

采用形态学峰谷检测的谐振接地系统故障选线方法

束洪春¹, 黄海燕¹, 田鑫萃¹, 董俊², 黄然³

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 云南省昆明市 650500;

2. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江省哈尔滨市 150001;

3. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南省昆明市 650217)

摘要: 谐振接地系统发生单相接地故障时暂态量十分丰富。文中对各线路发生故障后 1/4 周期零序电流的短窗数据进行小波变换, 剔除工频所在频带, 按能量和最大的原则选取特征频带, 并对特征频带下重构的小波系数进行形态学峰谷检测。故障线路零序电流首波头峰谷形态与各线路零序电流首波头整体的峰谷形态相反, 据此构成故障选线判据。仿真分析和实录数据验证均表明所提方法选线准确、可靠性高。

关键词: 谐振接地系统; 故障选线; 暂态分量; 峰谷检测; 数学形态学; 特征频带

0 引言

谐振接地系统故障选线较为困难, 国内外均展开了大量研究。在实际应用中因单相接地故障发生概率较高, 并且发生单相接地故障时其稳态电流幅值较小、故障点电弧不稳定, 基于稳态量的选线方法效果欠佳^[1-4]; 配电网单相接地故障的故障边界复杂, 架空线路和电缆线路之间电气特性差异较大, 用单一统计模型描述与工程实际偏差较大; 小故障角接地时, 因电流衰减直流分量的存在, 可能引起电流互感器(TA)饱和, 导致二次电流失真; 在实际运行中, 因树障、架空线路坠地引起的高阻故障使得选线漏选、误选时有发生; 配电网线路较短、诸多时变因素导致干扰信号较多, 将行波检测法运用于配电网选线不易捕捉行波波头。诸多因素致使谐振接地系统故障检测和选线较为困难。

配电网单相接地故障暂态量丰富, 且暂态量的获取对采样频率要求不高。目前, 常用的基于暂态量配电网故障选线方法主要有相关分析法^[5-6]、暂态能量法^[7-9]、S 变换^[10]、小波极性法^[11-13]等, 受诸多因素的影响, 现有选线方法在实际工程应用上其可靠性和准确性仍不满足工程需求, 需做大量研究和实践。

零序电流故障信息丰富, 具有明显的故障选线优势^[14]。在分析整体健全线路与故障线路的零序

电流首波头峰-谷突变方向相反的基础上, 指出故障线路数学形态学峰谷特征与各线路整体峰谷特征相反。根据如果整体线路首波头突变为波谷(峰)则故障线路首波头突变必为波峰(谷), 提出基于特征频带下零序电流数学形态学峰谷检测的故障选线方法。

1 小电流接地故障暂态特征分析

如图(1)所示, 谐振接地配电系统中线路 n 发生单相接地故障。实际配电网中线路电容容抗远大于零序阻抗, 零序阻抗可忽略不计^[15], 健全线路检测到的零序电流为该线路对地电容电流, 方向从母线流向线路末端; 故障线路检测到的零序电流为所有健全线路与检测点至母线间线路对地电容电流之和, 方向从故障点流向母线。健全线路和故障线路检测到的零序电流方向相反^[16]。暂态接地电流如式(1)所示:

$$i_d = i_C + i_L = (I_{Cm} - I_{Lm}) \cos(\omega t + \varphi) + I_{Cm} \left[\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin \omega t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right] e^{-\frac{t}{\tau_C}} + I_{Lm} \cos \varphi e^{-\frac{t}{\tau_L}} \quad (1)$$

式中: i_C 为暂态电容电流; i_L 为暂态电感电流; I_{Cm} 为电容电流幅值; I_{Lm} 为电感电流幅值; ω 为工频角频率; ω_f 为暂态自由振荡分量的角频率; τ_C 为电容回路时间常数; τ_L 为电感回路时间常数^[17]。

可见, 健全线路与故障线路零序电流起始阶段整体突变方向相反、幅值相差较大。若故障线路零序电流首波头整体突变方向向上, 可视为数学形态

收稿日期: 2018-05-06; 修回日期: 2018-08-14。

上网日期: 2018-11-29。

国家自然科学基金资助项目(51667010)。

学中的峰,则健全线路零序电流首波头整体突变方向必然向下,可视为数学形态学中的谷。反之,故障线路零序电流为谷时,健全线路零序电流必然为峰。该峰-谷特性在故障特征集中的特征频带尤为突出。基于此,运用数学形态学峰谷检测,识别特征频带下各线路零序电流起始阶段的峰谷差异性,实现故障选线。

