

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407264

计及燃弧频次的配电网单相接地故障分类与辨识*

陈晓旭¹ 刘素梅¹ 刘若溪²

(1. 北京林业大学工学院 北京 100089; 2. 国网北京市电力公司 北京 100075)

摘要: 尽管采用小电流接地方式的配电网发生单相接地故障时短路电流较小, 但若故障发生后燃弧现象长时间存在, 将会显著增加火灾发生风险。为减小火灾隐患, 已有多数研究从燃弧现象发生与否角度对故障进行辨识, 但并未计及燃弧频次的影响。为此, 针对某地配电网实际单相接地故障案例, 通过系统分析不同故障场景下零序电流变化特性与燃弧之间的关联规律, 从火灾隐患程度角度提出了计及燃弧频次的单相接地故障分类方法; 进一步挖掘出不同种类故障发生后零序电流波形分别呈现“平肩畸变”、“瞬态值”等特征, 并利用不同频带能量占比、谐波重心和燃弧周期数对波形畸变特征进行了数学描述; 以前述数学特征量作为输入, 研究建立了基于长短期记忆(long short-term memory, LSTM)网络的故障种类辨识模型, 经某电力公司现场收集的223组现场典型故障案例验证, 模型识别准确率达96.4%, 可有效识别燃弧故障种类, 对于减小森林火灾隐患、节约配电网运维成本意义重大。

关键词: 燃弧频次; 故障分类与辨识; 单相接地故障; 零序电流; 波形特征

中图分类号: TM76; TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4054

Fault classification and identification for single-phase grounding faults in distribution network considering the arcs' occurrence frequencies

Chen Xiaoxu¹ Liu Sumei¹ Liu Ruoxi²

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100089, China;

2. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100075, China)

Abstract: The short-circuit currents distributed from distribution networks with small current grounding mode are relatively little after single-phase grounding faults. However, due to the aforementioned faults the long-term presence of arcing phenomena can increase the potential fire risk. In order to minimize fire threat, the existing methods for identifying fault types are based on whether the arcs occur or not. Whereas, the impact of arcs' occurrence frequency is not taken into account. Aimed at the problem, on the basis of the actual cases of single-phase grounding faults in a certain distribution network the correlation between zero-sequence current characteristics and corresponding arcing phenomenon is firstly analyzed. And a novel classification method for single-phase grounding faults is proposed involving the arcs' occurrence frequency. The waveforms characteristics of zero-sequence current are further extracted under the distinct fault types, such as “flat shoulder distortion”, “transient change” and so on. The aforementioned characteristics are mathematically described using the energy proportion of zero-sequence current components with different frequency bands, harmonic centroid and the arcing cycle number. Used these mathematical features as inputs, a fault-type identification model based on long short-term memory (LSTM) networks was developed. At last, the proposed model is tested with a dataset of 223 typical fault cases collected from a certain power company. It is verified that the accuracy rate of proposed model is 96.4%. The distinct fault types can be identified effectively. It is significant for reducing the fire risk and saving on the costs associated with the maintenance of distribution networks.

Keywords: arcs' occurrence frequency; fault classification and identification; single-phase grounding fault; zero-sequence current; waveforms characteristics

0 引言

随着电网建设加速推进,大量配电线路选择跨越林区或草场区域的方式进行布线,这在一定程度上增加了发生火灾的隐患^[1]。且绝大多数林草区线路采用小电流接地方式,根据电力系统安全运行规程,小电流接地系统中发生单相接地故障后可带电继续运行1~2 h^[2]。实际上,小电流接地系统中单相接地故障引起的故障电流并不会显著超过负载电流^[3],因此电网继电保护装置通常不会动作^[4]。然而,若故障发生后,存在持续稳定的电弧燃烧现象,间隙介质温度将不断升高,从森林安全的角度看,该情况将可能引发火灾^[5]。例如,凉山州西昌市发生的“3·30”森林火灾,起因是电杆引流线与电杆横担支撑架抱箍搭接形成永久性接地短路故障,该故障引发电弧持续燃烧放热,最终致使19人牺牲、3人受伤,直接经济损失9 731.12万元。因此,如何快速准确地识别出配电网中的电弧故障变得十分必要。

针对配电网电弧故障的辨识,相关专家已开展了大量研究,提出了多种识别电弧故障的方法,但绝大多数文献都是通过建模仿真或实验室模拟得到的故障数据,而非实际电网中真实数据。比如,文献[6]通过建立基于电力ATP(alternative transient program)的配电网仿真模型,提出通过识别零序电压标幺值的奇异信号对电弧故障进行辨识。文献[7-9]通过建立基于PSCAD/EMTDC的配电网仿真模型,分别提出利用零序电流或零序电压计算瞬时能量特征、构造伏安曲线或采用小波变换后的时频特征量对源域卷积神经网络模型训练以实现电弧故障进行辨识;文献[10-11]通过建立基于MATLAB的配电网仿真模型,分别提出利用基波、3次、5次、7次等奇次谐波和2次、4次等偶次谐波量对稳定电弧故障和无电弧永久性故障进行了分类辨识,但没有考虑电弧不稳定存在的故障情况;文献[12]通过搭建配电网单相接地故障试验平台,分别模拟了单相金属性接地、经低电阻接地和电弧接地故障,提出利用广义拉普拉斯变换对故障相电流进行时频分析以实现辨识不同故障。虽然前述研究都能够较好地识别出电弧故障,但这些方法所依赖的电弧故障特征主要来源于仿真或实验测试模型,其在实际电网中的适用性和准确性仍需进一步验证。

目前仅有少数文献基于现场故障录波数据对电弧故障特征进行分析,并在此基础上提出了相应的识别方法。文献[13]通过分析现场故障录波数据中零序电流的波形特征,提出利用波形斜率曲线进行配电网持续性弧光高阻接地故障的检测;文献[14-17]将零序电压或零序电流的相空间轨迹图、波形畸变程度、波形畸变随机程度等作为特征量,提出分别利用GoogLeNet网络、模糊推理

系统、鲁棒半监督原型网络和双通道卷积神经网络对配电网接地故障中是否存在电弧进行辨识。尽管现有方法可较好地识别出配电网故障中是否存在电弧,但是并没有对电弧故障进行细分,也没有对不同电弧故障引发火灾的隐患程度进行分析。实际上电弧引起火灾的隐患程度与燃弧频次直接相关,燃弧频次越高,火灾隐患越大,反之亦然。

针对以上问题,本文结合某电力公司所辖配电线路中实际电弧故障案例,首先从燃弧频次的角度对单相接地故障进行了分类,并总结分析了不同故障种类下零序电流的故障波形特征;进一步利用不同频带能量分布特征和谐波重心等对不同故障种类下零序电流波形特征进行了数学描述,从而基于LSTM算法构建了不同燃弧故障辨识模型,以实现对不同燃弧故障进行甄别。

