

谐振接地系统虚幻接地的辨识和综合选线方法

束洪春

(昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650051)

摘要: 发生单相接地故障时,在零模电压与其差分构成的平面上相邻点之间的欧氏距离大于发生虚幻接地情况时的欧氏距离,借此原理实现虚幻接地的识别。谐振接地系统线路发生接地故障时,健全线路的暂态零模电流波形之间有很强的相似性,而故障线路与健全线路的暂态零模电流波形之间差异显著。取故障后 $1/4$ 工频周期作为分析时窗,采用分形盒维数和相对能量熵 2 个测度来定量表征故障线路和健全线路零模电流波形形态差别进行选线,并采用 K -means 聚类算法实现对线路的故障辨识。仿真分析表明,所提选线方法能够可靠地选出故障线路。将大量的历史故障数据作为样本映射到故障线路辨识平面,可提高其故障选线可靠性。

关键词: 谐振接地系统; 虚幻接地; 故障选线; 分形盒维数; 相对熵; K -means 聚类分析

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.06.018

0 引言

随着城市电缆线路在配电网线路中的占比的增加,线路充电电容电流增大,因而在发生弧光接地情况下熄弧变得更加困难。经消弧线圈接地方式被广泛采用,利用稳态量“群体比幅比相”的传统选线方法不适用于补偿接地电网。此外,由于架空线路导线坠地、树木等与架空线路接触所引起的高阻故障时有发生,使得实际运行中故障选线频繁出现漏选和误选的情况。同时,小角度故障时,接地电流中含有衰减直流分量,容易导致电流互感器饱和,加之非线性负荷使得故障电流中谐波分量丰富,更易导致电流互感器二次电流失真。此外谐振接地系统中,由于消弧线圈的补偿作用,电网中存在瞬时功率倒相的问题。因此,配电网故障选线有其特殊性和复杂性,多年以来一直是个影响重大而广泛却未能得到有效解决的原理和技术课题,对此仿真研究较多,而实际的实体实验和测试研究少。文献[1-2]根据故障线路与非故障线路间的暂态零模电流波形差异性大于非故障线路间的暂态零模电流波形差异性的特点,提出一种基于暂态波形差异性识别的接地选线新方法。文献[3]提出通过对零序电流波形进行伸缩变换提高非故障线路之间的相似性。文献[4]采用多重分形谱来刻画故障电流信号的几何特征和奇异性。上述文献提出的方法均只讨论了纯架空线路的配电网系统。当架空线路、电缆混合线路的补偿接地电网故障时,健全线路之间的暂态时域波形在形态上的相似性变差,采用相关分析单一算法的

故障选线方法,可能会存在误选或漏选的情况。

补偿接地配电网正常运行时,消弧线圈处于过补偿状态。当投入更多线路时,对地电容将增大,对地电容和消弧线圈可能会在工频下产生谐振,使得消弧线圈变为全补偿状态,从而产生串联谐振过电压。选线装置一般采用零模电压升高的值是否大于定值作为启动选线程序的判据。因此,配电网线路发生虚幻接地时,可能会启动故障选线程序。对此,本文采用故障时域波形的一阶差分和二阶差分形成的平面,并根据平面上点的距离构建虚幻接地识别判据。

分形盒维数是波形复杂度的一种度量,而相对能量熵是信号能量的度量。采用这 2 个测度定量地刻画零模电流波形,比单一测度更准确,所反映的故障特征也更完备。当配电网线路发生故障时,健全线路间的零模电流时域波形之间具有相似性,而健全线路与故障线路的零模电流时域波形之间有明显的差异性。聚类分析正是把具有相似性的对象聚到一个簇里,并且使不同簇之间的差异性达到最大的一种有效方法。因此,本文提出采用分形盒维数和相对能量熵提取零模电流的特征,并利用 K -means 聚类分析算法将这 2 个测度进行结合的综合选线方法。

1 谐振接地配电网单相接地故障暂态过程分析

随着电缆线路和线缆混合线路大量接入配电网,配电网中电缆线路与线缆混合线路的比重增多。当配电网线路发生接地故障时,线路充电电容电流增大,其暂态过程较纯架空线路配电网的复杂。若能充分考虑到电缆线路的暂态过程,可提高故障选线的可靠性。

现构建由 6 条线路 L_1 — L_6 组成的 35 kV 中性

点经消弧线圈接地的配电网,如图 1 所示。图中,G 为无限大电源;T 为主变压器,变比为 110 kV/35 kV,联结组别为 Yn/d11;我国配电网主变压器配电侧一般为三角形联结,不存在中性点,此处增设接地变压器 T_z 作为供补偿电网接地专用的“Z”字形变压器; L 为消弧线圈的等值电感;线路类型包括架空线路、电缆线路。

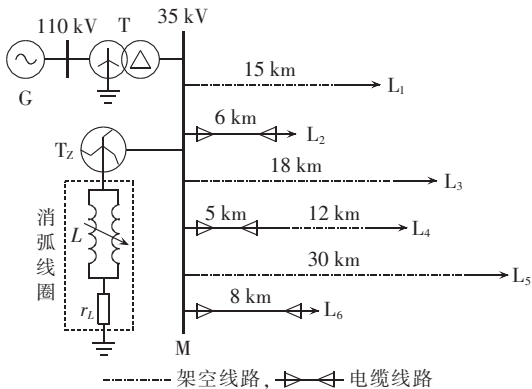


图 1 35 kV 谐振接地系统模型

Fig.1 Model of a 35 kV resonant grounding system

当配电网发生接地故障时,通常采用二阶等效电路分析故障电流的暂态过程。图 2 为中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障时的等效电路,图中, u_0 为等效零模电源电压; r_L 为消弧线圈的阻尼电阻; L 为消弧线圈的等值电感; L_0 为三相线路和电源变压器等在零模回路中的等值电感; R_0 为零模回路中的等效电阻(包括故障点的接地电阻和弧道电阻); C_0 为中性点经消弧线圈接地系统的三相对地电容。

