

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210623

利用暂态电流 Hausdorff 距离的谐振配电网故障选线方案

邵文权¹, 程畅¹, 卫晓辉², 张志华³

(1. 西安工程大学电子信息学院, 陕西 西安 710048; 2. 国网陕西省电力公司西安供电公司, 陕西 西安 710032;
3. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 陕西 西安 710110)

摘要: 针对谐振接地配电网系统高阻单相接地故障时无法可靠准确进行故障选线的问题, 提出一种利用暂态高频电流波形差异的故障选线方案。通过分析谐振接地系统单相接地故障时的零序电流特征, 发现健全线路与故障线路的暂态电流 5、7 次分量的波形依旧存在明显差异。利用 Hausdorff 距离算法比较线路间的暂态电流主要高频分量的波形差异进行故障选线。对各线路的暂态电流分量进行归一化处理, 构造了暂态电流分量 Hausdorff 距离参数的故障选线判据, 并设计了故障选线的实现方案。利用 Matlab 仿真以及试验录波进行计算分析, 验证了所提出选线方案的正确性和有效性, 尤其是对于配电网高阻单相接地故障具有良好的适用性。

关键词: 谐振接地系统; 5、7 次暂态电流分量; 归一化处理; Hausdorff 距离; 故障选线

Fault line selection scheme using the Hausdorff distance of transient current in resonant distribution networks

SHAO Wenquan¹, CHENG Chang¹, WEI Xiaohui², ZHANG Zhihua³

(1. School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China; 2. Xi'an Electric Power Supply Company, State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710032, China;
3. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710110, China)

Abstract: Since fault line selection cannot be performed reliably and accurately when a high-resistance single-phase grounding fault occurs in a resonant grounded distribution network system, a scheme based on the difference of transient high-frequency current waveform is proposed. Analyzing the zero-sequence current characteristics of a single-phase grounding fault system in a resonant grounding system, there are still significant differences in the waveforms of the fifth and seventh components of the transient current between the sound line and the fault line. The Hausdorff distance algorithm is used to compare the waveform differences of the main high-frequency components of the transient current between lines for fault line selection. Through the normalization of the transient current component of each line, the fault line selection criterion of the Hausdorff distance parameter of that component is constructed, and an implementation scheme is designed. The correctness and effectiveness of the proposed line selection scheme are verified by Matlab simulation and test recording, especially for a high-resistance single-phase grounding fault in a distribution network.

This work is supported by the Key Research and Development Project of Shaanxi Province (No. 2020GY-169).

Key words: resonant grounded system; fifth and seventh components of the transient current; normalization; Hausdorff distance; fault line selection

0 引言

单相接地故障在配电网中发生的概率最高, 若故障长期持续存在且没有及时进行可靠熄弧, 可能会引发相间故障, 甚至导致电缆沟道着火等更为

严重事故^[1]。因此, 为了避免故障影响进一步扩大, 必须尽快选出故障线路并及时处理故障^[2-3]。

目前常用的选线方法分为两大类, 即外加扰动法和故障特征量选线法^[4]。外加扰动法包括 S 信号注入法^[5]、并联中电阻^[6]等, 通过向系统注入特定信号或短时改变系统运行方式来增强故障信息, 但这类方法一般需要依赖额外的信号注入装置或扰动

基金项目: 陕西省重点研发计划项目资助(2020GY-169)

系统，增加了系统的复杂性。第二类方法采用故障本身的特征量进行故障判别，包括稳态法和暂态法。稳态法包括零序电流比幅法^[7]、比相法^[8]、负序电流法^[9]等；暂态法包括首半波^[10]、暂态特征频带法^[11]、衰减直流分量法^[12]等。在谐振接地系统消弧线圈对工频电容电流的深度补偿作用下，稳态电流方向、幅值等故障特征已经无法满足有效选线的要求，尤其在断线等过渡电阻高达数千欧姆的高阻故障情况下，进一步加剧了故障识别的难度^[13]。然而，由于谐波分量受补偿作用影响小，暂态电流依然具有较高的残余成分，因此利用高频次谐波分量将有望提高谐振接地系统故障选线的性能。现有文献利用故障暂态谐波分量，结合小波包分解系数^[14]、导纳不对称度参数^[15]、小波重构能量^[16]等方法进行了相应的研究，为开展利用高频次谐波电流进行故障选线做了大量的研究工作。

鉴于实际的谐振接地配电网发生高阻单相接地故障时，高频次暂态电流分量的故障特征更加微弱，常规的暂态量方法对于高阻接地故障存在灵敏度不足的实际问题，有必要探究更能灵敏反应故障线路和健全线路的暂态特征的选线方案。而 Hausdorff 距离算法对于图像间微弱信号的差异判别具有显著优势^[17]，因此本文利用 Hausdorff 距离算法的优异性能，对谐振接地配电网单相接地故障时线路之间微弱的电流波形差异进行提取和识别，构造相应的故障选线判别方案。最后通过仿真以及现场试验录波数据验证，该方法选线准确率高，对于高阻单相接地故障表现出较好的性能。

1 选线原理

1.1 故障特征分析

在谐振接地配电网中，消弧线圈一般按照工频零序电流的 1.05~1.1 倍进行设计，即工频残余分量为全系统对地电容电流的 5%~10%。以消弧线圈过补偿度为 10% 时为例，图 1 给出了消弧线圈补偿后各频次残余电流分量的关系，故障电流工频分量大部分由消弧线圈补偿，而对于高频次电流分量消弧线圈的补偿能力随频率增大逐渐减小。但由于频次越高，高频电流分量含量越低，导致降低计算的灵敏性，所以暂态高频电流的应用一般以 5、7 次分量为主^[18]。

以文献[19]中的谐振接地配电网仿真模型为例，该谐振接地系统在 0.1 s 时发生过渡电阻为 20Ω 的单相接地故障。该谐振接地系统单相接地故障残流如图 2 所示。从图 2(a)所示的各线路零序电流可以看出，暂态阶段的健全线路的电流流向为母线流

