

配电架空电缆混合线路接地故障检定技术研究

曹静波

国网冀北电力有限公司唐山供电公司

摘要: 配电架空电缆混合线路因其结构复杂、运行环境恶劣,容易发生接地故障,给电力系统的安全稳定运行带来严重威胁。本文针对配电架空电缆混合线路接地故障检定技术进行研究。首先,分析了配电架空电缆混合线路的结构特点和接地故障类型;其次,阐述了现有的接地故障检定方法及其局限性;再次,提出了一种基于时频域特征提取和智能算法相结合的新型接地故障检定技术,并通过仿真和实验对其性能进行了验证;最后,对全文进行了总结,并对今后的研究工作进行了展望。

关键词: 配电架空电缆混合线路;接地故障;故障检定

【DOI】10.12252/j.issn.2096-627X.2022.11.052

引言

配电架空电缆混合线路是目前我国配电网中应用较为广泛的一种线路形式,其在满足各种复杂地形和负荷分布的要求的同时,也存在一些突出的问题。由于架空线和电缆线路的结构和绝缘特性差异较大,在外界环境的影响下,极易发生接地故障。接地故障不仅会导致配电网无法正常供电,而且还可能引发严重的安全事故。因此,快速、准确地检测和定位配电架空电缆混合线路的接地故障,对于保证配电网安全稳定运行具有十分重要的意义。

一、配电架空电缆混合线路的结构特点和故障类型分析

(一) 配电架空电缆混合线路的结构特点

空电缆混合线路是由架空线路和电缆线路组合而成的配电线路。其中,架空线路采用裸导线,导线直接悬挂在杆塔或杆件的绝缘子上,导线与大地之间主要依靠空气进行绝缘。电缆线路则采用绝缘电缆,通过电缆护层和绝缘介质来隔离导体与大地。在架空电缆混合线路中,架空线和电缆线通过户外终端箱进行连接,电缆线路一般敷设在电缆沟或直埋于地下。

(二) 配电架空电缆混合线路故障类型

1. 单相接地故障

单相接地故障是指电力系统中单相导线与大地或电缆金属护层发生短路连接的故障情况。这种故障类型在架空线路和电缆线路中都有可能发生,并且在各类电力故障中占比最高。单相接地故障通常由导线绝缘损坏、外力破坏、污闪放电等因素引起,会导致相电压下降、相电流增大,对电网的安全稳定运行构成威胁,需要及时采取故障定位和隔离措施,方能尽快恢复供电。

2. 两相接地故障

两相接地故障,也称为相间接地故障,是指电力系

统中两相导线同时与大地或电缆护层发生短路连接的故障情况。与单相接地故障相比,两相接地故障在架空线路和电缆线路中发生的概率相对较小。这类故障通常由导线间绝缘损坏、交叉短路等因素引起,故障电流较大,对电力设备的冲击更为严重。一旦发生两相接地故障,需要快速切除故障线路,避免事故扩大,同时尽快查明原因,维修受损设备,恢复正常供电。

3. 过渡点接地故障

过渡点接地故障是指在架空线路和电缆线路的连接处发生的接地短路故障。这类故障通常发生在户外终端箱内,主要由絮接不良、固定件松动等原因引起。由于过渡点处线路结构和电气参数发生突变,故障电流会产生复杂的暂态过程,给故障定位和隔离带来困难。一旦确认过渡点发生接地故障,需要及时切除故障线路,防止事故扩大,并派人到现场检查终端箱,找出故障原因,更换或维修损坏的绝缘和固定部件,确保线路恢复正常运行。

4. 高阻接地故障

高阻接地故障是指故障点与大地之间存在一定的故障电阻,导致故障电流相对较小,属于非金属性故障。与低阻接地故障相比,高阻接地故障更加隐蔽,检测和定位的难度较大。由于故障电流较小,传统的过电流保护装置可能无法正确动作,导致故障无法及时切除,危及电网安全。因此,需要采用灵敏度更高的故障检测方法,如零序电流、波形识别等,同时结合故障指示器和故障定位算法,实现高阻接地故障的快速定位和隔离,提高供电可靠性。

二、配电架空电缆混合线路接地故障检定方法分析

(一) 基于行波理论的故障定位方法

行波理论是故障定位的传统方法之一。当架空电缆混合线路发生接地故障时,在故障点处产生的行波沿线

路向两端传播，到达线路终端或过渡点时发生反射和折射。通过在线路两端监测行波，对其到达时间和极性进行分析，可以计算出故障点到监测点的距离。由于架空线和电缆线的行波速度不同，在过渡点处行波会发生反射和折射，导致首末端测得的行波到达时间难以准确对应，影响了故障定位的精度。

