

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.01.015

基于零序电流分布特性的配电网故障区段辨识

徐皓远¹, 刘波², 叶开¹, 彭楠¹, 梁睿¹

(1. 中国矿业大学电气与动力工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 国网江苏省电力有限公司徐州供电分公司, 江苏 徐州 221005)

摘要:针对现有配网分布式故障定位方法复杂、可靠性差、设备要求高等问题,文中借助于低采样、低成本故障指示器,提出了一种基于零序电流分布特性的配电网故障区段辨识方法。首先,定性分析线路不同位置、不同中性点接地方式下零序电流的组成成分及分布特征;然后,定量推导各情况下健全区段与故障区段零序电流幅值的差异,以此构造故障区段辨识判据;最后,结合零序电流分布特征与聚类过程,以最后2个类的距离之比确定故障线路,同时根据故障线路最后2类的分界编号确定故障区段,方法简单、有效。在PSCAD/EMTDC中搭建10 kV小电流接地系统进行仿真验证,结果表明,所提方法与故障初相角无关、抗干扰能力强,且不受故障电阻、故障位置的影响。

关键词:零序电流幅值差;层次聚类;单相接地故障;故障区段辨识

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2020)01-0110-08

0 引言

我国配电网大多为小电流接地系统,在各种故障类型中,单相接地故障发生几率最高^[1]。由于配电网拓扑结构复杂、馈线分支众多、供电半径小、电压等级低^[2-5],存在故障量不突出(一般仅为数安培)、不稳定(间歇性接地发生频繁)与不确定性(消弧线圈的补偿使工频电流失去故障特征)等问题^[6-8],难以实现精确的故障定位。近年来,小电流接地故障选线技术不断发展,研究人员提出了一系列故障选线方法,如零序导纳法^[9]、暂态能量法^[10-13]及中电阻法^[14],利用暂态电压、电流选线的方法^[15-17],已在现场取得了较好的应用效果。

随着配电自动化技术的发展,用于监测线路三相负荷电流、零序电流等运行信息的馈线终端单元、故障指示器已在配电网中大量应用,可以将故障信息实时上传至主站,综合利用分布式量测装置记录的故障信息进行故障区段定位有着越来越广阔的应用前景。文献[18]通过比较三相电流中由接地故障产生的故障电流暂态分量的相关系数判别故障区段,但故障电流暂态分量的大小易受故障电阻大小和故障发生时刻的影响。文献[19]根据流过故障区段两侧的暂态零序电流存在明显差异的特点,提出一种基于动态时间弯曲距离的配电网

故障区段定位方法,但需比较相邻馈线终端装置(feeder terminal unit, FTU)一个周波内的所有采样数据点,而通常终端设备采样频率较高,导致主站的数据处理压力较大。文献[20]推导了故障线路上、下游导纳与频率的关系,利用故障点上、下游零序电流重心频率的差异,采用K-means聚类算法判定故障区段,但单一判据在故障初相角较小时难以保证可靠性。文献[21]根据多个FTU的故障方向测度构建多指标决策优化模型,具有很强的容错能力,但需要获取相电压、电流,而馈线终端大多只配套安装线电压互感器。

综上所述,现有研究多基于高采样、高成本的终端设备,对数据通信及波形处理的要求较高,且易受现场高频噪声的干扰,实际应用效果不佳。针对以上缺陷,文中基于小电流接地系统单相接地故障零序电流分布的固有特征,依靠实际配网中应用较为广泛的故障指示器,通过基频信号的幅值差异刻画故障位置,对设备性能要求低,辨识方法简单、可靠,具有较高的实际应用价值。

1 零序电流分布特征分析

目前,小电流接地系统主要分为中性点不接地和谐振接地2种形式。以图1为例,定性分析线路上零序电流的分布特征,对于健全线路与故障线路故障点至线路末端部分,零序电流不受消弧线圈的影响,分析时不加以区分。图1中以 B 代表母线, T_1, T_2 分别为连接在母线上的2条线路。假设 f 处发生单相接地故障,将线路划分为无穷个小区间

收稿日期:2019-08-16;修回日期:2019-10-09

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804400);江苏省自然科学基金资助项目(BK20161185);江苏省“六大人才高峰”项目(XNY-046);国家电网有限公司总部科技项目(J2018078)

Δx , 虚线代表每个区间 Δx 对地电容电流的流电路径, 以不同颜色分别代表健全线路、母线至故障点线路、故障点至末端线路、电感 4 部分不同特征的零序电流, 且假设第 k 个区间 Δx 所产生的对地电容电流为 ΔI_{Ck} , 健全线路对地电容电流之和为 $\Delta I_{\Sigma C}$, 电感电流为 ΔI_L , 线路各点所流过的零序电流即为以上 4 类电流之和。图中红色、黑色、蓝色虚线分别为故障点至末端线路、健全线路、母线至故障点线路对地电容电流的流电路径, 绿色虚线为消弧线圈补偿的电感电流。

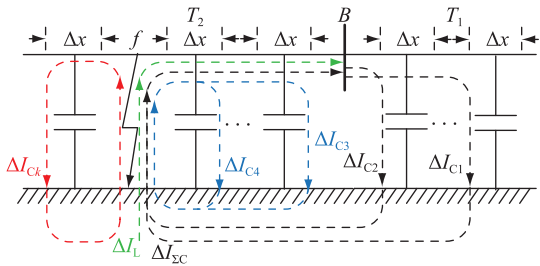


图 1 不同线路的零序电流分布
Fig.1 Zero-sequence current distribution of different lines

对于健全线路 T_1 , 任意一点零序电流为该点之后所有线路对地电容电流之和, 所以健全线路的零序电流幅值沿着出线方向递减。

对于故障线路 T_2 , 故障点至末端线路的零序电流性质与特征和健全线路一致; 而母线至故障点线路上的零序电流与中性点接地方式有关:

(1) 对于不接地系统, 该线路上任意一点的零序电流为健全线路对地电容电流与母线至该点线路对地电容电流之和, 沿母线至故障点方向递增;

(2) 对于谐振接地系统, 该段线路上的零序电流由 3 部分组成: 健全线路对地电容电流、母线至该点线路对地电容电流及消弧线圈补偿的电感电流。消弧线圈过补偿至故障点残留 I_f 小于 10 A, 该部分线路零序电流为感性, 幅值沿母线至故障点方向递减且故障点前后零序电流幅值差小于 10 A。

对于零序参数恒定的线路, 可利用式(1)计算每一点处的零序电流相量:

$$\begin{cases} \dot{I}_x^{(0)} = \dot{I}_{st}^{(0)} \cosh(\gamma^{(0)} x) - \frac{\dot{U}_{st}^{(0)}}{Z_c^{(0)}} \sinh(\gamma^{(0)} x) \\ \dot{I}_x^{(0)} = \dot{I}_{ed}^{(0)} \cosh[\gamma^{(0)}(L-x)] - \frac{\dot{U}_{ed}^{(0)}}{Z_c^{(0)}} \sinh[\gamma^{(0)}(L-x)] \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 为故障点与线路始端的距离; L 为线路总长度; $\dot{I}_{st}^{(0)}$, $\dot{U}_{st}^{(0)}$ 分别为线路始端零序电流、电压相量;

$\dot{I}_{ed}^{(0)}$, $\dot{U}_{ed}^{(0)}$ 分别为线路末端零序电流、电压相量; $\gamma^{(0)}$ 为零序网络的传播常数; $Z_c^{(0)}$ 为零序网络的特征阻抗。

由于式(1)为高阶非线性复变函数, 很难直接分析该函数的特性, 考虑使用双曲函数的 Taylor 展开式对其进行降阶处理^[22], 将方程降阶成一次函数, 即近似认为在低压配电网中, 零序电压处处相等, 将式(1)简化成式(2), 零序电流幅值的分布曲线如图 2 所示, 即:

(1) 对于健全线路, 线路始端幅值最高、末端为零; 从始端至末端电流幅值线性单调递减, 如图 2(a)所示;

(2) 对于不接地系统故障线路, 故障点至始端与故障点至末端电流幅值均线性单调递减, 二者斜率相反, 如图 2(b)所示;

(3) 对于谐振接地系统故障线路, 始端至故障点与故障点至末端电流幅值均线性单调递减, 二者斜率相同, 如图 2(c)所示。

$$\begin{cases} \dot{I}_x^{(0)} = \dot{I}_{st}^{(0)} - \frac{\dot{U}_{st}^{(0)}}{Z_c^{(0)}} \gamma^{(0)} x \\ \dot{I}_x^{(0)} = \dot{I}_{ed}^{(0)} - \frac{\dot{U}_{ed}^{(0)}}{Z_c^{(0)}} \gamma^{(0)} (L-x) \end{cases} \quad (2)$$

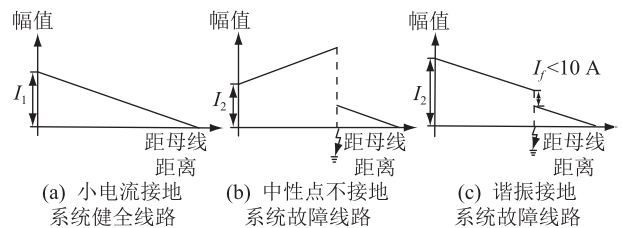


图 2 健全线路与故障线路零序电流幅值分布
Fig.2 Zero-sequence current amplitude distribution of healthy feeder and faulty feeder

2 故障区段辨识方法

2.1 区段辨识判据

图 3 为典型的配电网结构示意图, 母线带接地变经消弧线圈接地, 线路上安装有分布式故障指示器, 相邻故障指示器间距记为 L_s 。按照从左往右, 从上到下的顺序, 对故障指示器进行编号, 记为 p_q , p 代表该故障指示器所在的支路, q 代表每条支路上故障指示器的排序, 此外, 把相邻的 2 个故障指示器 i, j 之间的线路定义为区段 S_{i-j} 。

假设线路 C_2 发生单相接地故障, 由第 1 章的分析可知, 健全线路、母线至故障点线路、故障点至末端线路这 3 部分的零序电流特征各异。因此, 下面以图 3 健全线路 C_1 中的健全区段 S_{i+2} 、故障线路 C_2

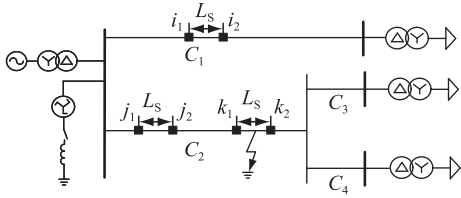


图3 典型的配电网结构

Fig.3 Typical distribution network structure

中的健全区段 $S_{j_1j_2}$ 与故障区段 $S_{k_1k_2}$ 为例,分析说明故障区段定位判据。

由于线路上的零序电压幅值处处相等,等于故障点 f 处的零序电压 $U_f^{(0)}$,规定故障后零序电流的流向为正方向,则根据式(2)可得,线路上任意点 x 处由对地电容产生的零序电流幅值为:

$$I_x^{(0)} = U_f^{(0)} \left| \frac{\gamma^{(0)}}{Z_c^{(0)}} \right| L_x \quad (3)$$

式中: L_x 为 x 点上游(x 位于故障点上游)/下游(x 位于故障点下游)线路的长度之和,上/下游线路指的是 x 至始/末端部分线路与 x 点上/下级母线相连的全部健全线路。

