

采用特征频率电流相位相似度的配电网 接地故障选线方法

李江涵, 张钧益, 熊庆, 庄毅, 唐逸杰, 张其旺, 王致文, 汲胜昌

(西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对小电流接地系统单相接地故障选线存在特征微弱、选线效果易受接地过渡电阻影响等难题,提出了一种采用特征频率电流相位相似度的配电网接地故障选线方法。首先,采用信号注入法,对小电流接地系统发生单相接地故障后的零序电流分布和注入特征电流信号分布展开分析,获得了故障特征电流分布规律;其次,分析不同特征频率、线路长度和线路拓扑结构对注入电流信号传播特性的影响,选择 220 Hz 作为注入电流的特征频率。采用 PSCAD/EMTDC 平台,搭建了配电网仿真模型,当故障发生后注入特征频率电流,分析每条线路特征频率信号的幅值和相位特征,利用特征频率电流的相位,提出了采用特征频率电流相位相似度的选线方法,构建了单相接地故障选线判据。对单相接地故障的不同接地过渡电阻工况进行仿真实例验证,并利用所提方法进行选线,结果表明:在高阻接地工况下,所提方法能够准确识别故障线路,具备较高的灵敏度和准确性;与传统选线方法相比,所提方法的复杂度更低,且可将接地过渡电阻提升至 10 k Ω 。所提方法可为小电流接地系统单相接地故障选线的理论研究提供一种新思路

关键词: 配电网;单相接地故障;信号注入;故障选线;电流相位相似度

中图分类号: TM862 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202504008 **文章编号:** 0253-987X(2025)04-0081-12

Line Selection Method for Grounding Faults in Distribution Networks Based on Phase Similarity of Characteristic Frequency Current

LI Jianghan, ZHANG Junyi, XIONG Qing, ZHUANG Yi, TANG Yijie,

ZHANG Qiwan, WANG Zhiwen, JI Shengchang

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In response to the challenges of weak characteristics and the influence of grounding transition resistance on line selection for single-phase grounding faults in low-current grounding systems, a line selection method for grounding faults in distribution networks based on the phase similarity of characteristic frequency current is proposed. Firstly, using signal injection method, the distribution of zero-sequence current and characteristic current signal distribution after a single-phase grounding fault occurs in a low-current grounding system is analyzed to obtain the fault characteristic current distribution pattern. Secondly, the impact of different characteristic frequencies, line lengths, and line topologies on the propagation characteristics of the injected current signals is analyzed, with 220 Hz selected as the characteristic frequency for the injected current. Using the PSCAD/

收稿日期: 2024-07-23。 作者简介: 李江涵(2000—),男,硕士生;熊庆(通信作者),女,博士,副教授,博士生导师。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB3205700)。

网络出版时间: 2024-12-04

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20241204.1122.002>

EMTDC platform, a distribution network simulation model is built. After a fault occurs, characteristic frequency current is injected, and the amplitude and phase characteristics of the characteristic frequency signals for each line are analyzed. By utilizing the phase of the characteristic frequency current, a line selection method based on the phase similarity of characteristic frequency currents is proposed, and criteria for single-phase grounding fault line selection are established. Simulation examples are conducted for different grounding transition resistance conditions of single-phase grounding faults, and line selection is performed using the proposed method. Results show that under high-resistance grounding conditions, the proposed method can accurately identify the faulty line with high sensitivity and accuracy. Compared to traditional line selection methods, the proposed method has lower complexity and can handle grounding transition resistance up to 10 k Ω . This method provides a new perspective for the theoretical research on line selection for single-phase grounding faults in low-current grounding systems.

Keywords: distribution network; single phase ground fault; signal injection; fault line selection; current phase similarity

我国的城乡配电系统电压等级为 6~35 kV,其中性点接地方式绝大多数采用的是小电流接地。根据相关电力故障报告的统计,配电网线路的接地故障中单相接地故障约占 80% 以上^[1]。单相接地故障会引起非故障相对地电压升高,过高的电压会破坏设备绝缘,从而损坏设备,而电弧性接地所产生的高温可能导致火灾等事故。为了保障供电质量,保护人员和设备安全,当单相接地故障发生时,需要快速、准确地找出并切断故障线路^[2]。因此,开展配电网单相接地故障选线方法研究具有重要意义。

由于小电流接地系统发生单相接地故障后,故障特征信号微弱,且接地过渡电阻的阻值具有随机性,对故障选线造成了一定的挑战^[3]。随着现代电力系统网络的不断发展,相关研究的不断推进,众多学者提出了一系列单相接地故障选线的理论与方法。根据是否利用故障的固有信息,选线方法主要分为故障信息应用法和信号注入法两类,其中故障信息应用法又分为稳态量选线法和暂态量选线法两种^[4-5]。

稳态量法主要利用故障发生后系统中的一系列稳态特征量进行故障选线^[6-9]。刘健等^[10]对零序电流互感器配大负载电阻时的特性开展了分析,提出了一种基于零序电流互感器配较大负载电阻的单相接地故障选线方法。Liang 等^[11]利用故障线路和非故障线路的零序电流与差分零序电压的比值波动系数具有明显不同的特征,提出了基于线路零序电流和差分零序电压比值波动的故障检测方法。基于稳态量的单相接地故障选线方法忽略了故障早期阶段的信息,且对于瞬态故障或谐振接地系统并不可靠。

瞬态量选线方法利用的是故障发生后极短时间

内的瞬态特征信息对故障进行选线^[12-16]。Yang 等^[17]提出了一种结合瞬态低频电流(transient low frequency current, TLFC)和弱稳定直流(weak steady DC, SDC)的单相接地故障选线方法,这种同时利用两种时间尺度的综合判据,保证了判据的及时性和正确性。Wei 等^[18]利用不含基频分量(fundamental frequency component, FFC)的瞬态电流的前半个功率周期内的瞬态能量和之后的余弦相似度,并用拉普拉斯分布合并将两个故障指标进行合并,最后通过计算累积密度函数(cumulative distribution function, CDF)定量估算出每条馈线的故障可能性。Wang 等^[19]利用配电网同步测量技术对具有横向分支的配电网络的等效阻抗的相频特性进行了分析,得到了具有明显故障特征的频段,提出了一种基于所选频段(selected frequency band, SFB)的瞬态零序电流能量分析的中性点非有效接地系统的单相故障选线方法。由于故障发生后的暂态过程短,对信号的采集设备的分辨率要求高,在实际应用中容易丢失特征信号。

信号注入法通过在配网中检测中性点或母线处注入的特定电流信号,根据故障发生后该信号在不同线路中的特性进行选线。史可鉴等^[20]提出利用高压脉冲信号源作为行波信号注入源,并根据行波信号反射结果,应用小波变换算法识别线路故障特征波,实现配网线路单相接地故障状态诊断。王志成等^[21]提出了一种基于配电网参数的故障选线方法,在检测到接地故障发生后,利用各线路中性点电压和零序电流的注入特征频率分量拟合出系统过渡电阻和总对地电容,实现故障选线。王晓卫等^[22]提

