

DOI: 10.7667/PSPC160312

面向智能变电站的输电线路综合故障定位方法研究

姚旭¹, 程蓉^{2,3}, 崔力心¹, 拜润卿¹, 康小宁²

(1. 国网甘肃省电力公司, 甘肃 兰州 730030; 2. 陕西省智能电网重点实验室, 西安交通大学, 陕西 西安 710049;
3. 国网河北省电力公司经济技术研究院, 河北 石家庄 050011)

摘要: 针对智能变电站条件下, 因采样速率过低导致行波测距无法应用的问题, 提出了一种面向智能变电站的输电线路工频综合故障定位方法。所提方法可以在现有各种单端工频测距方法中, 选择出测距精度最高的方法, 从而给出准确的故障位置信息。目前现有的各种工频测距方法的测距精度会受到电源、对端系统阻抗以及过渡电阻等参数的综合影响, 在不同的故障条件下, 各方法的测距精度会有不同的表现。首先获取输电线路发生故障时的大量训练样本, 应用粗糙集理论对训练样本进行属性约简, 找出测距精度与故障条件之间的内在关系。在系统发生故障时, 应用 KNN 算法在多种工频测距方法中找到测距结果最准确的方法, 计算故障距离。ATP 仿真结果及 RTDS 仿真实验显示, 所提方法可以成功避开误差较大的方法, 选择实际精度最优的方法, 有效提高测距精度。

关键词: 智能变电站; 单端工频测距; 属性约简; KNN 算法; RTDS

Study of comprehensive transmission line fault location method for smart substation

YAO Xu¹, CHENG Rong^{2,3}, CUI Lixin¹, BAI Runqing¹, KANG Xiaoning²

(1. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730030, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Smart Grid, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Hebei Electric Power Company Economic Research Institute, Shijiazhuang 050011, China)

Abstract: In a smart substation and due to the low sampling rate, travelling wave fault location cannot be applied. Therefore, a novel algorithm for transmission line fault location in smart substations is proposed. The algorithm can select the best fault location method among the conventional single-ended frequency fault location methods, and then get a value that is the closest to the fault. The conventional frequency fault location methods have various source of error, and fault location result is affected by power source, the opposite system impedance, transition resistance and other parameters. In different fault cases, every method has different location accuracy, namely the most accurate location method always varies with varying parameters. In this paper, firstly we construct a large number of training samples of transmission line fault, secondly the rough set theory is used to reduce training samples and find the intrinsic relationship between fault location and system parameters. When transmission line has a fault, this algorithm can search for the most accurate fault location method by k-Nearest Neighbor method and finally give the most credible fault distance. The results of ATP simulation and RTDS simulation show that the algorithm can successfully avoid the method of larger system error and select the optimal method and greatly improve the fault location accuracy.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Gansu Electric Power Company (No. 522722140043).

Key words: smart substation; single-ended fault location; attribute reduction; KNN algorithm; RTDS

0 引言

输电线路准确的故障定位对于快速查找故障点、及时修复故障线路, 保证电网安全稳定运行具

有重要的意义^[1]。行波测距的高精度使其成为目前我国输电线路故障定位的主要方法^[1-2], 但随着智能数字化变电站技术的推广应用, 特别是电子式互感器的使用, 行波信号的获取因电子式互感器采集单元采样频率的限制(4 kHz), 导致行波定位方法难于应用到数字化智能变电站^[3-5]。对此, 目前有三种应

基金项目: 国网甘肃省电力公司科技项目(522722140043)

对措施,一是装设专为故障定位服务的电磁式电流互感器和行波采集单元;二是对电子式互感器采集单元进行改造,增加独立的行波采集卡;三是采用工频测距方法。前两种方法需要增加投资并对已有设备进行改造,因此有必要研究替代行波测距的经济可靠的工频测距方法。此外,对于没有安装行波测距装置的变电站,工频测距方法仍是主要的故障定位方法。但是,单端工频测距方法原理上无法消除系统性误差,其定位效果不理想,尤其是对同一故障,不同方法给出的定位结果往往大相径庭,让运行人员无法选择。因此,研究智能变电站条件下高压输电线路的工频故障定位问题,对于提高电网运行的可靠性具有重要意义^[6-8]。

