

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.06.007

架空-电缆混合输电线路故障定位方法综述

张怿宁

(中国南方电网有限责任公司超高压输电公司检修试验中心,广东 广州 510663)

摘要:对国内外学者关于架空线-电力电缆混合线路故障定位的研究进行了梳理和综述。首先分析了混合线路故障定位存在的特殊问题,然后对架空-电缆混合输电线路故障定位方法的研究现状进行了总结。现有的混合线路故障定位方法有故障分析法、行波法、频率分析法以及智能法等。其中,故障分析法和行波法的准确性主要受混合线路参数不均一的影响;行波法因故障行波会在电缆连接点处发生复杂的折反射过程而导致反射波头难以识别;能否准确地确定故障暂态信号的固有频率值将直接影响频率法故障定位精度;智能法需对样本集进行离线训练,且需存储大量数据,应用起来较为困难。最后,对下一步需要开展的研究工作进行了展望。

关键词:混合线路;故障定位;故障分析法;行波法;频率分析法

中图分类号:TM773

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)06-0044-08

0 引言

架空线路占用空间大,安全性及可靠性较差。而电缆线路具有输电容量大、可靠性高、不受周围环境和鸟类影响、占用空间小以及美化市容、优化城市布局等优点。但电缆制作工序繁杂且造价高,一般情况下,城市外采用架空线路,城市内采用电缆线路。对于岛屿与大陆或岛屿间输电,海底多采用电缆,陆地多采用架空线路。因此电网中出现了由多段架空线和电缆混合而成的输电线路^[1-3]。为了满足复杂环境的需求,架空-电缆混合线路的连接方式主要有A型和B型2种,A型混合线路由1条架空线和1条电缆组成,B型混合线路由2条架空线和1条电缆组成,即架空线-电缆-架空线形式。

输电线路故障时,故障定位能够减轻人工巡线的负担,便于快速恢复线路供电,降低因停电造成的经济损失^[4-5]。为了准确、快速确定故障点,输电线路的故障定位被广泛研究^[6-8],架空-电缆混合线路也存在故障定位的问题。由于架空-电缆混合线路与传统输电线路在很多方面存在不同,其故障定位方法与传统输电线路也不同。

综上所述,随着架空-电缆混合线路的广泛应用,其故障的快速准确定位具有越来越重要的意义。文中结合国内外学者对架空-电缆混合线路故障定位的研究,首先介绍了混合线路故障定位方法的研究现状,归纳总结为故障分析法、行波法、频率分析法以及智能法4类;然后分析了这4类方法存

在的问题和难点;最后,对下一步需要开展的研究工作进行了展望。

1 混合线路故障定位存在的特殊问题

由于架空线与电缆线在制作工艺、架设或敷设位置、几何架构等方面都存在很大差异,因此架空-电缆混合输电线路测距存在以下特殊问题^[9-12]:

(1) 架空线与电缆电气参数明显不同。相对于架空线路,电缆线工频电抗值较小,电容值较大,波阻抗较小。因此,架空-电缆混合线路测距存在沿线阻抗参数不均一,即参数呈现多区段分散特性的问题。

(2) 混合线路架空线与电缆连接点处为波阻抗不连续点,导致故障行波在连接点发生复杂的折反射过程,增加了故障点反射波识别的难度。由于电缆参数具有依频特性,使得行波初始波头陡度降低,也增加了行波波头识别的难度。

(3) 由于电缆本身的绝缘介质,导致电缆中的行波波速较低,一般为架空线行波波速的1/2~2/3。因此,对于架空-电缆混合线路,存在各段线路行波波速不同的问题,使得行波测距不能直接使用传统的单端、双端行波测距方法,而是需要根据混合线路的参数进行分段处理。

2 国内外研究现状

2.1 故障分析法

故障分析法利用线路发生故障时采集到的工频电压和电流,结合已知的线路参数以及故障特征进行分析计算,从而实现定位^[13]。根据所需要的电气量不同,可分为单端法和双端法。

收稿日期:2020-05-18;修回日期:2020-06-26

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(CG YKJX-M20180146)

单端法仅使用线路一侧电气量,根据系统运行方式以及线路参数,建立故障测距方程或函数,通过求解得到故障点与测距点之间的距离。双端法采用的是线路两侧的电气量进行故障测距^[14]。

