

一种基于 EMD 的谐振接地系统选线新方法

查丛梅¹, 王长江², 魏云冰², 李涛³, 路光辉⁴

(1. 中原工学院电子信息学院, 河南 郑州 450007; 2. 郑州轻工业学院电气信息工程学院, 河南 郑州 450002;
3. 南阳市供电公司, 河南 南阳 473000; 4. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 针对谐波接地系统故障线路零序导纳特征不突出这一问题, 提出了一种基于 EMD 的谐振接地系统选线新方法。该方法对各条线路的零序导纳进行 EMD 分解, 提取出特征分量, 通过比较故障线路和非故障线路特征分量的符号进行选线。大量仿真表明, 该方法不受接地电阻和初始故障角的影响, 能准确地选出故障线路。

关键词: 谐振接地系统; 零序导纳; EMD; 特征分量; 故障选线

A new method of the resonant grounding system fault line detection based on EMD

ZHA Cong-mei¹, WANG Chang-jiang², WEI Yun-bing², LI Tao³, LU Guang-hui⁴

(1. School of Electric and Information, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China; 3. Nanyang Power Supply Company, Nanyang 473000, China; 4. XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China)

Abstract: To solve this problem that harmonic grounding system fault line zero sequence admittance levy does not highlight, this paper proposes a new resonant grounding line selection method based on EMD. In this method, each line zero sequence admittance is decomposed with EMD, characteristic component is extracted, and the fault line is selected by comparing the characteristic component symbols of the fault line and non-fault lines. Extensive simulations show that this method is not impacted by the ground fault resistance and the initial angle, and can accurately select the fault line.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61305080).

Key words: resonant grounding system; zero sequence admittance; EMD; characteristic component; fault line

中图分类号: TM771

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)14-0100-05

0 引言

我国小电流接地方式主要有四种: 中性点不接地、谐振接地、中性点经高阻接地和中性点经小电阻接地。其中, 谐振接地是我国 6~35 kV 中压配电网中主要的接地方式, 它能有效地提高供电可靠性, 对电网的安全运行有着重大的意义^[1]。但是, 在单相接地故障发生时, 由于消弧线圈的补偿作用, 使接地电流减小, 导致故障特征不明显, 给谐振接地系统故障选线造成了困难。

目前国内外选线的基本方法可以分为两大类: 稳态法和暂态法。其中稳态法主要有: 零序电流比幅法^[2]; 五次谐波法^[3]; s 注入法^[4]; 零序导纳法^[5-6]等。零序电流比幅法受接地方式和接地电阻影响较

大, 现已很少采用; 五次谐波法在电能质量要求较高的环境中选线准确性无法满足; s 注入法需要增加设备投入, 目前也很少采用; 零序导纳法不受接地电阻的影响, 但在过补偿时故障特征不突出, 文献[5-6]中在谐振接地系统时故障特征不突出, 选线的准确性也无法保证。暂态法主要是使用先进的信号处理手段使故障特征更突出, 从而提高选线的准确性和精度, 文献[7-11]中就在故障选线中分别应用了小波变换、s 变换、形态学理论、相关性分析和 EMD 分解等手段, 并取得了较好的效果。但小波变换存在选取基函数和分解尺度困难的问题; s 变换虽然是对小波变换的改进但仍然无法解决分解尺度问题; 形态学理论和相关性分析只对特征突出的信号有较好的分辨效果; EMD 算法与小波变换一样是一种时频处理方法, 但它克服了小波变换所具有的基函数和分解尺度选取困难的问题。另外, 随着信

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61305080)

息技术的发展, 智能化选线方法^[12-13]也得到了广泛的研究, 但是这些方法是建立在故障特征突出这一前提上的, 因此, 故障特征的研究才是选线技术的关键。

本文是在分析了在高频条件下零序导纳特征的基础上, 提出了一种基于 EMD 的谐振接地系统选线新方法。该方法对零序导纳进行了 EMD 分解, 并提取了零序导纳的首个本征模态函数, 同时, 为了凸显比较量的差距, 还求出了该本征模态函数中绝对值最大的极值, 然后将求出的极值分别与其他线路的极值作差后取绝对值并求和运算, 其结果最大的所对应的线路为故障线路。大量仿真结果证明了该方法的正确性。

1 零序导纳特征分析

为了方便分析, 各条线路中的电阻和电抗对零序导纳的影响不做考虑, 如图 1 所示。其中, R_d 为单相接地电弧电阻, L 为消弧线圈等效电感; U_{d0} 为零序电压; C_{iA}, C_{iB}, C_{iC} 为非故障线路三相对地电容; C_{jA}, C_{jB}, C_{jC} 为故障线路 j 三相对地电容^[6]。