现有的多种单端工频测距方法构造的测距方程中含有三个未知量:故障点的故障电流、故障距离和过渡电阻,但仅有实部、虚部两个方程,不满足定解条件。对此现有方法往往根据电网的特点增加一个接近工程实际的假设条件得到定解。其中,文献[9-10]提出的阻抗法假设故障点电流与测量点故障分量电流同相位得到定解,该方法易受系统运行方式和负荷电流的影响;文献[11]提出的解微分方程法易受高过渡电阻的影响;文献[12]提出的解复数方程法在电压方程的左右两端分别乘以测量端故障分量电流的共轭复数再取方程的虚部得到故障距离,当两侧系统阻抗角相差较大或线路重载时会产生较大误差;文献[13]提出的解二次方程法补充定义了测量点零序或正序电流分布系数表达式代入电压方程联立得到关于故障距离的一元二次方程,方法需要典型对端系统的参数值,同时必须解决伪根的判别问题;文献[14]提出的回路电流法假定对侧系统为无穷大系统,故障后对侧母线电压不变,方法的运算量较小,但假设条件过于理想。

综上所述,目前常用的几种工频测距方法采用了不同的简化假设,均存在系统性误差,测距精度会受到电源、对端系统阻抗以及过渡电阻等参数的综合影响,测距误差会随着故障条件,运行参数的变化而表现出不同的特性。当输电线路发生故障时,如果能根据故障条件,系统参数,波形信息等影响测距精度的因素,在各种方法中选择出测距结果最准确的方法,就可以在工程应用中大幅提高测距精度,同时避免运行人员面对多个定位结果无从选择的难题。

本文在获取输电线路发生故障时的大量训练样本的基础上,应用粗糙集理论对训练样本进行属性约简,找出各种方法的测距精度与故障条件、系统参数之间的内在关系。在系统发生故障时,应用

KNN 算法在多种工频测距方法中找到测距结果最准确的方法,计算故障距离。仿真及 RTDS 实验验证了本文方法的有效性。

1 综合故障定位方法的基本原理

在 EMTP-ATP 中建立三相输电线路故障模型,如图 1 所示。

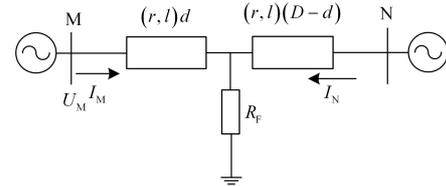


图 1 单相接地经过渡电阻故障模型图

Fig. 1 Structure of single-phase grounding fault with resistance

设 M 端为测量端,现有的各种单端工频测距方法,其基本测距原理都是基于以下的频域测距方程(1)或时域测距方程(2)。

$$\dot{U}_M = \dot{I}_M (r + j\omega_0 l) d + (\dot{I}_M + \dot{I}_N) R_F \quad (1)$$

$$u_M = r di_M + ld \frac{di_M}{dt} + (i_M + i_N) R_F \quad (2)$$

式中: r, l 分别为线路单位长度的电阻和电感参数; $\dot{U}_M, \dot{I}_M, \dot{I}_F$ 分别为测量点电压、电流相量和故障点故障电流相量; u_M, i_M, i_F 分别为测量点电压、电流瞬时值和故障点故障电流瞬时值; R_F 为故障点过渡电阻; d 为故障点到测量点 M 的距离。

由 $\dot{U}_M = \dot{I}_M (r + j\omega_0 l) d + (\dot{I}_M + \dot{I}_N) R_F$ 这个基本的测距方程可以看到,过渡电阻会对测距结果造成影响;对端正序、负序阻抗角与 \dot{I}_M 和 \dot{I}_N 有关,从而也影响测距结果。考虑到电源电压与 \dot{U}_M 、 \dot{I}_M 有关,并且故障暂态过程影响着相量计算精度。因此,在测距方程中隐含了以下 7 个系统参数:本端电源幅值、相位;对端电源幅值、相位;对端系统正序阻抗角、零序阻抗角和过渡电阻。现有的单端工频故障定位方法中阻抗法(方法 1)、解微分方程法(方法 2)、解复数方程法(方法 3)、解二次方程法(方法 4)和回路电流法(方法 5)等工频测距方法都是在上述频域、时域电压方程的基础上加上不同的假设条件得到的。这些条件的变化,对不同的方法测距精度会产生不同的影响。