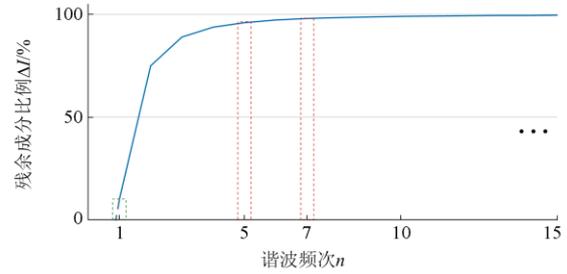


图 1 故障暂态各频次残余分量的比例

Fig. 1 Proportion of each fault transient frequency residual component

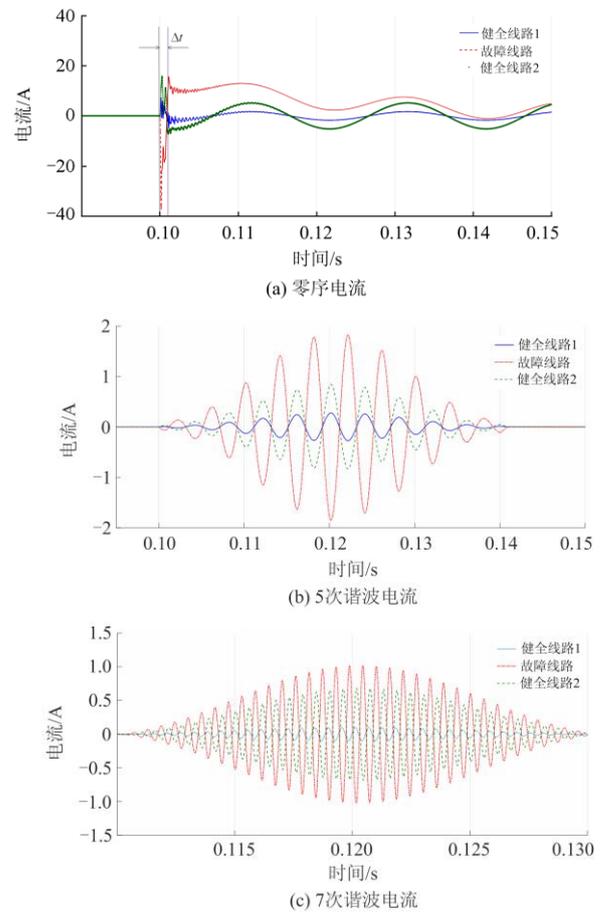


图 2 谐振接地系统单相接地故障残流

Fig. 2 Residual current for single-phase earth fault in resonant earth system

向线路，故障线路的电流流向为线路流向母线，两者方向相反。在过补偿作用下，暂态阶段仅持续较短的时间，此后各线路零序电流均为母线流向线路，相位相同，故障特征减弱，此时利用线路间的相位特征进行故障判别时，误判的可能性增大。

图 2(b)、2(c)为同一故障条件下系统中的 5 次和 7 次故障电流分量，由于受补偿作用影响微弱，

故障线路电流流向始终为线路流向母线, 与健全线路电流相位方向相反。因此, 本文基于 5 次和 7 次故障分量电流的方向差异有效地提高高阻单相接地故障时的选线灵敏度和可靠性。

图 3 是经过渡电阻为 $5\ 000\ \Omega$ 时高阻单相接地故障时系统中残余的 5 次电流分量, 依然保留了故障相位特性, 但在高阻的影响下, 故障线路与健全线路电流的幅值差异微弱, 特别当故障线路为系统对地电容电流小的线路时, 此时可能存在对地电容电流较大的健全线路与故障线路的暂态电流幅值特征相差甚微。对于高阻接地故障, 采用暂态电流的暂态能量法可能存在故障线路与健全线路暂态能量差异小的问题, 导致故障选线的灵敏度不足。

由于谐振接地系统在高阻接地故障时, 暂态电流分量依旧保留了显著的方向差异, 即故障线路和健全线路暂态电流的波形存在较大的不相似度。Hausdorff 距离算法通过数学计算, 比较图像间的不相似程度, 并用相应参数表征, 将不相似度可视化, 适用于比较图像间微弱信号差异的场景^[20]。而故障暂态电流波形作为一种特殊的二维图像, 利用 Hausdorff 距离算法理论上能表征谐振接地配电网高阻接地故障时线路之间微弱的电流波形差异, 进一步提高高阻单相接地故障时故障选线的灵敏度和可靠性。

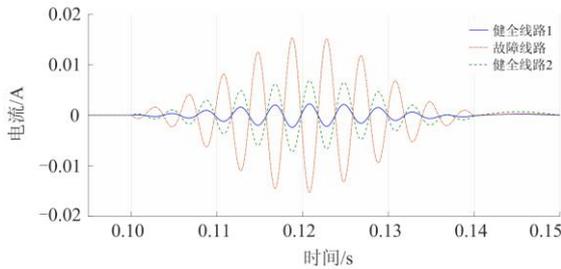


图 3 高阻接地故障时的 5 次谐波电流

Fig. 3 Fifth harmonic current at high resistance ground fault

1.2 Hausdorff 距离算法

目前 Hausdorff 距离(H_D)算法已应用于医学等各种不同的领域^[21], 该算法可以非常灵敏地反映出任意两个图像间的图像差异。下面将结合谐振接地系统, 对 Hausdorff 距离算法的基本原理以及如何利用 H_D 算法计算线路间波形差异度的具体过程作简单介绍。

当同一母线所连接线路发生单相接地故障后, 针对任意两条线路间 5、7 次暂态电流分量的离散采样点构成相应有限点集 A 、 B 。

设点集 $A = \{a_1, \dots, a_i, \dots, a_n\}, i = 1, 2, \dots, n$, $B =$

$\{b_1, \dots, b_j, \dots, b_m\}, j = 1, 2, \dots, m$, 求 A 中的每个点与 B 对应的欧氏距离, 将其记为一个新的点集, 即

$$D_{A-B} = \begin{cases} \min(|a_1 - b_1|, \dots, |a_1 - b_j|, \dots) \\ \min(|a_2 - b_1|, \dots, |a_2 - b_j|, \dots) \\ \vdots \\ \min(|a_n - b_1|, \dots, |a_n - b_j|, \dots) \end{cases} \quad (1)$$

$(i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m)$

同理, B 与 A 的欧氏距离点集为

$$D_{B-A} = \begin{cases} \min(|b_1 - a_1|, \dots, |b_1 - a_i|, \dots) \\ \min(|b_2 - a_1|, \dots, |b_2 - a_i|, \dots) \\ \vdots \\ \min(|b_m - a_1|, \dots, |b_m - a_i|, \dots) \end{cases} \quad (2)$$