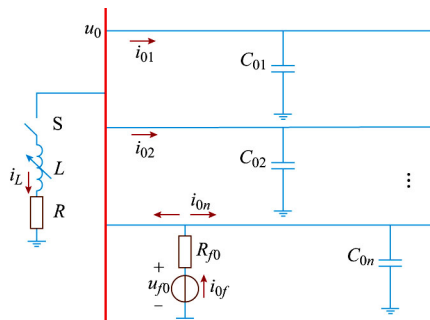


图1 单相接地故障零序网络简化图
Fig.1 Simplified equivalent circuit of zero sequence network with single-phase grounding fault

2 零序电流形态学峰谷检测与选线判据

2.1 零序电流特征频带的选取

TA 饱和对故障前后 $T/4$ (T 为周期) 的波形影响较小,TA 二次电流图见附录 A 图 A1。选取故障前后 $T/4$ 的零序电流数据进行分析,以降低电流传变失真对选线结果的影响。故障的初始阶段,暂态接地电流的主要特征反映在暂态电容电流中,而暂态电容电流的主要特征集中于能量较大的频带,提取故障特征最为明显的频带以提高故障选线裕度。运用小波分解对故障前后 $T/4$ 的零序电流数据进行处理,依据能量和最大原则确定零序电流的特征频带。

综合考虑时频两域内进行分析的需要,运用多种小波对各线路零序电流进行仿真,证明使用 db4 小波效果较为理想。此外,选线判据灵敏度会因小波分解层数过多而降低;因小波分解层数过少而引入干扰,无法保证选线可靠性。因此,对故障后 $T/4$ 各线路零序电流做 db4 小波 6 层分解。

正交小波变换,可直接由其重构小波系数的平方得到各尺度下对应的能量,信号 $x_i(n)$ 在尺度 j 下的能量和为:

$$E_{ij} = \sum_{k=1}^n D_j^2(k) \quad (2)$$

式中: $D_j(k)$ 为信号小波重构系数; $k=1, 2, \dots, n$, n 为采样点数。

所有信号在尺度 j 的总能量 E_j 为:

$$E_j = \sum_{i=1}^h E_{ij} \quad (3)$$

式中: h 为信号数。

剔除工频频带,暂态电容电流的主要特征集中于能量较大的频带。尽管各条线路的暂态电流能量集中的频率可能不一致,即各条出线的特征频率虽然不一致,但由于故障线路的暂态能量起着主导作用,所以各线路在各个频率点处能量和最大值对应的频率与故障线路能量最集中的频率一致,这一频率的零序电流故障能量特征最明显。按照能量和最大原则选择特征频带,避免因信号频带能量较小,导致测量和计算误差大而错误选线。

2.2 零序电流形态学峰谷检测

中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障时,存在一个明显的暂态过程,其暂态信息属于突变量。形态学算子的突变量检测实际上是一种峰谷检测。形态学中的开运算是信号的一种非扩张性运算,可使目标信号轮廓光滑,去掉毛刺以抑制信号中的峰值噪声;闭运算是一种扩张性运算,可填平沟谷、裂缝,以滤除信号中的低谷噪声。序列 $f(n)$ 关于 $g(n)$ 的开运算和闭运算如式(4)和式(5)所示。

$$f(n) \circ g(n) = f(n) \ominus g(n) \oplus g(n) \quad (4)$$

$$f(n) \cdot g(n) = f(n) \oplus g(n) \ominus g(n) \quad (5)$$

式中: \circ 表示开运算; \cdot 表示闭运算; \oplus 表示膨胀运算; \ominus 表示腐蚀运算; $f(n)$ 为采样得到的一维多值待处理信号,其定义域为 $D_f = \{0, 1, \dots, N\}$; $g(n)$ 为一维结构元素序列,其定义域为 $D_g = \{0, 1, \dots, P\}$,其中 P 和 N 都为整数, $N \geq P$ 。