1 基于现场录波数据的电弧故障分类

1.1 某电力公司配电线路单相接地故障案例及分类

图1所示为某电力公司2022年度发生的4 401起单相接地故障案例,从中可以发现异物(含鸟害)、树线矛盾和设备本体3类故障占比较大,分别达到了41%、23%和17%。这些故障案例发生后,为减小火灾隐患,多数情况下需要运维人员迅速到现场进行原因排查。然而,该排查过程往往费时费力,且若现场派单不及时很有可能引发大面积火灾。因此,如何利用现场故障暂态录波数据,从火灾隐患程度角度,对配电网单相接地电弧故障进行分类,并在运维人员进行现场排查之前辨识出电弧故障类别,对于减小森林火灾隐患、节约配电网运维成本至关重要。

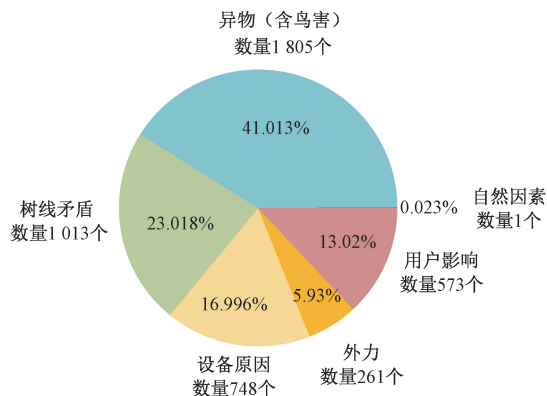


图1 某电力公司所辖配电线路单相接地故障原因统计结果
Fig.1 Statistical fault causes of single-phase grounding faults occurring in distribution lines from electric power company

目前已有研究从多个角度对单相接地故障进行了分类^[18],包括故障的时域特征、复杂程度、故障点性质和过

渡电阻大小等,这些分类方式虽然能够直观地揭示故障原因,但并不能直接反映故障过程中火灾隐患程度。实际上,在配电系统单相接地故障中,电弧燃烧是引发林区火灾的主要因素。然而,对于小电流接地配电网,当发生单相接地故障时,故障支路通常呈高阻状态,可能引发的电弧燃烧的剧烈程度一般较轻。这种情况下,电弧燃烧频次直接影响林区火灾隐患程度^[19]。因此,本文以燃弧频次为依据进行单相接地故障分类。

根据燃弧频次不同,单相接地故障可分为非线性永久、间歇性、瞬时性和线性永久故障 4 种类型。它们各自对应的燃弧频次依次降低,其所引发的火灾隐患程度也依次减少。在非线性永久接地故障中,除了故障电流过零点电弧会自动熄灭-重燃外,电弧均明显持续存在,其燃烧放出的热量会持续积累,间隙介质温度不断升高,极易引发火灾;间歇性接地故障下,电弧燃烧-熄灭-重燃过程呈间歇性特征,此情况下电弧燃烧产生的热量并不能持续地积累,火灾隐患相对较小^[20];瞬时性接地故障下,电弧现象会明显发生,但电弧一旦被熄灭后将无法重燃,即只存在单次电弧燃烧放热,引发火灾的可能性极小^[21]。不同于前面 3 种故障,线性永久接地故障下,电弧现象并不会明显存在,且故障电流相对较小,其所产生的热量也很小,所以基本不会引发火灾。

1.2 不同故障下零序电流波形变化规律分析

通过分析已有故障案例中暂态电压和电流录波数据,可以发现零序电流波形畸变特征能够较好地表征配电网发生单相接地故障下燃弧频次。因此,接下来将分析非线性永久、间歇性、瞬时性和线性永久故障下不同燃弧频次对零序电流波形畸变特征的影响。

1) 非线性永久接地故障

非线性永久接地故障下,配电线路与接地物体之间形成了较为稳定的接地回路并伴有持续燃弧现象,电弧放电点集中于某一局部,周期性低出现燃弧-熄弧-重燃过程,所以零序电流波形中存在持续稳定且具有周期性的“平肩畸变”特征^[22]。如图 2 所示为实际现场中刀闸虚接、避雷器断线和树枝搭落母线导致的非线性永久接地故障,从图中可以看出零序电“平肩畸变”特征尽管有时会于过零点附近发生偏移但始终存在,一般该畸变区域在 $T/4$ 以内。这是由于电弧电阻受弧隙间耗散功率影响,其数学关系式为^[23]:

$$\begin{cases} R_{arc} = e^{\int \frac{1}{\tau} (1 - \frac{u \cdot i}{P_{Loss}}) dt} \\ \tau = g_{arc} \cdot \frac{dQ}{dg_{arc}} \cdot P_{Loss}^{-1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_{arc} 为电弧电阻, P_{Loss} 表示弧隙的损耗功率; u 和 i 分别为电弧电压和电流,而 $u \cdot i$ 表示电弧从电网中的吸

收功率, τ 为电弧时间常数, g_{arc} 表示电弧电导, Q 表示弧隙中存储的能量。

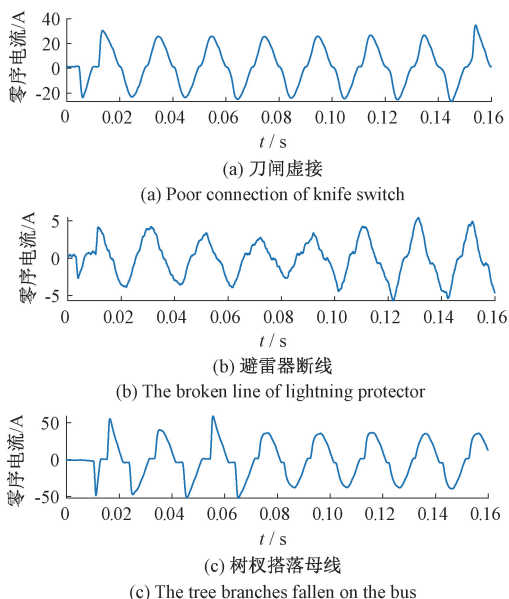


图 2 典型非线性永久接地故障下零序电流波形

Fig. 2 Zero-sequence current waveform of typical nonlinear permanent grounding fault

通过分析式(1)可知,当 $u \cdot i = P_{Loss}$ 时电弧电阻 R_{arc} 达到最大,此情况下零序电流波形中刚好出现“平肩畸变”特征。在电压电流过零点满足 $P_{Loss} = 0$ 时,电流波形的“平肩畸变”特征出现在过零点附近; P_{Loss} 越大,电流“平肩畸变”特征相对于过零点滞后偏移越大,此时 R_{arc} 达到最大值的位置也会右移。