$(i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m)$

则 A 到 B 的单向 Hausdorff 距离为

$$H_{A-B} = \max(D_{A-B}) \quad (3)$$

B 到 A 的单向 Hausdorff 距离为

$$H_{B-A} = \max(D_{B-A}) \quad (4)$$

取两个单向距离的较大值为最终的 Hausdorff 距离, 即

$$H_{AB} = \max(H_{A-B}, H_{B-A}) \quad (5)$$

H_D 也被称为极大-极小距离, 相对于点对点的距离, 其更能体现出两个点集间的整体差异。 H_D 值越大, 则表明两个比较对象间的差异越明显, 反之则说明相似度越高。

假设故障后同一母线上 n 条线路的零序电流分别为 $i_{0m} (m = 1, 2, \dots, n)$, 提取第一个 $1/4$ 工频周期下所有线路的 5、7 次暂态电流分量信号, 得到任意两条线路 k 、 p 的 5、7 次电流分量瞬时值数据集, 分别为 $I_{05,k}$ 、 $I_{07,k}$ 与 $I_{05,p}$ 、 $I_{07,p} (p \neq k)$ 。按照上述 H_D 计算方法得到 5 次电流分量 H_D 值为 $H_{D_{k-p}}^{(5)}$; 同理得 7 次计算值为 $H_{D_{k-p}}^{(7)}$ 。综合考虑故障暂态分量的相对关系^[22], 5 次分量通常高于 7 次分量, 因此分别设置权重为 0.6 和 0.4, 最终根据 $H_{D_{k-p}} = 0.6 \times H_{D_{k-p}}^{(5)} + 0.4 \times H_{D_{k-p}}^{(7)}$ 确定线路 k 、 p 的 H_D 值。

1.3 数据的归一化处理

配电网同一条母线上连接线路长度和类型具有一定的差异, 各线路的对地电容电流亦存在差异。若故障后两条健全线路间的暂态电流幅值差异大, 但电流相位一致性高, 直接利用线路的暂态电流分量使得健全线路间的 H_D 值差异大, 导致存在误判的可能, 增加选线的难度。

因此,为了凸显健全线路间暂态电流波形的相似度,减小暂态电流幅值的影响,将各线路的5、7次电流分量分别进行归一化处理,将所有线路的采样数据映射在0到1之间,最大程度上降低突变值对结果的影响,凸显故障线路与健全线路间的相位差异。

以图2(a)为例,将提取出的5次谐波电流进行归一化处理,将所有数据规范在区间[0,1]内。由图4可知,经过处理后,由于健全线路的电流流向相同,导致波形变化趋于一致,与故障线路的相位变化存在明显差异。分别计算归一化前后线路间的 H_D 值并进行对比,以健全线路1为例计算,结果如表1所示。

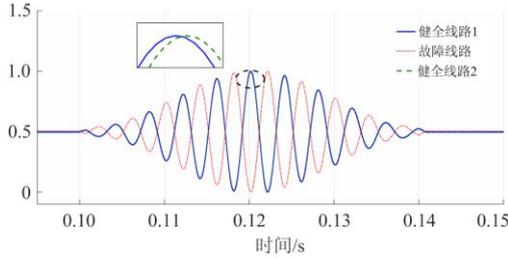


图4 归一化后的故障暂态分量电流

Fig. 4 Normalized fault transient component current

表1 归一化前后 H_D 值的变化

Table 1 Changes of H_D values before and after normalization

	归一化前		归一化后	
	健全线路1	健全线路2	健全线路2	故障线路
H_D 值	7.225 1	21.189 8	0.448 4	20.260 1
比值(故障/健全)	2.92		45.18	

以健全线路1为基准值,分别计算其与健全线路2及故障线路的 H_D 值,并对比归一化前后故障 H_D 与健全 H_D 的比值。由表1可知,归一化前健全线路1与健全线路2的 H_D 值为7.225 1,归一化处理后健全线路1、2间的 H_D 值减小到0.448 4,接近于0,即表明归一化使健全线路1、2的暂态电流波形具有高度相似性;而故障与健全线路1的 H_D 值在归一化处理前后的变化幅度不大。此外,故障与健全线路间的 H_D 值比值由2.92增大至45.18,即表明归一化可进一步凸显健全与故障线路的不相似程度,减小线路类型、长度等因素对健全线路间的相似度的影响,有助于利用 H_D 值对故障线路进行可靠识别。

2 选线判据及实现方案

假设同一母线上 n 条线路的零序电流分别为 i_{0m} ($m=1,2,\dots,n$),当电压超过越限值 U_{0set} (一般取

母线额定电压的15%)后,判定为单相接地故障。分别提取故障电流信号中的5次和7次暂态信息,在同一计算周期内,依次求任意线路间各个暂态电流分量间的 H_D 系数,构造线路 H_D 表,如表2所示。

表2 线路 H_D 值

Table 2 H_D values of line

i	j			
	1	2	...	n
1	0	$H_{D_{1,2}}$...	$H_{D_{1,n}}$
2	$H_{D_{2,1}}$	0	...	$H_{D_{2,n}}$
...	$H_{D_{i,j}}$...
n	$H_{D_{n,1}}$	$H_{D_{n,2}}$...	0

i 、 j 为线路编号,其中 $H_{D_{i-j}} = H_{D_{j-i}}$ ($i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j$)。

记第 j 列中最大值为 $H_{D_{\max-j}}$,所在行为第 i 行,则定义距离相对系数:

$$r_j = \frac{H_{D_{\max-i-j}}}{H_{D_{m-j}}} \quad (i, j, m = 1, 2, \dots, n, i \neq j \neq m) \quad (6)$$

$$\text{第1列: } r_1 = \frac{H_{D_{\max-i-1}}}{H_{D_{m-1}}}$$

$$\text{第2列: } r_2 = \frac{H_{D_{\max-i-2}}}{H_{D_{m-2}}}$$

$$\text{同理得第}n\text{列: } r_n = \frac{H_{D_{\max-i-n}}}{H_{D_{m-(n-1)}}}$$

$$(m = 1, 2, \dots, n, m \neq i)$$

若除第 i 列后所有列中的最大值 $H_{D_{\max-i-j}}$ 与同列其他值 $H_{D_{m-j}}$ ($m \neq i \neq j$)的比值 r_j 均大于等于10(一个数量级),且同时满足第 j 列中最大值均在第 i 行,则表明第 i 条线路与其余线路的 H_D 值存在明显差异,此时将判别第 i 条线路为故障线路。即判据1为

$$r = \begin{cases} r_j \geq 10 \\ r_i < 10 \end{cases} \quad (i \neq j, j = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

