

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240378

基于投入并联小电阻的含多分支配电网单相接地故障行波测距方法

陶政臣, 高湛军, 见文号

(电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东 济南 250061)

摘要: 含多分支配电网拓扑结构复杂, 传统算法常忽略分支, 测距精度受到影响。为此, 提出基于投入并联小电阻的含多分支配电网单相接地故障行波测距方法。首先, 检测故障零模、线模波到达首端的时间差, 投入消弧线圈处并联小电阻, 利用并联小电阻产生的零模波到达首端的时刻, 以及零模波到达故障点后折、反射产生的线模波到达首、末端的时刻, 消除零模波波速影响。其次, 定义故障判别系数, 判断故障发生在主干线路或分支上, 根据故障所在区段精确计算故障距离, 并根据混合线路的特点对故障判别系数进行修正以适应混合线路。最后, 在 PSCAD 仿真平台上对所述方法进行验证, 结果表明所提方法可判断故障区段, 精确定位故障点且耐受过渡电阻能力和抗同步误差能力强。

关键词: 配电网; 分支; 单相接地故障; 线模波; 故障判别系数; 混合线路

Traveling wave fault location method for a single-phase ground fault of a distribution network with multiple branches based on input parallel small resistance

TAO Zhengchen, GAO Zhanjun, JIAN Wenhao

(Key Laboratory of Power Grid Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education
(Shandong University), Jinan 250061, China)

Abstract: The topological structure of a distribution network with multiple branches is complex, and the traditional algorithm often ignores the branches. This affects the ranging accuracy. Therefore, a traveling wave fault location method for a single-phase grounding fault of a distribution network with multiple branches based on parallel small resistance is proposed. First, the time difference between the zero-mode and line-mode waves of the fault reaching the first end is detected, and a small resistor is connected in parallel at the arc suppression coil. The time when the zero-mode wave generated by the parallel small resistor reaches the first end and the time when the zero-mode wave reaches the first and the end of the line-mode wave generated by the folding and reflection after reaching the fault point are used to eliminate the influence of zero-mode wave velocity. Secondly, a fault discrimination coefficient is defined to determine whether the fault occurs on the main line or branch. The fault distance is accurately calculated according to the fault section, and the fault discrimination coefficient is modified according to the characteristics of the hybrid line to adapt to the hybrid lines. Finally, the proposed method is verified on the PSCAD simulation platform. The results show that the proposed method can judge the fault section, accurately locate the fault point, and has strong resistance to transition resistance and synchronization error.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52060019001H).

Key words: distribution network; branch; single-phase ground fault; linear mode wave; fault discrimination coefficient; hybrid lines

0 引言

配电网作为用户与电力系统交互的桥梁, 其故

障定位对于故障清除、恢复供电具有重要意义^[1-3]。随着分支的增多, 配电网拓扑结构更加复杂, 分支线路呈辐射状, 配电网查找故障点位置困难^[4-6], 传统单相接地故障测距算法面对多分支配电网故障时, 测距精度受到影响, 因此含多分支配电网单相

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(52060019001H)

接地故障的精确测距是一个亟待解决的难点问题。

配电网传统故障测距技术主要包括阻抗法^[7-10]、行波法^[11-14]和智能算法^[15-16]。文献[7]提出一种故障上游采用分布参数模型,下游集中参数模型的方法,利用黄金分割法确定故障位置,简化了计算过程。文献[10]提出了一种基于故障电流约束阻抗的故障定位方法,通过假设故障电阻消耗无功功率为零来建立定位方程。文献[11]根据多端行波和双端行波原理计算故障距离理论值,根据三端行波法计算实际故障距离。文献[14]利用双端行波法测得的距离计算近似反射波时间,再根据行波极性准确识别出故障反射波和混合线路节点,最后对故障点进行精确定位。文献[15]建立了具备容错能力的主动配电网模型,并提出了基于多元宇宙算法的故障测距方法。

配电网中大量分支的接入,使得上述传统测距算法受到一定程度的影响^[17-19]。各分支一般采用沿线分布的方法形成具有多个分支的复杂配电网,传统算法无法判别故障在主干线路上或是分支上,测距精度受到影响^[20-23]。文献[24]提出将N端测距转化为T型节点测距,在一定程度上解决了T型测距的电压死区问题。文献[25]利用故障线路特征,研究故障后电气量关系,将故障测距问题转化为优化问题,但所需电气量信息过多。文献[26]利用故障行波折反射特性,降低了线路参数与同步误差对测距的影响,但在多分支情况下,反射波难以获取。文献[27]通过分支首末两端的相位差来判断故障分支线路,再利用推算的正序测距方程计算故障点距离,但对于采样信号的同步要求较高。文献[28]通过末端节点将分支线路划分为独立的子系统,利用首末端节点注入电流与实际故障点位置之间的关系来进行故障定位。但随着配电网分支数量的增加,故障定位的复杂度增加。文献[29]提出预设故障点,定义预设故障点偏移值,以故障点位置与波速度为变量、偏移值为目标建立优化模型,寻找故障点位置,但所需行波测取装置过多且成本较高。因此,亟需提出不受分支影响的新型故障测距算法,使得含多分支配电网单相接地故障测距更加精确。

10~35 kV 配电网大多采用经消弧线圈接地,故障后向消弧线圈处投入并联小电阻的选线方法明显增强了故障暂态特征,大大增加了单相接地故障的选线率^[30-32]。文献[30]通过投入并联小电阻前后的零序电流相位变化特征进行故障选线。文献[31]通过分析投入并联小电阻前后的电压电流特征,提出了基于零序电压电流相位差变化的选线方法。上述