因此,在非线性永久接地故障下,零序电流正弦波形中呈现为周期性的“平肩畸变”。后文将主要针对零序电流波形的周期性“平肩畸变”特征来辨识配电网中存在稳定燃弧的永久性单相接地故障。

2) 间歇性接地故障

受接地介质类型、湿度以及介质内部结构等影响,间歇性接地故障下电弧在熄灭后并不能够立即重燃,其重燃具有一定随机性与间歇性^[24]。此场景下,虽然电弧放电燃烧阶段出现瞬态零序电流,但一旦电弧熄灭零序电流立马消失,而且由于电弧燃烧的随机不确定性,瞬态零序电流的出现也无规律性。但与后文瞬时性接地故障有所不同,间歇性接地故障下瞬态零序电流出现的频次至少大于两次。如图 3 所示为不同地点发生树枝挂线导致的间歇性单相接地故障发生后零序电流波形变化规律,可以发现出现瞬态零序电流的时间间隔并不固定,但出现的频次不仅只有一次。

虽然间歇性接地故障发生后,电弧从电网吸收的热量通常小于其耗散功率,其引发火灾的概率相对较低,但

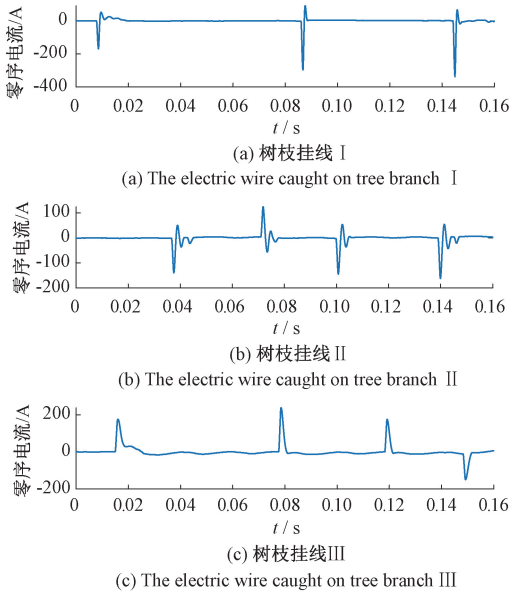


图3 典型间歇性接地故障零序电流波形

Fig. 3 Zero-sequence current waveform of typical intermittent grounding fault

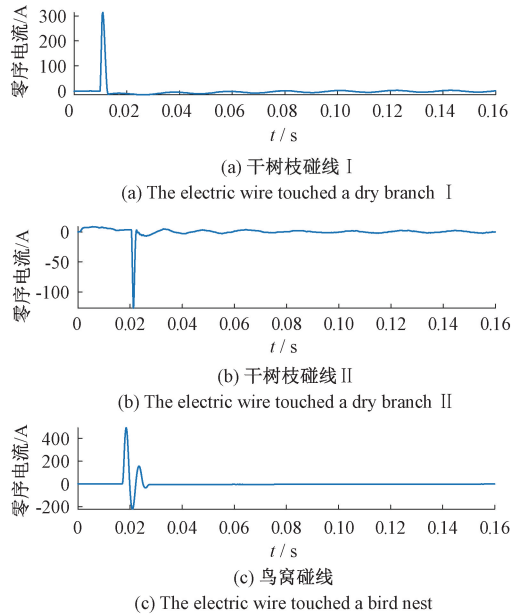


图4 典型瞬时性接地故障零序电流波形

Fig. 4 Zero-sequence current waveform of typical transient grounding fault

是一些不稳定的燃烧电弧可能会逐渐演化成持续稳定的电弧^[15]。因此,能够准确识别间歇性接地故障是至关重要的,这有助于防止其进一步发展成为永久性接地故障。结合前文分析,后文将主要针对零序电流波形中多次出现持续时间极短的“瞬态值”特征,来识别存在多频次不稳定燃弧的间歇性接地故障。

3) 瞬时性接地故障

若有异物搭接于线路绝缘薄弱处且搭接不牢,电弧放电能够破坏异物与导体的接触关系,或者因电弧熄灭后间隙介质温度迅速下降等原因,导致接地故障仅瞬时出现,即电弧燃烧放电仅出现一次或两次,之后线路恢复正常运行。此故障场景下,零序电流波形在数十或数百周期内通常仅出现一次或两次“瞬态值”。如图4所示为不同地点发生干树枝或鸟窝碰线的瞬时性单相接地故障下零序电流波形变化规律,可以发现与间歇性单相接地故障不同,瞬时性接地故障下出现瞬态电流值出现的频次只有一次或两次。

在瞬时性接地故障中,电弧从电网吸收的热量同样小于其耗散功率,且因为燃弧的次数很少,仅出现一次或两次,因此引发火灾的概率比间歇性单相接地故障更低。但为了准确区分间歇性接地短路故障与瞬时型短路故障,后文将主要针对零序电流波形中“瞬态值”只出现一次或两次的特征识别瞬时性接地故障。

4) 线性永久接地故障

在发生线性永久接地故障的情况下,配电线路与大地之间会形成一个稳定的接地回路,不会出现明显的燃弧现象或仅出现极其微弱的电弧。此时,故障电阻通常

呈线性特性,零序电流波形表现为正弦波或类正弦波的形态,不会出现明显的波形畸变^[25]。如图5所示为实际现场中鸟衔铁丝、避雷器击穿放电和避雷器引线断裂导致的线性永久接地故障,从故障实测波形中可以发现零序电流仅在故障发生瞬间存在短暂的暂态过程,随后便呈现出接近正弦波的特性。

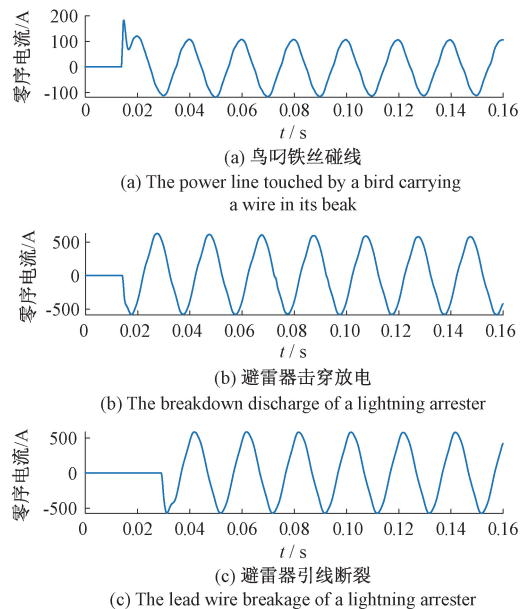


图5 典型线性永久接地故障零序电流波形

Fig. 5 Zero-sequence current waveform of typical linear permanent grounding fault