当不满足判据1时,将进行下一步,判断是否母线发生故障。母线发生单相接地故障时,各线路电流的流向相同,均由线路流向母线。此时各线路的电流相位相同,波形差异小,各线路间的 H_D 值均处于同一数量级,每两个相邻列中最大值与最小值差的比值将趋于1。因此计算同一列中的最大值 $H_{D_{\max-i-j}}$ 与最小值 $H_{D_{\min-i-j}}$ 的 H_D 值差 $H_{D_{\max-j}}$,将 $H_{D_{\max-j}}$ 中的最大值和最小值的比值记为 r' ,则 r' 可表示所有线路间的最大差异程度,若该值小于10说明最大的线路差异度不存在数量级跃变,为母线

接地故障, 反之最大 $H_{D_{\max-j}}$ 值所在列为故障线路。其中 j 为列数编号。即判据 2 为

$$r' = \frac{\max(H_{D_{\max-j}})}{\min(H_{D_{\max-j}})} < 10 \quad (i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j) \quad (8)$$

具体选线流程图如图 5。

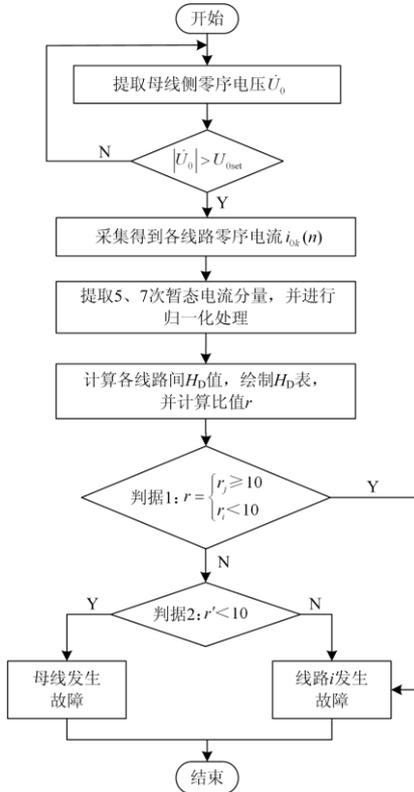


图 5 选线流程图

Fig. 5 Line selection flow chart

3 仿真验证

利用 Matlab 中的 Simulink 系统搭建了一个如图 6 所示的 110 kV/10 kV 架缆混合小电流接地系统,

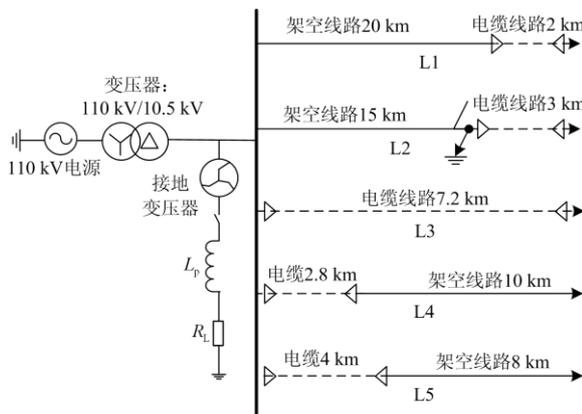


图 6 谐振接地系统仿真模型

Fig. 6 Simulation model of resonant grounding system

线路参数见表 3。消弧线圈的补偿度为 10%, 则电感值和阻值分别为 $L_p = 0.55 \text{ H}$, $R_L = 20 \Omega$ 。其中线路 2 为故障线路, 在架空电缆连接处发生 A 相单相接地故障。设置采样频率为 20 kHz。

表 3 仿真模型线路参数

Table 3 Simulation model line parameters

线路类型	正序			零序		
	$r_1/$ (Ω/km)	$c_1/$ ($\mu\text{F}/\text{km}$)	$l_1/$ (mH/km)	$r_0/$ (Ω/km)	$c_0/$ ($\mu\text{F}/\text{km}$)	$l_0/$ (mH/km)
架空	0.125 0	0.009 6	1.300 0	0.275 0	0.005 4	4.600 0
电缆	0.270 0	0.339 0	0.255 0	2.700 0	0.280 0	1.019 0

3.1 线路故障

假定线路 2 发生 A 相经过渡电阻为 20Ω 的单相接地故障, 各条线路的距离参数 H_D 值计算结果如表 4 所示。

表 4 线路 H_D 值 ($R_f = 20 \Omega$)

Table 4 H_D value of $R_f = 20 \Omega$

线路	1	2	3	4	5
1	0	20.255 8	0.436 9	0.412 4	0.492 8
2	20.255 8	0	20.025 4	19.850 4	19.763 0
3	0.436 9	20.025 4	0	0.383 3	0.281 6
4	0.412 4	19.850 4	0.383 3	0	0.250 4
5	0.492 8	19.763 0	0.281 6	0.250 4	0

从第 1 列开始计算:

$$r_1 = \begin{cases} \frac{H_{D_{2-1}}}{H_{D_{3-1}}} = \frac{20.2558}{0.4369} = 46.36 \geq 10 \\ \frac{H_{D_{2-1}}}{H_{D_{4-1}}} = \frac{20.2558}{0.4124} = 49.12 \geq 10 \\ \frac{H_{D_{2-1}}}{H_{D_{5-1}}} = \frac{20.2558}{0.4928} = 41.10 \geq 10 \end{cases}$$

$$r_2 = \begin{cases} \frac{H_{D_{1-2}}}{H_{D_{3-2}}} = \frac{20.2558}{20.0254} = 1.011 < 10 \\ \frac{H_{D_{1-2}}}{H_{D_{4-2}}} = \frac{20.2558}{19.8504} = 1.020 < 10 \\ \frac{H_{D_{1-2}}}{H_{D_{5-2}}} = \frac{20.2558}{19.9630} = 1.024 < 10 \end{cases}$$

$$r_3 = \begin{cases} \frac{H_{D_{2-3}}}{H_{D_{1-3}}} = \frac{20.0254}{0.4369} = 45.84 \geq 10 \\ \frac{H_{D_{2-3}}}{H_{D_{4-3}}} = \frac{20.0254}{0.3833} = 52.24 \geq 10 \\ \frac{H_{D_{2-3}}}{H_{D_{5-3}}} = \frac{20.0254}{0.2816} = 71.11 \geq 10 \end{cases}$$