消弧线圈并联小电阻选线方法有效提高了故障选线的准确率,但均未实现故障点的精确定位。因此,本文充分利用投入并联小电阻后产生暂态量特征,提出一种基于投入并联小电阻的含多分支配电网单相接地故障行波测距方法,先通过向消弧线圈投入并联小电阻,利用小电阻产生的行波消除零模波波速不稳定对故障测距的影响;再提出故障判别系数判断故障发生在主干线路上或分支上,根据故障所在区段精确计算故障距离,并对混合线路判别系数进行参数修正以适应混合线路测距。最后,利用PSCAD搭建含多分支配电网模型,在各种故障场景下验证了测距方法的有效性。

1 配电网故障行波信号分析

1.1 行波模量分析

当线路上某一点发生单相接地故障时,如图1所示,故障点处将产生行波,并由故障点处向两端传播。

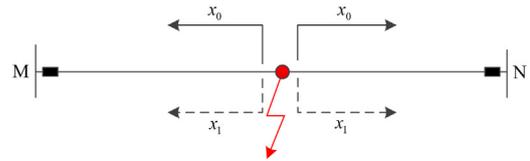


图1 故障行波传播示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fault traveling wave propagation

当发生单相接地故障时,为消除相与相之间的耦合,行波测距一般采用零模分量以及线模分量等电气量。采用凯伦鲍尔变换,将耦合的a、b、c三相变换为无耦合的模域系统,如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: x_0 表示零模分量; x_1 、 x_2 表示线模分量; x_a 、 x_b 、 x_c 表示相量。

当三相行波相等时,即 $x_a = x_b = x_c = x$,由式(1)可得式(2),此时线路中只含零模分量,而不含线模分量。

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.2 行波波速分析

经过模量分解后,各模分量之间相互解耦,各模量波阻抗 Z_m 及传播系数 γ_m 为

$$\begin{cases} Z_m = \sqrt{\frac{R_m + j\omega L_m}{G_m + j\omega C_m}}, m = 0, 1, 2 \\ \gamma_m = \sqrt{(R_m + j\omega L_m)(G_m + j\omega C_m)} = \alpha_m + j\beta_m \end{cases} \quad (3)$$

而各模量行波的传播速度为

$$v_m = \frac{\omega}{\beta_m} \quad (4)$$

式中： R_m 、 L_m 、 G_m 、 C_m 分别为线路模域内单位长度的电阻、电感、漏电导和漏电容； α_m 为衰减系数； β_m 为相位畸变系数； v_m 为各模量波速度。

对于线模波，由于其正序参数 R_1 、 L_1 基本与频率无关，故设线模波速度在传播过程中不受频率变化影响，因此可忽略频率变化对波速的影响^[33]，线模波速度 v_1 为

$$v_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (5)$$

对于零模波，影响参数 R_0 、 L_0 与频率关系较大，由于集肤效应和邻近效应，零模波在传播过程中的波速是变化的。根据文献[13]分析可知，在线路结构及参数确定的情况下，零模波波速与传播距离成单调关系，影响波速只有距离这一参数。

由于配电线路中零序参数与正序参数差异较大，且一般零序参数大于正序参数，故零模波波速与线模波波速差异较大，且 $v_1 > v_0$ 。

传统基于零模波、线模波波速差的测距算法中，常常忽略零模波波速变化进行测距，在实际应用中将造成较大误差。因此本文提出一种消除零模波波速影响的含多分支配电网单相接地故障测距方法，通过投入并联小电阻产生的行波消除零模波波速影响，对故障区段进行判别，最后计算故障点位置。

2 消除零模波波速影响

2.1 含多分支配电网模型

将实际的含多分支配电网故障线路拓扑简化，如图2所示，其中L1为故障线路；M端为故障线路首段，N端为故障线路末端；线路MN长度为 l_{MN} ；M、N两端安装行波信号测取装置，该装置具有实时通信功能，能获取测量点的电压行波信号 U_m 、 U_n ，并将获取到的行波信息上传； S_1K_1 、 S_2K_2 、 S_3K_3 、 S_4K_4 线路为分支线路， S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 为故障线路上的分支点，各分支点到M端的距离分别为 l_{MS1} 、 l_{MS2} 、 l_{MS3} 、 l_{MS4} ，各分支点到N端的距离分别为 l_{NS1} 、 l_{NS2} 、 l_{NS3} 、 l_{NS4} 。

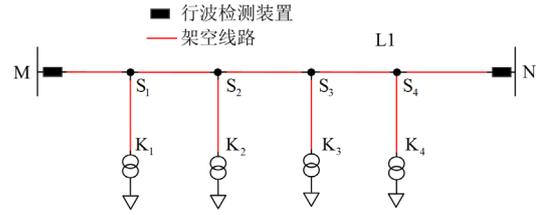


图2 含多分支配电网线路

Fig. 2 Distribution network lines with multi branches

当线路上一点发生单相接地故障时，配电自动化系统可定位到线路MN上，通过行波法进行故障精确定位，传统算法中的A型行波法以及D型行波法，在故障测距时无法判断故障点在主干线路上或分支上，因此传统算法无法避免分支对故障测距的影响。