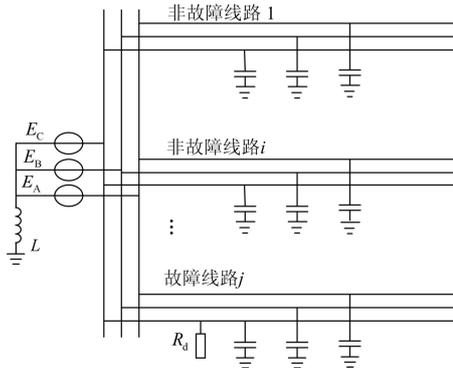


图 1 电网单相接地电路

Fig. 1 Single-phase grounding circuit

当系统发生单相接地故障时, 非故障线路的零序导纳都可以表示为

$$\dot{Y}_{di0} = \dot{I}_{di0} / \dot{U}_{d0} = j\omega C_i \quad (1)$$

式中: \dot{Y}_{di0} 为故障情况下测得的第 i 条非故障线路的零序导纳 (此时零序导纳就是线路的电纳); \dot{I}_{di0} 为故障情况下第 i 条非故障线路的零序电流; \dot{U}_{d0} 为对应的零序电压; C_i 为第 i 条线路自身的对地电容。

对于故障线路, 设第 j 条线路故障, 故障线路的零序导纳为

$$\dot{Y}_{dj0} = \frac{\dot{I}_{dj0}}{\dot{U}_{dj0}} = -\frac{1}{R_d} - j(\omega C_\Sigma - \frac{1}{3\omega L}) + j\omega C_j \quad (2)$$

在目前的谐振接地系统中, 大多采用过补偿形式, 即 $\omega C_\Sigma < \frac{1}{3\omega L}$ 。由式 (2) 可得在基波情况下 \dot{Y}_{dj0}

的虚部 (电纳) 是大于零的, 由文献[7]可知, 这主要是由于消弧线圈在基波时的过补偿使线路呈现感性引起的。而在高频下, 消弧线圈所提供的感性电流已远远不能补偿线路的容性电流, 使馈线主要显容性, 对应的零序导纳的虚部是小于零的, 因此, 在高频条件下通过判断各馈线电纳的符号就可以实现选线。

2 EMD 算法

EMD 算法是一种自适应的时频处理方法, 适用于分析非线性、非平稳信号。它可以把信号分解成若干个本征模态函数之和, 分解出的每个 IMF 分量突出了信号的不同频率成分, 反应了信号的局部特征。其中, 每个 IMF 必须要满足两个条件: 1) 极值点的个数和过零点的个数相差不大于 1; 2) 在任一点上下包络线的均值为零。

EMD 算法的主要步骤如下:

(1) 找出原信号 $x(t)$ 的所有极值点, 通过三次样条函数拟合得到原始信号的上下包络线; 上下包络线的平均值为 $m_1(t)$, 将 $x(t)$ 减去 $m_1(t)$ 就得到了一个去掉低频的信号 $h_1(t)$ 。如果 $h_1(t)$ 不是一个平稳信号, 则重复上述过程, 直到使所得信号的平均包络趋势为零, 这样就得到了一个高频成分的第一个本征模态函数 $imf_1(t)$ 。

(2) 用 $x(t)$ 减去 $imf_1(t)$ 得到一个新的 $r_1(t)$, 再对 $r_1(t)$ 重复步骤 (1) 得到第二个本征模态函数 $imf_2(t)$, 重复以上步骤直到剩余分量 $r_n(t)$ 不可分解为止。

(3) 经过以上步骤得到 $x(t)$ 经 EMD 分解后得到

$$x(t) = \sum_{i=1}^n imf_i(t) + r_n(t) \quad (3)$$

式中: $r_n(t)$ 为剩余项; $x(t)$ 经 EMD 分解后得到了 n 个频率从高到低的本征模态函数 IMF。

3 基于 EMD 的谐振系统接地选线原理

由前两节分析可知, 在高频条件下, 故障线路与非故障线路的电纳异号。本文利用 EMD 很好的分频特性对各馈线的电纳信号进行分解, 得到高频分量 $imf_1(t)$, 此时的 $imf_1(t)$ 具有较明显的特征。

图 2 分别为谐振接地系统在过补偿情况下, 某一馈线的 A 相发生金属性接地故障 (故障角

$\theta=90^\circ$) 时, 电纳的原始信号和经 EMD 分解后得到的高频信号的波形图。由图 2(a)可以看到, 该馈线的电纳为正, 由如图 2(b)可知, 该馈线的电纳为负, 这与第一节分析的相符合。因此可以通过比较各馈线的 $imf_1(t)$ 的符号选出故障线路。