$$r_4 = \begin{cases} \frac{H_{D_{2-4}}}{H_{D_{1-4}}} = \frac{19.8504}{0.4124} = 48.13 \geq 10 \\ \frac{H_{D_{2-4}}}{H_{D_{3-4}}} = \frac{19.8504}{0.3833} = 51.79 \geq 10 \\ \frac{H_{D_{2-4}}}{H_{D_{5-4}}} = \frac{19.8504}{0.2504} = 79.27 \geq 10 \end{cases}$$

$$r_5 = \begin{cases} \frac{H_{D_{2-5}}}{H_{D_{1-5}}} = \frac{19.9630}{0.4928} = 40.10 \geq 10 \\ \frac{H_{D_{2-5}}}{H_{D_{3-5}}} = \frac{19.8504}{0.2816} = 70.18 \geq 10 \\ \frac{H_{D_{2-5}}}{H_{D_{4-5}}} = \frac{19.8504}{0.2504} = 78.92 \geq 10 \end{cases}$$

根据以上计算的差异度的距离相对系数，有且仅有 r_2 趋于 1，其余的 r_j 均远大于 10，即此时满足判据 1：

$$r = \begin{cases} r_j \geq 10 \\ r_2 < 10 \end{cases} \quad (j=1,3,4,5)$$

判据 1 可靠判别线路 2 为故障线路，与仿真预设故障线路结果相同。在非故障线路的计算中， r_j 值远大于所设阈值，而 r_2 值则趋于 1，并远小于阈值，表明该判据可在低阻故障时准确地进行故障判别。

对不同过渡电阻、不同故障位置等情况下的 H_D 计算，结果分别如图 7、图 8 所示。

对不同故障情况进行仿真计算，进一步验证利用 H_D 值参数选线方案的适用性。其中每条线路的平均 H_D 值为 H_D 表中线路对应列除最大值外所有值的平均值。

1) 不同过渡电阻

过渡电阻从 20Ω 到 5000Ω ，每间隔 100Ω 形成一次 H_D 表，不同过渡电阻下各线路的平均 H_D 值计算结果如图 7 所示。

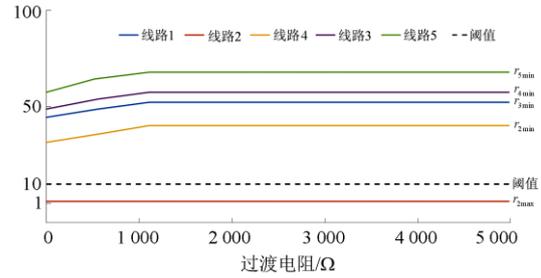
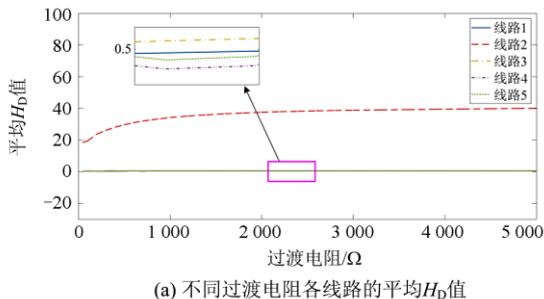


图 7 不同过渡电阻下故障线路的判定结果

Fig. 7 Judgement results of fault line under different transition resistance

从图 7(a)可以看出，随着过渡电阻的增大，故障线路 2 与健全线路的 H_D 值比值增大，且在 1000Ω 后趋于平稳。由图 7(b)可知，在低阻接地故障时，故障与健全线路的平均 H_D 值比值相对高阻接地故障虽然有一定程度的减小，但仍高于阈值，依然可以正确完成故障选线。

2) 不同故障位置

图 8(a)为单相接地故障发生在本线路首端至末端任意距离时，各线路平均 H_D 值的变化情况，各线路相对距离系数 r 与阈值的的关系，见图 8(b)。其中过渡电阻为 5000Ω ，补偿度为 5%。通过分析可看出，近端或远端故障时，故障线路的综合 H_D 值均稳定在 40 左右，健全线路的综合 H_D 值接近于 0。即使在最不利时，即任意健全线路相对距离参数 r 取最小时的 r_{\min} 值远高于阈值 10，故障线路 r 取最

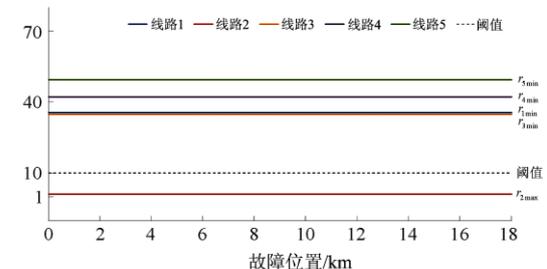
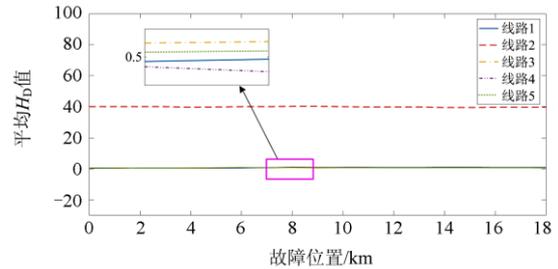


图 8 不同故障位置下故障线路的判定结果

Fig. 8 Judgement results of fault lines at different fault locations

大时的 r_{\max} 为 1, 稳定小于 10。表明判据 1 在不同故障位置时, 均可以可靠识别故障线路。

3) 不同消弧线圈补偿度

图 9 与图 8 同理, 其中过渡电阻为 $5\ 000\ \Omega$, 故障位置为线路末端。可以看出改变消弧线圈过补偿程度几乎不会影响各线路 H_D 值的结果。如图 9(b) 所示, 健全线路参数 r_{\min} 远大于阈值, 故障线路 r_{\max} 稳定在 1 左右, 满足判据 1, 可准确故障选线。