2.2 消除零模波波速影响

由于零模波波速受传播距离影响较大，故本节通过故障时刻产生的故障行波以及故障后投入并联小电阻产生的行波来消除零模波的影响。

如图3所示，当线路发生故障时，对M端测量的行波信号进行凯伦鲍尔变换，获取线模波分量 x_1 ，零模波分量 x_0 。由于线模波波速 v_1 大于零模波波速 v_0 ，故障产生的线模波将先到达M端，零模波将后到达M端。此时记录两者到达M端的时间差为 T_1 。根据线路长度与时间、波速的关系可列写式(6)。

$$T_1 = \frac{l_1}{v_0} - \frac{l_1}{v_1} \quad (6)$$

式中， l_1 为故障点与线路首端之间的距离。

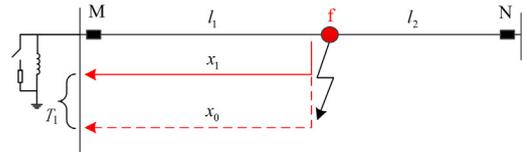


图3 传播至M端的故障行波示意图

Fig. 3 Schematic diagram of fault traveling wave propagating to M terminal

如图3所示，故障2~3周波后，躲过故障电压行波，在零序电压峰值时，向中性点消弧线圈处投入并联小电阻，此时将在中性点处产生一个行波，由于三相电压、电流幅值变化是相等的，根据式(2)分析可知，此时该行波只含有零模分量 x_0 ，M端行波测取装置可测量该零模波信号，设检测到零模波到达时刻为 t_1 。

当消弧线圈处产生的零模波到达故障点后，由于故障点的存在，三相线路不对称，零模波将在故

障点处产生线模波分别传播到线路两端。M 端可检测故障点反射产生的线模电压波 x_{m1} , 设检测到故障点产生的反射线模波到达 M 端的时刻为 t_2 ; N 端可检测故障点折射或反射产生的线模电压波 x_{n1} , 设检测到故障点产生的折射线模波到达 N 端的时刻为 t_3 。令 $T_2 = t_2 - t_1$, $T_3 = t_3 - t_1$, 根据线路长度与时间、波速的关系可列写式(7)。

$$\begin{cases} T_2 = \frac{l_1}{v_0} + \frac{l_1}{v_1} \\ T_3 = \frac{l_1}{v_0} + \frac{l_2}{v_1} \end{cases} \quad (7)$$

式中, l_2 为故障点与线路末端的距离。

图 3 中, 故障发生时零模波从故障点传播至线路首端; 而图 4 中, 投入并联电阻后产生的零模波从线路首端传播至故障点。此过程中零模波所传播的距离是相同的, 由于零模波波速只与传播距离有关, 因此零模波在这两段传播过程中消耗的时间是相同的。则联立式(6)、式(7)消除 $\frac{l_1}{v_0}$ 可消去 v_0 , 得

$$\begin{cases} \frac{T_2 - T_1}{2} = \frac{l_1}{v_1} \\ \frac{2T_3 - T_1 - T_2}{2} = \frac{l_2}{v_1} \\ T_3 - T_1 = \frac{l_1}{v_1} + \frac{l_2}{v_1} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\frac{T_2 - T_1}{2}$ 为线模波由故障点传播到 M 端所用时间; $\frac{2T_3 - T_1 - T_2}{2}$ 为线模波由故障点传播到 N 端所用时间; $T_3 - T_1$ 为线模波在线路上传播所消耗时间之和。通过上述方法, 可消除零模波波速不稳定对故障测距的影响。

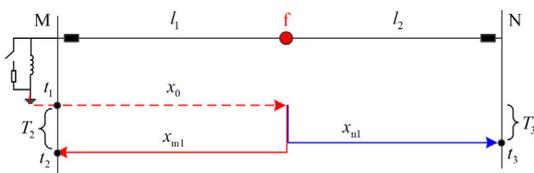


图 4 投入并联小电阻后的行波传播示意图

Fig. 4 Schematic diagram of traveling wave propagation after parallel small resistance is put into operation

3 含多分支配电网故障测距

3.1 故障测距方法

为解决上述由于分支的存在影响故障测距精度

的问题, 提出一种故障区段初判别方法对故障点进行初判别, 判断故障发生在主干线路或分支上。

如图 5 所示, 当主干线路上任意不同位置发生了单相接地故障, 线模波从故障点传播至两端的距离之和为定值 l_{mn} , 故式(8)中的线模波在线路上传播所消耗时间应为定值, 即线模波在线路 MN 上传播的时间。

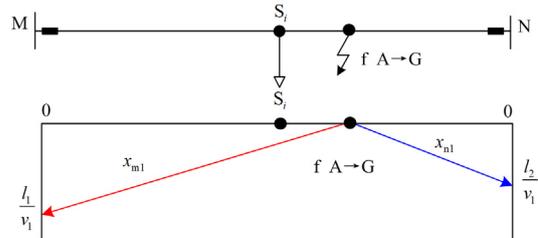


图 5 故障发生在主干线路时线模波传播示意图

Fig. 5 Schematic diagram of line mode wave propagation when the fault occurs on the trunk line

而当故障发生在分支上时, 由于线模波不仅需要在线路上传播, 还需在分支上传播, 传播时间为在线路上传播时间与在分支上传播时间之和, 故线模波在线路上传播所消耗时间大于故障发生在主干线路上线模波传播的时间。依据此特性, 结合式(8)定义故障区段第一判别系数 K_1 , 得

$$K_1 = \frac{l_1/v_1 + l_2/v_1}{T_{MN}} = \frac{T_3 - T_1}{T_{MN}} \quad (9)$$

式中, T_{MN} 表示线模波在线路 MN 上由 M 端传播到 N 端所用时间, 如式(10)所示。

$$T_{MN} = \frac{l_{MN}}{v_1} \quad (10)$$

当故障发生在主干线路上时, 故障区段第一判别系数等于 1, 而当故障发生在分支上时, 故障区段第一判别系数大于 1。根据故障判别系数可判断故障位于主干线路或分支上。若故障发生在主干线路上, 则可利用式(11)进行故障测距。

$$l_f = \frac{(T_2 - T_1)v_1}{2} \quad (11)$$

式中, l_f 为故障点与线路首端 M 的距离。

若故障发生在分支上, 则需要进一步判断故障发生在哪一条分支上。当分支线路上发生单相接地故障, 此时行波传播路线与时间如图 6 所示。

如图 6 所示, 当故障发生在分支上时, 无论是向 M 端传播的线模波, 还是向 N 端传播的线模波, 都需要从故障点处传播至分支点 S 处, 则传向两端的线模波在此分支上传播所用时间是相同的, 故定义故障区段第二判别系数 K_{2i} 为