利用故障出现的电压序分量可实现混合线路故障定位。文献[9]以均匀输电线路的波动方程为基础,利用混合线路两端电压、电流的正序故障分量以及线路正序参数直接计算故障距离。文献[15—16]通过比较从线路两端推导得到的架空线与电缆连接点处负序电压幅值的大小关系来判定故障区段,进而利用该故障区段两端的电气量计算出故障位置。考虑线路参数误差、测量误差等因素,在连接点附近故障时,文献[15]算法易发生故障区段的误判。文献[16]考虑了可能出现的测误差量等,对判定条件进行了优化。文献[17]研究了依据混合线路沿线电气量分布的快速计算方法。针对超高压架空线-电缆混合线路中的不对称故障,提出采用比较沿线负序电压幅值的故障定位方法;针对对称故障,提出采用比较沿线正序电压变化量幅值的故障定位方法。文献[18]通过全局一维搜索找出故障点的准确位置,伪根的剔除按照故障点处的电压幅值为最小值的原则。这种算法不要求两端数据同步,不受过渡电阻影响,但是存在计算量大、速度慢的问题。

根据混合线路故障时的模型建立函数,利用函数的变化也可实现故障定位。文献[19]推导出定位函数,参考点的位置不同时,定位函数的相位特征也不同。当所取参考点在故障点前后变化时,定位函数的相位会发生突变,相位发生突变的位置即为故障点。该方法定位精度较高,具有较高的鲁棒性。但定位函数推导复杂,需要同时考虑架空线和电缆的双曲正弦、双曲余弦的幅相特性。文献[20]通过故障区域识别函数相位特征的差异判断故障区域,然后利用正序测距方程实现混合线路的故障定位。文献[21]以线路连接点为参考点,规定了故障发生的正方向,利用两端电压、电流量推导出了线路连接点处的故障区段识别函数,利用其正负特征判定故障区段,然后确定故障位置。但该算法只适用于A型混合线路,无法应用到复杂的B型混合线路和更多区段的混合线路。文献[22]对算法进行了改进,可利用双端非同步数据进行故障定位。

2.2 行波测距法

行波测距法利用输电线路的故障行波传输特性实现故障位置的判别。由于提取行波信号的时间窗很短,行波测距法基本不受系统运行方式的影

响,较故障分析法测距精度高,因此得到了国内外学者的普遍重视^[23]。

(1) 单端行波法。单端行波法是通过记录由故障点向母线传播暂态行波的到达时间以及母线发射波被故障点再次反射后到达母线的的时间,然后根据这2个时间的差值计算故障距离的方法。其测距原理如图1所示。

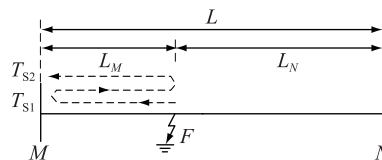


图1 单端行波测距原理

Fig.1 Principle of single-ended traveling wave ranging

图1中, F 为故障点; L 为线路全长; L_M 为线路M侧保护安装处至故障点的线路长度; L_N 为线路N侧保护安装处至故障点的线路长度; T_{S1} 为初始波到达时间; T_{S2} 为反射波到达时间。

针对混合线路故障点反射波难以识别的问题,文献[24]提出了一种基于小波分析的电缆-架空线混合输电线路行波故障测距方法。该方法将故障相与非故障相行波信号之差作为小波分析的原始信号,可消除连接点对混合线路行波测距结果的影响。但考虑到架空线路长度一般远大于电缆线路,若从架空线路侧发射脉冲信号可能造成接收反射脉冲困难,所以该方法只适用于A型混合线路。文献[25]利用连续小波变换处理故障后单端行波信号的高频分量来进行故障区段判定和故障定位。文献[26]利用希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)来识别行波波头,判定故障区段并进行单端故障定位。

(2) 双端行波法。双端行波故障定位是通过计算故障行波到达线路两端的时间差来计算故障位置,测距原理如图2所示。其中, T_M 为初始波到达线路M侧的时间; T_N 为初始波到达线路N侧的时间。

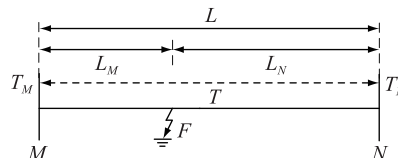


图2 双端行波测距原理

Fig.2 Principle of twin-end traveling wave ranging

双端行波故障定位不受故障类型、线路长度、接地电阻等影响^[27],其精度比阻抗法高。因此,混合线路双端行波故障定位方法被广泛研究^[28—29]。

记录故障行波到达线路两端的时间差,然后进行比较分析,可得到混合线路故障测距结果。文献[12]利用架空线与电缆连接点产生的行波到达线路两端的时间差构成故障区段查询表。文献[30]对线路进行多个故障点仿真,通过得到的行波时间差构成故障区段查询表。文献[31]将故障距离与故障行波到达线路两端的时间差制成表格查询。文献[32—33]采用时间判别法进行混合线路故障行波测距。文献[34]比较故障初始行波到达线路两侧测量点的时间差与混合线路各个连接点处行波传播到线路两侧测量点的时间差,确定故障区段,再通过时间和距离补偿,实现故障定位。