对于中性点不接地系统,线路中的零序电流仅为对地电容电流,健全区段 $S_{i_1i_2}$ 与 $S_{j_1j_2}$ 两端的零序电流幅值差均为该区段对地电容电流之和:

$$\begin{cases} \Delta I_i^{(0)} = I_{i_1}^{(0)} - I_{i_2}^{(0)} = \\ U_f^{(0)} \left| \frac{\gamma^{(0)}}{Z_c^{(0)}} \right| |L_{i_1} - L_{i_2}| = U_f^{(0)} \left| \frac{\gamma^{(0)}}{Z_c^{(0)}} \right| L_s \\ \Delta I_j^{(0)} = I_{j_2}^{(0)} - I_{j_1}^{(0)} = \\ U_f^{(0)} \left| \frac{\gamma^{(0)}}{Z_c^{(0)}} \right| |L_{j_2} - L_{j_1}| = U_f^{(0)} \left| \frac{\gamma^{(0)}}{Z_c^{(0)}} \right| L_s \end{cases} \quad (4)$$

式中: L_{i_1}, L_{i_2} 分别为 i_1, i_2 点下游线路的长度之和; L_{j_1}, L_{j_2} 分别为 j_1, j_2 点上游线路的长度之和。

故障区段 $S_{k_1k_2}$ 两端的零序电流幅值差为上、下游线路对地电容电流之差:

$$\Delta I_k^{(0)} = I_{k_1}^{(0)} - I_{k_2}^{(0)} = U_f^{(0)} \left| \frac{\gamma^{(0)}}{Z_c^{(0)}} \right| (L_{k_1} - L_{k_2}) \quad (5)$$

式中: L_{k_1} 为 k_1 点上游线路的长度之和; L_{k_2} 为 k_2 点下游线路的长度之和。

对于谐振接地系统,母线至故障点线路会流过消弧线圈产生的电感电流,该电感电流对健全区段 $S_{i_1i_2}$ 没有影响,且在计算健全区段 $S_{j_1j_2}$ 两端零序电流幅值差时互相抵消:

$$\begin{cases} \Delta I_i^{(0)} = \Delta I_i^{(0)} = U_f^{(0)} \left| \frac{\gamma^{(0)}}{Z_c^{(0)}} \right| L_s \\ \Delta I_j^{(0)} = (I_L - I_{j_1}^{(0)}) - (I_L - I_{j_2}^{(0)}) = U_f^{(0)} \left| \frac{\gamma^{(0)}}{Z_c^{(0)}} \right| L_s \end{cases} \quad (6)$$

式中: I_L 为消弧线圈产生的电感电流幅值。

故障区段 $S_{k_1k_2}$ 中,电感电流从 k_1 端流过,对区段两端零序电流幅值差产生影响:

$$\begin{aligned} \Delta I_k^{(0)} &= (I_L - I_{k_1}^{(0)}) - I_{k_2}^{(0)} = \\ I_L - U_f^{(0)} \left| \frac{\gamma^{(0)}}{Z_c^{(0)}} \right| (L_{k_1} + L_{k_2}) \end{aligned} \quad (7)$$

从式(4)一式(7)可以看出,无论采用何种中性点接地方式,健全区段幅值差均为该区段对地电容电流之和。对于中性点不接地系统,故障区段幅值差为上、下游线路对地电容电流之差。通常配网分支众多,故障点上、下游线路长度差别很大,故障区段幅值差远大于健全区段幅值差,即:

$$\Delta I_k^{(0)} \gg \Delta I_i^{(0)} = \Delta I_j^{(0)} \quad (8)$$

对于谐振接地系统,通常要求消弧线圈处于过补偿工作方式,补偿后的故障点残留 I_f 小于 10 A,可将式(7)写成如下形式:

$$\Delta I_k^{(0)} = I_f + U_f^{(0)} \left| \frac{\gamma^{(0)}}{Z_c^{(0)}} \right| L_s \quad (9)$$

故障区段幅值差一般远大于健全区段幅值差:

$$\Delta I_k^{(0)} \gg \Delta I_i^{(0)} = \Delta I_j^{(0)} \quad (10)$$

因此,文中将故障区段与健全区段两端零序电流幅值差的差异作为故障区段辨识判据。

2.2 基于层次聚类算法的故障区段辨识

由 2.1 节的结论可知,健全区段两端零序电流幅值差恒定,而故障区段零序电流幅值差不同,因此,可利用层次聚类算法分辨故障区段。此外,从式(3)可以看出,不同故障条件下,各线路故障指示器的零序电流幅值变化趋势相同,考虑到实际现场中存在的噪声干扰与故障电阻的不稳定波动,故障波形产生畸变,可以利用全周波傅里叶算法提取工频信号幅值,对应时刻变换后的数据仍符合 2.1 节的分布特征,这样,可以对多组数据进行层次聚类,确定故障区段,尽量消除错误数据及测量误差带来的影响,提高辨识方法的准确性。

将第 m 条线路的 n 个故障指示器数据进行傅里叶变换,将变换后 n 组长度为 r 的数据排成列放入矩阵中,称之为数据对象矩阵,记为 $\mathbf{I}_m, \mathbf{I}_m$ 为 $r \times n$ 矩阵。将 \mathbf{I}_m 的每一列看作反映故障信息的 r 维数据对象 \mathbf{O} ,也称为一个类,全部的 n 列数据作为数据对象集合,使用曼哈顿距离 $D_{o_i o_j}$ 度量 2 个不同的 r 维数据对象 $\mathbf{O}_i, \mathbf{O}_j$ 之间的距离:

$$D_{o_i o_j} = \sum_{k=1}^r |\mathbf{O}_i(k) - \mathbf{O}_j(k)| \quad (11)$$

式中: i 和 j 取 $1, 2, \dots, n, i \neq j$ 。

按照以下步骤,使用层次聚类算法对整个数据

对象集合分解:

- (1) 计算 n 个数据对象之间的曼哈顿距离, 构成距离矩阵;
 - (2) 合并距离最小的 2 个类, 形成新的类, 新类的 r 维数据使用合并前 2 个类的均值代替;
 - (3) 重新计算新类与其余类之间的距离, 形成新的距离矩阵;
 - (4) 重复(2)、(3), 直到所有类合并成一类。
- 分别计算最后一个类的距离 D_{mL1} 与前一个类的距离 D_{mL2} 的比值 D_m , 如式(12)所示。

$$D_m = \frac{D_{mL1}}{D_{mL2}} \quad (12)$$

易知, 健全线路的计算结果接近 1, 故障线路的计算结果远大于 1, 即 $\max(D_m)$ 所对应的线路为故障线路, 根据聚类结果, 2 个类的分界故障指示器所对应的区段即为故障区段。特殊地, 对于母线故障, 所有线路对应的 D_m 均为 1, 此时 $\max(D_m)$ 也等于 1, 可据此判断母线故障。图 4 为故障区段辨识流程图。

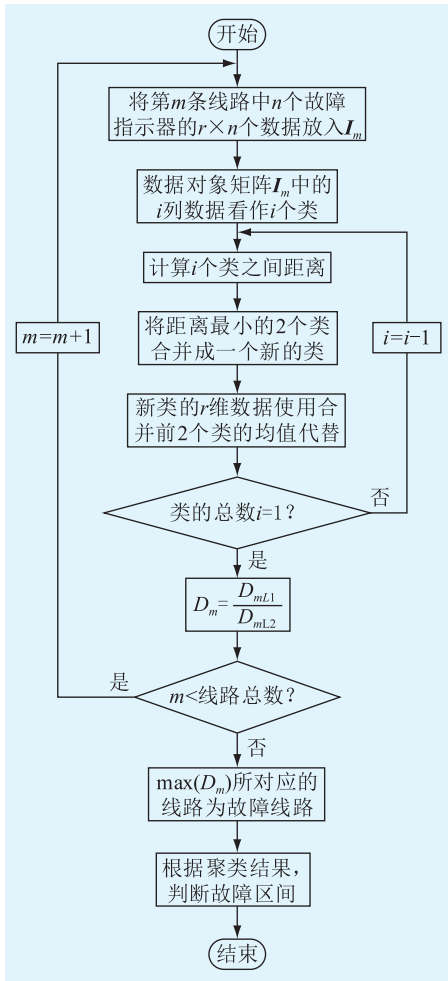


图 4 故障区段辨识流程

Fig.4 Fault section identification flow chart

3 仿真验证

3.1 降阶误差分析

在 PSCAD 中搭建 2 条出线电缆的中性点不接地系统模型, 线路长度均为 10 km, 线路参数分别选择配网中常见的 10 种不同截面积(截面积 50~500 mm²)的 YJV8.7/15 kV 电缆参数。在一条线路上设置 A 相接地故障, 故障电阻 10 Ω, 利用健全线路上的仿真数据, 从不同形式函数曲线的变化趋势差异, 分析降阶处理的误差。

皮尔逊相关系数常用于描述 2 个变量之间的相关性(变化趋势), 为验证降阶函数曲线与原始函数曲线的相似程度, 利用健全线路始端的零序电压、电流, 代入式(13)中 3 种不同形式电流分布函数, 步长为 1 m, 计算沿线不同位置零序电流幅值。

$$\begin{cases} I_x^{(0)} = \left| \dot{I}_{st}^{(0)} \cosh(\gamma^{(0)} x) - \frac{\dot{U}_{st}^{(0)}}{Z_c^{(0)}} \sinh(\gamma^{(0)} x) \right| \\ I_{1,x}^{(0)} = \left| \dot{I}_{st}^{(0)} - \frac{\dot{U}_{st}^{(0)}}{Z_c^{(0)}} \gamma^{(0)} x \right| \\ I_{2,x}^{(0)} = \left| \frac{1}{2} \dot{I}_{st}^{(0)} (\gamma^{(0)} x)^2 - \frac{\dot{U}_{st}^{(0)}}{Z_c^{(0)}} \gamma^{(0)} x + \dot{I}_{st}^{(0)} \right| \end{cases} \quad (13)$$

式中: $x=0, 1, 2, \dots, L, L$ 为健全电缆线路的长度。

将以上计算结果按照顺序排列, 得到线路沿线的零序电流幅值向量 $I^{(0)}, I_i^{(0)}$:

$$\begin{cases} I^{(0)} = (I_0^{(0)}, I_1^{(0)}, \dots, I_L^{(0)}) \\ I_i^{(0)} = (I_{i,0}^{(0)}, I_{i,1}^{(0)}, \dots, I_{i,L}^{(0)}) \end{cases} \quad (14)$$

式中: i 取 1 或 2, 分别代表一次函数、二次函数。

以 $I^{(0)}$ 为基准向量, 将向量 $I_i^{(0)}$ 与 $I^{(0)}$ 的皮尔逊相关系数定义为降阶函数与原始函数的相似度, 计算公式如下所示:

$$\rho_{I^{(0)}, I_i^{(0)}} = \frac{\text{cov}(I^{(0)}, I_i^{(0)})}{\sigma_{I^{(0)}} \sigma_{I_i^{(0)}}} \quad (15)$$