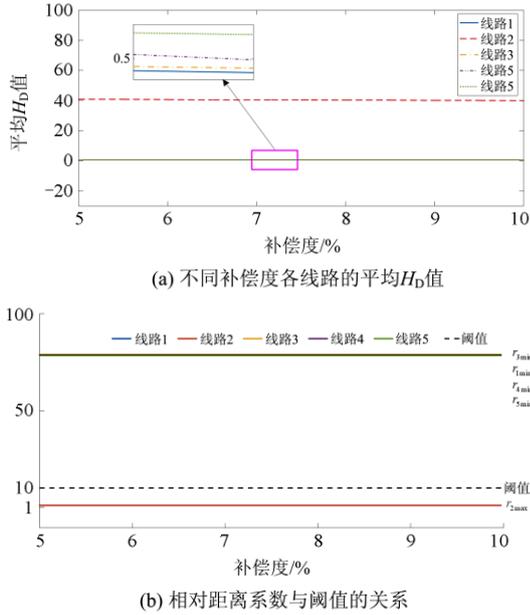


图 9 不同补偿度下故障线路的判定结果

Fig. 9 Judgement results of fault lines under different compensation degrees

4) 不同故障初相角

图 10 以线路末端故障、补偿度为 5% 为例进行分析, 其中过渡电阻为 $5\ 000\ \Omega$ 。表明存在一个最小范围的故障发生相角区间, 该区间内的极小值处, 故障线路平均 H_D 值与健全线路平均 H_D 值的比值 r 存在最小值, 因此有必要分析该最小值处是否存在判据无法判别的风险, 具体参数见表 5。

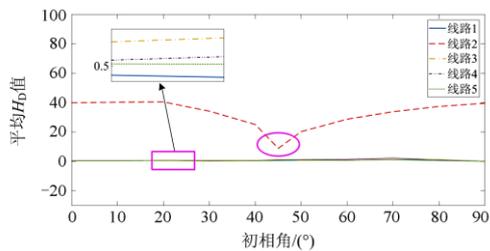


图 10 不同故障初相角各线路的平均 H_D 值

Fig. 10 Average H_D value of each line at different fault initial phase angles

表 5 线路 H_D 值(初相角为 45°)

线路	1	2	3	4	5
1	0	9.023 6	0.689 6	0.890 1	0.625 3
2	9.023 6	0	8.733 2	8.860 5	8.890 4
3	0.689 6	8.733 2	0	1.574 7	1.213 5
4	0.890 1	8.860 5	1.574 7	0	0.691 9
5	0.625 3	8.890 4	1.213 5	0.691 9	0

由表 5 可得判据 1:

$$r_1 = \begin{cases} \frac{H_{D_{2-1}}}{H_{D_{3-1}}} = \frac{9.0236}{0.6896} = 13.09 \geq 10 \\ \frac{H_{D_{2-1}}}{H_{D_{4-1}}} = \frac{9.0236}{0.8901} = 10.14 \geq 10 \\ \frac{H_{D_{2-1}}}{H_{D_{5-1}}} = \frac{9.0236}{0.6252} = 14.43 \geq 10 \end{cases}$$

$$r_2 = \begin{cases} \frac{H_{D_{1-2}}}{H_{D_{3-2}}} = \frac{9.0236}{8.7332} = 1.033 < 10 \\ \frac{H_{D_{1-2}}}{H_{D_{4-2}}} = \frac{9.0236}{8.8605} = 1.018 < 10 \\ \frac{H_{D_{1-2}}}{H_{D_{5-2}}} = \frac{9.0236}{8.8904} = 1.015 < 10 \end{cases}$$

$$r_3 = \begin{cases} \frac{H_{D_{2-3}}}{H_{D_{1-3}}} = \frac{8.7332}{0.6896} = 12.66 \geq 10 \\ \frac{H_{D_{2-3}}}{H_{D_{4-3}}} = \frac{8.7332}{1.5747} = 5.55 < 10 \end{cases}$$

此时 r_3 不满足判据 1, 无法进行故障选线, 采用判据 2 进行进一步判断。

计算每一行的最大-最小差 $H_{D_{\max-i}}$, 得到差值数组 $\{8.3983, 0.2904, 8.0436, 8.1686, 8.2651\}$, 则

$$r' = \frac{\max(H_{D_{\max-1}})}{\min(H_{D_{\max-2}})} = \frac{8.3983}{0.2904} = 28.92 \geq 10$$

由判据 2 可判定为非母线故障, 差值中最小值 $H_{D_{\max-2}}$ 即线路 2 为故障线路。

综上所述, 线路发生故障时, 判据 1 几乎不受过渡电阻、故障位置以及消弧线圈补偿度的影响, 但受到故障初相角的影响较大。此时, 进一步结合判据 2, 能够在不同情况下均可准确完成故障选线, 提高了选线结果的可靠性。

3.2 母线故障

设置母线 A 相接地故障, 作不同过渡电阻下的

平均 H_D 值关系图, 如图 11 所示。

由图 11 可以看出, 当母线发生单相接地故障时, 该母线所连线路的暂态电流波形具有较高的相似性。随过渡电阻的增大, H_D 值均在 0.5 上下浮动, 以 5 000 Ω 下的 H_D 值进行验证计算, 如表 6 所示。

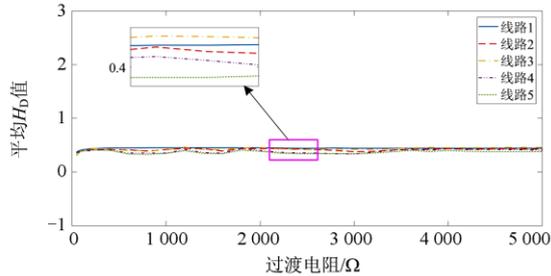


图 11 不同母线故障接地电阻与平均 H 值的关系

Fig. 11 Relationship between different bus fault ground resistance and average H value

表 6 线路 H 值 ($R_f = 5\ 000\ \Omega$)

Table 6 H value of $R_f = 5\ 000\ \Omega$

线路	1	2	3	4	5
1	0	0.478 8	0.487 9	0.320 1	0.491 2
2	0.478 8	0	0.500 2	0.451 8	0.278 5
3	0.487 9	0.500 2	0	0.465 4	0.379 4
4	0.320 1	0.451 8	0.465 4	0	0.382 1
5	0.491 2	0.278 5	0.379 4	0.382 1	0

计算得判据 1:

$$r_1 = \begin{cases} \frac{H_{D_{s-1}}}{H_{D_{2-1}}} = \frac{0.4912}{0.4788} = 1.026 < 10 \\ \vdots \end{cases}$$

判据 1 不成立, 计算判据 2:

$$H_{D_{\max-j}} = \{1.535, 1.796, 1.318, 1.454, 1.764\}$$

$$r' = \frac{\max(H_{D_{\max-2}})}{\min(H_{D_{\max-3}})} = \frac{1.796}{1.318} = 1.363 < 10$$