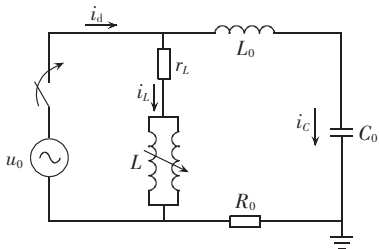


图 2 单相接地故障的等效回路

Fig.2 Equivalent circuit of single-phase grounding fault

在中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障的瞬间,流过故障点的暂态电流由暂态电容电流 i_C 和暂态电感电流 i_L 两部分组成,其对应的表达式为^[5-6]:

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

其中, I_{Cm} 、 I_{Lm} 分别为稳态电容电流和稳态电感电流的幅值; $\tau_L = L/r_L$,为电感回路的时间常数; τ_c 为电容

回路的时间常数; ω_f 为自由振荡频率; φ 为电源电压的相角; $(I_{Cm} - I_{Lm})\cos(\omega t + \varphi)$ 项为接地故障电流稳态分量,其大小等于稳态电容电流和稳态电感电流的幅值之差;其余项为接地故障电流的暂态分量,其值等于电容电流的暂态自由振荡分量与电感电流的暂态直流分量之和,两者的幅值不仅不能相互抵消,甚至还可能彼此叠加,使暂态接地故障电流的幅值明显增大。消弧线圈的磁通 ϕ_L 和电感电流 i_L 均是由暂态的直流分量和稳态的交流分量组成的,而暂态过程的振荡角频率 ω 与电源的角频率相等,且幅值与接地瞬间电源电压的相角 φ 有关;当 $\varphi = 0^\circ$ 时,其值最大;当 $\varphi = 90^\circ$ 时,其值最小。当线路不同位置发生单相接地故障时,所计算出来的等效电容 C_0 是不同的,因此不同分支发生故障时,所对应的时间常数 τ_c 不同。由于 τ_c 决定了自由振荡衰减的快慢,因此不同分支上的故障具有不同的暂态特性。在含有电缆的中低压电网中,暂态电容电流的自由振荡频率通常在 300~3000 Hz 范围内。

在图 1 所示的谐振接地系统中,现假设架空线路 L_1 发生单相接地故障,量测端获取到的电流波形如图 3 所示。假设电缆线路 L_3 发生单相接地故障,量测端获取到的电流如图 4 所示。

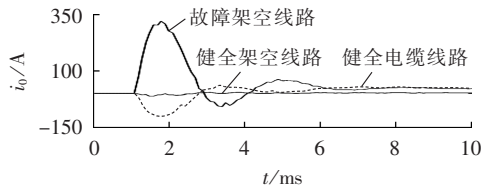


图 3 架空线路故障下量测端暂态零模电流

Fig.3 Transient zero-mode currents of measuring terminal during overhead line fault

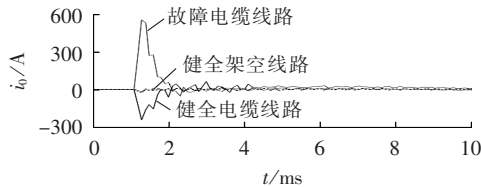


图 4 电缆线路故障下量测端暂态零模电流

Fig.4 Transient zero-mode currents of measuring terminal during cable feeder fault

由图 3 和图 4 可知,含有电缆线路的配电网发生接地故障时,充电电容电流增大,使得健全电缆线路与健全架空线路的电流幅值相差很大。若采用信号距离的方法直接对波形进行相似性刻画,健全线路之间的时域波形相似性会变小。

同时,实际运行的配网线路发生接地故障时,由于故障的随机性和复杂性,零模电流的极性也会存在不能可靠表征故障特征的情况。图 5 展示了弧光接地故障的实测故障零模电流。

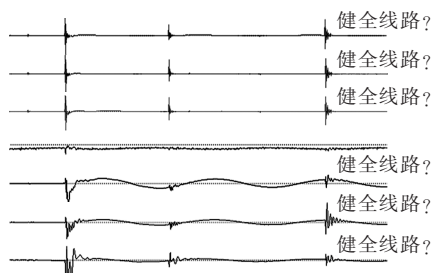


图 5 间歇性弧光接地故障实测零模电流波形
Fig.5 Measured waveforms of zero-mode current during intermittent arc grounding fault

由图 5 可知,小电流接地系统发生弧光接地故障时,线路故障零模电流波形的形态复杂,健全线路之间的零模电流波形在形态上的相似性变差,采用群体比较性,很难选出故障线路。

2 虚幻接地及辨识方法

对于选线装置,通常以零模电压是否越限作为启动接地选线的依据。当配电网发生虚幻接地时,有可能会启动接地选线程序,因此需要识别出虚幻接地。下面阐述虚幻接地的辨识方法。

设零模电压 u_0 的一阶差分 $d[1](n)=u_0(n)-u_0(n-1)$,二阶差分 $d[2](n)=d[1](n)-d[1](n-1)$,三阶差分 $d[3](n)=d[2](n)-d[2](n-1)$,发生单相接地故障和虚幻接地情况下,零模电压波形分别如图 6(a)和图 7(a)所示,图 6、7 的(b)、(c)和(d)分别为 $(d[1],u_0)$ 、 $(d[2],d[1])$ 、 $(d[3],d[2])$ 所组成 3 个平面分布结果。