因此,利用原始信号减去其做过开运算的结果,便可以得到峰值点出现的标记点,即 Top-Hat 算子 O_{th} ,如式(6)所示;利用原始信号减去其做过闭运算的结果,可以得到在谷值点处的标记点,即 Bottom-Hat 算子 O_{bh} ,如式(7)所示。

$$O_{th} = f(n) - (f(n) \circ g(n)) \quad (6)$$

$$O_{bh} = f(n) - (f(n) \cdot g(n)) \quad (7)$$

数学形态学运算中,结构元素的形状和大小对信号处理结果有较大影响。结合电力系统的信号特点以及简化程序资源的需要,选取直线形结构元素,它与水平方向成 0° ,进行噪声消除时既能保持信号的形状,又能较大幅度地消除毛刺形状的噪声。

对特征频带下的零序电流进行形态学峰谷检测,应用数学形态学 Top-Hat 算子及 Bottom-Hat 算子检测各线路零序电流特征频带的波峰和波谷,以更好地展现峰谷特性。此处的目标信号 $f(n)$ 为特征频带下各线路的零序电流 $i(t)$,为了同时检测零序电流的峰值点和谷值点,结合上述两个算子,定

义 $D_e(t)$ 为峰谷检测器, 如式(8)所示:

$$D_e(t) = O_{thi} + O_{bhi} = 2i(t) - (i(t) \circ g(n)) - (i(t) \cdot g(n)) \quad (8)$$

式中: 算子 O_{thi} 定义为特征频带下零序电流的波峰点数据; 算子 O_{bhi} 定义为特征频带下零序电流的波谷点数据。一般突变明显点不是孤立点而是相邻的两个或三个点, 经过多次仿真验证, 此处取长度为 3 的结构元素时所展现的峰谷特性最佳。

运用峰谷检测器 $D_e(t)$, 确定故障后暂态信息突变明显点的突变方向和强度。故障后, 通常故障线路零序电流的突变强度最大, 由于现场环境复杂, 故障线路某些突变点突变强度可能比健全线路的更小, 但故障线路突变趋势与健全线路突变趋势必然相反。因此, 利用形态学峰谷检测, 根据特征频带下故障线路首波头峰谷形态与各线路零序电流首波头的整体峰谷形态相反, 所构成的判据充分体现了单相接地故障的暂态过程, 与实际相符。

2.3 选线判据

取故障后 $T/4$ 短窗数据, 通过形态峰谷检测实现配电网故障选线。利用重构后小波系数的峰谷特征进行故障选线, 无需对故障初始时刻的电流极性进行准确的甄别。

定义:

$$S = \sum_{i=1}^{n_L} d_i \quad n_L \geq 3, n_L \in \mathbf{N} \quad (9)$$

式中: S 为各条线路特征频带下零序电流首波头的整体突变方向, 检测第 i 条线路首波头为峰时 d_i 为 1, 检测为谷时 d_i 为 -1; n_L 为线路数。

检测结果有如下几种情况。

1) 当 $d_i S < 0$ 时, 表示第 i 条线路对应首波头峰谷形态和整体线路峰谷形态相反, 判定第 i 条线路为故障线路。

2) 当 $d_i S > 0$ 时, 表示第 i 条线路对应首波头峰谷形态和整体线路峰谷形态相同, 判定第 i 条线路为健全线路。

3) 当 $d_i (i=1, 2, \dots, n_L)$ 均满足 $d_i S > 0$ 时, 表示所有出线首波头峰谷形态相同, 判定为母线接地故障。

具体选线流程如图 2 所示。其中, 启动算法采用突变能量 $E(k)$ 结合零序电压有效值综合判断, 保证高阻接地故障、电弧性接地故障下选线装置的灵敏可靠启动。突变能量计算如式(10):