为了消除混合线路波阻抗以及波速不一致对故障定位精度的影响,文献[35]提出了利用改进HHT标定故障行波波头的算法。文献[36]提出了一种基于经验小波变换的行波检测算法,实现了波头的精确提取。文献[37]通过研究2种不同模量信号在电缆和架空线上传播特性的异同点,利用2种模量信号传播特性的差异,提出一种不受波速影响的混合线路的双端非同步行波故障测距算法,但需要额外增加装置给线路首端注入脉冲。文献[38]通过对不同线路波速进行归一化处理,试图解决混合线路波速不一致对定位准确性的影响。文献[11]同样进行了波速度归一化处理,并将单、双端行波测距方程联立求解得到电缆实时的波速度,解决了电缆波速难以确定的问题。

针对混合线路连接点处装设有变压器的情况,文献[39]提出了一种基于改进双端测距原理的故障定位方法。文中分析了经变压器传播时的行波波头特点,利用HHT消除变压器导致各次行波波头幅值减小而无法准确提取的缺陷,求取行波到达线路两端时间差值,通过将时间差值代入由整定值构造的时间轴得到故障点所在区间,最后由计算公式求得故障距离。

双端行波定位与单端行波测距的结合也被提出,即利用双端行波判定故障发生区段,然后利用单端行波故障定位方法计算故障位置^[40—42]。

行波法具有快速高效的特点,但行波法存在准确识别波头困难甚至波头识别失败的概率,因此一些学者提出了基于工频量和行波的组合算法^[43—45]。

2.3 频谱分析法

频谱分析法利用线路发生故障后暂态信号中丰富的频域信息,使用信号分析方法进一步得出故障信息,然后通过分析计算进行故障定位^[46]。

对于架空线电缆混合输电线路,由于波阻抗不

连续,会形成混叠的固有频率频谱,给正确识别和提取故障行波固有频率主成分带来困难。文献[47—48]将集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)方法运用到混合线路故障测距中,通过EEMD分解克服频谱混叠的问题,从而准确有效地提取行波固有频率主成分。

文献[49]提出了一种考虑自然频率和使用变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)算法的混合线路测距新方法。该方法对行波信号进行了经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD),利用赫斯特指数筛选本征模态分量(intrinsic mode function, IMF)作为VMD分解的模态参数,准确地分解了行波信号;引入多信号分类(multiple signal classification, MUSIC)算法对VMD分解结果进行频谱分析,提取出故障信号主自然频率及其谐波次频率;最后利用其对应关系计算出故障距离。

2.4 人工智能法

人工智能算法也被应用于混合线路故障测距,其主要思路是将测量的电压电流数据组成样本集,建立故障发生时所测量得到的各种故障特征量与故障距离间所存在的某种对应关系,然后利用人工智能技术对样本数据进行学习、训练,寻找数据间深层关系并获得模型结构参数。当线路发生故障时,结合测量的数据和已建立的模型以实现最终的故障定位^[50]。神经网络结构如图3所示。

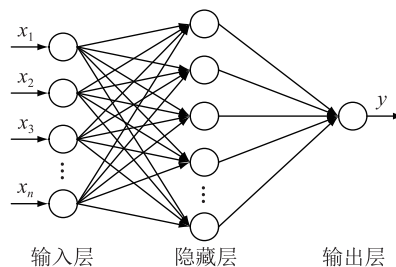


图3 神经网络结构

Fig.3 Structure of neural network

文献[51]研究了基于神经网络的多端高压架空线-电缆混合线路故障行波定位系统。在待测电缆上输入高压脉冲获得暂态行波特征,在选用的采集点测量电压,记录暂态行波数据并储存,将数据分为训练样本与测试样本,分别导入反向传播(back propagation, BP)神经网络模型,实现架空线、电缆的故障定位和诊断。

文献[52]以故障频率的特征搭建了三层前馈型BP神经网络,使用种子群优化的方式进行训练,然后建设故障测距子网络,实现远距离对线路故障进行测算,并准确判断故障位置。

3 现有方法存在的问题

3.1 故障分析法

由于架空-电缆混合线路具有更为复杂的特征,利用故障分析法进行混合线路故障定位还存在以下问题:

(1) 对于单端故障分析法,过渡电阻和系统运行方式会严重影响该方法的测距精度。而双端故障分析法虽原理上不受过渡电阻的影响,但必须使用通信通道来传递两端的测量信息,需要解决两端测量信息的同步问题^[14-15]。