出了一种主动注入信号辨识的故障选线方法,注入频率为 25 Hz 的低频信号,并利用 Prony 算法对故障发生后各线路中零序电流的特征频率分量的幅值进行识别完成选线。Niu 等^[23]提出了一种基于注入信号的小电流接地系统单相接地故障选线方法,利用全相傅里叶变换提高了信号频域转换的精度,并以故障后注入信号的有功功耗为选线标准。

随着计算机技术的不断发展,人工智能和机器学习等技术被越来越多地运用于接地故障的故障选线中^[24-29]。Teimourzadeh 等^[30]将输电线路传递函数的迹线作为卷积神经网络(CNN)和深度强化学习(DRL)混合模型的输入,进行高阻接地故障的选线,结果表明混合模型的精确度优于 CNN 网络。Guo 等^[31]利用故障发生后的瞬态零序电流,并将其串联起来构建特征波形,通过一维 CNN 网络自适应检测,定位故障线路。高淑萍等^[32]利用克拉克变换解耦后的故障电流线模分量,结合变分模态分解和 CNN 网络,实现混合三端直流输电线路的故障定位。利用人工智能实现故障选线的方法虽然适用性广,但针对不同的系统可能需要进行重新构建模型,且由于计算量大,可能无法满足故障选线对于快速性的需求。

本文提出了一种基于注入特征频率电流相位相似度的配电网接地故障选线方法,通过分析不同频率、线路长度以及线路拓扑结构对特征频率电流在线路中传输特性的影响,选择 220 Hz 作为特征频率。在单相接地故障发生后注入特征信号,通过计算特征频率电流的相位相似性,对故障线路进行识别,并采用 PSCAD/EMTDC 软件搭建线路仿真模型对本方法进行验证。

1 配电网单相接地故障分析

1.1 含信号注入源的谐振接地系统分析

配电网单相接地的等效电路图如图 1 所示,注入信号源与消弧线圈并联, $\dot{I}_{\text{sig}}$ 为信号注入源, L_p 为消弧线圈电感, R_L 为消弧线圈电阻, R_f 为接地过渡电阻, u_f 为故障点虚拟等效电压源, C 为线路对地电容, U_0 为中性点零序电压, S_1 、 S_2 为开关。

当线路正常运行时, S_1 和 S_2 开关断开,当接地故障发生后, S_1 和 S_2 闭合,根据基尔霍夫电流定律,故障电流可以由下式计算得到,

$$\dot{I}_f = \dot{I}_{\text{sig}} - \dot{U}_0(Y_L + Y_C) \quad (1)$$

式中: Y_L 为消弧线圈接地导纳; Y_C 为线路对地导纳。

由式(1)可知,故障电流的大小与注入源和线路参数有关,中性点电压也会受到接地过渡电阻的影响,从而影响故障电流的大小。

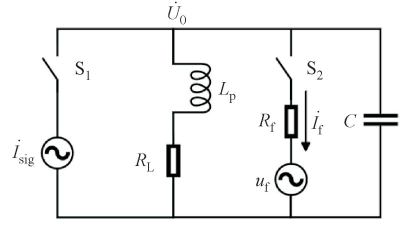


图1 配电网单相接地故障的等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of single phase ground fault in distribution network

1.2 特征频率电流分布路径分析

如图 2 为谐振接地系统的零序等值网络,母线上共有 n 条线路, C_i 为各条线路的零序对地电容,假设馈线 L_i 的 A 相发生单相接地故障。

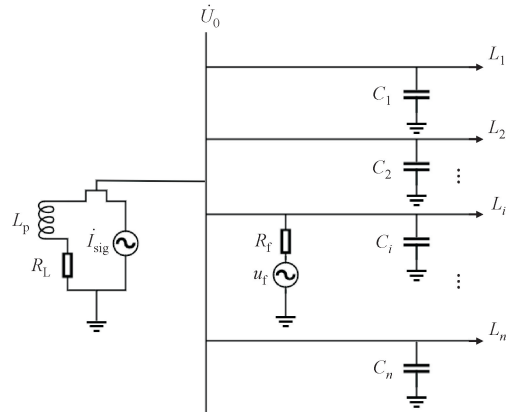


图2 谐振接地系统的零序等值电路

Fig.2 Zero sequence equivalent circuit for resonant ground systems

考虑到配电网的三相不对称,则特征电流注入后配电网中性点的零序电压 $\dot{U}_0$ 如下所示

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{I}_{\text{sig}} - \dot{E}_A \dot{Y}_{0A} - \dot{E}_B \dot{Y}_{0B} - \dot{E}_C \dot{Y}_{0C} - \dot{E}_A / R_f}{\dot{Y}_p + \dot{Y}_{0A} + \dot{Y}_{0B} + \dot{Y}_{0C} + 1/R_f} \quad (2)$$

式中: $\dot{E}_X$ 和 $\dot{Y}_{0X}$ (X 为 A,B,C) 分别为配电网三相电源电压和对地导纳; $\dot{Y}_p$ 为消弧线圈导纳,则故障线路的零序电流 $\dot{I}_{0i}$ 计算如下所示

$$3\dot{I}_{0i} = \dot{U}_0 \left(\dot{Y}_i + \frac{1}{R_f} \right) + \dot{I}_{bdi} + \frac{\dot{E}_A}{R_f} \quad (3)$$

其中, $\dot{Y}_i$ 为故障线路的对地导纳, $\dot{I}_{bdi}$ 为故障线路不平衡运行所产生的不平衡电流。将式(2)和式(3)相结合进一步进行简化可得下式

$$3\dot{I}_{0i} = -h\dot{I}_{bd} + h\dot{I}_{\text{sig}} + (1-h) \frac{\dot{E}_A}{R_f} + \dot{I}_{bdi} \quad (4)$$

式中: $h = (\dot{Y}_i + 1/R_f) / (\dot{Y}_p + \dot{Y}_{0A} + \dot{Y}_{0B} + \dot{Y}_{0C} +$

$1/R_f)$ 为只与线路结构以及接地故障接地过渡电阻相关的参数; $\dot{I}_{bd} = \dot{E}_A \dot{Y}_{0A} + \dot{E}_B \dot{Y}_{0B} + \dot{E}_C \dot{Y}_{0C}$ 表示由于系统不对称运行所产生的系统不平衡电流。由式(4)可以分析得出,故障线路的零序电流只与系统不平衡电流、注入信号、短路电流以及故障线路不平衡电流相关,且当接地过渡电阻越小,故障线路中流经的注入电流信号越大。当接地故障为金属性接地时, h 约为 1,注入信号几乎完全流入故障线路。

2 特征频率电流传播衰减特性分析及特征频率选择

2.1 线路模型搭建

在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中搭建配电网模型,其中电缆线路和架空线路均采用频变(相位)模型,由线路常量程序可以计算得到 1 km 电缆线路和架空线路的正序、负序、零序标么参数,基准电压为 230 kV,基准功率为 100 MV·A,计算后得到线路模型具体参数有名值如表 1 和表 2 所示。

表 1 电缆线参数

Table 1 Cable parameters

电网结构	电阻/ Ω	电感/H	电容/nF
正序	0.303 6	0.010 7	968.30
负序	0.303 6	0.010 7	968.37
零序	0.655 1	0.000 6	968.30