在线性永久接地故障下,不存在燃弧或者燃弧比较微弱,其引发火灾的可能性较低。为与前述 3 种故障有所区分,后文将主要针对零序电流波形基本呈现为稳定正弦波的特征来辨识线性永久单相接地故障。

2 不同故障下零序电流波形特征的描述与提取

2.1 平肩畸变与瞬态值特征的差异性描述

结合前文分析,多数非线性永久性接地故障因存在持续性燃弧现象,所以零序电流波形呈“平肩畸变”特征;而在间歇性接地故障和瞬时性接地故障下电弧无法持续稳定存在,所以一旦发生燃弧现象零序电流波形中通常存在“瞬态值”。本文利用零序电流在不同频段能量分布规律区分“平肩畸变”与“瞬态值”特征。具体的不同频段能量分布描述指标如式(2)所示。

$$\alpha_n = \frac{|I_n|^2}{\sum_{n=1}^3 |I_n|^2} \quad (2)$$

式中; $n=1$ 表示对零序电流瞬时值进行频谱分析时对应的低频段; $n=2$ 表示中频段; $n=3$ 表示高频段; I_n 即对应各个频段的分解信号的系数; $|I_n|^2$ 为对应频段量的能量值; α_n 为各频段量的能量值占原始信号能量的比重。

本文采用现场实测故障录波数据(采样频率 f_s 为 12.8 kHz)进行小波包变换,以提取式 2 中不同频段量。对零序电流流量进行小波变换时采用 *haar* 小波为基函数,利用多分辨率分析方法将 150 Hz 以下的频域量划分为低频段量,150~200 Hz 为中频段量,200 Hz 以上为高频段量。接下来分析不同故障场景下低、中、高频段量的各自能量占比规律。

图 6 所示为图 2(c) 中刀闸虚接导致非线性永久接地故障下零序电流中不同频段量的能量占比规律,可以发现 150~200 Hz 频段量的能量占比最大。在非线性永久接地故障下零序电流整体呈周期性规律变化且每个周期均出现“平肩畸变”特征,所以其能量集中的频段比标准正弦波的频段高,但比短时间出现“瞬态值”波形量的频段低。

图 7 所示为图 3(a) 中树枝挂线导致间歇性接地故障后线路上零序电流中包含的不同频段量的能量占比规律,可以发现 200 Hz 以上的高频段量的能量占比总和最大,这主要是由于零序电流波形中仅存在持续时间极短的“瞬态值”。同理,瞬时性接地故障下也有类似的零序电流变化特征,所以其对应的不同频段量的能量占比规律与间歇性接地故障类似。

图 8 所示为图 5(a) 中鸟叼铁丝碰线导致线性永久接地故障下零序电流对应的不同频段量的能量占比规

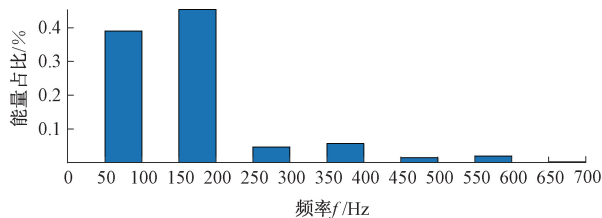


图 6 非线性永久接地故障不同频段零序电流量的能量占比
Fig. 6 The energy proportion of zero-sequence current components with different frequency bands under nonlinear permanent grounding faults

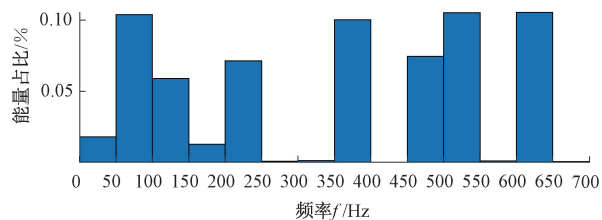


图 7 间歇性接地故障下不同频段零序电流量的能量占比
Fig. 7 The energy proportion of zero-sequence current components with different frequency bands under intermittent grounding faults

律,可以发现 150 Hz 以下频段量的能量占比最高。这主要是由于线性永久接地故障下零序电流的波形呈现为正弦波或类正弦波,其能量主要集中于低频段量。

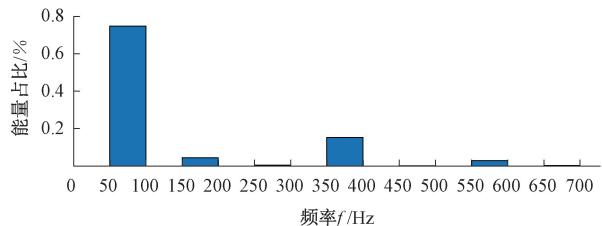


图 8 线性永久接地故障不同频段零序电流量的能量占比
Fig. 8 The energy proportion of zero-sequence current components with different frequency bands under linear permanent grounding faults

2.2 平肩畸变特征与类正弦波形差异性描述

实际现场中即使发生无燃弧现象的线性永久接地故障,但因测量误差等原因使得对应的零序电流波形并不一定是完全标准的正弦波。此场景下,实测零序电流流量中含有一定高频分量,这会使得高频段量的能量占比变大。利用前文不同频段能量分布特征,可能无法辨别测量误差等导致的正弦波形微小畸变与稳定燃弧现象导致的平肩畸变。实际上,不同频段能量分布指标是以频段作为整体,无法对各频段内具体频率量进行区分。

为了凸显不同场景下零序电流中高频分量的差异性,本文提出利用谐波重心加以表征。零序电流中谐波

重心的表达式如式(3)所示。

$$K = \frac{\sum_{j=2}^{14} j |I_j|}{\sum_{j=0}^N |I_j|} \quad (3)$$

式中: K 为谐波重心; j 表示谐波次数; N 为总谐波数; I 表示不同频率分量的幅值。

根据式(3)可知, 谐波重心 K 是将各谐波分量幅值与谐波次数相乘后进行累加求和计算得到的, 它可以反映故障下零序电流中不同高频谐波量的差异性, 频率越高的谐波量在谐波重心 K 中所占权重越大。如图9所示为不同故障场景下的非线性永久接地故障谐波重心的变化规律, 其取值的范围在1~4; 相比之下, 图10中不同场景下线性永久接地故障谐波重心值在0~0.7之间变化。这表明非线性永久接地故障和线性永久接地故障发生后其对应的谐波重心特征量存在明显区别。