$$E(k) = \sum_{n=k-K+1}^k (\Delta u_0(n))^2 \quad (10)$$

式中: $\Delta u_0(n)$ 为电压突变量, $\Delta u_0(n) = u_0(n) -$

$u_0(n-1)$, n 为当前采样点; K 为一定时窗内的采样点数。

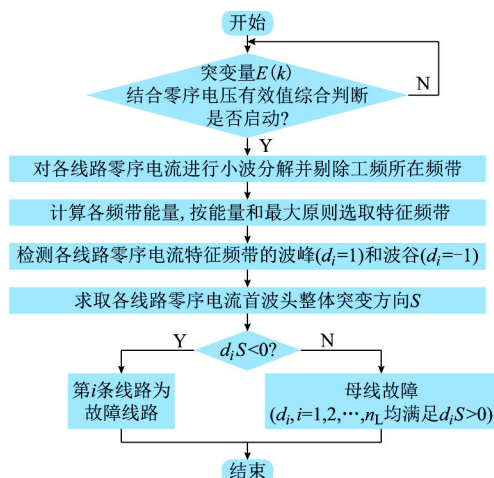


图 2 故障选线算法流程图

Fig.2 Flow chart of fault line detection algorithm

3 仿真分析

3.1 仿真模型

构建由 6 条线路组成的 35 kV 中性点经消弧线圈接地的配电网系统, 见附录 A 图 A2。系统中 T 为 110 kV/35 kV 变比的主变压器, 联结组别为 YN/d11, 线路模型采用架空、缆-线混合、电缆三种馈出线路, 共 6 条。中国配电网主变压器配电电压侧一般为无中性点的三角形联结, 通常增设接地变压器以提供消弧线圈接地的中性点, T_z 是供补偿接地电网接地专用的 Z 型变压器。

3.2 仿真算例分析

线路 L_1 距离母线 5 km 处发生单相接地 (AG) 故障, 其中故障时刻为 0.23 s, 故障过渡电阻为 20 Ω , 取 10 kHz 的采样频率记录故障波形, 采集的不失真的信号频率范围为 0~5 kHz。各线路的零序暂态电流见附录 A 图 A3。

从故障初瞬后选取 5 ms 的零序暂态电流数据运用 db4 小波 6 层分解, 利用重构后的小波系数计算各个频带下的能量和, 除去工频频带, 根据能量和最大的原则选择特征频带, 选取能量和最大频带 E_4 (312.5~625 Hz) 作为特征频带。线路在各尺度下能量和见附录 A 图 A4。

利用式(8)和式(9)得到特征频带下各线路零序电流峰谷检测结果, 线路 L_1 至 L_6 的零序电流峰谷形态见附录 A 图 A5。以 S 表征各条线路特征频带下零序电流首波头的整体突变方向, 当 $d_i S < 0$, 其中 $i=1, 2, \dots, 6$, 表示第 i 条线路对应的首波头峰谷形态和整体线路的首波头峰谷形态相反, 判定第 i

条线路为故障线路。所构建的仿真模型中有 $d_1S < 0$, 因此, 判定模型中线路 L_1 为故障线路。

3.3 适用性分析

为验证所提选线方法的适用性, 分别改变故障线路类型、故障过渡电阻大小、故障初相角 θ 、故障距离, 分为以下几种故障条件。

故障条件 1: 改变故障线路类型, 当缆-线混合线路 L_4 、架空线路 L_5 、电缆线路 L_6 分别发生单相接地故障时, 故障初相角为 60° , 过渡电阻为 $50\ \Omega$, 故障位置距离母线 5 km 。

故障条件 2: 以架空线路 1 发生单相接地故障为例, 故障初相角为 60° , 故障位置距离母线 5 km , 仅改变过渡电阻。

故障条件 3: 以架空线路 5 单相接地故障为例, 故障位置距离母线 5 km , 过渡电阻为 $50\ \Omega$, 仅改变故障初相角。

故障条件 4: 以缆-线混合线 4 发生单相接地故障为例, 故障初相角为 60° , 过渡电阻为 $50\ \Omega$, 仅改变故障距离。

各种故障条件下, 选线结果如下表 1 所示, 利用所提的选线方法, 在不同故障情况下均能准确识别出故障线路。

表 1 故障线路类型变化时选线结果
Table 1 Selection results with different fault types

故障条件	d_1S	d_2S	d_3S	d_4S	d_5S	d_6S	选线结果
L_4 故障	>0	>0	>0	<0	>0	>0	L_4
1 L_5 故障	>0	>0	>0	>0	<0	>0	L_5
L_6 故障	>0	>0	>0	>0	>0	<0	L_6
0.01 Ω	<0	>0	>0	>0	>0	>0	L_1
2 200 Ω	<0	>0	>0	>0	>0	>0	L_1
1000 Ω	<0	>0	>0	>0	>0	>0	L_1
0°	>0	>0	>0	>0	<0	>0	L_5
3 60°	>0	>0	>0	>0	<0	>0	L_5
90°	>0	>0	>0	>0	<0	>0	L_5
2 km	>0	>0	>0	<0	>0	>0	L_4
4 5 km	>0	>0	>0	<0	>0	>0	L_4
15 km	>0	>0	>0	<0	>0	>0	L_4

