距离与模极大值的关系曲线如图 4 所示(横坐标为模极大值,纵坐标为故障距离),二者之间是一种近似线性的关系,具有比较强的规律性。

以上是在不考虑过渡电阻变化时,线路发生金属性接地的情况。当过渡电阻依次取值为 5、10、30、50、500、1 000、2 000、5 000 时,模极大值点位置及相应的奇异点时刻如表 2 所示。

表 2 不同过渡电阻时的检测情况

Tab 2 Results of different transition resistance

过渡电阻 /	尺度 6 模极大值点	模极大值	奇异点发生时刻 / μ s
0	1 080	4.596 4	5 300
5	1 080	4.494 6	5 300
10	1 079	4.397 3	5 300
30	1 079	4.045 1	5 300
50	1 079	3.740 8	5 300
500	1 079	1.339 9	5 300
1 000	1 078	0.776	5 300
2 000	1 078	0.422 58	5 300
5 000	1 078	0.178 41	5 300

可见过渡电阻的变化仅影响模极大值的大小,而不影响最高尺度上模极大值的位置以对应的奇异点发生的时刻。过渡电阻越大,在最高尺度上检测到的模极大值的数值越小。

为了体现普遍性继续以故障点位置为 8 km 的情况进行分析,当接地过渡电阻为 5 时,不同的故障角对非故障相暂态电流的影响如表 3 所示。

表 3 不同故障瞬时角的检测情况

Tab 3 Results of different instantaneous angular in fault phase

故障瞬时角 /($^{\circ}$)	尺度 6 模极大值点	模极大值
90	1 080	5.158 9
80	1 080	4.865 7
70	1 079	4.494 6
60	1 079	4.439 5
50	1 079	3.357 8
40	1 080	2.531 7
30	1 079	1.813 6
20	1 080	1.186 6
10	1 080	0.776
0	1 473	0.118 88

除了故障瞬时角为 0 的时刻外,故障瞬时角的变化基本上不影响模极大值点出现的位置。随着故障合闸角的逐渐增大,模极大值的数值也逐渐增大。当故障发生在电压最大值时刻时,模极大值达到最大值,而当电压接近于 0 时刻发生单相接地故障时,暂态过程很不明显,模极大值数值也很小,这也与实际情况相一致。

4 结束语

1) 小电流接地系统单相接地故障定位是多年来一直未能很好解决的一个问题。故障馈线非故障相暂态电流中包含有故障距离的信息,且不受系统运行方式等因素的影响,可以作为故障定位的依据。本文利用小波变换奇异性检测理论对该思想的可行性进行了论证。

2) 人工神经网络具有很强的联想、鲁棒性和非线性映射等功能,将人工神经网络和小波变换相结合有望实现本文提出的基于非故障相暂态电流的小电流接地系统单相接地故障定位。

3) 本文只是对非故障相暂态电流的单相接地故障定位及其可行性进行了理论上的分析和验证,具体实现方案还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 薛永端,冯祖仁,徐丙垠. 中性点非直接接地电网单相接地故障暂态特征分析[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(2): 195-199.
XUE Yong-duan, FENG Zu-ren, XU Bing-yin. Analysis of Transient Characteristics of Signals Phase Earth Fault in Non-solidly Earthed Network[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(2): 195-199.
- [2] 孙雅明,苗友忠. 谐振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(3): 62-66.

SUN Ya-ming, MAO You-zhong. A New Principle of Transient Current Grounded Relay for Feeder in Resonant-Grounded Distribution Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 62-66.

- [3] 李弼程,罗建书. 小波分析及其应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2003.
LI Bi-cheng, LUO Jian-shu. Wavelet Analysis and Its Application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.
- [4] 吴玲,孙莹. 连续小波变换在小电流接地系统单相接地故障选线中的应用[J]. 继电器, 2003, 31(11): 20-24.
WU Ling, SUN Ying. Application of Continuous Wavelet Transform to Select the Fault Line of Single-phase Earth Faults in Non-solid Earthed Power System[J]. Relay, 2003, 31(11): 20-24.
- [5] Sun P, Zhang J F, Zhang D J, et al. Morphology Identification of Transformer Magnetizing Inrush Current[J]. IEE Electronics Letters, 2002, 38(9): 437-438.

收稿日期: 2005-06-23; 修回日期: 2005-08-18

作者简介:

王 铭(1977-),女,硕士研究生,主要从事小电流接地单相接地故障定位新方法的研究; E-mail: wmingnever@163.com

徐玉琴(1964-),女,教授,主要从事电力系统继电保护新原理与新技术、电力系统分析与控制方面的研究。

Study of the attribution of non-fault-phase transient current and its application in fault location

WANG Ming, XU Yu-qin

(School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The single-phase grounding fault frequently occurs in neutral ungrounded systems, the fault location must be found as soon as possible to avoid a phase-to-phase short circuit. Aimed at the condition of fault location for feeder single-phase-to-grounded in non-effective grounding distribution systems, the paper presents a new method that used the transient current component of non-fault-phase in faulty feeder to realize fault location and then tests the possibility from the angle of singularity detection.

Key words: distribution systems; fault location; transient current component of non-fault-phase; wavelet analysis; singularity

网站改版通知

为了更好的服务于读者和作者,继电器杂志社对网站(<http://www.powerkingdom.com/rep/ress/>)进行了改版。新版网站内容更丰富,分类更合理,并还将不断推出各种新的业务和服务。包括杂志社新闻版块,近期录用文章的公布,高校录用排行榜,每期文章的摘要及英文摘要;同时我们还在留言板里开通了“稿件咨询、文章发表及评定、杂志发行、主任在线、作者联络站”等几个留言板系统,欢迎大家的访问。

网站改版运行的初始阶段,部分页面尚在完善过程中,可能会出现网站访问不正常和资料更新延迟的现象,由此给用户带来的不便,敬请谅解。