(2) 假设混合线路参数已知,但实际混合输电线路电缆参数受环境影响会发生变化,从而对测距结果造成较大误差,电缆参数的不准确性造成的故障定位误差不可忽视^[53]。

(3) 该方法所建立的故障测距函数一般较为复杂,易受电气量采样值精度的影响^[2,18,20]。

(4) 由于混合线路参数的不均一,该方法会出现伪根识别问题^[23-24]。部分文献提出改进方法消除伪根问题,但计算量较大,较为耗时^[19]。

3.2 行波法

和工频故障信息不同,故障行波具有高频、暂态特性,较难分析,并且不可重复。基于故障行波的混合线路故障定位方法^[14-16,25,53-55]存在以下问题:

(1) 故障行波在架空线与电缆的连接处存在复杂的行波折反射问题,且电缆的依频特性突出,导致行波波头难以准确捕捉;

(2) 故障行波具有衰减特性,在经过较长的输电线路传播后,波头幅值较小,反射波衰减更为明显,导致波头识别困难,且容易受周围信号影响;

(3) 架空线、电缆波速不均一会影响测距结果。

3.3 频谱分析法

与行波法相比,频谱分析法不需要对行波的波头进行识别,避免了混合线路存在的波头难识别的问题。但当存在干扰信号,且干扰信号在一个或者多个频点的能量高于故障行波固有频率的能量时,频谱分析法测距结果误差较大。固有频率主成分的识别决定了该方法的可靠性,若行波频谱主成分的频率过高,可能会超过行波采集装置的采样率,导致该方法存在测距的死区。同时,能否准确确定故障暂态信号的固有频率值将直接影响频谱分析法的故障定位精度^[46,56]。

3.4 智能法

基于智能算法的故障定位方法有明显的局限

性,其定位精度容易受系统结构的影响,且需要对样本数据进行离线学习及训练,需要进行大量的线路故障仿真或采集大量故障录波数据,因此应用较为复杂^[46,50]。

3.5 小结

综上所述,目前混合线路故障定位方法的优缺点如表1所示。

表1 混合线路故障定位方法
Table 1 Hybrid line fault location methods

故障定位方法	优点	缺点
故障分析法	原理简单,低成本	易受过渡电阻、电气量采样值精度等影响,存在伪根
行波法	不受系统运行方式、过渡电阻等因素的影响	行波波头无法准确捕捉
频谱分析法	不需要对行波的波头进行识别	固有频率主成分不易准确识别
智能法	可靠性高	工作量大,实现较为复杂

由表1可知,现有混合线路故障定位方法虽各有优点,但都存在一定局限性。因此,还需对混合线路故障定位方法开展进一步研究工作。

4 展望

虽然针对架空-电缆混合线路故障定位已有大量相关研究,但仍有很多问题需要解决,有必要开展以下几个方面的研究工作。

(1) 由于已有方法各有优缺点,可将几种方法相结合,取长补短进行混合线路的故障定位。

(2) 可考虑在架空线与电缆连接点处增加行波传感器或电流、电压互感器,能够彻底解决混合线路参数不均一、波头识别困难等问题的影响。

(3) 由于架空线路的故障大多是瞬时性故障,而电缆的短路故障大部分属于永久性故障。对于架空-电缆混合高压输电线路,若故障位置处于电缆部分,开放重合闸将造成更严重事故;若全线闭锁重合闸,对于架空线路部分故障又丧失了重合机会,可能危及系统的稳定和安全运行。因此,对于混合线路,是否开展重合闸也是当前面临的难题之一,可进一步开展自适应重合闸方式、重合闸时间及时序等方法的研究。

(4) 随着我国配电网的发展及升级改造,配电网中也出现了大量架空-电缆混合线路,因此,配电网架空-电缆混合线路的故障定位需进一步研究。

5 结语

架空-电缆混合线路沿线阻抗参数分布不均一、

行波波速不一致以及架空线路和电缆连接处会形成多次行波反射,使得许多已有的基于线路均匀参数的故障测距方法受到了挑战。文中讨论了混合线路故障定位存在的问题,并将现有的混合线路故障定位方法归纳总结为4类:故障分析法、行波法、频率分析法以及智能法,梳理分析了这4类方法的优缺点和难点,最后提出了下一步需要开展的架空-电缆混合线路故障定位研究内容。

参考文献:

[1] ZHANG S,GAO H L,SONG Y T. A new fault-location algorithm for extra-high-voltage mixed lines based on phase characteristics of the hyperbolic tangent function [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2016,31(3):1203-1212.

