模极大值均方根比在配网暂态接地故障选线中的应用研究

王 铭[1]，王宏伟[2]，赵义明[1]

（1.中国石油大学胜利学院，山东 东营 257000；2.国网山东省电力公司检修公司，山东 济南 250021）

摘要：针对小电流接地系统单相接地故障暂态量电流特征，给出一种以零模电流模极大值均方根比值为判据的接地故障暂态选线方法。利用小波包分析和奇异性检测理论对故障线路与非故障线路零模暂态电流奇异性差异进行分析，计算选线频带内各线路零模电流的模极大值序列及模极大值的均方根值，并根据均方根比值确定故障线路。理论分析和 EMTP 大量仿真试验结果表明，该方法能适应工程应用中可能存在的影响因素，具有灵敏度高、自适应能力强、选线准确等特点。

关键词：小电流接地系统；故障选线；模极大值；均方根；比值

Application research for the root mean square ratio of modulus maxima in the distribution network transient fault line selection

WANG Ming[1], WANG Hong-wei[2], ZHAO Yi-ming[1]

(1. Shengli College, China University of Petroleum, Dongying 257000, China;
2. Maintenance Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250021, China)

Abstract: Aiming at the transient zero-mode characteristics of single-phase ground fault in neutral point ineffectively grounding system, a method of fault line selection is presented based on the Root Mean Square (RMS) ratio of modulus maximum. This method analyzes the singularity differences of transient current between fault line and non-fault line by using wavelet packet theory and singularity detection theory. It calculates the modulus maximum RMS in line selection band and determines the fault line by calculating the ratio of modulus maximum RMS. Some factors that might influence the effect of fault line selection in the actual application are taken into account. Results and a lot of EMTP simulation show that the proposed method is of high sensitivity and accuracy and strong adaptive ability.

Key words: small current grounding system; fault line selection; modulus maxima; root mean square; ratio

中图分类号： TM711 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2014)17-0050-05

0 引言

中性点非直接接地电网单相接地故障时其暂态电气量与故障特性有清晰的关系。在接地故障检测中利用这些特征量实现故障选线具有更高的灵敏性和可靠性。近几年国内外研究人员对利用暂态电气量特征实现选线进行了深入的研究，取得了较多成就[1]，但总体而言暂态故障选线还不是十分完善。

本文提出了一种新的小电流接地系统单相接地故障选线方法。该方法对故障线路和非故障线路零模电流进行小波包变换，从能量最大角度出发自适应确定故障选线频带。求取选线频带内各线路模极大值组合及模极大值所对应的均方根值 Root Mean Square（RMS），最终运用 RMS 值的差异特征实现故障选线。

基金项目：山东省高等学校科技计划项目（J09LG66）

1 零模网络暂态特征分析及数据处理

1.1 零模网络暂态电流特征分析

以中性点经消弧线圈接地系统为例分析，可采用卡伦鲍尔（Karrenbauer）变换将三相系统解耦成 0 模、1 模、2 模三个独立的模量。设小电流接地系统中共有 n 条线路，假设第 i 条线路发生单相接地故障，可建立图 1 所示零模网络等效电路。

图 1 中：R_0、L_0、C_0 分别为线路每千米的零序电阻、电感和电容；L 为消弧线圈电感；故障点虚拟电源在零模网络上的压降用 U_0 表示。

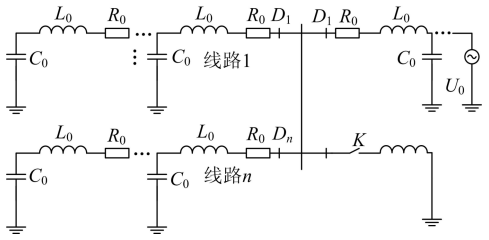

图 1 单相接地故障零模网络等效图

Fig.1 Equivalent graph of single phase grounding fault in zero-mode network

故障线路检测的零序导纳在忽略线路电阻的情况下等于消弧线圈以及所有健全线路并联的综合导纳。设消弧线圈在 f_r 频率下能够完全补偿系统的电容电流，则有：

$$f_r = 1/2\pi\sqrt{3LC_{oh}} \quad (1)$$

上式中用 C_{oh} 表征系统中全部非故障线路零序等效电容总和。若忽略线路电阻，则非故障线路上出现首次串联谐振的频率可表示为 $f_s = 1/4l\sqrt{LC}$，由系统最长非故障线路可确定所有健全线路自身串联谐振频率最小值 f_M。