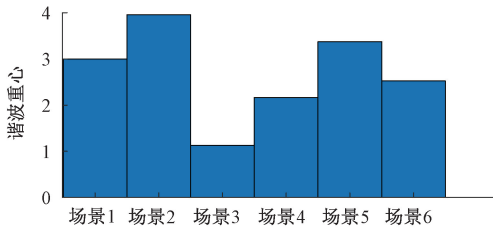


图9 非线性永久接地故障谐波重心

Fig. 9 The harmonic centroid under nonlinear permanent grounding faults

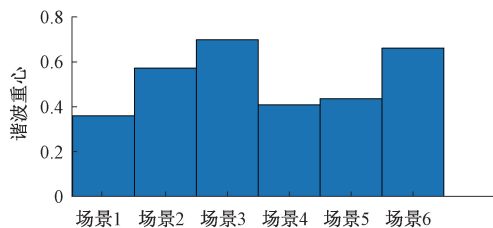


图10 线性永久接地故障谐波重心

Fig. 10 The harmonic centroid under linear permanent grounding faults

2.3 瞬态值出现次数的描述

根据前文分析, 尽管间歇性接地故障和瞬时接地故障下零序电流中均会出现“瞬态值”特征, 但是出现次数有所不同。为了对“瞬态值”出现次数进行描述, 这里先对故障后10个周波内的零序电流采样值进行取绝对值计算, 从而得到零序电流最大值 I_m , 进一步统计每个周波内零序电流绝对值的最大值超过 $I_m/8$ 的燃弧周期数 T_m , 利用该燃弧周期数作为衡量“瞬态值”出现次数的特征量。这里取 $I_m/8$ 是根据现场典型故障案例数据验证过的经验值。

3 计及燃弧频次的配电网单相接地故障识别

3.1 故障种类辨识模型

尽管如前文所述“平肩畸变”、“瞬态值”等特征可用不同频段能量占比、谐波重心值等加以区分, 但是在故障场景发生变化情况下这些特征量的大小也会随之发生改变, 比如非线性永久故障下受弧隙间损耗功率影响, 零序电流中“平肩畸变”出现的位置会发生偏移, 这将导致谐波重心值等发生改变。因此, 如何确定不同频段能量占比、谐波重心值等特征量的阈值以辨识“平肩畸变”、“瞬态值”等特征至关重要。

考虑到不同燃弧频次故障下零序电流中“平肩畸变”、“瞬态值”及其出现次数等均具有时序性特征, 本文利用 LSTM 来寻找前文中不同频段能量占比 α_n 、谐波重心 K 和燃弧周期数 T_m 的阈值, 以辨识故障种类。LSTM 网络是递归神经网络 (recurrent neural network, RNN) 的一种变体, 采用 LSTM 网络的优势在于故障种类的辨识结果不仅取决于当前时间窗内零序电流中不同频段能量占比 α_n 、谐波重心 K 和燃弧周期数 T_m 的大小, 还取决于过去时间窗内特征量数据, 且随时间推移不会出现因梯度消失而无法更新训练模型参数的问题。其相应的数学模型如式(4)所示。

$$\begin{cases} h_t = o_t \cdot \tanh(C_t) \\ o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \\ C_t = f_t \cdot C_{t-1} + i_t \cdot C'_t \\ f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \\ i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \\ C'_t = \tanh(W_c \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_c) \\ x_t = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, K, T_m] \end{cases} \quad (4)$$

式中: x_t 为当前零序电流中低中高频段能量占比 α_n ($n=1, 2, 3$)、谐波重心 K 和燃弧周期数 T_m ; h_t 为当前故障种类辨识结果, $h_t=1, 2, 3, 4$ 分别表示辨识的故障种类为非线性永久接地故障、间歇性接地故障、瞬时性接地故障和线性永久接地故障。 f_t 为遗忘系数; i_t 为输入系数; C'_t 为输入数据; C_t 为更新后的细胞状态; o_t 为输出系数; σ 为 sigmoid 激励函数; W_f 和 b_f 分别为遗忘门权重矩阵和偏置; W_i 和 b_i 分别为输入门权重矩阵和偏置; W_c 和 b_c 分别为输入数据权重矩阵和偏置; W_o 和 b_o 分别为输出门权重矩阵和偏置。

根据式(4)可知, 在配电网故障种类辨识过程中, 当前输入的样本为 x_t 和上一时刻的输出值 h_{t-1} 共同作为当前记忆细胞的输入, 该输入在与遗忘门、输入门和输出门进行信息交互后, 生成当前单元的输出数据 h_t , 之后通过分类器将故障种类映射为概率分布, 选择计算概率值最

大的故障种类作为分类辨识结果。

3.2 计及燃弧频次的单相接地故障种类识别算法

利用配电网实测的零序电流波形特征作为原始数据,基于 LSTM 网络搭建计及燃弧频次的故障种类识别模型,如图 11 所示。

1) 首先获取由暂态故障录波装置采集的故障发生后的零序电流波形数据,本文暂态故障录波装置的采样频率为 12.8 kHz,即一个工频周期包含 256 个采样点。

2) 利用滑动平均法对采集的零序电流信号去噪,去噪后的零序电流数据 $y(n)$ 为:

$$y(n) = \frac{1}{9} \sum_{n-4}^{n+4} i(n), 5 \leq n \leq 252 \quad (5)$$

式中: n 为当前采样点; $i(n)$ 为原始零序电流数据。

3) 以 1 个工频周期为数据窗长,利用小波包分解(以 *haar* 小波为基函数)和傅里叶变换计算去噪后零序电流量的低中高频段量的能量占比、谐波重心和燃弧周期数,从而形成可区分故障种类的特征数据集。

4) 将不同故障种类的特征数据集混合并进行归一化处理,按照 7:3 的比例划分训练集和测试集。将训练集数据代入基于 LSTM 的故障种类辨识模型中进行迭代训练,当模型损失函数收敛时,将测试集数据代入已训练好的模型中进行故障种类辨识。