综合故障定位方法的基本思想是:首先建立输电线路故障仿真模型。对模型中可能影响测距精度的因素根据工程上的可能范围进行不同的设定,并据此得到大量的故障仿真波形。其次,利用故障仿真数据并采用现有多种故障定位方法得到故障测距

结果,将各种方法测距精度与故障条件做成属性表。然后对属性表进行属性约简,得到故障条件与最佳测距方法之间的属性关系。最后,根据实际故障录波数据及故障条件,利用上述属性关系选择合适的故障定位方法计算故障距离。

具体实现过程如下:

1.1 确定数据集

为了寻找以上7种因素与测距方法精度之间的内在联系,首先利用图1模型分别调整以上七个参数,得到各种情况下的故障波形数据。然后,利用波形数据分别用阻抗法、解微分方程法、解复数方程法、解二次方程法和回路电流法这五种工频测距方法进行计算得到五个相应的故障距离。

将每种参数设置情况下得到的五个故障距离与故障模型中实际的故障距离相比较,相对误差最小的方法就定义为该参数设置情况下的最优方法。在获取了这些输电线路发生故障时的大量训练样本信息之后,就可以构造出一个数据集供后面使用,数据集的前七列分别为各个故障情况下七个系统参数的设置值,第八列为各个故障情况下其最优测距方法的编号。

1.2 数据集属性约简

上述的数据集是一个非常庞大的表格,包括了大量的训练样本和系统参数。根据这个数据集,需要知道7个系统参数的数值才能确定最后一列最优测距方法,而在7个系统参数中,有的参数对测距结果的精度有着决定性的作用,有的影响甚微。因此,需要应用属性约简的方法对当前数据集进行简化,删除关联度小的参数以及实际工程上难于获取的参数,找出对测距精度影响最大的关键因素,最终利用约简后的属性表确定最优测距方法。

对数据集表格进行属性约简,首先需要构造决策表^[15],决策表的前几列为条件属性,最后一列为决策属性,每一行的决策信息组成论域,其含义就是在论域中,根据一组条件属性的值可以唯一确定它的决策属性的数值。本文中,决策表的论域为之前整理的整个数据集,条件属性对应的就是数据集的前七列,决策属性对应的就是数据集的最后一列。

属性约简主要采取计算决策属性对条件属性依赖度的方法。从七种条件属性中可以选取几个组合成新的条件属性组合,当决策属性对某种条件属性组合的依赖度大于95%时,认为只需保留该条件属性组合中包含的这几个属性,根据他们的数值就可以正确判断出决策属性,从而得到约简结果。

计算依赖度的数学方法如下:定义两元组决策表 $S=(U, A)$, $U \neq \emptyset$ 为论域,其一共包含了 m 行训练样本的决策信息 $e_1, e_2 \dots e_m$; $A=C \cup D$ 且有 $C \cap D = \emptyset$ 为属性集合,其中 C 为条件属性集合 $C_1, C_2 \dots C_n$, D 为决策属性。设 $C' \subseteq C$ 为某些条件属性组成的集合,用 U/C' 表示 C' 的所有等价类构成的集合。 D 的 C' 正域 $|\text{pos}_{C'}(D)|$ 表示集合 $\cup\{Y \in U/C' | Y \subseteq D\}$ 包含的元素个数。则决策属性 D 对条件属性组合 C' 的依赖度为 $k = \gamma_{C'}(D) = |\text{pos}_{C'}(D)|/m$ 。

本文首先分别计算决策属性对单个条件属性的依赖度,若得到的七个依赖度数值中有超过95%的,则约简只需保留该条件属性即可;若得到的七个依赖度数值较小,则取出前两个依赖度较大的条件属性组成一个集合,对该集合计算一次依赖度,若数值达到95%,则完成计算,属性约简保留该两个条件属性即可,若仍未达到,则继续添加条件属性组成新的集合,计算依赖度直至达到标准。