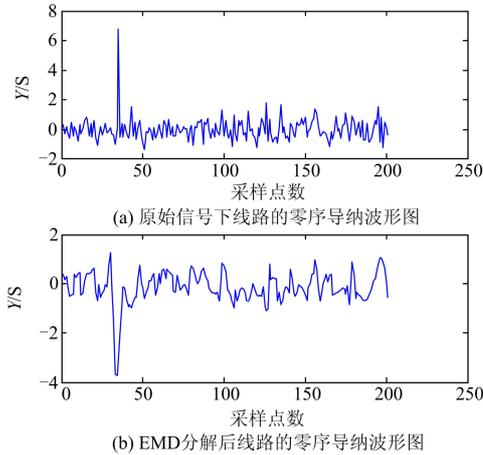


图 2 EMD 分解前后线路电纳波形图

Fig. 2 Susceptance waveform before and after EMD decomposition

4 选线算法

当谐振系统馈线发生接地故障时, 根据高频下故障线路与非故障线路的电纳异号这一特征就可以实现选线, 但是, 一个好的选线算法应该最大限度的拉大比较量之间的距离。对此本文采取了这样一个算法:

- 1) 先用 EMD 对各馈线的零序导纳信号进行分解, 提取首个 $imf_1(t)$ 。
- 2) 找出各馈线 $imf_1(t)$ 的绝对值最大的极值, 并将求出的极值分别与其他馈线的极值作差取绝对值并求和。
- 3) 其值最大的那条线路即为故障线路, 若结

果都相等, 则为母线故障。

5 基于 PSCAD/EMTDC 的仿真

本文用 PSCAD/EMTDC 对一个 10 kV 的谐振接地配电系统进行仿真, 该配电系统有三条馈线, 其中一条架空线, 一条电缆线和一条电缆架空线混合线, 如图 3 所示。该系统采用过补偿方式, 补偿度为 10%, 其线路参数见表 1。

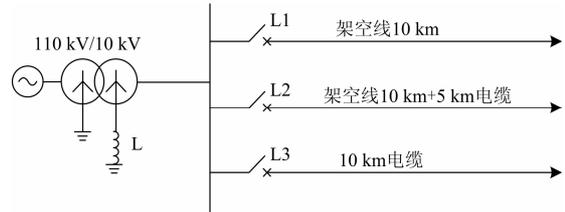


图 3 具有三条馈线的 10 kV 供电系统

Fig. 3 10 kV power supply system with three feeders

当馈线 L1 在 10 km 处发生金属性接地 (故障角 $\theta=90^\circ$, $R_d=0$) 时, 经 EMD 分解后各馈线零序导纳的高频信号的波形图如图 4, 从图中可以看出, 高频下三条馈线的电纳异号, 其对应的绝对值最大的极值也是异号的, 根据第四节中的选线算法, 计算的结果如表 2。

本文还针对不同故障角和接地电阻进行仿真, 由于篇幅有限这里只将选线结果列于表 2。由表 2 可以看出, 本文提出的选线算法不受故障角和接地电阻的影响, 能正确地选出故障线路。

表 1 电网参数

Table 1 Grid parameters

馈线类型	序抗	R/Ω	L/mH	C/PF
架空线	正序	0.17	1.25	9.327
	零序	0.317	4.93	5.133
电缆线路	正序	0.12	0.737	0.293
	零序	0.507	0.609	0.293

表 2 仿真结果

Table 2 Simulation results

R_d/Ω	$\theta/(^\circ)$	计算结果 B_{L_i}/S			实际故障线路	判定故障线路	判定结果
		L1	L2	L3			
0	0	2.34	1.21	1.13	L1	L1	正确
	30	5.35	2.84	2.51	L1	L1	正确
	60	9.68	4.92	4.76	L1	L1	正确
	90	12.14	7.21	4.93	L1	L1	正确
500	0	2.25	1.16	1.09	L1	L1	正确
	30	5.26	2.75	2.51	L1	L1	正确
	60	9.52	4.83	4.79	L1	L1	正确
	90	1.24	1.24	1.24	母线	母线	正确