表 2 架空线参数

Table 2 Overhead line parameters

电网结构	电阻/ Ω	电感/H	电容/nF
正序	0.377 1	0.003 2	32.866
负序	0.377 1	0.003 2	32.866
零序	0.814 2	0.014 9	13.305

消弧线圈的参数设置与线路有关,消弧线圈电感的计算如式(5)所示,其中: f_N 为工频 50 Hz; l 为系统线路的总长; C_0 为馈线的单位长度零序电容; V 为失谐度;消弧线圈电阻一般取工频下电感感抗的 10%。

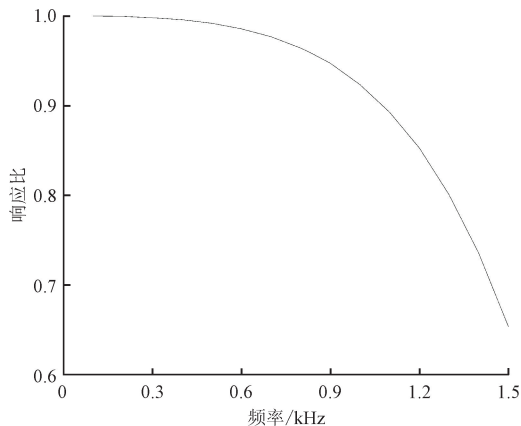
$$L_N = \frac{1}{3(1+V)(2\pi f_N)^2 l C_0} \tag{5}$$

2.2 特征频率对传播衰减特性的影响

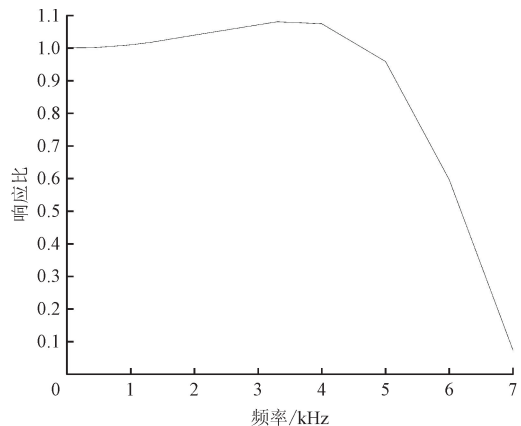
对于相同参数的电缆或架空线路,由于线缆对地电容的存在,不同频率的注入电流在其中的传播衰减规律有所差异。为了确定效果较好的特征电流信号频率,分别搭建电缆和架空线仿真模型,开展不同频率的特征电流信号在不同线路中从注入点至接地点

段的传播衰减特性仿真研究。为了尽可能减小对配电网正常运行过程中造成过多影响,符合 10 kV 配电网谐波标准,对于基准短路容量 100 MV·A 的 10 kV 配电网,注入 1 kHz 及以下电流应不大于 2.6 A^[33],所注入特征电流信号在保证不被背景噪声淹没的同时,应尽可能减小注入信号幅值,因此对于搭建的 20 MV·A 的 10 kV 配电网仿真模型,设置中性点注入 0.3 A 的特征电流信号,线路长度 $L=10$ km, A 相经 0.01 Ω 电阻接地,改变注入信号的频率,记录线路 A 相首端及线路末端接地点前的电流。

定义末端电流与首端电流之比作为响应比,通过仿真获得数据,计算得到的电缆线路和架空线路频率响应曲线如图 3 所示。



(a) 电缆线路



(b) 架空线路

图 3 不同线路的频率响应曲线

Fig. 3 Frequency response curves of different lines

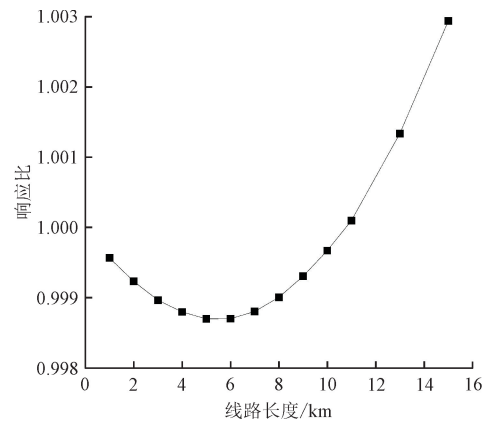
根据仿真结果,在配电网中压线路中,无论是在电缆还是架空线路中,1 000 Hz 以下的特征频率电流信号基本没有衰减,可以实现中性点注入来判别单相接地故障。考虑到实际工况中电力系统的工频及谐波干扰,特征频率信号的频率选择应介于工频 N 次与 $N+1$ 次谐波之间,因此,参考“S”信号注入

法的频率选择原则,本文选用 220 Hz 作为注入特征电流信号的频率^[34-36]。

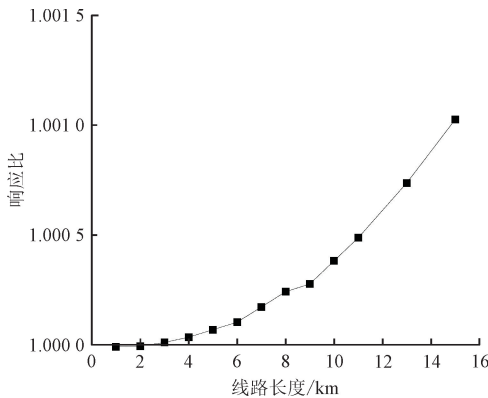
2.3 线路长度对频率响应的影响

线路的阻抗、电容等参数一般来说与线路长度成正比,架空线及电缆线长度的改变会引起线路参数的变化,既影响线路的阻抗,又影响线路的电容的大小,从而会对在中压线路上传输的特征频率电流信号的传播衰减特性产生影响。分别搭建电缆和架空线仿真模型分析注入点至接地点前的线路长度对信号传播衰减的影响,中性点注入 220 Hz、0.3 A 的特征频率电流,A 相经 0.01 Ω 的电阻接地,改变线路长度,记录线路 A 相首端及线路末端接地点前的电流。

注入信号的响应比随线路长度变化的关系如图 4 所示,随着线路长度的增长,电缆线路的响应比先减小后增大,而架空线路的响应比缓慢增大。在 1~15 km 的线路长度内两种类型的响应比变化均不超过 0.3%,可以认为配电网 1~15 km 范围内线路长度改变导致的线路参数变化对 220 Hz 电流信号的传播衰减特性几乎没有影响。



(a) 电缆线路



(b) 架空线路

图 4 特征电流信号的传播衰减特性与线路长度的关系
Fig. 4 Propagation attenuation characteristics of characteristic current signals as a function of line length

改变电缆和架空线路长度,获取不同线路条件下的传递函数,对不同长度线路传输电流信号的幅频特性展开分析,如图 5 和图 6 所示。随着电缆和架空线路长度的增加,出现尖峰的频率逐渐降低,且 1 000 Hz 以下的低频部分的幅频特性相近,幅值衰减约为 0,故选用 220 Hz 的特征频率电流作为注入信号,在配电网线路长度改变导致的线路参数变化的情况下仍适用。