最终的约简结果就是在原本的决策表中保留决策属性和使依赖度达标的条件属性组合,删除掉剩下的冗余条件属性。约简后的数据集简单清晰,只需根据保留的几个系统参数的值就能够给出决策,判断出该故障条件下哪种工频测距方法为最优测距方法。

1.3 基于KNN算法的综合定位方法

约简后的数据集是一个离散的表格,输电线路发生某次故障时的系统参数未必就正好对应表格中的某个决策,本文采用KNN算法判断实际故障数据与决策表决策的对应关系。

KNN算法基于分类与回归,其思路简单直观,易于快速实现,作为一种简单、有效、非参数的分类方法,得到了广泛的应用^[16]。其基本思想为:计算待分类样本 x 和每个训练样本的距离,取出与待分类点最近的 k 个训练样本点,统计出这 k 个点中大多数属于哪一类,则认为待分类点 x 也属于该类。

KNN算法需首先给定一个训练样本集,所有训练样本所属的类别事先给定,在本文中,约简后的数据集就是这个给定的训练样本集,所有样本的决策属性值域构成了所有的类别数,各个样本的条件属性值依次排列构成它们的特征坐标,其决策属性的值决定了所属的类别。当线路发生故障并已知故障时的系统参数后,确定了待分类点的特征坐标,此时根据KNN算法通过多数表决,预测该待分类点应属的类别,确定它的最优方法。如图2所示,

坐标系中被包围的三个圆圈是训练样本集, 他们由约简后的数据集确定, 每个样本根据自己的特征坐标置入空间, 各样本所属的不同类别用不同的形状表示, 圆点表示该样本点属于类别 W_1 (该点采用方法 1 时测距精度最高), 三角形表示类别 W_2 , 长方形表示类别 W_3 。待分类点 x 用五角星表示, 根据故障时的系统参数, 按照特征坐标置入特征空间。计算待分类点与所有训练样本的欧式距离, 选出距离它最近的 k 个点, 若这 k 个点中大多数点属于类别 W_1 , 则认为该待分类点也应属类别 W_1 , 也就是线路此次发生的故障使用方法 1 测距的精度最高, 其他情况同理。

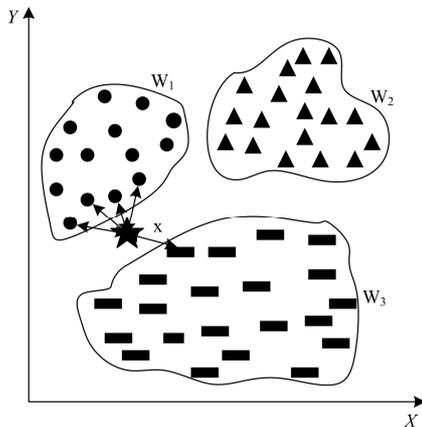


图 2 KNN 算法介绍

Fig. 2 Structure of KNN algorithm

KNN 算法的效果很大程度上依赖于 k 值的选则, 如果 k 值选择过小, 意味着有效的近邻数过少, 放大了噪声数据的干扰, 分类精度相应降低; 如果 k 值选择过大, 一方面加大了运算量, 另一方面, 假设待分类样本属于训练集中总数据量较小的那一类, 在实际上选择 k 个近邻时, 可能会由于 k 值过大, 许多其他类别的数据也会被包含进来, 导致分类结果错误。

本文 k 值的求取方法如下: 再次在双端电源系统三相输电线路经过渡电阻单相接地故障模型中任意改变 7 个系统参数的设置值, 得到八种故障波形数据, 分别用五种测距算法进行测距得到它们最优方法的编号; 同时根据这八种故障的系统参数, 设定一个 k 值, 应用 KNN 算法也可以对每种故障情况预测出一个最优方法的编号。通过改变 k 值使得在八种故障情况下两个编号获得最大的重合, 也就是 KNN 算法能够最大程度上准确预测出输电线路发生故障时采用哪种测距算法能够得到最准确的结果, 该 k 值即可选定。