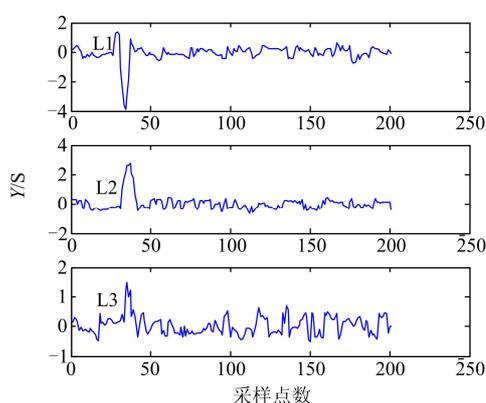


图 4 各馈线电纳的高频分量波形图

Fig. 4 High frequency component waveform of each feeder's susceptance

6 结论

本文分析了故障时各馈线的零序导纳特征, 发现高频条件下零序导纳特征更突出这一特点。对此, 提出了一种基于 EMD 的谐振接地系统选线新方法。该方法用 EMD 提取了零序导纳的高频信号, 通过对各馈线的高频信号提取绝对值最大的极值作互差取绝对值并求和运算, 拉大了比较量之间的差距, 提高了选线的准确度。从仿真结果看, 本文提出的选线方法能够准确有效地选出故障线路, 并且不受接地阻抗和故障初始角的影响。

参考文献

- [1] 郭清滔, 吴田. 小电流接地系统故障选线方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 147-150.
GUO Qing-tao, WU Tian. Survey of the methods to select fault line in neutral point ineffectively grounded power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 147-150.
- [2] 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.
- [3] 陈志亮, 范春菊. 基于 5 次谐波突变变量的小电流接地系统选线[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(5): 38-41.

- CHEN Zhi-liang, FAN Chun-ju. Fault line selection for small current neutral grounding system based on the fifth harmonic current mutation in distribution system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18(5): 38-41.
- [4] 桑在中, 张慧芬, 潘贞存, 等. 用注入法实现小电流接地系统单相接地选线保护[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(2): 11-12.
SANG Zai-zhong, ZHANG Hui-fen, PAN Zhen-cun, et al. Protection for single phase to earth fault line selection for ungrounded power system by injecting signal[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(2): 11-12.
- [5] 唐秩, 陈奎, 陈庆, 等. 导纳互差之绝对值和的极大值法小电流接地选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 49-54.
TANG Zhi, CHEN Kui, CHEN Qing, et al. Study on earthed fault location method in indirectly grounding power system using maximum value of absolute value summation of measurement admittance mutual difference[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 49-54.
- [6] 何引生, 王彦东, 严司玮, 等. 零序导纳角正弦值在不接地系统单相故障选线分析[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(8): 39-42.
HE Yin-sheng, WANG Yan-dong, YAN Si-wei, et al. Analysis of fault line detection in neutral point ungrounded power system based on sine value of zero sequence admittance angle[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(8): 39-42.
- [7] 鲁改凤, 化雨, 金小兵, 等. 小电流接地系统单相接地故障选线方法探究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 45-49.
LU Gai-feng, HUA Yu, JIN Xiao-bing, et al. Research on a method of fault line selection for single-phase earth fault in ineffectively grounded power systems[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 45-49.
- [8] 束洪春, 彭仕欣. 基于短窗数据 S 变换能量的缆-线混合配电网故障选线方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 153-158.
SHU Hong-chun, PENG Shi-xin. A fault line detection algorithm for distribution network of overhead line and underground cable mixed lines using S-transform energy

- from short window data[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 153-158.
- [9] 高艳, 林湘宁, 刘沛. 基于广义形态开闭变换的小电流接地选线算法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 2-5.
- GAO Yan, LIN Xiang-ning, LIU Pei. Generalized morphological opening-closing transform based feeder selection algorithm for neutral un-effectual grounded system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 2-5.
- [10] 王韶, 朱姜峰. 基于改进相关性分析法的配电网单相接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 77-81.
- WANG Shao, ZHU Jiang-feng. Faulty line selection of single-phase to ground fault in distribution network based on improved correlation analysis method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 77-81.
- [11] 张宇辉, 汪利君, 兰华, 等. 基于 EMD-相关性算法的谐振接地系统故障选线新方法[J]. 电测与仪表, 2012, 49(564): 7-11.
- ZHANG Yu-hui, WANG Li-jun, LAN Hua, et al. A method of resonant earthed system fault line detection based on EMD[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(564): 7-11.
- [12] 张海平, 何正友, 张钧. 基于量子神经网络和证据融合的小电流接地选线方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 172-177.
- ZHANG Hai-ping, HE Zheng-you, ZHANG Jun. A fault line detection method for indirectly grounding power system based on quantum neural network and evidence fusion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(12): 172-177.
- [13] 贾清泉, 石磊磊, 王宁, 等. 基于证据理论和信息熵的消弧线圈接地电网融合选线方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 192-197.
- JIA Qing-quan, SHI Lei-lei, WANG Ning, et al. A fusion method for ground fault line detection in compensated power networks based on evidence theory and information entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 192-197.

收稿日期: 2013-10-14; 修回日期: 2014-03-19

作者简介:

查丛梅(1966-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为电力系统及其自动化、电力电子及电力传动;

王长江(1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: 554163181@qq.com

魏云冰(1970-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统自动化。