$$f_M = \min(f_{sj})_{j\neq i} \quad (2)$$

对中性点经消弧线圈接地系统，设最大健全线路零序电容为 $C_{0\max}$ 且 $\eta = C_{0\max}/C_{0\Sigma}$，再定义：

$$f_L = \frac{f_r}{\sqrt{\rho-\eta}} \quad (3)$$

其中，$\rho = C_{0h}/C_{0\Sigma}$（$C_{0\Sigma}$ 为整个零模网络等效电容），在 f_L 到 f_M 范围内故障线路的暂态零模电流幅值大于任一非故障线路且极性相反。由于故障时出现的突变信号是在正常运行情况下的稳态电流基础上产生的，因此故障线路信号的突变程度将明显大于非故障线路。

1.2 故障暂态数据处理相关问题

通常将无限次可导的函数称为光滑的或没有奇异性的。若函数在某点间断或某阶导数不连续，则称其在此处有奇异点。一个信号在某点的奇异度常用其李普西兹指数来刻画。当取小波母函数为平滑函数的一阶导数时，在突变点处小波变换的模取得局部最大值，故信号的奇异性检测就转变为小波变换模极大值的检测[2]。

小电流接地系统故障暂态行波信号是一典型的非平稳信号，具有突变、奇异性的特点。小波变换作为一种时频局部分析工具很适合探测非平稳信号并展示其成分。小波包变换在小波变换基础上可对高频信号提供更精细的分解，并可根据信号特征选择相应频带进行分析。

2 小电流接地故障暂态选线策略

2.1 选线策略

小电流接地系统发生单相接地故障时将出现信号突变即存在奇异性。由于非故障线路上出现的电流行波分量是由故障线路透射过去的[3]，相应的其小波变换模极大值及突变能量在故障线路上最大，在非故障线路上则较小。在整个暂态范围内，故障线路模极大值有效值要远大于非故障线路。基于此，可求取故障发生后各线路零模电流在选线频带内模极大值的均方根值 RMS（Root Mean Square）。假如第 k 条线路模极大值的 RMS 值 R_k 为所有线路极大值的 RMS 值中的最大者，第 j 条线路模极大值的 RMS 值 R_j 为 RMS 值中的次大者。则可设定如下判据：如果 $M = R_k/R_j \geq \varepsilon$，即可以判定线路 k 是故障线路，其中 ε 为选线门槛值。

2.2 选线频带及选线门槛值设定

建立一个具有 4 条馈线的 10 kV 系统模型如图 2，其馈线正序阻抗为 $(0.17 + j0.38)\Omega/km$，零序阻抗为 $(0.23 + j1.72)\Omega/km$，正序容纳为 $3.045\,\mu s/km$，零序容纳为 $1.884\,\mu s/km$，线路长度分别为 20 km,10 km,15 km, 25 km。

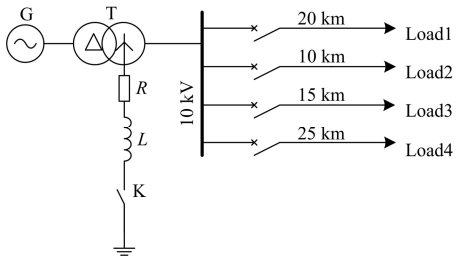

图 2 10 kV 配电网络结构图

Fig. 2 Structure for a 10 kV distribution network

根据式（2）及式（3）分别计算选线频带的上下限。将其下限乘以 1.1，上限乘以 0.9 的修正系数（考虑误差及线路电阻的影响）后，选线频带可设定为（94，1570）Hz。

