

多重分形在小电流接地系统单相接地故障选线中的应用

杜延辉, 张勤, 何岩, 杨俊

(西南交通大学电气化自动化研究所, 四川 成都 610031)

摘要: 系统阐述了多重分形和多重分形谱的小波局部极大模计算方法, 提出了利用多重分形谱对线路的零序电流进行分析, 根据谱图进行判断故障线路的新方法。采用 PSCAD/EMTDC4.02 软件建立一 35 kV 配电线路模型进行仿真, 仿真结果表明多重分形谱可以很好地反映故障电流信号的几何特征和奇异性, 这为小电流接地系统单相接地故障选线提供了一种有效的方法, 且该方法计算简单, 可靠性高。

关键词: 小电流接地系统; 多重分形谱; 小波极大模; 零序电流; 故障选线

Application of multifractal spectrum to select fault line in neural indirect ground system

DU Yan-hui, ZHANG Qin, HE Yan, YANG Jun

(Institute of Electrification&Automation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The concept of multifractal spectrum is presented systematically and the wavelet local maxima modulus based method is introduced. Focused on a resonance-grounded power system, a new method of selecting faulted line based on multifractal spectrum of the zero-sequence current is presented. A 35 kV simulational model is set up by PSCAD/EMTDC4.02. The result shows that the geometry features of a fault current signal can be reflected by multifractal spectrum, which provides an effective way for selecting faulted line on a neutral indirect grounded power system. The method is of simple calculation and reliability.

Key words: neutral indirect ground system; multifractal spectrum; wavelet local maximum modulus; zero-sequence current; selecting fault line

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)07-0010-05

0 引言

小电流接地系统发生单相接地故障时, 含有丰富的暂态信息, 基于暂态信号的检测方法灵敏度高且不受消弧线圈的影响, 尤其是近几年随着高速数据采集与信号处理技术的发展, 使得基于暂态信号的检测方法成为学术界研究的热点。目前基于暂态的选线方法主要有两种: 一种是利用特征频段内故障线路零序电流和非故障线路零序电流极性相反, 构成的零序无功功率方向法^[1~3]; 另一种是基于小波和小波包分析的方法^[4, 5]。

分形理论致力于研究自然结构的几何特征, 并力求从表征几何特征的一系列参数来阐述、揭示非线性动力学机理, 在材料、机械、军事等诸多领域都得到了广泛的研究与应用^[6~9]。利用能够对突变的、微弱的非平稳的故障信号进行处理的多重分形谱分析, 可以很好地分析电力系统暂态过程并提取

出故障特征, 所以本文提出利用多重分形进行故障选线, 为小电流接地系统单相接地故障选线提供了一种新的思路。

1 多重分形

多重分形是定义在分形结构上的由多个标度指数的奇异测度构成的无限集合, 将分形集 F 分为 N 个小区域(分形子集), 设第 i 个区域的标度大小为 L_i , 在该小区域的奇异测度为 P_i , 定义一种奇异性指数 α_i

$$P_i \sim L_i^{\alpha_i} \quad (1)$$

式中: α_i 称为 Holder 指数(标度指数), 这里的局部奇异性可以理解为局部自相似性, 则 α_i 为局部自相似因子, 描述多重分形的广义维数 D_q 可以通过下面的描述定义^[10]。

$N(q, L)$ 为定义在几何支集 F 上奇异测度的 q 阶

矩

$$N(q, L) = \sum_i p_i^q \quad (2)$$

如果存在临界指数 $\tau(q)$, 使得 $\lim_{L \rightarrow 0} \sum_i p_i^q L^{-\tau} = \lim_{L \rightarrow 0} N(q, L) L^{-\tau}$: (1)当 $r > \tau(q)$ 时, 值为 ∞ ; (2)当 $r < \tau(q)$ 时, 值为 0; (3)当 $r = \tau(q)$ 时, 值为有限正值。则称 $\tau(q)$ 为质量指数, 且 $N(q, L) \sim L^{\tau(q)}$ 。

因此, $N(q, L)$ 为一个反映 F 上奇异测度不均匀性的统计量, 并可由此定义 D_q :

$$D_q = \frac{1}{q-1} \lim_{L \rightarrow 0} \frac{\ln N(q, L)}{\ln L} \quad q \neq 1 \quad (3)$$

$$D_q = \lim_{L \rightarrow 0} \frac{\sum p_i \ln p_i}{\ln L} \quad q=1 \quad (4)$$