（二）基于阻抗法的故障定位方法

阻抗法是另一种常用的故障定位方法。其基本原理是利用接地故障时的序网络等效电路，通过测量线路某一端的电压电流，计算出故障点的等效阻抗，进而求得故障距离。阻抗法的优点是原理简单，易于实现。但是，由于架空电缆混合线路存在多个分段，不同分段的阻抗参数差异较大，计算复杂度高。

（三）基于智能算法的故障检定方法

近年来，随着人工智能技术的发展，一些智能算法被引入到配电网故障检定领域，以期提高故障检定的自适应性和精度。这些算法主要包括神经网络、支持向量机、小波变换等。其基本思路是通过将故障数据进行特征提取和分类识别，建立故障类型和故障距离的映射关系。以神经网络为例，可以使用故障时的电压、电流等信号作为神经网络的输入，故障类型和故障距离作为输出，通过大量样本数据训练网络，使其具备一定的故障诊断能力。

（四）基于时频域特征提取和智能算法相结合的接地故障检定方法

综合考虑配电网架空电缆混合线路的结构特点以及现有故障检定方法的局限性，本文提出了一种基于时频域特征提取和智能算法相结合的接地故障检定新方法。该方法首先利用短时傅里叶变换（STFT）对故障电流信号进行时频分析，得到反映故障特征的时频能量分布图像；然后，使用卷积神经网络（CNN）对时频图像进行自动特征提取和分类识别，实现故障类型检测；最后，采用改进的多分类支持向量机（MSVM）算法对故障距离进行估计。

三、基于时频域特征提取的接地故障检定技术

（一）架空电缆混合线路的数学建模

为了分析接地故障暂态过程，需要对架空电缆混合线路进行数学建模。考虑到架空线和电缆线导体材料、绝缘方式等方面的差异，应采用分段建模的思想，分别对架空线路段和电缆线路段建立数学模型，然后通过过渡点的边界条件联立求解。对于架空线路段，可使用分布参数等效电路模型。在得到架空电缆混合线路的数学

模型后，可通过仿真软件生成各种接地故障情况下的暂态电流数据，为后续的特征提取和智能诊断算法训练提供样本。

（二）基于短时傅里叶变换的时频域特征提取

传统的时域分析和频域分析方法难以全面刻画接地故障暂态过程的时变和频变特性，为了更好地提取故障特征，本文采用短时傅里叶变换（STFT）对故障电流信号进行时频域分析。STFT是一种时频分析工具，通过引入滑动窗函数，可以同时获得信号在时域和频域的局部特性。对于接地故障电流信号，由于故障初始阶段存在明显的高频暂态分量，稳态阶段以工频成分为主，各频率分量随时间不断衰减，因此其时频谱呈现出复杂的能量分布规律。在故障发生后的很短时间内，信号能量主要集中在高频段，随后高频分量迅速衰减，并逐渐向低频段转移，稳态时只剩下工频成分。不同类型接地故障的时频谱分布特点不尽相同，反映了故障电弧形成、发展和熄灭的动态过程。

（三）基于卷积神经网络的故障类型识别

卷积神经网络（CNN）是一种典型的深度学习模型，以其强大的自动特征提取和分类识别能力在图像识别领域得到了广泛应用。本文将CNN引入到接地故障检测中，利用其对故障时频图像进行自动特征学习和分类判别，实现故障类型的智能诊断。

CNN的基本结构主要由输入层、卷积层、池化层、全连接层和输出层组成。其中，输入层负责接收原始图像数据；卷积层通过卷积核对图像进行特征提取，得到特征图；池化层对特征图进行降采样，减小数据量；全连接层将提取的特征进行非线性组合，生成更高级的特征表示；输出层通过Softmax函数将全连接层的输出映射为概率分布，实现分类判别。

（四）基于支持向量机的故障距离估计

在识别出接地故障类型后，还需进一步确定故障点的距离，为故障定位和抢修提供依据。本文采用支持向量机（SVM）算法对故障距离进行估计。SVM是一种二分类模型，其基本思想是在特征空间中寻找一个最优的分类超平面，使得两类样本的间隔最大化。当训练样本线性不可分时，可通过核函数将样本映射到高维空间，构造出非线性分类边界。对于多分类问题，可采用“一对一”或“一对多”等策略，将多分类问题转化为多个二分类问题求解。