在上述选线频带内，当故障发生在馈线上时，故障线路零模电流将明显大于健全线路。故障线路模极大值的 RMS 值也远大于非故障线路模极大值的 RMS 值。故障时出现的暂态信号是在正常运行情况下稳态电流基础上产生的，信号突变程度即模极大值与暂态信号幅值密切相关，可以此为基准确定选线门槛值 ε。不难看出，ε 值选取越大，抗干扰能力越强，但选线灵敏度会下降，反之亦然。考

虑到计算误差等因素影响并经过多次仿真验证，本文取 $\varepsilon=1.5$ 能保证有较强的抗干扰能力和选线灵敏度。

3　选线步骤分析

利用电磁暂态程序 ATP/EMTP 对上述 10 kV 网络进行仿真[4]。采样频率设为 3 kHz。线路 1 距线路出口处 10 km 发生 A 相接地短路，过渡电阻为 5 Ω，各线路零模暂态电流如图 3。

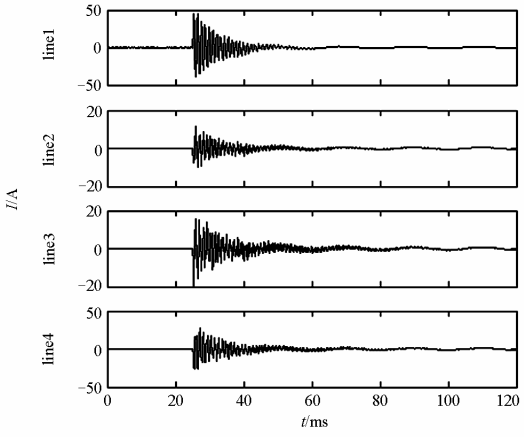

图 3 线路故障时各线路零模分量

Fig. 3 Zero-mode transient when fault in line

用 Db5 小波包对四条线路零模电流进行分解。根据小波包分频特性，尺度 4 下四组零模电流分量均被分解为 16 个子频带，记为节点 $S_{ij}(i=4,j=(1\sim16))$，i 为所在层，j 为相应层上的子频带序号。每个节点长度为 93.75 Hz。其中最低频带为 0~93.75 Hz，最高频带为 1406.25~1500 Hz，在程序设定中舍弃第一个子频带后，其余 15 个子频带均处于（94，1570）Hz 的选线有效频带内。记各线路有效节点内的模极大值为 $\{W_{lmn}\,|\,n=1,2,3,\cdots,N\}$，其中 l 为出线回路数；$m=2,3,4,\cdots,16$，为各线路有效节点序号；n 为各有效节点内模极大值点序号；N 为各有效节点内模极大值个数。线路 1 在各有效节点内的模极大值能量为

$$E_{lm}=\sum_{n=1}^{N}|W_{lmn}|^2 \qquad (4)$$

提取 4 条线路小波包分解后能量最大的频带所对应节点并将 4 个节点组合为选线频带如图 4。

各线路选线频带范围随系统运行方式或线路参数改变而变化，前述故障条下四条线路选线频带均为其各自 S_{43} 节点。在组合选线频带内分别求取四条线路的正负模极大值，如图 5 所示。