D_q 实际上是通过空间各处奇异测度的 q 次方及其求和运算以求从总体上反应各处奇异程度的统计量, D_0 是几何支集的盒维数, D_1 是信息维数。由式(3)和(4)可以得到

$$\tau(q) = (q-1)D_q \quad (5)$$

广义维数谱 $D_q \sim q$ 和奇异谱 $f(\alpha) \sim \alpha$ 之间的关系为

$$\alpha(q) = d/dq[(q-1) D_q] \quad (6)$$

2 多重分形谱的小波极大模(WTMM)算法

小波变换通过伸缩和平移运算对函数或者信号进行多尺度细化分析, 因此可以有效的从信号中提取时频信息。

设 $f(x)$ 是一有限能量的函数, 即 $f(x) \in L^2(R)$, 则该函数的小波变换定义为以函数族 $\psi_{a,b}(x)$ 为积分核的积分变换, 如式(7)所示。

$$W_f(a, b, \psi) \leq f(x), \psi_{a,b}(x) \geq a^{-1/2} \int f(x) \psi_{a,b}(x) dx \quad a > 0 \quad (7)$$

其中: 函数族 $\psi_{a,b}(x)$ 由基本小波函数 $\psi(x)$ 通过伸缩和平移产生:

$$\psi_{a,b}(x) = a^{-1/2} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (8)$$

式中: a 为尺度参数; b 为位置参数, 因子 $a^{-1/2}$ 用来保证变换的能量守恒。

小波 $\psi(x)$ 的选择不是唯一的, 但其选择应该满足定义域紧支撑条件和小波容许条件^[8]。这里选择的小波函数为光滑函数的一阶导数, 即为 $\psi(t) = d\theta(t)/dt$ 。

在尺度 a_0 下, 称 (a_0, b_0) 为局部极大模点, 若对

属于 b_0 的某一邻域内的任一点 b , 都有 $|W_f(a_0, b; \psi)| \leq |W_f(a_0, b_0; \psi)|$ 。

尺度空间 (a_0, b_0) 中所有极大模点的连线称为极大模线。小波变换的局部极大模的位置和大小包含了信号的主要信息。小波局部极大模线有一个非常重要的性质, 当被分析信号 $f(x)$ 在 x_0 点的 Holder 指数 α 小于小波的消失矩阶数时, 则至少存在一条局部极大模线指向 x_0 , 而且沿极大模线, 小波变换系数存在以下尺度行为

$$|W_f(a, x_0; \psi)| \sim a^\alpha \quad (9)$$

信号的分形特征主要表现为奇异性的层次分布, 而通过小波局部极大模线可突出奇异性的层次结构。这也是可以用小波极大模来计算多重分形谱的原因, 详细的理论证明见文献[11]。

设 $L(a)$ 为尺度 a 以下所有小波极大模线的集合, 当 $\alpha \rightarrow 0$ 时, 配分函数的尺度行为用 $\tau(q)$ 来描述

$$Z(q, a) = a^{\tau(q)} \quad (10)$$

通过对 $\tau(q)$ 进行 Legendre 变换, 可得到多重分形谱

$$\alpha(q) = d\tau(q)/dq \quad (11)$$

$$f(\alpha(q)) = q\alpha(q) - \tau(q) \quad (12)$$

用小波极大模方法计算多重分形谱, 具有很多优点, 它可以分析 Holder 指数 $\alpha < 0$ 的情况, 因此用小波极大模方法计算的多重分形谱 $f(\alpha)$ 可以全面反映信号的奇异性分布。

3 零序电流信号的多重分形谱分析

3.1 仿真模型的建立

采用 PSCAD/EMTDC4.02 仿真软件, 建立一 35 kV 配电线路仿真模型, 线路参数如下: 变压器 220 kV/35 kV, 杆塔采用上字型, 下端导线距地面 15 m, 中间导线距下端导线 1.5 m, 避雷线距下端导线 3.58 m, 传输导线采用 LGJ-120, 四条出线的长度分别为 20 km、30 km、41 km、44 km, 全部采用相同的负载。

下面通过一个仿真算例来验证模型的正确性, 设线路 3 在距离母线 14 km 处发生接地故障, 接地电阻 200 Ω 。当中性点不接地时, 其各相对地电压波形如图 2 所示, 零序电流及接地点故障电流如图 1 所示。将接地方式改为谐振接地, 过补偿 5%时的各线路零序电流及接地点故障电流如图 3 所示。