4 算法测试与分析

本文从 2022 年度发生的 4 401 起单相接地故障案例

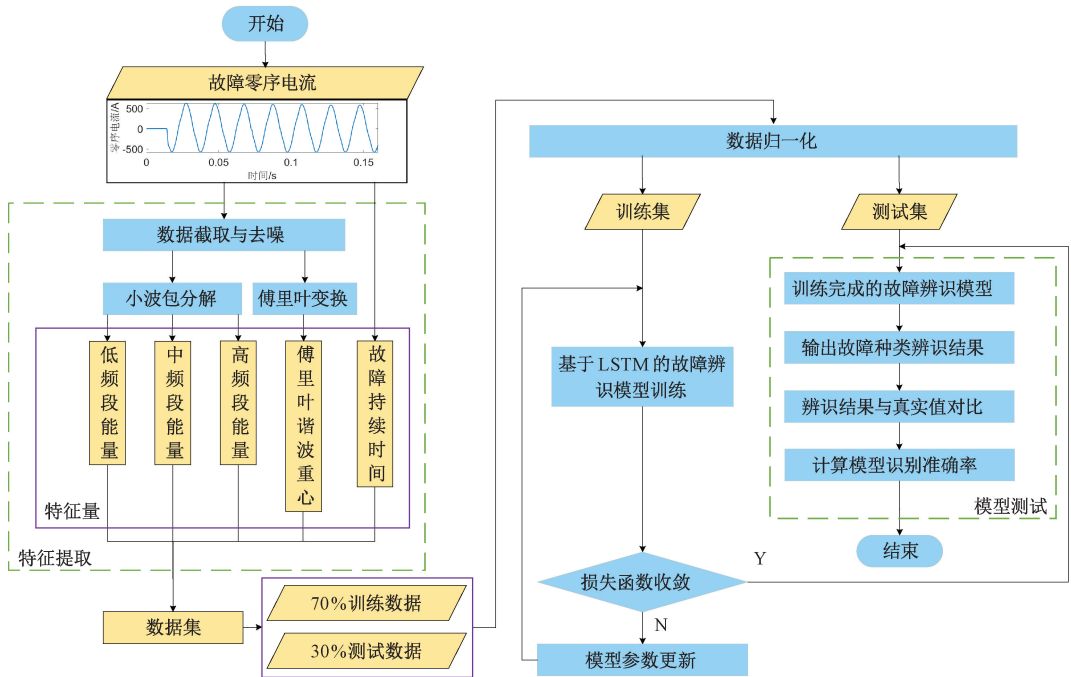


图 11 配电网单相接地故障种类辨识算法流程

Fig. 11 The algorithm flow for identifying the single-phase grounding faults' types in distribution networks

中选取 223 组典型故障录波数据,验证所提计及燃弧频次的配电网单相接地故障种类辨识方法的可靠性。根据所提故障分类方法,故障录波数据集中包含 72 例非线性永久接地故障、69 例间歇性接地故障,19 例瞬时性接地故障和 63 例线性永久接地故障。

4.1 基于 LSTM 故障种类辨识模型参数与性能评估

在对基于 LSTM 的故障种类辨识模型进行训练时,将 223 组数据按照 7:3 的比例划分训练集和测试集,即 156 组用于训练,并利用自适应矩估计算法优化网络参数,具体设置的网络参数如表 1 所示。训练过程中,训练集的准确率和损失值随迭代周期的变化曲线如图 12(a)

表 1 基于 LSTM 故障种类辨识模型的参数设置

Table 1 Parameters settings for the LSTM-based fault type identification model

模型参数	取值
输入序列的长度	256
LSTM 层包含的隐藏单元数量	16
批大小	47
最大迭代轮数	300
初始学习率	0.01
学习率衰减因子	0.5
学习率衰减周期	200

和(b)所示。从图中可以看出,模型的收敛速度很快,当

迭代轮数为 50 轮时,模型的准确率约为 90.78%,损失值约为 0.25;当迭代轮数为 100 轮时,模型的准确率约为

93.62%,损失值约为 0.19。

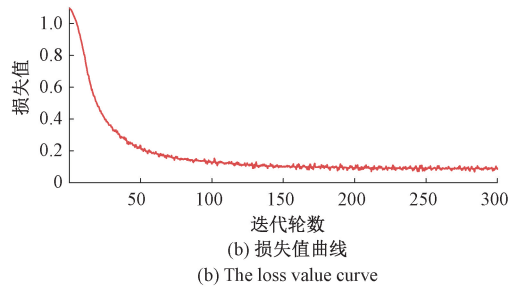
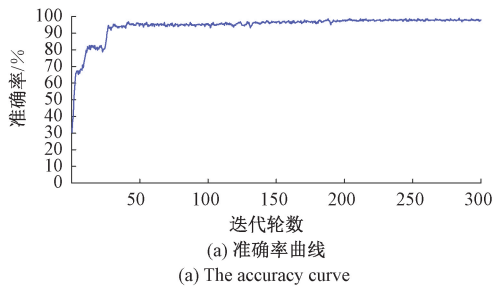


图 12 基于 LSTM 的故障种类辨识模型训练结果曲线

Fig. 12 The training result curve from the LSTM-based fault-type identification model

4.2 故障种类辨识结果

接下来,利用上文训练完成的基于 LSTM 的故障种类辨识模型,对剩余的 67 组实测故障录波数据进行故障种类辨识。图 13 为辨识结果对应的混淆矩阵,可以看出 72 例非线性永久接地故障中有 70 例能够正确辨识,另外 2 例分别为误判为间歇性接地故障和线性永久性接地故障;69 例间歇性接地故障中 65 例能够正确辨识,其他 4 例被误判为非线性永久接地故障;19 例瞬时性接地故障均能够正确辨识;63 例线性永久接地故障中 61 例能够正确辨识,其他 2 例被误判为非线性永久接地故障。

性接地故障,6 例间歇性接地故障被误判为非线性永久接地故障,其他 17 例线性永久接地故障被误判为非线性永久接地故障。基于 GRU 的故障种类辨识结果中有 8 例非线性永久接地故障被误判为间歇性接地故障和线性永久性接地故障,3 例间歇性接地故障被误判为非线性永久接地故障,其他 2 例线性永久接地故障被误判为非线性永久接地故障。实际上,从避免火灾隐患角度看,故障种类辨识方法对非线性永久接地故障的识别准确率要求应该是最高的。通过前文分析,可以发现对于识别非线性永久接地故障,本文所提基于 LSTM 的故障种类辨识模型具有更高的准确率。

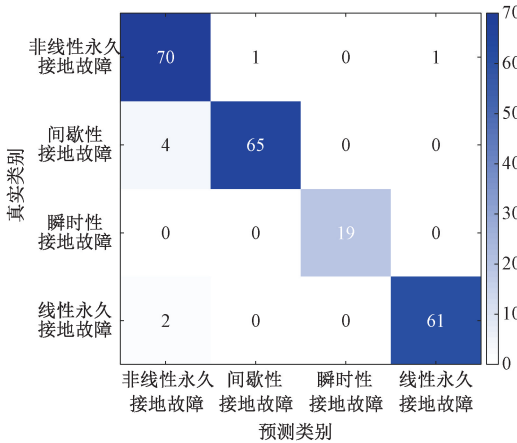


图 13 基于 LSTM 故障种类辨识模型识别结果的混淆矩阵

Fig. 13 Confusion matrix of the results from the LSTM-based fault-type identification model

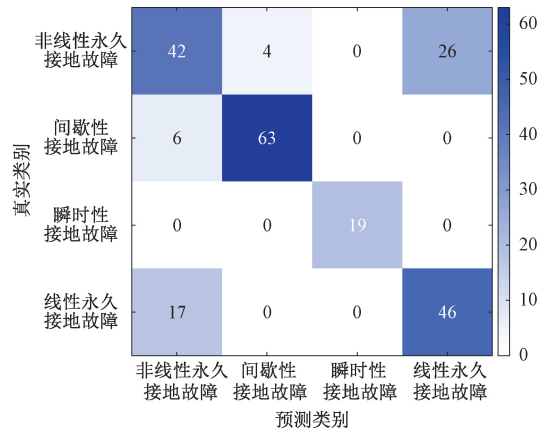


图 14 基于 RNN 故障种类辨识模型识别结果的混淆矩阵

Fig. 14 Confusion matrix of the results from the RNN-based fault-type identification model