4 现场实录数据验证

4.1 不同故障性质下的实录数据验证

分别取 3 个变电站, 2010 年 2 月 22 日高阻接地故障、2011 年 5 月 11 日金属性接地故障、2010 年 2 月 27 日弧光接地故障的录波数据加以检验。运用多种小波对故障后 5 ms 的暂态零序电流数据进行分解。实测数据中干扰较多, 为了减小频谱的泄漏和混叠, 须保证小波函数具有较好的频域特性。对多个变电站的实测数据运用多种小波进行分解,

综合考虑小波函数的时域特性, 采用 db10 小波进行 6 层分解效果最佳。此处仅展示高阻接地故障时各线路暂态零序电流 i_{0i} 以及特征频带下零序电流峰谷检测结果, 如图 3 所示。金属性接地故障和弧光接地故障下各线路的暂态零序电流见附录 A 图 A6、图 A7。三种故障选线结果见附录 A 表 A1。

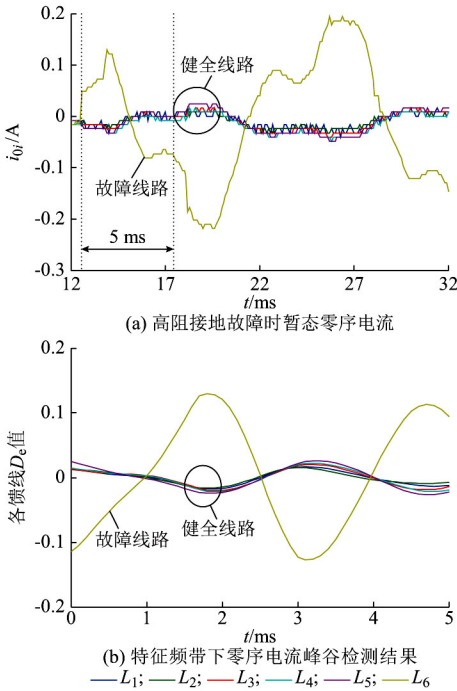


图 3 高阻接地时零序电流及峰谷检测结果
Fig.3 Zero sequence current and peak-valley detection result with high-impedance grounding fault

4.2 小波模极大值极性法对比分析

配电网中树障、避雷器不完全击穿、导线跌落于草地或水塘等高阻接地故障时有发生, 系统长时间带高阻接地故障运行可能扩大故障范围和故障性质。同时, 高阻接地故障电气量特征不明显, 检测更加困难。因此, 以高阻接地故障为例, 对比分析小波模极大值法与所提形态学峰谷检测法。将实测故障数据运用于小波模极大值极性选线方法, 此处同样取 5 ms 的零序电流, 各线路原始零序电流及小波变换模极大值如图 4 所示。

小波系数模极大值极性法能准确捕捉到零序电流的奇异点, 零序电流波头与模极大值基本呈现一一对应关系, 但选线保护运行环境电磁干扰严重, 要求故障选线装置必须有很好的防止、消除各种干扰的措施, 如图 4 所示的模极大值图, 小波系数极大值极性法需排除由于干扰引起的突变点, 准确判断故障初始波头, 否则可能引起误判。形态学峰谷检测法检测结果如图 3 所示, 选取特征频带用以分析, 故障特征突出; 检测零序电流整体峰谷形态, 无须准确甄

别故障初瞬时刻电流的极性,选线准确可靠。

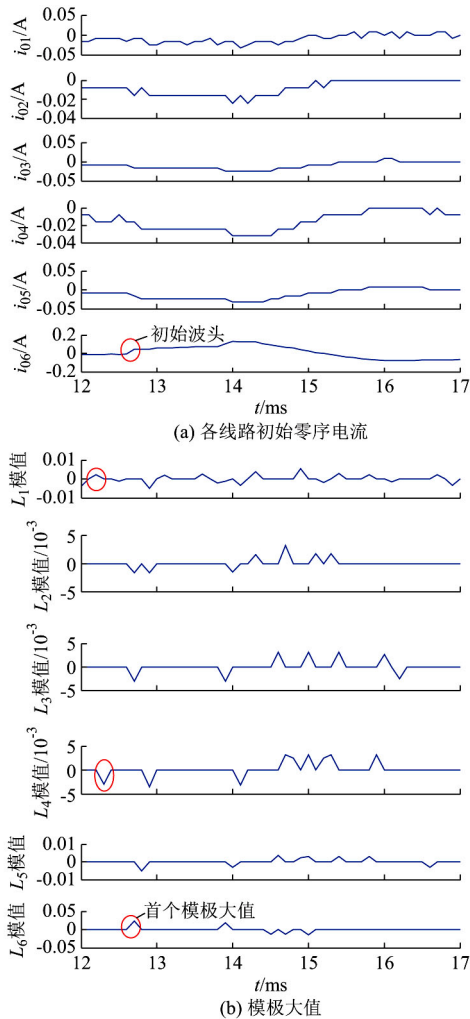


图4 原始零序电流及其小波变换模极大值
Fig.4 Original zero sequence current and its modulus maxima of wavelet transform