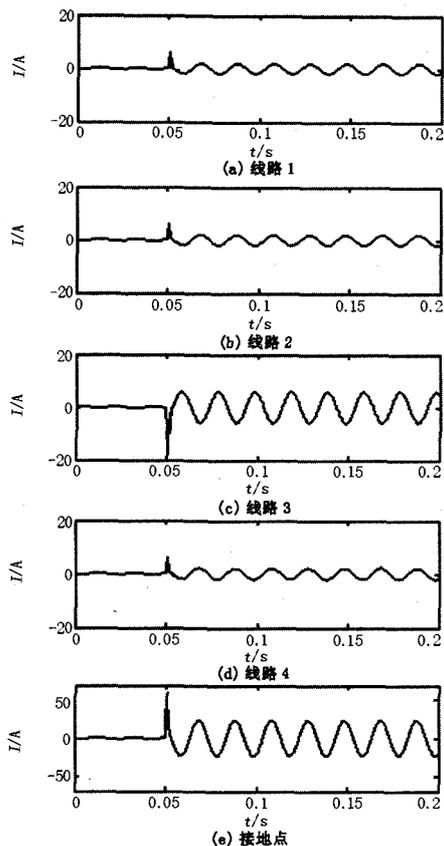


图 1 中性点不接地各线路零序电流
Fig.1 Waveform of every line's zero-sequence current in neutral ungrounded system

从仿真结果可以得出以下结论：(1) 发生单相接地故障时，非接地相电压升高 $3^{1/2}$ 倍，线电压仍然对称；(2) 故障后全系统出现零序电流，对于中性点不接地系统，故障线路零序电流幅值最大，并且方向同健全线路方向相反；(3) 对于谐振接地系统，在过补偿的情况下，故障线路与健全线路流向相同；(4) 发生故障时，有明显的暂态过程出现。

对比小电流接地电网的故障分析可以知道，以上仿真结果以及结论同理论分析完全相符，仿真模型所仿真结果可以作为实验的依据。

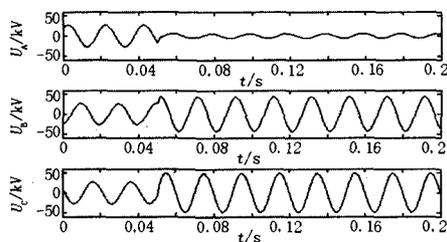


图 2 中性点不接地系统各相对地电压
Fig.2 Waveform of every phase's voltage to earth in neutral ungrounded system

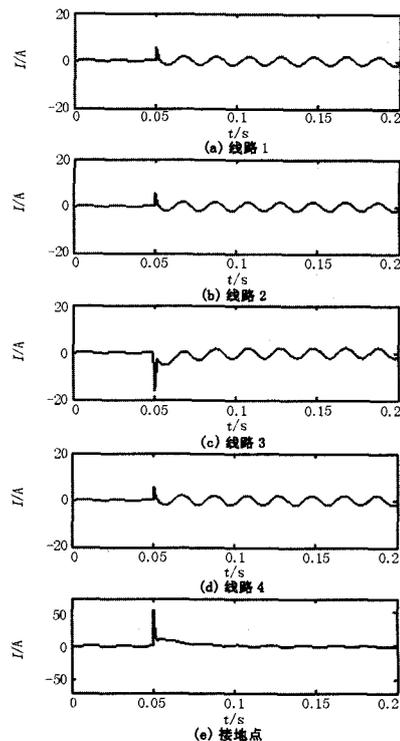


图 3 谐振接地过补偿 5%各线路零序电流
Fig.3 Waveform of every line's zero-sequence current under over-compensated 5% in resonance ground system

3.2 多重分形谱分析

下面的分析中的 α 为多重分形谱的横坐标，是分析数据的奇异性标度(或称为区间维数)， $f(\alpha)$ 为谱图的纵坐标，称为奇异性指数，也就是 α 值相同的区间的豪斯道夫维数。仿真的目的是为得出小电流系统单相接地故障时故障线的特征，依此作为判据选出故障线路。

仿真算例仍采用谐振接地过补偿 5%，线路 3 在距离母线 14 km 处发生接地故障，接地电阻 200Ω 。故障线路 3 和非故障线路 1 的零序电流多重分形谱如图 4 和图 5。