由图 6、7 可知,当发生虚幻接地时,零模电压幅值逐渐增大,在零模电压与其差分构成的平面上,相邻点之间的欧氏距离较小。当发生单相接地故障时,零模电压瞬时值由零突然增加至十几千伏,与虚幻接地情况相比,在零模电压与其差分构成的平面上,相

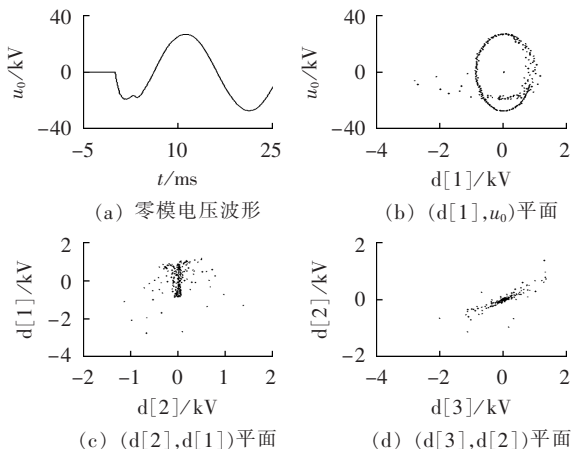


图 6 单相接地故障时零模电压与其差分构成的平面分布结果

Fig.6 Distribution of zero-mode voltage vs. its differential during single-phase grounding fault

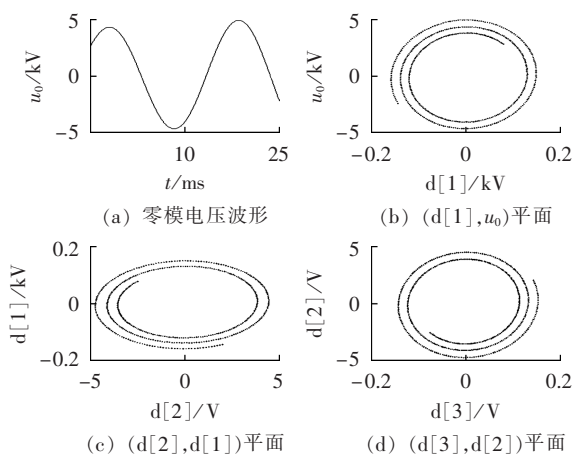


图 7 虚幻接地时零模电压与其差分构成的平面的分布

Fig.7 Distribution of zero-mode voltage vs. its differential during unreal grounding

邻点之间的欧氏距离较大。定义在以 $d[2]$ 为横轴、 $d[1]$ 为纵轴的平面上,相邻点间欧氏距离的平方为:

$$d^2(n)=[d[2](n)-d[2](n-1)]^2+[d[1](n)-d[1](n-1)]^2 \quad (2)$$

根据式(2)得到单相接地故障和虚幻接地下的 $d(n)$ 如图 8 所示。

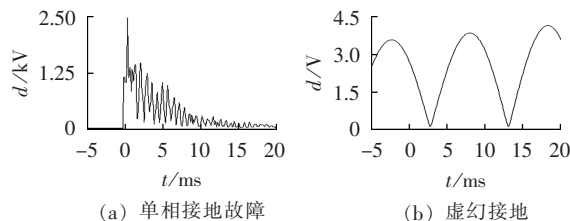


图 8 单相接地故障和虚幻接地下的 $d(n)$

Fig.8 Waveforms of $d(n)$ for single-phase grounding fault and unreal grounding

大量仿真分析表明,对故障发生后或谐振后 5 ms 的 d 进行积分,利用求取的积分结果 d_{sum} 能识别出接地故障和虚幻接地。故可建立判据:若 $d_{\text{sum}} > 1$,则判断为单相接地故障;若 $d_{\text{sum}} \leq 1$,则判断为虚幻接地。

3 故障波形的形态特征描述

3.1 零模电流波形的分形盒维数测度

利用信号距或相关系数等常用的相关算法来描述零模电流波形之间的相关性时,往往受零模电流的幅值影响较大。对于含有电缆线路的配电网,当线路发生接地故障时,健全电缆线路与健全架空线路之间的幅值相差很大,若采用信号距或相关系数描述零模电流波形,则健全线路之间的相似性减小,这可能会导致基于此的选线方法失效。分形盒维数反映了复杂形体占有空间的有效性,是复杂形体不规则性的一种量度。它本质上也是一种信号相似性的度量方法,但它与零模电流幅值的关系甚小。

现取边长为 ε 的小盒子,并用此小盒子来覆盖被测形体,由于被测形体内部有各种空隙,有些小盒子会是空的,非空盒子的数目为 $N(\varepsilon)$ 。若逐渐缩小盒子的尺寸,则所得的 $N(\varepsilon)$ 将增大。根据以上定义,在双对数坐标上描绘出 $(-\ln \varepsilon, \ln N(\varepsilon))$ 的曲线,其直线部分的斜率即为此被测形体的盒维数 D_c [7-8,11]:

$$D_c = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln(1/\varepsilon)} \quad (3)$$

仍采用如图 1 所示的系统,现假设支路 L_1 发生故障,采样率为 10 kHz,故障后 1/4 周期的故障架空线路与健全架空线路的暂态零模电流波形分别如图 9(a) 和 9(b) 所示。经过分形盒维数后的结果如图 10 所示,图中,故障架空线路和健全架空线路的 D_c 分别为 1.233 1 和 1.352 7。