[2] 王晓彤,林集明,陈葛松,等. 广东—海南500 kV海底电缆输电系统电磁暂态研究[J]. 电网技术,2008,32(12):6-11.
WANG Xiaotong,LIN Jiming,CHEN Gesong,et al. Electromagnetic transient analysis of 500 kV submarine cable transmission system from Guangdong to Hainan [J]. Power System Technology,2008,32(12):6-11.

[3] 张云柯,李博通,贾健飞,等. 带并联电抗器的超高压电缆-架空混合线路三相永久性故障识别方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(10):107-111,125.
ZHANG Yunke,LI Botong,JIA Jianfei,et al. Three-phase permanent fault identification for EHV cable-overhead hybrid line with shunt reactors[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(10):107-111,125.

[4] 李配配,邓雷,赵永雷,等. 配电网混合线路单端行波测距方法的研究[J]. 智慧电力,2013,41(4):70-73.
LI Peipei,DENG Lei,ZHAO Yonglei,et al. Study on single-ended traveling wave fault location in distribution network hybrid lines[J]. Smart Power,2013,41(4):70-73.

[5] SHANG L Q,LIU Z Y,LIU X R,et al. Fault location of hybrid transmission lines based on k-means algorithm [C]//2018 China International Conference on Electricity Distribution (CI-CED). 2018.

[6] 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.
GE Yaozhong. New types of protective relaying and fault location their theory and technigues[M]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press,1996.

[7] 张晓明,徐岩,王瑜,等. 一种基于参数检测的双端故障测距算法[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(12):106-111.
ZHANG Xiaoming,XU Yan,WANG Yu,et al. A fault location algorithm for two-terminal transmission lines based on parameter detection[J]. Power System Protection and Control,2011,39(12):106-111.

[8] 林富洪,曾惠敏. 基于分布参数模型的高压输电线路单相接地故障单端测距方法[J]. 电网技术,2011,35(4):201-205.
LIN Fuhong,ZENG Huimin. One-terminal fault location of single-phase to earth fault based on distributed parameter model of HV transmission line[J]. Power System Technology,2011,35

(4):201-205.

[9] LIVANI H, EVRENOSOGLU C Y. A machine learning and wavelet-based fault location method for hybrid transmission lines[J]. IEEE Transactions on Smart Grid (ICICM),2014,5(1):51-59.

[10] CAO J P,JIANG H,ZHOU L Y,et al. Accurate fault location method and verification test analysis of high-voltage cable hybrid lines[C]//2018 IEEE 3rd International Conference on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM). 2018.

[11] 赵军玉,杨淑英,陆海东,等. 不受电缆波速度影响的混合线路故障定位研究[J]. 电测与仪表,2013,50(7):11-15,20.
ZHAO Junyu,YANG Shuying,LU Haidong,et al. The study on fault location for hybrid line without the affection of wave speed on the cable[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2013,50(7):11-15,20.

[12] 逯怀东,许磊,刘宗杰,等. 电缆-架空线混合线路故障行波定位及自适应重合闸控制[J]. 电力科学与技术学报,2013,28(4):31-36.
LU Huaidong,XU Lei,LIU Zongjie,et al. New method of traveling wave fault location and adaptive reclosing for cable-overhead mixed lines[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2013,28(4):31-36.

[13] 管永丽. 电缆—架空线混合线路故障测距方法的研究[D]. 南京:东南大学,2017.
GUAN Yongli. Research on fault location for cables-overhead circuit transmission lines[D]. Nanjing:Southeast University,2017.

[14] 李超群,沈军,蔡光宗,等. 高压电缆-架空线混合线路故障测距方案研究[J]. 华东电力,2012,40(5):858-861.
LI Chaoqun,SHEN Jun,CAI Guangzong,et al. Reclosing scheme of HV cable-overhead hybrid transmission lines[J]. East China Electric Power,2012,40(5):858-861.

[15] 吴承恩,邵能灵,郁惟塘,等. 超高压电缆-架空线混合线路故障测寻方法[J]. 电力系统自动化,2005,29(10):26-29.
WU Cheng'en,TAI Nengling,YU Weiyong,et al. New method of fault detection and location for EHV cables with transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(10):26-29.

[16] 刘伟,陈皓. 基于分布参数模型的混合线路故障测距新算法[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(24):76-80,132.
LIU Wei,CHEN Hao. A new fault location algorithm for hybrid transmission line based on distributed parameter model [J]. Power System Protection and Control,2009,37(24):76-80,132.

[17] 姜宪国,李博通,张云柯,等. 基于电压序量变化量的超高压混合线路故障测距方法[J]. 电网技术,2015,39(12):3578-3583.
JIANG Xianguo,LI Botong,ZHANG Yunke,et al. A fault location method for extra-high voltage mixed lines based on variation of sequence voltage[J]. Power System Technology,2015,39(12):3578-3583.