2 EMTP 仿真验证结果

2.1 建模确定数据集

以京津唐 500 kV 输电线路为例, 建立京津唐 500 kV 三相输电线路经过渡电阻单相接地故障模型, 如图 1 所示, 线路长度为 $D=300$ km; 线路参数为 $r_1=0.02083 \Omega/\text{km}$, $l_1=0.8984 \text{ mH}/\text{km}$, $r_0=0.1148 \Omega/\text{km}$, $l_0=2.2886 \text{ mH}/\text{km}$ 。两侧电源幅值的变化范围是 0.95 倍到 1.05 倍的额定电压, 相位的变化范围是 0° 到 180° , 对端系统零序、正序阻抗角的变化范围是 50° 到 89° , 过渡电阻的变化范围是 0Ω 到 200Ω , 分别改变 7 个参数, 用 5 种单端工频测距方法进行测距按照 1.1 的方法得到数据集。

为便于书写, 定义本端电源幅值为参数 1、本端电源相位为参数 2, 对端电源幅值为参数 3、对端电源相位为参数 4、对端系统正序阻抗角为参数 5、零序阻抗角为参数 6、过渡电阻为参数 7, 相应地, 阻抗法为方法 1, 解微分方程法为方法 2, 解复数方程法为方法 3, 解二次方程法为方法 4, 回路电流法为方法 5。

由于数据集过于庞大, 不便列出具体数值, 这里仅给出结论。对数据集进行分析, 结果显示五种测距方法在各种故障条件下表现出的测距准确度是不同的, 测距准确度最高的方法随着参数的变化而变化。五种测距方法对某种故障情况的绝对测距误差最大会达到 10 km 以上, 最大相对误差达到 4%。

2.2 计算数据集的属性约简

接下来进行第二步, 对数据集进行属性约简, 计算得到的决策对各种条件属性集合的依赖度如表 1 所示。

表 1 决策属性对各条件属性集合的依赖度结果

Table 1 Results of the decision attribute of each condition attribute sets			
属性组合	决策对属性组合的依赖度	属性组合	决策对属性组合的依赖度
1、2、5、6、7	96.02%	1、2、5、7	83.33%
1、5、6、7	74.13%	1、2、6、7	83.08%
2、5、6、7	93.53%	1、2、5、6	61.19%
1、6、7	65.17%	1、5、6	34.33%
2、6、7	78.11%	2、5、7	78.36%
5、6、7	69.15%	1、2、7	61.44%

由表 1 结果看到, 决策对条件属性集合 1、2、5、6、7 的依赖度为 96.02%, 大于 95% 满足要求。所以对数据集的约简需要保留五个参数: 本端电源幅值、本端电源相位、对端系统正序阻抗角、零序阻抗角和过渡电阻, 根据这 5 个参数就可以在

96.02%的正确率内给出决策, 选出准确度最高的测距算法。

2.3 验证基于 KNN 算法的综合定位方法

输电线路发生故障后首先要求解待分类点的特征向量, 也就是上步约简保留的 5 个系统参数。本端电源的幅值和相位通过故障分量网络求得本端系统阻抗和电源的各序分量, 再利用对称分量变换得到; 过渡电阻通过解二次方程法最终的二次方程中代入求解得到; 对端系统的正序阻抗角和零序阻抗角通过对电网运行方式进行查询给出。

改变参数设定出 8 种故障条件, 采用步骤三的方法确定了 $k=23$, 综合定位方法的选择结果如表 2 所示。由下表结果看出, 本文提出的综合定位方法选择结果较好, 能在输电线路发生故障时在多种工频测距方法中选择出测距准确度最高的方法, 避开误差较大的方法, 将测距相对误差控制在 1%以内。

表 2 各测距方法的误差及 KNN 选择结果

Table 2 Errors of each fault location methods and KNN selection results

序号	方法 1/ %	方法 2/ %	方法 3/ %	方法 4/ %	方法 5/ %	最优 方法	KNN 选 择的方法
1	0.138	0.272	0.138	-0.44	0.790	方法 1	方法 1
2	1.879	1.933	1.879	-0.23	18.26	方法 4	方法 4
3	3.212	3.215	3.212	-0.97	-0.90	方法 5	方法 4
4	0.021	0.076	0.021	-0.23	-0.23	方法 3	方法 3
5	0.830	0.909	0.830	-0.79	9.148	方法 4	方法 4
6	0.777	0.834	0.777	-0.42	-8.52	方法 4	方法 4
7	0.451	0.495	0.451	0.019	5.873	方法 4	方法 4
8	0.242	0.258	0.242	0.339	-1.67	方法 1	方法 1