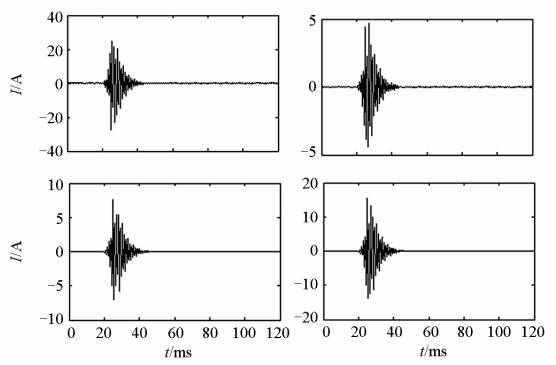

图 4 四条线路组合选线频带细节图

Fig. 4 Detailed diagram of combination selected frequency bands for four lines

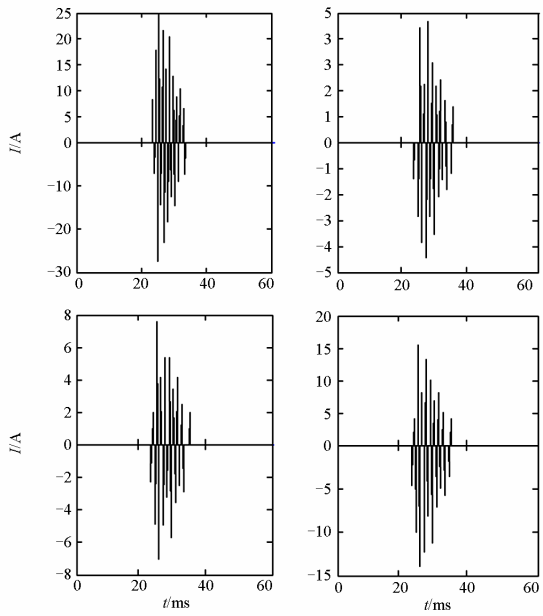

图 5 选线频带内线路 1−线路 4 的正负模极大值

Fig. 5 Positive and negative modulus maxima in the selected frequency bands for line 1 to line 4

根据均方根 RMS（Root Mean Square）定义求取四条线路正负模极大值所对应的 *RMS* 值：*RMS*=[19.36 3.87 4.76 10.02]，可见故障馈线的 RMS 值远大于其余三条健全线路，将馈线模极大值的 *RMS* 值按降序进行排序并编号为 $R_1\sim R_4$，求取 $M=R_1/R_2$（论文中称之为 *RMS* 比值）为 1.93。该值大于选线门槛值 1.5，即可判定最大模极大值比值中分子量所在线路为故障线路。

改变故障条件，将单相接地故障点由线路移向母线，故障瞬时角为 90°，过渡电阻为 500 Ω，各线路零模暂态电流如图 6。

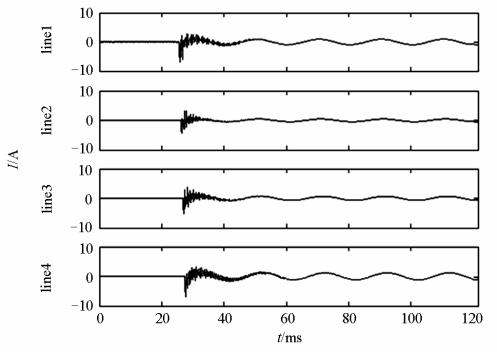

图 6 母线故障时各线路零模分量

Fig. 6 Zero-mode transient when fault in bus-bar

故障发生在母线上时，各馈线均为非故障线路，各条线路暂态量的突变程度相差不大，经小波包分解后在其选线频带内求取四条线路正负模极大值所对应的 *RMS* 值：*RMS*=[2.76 2.71 2.56 2.53]，M 值为 1.02，接近为 1，如图 7 所示。

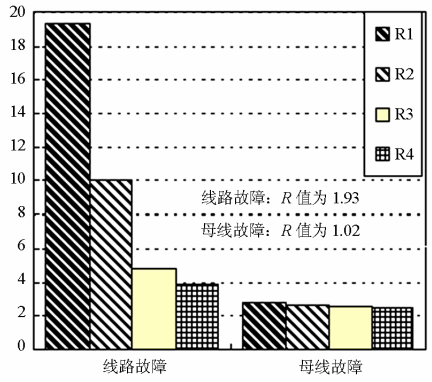

图 7 线路故障与母线故障的 *RMS* 对比

Fig. 7 Comparison of fault in line and fault in bus-bar

根据算例分析，故障选线过程可总结为：单相接地故障后启动故障选线程序。以各馈线零模电流为分析对象，在选线频带内对数据窗内零模电流信号进行小波包分解；在最高层子频带节点中自适应的求取能量最大的子频带组合为选线频带；求取选线频带内各线路模极大值序列；计算极大值所对应得 *RMS* 值并进行排序，最后求取 *RMS* 比值 M 。若 $M>\varepsilon$ 则判定排序为 R_1 者所对应的线路为故障线路，否则为母线故障。