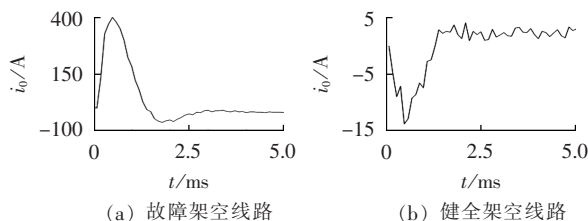


图 9 故障线路与健全线路的暂态零模电流波形

Fig.9 Waveforms of transient zero-mode current of faulty feeder and healthy feeder

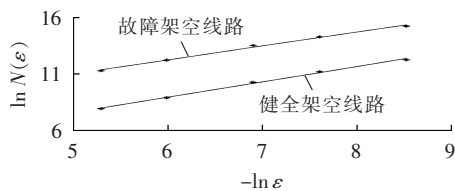


图 10 架空线路分形盒维数

Fig.10 Fractal box dimension of overhead line

由图 9 和图 10 可知,健全架空线路的零模电流波形形态比故障架空线路的复杂。对应地,健全架空线路的分形盒维数大于故障架空线路的分形盒维数。

同样,假设支路 L_1 发生故障,故障线路与健全电缆线路及健全缆-线混合线路的时域波形如图 11(a) 所示,对应的分形盒维数如图 11(b) 所示,图中,

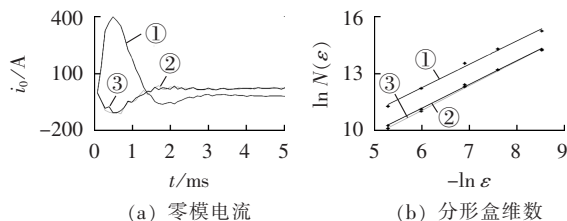


图 11 故障架空线与健全电缆线的暂态零模电流及其分形盒维数

Fig.11 Transient zero-mode current and corresponding fractal box dimension for faulty overhead line and healthy cable line

故障架空线路、健全缆-线混合线路、健全电缆线路的 D_c 分别为 1.233 1、1.290 0 和 1.248 42。

由图 11 可看出,故障线路、健全电缆线路、健全缆-线混合线路的波形复杂度较为相似,对应分形盒维数区分不大。

现假设支路 L_1 距离量测端 10 km,故障初相角为 90° ,不同过渡电阻下的零模电流如图 12(a) 所示,对应的分形盒维数如图 12(b) 所示,图中,过渡电阻为 30 Ω 、100 Ω 、300 Ω 情况下对应的 D_c 分别为 1.247 1、1.245 1、1.231 3。

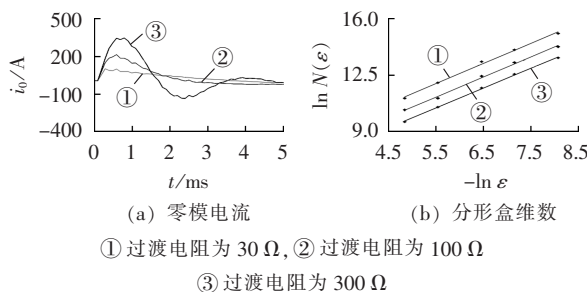


图 12 支路 L_1 故障时不同过渡电阻下的暂态零模电流波形和对应的分形盒维数

Fig.12 Transient zero-mode current and corresponding fractal box dimension for different transition resistances, when line L_1 is faulty

由图 9—12 可知,采用分形盒维数来定量地描述波形的复杂度时,故障线路、健全电缆线路、健全缆-线混合线路的波形的分形盒维数的区别较小;而对于同一故障位置、不同过渡电阻的情况,分形维数区别较小,可见,采用分形盒维数刻画时域波形的特征,其值受过渡电阻的影响很小。

现有的故障选线装置对于永久性单相接地故障、弧光接地,故障选线的正确率很高。而对于树梢放电、蔓藤放电会呈现高阻,电缆段绝缘老化亦有高阻接地故障(HIF)现象。现场研究表明,上述这些情况下,过渡电阻可达到 1000~3000 Ω ,但是没有一种选线保护装置可以启动。除非采用突变量启动,但这样会导致选线装置频繁启动而无法开展正常选线。因此,通常仿真单相高阻接地时,采用接近或大于其波阻抗来表征。

3.2 零模电流波形的小波能量熵测度

小波变换与相对熵相结合的小波能量相对熵是一种能量的度量,它可以放大暂态零模电流能量上的细微差别。根据线路故障的充放电过程可知,采用小波能量相对熵刻画各线路的能谱分布,健全线路之间的小波能量相对熵较小,故障线路与健全线路之间的小波能量相对熵较大 [7,9-11]。

对于正交小波变换,变换后各尺度的能量可直接由其单支重构后的小波系数的平方得到。故定义尺度 j 下线路 $L_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的暂态零模电流能量为:

$$E_{ij} = \sum_{k=1}^N D_j^2(k) \quad j=1,2,\dots,m \quad (4)$$

其中, $k=1,2,\dots,N$ (N 为暂态零模电流在故障后 5 ms 时窗内的采样点数); $i=1,2,\dots,n$ (n 为配电网线路数目); m 为小波包分解的尺度(频带)。

现假设支路 L_1 距离量测端 10 km 处发生金属性接地故障,故障初相角为 90° 。选取故障后 5 ms 的暂态零模电流,采用 db10 小波包进行 5 层分解,并根据式(4)计算出各线路在 5 个尺度下的高频暂态能量分布如图 13 所示。其中,尺度 1—5 的频率范围分别为 2.5~5.0 kHz、1.25~2.5 kHz、625~1250 Hz、312.5~625 Hz 和 156.25~312.5 Hz。