3 RTDS 仿真结果

在 RTDS 实时数字仿真仪中搭建 2.1 中所述的京津唐 500 kV 输电线路模型, 分别仿真在线路总长度的 10%、30%、50%、70%、90%处发生金属性接地、经 20 Ω 阻抗接地, 经 50 Ω 阻抗接地故障。应用上节所述方法对各种故障情况进行仿真验证, 方法选择的结果如表 3 所示。

由表中 RTDS 的仿真数据可以看到, 本文 KNN 方法绝大多数情况下能够选择到最优测距方法; 部分情况下会选到次优的测距方法, 显著提高了测距精度。

造成 RTDS 实验的结果与 EMTP 仿真结果的差异的主要原因有以下两个方面: 第一, RTDS 试验采用的是分布参数模型与 EMTP 仿真实验的模型不同, 存在差异; 第二, RTDS 得到的故障波形数据

相比 EMTP 仿真会受到更多的干扰, 电压电流数据会有偏差, 由这些数据计算出来的 5 个系统参数也存在一些偏差, 造成 KNN 算法的待分类点特征坐标不够准确, 最终导致了 RTDS 的实验结果不如 EMTP 的仿真结果。

表 3 各故障情况下的测距误差及 KNN 选择结果

Table 3 Errors of each fault conditions and KNN selection results

故障 距离	过渡电 阻/Ω	方法 1/ %	方法 2/ %	方法 3/ %	方法 4/ %	方法 5/ %	KNN 选 择的方法
10%	0	0.528	0.684	0.528	0.311	12.6	方法 4
10%	20	0.501	1.876	0.531	0.578	12.786	方法 3
10%	50	1.540	10.986	1.540	0.956	13.249	方法 4
30%	0	0.038	1.833	0.038	0.043	14.793	方法 1
30%	20	0.398	2.784	0.398	0.003	14.677	方法 4
30%	50	1.674	8.280	1.674	0.600	14.573	方法 4
50%	0	0.023	9.525	0.023	0.036	0.381	方法 1
50%	20	0.024	15.782	0.024	0.448	0.390	方法 3
50%	50	1.173	11.044	1.173	0.757	0.393	方法 5
70%	0	0.134	6.711	0.134	0.167	12.118	方法 3
70%	20	0.554	4.090	0.554	0.758	12.051	方法 1
70%	50	0.663	9.562	0.663	3.099	12.054	方法 3
90%	0	0.378	8.667	0.378	0.450	12.756	方法 4
90%	20	0.243	16.854	0.243	1.224	12.714	方法 4
90%	50	2.425	16.921	2.425	1.567	12.963	方法 1

但是, 如果根据实际故障位置与计算结果的差异, 将不好的样本重新加入训练样本进行训练, 那么算法的性能会进一步提高, 也就是说本文方法具有一定的自学习功能。

4 结论

提出了一种面向智能变电站的输电线路单端工频综合故障定位方法, 输电线路故障时能在多种工频测距方法中选择出精度最高的方法, 给出最接近真值的故障距离。和现有技术相比较, 本方法具备如下优点:

- 1) 避开了智能变电站条件下数字式互感器采集速率低, 无法提取到行波信号的限制, 满足智能变电站故障定位要求。
- 2) 采用基于粗糙集理论的属性约简方法, 简化了测距方法的决策过程。
- 3) KNN 算法 k 值的确定能在最大范围内确保在多种工频测距算法中选择出准确度最高的算法, 提高测距精度。

参考文献

[1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.