5 结语

利用形态学峰谷特征进行故障选线无须准确甄别故障初始电流极性,能有效提高选线准确性。对信号进行预处理,排除了工频量和其他非特征频带,降低了TA电流传变失真对选线准确性的影响。放大了故障特征,能有效提高选线可靠性,尤其对高阻及弧光接地故障有较强的适应性。选线方法原理简单,易于实现,对硬件要求不高,节约成本。当发生小角度故障时,暂态信息不明显,所提方法的可靠性不高。后续研究将综合考虑大小故障角的情况,实现其可靠选线。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

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 Yongduan, FENG Zuren, XU Bingyin, 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] 束洪春,段锐敏,朱梦梦,等.基于零序电流小波变换系数均方根值的故障选线 ANN 方法[J].电力科学与技术学报,2013,28(1):17-24.
SHU Hongchun, DUAN Ruimin, ZHU Mengmeng, et al. An ANN method of faulted feeder detection based on continuous wavelet transform coefficients' RMS values of zero sequence current[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(1): 17-24.
- [3] TANG J R, YIN X G, WEN M H, et al. Fault location in neutral non-effectively grounded distribution systems using phase current and line-to-line voltage [J]. Electric Power Components and Systems, 2014, 42(13): 1371-1385.
- [4] 刘健,张小庆,申巍,等.中性点非有效接地配电网的单相接地位能力测试技术[J].电力系统自动化,2018,42(1):138-143. DOI:10.7500/AEPS20170508012.
LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, SHEN Wei, et al. Performance testing of single phase to earth fault location for distribution network with neutral point non-effectively grounded systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 138-143. DOI: 10.7500/AEPS20170508012.
- [5] 汤涛,黄纯,江亚群,等.基于高低频段暂态信号相关分析的谐振接地故障选线方法[J].电力系统自动化,2016,40(16):105-111. DOI:10.7500/AEPS20151125013.
TANG Tao, HUANG Chun, JIANG Yaqun, et al. Fault line selection method in resonant earthed system based on transient signal correlation analysis under high and low frequencies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 105-111. DOI: 10.7500/AEPS20151125013.
- [6] 曲铁龙,谭伟璞,杨以涵.基于形态滤波的谐振接地系统故障选线新方法[J].电力系统自动化,2008,32(12):73-77.
QU Yilong, TAN Weipu, YANG Yihan. A new transient method for earth fault line selection in resonant grounded power system based on morphological filtering [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12): 73-77.
- [7] 张艳霞,王清亮.应用故障暂态特性实现配电网故障选线的新方法[J].电力系统自动化,2009,33(16):76-80.
ZHANG Yanxia, WANG Qingliang. New method for single phase to ground fault feeder selection based on analysis of fault transient characteristics [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(16): 76-80.
- [8] 周登登,刘志刚,胡非,等.基于小波去噪和暂态能量分组比较的小电流选线接地新方法[J].电力系统保护与控制,2010,38(7):22-28.
ZHOU Dengdeng, LIU Zhigang, HU Fei, et al. A new method for fault line selection based on wavelet de-noising and transient current energy grouping comparison in ineffective grounding system [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 22-28.