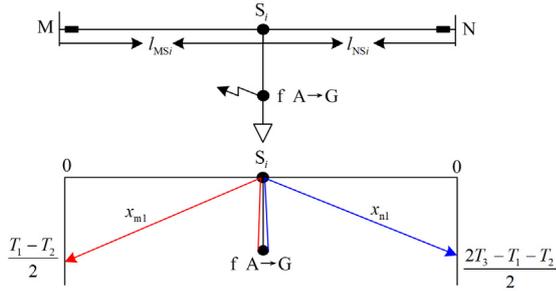


图6 故障发生在分支上时线模波传播示意图

Fig. 6 Schematic diagram of line mode wave propagation when the fault occurs on the branch

$$K_{2i} = \frac{l_1 / v_1 - T_{MSi}}{l_2 / v_1 - T_{NSi}} = \frac{(T_1 - T_2) / 2 - T_{MSi}}{(2T_3 - T_1 - T_2) / 2 - T_{NSi}} \quad (12)$$

式中： T_{MSi} 表示线模波从分支点 S_i 传播至M端所用的时间； T_{NSi} 表示线模波从分支点 S_i 传播至N端所用的时间； i 为分支点编号，取1、2、3、4。 T_{MSi} 、 T_{NSi} 可由式(13)获得。

$$\begin{cases} T_{MSi} = \frac{l_{MSi}}{v_1} \\ T_{NSi} = \frac{l_{NSi}}{v_1} \end{cases} \quad (13)$$

式中： l_{MSi} 为分支点 S_i 到线路M端的距离； l_{NSi} 为分支点 S_i 到故障线路N端的距离。

当分支 $S_i K_i$ 上发生故障时，该分支对应的故障区段第二判别系数应等于1，而其他分支对应的故障区段第二判别系数均不等于1。

由故障区段第二判别系数确定了故障点所在分支线路后，可进行故障测距。

$$l_{fsi} = \frac{(T_1 - T_2)v_1}{2} - l_{MSi} \quad (14)$$

式中， l_{fsi} 为故障点与分支点 S_i 之间的距离。

在实际配电网中，由于各种因素(包括线路参数不准确、互感器的测量误差以及两端行波测量装置时钟不完全同步等)的影响，可能导致计算 K 值时存在误差。因此需要对 K 值进行修正，留有一定的裕度。设定 K 值的误差裕度为 μ (取0.05)：

- ① 当 $1 - \mu \leq 1 + \mu$ 时，则判断 $K = 1$ ；
- ② 当 $1 + \mu < K$ 或 $1 - \mu > K$ 时，判断 $K \neq 1$ 。

3.2 架空线、电缆混合线路测距

3.1节给出了单一类型线路的故障测距流程，但实际配电网中往往采用架空线、电缆混合线路，由于架空线与电缆的线路参数存在一定差异，因此需要对定段及测距公式进行改进以适应混合线路。

图7为架空线路与电缆线路混合的配电网故障线路等效模型(红色线路为架空线路，蓝色线路为电缆线路)，设架空线路的线模波波速为 v_{line} ，电缆线路的线模波波速为 v_{cable} 。

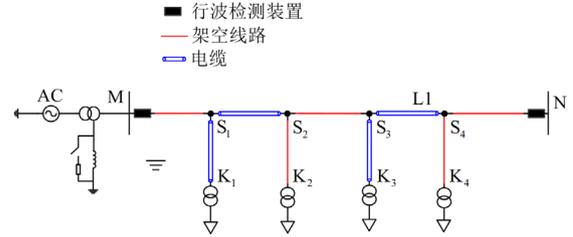


图7 配电网含多分支混合线路

Fig. 7 Distribution network with multi-branch hybrid lines

与式(9)原理一致，可计算故障第一判别系数，判断故障区段，但 T_{MN} 需进行修正，得

$$T_{MN} = \frac{l_{MN_c}}{v_{cable}} + \frac{l_{MN_l}}{v_{line}} \quad (15)$$

式中： l_{MN_c} 为主干线路中电缆线路长度总和； l_{MN_l} 为主干线路中架空线路长度总和。

若故障发生在分支上，则需要二次判别，与式(12)原理一致，可通过计算故障第二判别系数判断故障区段。同理也需要进行修正，得到

$$\begin{cases} T_{MSi} = \frac{l_{MSi_c}}{v_{cable}} + \frac{l_{MSi_l}}{v_{line}} \\ T_{NSi} = \frac{l_{NSi_c}}{v_{cable}} + \frac{l_{NSi_l}}{v_{line}} \end{cases} \quad (16)$$

式中： l_{MSi_c} 为M端到分支点 S_i 处电缆线路长度总和； l_{MSi_l} 为M端到分支点 S_i 处架空线路长度总和； l_{NSi_c} 为N端到分支点 S_i 处电缆线路长度总和； l_{NSi_l} 为N端到分支点 S_i 处架空线路长度总和。