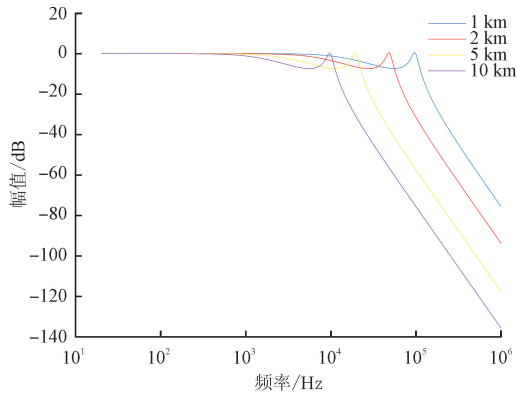


图 5 不同长度电缆的幅频特性

Fig. 5 Amplitude frequency characteristics of cables of different lengths

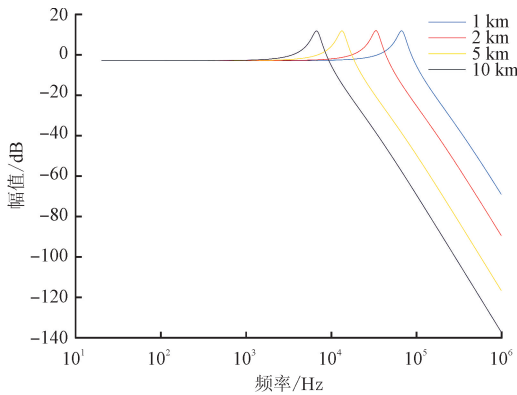


图 6 不同长度架空线的幅频特性

Fig. 6 Amplitude frequency characteristics of overhead lines of different lengths

2.4 拓扑结构对传播衰减特性的影响

为了分析线路拓扑结构对注入信号传播特性的影响,分别搭建电缆线路和架空线路的配电网单节点连接的多分支结构以及多节点连接的多分支结构仿真模型,两类结构如图 7 所示,其中 Z_s 表示系统及信号源阻抗, L 表示主干线路, L_1 表示支路, Z_L 为干路阻抗, Z_{L_1} 为支路阻抗。

在中性点注入 220 Hz、0.3 A 的特征频率电流的信号,主干线路 6 km,每段分支长度 3 km。记录

首端电流和末端电流,分析分支数量对注入信号在系统中传播衰减特性的影响,响应比和分支数量的关系如图 8 和图 9 所示。

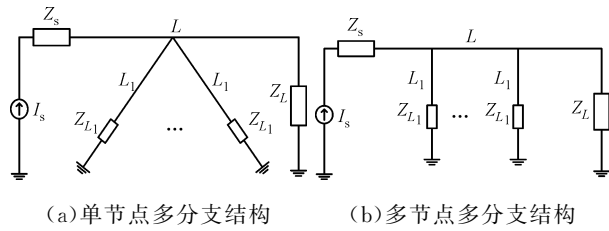


图 7 两种典型的拓扑结构
Fig. 7 Two typical topologies

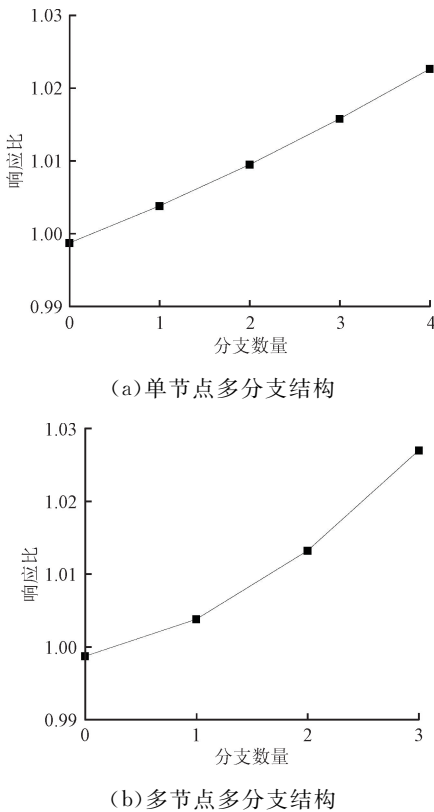


图 8 电缆线路特征电流信号的传播衰减特性与分支数量的关系

Fig. 8 Propagation attenuation characteristics of characteristic current signals in cable lines of the number of branches

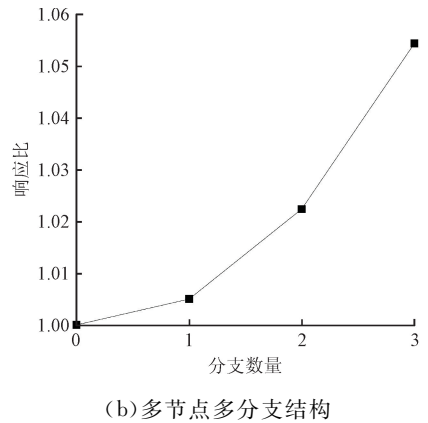
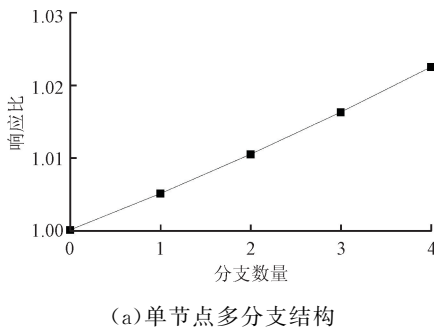


图 9 架空线路特征电流信号的传播衰减特性与分支数量的关系

Fig. 9 Propagation attenuation characteristics of characteristic current signals in overhead lines of the number of branches

从图 8、图 9 可见,在 4 种结构下,随着分支数量的增加,电流响应比都会缓慢增加,其中单节点多分支结构中响应比随着分支数量的增加线性增大,而多节点多分支结构的响应比增长特性线性度较低。在架空线和电缆线路的两种线路结构中,特征频率电流响应畸变程度均小于 6%,可以说明分支数量的改变导致的线路参数变化,基本不会使 220 Hz 的特征频率电流信号产生严重畸变,说明 220 Hz 特征频率电流信号适用于拓扑结构改变导致线路参数变化的工况。

3 接地故障选线方法的提出

3.1 相位相似度的原理

搭建 4 路配电网模型如图 10 所示,中性点经消弧线圈接地,发电机电压置 0,4 条线路从上至下分别为 L_1 (3 km 架空线和 3 km 电缆)、 L_2 (6 km 架空线和 3 km 电缆)、 L_3 (6 km 架空线)、 L_4 (9 km 电缆)。中压侧变压器的额定容量为 20 MV · A,额定输入、输出电压分别为 110 kV 和 0.5 kV(通常表示为 20 MV · A, 110 kV/0.5 kV);低压侧变压器的额定容量为 20 MV · A,额定输入、输出电压分别为 10 kV 和 0.5 kV(通常表示为 20 MV · A, 10 kV/0.5 kV)。设置单相接地故障发生装置线路 L_2 的 A 相,过渡电阻设置为 1 k Ω ,故障发生时刻为 0.1 s,故障发生后从中性点注入电流为 0.3 A,频率为 220 Hz 的特征电流,故障时长为 0.2 s,仿真时长为 0.3 s,仿真步长为 1 μ s。