- [18] 杨军,伍咏红,江文波,等. 基于双端故障信息的高压电缆-架空线混合线路故障测距方法[J]. 电网技术,2010,34(1):208-213.
YANG Jun, WU Yonghong, JIANG Wenbo, et al. A fault location algorithm for hybrid transmission line composed by high voltage cable and overhead line based on two-terminal information [J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 208-213.
- [19] 曾惠敏,林富洪. 高压电缆-架空线混合线路相位测距法[J]. 电力自动化设备,2011,31(9):82-87.
ZENG Huimin, LIN Fuhong. Fault locating algorithm based on phase characteristics for hybrid high voltage transmission line [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(9): 82-87.
- [20] 张斯淇,李永丽,陈晓龙. 基于故障区域快速识别的混合线路故障测距新原理[J]. 电力自动化设备,2018,38(10):166-171,183.
ZHANG Siqi, LI Yongli, CHEN Xiaolong. Novel fault location algorithm for mixed lines based on fault section fast identification [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10):166-171,183.
- [21] YAO Chuang, LI Yongli, LI Botong, et al. A new fault location algorithm for EHVAC mixed cable-overhead line based on fault zone identification [C]//Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia). IEEE,2012:1-4.
- [22] 李博通,李永丽,胡宇,等. 基于故障区域识别的超高压混联线路故障测距算法[J]. 电力系统自动化,2013,37(5):93-98.
LI Botong, LI Yongli, HU Yu, et al. A new fault location algorithm for extra-high voltage mixed lines based on fault zone identification [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5):93-98.
- [23] 于玉泽,覃剑,李功新,等. 电缆-架空线混合线路故障测距方法综述[J]. 电网技术,2006,30(17):64-69.
YU Yuze, QIN Jian, LI Gongxin, et al. A survey on fault location methods for hybrid transmission lines consisting of power cables and overhead lines [J]. Power System Technology, 2006, 30(17):64-69.
- [24] 李骏,范春菊. 基于小波分析的电缆-架空线混合输电线路行波故障测距方法[J]. 电网技术,2006,30(9):92-97.
LI Jun, FAN Chunju. Wavelet analysis based traveling wave fault location for hybrid transmission line consisting of power cable and overhead line [J]. Power System Technology, 2006, 30(9):92-97.
- [25] FEIZIFAR B, HAGHIFAM M R, SOLEYMANI S. Application of continuous wavelet transform for fault location in combined overhead line and cable distribution networks [C]//International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). IEEE,2012.
- [26] WANG Y, ZENG X J, QIN X A, et al. HHT based single terminal traveling wave fault location for lines combined with overhead-lines and cables [C]//International Conference on Power System Technology. IEEE,2010.
- [27] 黄荣辉,李勋,张宏钊,等. 线缆混合输电线路故障组行波测距方法及影响因素研究[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(5):73-81.
HUANG Ronghui, LI Xun, ZHANG Hongzhao, et al. Research on combined traveling wave fault location method of overhead line-cable hybrid line and influencing factors [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5):73-81.
- [28] 黄震,江泰廷,张维锡,等. 基于双端行波原理的高压架空线—电缆混合线路故障定位方法[J]. 电力系统自动化,2010,34(14):88-91.
HUANG Zhen, JIANG Taiting, ZHANG Weixi, et al. A fault location method for high-voltage overhead lines combined with underground power cables based on double-ended travelling wave principle [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14):88-91.
- [29] 许文杰,蒋道宇,王剑英,等. 利用暂态行波的架空线-海底电缆混合线路故障定位方法[J]. 山东电力技术,2016,43(229):15-19.
XU Wenjie, JIANG Daoyu, WANG Jianying, et al. Fault location method of overhead line-submarine cable mixed lines used transient traveling waves [J]. Shandong Electric Power, 2016, 43(229):15-19.
- [30] 朱子坤,黄龙,叶皖,等. 一种无需参数整定的混合线路故障行波定位方法[J]. 电测与仪表,2016,53(19):125-131.
ZHU Zikun, HUANG Long, YE Huan, et al. Novel traveling wave based fault location method with non-parameter-threshold-setting for hybrid power lines [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(19):125-131.
- [31] 宣耀伟,余为,俞恩科,等. 基于查表法的架空线电缆混合线路行波故障测距方法[J]. 浙江电力,2014,33(8):15-18.
XUAN Yaowei, YU wei, YU Enke, et al. A traveling wave fault location method for hybrid transmission lines consisting of power cables and overhead lines based on table look-up method [J]. Zhejiang Electric Power, 2014, 33(8):15-18.
- [32] 刘顺桂,李勋,张宏钊,等. 一种采用时间判别法的混合线路故障行波定位方法[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(1):41-46.
LIU Shungui, LI Xun, ZHANG Hongzhao, et al. A traveling wave fault location method of hybrid line using time discrimination [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1):41-46.
- [33] 辛正祥,赵肖雪,李京,等. 一种基于时间轴整定的T型混合输电线路故障测距方法[J]. 水电能源科学,2019,37(7):150-153,145.
XIN Zhengxiang, ZHAO Xiaoxue, LI Jing, et al. A fault location method for T-type hybrid transmission line based on time axis setting [J]. Water Resources and Power, 2019, 37(7):150-153,145.
- [34] 薛永端,李乐,俞恩科,等. 基于分段补偿原理的电缆架空线混合线路双端行波故障测距算法[J]. 电网技术,2014,38(7):1953-1958.