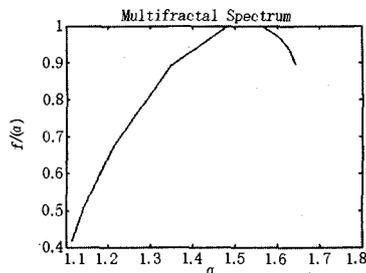


图 4 故障线路 3 零序电流的多重分形谱
Fig.4 Multifractal spectrum of fault line 3's zero-sequence current

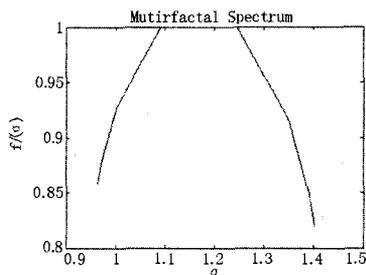


图5 非故障线路1零序电流的多重分形谱

Fig.5 The multifractal spectrum of non-fault line 1's zero-sequence current

表1 I_3 和 I_1 零序电流多重分形谱图统计数字
Tab.1 Statistics of multifractal spectrum

	I_3 零序电流图谱	I_1 零序电流图谱
α 的最小值	1.112 2	0.964 2
α 的最大值	1.642 2	1.401 9
α 的均值	1.437 6	1.178 3
α 的标准差	0.215 8	0.196 7
α 的分布范围	0.529 9	0.437 7
$f(\alpha)$ 的最小值	0.413 6	0.819 8
$f(\alpha)$ 的最大值	1.000 0	1.000 0
$f(\alpha)$ 的均值	0.819 5	0.894 6
$f(\alpha)$ 的标准差	0.212 2	0.065 2
$f(\alpha)$ 的分布范围	0.584 6	0.180 2

从表1故障线路和非故障线路的零序电流的多重分形谱统计数字可以看出, α 的最小值、最大值、均值、标准差故障线路的数值均大于非故障线路的数值, 这说明线路发生故障时故障线路的零序电流的多重分形谱右移, 故障线的零序电流的分形维数普遍偏高, 这是区分线路发生单相接地故障时故障线路与非故障线路的重要判据。

另外一个判据是故障线路零序电流的多重分形谱的 $f(\alpha)$ 的标准差, 分布范围 ($f(\alpha_{\max}) - f(\alpha_{\min})$) 大于非故障线路的零序电流多重分形谱的数值。标准差主要表示一个集合内各元素的距离, 故障线路谱图的标准差偏大, 这也说明了故障线路的谱图变化幅度较大, $f(\alpha)$ 表征一个集合的豪斯道夫维数, 就此处说来就是线路零序电流的维数, 这使得选出故障线路更加容易。

3.3 性能评价

小电流接地系统单相接地故障时, 接地电容电流的暂态分量往往比其稳态值大几倍到几十倍, 而且在前几个故障周波, 消弧线圈产生的电感电流的高频分量的频率与电容电流高频分量的频率不一

致。若能反映出这些暂态分量, 则不仅有望显著提高选线精度, 而且可以忽略消弧线圈对选线的影响。多重分形谱可以很好的提取暂态故障特征, 可以很好的反映故障信号的几何特性和奇异性。上面两个判据正是从故障线路和非故障线路零序电流的多重分形谱对比的差异入手, 提取出来的暂态故障特征。因此, 这种基于多重分形谱的小电流接地系统单相接地故障选线方法完全可以可靠地选线。

4 结论

本文系统阐述了多重分形与多重分形谱的小波局部极大模计算方法, 并对小电流接地单相接地故障线路和非故障线路零序电流的多重分形谱进行了对比分析。分析结果表明: 当小电流接地系统发生单相接地故障时存在着大量的暂态分量, 由于故障线路与非故障线路的零序电流存在着明显的差异, 这种差异经过对零序电流采样的多重分形谱的计算, 能够在谱图上明显的表现出来, 并且对于每个特定的网络, 这种规律是普遍存在的。据此可以进行故障选线。