式中: cov, σ 分别为协方差与标准差。

YJV8.7/15 kV 1×300 型电缆对应的 3 种健全线路零序电流幅值分布曲线如图 5 所示。

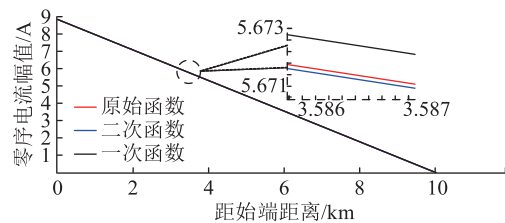


图 5 3 种形式的零序电流分布

Fig.5 Three forms of zero-sequence current distribution

10 种不同截面积电缆的相似性分析结果如图 6 所示。

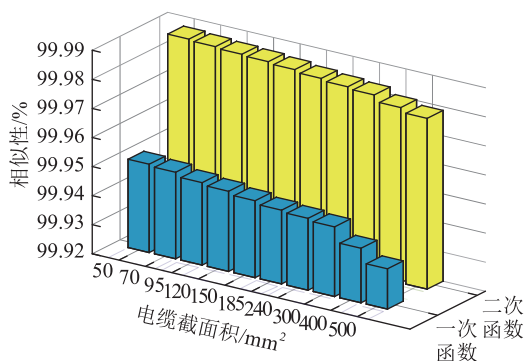


图 6 不同截面积电缆的降阶误差

Fig.6 Order reduction errors of cables with different cross-sectional areas

从图 6 可以看出,对于不同截面积的电缆,截面积越大,降阶函数与原函数的相似性越小,但依旧在 99.9% 以上。

3.2 算例分析

在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 7 所示 10 kV 配电网仿真模型,系统共 10 条电缆线路,具体参数见表 1。在线路上间隔 1 km 布置一个故障指示器并编号,采样频率参照现场实际应用的故障指示器,设置为 4 kHz。实际上,由香农采样定理可知,提取工频信号,最低只需要 100 Hz,因此,若配网中所安装设备(不限于故障指示器)的采样频率在 100 Hz 以上、且能向主站传递数据,均可用于文中算法。在线路 C_9 中距始端 6.5 km 处设置 A 相单相接地故障,故障电阻为 100 Ω ,故障初相角为 90°,中性点接地方式为不接地。具体的线路长度、变压器变比、负载容量见表 2、表 3。

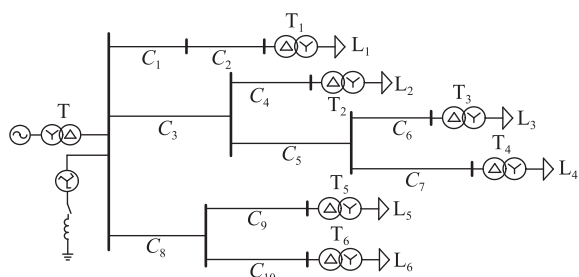


图 7 10 kV 配电网仿真模型

Fig.7 Simulation model of 10 kV distribution network

利用卡伦鲍厄变换将线路上各测点电流信号解耦成零模电流信号,并使用全周波傅里叶变换提取零序电流的幅值,图 8 为仿真得到的故障后零序电流幅值分布图。可以看出,在整个故障过程中,相同采样时刻所对应的零序电流幅值沿线分布规律均一致,与理论分析结果一致。

表 1 电缆线路参数

Table 1 Cable line parameters

参数	数值
$R^{(+)} / (\Omega \cdot \text{m}^{-1})$	5.080×10^{-5}
$L^{(+)} / (\text{H} \cdot \text{km}^{-1})$	3.059×10^{-4}
$C^{(+)} / (\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$	4.599×10^{-7}
$R^{(0)} / (\Omega \cdot \text{m}^{-1})$	5.156×10^{-5}
$L^{(0)} / (\text{H} \cdot \text{km}^{-1})$	5.857×10^{-4}
$C^{(0)} / (\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$	3.382×10^{-7}

表 2 线路长度

Table 2 The length of lines

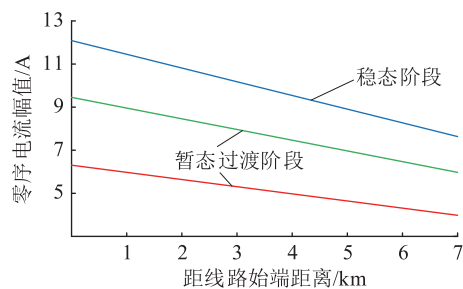
编号	长度/km	编号	长度/km
C_1	8	C_6	7
C_2	6	C_7	5
C_3	4	C_8	7
C_4	6	C_9	9
C_5	7	C_{10}	9

表 3 变压器变比和负荷容量

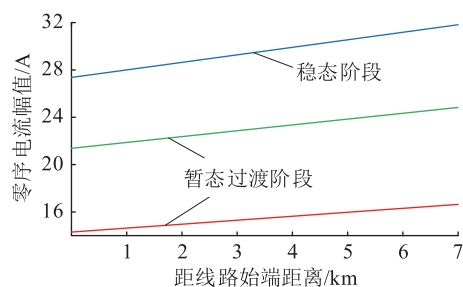
Table 3 Transformer ratio and load capacity

变压器			负载	
编号	变比/(kV/kV)	容量/(MV·A)	编号	容量/(MW+Mvar)
T	110/10	20	L_1	0.38+j0.27
T_1	10/0.4	2	L_2	0.15+j0.03
T_2	10/0.4	1	L_3	0.40+j0.30
T_3	10/0.4	2	L_4	0.10+j0.08
T_4	10/0.4	1	L_5	0.30+j0.08
T_5	10/0.4	1	L_6	0.40+j0.20
T_6	10/0.4	2		