- [2] 刘慧海, 张晓莉, 姜博, 等. 行波故障测距装置的检测与评价[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 145-149. LIU Huihai, ZHANG Xiaoli, JIANG Bo, et al. Testing and evaluation method of fault location equipment based on traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 145-149.
- [3] 周裕龙, 辛建波, 蔡文. 新型行波故障测距装置在智能变电站中的应用[J]. 江西电力, 2011, 35(5): 15-18. ZHOU Yulong, XIN Jianbo, CAI Wen. A new type of travelling wave fault location equipment used in smart transformer substation[J]. Jiangxi Electric Power, 2011, 35(5): 15-18.
- [4] 韩伟, 石光, 刘磊, 等. 智能变电站行波定位系统研发[J]. 电测与仪表, 2015(18): 96-100. HAN Wei, SHI Guang, LIU Lei, et al. Research on traveling wave location system in smart substation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015(18): 96-100.
- [5] 董义华, 孙同景, 徐丙垠. 适用于行波传变的电子式互感器信号采集与合并单元的设计与实现[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 147-151. DONG Yihua, SUN Tongjing, XU Bingyin. Design and implementation of electronic transformer signal acquisition and merging unit for traveling-wave transfer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 147-151.
- [6] 范国琛, 朱永利, 史金茂, 等. 基于 Kaiser 自卷积窗的相位比较式输电线路故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 143-148. FAN Guochen, ZHU Yongli, SHI Jinmao, et al. Fault location scheme for transmission lines using Kaiser self-convolution windowed FFT phase comparison[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 143-148.
- [7] 张金虎, 徐振宇, 杨奇逊, 等. 基于改进 RL 模型的串联补偿线路单相接地故障测距新算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 1-7. ZHANG Jinhua, XU Zhenyu, YANG Qixun, et al. A novel single-phase ground fault location algorithm for series compensated line based on improved RL model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 1-7.
- [8] 孙刚, 时伯年, 赵宇明, 等. 基于 MMC 的柔性直流配电网故障定位及保护配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 127-133. SUN Gang, SHI Bonian, ZHAO Yuming, et al. Research on the fault location method and protection configuration strategy of MMC based DC distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 127-133.
- [9] TAKAGI T, YAMAKOSI Y, YAMAURA M, et al. Development of a new type fault locator using the one terminal voltage and current data[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, PAS-101(8): 2892-2898.
- [10] WISZNIEWSKI A. Accurate fault impedance locating algorithm[C] // IEE Conference Publication, 1985: 185-187.
- [11] 徐启峰, 魏孝铭. 高压输电线故障测距的解微分方程算法中的零序电流相位修正[J]. 电力系统自动化, 1990, 14(1): 33-39. XU Qifeng, WEI Xiaoming. An algorithm with zero-sequence current angle correction for fault location of HV transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 1990, 14(1): 33-39.
- [12] YANG Q S, MORISON I F. Microprocessor based algorithm for high resistance earth-fault distance protection[J]. IEE Proceeding Generation, Transmission and Distribution, 1983, 130(11): 306-310.
- [13] 吴必信, 利用解二次方程法的故障测距仿真计算[J]. 东北电力学院学报, 1995, 15(4): 46-52. WU Bixin. Analogue computation of cable fault location based on quadratic equation method[J]. Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 1995, 15(4): 46-52.
- [14] 刘劲, 孙扬生, 罗毅. 一种基于时间域的实用单侧电量故障测距方法[J]. 电力系统自动化, 1994, 18(5): 52-56. LIU Jin, SUN Yangsheng, LUO Yi. A time domain based practical fault location algorithm using one terminal voltage and current[J]. Automation of Electric Power Systems, 1994, 18(5): 52-56.
- [15] 张文修. 粗糙集理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [16] 张宁, 贾自艳, 史忠植. 使用 KNN 算法的文本分类[J]. 计算机工程, 2005, 31(8): 171-172, 185. ZHANG Ning, JIA Ziyang, SHI Zhongzhi. Text categorization with KNN algorithm[J]. Computer Engineering, 2005, 31(8): 171-172, 185.

收稿日期: 2016-03-09; 修回日期: 2016-04-06

作者简介:

姚旭(1960-), 男, 硕士, 教授级高工, 研究方向为电力系统继电保护和安全自动装置; E-mail: yxjdbh@163.com

程蓉(1991-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: chengrong1991@stu.xjtu.edu.cn

崔力心(1977-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护和安全自动装置及自动化控制技术。

E-mail: Cuilx@gs.sgcc.com.cn

(编辑 张爱琴)