为了与本文所提基于 LSTM 的故障种类辨识模型进行对比,论文也基于循环神经网络(recurrent neural network, RNN)门控循环单元(gated recurrent unit, GRU)网络建立了相应的辨识模型,图 14、15 分别为基于 RNN 和 GRU 的故障种类辨识结果对应的混淆矩阵。从图中可以看出,基于 RNN 的故障种类辨识结果中有 30 例非线性永久接地故障被误判为间歇性接地故障和线性永久

表 2 给出了基于 RNN、GRU 和 LSTM 的故障种类辨识模型的故障辨识准确率,可以看出对于非线性永久接地故障,基于 RNN 的模型的辨识准确率仅为 58.3%,基于 GRU 的模型的辨识准确率为 88.8%,而基于 LSTM 的模型的辨识准确率较高,为 97.2%;对于间歇性接地故障,基于 RNN 的模型的辨识准确率为 91.3%,基于 GRU 的模型的辨识准确率为 95.7%,基于 LSTM 的模型的辨

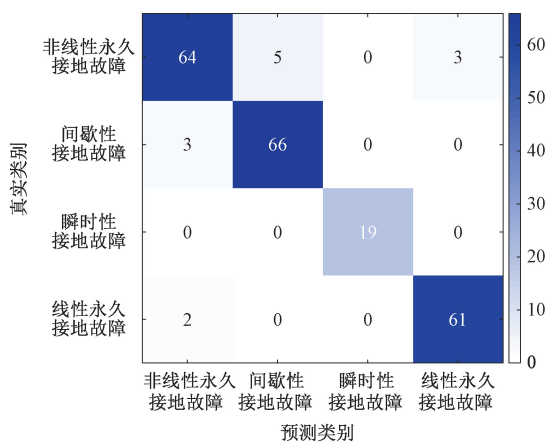


图 15 基于 GRU 故障种类辨识模型识别结果的混淆矩阵

Fig. 15 Confusion matrix of the results from the GRU-based fault-type identification model

识准确率为 94.2%；对于瞬时性接地故障，3 种模型的准确率相同，均为 100%；对于线性永久接地故障，基于 RNN 的模型的辨识准确率为 73%，基于 GRU 和基于 LSTM 的模型的辨识准确率均为 96.8%。

表 2 不同故障种类辨识模型准确率对比

Table 2 Comparison of accuracy rates among different fault type identification models

故障种类	总样本数	基于 RNN	基于 GRU	基于 LSTM
		模型的准确率/%	模型的准确率/%	模型的准确率/%
非线性永久接地故障	72	58.3	88.8	97.2
间歇性接地故障	69	91.3	95.7	94.2
瞬时性接地故障	19	100	100	100
线性永久接地故障	63	73	96.8	96.8
总计	223	76.2	94.2	96.4

实际上，从模型结构上看，基于 RNN 模型的结构相对较简单，训练时会学习全部序列的历史信息，存在梯度爆炸和梯度消失的问题，在本文故障种类辨识问题中准确率最低；而基于 GRU 的模型与 LSTM 的模型是基于 RNN 的改进模型，其中 GRU 的门控较少，计算效率更高且更容易收敛，但该算法抓取时序重要信息的精度较低。相比之下，LSTM 算法中门控较多，其网络结构较复杂，可学习到的参数较多，此算法能够较精确地捕捉到时序重要信息。

本文主要利用实测零序电流波形中“平肩畸变”、“瞬态值”及“瞬态值出现次数”特征来对计及燃弧频次的单相接地短路故障种类进行辨识，而前述特征量均与时序有关，且它们也容易受到实际现场环境（如采样误差等）影响，这为利用实际现场采样数据挖掘“平肩畸变”、“瞬态值”及“瞬态值出现次数”特征带来一定难度。正如前文所述，LSTM 算法具有精确捕捉时序重要信息的能

力，这也就是说，即使实际采样数据的波形中存在一定的干扰影响，但利用 LSTM 算法仍可较精确地捕捉到“平肩畸变”、“瞬态值”及“瞬态值出现次数”特征的变化，从而能够较高准确率（经实际数据测试准确率为 96.4%）。

5 结 论

本文首先系统分析了某地小电流接地配电网现场故障案例数据，提出计及燃弧频次单相接地故障分类方法，按火灾隐患程度将单相接地故障划分为非线性永久接地故障、间歇性接地故障、瞬时性接地故障和线性永久接地故障。进一步，结合零序电流波形特征对所提故障种类进行了描述与数学表征，并以此为基础，构建了基于 LSTM 的故障种类辨识模型。最终，针对现场实际故障录波案例，对所提故障种类辨识方法进行了验证，结果表明所提方法优于基于 RNN 和 GRU 的故障种类辨识方法，能够较为准确地识别出非线性永久接地故障、间歇性接地故障、瞬时性接地故障和线性永久接地故障，尤其对于非线性永久接地故障的识别准确率较高，为 97.4%。

参考文献

[1] 戚振彪,郭晓雪,寿宇铭,等.林区架空配电线路诱发森林火灾风险评估[J].消防科学与技术,2023,42(6):829-834.
 QI ZH B, GUO X X, SHOU Y M. et al. Risk assessment of fire induced by overhead distribution lines across forest areas [J]. Fire Science and Technology, 2023,42(6): 829-834.

[2] 王宾,崔鑫,董新洲.配电线路弧光高阻故障检测技术综述[J].中国电机工程学报,2020,40(1):96-107,377.
 WANG B, CUI X, DONG X ZH. Overview of arc high impedance grounding fault detection technologies in distribution system [J]. Proceedings of the CESS, 2020, 40(1):96-107,377.

[3] ZENG H, YANG P H, CHENG H B, et al. Research on single-phase to ground fault simulation base on a new type neutral point flexible grounding mode [J]. IEEE Access, 2019,(7):82563-82570.

[4] 陈再航,刘晓波,聂远航,等.基于自适应VMD的含DG配电网谐振接地故障选线方法[J].国外电子测量技术,2022,41(1):146-152.
 CHEN Z H, LIU X B, NIE Y H, et al. Adaptive VMD-based resonant ground fault routing method for distribution networks with DG [J]. Foreign Electronic Measurement Technology,2022,41(1):146-152.