对故障发生 0.02 s(模拟故障指示器的启动时间)后,各条线路 2 个周期波形进行傅里叶变换,变



(a) 线路 C_3 的零序电流幅值分布



(b) 线路 C_8 的零序电流幅值分布

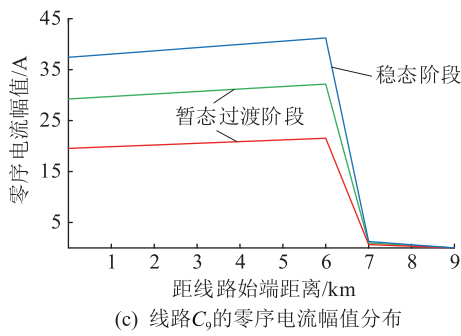


图8 零序电流幅值分布特征

Fig.8 Amplitude distribution characteristics of zero sequence current

换结果分别放入数据对象矩阵 I_m 中, 并进行聚类分析, 健全线路与故障线路的层次聚类树状图如图9所示, 按照2.2节的方法辨识故障区段, 所有线路的聚类分析结果如表4所示。

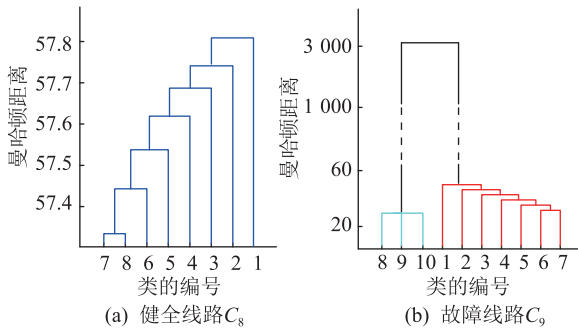


图9 健全线路与故障线路的层次聚类树状图

Fig.9 Hierarchical clustering tree diagram of sound lines and fault line

表4 不同线路的聚类结果

Table 4 The clustering results of different lines

线路	聚类结果	D_{m11}	D_{m12}	D_m
C_1	(((((((9,8),7),6),5),4),3),2),1)	59.31	59.31	1.000 00
C_2	(((((((7,6),5),4),3),2),1)	59.32	59.32	1.000 00
C_3	(((5,4),3),2),1)	59.27	59.23	1.000 68
C_4	(((((((7,6),5),4),3),2),1)	59.37	59.37	1.000 00
C_5	(((((((8,7),6),5),4),3),2),1)	59.51	59.49	1.000 34
C_6	(((((((8,7),6),5),4),3),2),1)	59.54	59.54	1.000 00
C_7	(((6,5),4),3),2),1)	59.52	59.51	1.000 17
C_8	(((((((8,7),6),5),4),3),2),1)	57.66	57.59	1.001 22
C_9	(((((((7,6),5),4),3),2),1), (8,9),10)	3 386	57.80	58.581 3
C_{10}	(((((((10,9),8),7),6),5),4),3),2),1)	58.36	58.35	1.000 17

从聚类分析结果可以看出, 与其他线路相比, D_{C_9} 的值最大, 即故障线路为 C_9 , 分界故障指示器为 IX_7 与 IX_8 , 即故障区段为 $S_{IX_7-IX_8}$ 。

3.3 故障条件的影响

为了测试不同故障条件对故障区段辨识的影

响, 验证所提方法的有效性, 分别在线路 C_2, C_5, C_8 上设置 A 相接地故障, 并改变故障接地方式与故障电阻, $\max(D_m)$ 与故障区段辨识结果如表5所示。从表5的结果可以看出, 对于中性点不接地系统, 故障电阻的改变对 $\max(D_m)$ 的大小没有影响, 即故障区段辨识的结果不受过渡电阻影响; 对于谐振接地系统, 过渡电阻的变化会影响 $\max(D_m)$ 的大小, 这是由于文中所定义的 D_m 和故障区段幅值差与健全区段幅值差的比值成正比, 对于中性点不接地系统, 从式(4)、式(5)可知, 二者之比仅与故障位置有关, 故障电阻不会影响 $\max(D_m)$ 的大小; 对于谐振接地系统, 从式(4)、式(9)可知, 二者之比与零序电压、补偿电流、故障位置有关, 故过渡电阻的变化会影响 $\max(D_m)$ 的值。虽然 $\max(D_m)$ 会受到过渡电阻的影响, 但与健全区段相比, 故障区段幅值差仍有显著的差异, 能够加以区分。综上所述, 文中所提能够适用于小电流接地系统, 对于不同类型的故障, 均有较高的辨识精度。

表5 不同故障条件下的故障区段辨识结果
Table 5 Fault section identification results under different fault conditions

故障线路	故障位置	接地方式	故障电阻/ Ω	$\max(D_m)$	故障线路聚类结果	故障区段
C_2	距线路首端 1.5 km	不接地	10	60.013 4	(1,2), (((3,4),5),6),7)	$S_{II-2-II3}$
			300	60.013 4		
		谐振接地	10	8.984 73		
			300	8.571 21		
C_5	距线路首端 2.1 km	不接地	10	34.347 2	((1,2),3), (((4,5),6),7),8)	S_{V3-V4}
			300	34.347 2		
		谐振接地	10	8.235 17		
			300	8.359 12		
C_8	距线路首端 3.6 km	不接地	10	20.194 2	(((5,6),7),8), ((4,3),2),1))	$S_{VIII-4-VIII5}$
			300	20.194 2		
		谐振接地	10	9.411 89		
			300	8.408 06		
			1000	7.790 04		

3.4 与已有方案的对比分析

文献[23—24]利用故障后的暂态信息进行配电网区段定位。其中, 文献[23]利用了故障线模行波首波头的频谱分量, 因此需要较高的采样频率。由于行波幅值受故障电阻和故障初相角影响较大, 存在高频噪声, 有时难以准确提取频谱所需分量,