4　选线方法适应性分析及验证

小电流接地系统接地故障暂态过程主要受影响于故障距离、过渡电阻和故障初相角等 [5]。当故障条件变化时，信号中暂态分量的频率成分、能量分布及暂态过程持续时间均有明显差异。以线路 1 故障为例，分析上述因素对 *RMS* 值及其比值的影响。限于篇幅，列出部分数据如表 1 。

表 1 不同故障条件的检测结果

Table 1 Detection results of different fault conditions

影响因素		*RMS* 值				*M* 值
		L1	L2	L3	L4	
故障距离/km	1.5	4.09	1.21	1.33	2.15	1.90
	7.5	5.02	0.86	2.10	2.77	1.81
	10.5	4.98	0.67	1.73	2.82	1.77
过渡电阻 /Ω	5	25.0	3.98	6.41	12.30	2.03
	100	7.72	1.52	3.26	4.03	1.92
	300	5.41	0.65	2.83	3.06	1.77
初相角/（°）	0	3.02	0.39	0.66	1.07	2.82
	27	7.33	1.32	2.10	3.83	1.91
	90	13.8	2.15	3.97	7.70	1.79

故障条件变化时，选线频带所在节点及 M 值均发生相应变化，但模极大值的 *RMS* 值最大者固定出现在故障线路上且 *RMS* 比值始终大于 1.5 的门槛值。故障距离变化对 M 值影响不大，当故障发生在线路首端时，M 值较大，当故障发生在线路末端时，M 值较小，呈现较强的规律性。

过渡电阻在改变信号振荡特性的同时，也改变了暂态信号的变化程度。在其余条件不变的情况下，M 值随过渡电阻增大有下降趋势。这是因为过渡电阻越大容性分量的振荡频率越小，暂态信号的变化量及突变程度也越小。

故障初相角对 *RMS* 比值的影响较为明显。电压最大值时发生故障时，故障线路模极大值的 *RMS* 值明显大于非故障线路，能够准确实现选线。电压过零点故障时，各线路 *RMS* 值都很小。在这种情况下以往基于大小或方向确定故障线路的方法常会失效。本文选线方法是建立在比值的基础上，此时尽管故障线路电流变化较弱，模极大值 *RMS* 值较小，但由于非故障线路电流是故障线路电流行波的透射，其突变程度更弱。在两个数值都变小的情况下，用这两个数值的比值进行判断却能够使 M 值仍能保持较大的数值，非常有利于此种状态下故障线路的判断。

5　结论

本文分析了基于模极大值 *RMS* 比值的故障选

线方法的实现。该方法将选线判据建立在小波包分解及奇异程度有效值的比值上，在故障特征不明显时，仍能准确选线。在对含有误差的信号进行处理时具有良好的容错性，适用范围广，检测灵敏度高。一些相关技术问题，如高阻故障检测灵敏性等还需结合实践进行进一步的研究。

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): 46-51.
GUO Qing-tao, WU Tian. Survey of methods to select fault line in neutral point ineffectively ground power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 46-51.

[2] 孙延奎. 小波分析及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

[3] 王韶, 朱姜峰. 基于改进相关性分析法的配电网络单相接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 76-81.
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): 76-81.

[4] DOMMEL H W. Electromagnetic transients program reference manual (EMTP Theory Book)[M]. Portland: BPA,1986.

[5] 郭谋发, 林妙玉, 杨耿杰. 谐振接地系统暂稳态信息智能融合选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 60-66.
GUO Mou-fa, LIN Miao-yu, YANG Geng-jie. The transient and steady-state information fusion method for single phase grounding line detection in resonant grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 60-66.

收稿日期：2014-03-03； 修回日期：2014-04-29

作者简介：

王 铭(1977-)，女，通信作者，硕士，讲师，主要从事电力系统继电保护新原理、新技术方面的研究；E-mail:wmzuoye@126.com

王宏伟 (1978-)，女，硕士，高级工程师，从事继电保护运行维护工作；

赵义明 (1961-)，男，硕士，教授，从事电力系统仿真及软件研究。