- [9] 束洪春,彭仕欣.配网电缆-线混合线路故障选线相对能量法[J].电力自动化设备,2009,29(11):1-5.
SHU Hongchun, PENG Shixin. Faulty line detection by relative energy method for hybrid transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(11): 1-5.
- [10] 张钧,何正友,贾勇.基于S变换的故障选线新方法[J].中国电机工程学报,2011,31(10):109-155.
ZHANG Jun, HE Zhengyou, JIA Yong. Fault line identification approach based on S-transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 109-155.
- [11] 董新洲,毕见广.配电线路暂态行波的分析和接地选线研究[J].中国电机工程学报,2005,25(4):3-8.
DONG Xinzhou, BI Jianguang. Analysis on transient traveling wave and study on fault line selection for distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 3-8.
- [12] 黄景光,刘会家,胡汉梅,等.行波小波系数极大值极性法接地故障选线研究[J].高电压技术,2006,32(8):100-104.
HUANG Jingguang, LIU Huijia, HU Hanmei, et al. Distribution grid earth fault line detection study by traveling wave wavelets coefficient maximum polarities [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(8): 100-104.
- [13] 刘渝根,王建南,马晋佩,等.结合小波包变换和5次谐波法的谐振接地系统综合故障选线方法[J].高电压技术,2015,41(5):1519-1525.
LIU Yugen, WANG Jiannan, MA Jinpei, et al. Comprehensive fault line selection method for resonant grounded system combining wavelet packet transform with fifth harmonic method[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1519-1525.
- [14] 要焕年,曹梅月.电力系统谐振接地[M].北京:中国电力出版社,2009.
YAO Huannian, CAO Meiyue. Resonant grounding in power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [15] 唐金锐,杨晨,程利军.配电网馈线零序电流随补偿度动态调节的变化特性分析[J].电力系统自动化,2017,41(13):125-132.DOI:10.7500/AEPS20161114004.
TANG Jinrui, YANG Chen, CHENG Lijun. Analysis on zero-sequence current variation characteristic for feeders of distribution network at different residual current compensation factors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 125-132. DOI: 10.7500/AEPS20161114004.
- [16] 张林利,徐丙垠,薛永端,等.基于线电压和零模电流的小电流接地故障暂态定位方法[J].中国电机工程学报,2012,32(13):110-115.
ZHANG Linli, XU Bingyin, XUE Yongduan, et al. Transient fault locating method based on line voltage and zero-mode current in non-solidly earthed network[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 110-115.
- [17] 束洪春,刘娟,司大军,等.自适应消弧线圈接地系统故障选线实用新方法[J].电力系统自动化,2005,29(13):64-68.
SHU Hongchun, LIU Juan, SI Dajun, et al. New adaptive method for fault line selection in non-solidly grounded system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(13): 64-68.

束洪春(1961—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统继电保护与故障测距、故障录波、数字信号处理。E-mail: kmshc@sina.com.cn

黄海燕(1993—),女,硕士研究生,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail: hhy_mail@yeah.net

田鑫萃(1985—),女,通信作者,博士,讲师,主要研究方向:电力系统故障检测、直流输电线路保护控制、故障测距。E-mail: 1105479731@qq.com

(编辑 代长振)

Fault Line Selection in Resonant Earthed System Based on Morphological Peak-Valley Detection

SHU Hongchun¹, HUANG Haiyan¹, TIAN Xincui¹, DONG Jun², HUANG Ran³

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

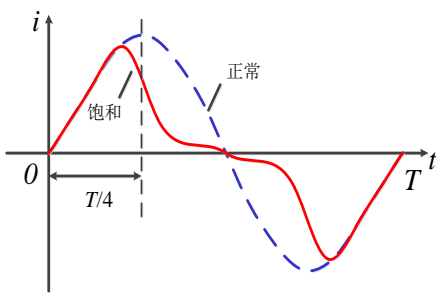
3. Power Science Research Institute of Yunnan Power Grid Co. Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: Transient electrical quantity information is very abundant when single-phase grounding fault occurs in resonant earthed system. The short window data of 1/4 period of zero sequence current fault of each line are transformed by wavelet transform. The frequency band of power frequency is eliminated and the feature frequency band is selected according to the principle of maximum energy sum. The reconstructed wavelet coefficients under the feature frequency band are checked by morphological peak-valley detection. The peak-valley characteristic of the fault feeder is opposite to that of the total feeders, which is used as the fault line selection criterion. The simulation analysis and practical verification demonstrate the feasibility and effectivity of this method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51667010).