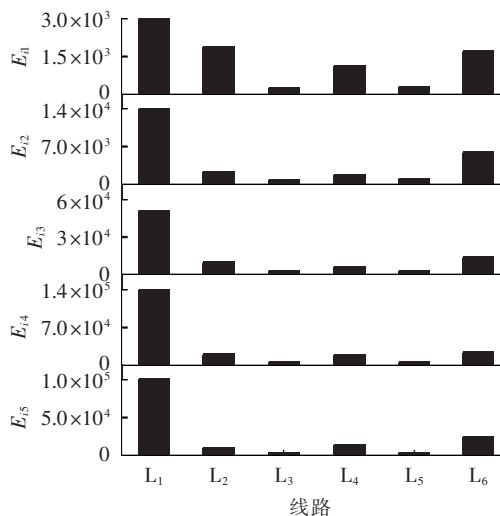


图 13 各尺度下的零模电流能量分布

Fig.13 Energy distribution of zero-mode current for different scales

所有出线在尺度 j 下的总能量为:

$$E_j = \sum_{i=1}^n E_{ij} \quad (5)$$

在尺度 j 下支路 L_i 的能量与总能量之比 p_{ij} 为:

$$p_{ij} = \frac{E_{ij}}{E_j} \quad j=1,2,\dots,m \quad (6)$$

其中, $\sum_{j=1}^m p_{ij} = 1$, 这里 $m=5$ 。

据相对熵理论,得到线路 L_i 相对于线路 L_l 的小波能量相对熵为:

$$M_{il} = \sum_{j=1}^m \left| p_{ij} \ln \frac{p_{ij}}{p_{lj}} \right| \quad i=1,2,\dots,n; l=1,2,\dots,n \quad (7)$$

根据式(7),可以得到线路 L_i 相对于其余各线路的综合小波能量相对熵为:

$$M_i = \sum_{l=1}^n (M_{il} + M_{li}) \quad i=1,2,\dots,n \text{ 且 } i \neq l \quad (8)$$

其中, M_{li} 为线路 L_l 相对于线路 L_i 的小波能量相对熵。

由式(5)—(8)得到支路 L_1 故障下,各尺度下的各线路综合小波能量相对熵如图 14 所示,图中波形由上至下分别对应尺度 1、2、3、4、5。

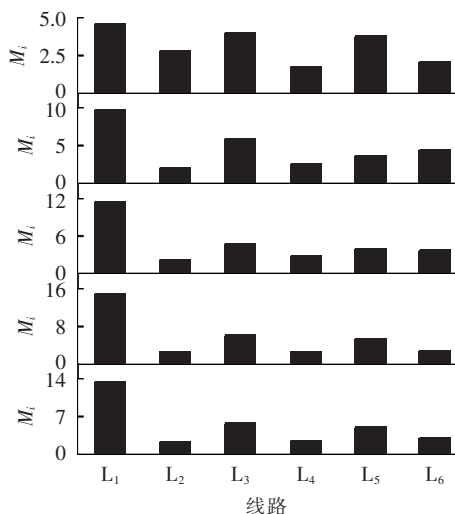


图 14 各尺度下的综合小波能量相对熵

Fig.14 Integrated wavelet energy relative entropy for different scales

由于配电网的结构不同,配电网中各线路的长度不同,其零模电流在各个频带的小波能量分布也会有所差异。为了更好地刻画故障能量分布情况,现选取能量最大且故障线路与健全线路间差异最大的频带作为特征频带,并在此频带(尺度)下计算综合小波能量相对熵。由图 13 和大量仿真结果可知,在尺度 4 下暂态零模电流小波能量最大。故本文选用尺度 4 作为特征频带来计算综合小波能量相对熵。

4 基于分形盒维数和相对能量熵的综合选线方法

当配电网线路中含有电缆线路或线-缆混合线路时,若单独采用分形盒维数定量地描述故障波形并作为故障选线的唯一测度时,往往不能选出故障线路。而相对能量熵是一个能量的度量,它受故障位置、故障初相角和过渡电阻的影响较大。所以本文利用分形维数和综合小波能量相对熵这 2 种不同的表征测度,对故障信号特征进行定量描述和分析,克服单一判据选线的不足。现采用如图 1 所示的仿真模型,沿各线路在不同故障条件下,每隔 1 km 设置故障位置,由 MATLAB 电磁暂态仿真获得量测端的暂态零模电流曲线。将仿真获取到的暂态零模电流曲线,选取故障后 1/4 周期时窗内数据,采用 db10 小波进行 5 层分解后,计算得到综合小波能量相对熵;同时计算出各样本曲线的分形盒维数。将分形盒维数与综合小波能量相对熵作为表征故障特征的测度,并将其映射到二维平面上,如图 15 所示。

由图 15 可知,故障线路和健全线路样本数据在小波能量相对熵和分形盒维数形成的平面上聚类成 2 类点簇,易于采用聚类来刻画。关键是采用哪种聚类算法来描述和刻画故障线路和健全线路这 2