计算各分支点处的故障区段第二判别系数，可对故障所在分支进行识别。

通过上述故障区段判别方法，可初步判断出故障区段，再通过下述方法实现精确故障测距。

1) 当故障发生在主干线路上时，需要判断故障最小区段，假设故障发生在分支点 S_i 、 S_{i+1} 之间，则 $T_{MSi} < \frac{T_2 - T_1}{2} < T_{MS(i+1)}$ 。故通过此方法初步判断出故障点所在最小区段，此时再进行故障测距，得到

$$l_f = \frac{(T_2 - T_1 - 2T_{MSi})v_{cable}}{2} + l_{MSi} \quad (17)$$

式(17)为当区段 SS_{i+1} 为电缆线路时故障测距公式, 若 $i(i+1)$ 为架空线路时, 需将式(17)中的电缆线路波速替换为架空线路波速 v_{line} , 得到

$$l_f = \frac{(T_2 - T_1 - 2T_{MSi})v_{line}}{2} + l_{MSi} \quad (18)$$

2) 当故障发生在分支线路上时, 故障点与分支点 S_i 之间的距离 l_{fSi} 为

$$l_{fSi} = \frac{(T_2 - T_1 - 2T_{MSi})v_{cable}}{2} \quad (19)$$

若分支为架空线路, 则需将式(19)中的电缆线路波速替换为架空线路波速 v_{line} , 得到式(20)。

$$l_{fSi} = \frac{(T_2 - T_1 - 2T_{MSi})v_{line}}{2} \quad (20)$$

4 故障测距流程

含多分支配电网行波定段及测距的思想, 是通过故障行波以及并联小电阻产生的行波消除零模波后, 再通过线模波传播的时间定义故障判别系数, 进行故障定段, 根据不同故障位置分情况进行故障测距, 故障定段及测距流程如图 8 所示。

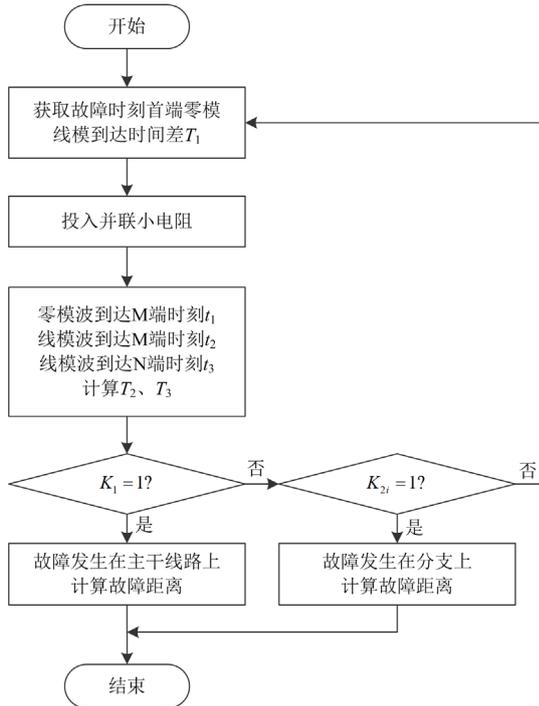


图 8 故障定段及测距流程

Fig. 8 Fault sectioning and ranging process

其具体步骤描述如下所述。

1) 对故障电压行波信号进行凯伦鲍尔变换, 获取故障线模波、零模波到达 M 端的时间差 T_1 。

2) 故障发生一段时间后, 向中性点消弧线圈处

投入并联小电阻, 对测量到的信号进行凯伦鲍尔变换。设 M 端行波测取装置检测到零模波到达时刻为 t_1 ; M 端检测到故障点产生的反射线模波到达 M 端的时刻为 t_2 ; N 端检测到故障点产生的折射或反射线模波到达 N 端的时刻为 t_3 。令 $T_2 = t_2 - t_1$, $T_3 = t_3 - t_1$ 。

3) 计算故障区段第一判别系数 K_1 , 若 K_1 满足等于 1, 则判断故障在主干线路上, 执行 4)。若 K_1 不等于 1, 则判断故障发生在分支上, 执行 5)。

4) 故障发生在主干线路上, 若为单一线路, 则利用测距式(11)计算故障点; 若为混合线路, 先判断区段再利用式(17)和式(18)进行故障测距。

5) 故障发生在分支线路上, 计算各条分支对应的故障区段判别系数 K_{2i} 。若存在某条分支对应的 K_2 满足等于 1, 则判断故障发生在该分支上, 执行 6); 若各分支均不满足 K_2 等于 1, 则返回至 1)。

6) 故障发生在分支上, 若为单一线路, 利用式(14)计算故障点; 若为混合线路, 利用式(19)和式(20)计算故障点。

5 仿真验证

5.1 仿真模型

为验证所述含多分支配电网单相接地故障测距方法的有效性, 在 PSCAD 中搭建如图 7 所示的仿真模型, 由 3 条主馈线组成: 主馈线 L1 上含有 4 条分支, 分别为 $S_1K_1, S_2K_2, S_3K_3, S_4K_4$; 主馈线 L1 长度为 17 km, 由架空线和电缆混合组成; 区段 $MS_1, S_2S_3, S_2K_2, S_4K_4, S_4N$ 为架空线路, 每段长 3 km; 区段 $S_1K_1, S_1S_2, S_3K_3, S_3S_4$ 为电缆线路, 每段长 4 km; 馈线两端安装行波测取装置, 可检测行波信号并上传, 采样频率为 10 MHz; 最左侧是主电源, 电压等级为 10 kV; 负荷容量为 1 MVA, 功率因数均为 0.9。架空线和电缆的参数如表 1 所示; 并联小电阻的阻值选取必须保证在面对高阻接地时能有效动作, 且不产生较大故障残余电流^[30], 结合实际运行经验, 本文选取并联小电阻阻值为 10Ω ^[34]。