针对接地故障距离估计问题，需要对SVM进行如下改进：首先，将故障距离量化为若干离散区间，每个

区间对应一个类别，转化为多分类问题；其次，引入置信概率估计，使SVM能够输出各个类别的概率值，便于评估定位结果的可信度；再次，对SVM的核函数进行优化，提高分类性能。该模型的输入特征为故障电流的特征参数，包括幅值、相位、衰减时间常数等，这些特征可从故障时频谱图像中提取得到。模型输出为故障距离区间的概率分布。对于给定的测试样本，模型计算其属于各个距离区间的概率，取概率最大者为估计结果，同时给出估计的置信水平。

四、仿真与实验验证

(一) 仿真分析

利用PSCAD/EMTDC软件搭建了10kV配电架空电缆混合线路的仿真模型，如图8所示。线路全长6km，架空段长4km，电缆段长2km，过渡点位于4km处。线路分3相布置，导线参数和绝缘参数按表1设置。

表1 线路导线和绝缘参数

导线类型	架空线LGJ-70	电力电缆YJV22-8.7/10kV
导线材质	钢芯铝绞线	铜芯
导线截面积 (mm ²)	70	70
电阻率 (Ω·mm ² /m)	0.4136	0.0172
电感 (μH/km)	1.2764	0.37
电容 (nF/km)	10.106	0.205
绝缘材质	---	XLPE
绝缘厚度 (mm)	---	5.5

在此线路模型上，考虑5种典型的接地故障情形：架空线单相接地、架空线两相接地、电缆单相接地、电缆两相接地和过渡点单相接地。通过改变故障点位置、故障电阻等参数，生成了500个故障样本，其中400个作为训练集，100个作为测试集。

将上述样本输入构建的CNN故障诊断模型，对网络进行训练和测试，得到的性能指标如表2所示。可以看出，CNN模型在故障类型识别上取得了较高的精度，平均准确率达到97.5%，能够有效区分不同类型的接地故障。同时，召回率和F1值也保持在较高水平，说明模型对各类故障的查全率和综合性能都比较理想。

表2 CNN故障诊断模型的性能指标

故障类型	精度	召回率	F1值
架空单相接地	100%	95.2%	97.6%
架空两相接地	95.8%	100%	97.8%
电缆单相接地	96.0%	96.0%	96.0%
电缆两相接地	94.7%	94.7%	94.7%
过渡点单相接地	100%	100%	100%
平均	97.5%	96.9%	97.2%

为了测试SVM故障距离估计模型的性能，将100个测试样本的故障距离进行量化，划分为5个区间（0~1km、1~2km、2~3km、3~4km、4~6km），每个区间对应1个距离等级。提取样本的特征参数输入SVM模型，得到距离估计结果，并与真实故障距离进行对比，计算平均误差，结果如表3所示。

表3 SVM故障距离估计结果

距离等级	估计正确数	估计错误数	正确率	平均误差 (m)
0~1km	18	2	90%	85
1~2km	19	1	95%	102
2~3km	17	3	85%	143
3~4km	20	0	100%	56
4~6km	19	1	95%	124
总计	93	7	7%	102

由表3可见，SVM模型在故障距离估计上的总体正确率达到93%，平均误差为102m，满足工程应用要求。对于不同距离等级，SVM的估计精度存在一定差异，其中3~4km段的估计正确率最高，达到100%，而2~3km段的平均误差最大，为143m。这主要是由于SVM模型对故障距离的分辨力随距离增大而降低，导致远端故障定位误差增大。此外，过渡点附近的故障样本较少，也影响了该区域的估计精度。

结语

配电架空电缆混合线路接地故障检定技术研究对于提高配电网的安全性、可靠性和供电质量具有重要意义。本文通过对架空电缆混合线路的结构特点和接地故障类型进行深入分析，针对传统故障检定方法的局限性，提出了一种基于时频域特征提取与智能算法相结合的新型检定技术。该技术利用短时傅里叶变换提取故障电流的时频特征，再通过卷积神经网络实现故障类型的自动识别。仿真分析和实验验证表明，所提出的方法能够快速、准确地判定出架空电缆混合线路故障的类型和位置，可以为配电自动化的故障诊断功能提供有力支撑。

参考文献

- [1] 曾晗, 王利娜, 林文莹等. 新型动态变弧长模型在接地弧光中的应用研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(06): 315-320+329.
- [2] 柏继云, 王亿勃, 程范贤. 10kV混合系统接地故障研究[J]. 电力设备管理, 2020(09): 60-61.