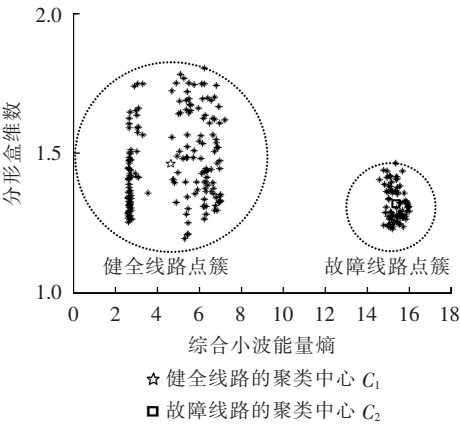


图 15 二维空间上的故障样本数据
Fig.15 Fault sample data in 2-dimension space

类点簇。

K -means 聚类是一种把簇的形心定义为簇内点均值的划分技术^[12]。首先从数据集中随机地选择 K 个样本数据,每个样本数据代表一个簇的初始中心。对剩下的每个样本数据,根据其与其各个簇中心的欧氏距离,将它分配到最近的簇。然后,计算新的簇均值作为中心,并重新分配样本数据。继续迭代直到分配稳定。如图 15 所示,健全线路和故障线路样本数据在二维平面形成简单的“球状簇”,对于这类点簇采用基于欧氏距离的 K -means 聚类算法就能很好地描述和刻画。

现采用 K -means 聚类算法得到 2 个聚类中心,分别为 $C_1=(4.698,1.461)$ 和 $C_2=(15.373,1.313)$ 。现以与聚类中心欧氏距离最远的样本点确定半径 r_1 和 r_2 ,得到的包围圆如图 15 所示。由图 15 可知,健全线路和故障线路样本点均落在以 C_1 和 C_2 为圆心, r_1 和 r_2 为半径的圆上,并将该平面称为故障线路的判断平面。可见,采用 K -means 聚类算法实现了健全线路和故障线路点簇的可靠划分。

由图 15 可知,当配电网线路发生故障时,按照上述方法得到各线路故障数据的分形盒维数和能量相对熵,并将其映射到聚类空间。若线路 L_i 故障数据点落在健全线路点簇的包围圆上,则线路 L_i 没有故障;若 L_i 线路故障数据点落在故障线路点簇的包围圆上,则线路 L_i 故障。由于图 15 所示的聚类结果没有考虑到各种故障条件,因此根据故障数据点是否落在包围圆上来判断线路 L_i 是否故障的容错性稍低。

现采用欧氏距离来计算测试样本与 C_1 和 C_2 之间的距离,即:

$$d_p=\sqrt{(C_1-c_{p1})^2+(C_2-c_{p2})^2} \quad p=1,2 \tag{9}$$

其中, (c_{p1},c_{p2}) 为 $C_p(p=1,2)$ 的坐标; d_1 为测试样本与健全线路的聚类中心 C_1 的距离, d_2 为测试样本与故障线路的聚类中心 C_2 的距离。

根据测试数据在聚类空间上的坐标与故障样本数据聚类中心之间的距离构建的基于 K -means 聚类分析的故障选线判据为:

$$d_{i,\min}=\min(d_1,d_2) \quad i=1,2,\cdots,n \tag{10}$$

由式 (10) 可知,若 $d_{i,\min}=d_2$,则出线 L_i 故障;若 $d_{i,\min}=d_1$,则出线 L_i 未故障;若 $d_{1,\min}=d_{2,\min}=\cdots=d_{n,\min}=d_1$,则为母线故障。

5 选线方法仿真验证

对本文方法进行仿真验证,仿真系统如图 1 所示,现避开样本数据集进行测试。在不同故障条件下进行仿真验证。不同故障类型、不同过渡电阻、不同故障初相角下的仿真测试结果如表 1 和图 16 所示。母线故障测试结果如图 17 所示。

由图 16 可知,健全线路测试数据点几乎全部都落在健全线路点簇的包围圆上;而故障线路测试数据点距离故障线路点簇的包围圆较近。由表 1 可知,采用欧氏距离可以可靠地选出故障线路。由图 17 可知,母线故障情况下,所有线路数据点均落在健全

表 1 基于 K -means 聚类方法的故障选线识别结果
Table 1 Results of faulty line selection based on K -means clustering

故障情况	线路	d_1	d_2	d_1 与 d_2 比较	选线结果
L_1 距量测端 1.5 km 处故障 ($R_f=20\ \Omega$, $\theta=10^\circ$)	L_1	9.69	1.03	$d_2<d_1$	正确
	L_2	2.31	12.81	$d_2>d_1$	
	L_3	2.02	8.73	$d_2>d_1$	
	L_4	2.31	12.81	$d_2>d_1$	
	L_5	1.09	10.089	$d_2>d_1$	
	L_6	1.93	12.40	$d_2>d_1$	
L_2 距量测端 2.5 km 处故障 ($R_f=20\ \Omega$, $\theta=30^\circ$)	L_1	2.42	9.06	$d_2>d_1$	正确
	L_2	8.58	2.46	$d_2<d_1$	
	L_3	1.49	11.08	$d_2>d_1$	
	L_4	2.29	12.57	$d_2>d_1$	
	L_5	1.59	10.21	$d_2>d_1$	
	L_6	1.88	9.39	$d_2>d_1$	
L_4 距量测端 3.5 km 处故障 ($R_f=100\ \Omega$, $\theta=90^\circ$)	L_1	2.50	8.81	$d_2>d_1$	正确
	L_2	1.54	12.21	$d_2>d_1$	
	L_3	1.08	9.60	$d_2>d_1$	
	L_4	10.99	0.48	$d_2<d_1$	
	L_5	0.45	10.25	$d_2>d_1$	
	L_6	0.59	11.26	$d_2>d_1$	
L_4 距量测端 9.5 km 处故障 ($R_f=300\ \Omega$, $\theta=90^\circ$)	L_1	1.74	10.21	$d_2>d_1$	正确
	L_2	2.28	12.55	$d_2>d_1$	
	L_3	2.03	9.60	$d_2>d_1$	
	L_4	8.89	2.64	$d_2<d_1$	
	L_5	1.52	10.67	$d_2>d_1$	
	L_6	1.33	10.69	$d_2>d_1$	
母线故障	L_1	1.71	10.01	$d_2>d_1$	正确
	L_2	1.54	9.86	$d_2>d_1$	
	L_3	1.44	10.98	$d_2>d_1$	
	L_4	2.24	12.54	$d_2>d_1$	
	L_5	1.74	11.60	$d_2>d_1$	
	L_6	3.59	7.35	$d_2>d_1$	