采用式(5)可计算电缆以及架空线的线模波波速。

表 1 架空线和电缆线路参数

Table 1 Parameters of overhead lines and cable lines

线路类型	电阻/(Ω /km)	电感/(mH/km)	电容/(μ F/km)
电缆线路	0.27	0.255	0.376
架空线路	0.17	1.21	0.0097

$$\begin{cases} v_{\text{cable}} = \frac{1}{\sqrt{L_c C_c}} = 1.0212 \times 10^8 \text{ m/s} \\ v_{\text{line}} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = 2.9189 \times 10^8 \text{ m/s} \end{cases} \quad (21)$$

式中, L_c 、 C_c 分别为电缆线路的正序电感、电容。

5.2 算例分析

1) 不同线路区段下故障测距方法验证

(1) 故障位于主干线路

在主干线路上 S_2S_3 段设置单相接地故障, 距离线路首端 9 km 处, 过渡电阻为 100Ω , 故障时刻为 120 ms, 按测距流程进行测距。故障线模波、零模波的小波变换如图 9 所示。

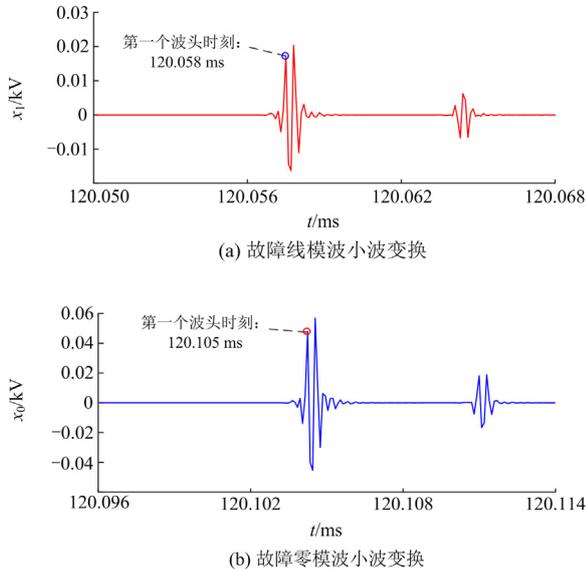


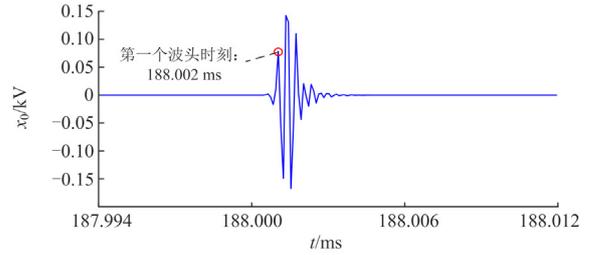
图 9 故障线模波及零模波小波变换

Fig. 9 Wavelet transform of fault line mode wave and zero mode wave

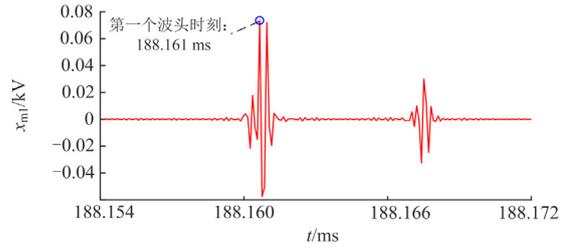
由图 9 波头到达时间可得故障零模、线模波到达时间差为 $47 \mu\text{s}$ 。

在 188 ms 时投入并联小电阻, 此时 M 端检测的零模波到达时刻 t_1 、故障点反射产生线模波到达 M 端时刻 t_2 、故障点折射产生线模波到达 N 端的时刻 t_3 , 如图 10 所示。

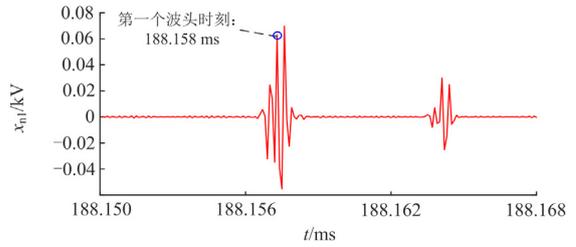
由图 10 可得 $T_2 = t_2 - t_1 = 159 \mu\text{s}$, $T_3 = t_3 - t_1 = 156 \mu\text{s}$ 。由于线路为混合线路, 采用式(15)得到 $T_{MN} = 9/v_{\text{line}} + 8/v_{\text{cable}} = 109 \mu\text{s}$, 可计算得故障第一判别系数 $K_1 = (T_3 - T_1)/T_{MN} = (156 - 47)/109 = 1$, 可判断故障发生在主干线路上。此时采用式(16)计算线模波各分支点传播到 M、N 的距离, 如表 2 所示, 并分析故障发生的线路。



(a) 消弧线圈产生的零模波小波变换



(b) 反射线模波小波变换



(c) 折射线模波小波变换

图 10 投入并联小电阻后产生的行波小波变换

Fig. 10 Wavelet transform of the traveling wave generated after the parallel small resistance is put into operation

表 2 线模波从各分支点传播至线路两端所用时间

Table 2 Time taken for the propagation of the line mode wave from each branch point to both ends of the line

区段	MS ₁	MS ₂	MS ₃	MS ₄
时间/ μs	10	49	60	99
区段	NS ₁	NS ₂	NS ₃	NS ₄
时间/ μs	99	60	49	10