且须事先离线获取数据库,因此其工程实用性受限。文献[24]定义了三相电流及零序电流的单位小波能量熵作为相应特征,并将其作为多层神经网络模型的输入量,进而实现区段定位。所提方法仍无法避免高阻故障下暂态信号不明显的缺点以及训练集数据获取难的问题。文中方法克服了以上缺点,无需历史故障数据,且因仅需提取零序电流基频分量,故不需高采样频率,具有抗噪声能力强的优点。3种故障区段辨识方法对比如表6所示。

表6 3种故障区段辨识方法对比
Table 6 Comparison of three fault section identification methods

方法	采样频率/kHz	抗噪能力	故障历史数据	过渡电阻范围/ Ω
文献[23]	300	较弱	需要	0~150
文献[24]	7.68	较弱	需要	0~100
文中方法	4	强	不需要	0~1 000

虽然受限于目前实际配网测量装置的采样精度,高阻故障下零序信号微弱、难以检测,文中方法可能失效或发生误判,但随着配电自动化的进一步发展,方法的适用范围也会随之提高。

4 结论

文中分析小电流接地系统单相接地故障的零序网络,以线路上的零序电流幅值分布规律为基础,根据健全线路与故障线路的零序电流幅值差异,构造判据辨识故障区段,具有以下特点:

(1) 基于零序基频分量,采样要求低、抗噪能力强,提高了区段辨识方法的适应性;

(2) 使用多周期故障数据,放大区段两端零序电流幅值的差异,抗干扰能力强,提高了区段辨识方法的可靠性;

(3) 对故障数据进行层次聚类分析,定义距离比值筛选故障线路,简单、直观,提高了区段辨识方法的准确性。

仿真结果表明,文中方法能够适用于较宽故障电阻范围的小电流系统稳定性单相接地故障。此外,文中方法从理论上无法适用于间歇性故障和弧光故障,对于现场中较为微弱的间歇性故障,可与传统的绝缘监测方法相结合,弥补文中方法的缺陷。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019009)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 梁睿,孟祥震,周鲁天,等. 配电网故障定位技术发展现状及展望[J]. 电力工程技术,2018,37(6):20-27.

LIANG Rui, MENG Xiangzhen, ZHOU Lutian, et al. Status quo and prospect of distribution network fault location[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6): 20-27.

[2] 张妹,何正友,林圣,等. 基于充放电暂态特征的谐振接地系统单相接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(9):13-20.

ZHANG Shu, HE Zhengyou, LIN Sheng, et al. Fault location based on charge and discharge transient characteristic of the single-phase fault in the resonant grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 13-20.

[3] DONG X Z, WANG J, SHI S X, et al. Traveling wave based single-phase-to-ground protection method for power distribution system[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(2): 75-82.

[4] 刘健,张小庆,李品德,等. 基于熄弧倍增原理的配电网单相接地故障处理[J]. 电网技术,2016,40(11):3586-3590.

LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, LI Pinde, et al. A novel approach treating single-phase ground fault in distribution system [J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3586-3590.

[5] 常仲学,宋国兵,黄炜,等. 基于相电压电流突变量特征的配电网单相接地故障区段定位方法[J]. 电网技术,2017,41(7):2363-2370.

CHANG Zhongxue, SONG Guobing, HUANG Wei, et al. Phase voltage and current fault components based fault segment location method under single-phase earth fault in distribution network [J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2363-2370.

[6] 沈兴来,杨智. 基于故障全信息的自适应模糊融合选线技术[J]. 电力工程技术,2017,36(6):90-95.

SHENG Xinglai, YANG Zhi, A self-adapted fault line selection method based on complete data fusion theory [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(6): 90-95.

[7] TENG J H, HUANG W H, LUAN S W. Automatic and fast faulted line-section location method for distribution systems based on fault indicators [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1653-1662.

[8] MAJIDI M, ETEZADI A M, SAMI F M. A novel method for single and simultaneous fault location in distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 41(9): 13-20.

[9] 曾祥君,尹项根,张哲,等. 零序导纳法馈线接地保护的研究[J]. 中国电机工程学报,2001,21(4):5-10.

ZENG Xiangjun, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Study on feeder grounding fault protection based on zero sequence admittance [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 5-10.

[10] 束洪春,刘娟,王超,等. 谐振接地电网故障暂态能量自适应选线新方法[J]. 电力系统自动化,2006,30(11):72-76.

SHU Hongchun, LIU Juan, WANG Chao, et al. Adaptive method for fault circuit selection in arc suppression coils system by using transient energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(11): 72-76.