注: R_f 为过渡电阻。

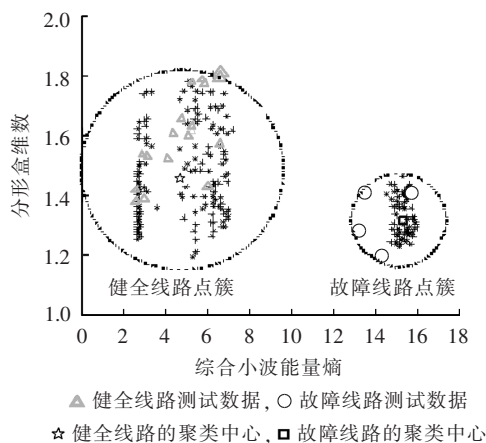


图 16 基于 K-means 聚类方法的故障选线测试结果

Fig.16 Results of faulty line selection based on K-means clustering

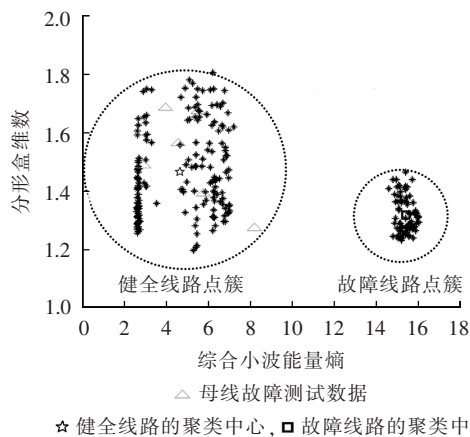


图 17 基于 K-means 聚类方法的母线故障识别结果

Fig.17 Results of bus fault identification based on K-means clustering

线路点簇的包围圆上。同时,若将大量的历史实测故障数据作为样本数据映射到如图 15 所示的二维空间,可采用 K-means 聚类算法得到新的聚类中心,提高选线的可靠性。

由上述仿真结果可知,本文方法不仅适用于纯架空线路的配电网,而且适应于含有电缆线路的配电网,容错性更高。

K-means 聚类算法的复杂度为 $O(sq t_r)$,其中 s 是样本数量^[11], q 是划分的簇数, t_r 是迭代次数。通常, $q \ll s$ 且 $t_r \ll s$ 。因此,处理大数据集时,该算法是相对可伸缩的和有效的。因此,对于故障选线,足够的时间和较为复杂的算法可以提高故障选线的可靠性。

根据上面的分析和仿真算例结果,得到基于分形盒维数和小波相对能量熵的综合选线算法的主要步骤如下,其中步骤 1—3 得到故障线路的判断平面。故障选线的算法流程如图 18 所示。

步骤 1:建立样本数据库。采用如图 1 所示的仿真模型,沿各线路在不同故障条件下每隔 1 km 设置故障位置,并由电磁暂态仿真获得的 1/4 周期时窗内

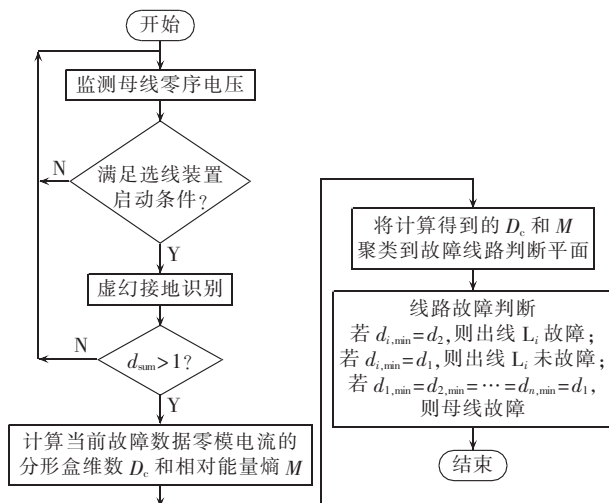


图 18 故障选线流程

Fig.18 Flowchart of faulty line selection

各线路暂态零模电流作为样本数据。

步骤 2:零模电流波形故障特征的表征。利用分形维数和综合小波能量相对熵这 2 种不同的信息测度,对故障波形的复杂性、相关性等内在特征进行定量表征,并作为故障特征识别的测度。

步骤 3:计算样本数据的聚类中心。将故障样本数据映射到分形维数和综合小波能量相对熵形成的平面上,并采用 K-means 算法得到故障线路和健全线路 2 类点簇的聚类中心 C_1 和 C_2 。

步骤 4:虚拟接地的识别。选线装置启动后,首先按照式(3)判断当前故障是线路故障还是虚拟接地,若是线路故障则转至步骤 5,若是虚拟接地则终止流程。

步骤 5:选取 1/4 周期时窗内的零模电流求取分形盒维数和小波相对能量熵后将其映射到故障线路判断平面,计算测试样本数据与各聚类中心的欧氏距离 d_1 和 d_2 。