最终确定母线处发生接地故障。实际配电网中母线发生单相接地故障的概率远小于线路故障的概率, 但母线故障的可能性仍然存在。判据 2 不仅在线路故障时可为判据 1 提供重要补充, 并且对于母线发生接地故障时, 也可做出准确判断。

3.3 性能对比分析

通过以上分析可知, 本文方法尤其对于高阻接地故障具有较高的灵敏性, 下面分析在同样故障情况下、同一计算周期内, 本文方法与其他暂态量选线方法^[23]性能的对比如表 8 所示。其中设置线路 2 为故障线路。

表 7 不同选线方法的耐过渡电阻性能对比

Table 7 Sensitivity comparison of different line selection methods

过渡电阻	500	1 000	2 000	5 000	
$r_{1\min}$	61.5	68.6	74.3	77.5	
本文方法	$r_{2\max}$	1.0	1.0	1.0	1.0
$r_{3\min}$	60.0	67.7	72.0	76.2	
$r_{4\min}$	60.0	68.1	73.8	76.5	
$r_{5\min}$	60.4	68.1	73.9	76.7	
暂态能量法 ^[22] /J	w_1	51.5	22.8	5.5	0.8
w_2	906.7	236.4	58.3	9.1	
w_3	183.9	136.2	34.0	5.4	
w_4	89.8	30.0	7.28	1.1	
w_5	117.8	47.3	11.6	1.8	

由表 7 可以看出: 一方面, 能量法随着过渡电阻的增加, 各线路能量值 w 大幅减小, 而本文方法的判据 r 不受过渡电阻的影响, 计算结果值更加稳定; 另一方面, 500 Ω 的较低阻下, 能量法中故障线路 w_2 为健全线路最大能量值 w_3 的 5 倍, 本文 H_D 方法健全线路最小比值参数 $r_{3\min}$ 为故障线路 $r_{2\max}$ 的 60 倍。此外, 当过渡电阻为 5 000 Ω 的单相故障时, 能量法中故障线路 w_2 仅为健全线路最大能量值 w_3 的 1.68 倍, 故障线路和健全线路的相对差异程度较小; H_D 法各健全线路 r_{\min} 中最小参数 $r_{3\min}$ 为故障线路 $r_{2\max}$ 的 76 倍, 表明此时故障线路和健全线路参数值 r 依旧具有显著的差异。因此, 本文方法采用 Hausdorff 距离参数可以更好地凸显故障线路与健全线路的差异, 故障选线的灵敏度更高, 尤其是对于高阻接地故障具有更好的适应性。

3.4 试验验证

为了进一步验证本文选线方案的性能, 利用陕西省电力科学研究院配电网户外试验场的故障录波数据进行验证, 实验系统电压等级为 10 kV, 采用中性点经消弧线圈接地方式, 试验系统包含 5 条线路模型, 采用集中 RLC 模拟柜进行表示, 分别为长度 15 km 架空线路 1、长度 1.3 km 电缆线路 2、长度 1 km 电缆线路 3、长度 10 km 架空线路 4、长度 1.5 km 电缆线路 5。在出线开关柜处配备一体式零序电流互感器, 变比为 50:5, 利用 20 kHz 的采样频率对故障后的线路零序电流进行记录。图 12 为线路发生过渡电阻 R_f 为 2 000 Ω 高阻接地故障的零序电流录波数据图, 表 8 为相应的 H_D 表。

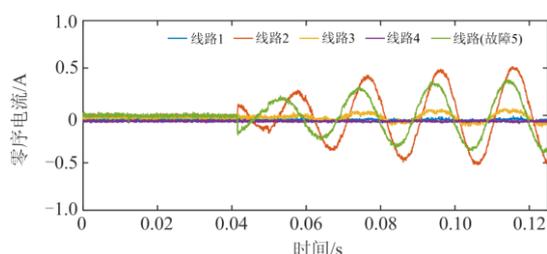


图 12 试验录波电流数据

Fig. 12 Test recording current data

表 8 试验数据的线路 H_D 值Table 8 H_D value of test data

线路	1	2	3	4	5
1	0	0.579 3	2.026 4	1.537 4	15.388 4
2	0.579 3	0	1.902 5	2.126 6	14.980 8
3	2.026 4	1.902 5	0	0.626 8	14.737 9
4	1.537 4	2.126 6	0.626 8	0	14.685 3
5	15.388 4	14.980 8	14.737 9	14.685 3	0

$$r_1 = \begin{cases} \frac{H_{D_{5-1}}}{H_{D_{2-1}}} = \frac{15.3884}{0.5793} = 26.56 \geq 10 \\ \frac{H_{D_{5-1}}}{H_{D_{3-1}}} = \frac{15.3884}{2.0264} = 7.594 < 10 \\ \vdots \end{cases}$$

判据 1 不成立, 计算判据 2 得:

$$H_{D_{\max-j}} = \{14.8091, 14.4015, 14.1111, 14.0585, 0.7031\}$$

$$r' = \frac{\max(H_{D_{\max-2}})}{\min(H_{D_{\max-3}})} = \frac{14.8091}{0.7031} = 21.06 \geq 10$$

结果表明, 在该试验系统经 2000Ω 的高阻接地故障时, 判据 1 和判据 2 的结合使用能够可靠识别故障线路。进一步证明了本文所提故障选线方案的良好性能。

4 结论

本文针对谐振接地配电网单相故障后各线路的暂态 5、7 次电流分量, 通过 Hausdorff 距离(H_D)算法计算线路间主要高频电流分量波形的差异, 构造基于距离参数的故障选线判据。该方案具有以下特点:

1) 在谐振接地系统中, 高频电流依旧故障具有较大的残余成分, 采用高频电流 5、7 次分量有利于进行波形差异的比较;

2) 采用暂态电流归一化处理, 有效降低了线路不对称程度对故障选线方案的影响;