[11] 林湘宁,高艳,刘沛,等. 基于零序补偿导纳的小电流接地系统单相故障保护新方法[J]. 中国电机工程学报,2006,

- 26(10):45-49.
- LIN Xiangning,GAO Yan,LIU Pei,et al. A novel method to identify the single phase-to-earth fault in the neutral ungrounded system using the zero-sequence compensated admittance [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10):45-49.
- [12] 吴丽,郑昕,朱小红,等. 三相四线制系统中计及零序电流特性的分布式电源逆变器有功和无功功率控制[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(22):126-133.
- WU Li,ZHENG Xin,ZHU Xiaohong,et al. Active and reactive power control with zero sequence current characteristics for distributed generation inverters in three-phase four-wire system [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22):126-133.
- [13] 尤向阳,葛笑寒,吴萍. 基于零序电流波形相似度的接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(14):125-130.
- YOU Xiangyang,GE Xiaohan,WU Ping. Grounding fault location method based on waveform similarity of zero-sequence current[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14):125-130.
- [14] 明志强,许虎. 经消弧线圈接地系统的中电阻快速选线方法[J]. 电网技术,2009,33(12):112-114.
- MING Zhiqiang,XU Hu. Method of fast grounding fault line selection with arc-suppression coil and median resistor [J]. Power System Technology, 2009, 33(12):112-114.
- [15] 戴剑锋,张艳霞. 基于多频带分析的自适应配电网故障选线研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(5):44-47.
- DAI Jianfeng,ZHANG Yanxia. Study on adaptively choosing fault line under single-phase to ground fault based on analysis of multi-frequency bands[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5):44-47.
- [16] ABDEL F M F, LEHTONEN M. Transient algorithm based on earth capacitance estimation for earth-fault detection in medium-voltage networks[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(2):161-166.
- [17] 索南加乐,李宗朋,王莉,等. 基于频域参数识别方法的配电网单相接地故障选线[J]. 电力系统自动化,2012,36(23):93-97,125.
- SUONAN Jiale,LI Zongpeng,WANG Li,et al. Fault line selection in distribution networks based on parameter identification method in frequency domain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23):93-97,125.
- [18] 孙波,张承慧,孙同景,等. 基于暂态相电流的小电流接地故障定位研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(18):69-74.
- SUN Bo,ZHANG Chenghui,SUN Tongjing, et al. Earth fault location based on transient phase current in non-solidly earthed network [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18):69-74.
- [19] 刘鹏辉,黄纯. 基于动态时间弯曲距离的小电流接地故障区段定位方法[J]. 电网技术,2016,40(3):952-957.
- LIU Penghui,HUANG Chun. Fault section location method for small-current grounding fault in distribution network based on dynamic time warping distance [J]. Power System Technology, 2016, 40(3):952-957.
- [20] 张姝,杨健维,何正友,等. 基于线路暂态重心频率的配电网故障区段定位[J]. 中国电机工程学报,2015,35(10):2463-2470.
- ZHANG Shu,YANG Jianwei,HE Zhengyou, et al. Fault section location of the distribution network based on transient center frequency [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10):2463-2470.
- [21] 贾清泉,郑旭然,刘楚,等. 基于故障方向测度的配电网故障区段定位方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(20):5933-5941.
- JIA Qingquan,ZHENG Xuran,LIU Chu, et al. Method of fault section location in distribution networks based on fault direction measures [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20):5933-5941.
- [22] LIANG R,PENG N,YANG Z, et al. A novel single-phase-to-earth fault location method for distribution network based on zero-sequence components distribution characteristics [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 102:11-22.
- [23] ADEWOLE A C, TZONEVA R, BEHARDIEN S. Distribution network fault section identification and fault location using wavelet entropy and neural networks [J]. Applied Soft Computing, 2016, 46:296-306.
- [24] SADEH J, BAKHSHIZADEH E, KAZEMZADEH R. A new fault location algorithm for radial distribution systems using modal analysis [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 45(1):271-278.

作者简介:



徐皓远

徐皓远(1995),男,硕士在读,研究方向为电力系统保护与定位(E-mail: xuhaoyuan@cumt.edu.cn);

刘波(1983),男,硕士,工程师,从事电网运维相关工作;

叶开(1995),男,硕士在读,研究方向为电网故障定位、小电流接地选线。

(下转第164页)

Fault diagnosis of on-load tap-changer based on the parameter-adaptive VMD and SA-ELM

QIAN Guochao^{1,2}, PENG Qingjun², CHENG Zhiwan², GU Hongrui¹, YU Hong²

(1. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650200, China)

Abstract: Mechanical vibration signal can reflect the running state of on-load tap-changer. In order to realize effective mechanical fault diagnosis for on-load tap-changer, a fault diagnosis method based on the parameter-adapted variational mode decomposition (VMD) and extreme learning machine optimized by simulated anneal (SA-ELM) is proposed. Firstly, the signal is decomposed by VMD method, and the number of modals is selected based on energy criterion. A group of modal components with narrow band and great discrimination is obtained. Then the energy features of each modal component are calculated, which form the feature vector group, and the modal features of different fault states are clearly distinguished. Finally, the feature vector group is input to the extreme learning machine (ELM) optimized by simulated annealing algorithm to realize the recognition and fault diagnosis of the vibration signals. An experiment is carried out on the simulation experiment platform and the collected signals are processed. Compared with the method based on VMD and ELM, the fault diagnosis method proposed can effectively improve the diagnostic accuracy of mechanical fault of on-load tap-changer.

Keywords: on-load tap-changer; variational mode decomposition; modal energy; extreme learning machine; fault diagnosis

(编辑 方晶)

(上接第 117 页)

Identification of fault zones in distribution network based on zero sequence current distribution characteristics

XU Haoyuan¹, LIU Bo², YE Kai¹, PENG Nan¹, LIANG Rui¹

(1. School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. State Grid Xuzhou Power Supply Company of Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Xuzhou 221005, China)

Abstract: Aiming at the problems of complex fault location method, poor reliability and high equipment requirements of existing distribution network, a fault segment identification of distribution network based on zero-sequence current distribution characteristics is proposed by means of low-sampling and low-cost fault indicators method. Firstly, the composition and distribution characteristics of zero-sequence current in different locations and different neutral grounding modes of the line are analyzed qualitatively. Then the difference between the zero-sequence current amplitude of the healthy section and the fault section in each case is derived quantitatively, thereby constructing the fault segment identification criterion. Finally, combined with the zero-sequence current distribution feature and the clustering process, the fault line is determined by the ratio of the distance between the last two classes, and the fault segment is determined according to the last two types of boundary numbers of the fault line. The method is simple and effective. The 10 kV low-current grounding system is built in PSCAD/EMTDC for simulation verification. The results show that the proposed method has nothing to do with the initial phase angle of the fault and has strong anti-interference ability, and is not affected by the fault resistance and fault location.

Keywords: zero sequence current amplitude difference; hierarchical clustering; single phase ground fault; fault zone identification

(编辑 陈静)