- XUE Yongduan, LI Le, YU Enke, et al. A sectionalized compensation based two-terminal traveling wave fault location algorithm for hybrid transmission line composed of power cable and overhead line [J]. *Power System Technology*, 2014, 38(7): 1953-1958.
- [35] 侯丽钢, 汤向华, 江辉, 等. 应用于含有线-缆混合线路配电网的行波故障测距新方法[J]. *电力工程技术*, 2019, 38(2): 111-116.
- HOU Ligang, TANG Xianghua, JIANG Hui, et al. A novel traveling wave fault location method applied to distribution networks with hybrid line composed of overhead line and cable [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2019, 38(2): 111-116.
- [36] ZHAO J W, DUAN J X. Traveling wave fault location for lines combined with overhead-lines and cables based on empirical wavelet transform [C]//2019 IEEE 2nd International Conference on Electronics and Communication Engineering (ICECE). IEEE, 2020.
- [37] 杨建, 唐忠. 混合输电线路行波故障测距算法的设计[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2017, 29(1): 63-68.
- YANG Jian, TANG Zhong. Design of traveling wave based fault location algorithm for hybrid transmission lines [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2017, 29(1): 63-68.
- [38] 于程, 唐圣学. 基于小波-波速归一化的混合线路单相接地故障行波定位方法[J]. *电器与能效管理技术*, 2015(23): 11-17.
- YU Cheng, TANG Shengxue. Study on single-phase grounding fault location method in hybrid line grid [J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2015(23): 11-17.
- [39] 方毅, 李本瑜, 石恒初, 等. 基于改进双端测距原理的带变压器线缆混合线路故障定位方法[J]. *电气传动*, 2019, 38(7): 105-110.
- FANG Yi, LI Benyu, SHI Hengchu, et al. Fault location method of hybrid line with transformer cable based on improved two terminal distance measurement principle [J]. *Electrical Drive*, 2019, 38(7): 105-110.
- [40] 王奎鑫, 唐毅, 陈平, 等. 基于组合行波原理的高压架空线-电缆混合线路故障测距方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(10): 90-94.
- WANG Kuixin, TANG Yi, CHEN Ping, et al. Fault location method based on combined travelling wave principle for high-voltage overhead-cable lines [J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(10): 90-94.
- [41] 伍国兴, 徐曙, 李勋, 等. 一种架空线-电缆混合线路的组合行波测距方法[J]. *水电能源科学*, 2017, 35(7): 186-188, 162.
- WU Guoxing, XU Shu, LI Xun, et al. A combined traveling wave fault location method of overhead line-cable hybrid line [J]. *Water Resources and Power*, 2017, 35(7): 186-188, 162.
- [42] 梁凤强, 孙永波, 陈平, 等. 一种基于区段判别的混合线路组合行波定位方法[J]. *电力自动化*, 2016, 38(5): 64-67.
- LIANG Fengqiang, SUN Yongbo, CHEN Ping, et al. A location method for hybrid line combination traveling wave based on segment discrimination [J]. *Electrical Automation*, 2016, 38(5): 64-67.
- [43] 宋云海, 王奇, 常安, 等. 架空线-电缆混合线路分布式故障测距方法[J]. *水电能源科学*, 2016, 34(1): 179-183.
- SONG Yunhai, WANG Qi, CHANG An, et al. Distributed fault location method for overhead transmission lines combined with underground cables [J]. *Water Resources and Power*, 2016, 34(1): 179-183.
- [44] 覃思明, 李焱. 架空线-电缆-架空线混合线路故障定位方法研究[J]. *广西电力*, 2019, 42(4): 24-28.
- QIN Siming, LI Yi. Study on the fault location method of overhead-cable-overhead hybrid lines [J]. *Guangxi Electric Power*, 2019, 42(4): 24-28.
- [45] GAZZANA D S, FERREIRA G D, BRETAS A S, et al. A hybrid impedance and transient based analysis technique for fault location in distribution networks [C]//2013 IEEE Grenoble Conference. IEEE, 2013: 1-6.
- [46] 汪磊. 基于VMD和TEO的高压直流线缆混合线路故障定位的研究[D]. 湖北: 湖北工业大学, 2019.
- WANG Lei. Research on fault location of HVDC hybrid transmission lines based on VMD and TEO [D]. Hubei: Hubei University of Technology, 2019.
- [47] 黎子铭, 薛毓强, 魏文新. 基于EEMD的混合线路故障测距[J]. *电气开关*, 2015, 53(6): 83-86.
- LI Ziming, XUE Yuqiang, WEI Wenxin. Fault location for hybrid transmission lines based on EEMD [J]. *Electric Switch Gear*, 2015, 53(6): 83-86.
- [48] 李世钲, 刘辉, 钱金良, 等. 经消弧线圈接地系统的混合线路故障测距研究[J]. *湖北工业大学学报*, 2018, 33(5): 29-31.
- LI Shikun, LIU Hui, QIAN Jinliang, et al. Study on fault location of hybrid line with arc suppression coil grounding system [J]. *Journal of Hubei University of Technology*, 2018, 33(5): 29-31.
- [49] 冯宽, 王思华. 计及谐波次自然频率和VMD的混合线路故障测距[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(17): 109-115.
- FENG Kuan, WANG Sihua. Hybrid line fault location considering harmonic subharmonic natural frequency and VMD [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(17): 109-115.
- [50] 刘泽宇. 电缆-架空线混合输电线路故障测距方法的研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
- LIU Zeyu. Research on fault location method for cable-overhead hybrid transmission lines [D]. Xi'an: Xi'an University of Science Technology, 2019.
- [51] 简学军, 傅兴强, 王秋影. 多端高压架空线和电缆混合线路故障定位及诊断系统的设计[J]. *电子设计工程*, 2019, 27(14): 30-34.
- JIAN Xuejun, FU Xingqiang, WANG Qiuying. Design of fault location and diagnosis system for multi-terminal high-voltage overhead line and cable hybrid line [J]. *Electronic Design En-*