[5] 杨洋,黄罗杰,李平,等.基于多维度特征提取的电弧故障检测方法[J].电子测量与仪器学报,2021,

- 35(10):107-115.
- YANG Y, HUANG L J, LI P, et al. Arc fault detection based on multi-dimension feature extraction [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(10): 107-115.
- [6] 司马文霞,冉锐,袁涛,等.采用数学形态学的弧光接地过电压识别方法[J].高电压技术,2010,36(4):835-841.
- SIMA W X, RAN R, YUAN T, et al. Identification of arc grounding over-voltage using mathematical morphology transform [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(4): 835-841.
- [7] 王毅,李曙,李松浓,等.瞬时特征下极限学习机在接地故障诊断中的应用[J].电子测量与仪器学报, 2022, 36(1): 212-219.
- WANG Y, LI SH, LI S N, et al. Application of ground fault diagnosis based on extreme learning machine under instantaneous characteristics [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(1): 212-219.
- [8] 董俊,李一凡,束洪春,等.配电网馈出线路单相永久性接地故障性质辨识方法[J].电工技术学报, 2020, 35(21):4576-4585.
- DONG J, LI Y F, SHU H CH, et al. Study on identification method of single phase permanent ground fault in distribution network feed out line [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(21):4576-4585.
- [9] GUO M F, GUO Z Y, GAO J H, et al. High-impedance fault detection methodology using time-frequency spectrum and transfer convolutional neural network in distribution network [J]. IEEE Systems Journal, 2023, 17(3):4002-4013.
- [10] 杨帆,任伟,沈煜,等.谐振接地配电网电弧接地故障暂态分析方法与辨识[J].电力系统及其自动化学报, 2021, 33(4):23-31.
- YANG F, REN W, SHEN Y, et al. Transient analysis method and identification of arc grounding faults in Petersen coil grounded distribution network [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(4):23-31.
- [11] LALA H, KARMAKAR S. Detection and experimental validation of high impedance arc fault in distribution system using empirical mode decomposition [J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(3):3494-3505.
- [12] 沈煜,阮羚,戴兵,等.配电网单相电弧接地故障的辨识方法[J].武汉大学学报(工学版), 2018, 51(12):1098-1104.
- SHEN Y, RUAN L, DAI B, et al. Identification of single-phase arc grounding fault in power distribution network [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(12):1098-1104.
- [13] 韦明杰,石访,张恒旭,等.基于零序电流波形区间斜率曲线的配电网高阻接地故障检测[J].电力系统自动化, 2020, 44(14):164-171.
- WEI M J, SHI F, ZHANG H X, et al. Detection of high impedance grounding fault in distribution network based on interval slope curves of zero-sequence current [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14):164-171.
- [14] 杨耿杰,王康,高伟.基于相空间重构和迁移学习的配电网高阻接地故障检测[J].电力系统保护与控制, 2022, 50(13):151-162.
- YANG G J, WANG K, GAO W. High impedance fault detection in a distribution network based on phase space reconstruction and transfer learning [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13):151-162.
- [15] LIANG Y L, LI K J, MA Z, et al. Typical fault cause recognition of single-phase-to-ground fault for overhead lines in nonsolidly earthed distribution networks [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(6):6298-6306.
- [16] ZHENG T Q, LIU Y D, YAN Y J. et al. RSSPN: Robust semi-supervised prototypical network for fault root cause classification in power distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(4):3282-3290.
- [17] LIU H, LIU S, ZHAO J B. et al. Dual-channel convolutional network-based fault cause identification for active distribution system using realistic waveform measurements [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(6):4899-4908.
- [18] 杨帆,金鑫,沈煜,等.小电流接地故障多层次分类及其识别模型[J].电力系统自动化, 2018, 42(15):186-191.
- YANG F, JIN X, SHEN Y, et al. Multilevel classification and identification model for earth faults in non-solidly earthed network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15):186-191.
- [19] 郑梦笛,吴细秀,闫格.基于新型故障电弧模型的电弧能量特性分析[J].中国电力, 2015, 48(11):49-53.
- ZHENG M D, WU X X, YAN G. Investigation on fault arc energy under different load based on the new time varying resistance fault arc model [J]. Electric Power, 2015, 48(11):49-53.
- [20] 包从波.基于深度神经网络的配电网单相接地故障辨识研究[D].徐州:中国矿业大学, 2019.
- BAO C B. Research on identification of single-phase

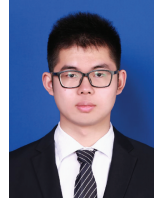
- grounding fault in distribution network based on deep neural network [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [21] 罗屹豪, 杨廷方, 汪新秀, 等. 自能式空气炮保护间隙快速熄弧装置 [J]. 南方电网技术, 2022, 16(5): 71-78.
LUO Y H, YANG T F, WANG X X, et al. Rapid ARC-extinguishing device for self-charging air cannon with protective clearance [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(5): 71-78.
- [22] 张婷, 王海淇, 张认成, 等. 基于自归一化神经网络的电弧故障检测方法 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(3): 141-149.
ZHANG T, WANG H Q, ZHANG R CH, et al. An arc fault detection method based on the self-normalized convolutional neural network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(3): 141-149.
- [23] 韦明杰, 石访, 张恒旭, 等. 基于同步零序电流谐波群体比相的谐振接地系统高阻故障选线及区段定位方法 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(24): 8358-8372.
WEI M J, SHI F, ZHANG H X, et al. Feeder selection and section location of high impedance fault at resonant networks based on the phase differences between the synchronous harmonics of the zero sequence currents [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8358-8372.
- [24] 顾荣斌, 蔡旭, 陈海昆, 等. 非有效接地电网单相电弧接地故障的建模及仿真 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 63-67.
GU R B, CAI X, CHEN H K, et al. Modeling and simulating of single-phase arc grounding fault in non-

effective earthed networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 63-67.

- [25] 齐郑, 赵昕一, 陈艳波. 暂态与稳态相不对称信号相结合的配电网单相接地故障感知技术 [J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1264-1276.

QI ZH, ZHAO X Y, CHEN Y B. Single-phase grounding fault sensing technology in distribution network based on transient and steady state phase asymmetrical signals [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1264-1276.

作者简介



陈晓旭, 2021 年于青岛农业大学获得学士学位, 现为北京林业大学在读研究生, 主要研究方向为配电网故障识别与定位。

E-mail: kumiko@bjfu.edu.cn

Chen Xiaoxu received his B. Sc. degree from Qingdao Agricultural University in 2021. Now he is a M. Sc. candidate in Beijing Forestry University. His main research interests include fault identification and localization for single-phase grounding faults in distribution network.



刘素梅 (通信作者), 2013 年于华北电力大学获得博士学位, 现为北京林业大学副教授、硕导, 主要研究方向为新能源电力系统保护与控制。

E-mail: smliu@bjfu.edu.cn

Liu Sumei (Corresponding author) received her Ph. D. degree from North China Electric Power University in 2013. Now she is an associate professor in Beijing Forestry University. Her main research interests include protection and control in new energy power systems.