由于 $49 \mu\text{s} < (T_2 - T_1)/2 = 56 \mu\text{s} < 60 \mu\text{s}$, 故判断故障发生在区段 S_2S_3 上, 为架空线路。

此时由式(18)计算故障点位置: $l_f = ((T_2 - T_1)/2 - T_{MS2})v_{\text{line}} + l_{MS2} = 9043 \text{ m}$, 预设故障为 9 km, 测距误差为 0.47%, 在工程测距误差范围内。同样的情况下, 应用传统基于零模、线模波速度差的单端测距方法未消除零模波波速影响, 测得故障距离线路首端 9161 m, 测距误差较大。

(2) 故障位于分支线路

在分支上 S_3K_3 段设置单相接地故障, 距离线路首端 13 km 处, 即距分支点 S_3 处 3 km, 过渡电阻为 100 Ω , 故障时刻为 120 ms, 按测距流程进行测距。小波变换得到故障零模、线模波到达时间差 T_1 为 73 μs 。

在 188 ms 处投入并联小电阻, 此时 M 端检测的零模波到达时刻 $t_1 = 188.002$ ms、故障点反射产生线模波到达 M 端时刻 $t_2 = 188.252$ ms、故障点反射产生线模波到达 N 端的时刻 $t_3 = 188.242$ ms, 则 $T_2 = t_2 - t_1 = 250$ μs , $T_3 = t_3 - t_1 = 240$ μs 。由于线路为混合线路, 采用式(15)得到 $T_{MN} = 9/v_{line} + 8/v_{cable} = 109$ μs , 可计算得故障第一判别系数 $K_1 = (T_3 - T_1)/T_{MN} = (240 - 73)/109 > 1$, 可判断故障发生在分支上。进一步需要对故障分支进行判别, 根据表 2 以及式(12)可得各分支对应的第二判别系数 K_2 , 如表 3 所示。

表 3 各分支对应第二判别系数 K_2 Table 3 Second discriminant coefficient K_2 of each branch

分支	S_1K_1	S_2K_2	S_3K_3	S_4K_4
K_2	-3.83	2.135	0.97	-0.153

由表 3 可知, 故障发生在分支 S_3K_3 上。此时由式(19)可计算故障点距离分支点 S_3 的距离为: $l_{rs3} = ((T_2 - T_1)/2 - T_{MS3})v_{cable} = 2910.42$ m, 距离线路首端的距离为 $l_f = l_{rs3} + l_{MS3} = 12910.42$ m, 测距误差为 0.75%, 符合工程测量误差要求。同样的情况下, 应用传统基于零模、线模波波速度差的单端测距方法未消除零模波波速影响, 测得故障距离线路首端 12 804 m, 测距误差较大。

2) 不同故障位置对故障测距的影响

在主干线路上以及分支上的不同位置设置单相接地故障, 过渡电阻为 100 Ω , 按测距流程进行测距, 得到的测距结果如表 4 所示。

由表 4 可知, 当在线路的不同位置设置单相接地故障, 该算法能有效判别出故障分支, 并精确计算出故障点位置, 测距误差均在 1%以内, 满足工程测量误差要求。

表 4 不同故障位置下的测距结果及误差

Table 4 Ranging results and errors under different fault locations

算例	故障点与 M 端距离/km	故障分支	测量与 M 端的距离/km	误差/%	定位分支
3	2	主干	2.017	0.85	主干
4	5	主干	5.032	0.64	主干
5	6	分支 S_1K_1	6.045	0.75	分支 S_1K_1
6	12	分支 S_3K_3	12.083	0.69	分支 S_3K_3
7	15	分支 S_4K_4	15.098	0.65	分支 S_4K_4

3) 过渡电阻对故障测距的影响

由于发生高阻接地时, 故障电流较小, 若不能及时发现并查找到故障点位置, 故障线路长期带电运行将产生严重后果。因此故障测距算法需要具有一定的耐过渡电阻能力。在图 7 中主干线路距离首端 8 km 处和分支 S_3K_3 上距离首端 12 km 处分别设置过渡电阻为 1 Ω 、100 Ω 、500 Ω 的单相接地故障, 测距结果如表 5 所示。

表 5 不同过渡电阻下测距结果及误差

Table 5 Ranging results and errors under different transition resistances

过渡电阻/ Ω	故障点与 M 端距离/km	故障分支	测量与 M 端的距离/km	误差/%	定位分支
1			8.028	0.35	主干
100	8	主干	8.042	0.53	主干
500			8.065	0.81	主干
1			12.037	0.31	分支 S_3K_3
100	12	分支 S_3K_3	12.065	0.54	分支 S_3K_3
500			12.086	0.72	分支 S_3K_3

由表 5 可得, 当在主干或分支线路上设置不同过渡电阻的单相接地故障, 该算法能有效判别出故障区段, 并计算出故障点位置, 随着过渡电阻增大, 由于故障电流变小, 误差略有变大, 但测距误差均在 1%以内, 满足工程测量误差要求。

4) 双端时钟不完全同步对故障测距的影响

双端不完全同步的误差时间 Δt (N 端时间慢于 M 端 Δt)分别取 0.5 μs 、1 μs 、1.5 μs , 在图 7 中主干线路距离线路首端 8 km 处和分支 S_3K_3 上距离首端 12 km 处设置过渡电阻为 100 Ω 的单相接地故障, 故障判别系数、测距结果及误差分别如表 6 和表 7 所示。

表 6 双端时钟不同步时主干线路故障的判别系数、测距结果及误差

Table 6 The K , ranging result and error of the trunk line fault when the two-terminal clocks are not synchronized