- gineering, 2019, 27(14):30-34.
- [52] 程孟晗. 基于神经网络下柔性直流混合输电线路故障测距的思考[J]. 中国设备工程, 2018(13):105-107.
CHEN Menghan. Consideration on fault location of flexible DC hybrid transmission line based on neural network [J]. China Plant Engineering, 2018(13):105-107.
- [53] 张云柯. 超高压电缆-架空线混合线路故障定位方法及自适应重合闸技术研究[D]. 天津:天津大学, 2016.
ZHANG Yunke. Research on fault location method and adaptive reclosing technique for EHV hybrid transmission line[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [54] YAO C, LI Y L, LI B T, et al. A new fault location algorithm for EHVAC mixed cable-overhead line based on fault zone identification[J]. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, 2012: 1-4.
- [55] 杨光胤, 葛金. 小波分析故障行波测距法在混合线路中的应用[J]. 云南电力技术, 2008, 36(5):48-51.
YANG Guangyin, Ge Jin. Application of fault location methods of travelling wave with wavelet analysis[J]. Yunnan Electric Power, 2008, 36(5):48-51.
- [56] 杨林, 王宾, 董新洲. 高压直流输电线路故障测距研究综述[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8):185-191.
YANG Lin, WANG Bin, DONG Xinzhou. Overview of fault location methods in high voltage direct current transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8):185-191.

作者简介:



张怿宁

张怿宁(1973),男,博士,教授级高级工程师,从事超高压交、直流输电线路故障测距,继电保护与控制等相关工作(E-mail:286285430@qq.com)。

A review of fault location methods for hybrid overhead and cable transmission lines

ZHANG Yining

(CSG EHV Power Transmission Company Maintenance & Test Center, Guangzhou 510663, China)

Abstract: The research on fault location of overhead line and power cable is reviewed. Firstly the special problems in fault location of hybrid transmission lines are analyzed, and then the research status of fault location methods for hybrid transmission lines is summarized. The existing methods of fault location for hybrid transmission lines mainly include fault analysis, traveling wave method, frequency analysis and intelligent method. Among them, the accuracy of fault analysis method and traveling wave method is mainly affected by the uneven parameters of the hybrid transmission line. For frequency method, whether the natural frequency of fault transient signal can be determined accurately directly affects the fault location accuracy of spectrum analysis. The offline training of the sample set and the storage of a large amount of data is required for the intelligent method. Finally, the future research work is prospected.

Keywords: hybrid transmission lines; fault location; fault analysis method; travelling wave method; frequency analysis method

(编辑 钱悦)