采集各条线路首端特征零序电流幅值、相位结果如图 11(a)和图 11(b)所示。由于故障线路过渡电阻较大,且 L_4 电缆对地电容较大,故障线路 L_2 上的特征电流幅值小于 L_4 的,使用特征频率电流幅值

进行选线的方式在混合线路的情况下容易失效。对故障发生后各条线路的零序电流相位进行分析,在

接地电阻较大的情况下,健全线路相位基本一致,故障线路相位与健全线路存在明显差异性。

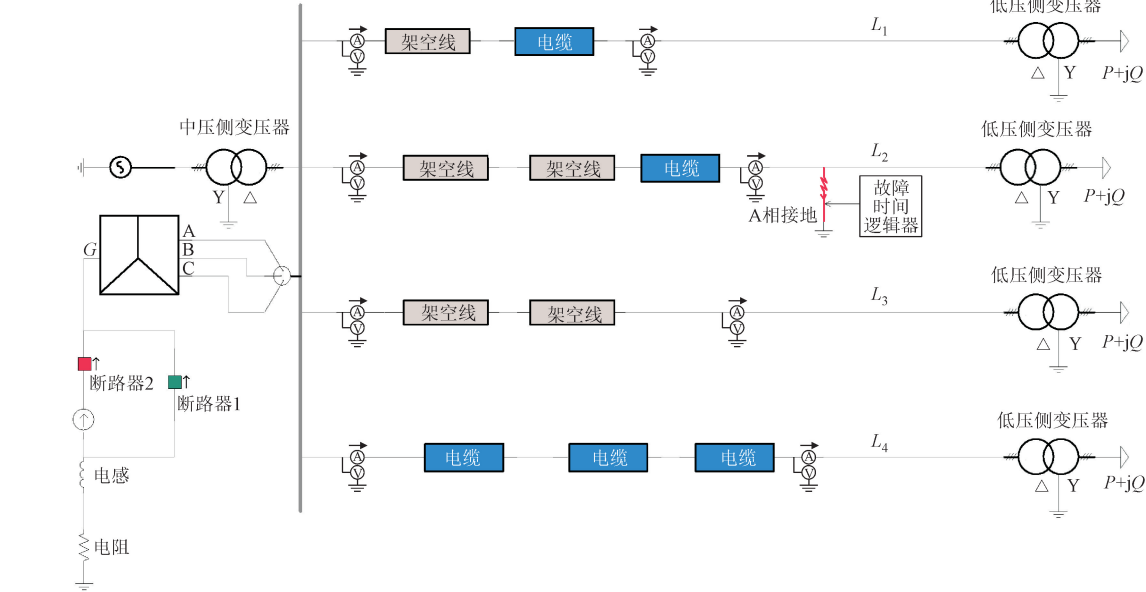


图 10 配电路仿真模型
Fig. 10 Distribution line simulation model

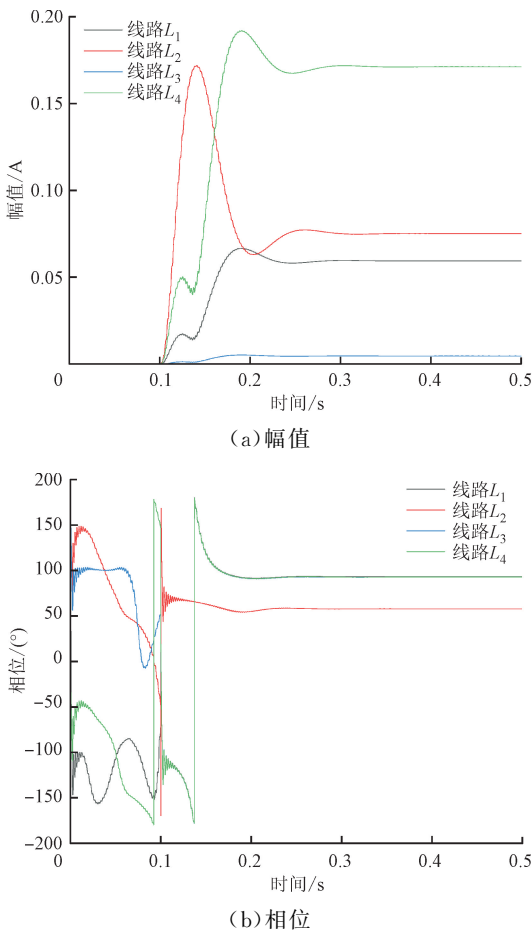


图 11 故障发生后特征频率电流的幅值和相位
Fig. 11 Amplitude and phase of characteristic frequency currents after fault occurrence

为了利用线路之间首端特征频率零序电流的相位对单相接地故障进行选线,定义了相位相似度作为用于故障选线的特征参量,其计算式如下

$$c = \sin(\varphi_i - \varphi_j) \tag{6}$$

式中： c 为相位相似度； φ_i 为线路 i 的特征零序电流的特征频率相位； φ_j 为线路 j 的特征零序电流的特征频率相位。不存在故障时,各线路之间注入后的零序特征频率电流的特征频率相位相似程度约等于 0；接地故障存在时,相位差正弦值大于 0,且随接地电阻增大逐渐接近于 0。

3.2 特征频率电流相位提取方法

在电流测量设备测得各线路的首端零序电流后,利用快速傅里叶变换(FFT)获得电流信号的特征频率零序电流的相位,对于 FFT 计算得到的某个频率点 k ,可以简化表示为实数与复数相加的形式

$$X_k = a_k + jb_k \tag{7}$$

式中： X_k 为 k 频率点信号的复数形式； a_k 为实数部分； b_k 为虚数部分。

那么, k 频率点信号的相位 φ_{ik} 可以通过下式计算得到

$$\varphi_{ik} = \arctan(b_k/a_k) \tag{8}$$

实际应用中通过磁电耦合传感器进行电流测量,在进行仿真验证时结合磁电耦合传感器高灵敏、可选频的特性,在 PSCAD/EMTDC 仿真模型中添加带通 6 阶 Butterworth 滤波器,用来模拟磁电耦

合传感器,设置的通带范围为 210~230 Hz,滤波器的频率频响曲线如图 12 所示。

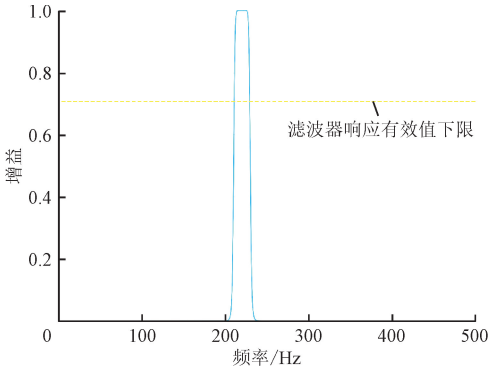


图 12 带通 6 阶 Butterworth 滤波器的频响曲线
Fig. 12 The response curve of bandpass 6th order Butterworth filter