3) 设计了基于 Hausdorff 距离算法的故障选线方案, 能适用于不同故障情况的故障选线, 仿真和试验结果表明高阻故障时依旧具有良好的适应性,

有望提高高阻单相接地故障时故障选线的可靠性和灵敏性。

参考文献

- [1] MARTA A, MIGUEL G G, HALABI E N, et al. Network impulse response based-on fault location method for fault location in power distribution systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(15): 3962-3970.
- [2] WANG Yuanyuan, HUANG Yuhao, ZENG Xiangjun. Faulty feeder detection of single phase-earth fault using grey relation degree in resonant grounding system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 55-61.
- [3] 魏科文, 张靖, 何宇, 等. 基于 VMD 和相关性聚类的谐振接地系统单相接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 105-113. WEI Kewen, ZHANG Jing, HE Yu, et al. Single-phase grounding fault line selection in a resonant grounding system based on VMD and correlation clustering[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 105-113.
- [4] 白杰, 邵文权, 程远, 等. 基于调节脱谐度的谐振接地系统故障选线方法的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(3): 143-147. BAI Jie, SHAO Wenquan, CHENG Yuan, et al. Study on fault line selection method of resonant grounding system based on adjusting detuning degree[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(3): 143-147.
- [5] XUE Y, CHEN X, SONG H, et al. Resonance analysis and faulty feeder identification of high-impedance faults in a resonant grounding system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1545-1555.
- [6] 李振兴, 万佳灵, 王新, 等. 基于中值电阻投切的故障选线与定位新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 57-65. LI Zhenxing, WAN Jialing, WANG Xin, et al. A novel method of fault line selection and section location based on the input and cutoff of medium resistance[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 57-65.
- [7] 齐郑, 刁春燕, 陈艳波. 配电网快速故障点转移熄弧方法的有效性在线辨识研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 69-75. QI Zheng, DIAO Chunyan, CHEN Yanbo. Online identification of the effectiveness of fast fault point transfer arc extinguishing method for distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 69-75.
- [8] 束洪春, 黄海燕, 田鑫萃, 等. 采用形态学峰谷检测的谐振接地系统故障选线方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 228-236. SHU Hongchun, HUANG Haiyan, TIAN Xincui, et al. Fault line selection in resonant earthed system based on morphological peak-valley detection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 228-236.
- [9] 龙茹悦, 黄纯, 汤涛, 等. 一种谐振接地系统的配电网线路接地故障选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 21-29. LONG Ruyue, HUANG Chun, TANG Tao, et al. Line

- selection method for grounding fault in resonant grounding distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 21-29.
- [10] 安东亮, 陈涛, 李军, 等. 基于半波傅氏算法的小电流接地选线装置设计[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 157-163.
AN Dongliang, CHEN Tao, LI Jun, et al. Design of a small current grounding line selection device based on a half-wave Fourier algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 157-163.
- [11] 束洪春, 龚振, 田鑫萃, 等. 基于故障特征频带及形态谱的单相接地故障选线[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 1041-1053.
SHU Hongchun, GONG Zhen, TIAN Xincui, et al. Single line-to-ground fault line selection based on fault characteristic frequency band and morphological spectrum[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 1041-1053.
- [12] 庄胜斌, 缪希仁, 江灏, 等. 基于改进欧氏-动态时间弯曲距离的谐振接地配电网单相高阻接地故障选线方法[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 273-281.
ZHUANG Shengbin, MIAO Xiren, JIANG Hao, et al. A line selection method for single-phase high-resistance grounding fault in resonant grounding system of distribution network based on improved Euclidean-dynamic time warping distance[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 273-281.
- [13] 管廷龙, 薛永端, 徐丙垠. 基于故障相电压极化量的谐振接地系统高阻故障方向检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(23): 73-81.
GUAN Tinglong, XUE Yongduan, XU Bingyin. Method for detecting high-impedance fault direction in a resonant grounding system based on voltage polarization of the fault phase[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 73-81.
- [14] 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]. 高压工程技术, 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.
- [15] 韦莉珊, 贾文超, 焦彦军. 基于 5 次谐波与导纳不对称度的配电网单相接地选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 77-83.
WEI Lishan, JIA Wenchao, JIAO Yanjun. Single-phase fault line selection scheme of a distribution system based on fifth harmonic and admittance asymmetry[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 77-83.
- [16] 孙其东, 张开如, 刘建, 等. 基于五次谐波和小波重构能量的配电网单相接地故障的选线方法研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(16): 1-4.
SUN Qidong, ZHANG Kairu, LIU Jian, et al. Research on single-phase fault earth fault line selection method for the distribution network based on fifth harmonics and wavelet reconstruction[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(16): 1-4.
- [17] 魏鑫, 舒乃秋. 基于 Hausdorff 距离的配电网单相接地故障选线方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(5): 133-142.
WEI Xin, SHU Naiqiu. Single phase grounding fault line selection method based on Hausdorff distance in distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(5): 133-142.
- [18] 王清亮. 补偿接地电网的暂态量选线保护研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2010.
WANG Qingling. Fault line detection based on the transient information in compensated earthed network[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2010.
- [19] 朱振东, 邢惠民, 刘代, 等. 基于综合 Hausdorff 距离的小电流接地故障选线[J]. 电测与仪表, 2019, 56(6): 56-62.
ZHU Zhendong, XING Huimin, LIU Dai, et al. Fault line selection in small current grounding system based on composite Hausdorff distance[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(6): 56-62.
- [20] 李振兴, 王朋飞, 王新, 等. 基于幅值特征和 Hausdorff 距离的配电网故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 169-177.
LI Zhenxing, WANG Pengfei, WANG Xin, et al. Fault location method of distribution network based on amplitude feature and Hausdorff distance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 169-177.
- [21] 翁汉珺, 刘华, 林湘宁, 等. 基于 Hausdorff 距离算法的变压器差动保护新判据[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 475-483.
WENG Hanli, LIU Hua, LIN Xiangning, et al. A novel criterion of the transformer differential protection based on the Hausdorff distance algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 475-483.
- [22] 陈景文, 褚恩亮, 李英春, 等. 基于贝叶斯分类器的谐振接地故障选线系统设计[J]. 智慧电力, 2019, 47(8): 99-104.
CHEN Jingwen, CHU Enliang, LI Yingchun, et al. Design of resonant ground fault line selection system based on Bayesian classifier[J]. Smart Power, 2019, 47(8): 99-104.
- [23] 罗立波, 高阳, 谷彩连, 等. 基于 S 变换和可信度决策的谐振接地系统故障选线新方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(15): 84-90.
LUO Libo, GAO Yang, GU Cailian, et al. A new method of fault line selection for resonant grounding system based on the S-transform and credibility decision[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(15): 84-90.

收稿日期: 2021-05-24; 修回日期: 2021-12-08

作者简介:

邵文权(1978—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统继电保护、配电网故障处理; E-mail: shaowenquan@xpu.edu.cn

程畅(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: 824934274@qq.com

(编辑 葛艳娜)