Key words: resonant earthed system; fault line selection; transient component; peak-valley detection; mathematical morphology; feature band

附录 A



图A1 TA二次电流
Fig.A1 Secondary current of TA

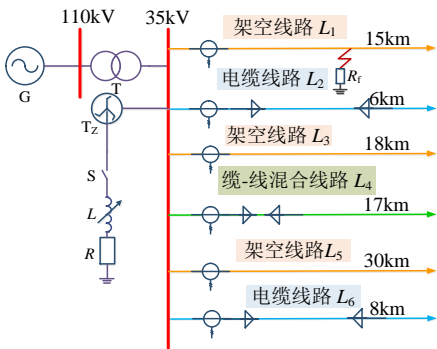


图 A2 谐振接地系统图
Fig.A2 Radial resonant earthed system

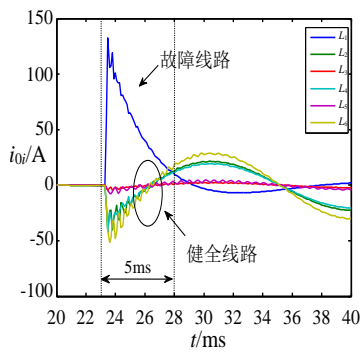


图 A3 暂态零序电流
Fig.A3 Transient component of zero sequence current

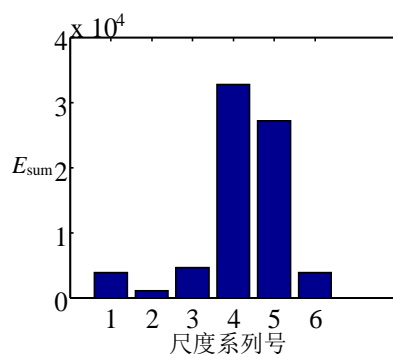
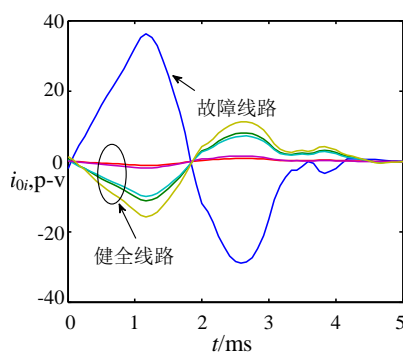


图 A4 各尺度下的能量和

Fig.A4 Total energy distribution at each segment



图A5 特征频带下零序电流峰谷检测结果

Fig.A5 Peak-valley detection results of zero A6 sequence current at characteristic frequency

注：上图纵坐标 $i_{0i}, \text{p-v}$ ，表示第 i 条线路零序电流的峰谷（peak-valley, p-v）形态

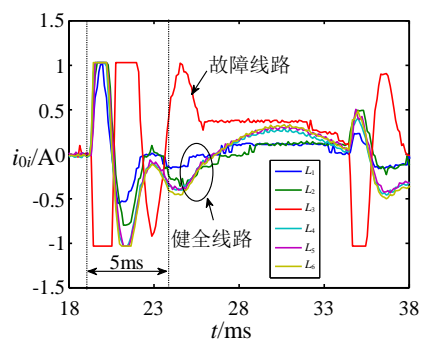


图 A6 金属性接地故障时暂态零序电流

Fig.A6 Transient component of zero sequence current with metallic grounding fault

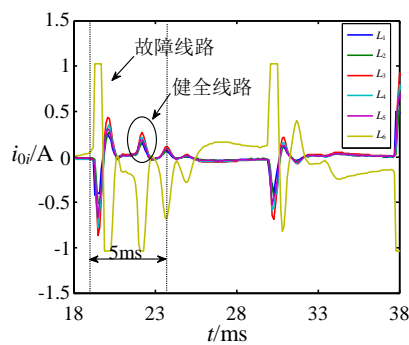


图 A7 弧光接地故障时各线路的暂态零序电流

Fig.A7 Transient component of zero sequence current with arc grounding fault

表 A1 不同故障性质下的选线结果

Table A1 Selection results with metallic grounding fault

	高阻接地故障						金属性接地故障						弧光接地故障					
	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
首个峰谷	谷(-)	谷(-)	谷(-)	谷(-)	谷(-)	峰(+)	峰(+)	峰(+)	谷(-)	峰(+)	峰(+)	峰(+)	谷(-)	谷(-)	谷(-)	谷(-)	谷(-)	峰(+)
d_i	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1
$d_i \times S$	>0	>0	>0	>0	>0	<0	>0	>0	<0	>0	>0	>0	>0	>0	>0	>0	>0	<0
选线结果	健全线路	健全线路	健全线路	健全线路	健全线路	故障线路	健全线路	健全线路	故障线路	健全线路	健全线路	健全线路	健全线路	健全线路	健全线路	健全线路	健全线路	故障线路