3.3 基于相位相似度的选线算法流程

基于故障线路与健全线路特征频率电流的相位差异性,提出了基于注入特征频率电流相位相似度的接地故障选线方法,测试表明即使在接地过渡电阻很高的情况下,该方法依然能够成功识别故障,具有较高抗过渡电阻能力,算法流程如图 13 所示。当配电网线路首端的电压互感器检测到零序电压超越设定的阈值后,判断为接地故障发生,向注入源发出信号注入指令,注入源接收指令后通过接地变压器由中性点注入特征频率电流。利用电流测量设备采集各条线路首端的各相电流,并对采集到的各相电流进行带通滤波。获得各条线路首端零序电流后,通过 FFT 计算各条线路首端零序电流特征频率的相位,并计算各条线路之间特征频率电流信号的相

位相似度。根据相似度的计算结果和线路结构构建特征矩阵,并通过特征矩阵确定故障线路,算法复杂度为 $O(n\log N)$ 。

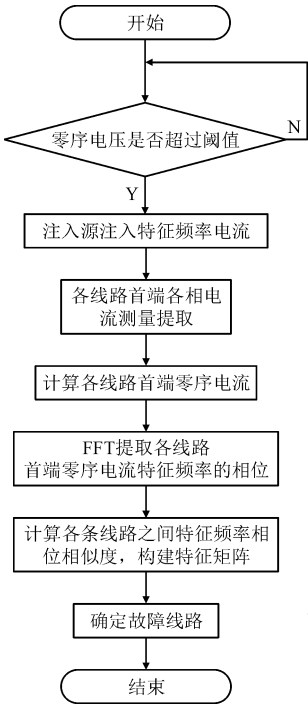


图 13 基于相位相似度的选线算法流程
Fig. 13 Flow chart of line selection algorithm based on phase similarity

4 仿真案例分析

为了验证所提出的基于注入特征频率电流相位相似度的配电网接地故障选线方法的可行性,在 PSCAD/EMTDC 中搭建的仿真模型如图 14 所示。

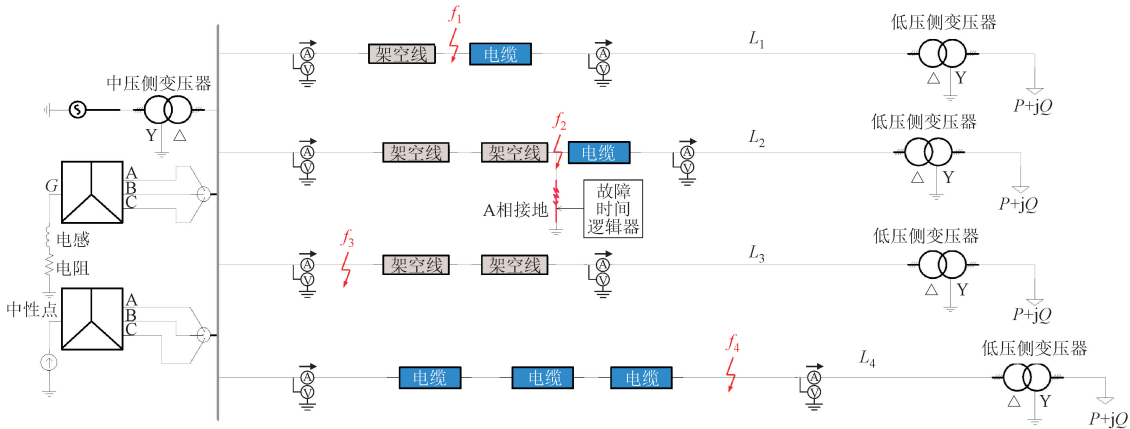


图 14 信号注入法故障选线系统
Fig. 14 Signal injection method fault line selection system

仿真模型一共 4 条线路($L_1 \sim L_4$),包括纯架空线路和纯电缆线路以及两种类型的混合线路,模型中每

个线路模块的长度均设置为 3 km。发生故障后,由中性点注入特征频率电流。通过改变接地点位置与

接地过渡电阻的大小模拟不同故障情况,接地点分别设置在 4 条线路的不同位置,分别如图中的 f_1 、 f_2 、 f_3 和 f_4 。为了验证本选线方法在过渡电阻阻值较高的情况下的有效性,设置过渡电阻分别为 1、5、10 k Ω 。

当线路没有发生接地故障时,所构造的特征矩阵如表 3 所示,矩阵中所有的相位相似度计算值几乎全为 0。

表 3 未发生故障时的相位相似度特征矩阵
Table 3 Characterization matrix when no fault occurrence

线路	相位相似度			
	L_1	L_2	L_3	L_4
L_1	0	0	0.014 1	0
L_2	0	0	0	0
L_3	0.014 1	0	0	0
L_4	0	0	0	0

设置故障位置为 L_2 的 f_2 ,故障过渡电阻为 0.01 Ω ,模拟金属性接地(工况 1),计算出的特征矩阵如表 4 所示,线路 L_2 所对应矩阵的行和列的相位相似度均出现较为明显的变化, L_2 与 L_1 的相位相似度由 0 增大至 0.287 3, L_2 与 L_3 和 L_4 的特征值变为负值,而矩阵中的其他元素约为 0,说明线路 L_2 发生了单相接地故障。

表 4 故障发生后的相位相似度特征矩阵(工况 1)
Table 4 Phase similarity characterization matrix after fault occurrence (case 1)

线路	相位相似度			
	L_1	L_2	L_3	L_4
L_1	0	0.287 3	0.014 1	0
L_2	0.287 3	0	-0.297 1	-0.294 1
L_3	0.014 1	-0.297 1	0	0
L_4	0	-0.294 1	0	0

设置故障位置为 L_2 的 f_2 ,故障过渡电阻为 5 k Ω (工况 2),计算出的特征矩阵如表 5 所示,线路 L_2 所对应矩阵的行和列的相位相似度均出现了较为明显的增大,而矩阵中的其他元素保持为 0,说明线路 L_2 发生了单相接地故障。

表 5 故障发生后的相位相似度特征矩阵(工况 2)
Table 5 Phase similarity characterization matrix after fault occurrence (case 2)

线路	相位相似度			
	L_1	L_2	L_3	L_4
L_1	0	0.130 9	0.014 1	0
L_2	0.130 9	0	0.120 6	0.123 9
L_3	0.014 1	0.120 6	0	0
L_4	0	0.123 9	0	0

利用搭建的仿真模型,进行的所有仿真测试条件和选线结果如表 6 所示。结果表明,本方法针对小电流接地系统单相接地故障能够实现准确的故障选线,且能够适应不同线路系统、不同接地过渡电阻,即使在过渡电阻很大的情况下,本方法均有较好的稳定性,验证了本方法的实用价值。

表 6 仿真测试条件和选线结果
Table 6 Simulation test conditions and wire selection results

故障位置	过渡电阻/k Ω	选线结果
f_1	1	L_1
	5	L_1
	10	L_1
f_2	1	L_2
	5	L_2
	10	L_2
f_3	1	L_3
	5	L_3
	10	L_3
f_4	1	L_4
	5	L_4
	10	L_4