步骤 6:选出故障线路。若 $d_{i,min} = d_2$,则判断为出线 L_i 故障;若 $d_{i,min} = d_1$,则判断为出线 L_i 未故障;若 $d_{1,min} = d_{2,min} = \dots = d_{n,min} = d_1$,则判断为母线故障。

6 结论

充分考虑电流互感器饱和、倒相、虚拟接地和电弧故障等多种因素,采用故障后 1/4 周期时窗内的零模暂态电流,提出一种基于分形盒维数和小波相对能量熵,并对二者采用 K-means 聚类划分的谐振接地系统综合选线方法。本文所得结论如下。

a. 采用零模电压与其差分构成的平面形成虚拟接地识别判据,可以可靠地识别出虚拟接地。

b. 利用分形盒维数与综合小波能量相对熵相结合作为表征故障特征的测度。其中,分形盒维数作为波形复杂程度的测度,综合小波能量相对熵作为

能量分布的测度,将两者相结合放大了故障线路与健全线路间的特征差异,使得选线效果更佳。

c. 基于 K -means 聚类分析的故障选线方法,样本中包含的故障信息越多,选线正确率越高。将大量的历史实测故障数据作为样本数据进行聚类分析,则可以进一步提高选线的可靠性。

参考文献:

- [1] 郭谋发,高源,杨耿杰. 谐振接地系统暂态波形差异性识别法接地选线[J]. 电力自动化设备,2014,34(5):59-66.
GUO Moufa,GAO Yuan,YANG Gengjie. Faulty line detection based on transient waveform difference recognition for resonant earthed system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(5):59-66.
- [2] 李彩林,廖桂源,施伟,等. 基于聚类分析和相关分析的故障选线方法[J]. 电力学报,2014,29(1):10-13.
LI Cailin,LIAO Guiyuan,SHI Wei,et al. Faulty line selection method based on correlation analysis and cluster analysis in distribution network[J]. Journal of Electric Power,2014,29(1):10-13.
- [3] 郭谋发,郑新桃,杨耿杰,等. 利用暂态波形伸缩变换的谐振接地系统故障选线方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(9):33-40.
GUO Moufa,ZHENG Xintao,YANG Gengjie,et al. Faulty line detection based on transient waveform stretching transformation for resonance-grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(9):33-40.
- [4] 杜延辉,张勤,何岩,等. 多重分形在小电流接地系统单相接地故障选线中的应用[J]. 继电器,2008,36(7):10-14.
DU Yanhui,ZHANG Qin,HE Yan,et al. Discrimination of faulty line with single phase fault in small current neutral grounding power system based on multi-fractal spectrum[J]. Relay,2008,36(7):10-14.
- [5] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京:中国电力出版社,2000:24-25.
- [6] 薛永端,李娟,徐丙垠. 中性点经消弧线圈接地系统小电流接地

故障暂态等值电路及暂态分析[J]. 中国电机工程学报,2015,35(22):5703-5714.

XUE Yongduan,LI Juan,XU Bingyin. Transient equivalent circuit and transient analysis of single-phase earth fault in arc suppression coil grounded system[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(22):5703-5714.

- [7] 束洪春. 配电网故障选线[M]. 北京:机械工业出版社,2008:23-25.
- [8] 姜兴广. 基于 EMD 与分形理论的小电流接地系统故障选线方法[D]. 秦皇岛:燕山大学,2014.
JIANG Xingguang. Study on fault line selection of small current grounding system based on EMD and fractal theory[D]. Qinhuangdao:Yanshan University,2014.
- [9] 何正友,蔡玉梅,钱清泉. 小波熵理论及其在电力系统故障检测中的应用研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(5):39-43.
HE Zhengyou,CAI Yumei,QIAN Qingquan. A study of wavelet entropy theory and its application in electric power system fault detection[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(5):39-43.
- [10] 符玲. 基于信息测度的电力系统故障识别方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2006.
FU Ling. Information measurement based fault discrimination in power system[D]. Chengdu:South West Jiaotong University,2006.
- [11] 束洪春. 电力工程信号处理应用[M]. 北京:科学出版社,2009:260-266.
- [12] 范明,孟小峰. 数据挖掘概念与技术[M]. 北京:机械工程出版社,2012:451-454.

作者简介:



束洪春(1961—),男,江苏丹阳人,教授,博士研究生导师,博士,从事电力系统新型继电保护与故障测距、故障录波、数字信号处理及 DSP 应用等方面的教研工作(E-mail: kmshe@sina.com.cn)。

Unreal grounding identification and comprehensive line selection for resonant grounding system

SHU Hongchun

(Faculty of Electric Power Engineering,Kunming University of Science and Technology,Kunming 650051,China)

Abstract: The Euclidean distance between two adjacent points on the plane formed by zero-mode voltage and its differential during a single-phase grounding is larger than that during an unreal grounding,which is adopted to identify the unreal grounding. When a grounding fault occurs in a resonant grounding system,the transient zero-mode current of a healthy line is very similar to that of another healthy line,but very different from that of the faulty line. The first quarter of post-fault power-frequency cycle is taken as the analytical time-window,the fractal box dimension and relative energy entropy are used to represent the difference of transient zero-mode current between healthy and faulty lines for selecting the faulty line,and the K -means clustering algorithm is adopted to identify the fault. Simulative analysis shows that,the proposed method can effectively select the faulty line. The reliability of faulty line selection is improved if massive historical fault data are projected onto the faulty line identification plan as samples.

Key words: resonant grounding system; unreal grounding; faulty line selection; fractal box dimension; relative entropy; K -means clustering analysis