参考文献

- [1] 薛永端, 冯祖仁, 徐丙垠, 等. 基于暂态零序电流比较的小电流接地选线研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(9): 48-53.
XUE Yong-duan, FENG Zu-ren, XU Bing-yin, et al. Earth Fault Protection in Non-solidly Earthed Network Based on Transient Zero Sequence Current Comparison[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(9): 48-53.
- [2] 薛永端, 陈羽, 徐丙垠, 等. 利用暂态特征的新型小电流接地故障检测系统[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(24): 83-88.
XUE Yong-duan, CHEN Yu, XU Bing-yin, et al. Characteristic Transient Based Monitoring System for Earth Fault in Non-solidly Earthed Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(24): 83-88.
- [3] 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, Lü 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.
- [4] 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故障选线保护[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.
- [5] 吴军基, 杨敏, 杨伟, 等. 暂态高频分量能量法小电流接地故障选线[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(6): 14-17. WU Jun-ji, YANG Min, YANG Wei, et al. Fault Line Detection Using Transient High Frequency Energy for Small Current Grounding System[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(6): 14-17.
- [6] Zhao J, Smith C D, Varlow B R. Substation Monitoring by Acoustic Emission Techniques[J]. IEE Proceedings on Science, Measurement and Technology, 2001, 148(1): 28-34.
- [7] 徐玉秀, 侯荣涛, 杨文平. 广义分形维数在旋转机械故障诊断中的应用研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(21): 1812-1815. XU Yu-xiu, HOU Rong-tao, YANG Wen-ping. Application of General Fractal Dimension to Coupling Fault Diagnosis[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(21): 1812-1815.
- [8] 盛永刚, 许耀, 李志宏, 等. 气体吸附法测定二氧化硅干凝胶的分形维数[J]. 物理学报, 2005, 54(1): 221-228. SHENG Yong-gang, XU YAO, LI Zhi-hong, et al. Determination of Fractal Dimensions of Silicom Dioxide Xerogel by Means of Gas Absorption[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(1): 221-228.
- [9] 杜干, 张守宏. 基于多重分形的雷达目标的模糊检测[J]. 自动化学报, 2001, 27(2): 174-179. DU Gan, ZHANG Shou-hong. Fuzzy Detection of Radarship Targets Based on Multifractal Analysis[J]. Acta Automatica Sinica, 2001, 27(2): 174-179.
- [10] Muzy J F, Bacry E, Ameodo A. Wavelet and Multifractal Formalism for Singular Signals: Application to Turbulence Data[J]. Physical Review Letters, 1991, 67(2): 3515-3518.
- [11] Bacry E, Muzy J F, Ameodo A. Singularity Spectrum of Fractal Signals From Wavelet Analysis: Exact Result[J]. Journal of Statistical Physics, 1993, 70(3): 635-675.

收稿日期: 2007-08-22; 修回日期: 2007-10-10

作者简介:

杜延辉(1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事信号分析和电力系统继电保护研究; E-mail: duyanhui2008@tom.com

张勤(1968-), 女, 副教授, 主要从事铁道电气化自动化及变电站综合自动化研究;

何岩(1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事变电站综合自动化研究。

(上接第9页 continued from page 9)

2.6 PT 断线闭锁

PT 断线一般可以分为一次侧断线和二次侧断线, 无论是哪一侧的断线, 都将会使 PT 二次回路的电压异常, 影响继电保护装置的正确动作。

在大电流接地系统中, 满足下面条件即可判断 PT 断线:

a) 三相电压和不为零, $U_A + U_B + U_C > 7V$,

用于检测一相或两相断线;

b) 三相电压均小于 8 V, 且双回线任一相电流 $> 0.04I_n$ (I_n 为每一条线路的额定电流), 或者双回线任一断路器在合位, 用于检测三相失压。

以上条件满足瞬时闭锁横差保护。

3 结论

本文详细分析了横联差动电流方向保护的基本原理和大电流接地系统下的动作判据, 并以此展开, 对横差保护的闭锁措施做了定性的研究, 如在单回线运行的情况、双回线先跳一回线后的情况、双回线接到两段母线上且母线故障时的情况、任一线路的任何相别断线的情况下的闭锁措施, 以及复压闭

锁、PT 断线闭锁等, 为同杆双回线的横差保护实现提供了理论依据。

参考文献

- [1] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术(第三版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005. 270-277. ZHU Sheng-shi. Principle and Technology of Relay Protection in HV Network, Third Edition[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005. 270-277.
- [2] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996. GE Yao-zhong. New Type of Protective Relaying and Fault Location Their Theory and Techniques[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.

收稿日期: 2007-09-11; 修回日期: 2007-10-09

作者简介:

赵一(1982-), 男, 硕士, 从事电力系统方面的研究; E-mail: zhaoyicqu@163.com

罗建(1960-), 男, 副教授, 主要从事继电保护的研究和教学工作;

郝安河(1952-), 男, 高级工程师, 从事电网技术、电力系统调度、生产的研究和管理工作。