保持信号注入位置及 0.3 A 幅值不变,改变注入频率信号为 830 Hz(工况 3),研究本文所提算法在较高注入频率下的适用性。设置故障位置为 L_2 的 f_2 ,故障过渡电阻为 5 k Ω (工况 3),计算出的特征矩阵如表 7 所示,可以成功选出故障线路为 L_2 ,但相似度数值与注入信号频率为 220 Hz 时相比略有下降,证明了该方法在较高频率注入特征信号下能够成功选线,但灵敏度有所下降。

表 7 故障发生后的相位相似度特征矩阵(工况 3)
Table 7 Phase similarity characterization matrix after fault occurrence (case 3)

线路	相位相似度			
	L_1	L_2	L_3	L_4
L_1	0	0.064 1	-0.016 6	0
L_2	0.064 1	0	-0.086 3	-0.025 5
L_3	-0.016 6	-0.086 3	0	0
L_4	0	-0.025 5	0	0

上述仿真算例中,有效注入至 10 kV 配电网一次侧的特征频率电流信号有效值为 0.3 A,通过计算可以得到注入信号源的容量约为 1.818 7 kV $\cdot$ A,同时传统接地变压器容量为 $10^2\sim10^3$ kV $\cdot$ A 等级,因此为了保障注入到 10 kV 侧的电流有效值不小于 0.3 A,注入源容量选择应不小于 1.818 7 kV $\cdot$ A。在实际工程应用中,考虑到复杂电磁环境下,为保障选

线效果,需适当增大特征电流信号幅值,因此选用的注入电源容量、电流调节范围应在保证电网运行稳定性的同时,可以适当增大。

5 结 论

本文对单相接地故障发生后注入信号的传播特性和故障特性进行了分析,针对小电流接地系统单相接地故障特征微弱和容易受接地过渡电阻阻值影响的问题,提出了一种基于注入特征频率电流相位相似度的配电网接地故障选线方法,可以有效解决小电流接地系统发生高阻接地故障时选线困难的问题。主要结论如下:

(1)对小电流接地系统单相接地故障发生后的零序电流分布和注入电流信号分布开展了分析,注入电流信号在故障线路中的分布会受到接地过渡电阻的影响,且过渡电阻越小,注入信号在故障线路中的分量越多。

(2)开展了线路拓扑结构对注入电流信号频率响应以及线路长度对注入电流信号衰减特性影响的分析。两种影响因素均不会对特征电流信号的响应比产生较大影响,选择了 220 Hz 作为注入电流信号的特征频率。

(3)对故障发生后的各线路注入特征电流的幅值和相位展开了分析,当接地过渡电阻较大时,故障线路的特征电流幅值与正常线路区别不大,而特征电流的相位能够避免过渡电阻带来的影响,在此基础上提出了基于相位相似度的单相接地故障选线方法。

(4)搭建仿真模型对所提出的选线方法进行了验证,结果表明本方法能够避免不同接地故障位置和接地过渡电阻带来的影响,具有很好的准确性和稳定性。在注入信号频率增大后,所提算法仍能有效选线,但判据的灵敏度下降。

参考文献:

- [1] 董礼清,薛永端,李娟,等.小电流接地故障零序电压分布特征与测距[J].电力系统自动化,2022,46(19):180-187.
DONG Liqing, XUE Yongduan, LI Juan, et al. Zero-sequence voltage distribution characteristics and location of non-solidly grounding fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19): 180-187.
- [2] 韩捷,刘智勇,周歧林,等.基于零序导纳幅值比的同母两回线异相接地复故障选线方法[J].电力工程技术,2024,43(04):253-261.
HAN Jie, LIU Zhiyong, ZHOU Qilin, et al. Line se-

lection method for opposite-phase grounding faults of two circuits on the same bus based on zero-sequence admittance magnitude ratio [J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(04): 253-261.

- [3] 索南加乐,薛晓辉,高峰,等.小电流接地系统单相接地故障选线的研究[J].西安交通大学学报,2008,42(4):471-475.
SUONAN jiale, XUE Xiaohui, GAO Feng, et al. Fault line selection in non-solid earthed network [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(4): 471-475.
- [4] 陶维青,李雪婷,华玉婷,等.基于曼哈顿平均距离和余弦相似度的配网单相接地故障定位[J].电力工程技术,2023,42(02):130-138.
TAO Weiqing, LI Xueting, HUA Yuting, et al. Single-phase grounding fault location in distribution networks based on Manhattan average distance and cosine similarity [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(02): 130-138.
- [5] 李琰,赵莹,杜磊,等.计及分布式电源注入谐波的单相接地故障联合选线[J].电力工程技术,2023,42(04):113-121.
LI Yan, ZHAO Ying, DU Lei, et al. Joint line selection of single-phase grounding faults considering distributed power harmonic injection [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(04): 113-121.
- [6] 张国军,张文周,葛群,等.基于补偿参数的多零序电流互感器的小电流接地系统单相接地故障选线方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(2):1-9.
ZHANG Guojun, ZHANG Wenzhou, GE Qun, et al. Single-phase ground fault line selection method of small current grounding system of multiple zero-sequence current transformer based on compensation parameters [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 1-9.
- [7] 郭亮,屈新宇,王晓卫,等.基于改进 Hough 变换的消弧线圈接地配电网故障选线新方法[J].中国电力,2024,57(7):132-142.
GUO Liang, QU Xinyu, WANG Xiaowei, et al. A novel fault feeder selection method for resonant grounding distribution networks based on improved Hough transform [J]. Electric Power, 2024, 57(7): 132-142.
- [8] 孙震,徐昊,朱洪志,等.基于接地故障比的不平衡配电网单相接地故障选相方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(12):108-116.
SUN Zhen, XU Hao, ZHU Hongzhi, et al. Phase selection method of single line to ground fault in unbalanced distribution network based on ground fault ratio [J].

- Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 108-116.
- [9] 闫森, 黄纯, 刘映彤, 等. 基于零序功率比的灵活接地系统故障选线方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(3): 46-52.
- YAN Sen, HUANG Chun, LIU Yingtong, et al. Flexible fault selection method of grounding system based on zero-sequence power ratio [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(3): 46-52.
- [10] 刘健, 刘海, 杨晓西, 等. 零序电流互感器配大电阻的配电网单相接地故障检测 [J]. 电测与仪表, 2023, 60(10): 92-97.
- LIU Jian, LIU Hai, YANG Xiaoxi, et al. Single-phase grounding fault detection based on zero-sequence current transformer with large resistance [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(10): 92-97.
- [11] LIANG Huamin, LI Haifeng, WANG Gang. A single-phase-to-ground fault detection method based on the ratio fluctuation coefficient of the zero-sequence current and voltage differential in a distribution network [J]. IEEE Access, 2023, 11: 7297-7308.
- [12] 汤涛, 周宇, 曾祥君, 等. 基于过渡电阻评估的灵活接地系统暂态故障选线方法 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47(5): 171-179.
- TANG Tao, ZHOU Yu, ZENG Xiangjun, et al. Transient fault line selection method for flexible grounded system based on transition resistance evaluation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 171-179.
- [13] 吴江雄, 郑茂然, 王欣, 等. 基于暂态零序导纳值的谐振接地系统单相接地故障选线方法 [J]. 南方电网技术, 2024, 18(11): 58-66.
- WU Jiangxiong, ZHENG Maoran, WANG Xin, et al. Single-phase grounding fault line selection method for resonant grounding system based on transient zero-sequence admittance value [J]. Southern Power System Technology. 2024, 18(11): 58-66.
- [14] 王小帅, 薛永端, 刘萃萃, 等. 灵活接地系统小电阻退出暂态特征及对暂态故障选线方法影响 [J]. 电力系统自动化, 2024, 48(16): 174-183.
- WANG Xiaoshuai, XUE Yongduan, LIU Cuicui, et al. Transient characteristics of small resistor exit in flexible grounding system and implications for transient faulty-line selection methods [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(16): 174-183.
- [15] CHEN Jiaquan, LI Haifeng, DENG Chengjiang, et al. Detection of single-phase to ground faults in low-resistance grounded MV systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(3): 1499-1508.
- [16] 商立群, 李瑶. 基于组合模量 S 变换能量熵的配电网故障选线方法 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(5): 119-126.
- SHANG Liqun, LI Yao. Faulty line identification in distribution network based on combined modulus and S-transform energy entropy [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(5): 119-126.
- [17] YANG Shiwu, JIAO Yang, CHEN Qing, et al. A single-phase to ground fault identification method based on extremely low frequency current detection in distribution grids [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(6): 5214-5223.
- [18] WEI Xiangxiang, WANG Xiaowei, GAO Jie, et al. Faulty feeder detection for single-phase-to-ground fault in distribution networks based on transient energy and cosine similarity [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(5): 3968-3979.
- [19] WANG Xuewen, ZHANG Hengxu, SHI Fang, et al. Location of single phase to ground faults in distribution networks based on synchronous transients energy analysis [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 774-785.
- [20] 史可鉴, 陈刚, 吴建军, 等. 基于行波信号注入的配电网线路单相故障状态接地诊断方法 [J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(2): 82-87.
- SHI Kejian, CHEN Gang, WU Jianjun, et al. A single phase grounding fault state diagnosis method for distribution network lines based on traveling wave signal injection [J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(2): 82-87.
- [21] 王志成, 宋国兵, 常仲学, 等. 配电网单相接地故障时的对地参数实时测量和选线方法 [J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3762-3769.
- WANG Zhicheng, SONG Guobing, CHANG Zhongxue, et al. Real-time measurement of ground parameters and line selection for single-phase grounding faults of distribution network [J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3762-3769.
- [22] 王晓卫, 岳阳, 郭亮, 等. 注入电流分布特性辨识的配电网故障选线方法 [J]. 中国电力, 2024, 57(10): 78-89.
- WANG Xiaowei, YUE Yang, GUO Liang, et al. Injection current distribution characteristics identification based distribution-level fault line selection [J]. Electric Power, 2024, 57(10): 78-89.
- [23] NIU Lin, WU Guiqing, XU Zhangsheng. Single-phase

- fault line selection in distribution network based on signal injection method [J]. IEEE Access, 2021, 9: 21567-21578.
- [24] 李成钢, 刘亚东, 杨雪凤, 等. 基于变分模态分解与空洞卷积神经网络的配电网故障选线方法 [J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(2): 110-118.
- LI Chenggang, LIU Yadong, YANG Xuefeng, et al. A method of fault line selection for distribution networks based on variational mode decomposition and dilated convolutional neural network [J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(2): 110-118.
- [25] 张晓鹏, 白洁, 孙乃君, 等. 基于特征融合的 GA-SVM 配电网单相接地故障选线方法 [J]. 电测与仪表, 2025, 62(1): 140-148.
- ZHANG Xiaopeng, BAI Jie, SUN Naijun, et al. GA-SVM method for single-phase grounding fault line selection in distribution network based on feature fusion [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(1): 140-148.
- [26] 缪欣, 张忠锐, 郭威, 等. 基于信号图像化和 CNN-ResNet 的配电网单相接地故障选线方法 [J]. 中国测试, 2024, 50(6): 157-166.
- MIAO Xin, ZHANG Zhongrui, GUO Wei, et al. Single-phase ground fault line selection method for distribution network based on signal imaging and CNN-ResNet [J]. China Measurement & Test, 2024, 50(6): 157-166.
- [27] 李泽文, 黎文娇, 彭维馨, 等. 基于 IHHT-RF 的配电网单相接地故障选线方法 [J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(1): 171-182.
- LI Zewen, LI Wenjiao, PENG Weixin, et al. Single-phase-to-ground fault line selection method of distribution network based on IHHT-RF [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 171-182.
- [28] 朱晓红, 杨伟荣, 张蓉, 等. 基于 RNN-LSTM 神经网络的小电流接地故障选线方法 [J]. 高压电器, 2023, 59(7): 213-220.
- ZHU Xiaohong, YANG Weirong, ZHANG Rong, et al. Line selection method of low current grounding fault based on RNN-LSTM neural network [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 213-220.
- [29] LIANG Yongliang, LI Kejun, MA Zhao, et al. Multilabel classification model for type recognition of single-phase-to-ground fault based on KNN-Bayesian method [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(2): 1294-1302.
- [30] TEIMOURZADEH H, MORADZADEH A, SHOARAN M, et al. High impedance single-phase faults diagnosis in transmission lines via deep reinforcement learning of transfer functions [J]. IEEE Access, 2021, 9: 15796-15809.
- [31] GUO Moufa, GAO Jianhong, SHAO Xiang, et al. Location of single-line-to-ground fault using 1-D convolutional neural network and waveform concatenation in resonant grounding distribution systems [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-9.
- [32] 高淑萍, 杨莉莉, 武心宇, 等. 一种适用于混合三端直流输电线路的故障定位方法 [J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(1): 37-46.
- GAO Shuping, YANG Lili, WU Xinyu, et al. A fault location method for hybrid three-terminal HVDC transmission lines [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(1): 37-46.
- [33] 国家技术监督局. 电能质量 公用电网谐波: GB/T 14549-1993 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [34] 王建元, 张峥. 基于注入信号与小波能量的小电流接地故障选线研究 [J]. 电测与仪表, 2018, 55(5): 28-32.
- WANG Jianyuan, ZHANG Zheng. Research of fault line selection in small current grounding system based on injected signal and wavelet energy [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(5): 28-32.
- [35] 王慧, 范正林, 桑在中. "S注入法"与选线定位 [J]. 电力自动化设备, 1999, 19(3): 18-20.
- WANG Hui, FAN Zhenglin, SANG Zaizhong. The "S signal injection method" and its application in single phase-to-earth fault line identification and fault point location [J]. Electric Power Automation Equipment, 1999, 19(3): 18-20.
- [36] 杜刚, 刘迅, 苏高峰. 基于 FTU 和 "S" 信号注入法的配电网接地故障定位技术的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 73-76.
- DU Gang, LIU Xun, SU Gaofeng. Research on technology of grounding fault location combining FTU and 'S' signal injecting method in distribution grid [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 73-76.

(编辑 刘杨 陶晴)