$\Delta t/\mu\text{s}$	故障点与 M 端距离/km	故障分支	判别系数 K_1	测量与 M 端的距离/km	误差/%	定位分支
0.5	8	主干	1.012	8.033	0.41	主干
1	8	主干	1.023	8.033	0.41	主干
1.5	8	主干	1.041	8.033	0.41	主干

表 7 双端时钟不同步时分支线路故障的判别系数 K 、测距结果及误差Table 7 The K , ranging results and errors of branch line faults when the two-terminal clocks are not synchronized

$\Delta t/\mu\text{s}$	故障点与 M 端距离/km	故障分支	判别系数 K_1	分支 S_1K_1 系数 K_2	分支 S_2K_2 系数 K_2	分支 S_3K_3 系数 K_2	分支 S_4K_4 系数 K_2	测量与 M 端的距离/km	误差/%	定位分支
0.5	12	分支 S_3K_3	1.38	-2.45	-2.95	0.986	-0.314	12.065	0.54	分支 S_3K_3
1	12	分支 S_3K_3	1.385	-2.5	-2.81	0.976	-0.311	12.065	0.54	分支 S_3K_3
1.5	12	分支 S_3K_3	1.389	-2.545	-2.69	0.961	-0.308	12.065	0.54	分支 S_3K_3

由表 6 和表 7 结果可知，双端时钟不完全同步时，仍可有效判别出故障区段并计算处故障点。通过分析发现，由于判别系数 K 值设置一定的裕度 μ (取 0.05)，故双端时钟不完全同步几乎不会对故障区段判别造成影响。而判断出故障区段后的故障测距算法中，所使用的时间数据均来自故障首端的行波测取装置所记录的时间 T_1 、 T_2 ，故双端时钟不完全同步不会对此故障测距算法造成影响，一般情况下，双端误差时间 Δt 为 $1 \mu\text{s}$ 属于行业可接受范围，而本文中验证了 $1.5 \mu\text{s}$ 误差下仍能精确定位，抗同步误差能力较强。

6 结论

本文针对配电网含多分支测距问题，利用故障行波以及消弧线圈并联小电阻产生的行波，消除零模波波速影响，同时提出故障区段识别方法，可有效判断故障发生在主干线路或分支线路上。并针对混合线路对测距算法进行修正以满足混合线路测距需求。最后根据不同故障点位置，精确求解故障距离，得出以下结论：

1) 通过消弧线圈并联小电阻产生的行波以及故障产生的行波两者结合，可消除零模波，仅利用线模波进行故障定段和定位，消除了零模波波速不稳定对故障测距的影响，精度有所提高；

2) 通过所提故障判别系数，可精确识别故障发生在主干线路或分支上，根据故障区段的不同分别进行故障测距，有效减少了分支线路对故障测距的影响，解决了含多分支配电网馈线测距误差大的难题；

3) 所提方法仅需主干线路首、末端安装行波测距装置，分支线路无需安装，降低了安装成本；

4) 仿真验证了该方法不受故障位置的影响，具有较强的耐受过渡电阻能力，且具有一定的抗同步误差的能力，测距误差均在 1% 以内，满足工程测量误差要求，具有一定的工程实际意义。

参考文献

- [1] 唐巍, 张起铭, 张璐, 等. 新型配电系统多层次交直流互联理念、关键技术与发展方向[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6): 2-17.
TANG Wei, ZHANG Qiming, ZHANG Lu, et al. Concept, key technologies and development direction of multilevel AC/DC interconnection in new distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 2-17.
- [2] 顾大德, 肖健, 韦梦立, 等. 含逆变型分布式电源的花瓣型配电网故障定位策略研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(11): 53-59.
GU Dade, XIAO Jian, WEI Mengli, et al. Research on fault location strategy for petal-shaped distribution network with inverter-interfaced distributed generation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(11): 53-59.
- [3] 王泽乾, 丛伟, 胡选正, 等. 基于参考电压二次积分值的柔性直流配电网纵联保护方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 153-162.
WANG Zeqian, CONG Wei, HU Xuanzheng, et al. Pilot protection method for flexible dc distribution network based on quadratic integration value of reference voltage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 153-162.
- [4] 麦章渠, 曾颖, 张禄亮, 等. 基于改进哈里斯鹰优化算法的有源配电网故障定位[J]. 智慧电力, 2022, 50(11): 104-111.
MAI Zhangqu, ZENG Ying, ZHANG Luliang, et al. Fault location of active distribution network based on improved harris hawks optimization algorithm[J]. Smart Power, 2022, 50(11): 104-111.
- [5] CHENG Liang, WANG Tao, WANG Yi. A novel fault location method for distribution networks with distributed generations based on the time matrix of traveling-waves[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(4): 1-11.
- [6] 高厚磊, 李娟, 朱国防, 等. 有源配电网电流差动保护应

- 用技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 40-44.
GAO Houlei, LI Juan, ZHU Guofang, et al. Study on application technology of current differential protection in active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 40-44.
- [7] 梁睿, 张鹏, 孔令昌, 等. 联合搜索零序电压变化量的小电阻接地配电网故障测距[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(1): 139-147.
LIANG Rui, ZHANG Peng, KONG Lingchang, et al. Fault location of low resistance grounding distribution network based on joint search of zero sequence voltage variation[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(1): 139-147.
- [8] 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.
- [9] 索南加乐, 王增超, 康小宁, 等. 基于线性微分方程参数识别的单端准确故障测距算法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(12): 9-14, 20.
SUONAN Jiale, WANG Zengchao, KANG Xiaoning, et al. Accurate fault location algorithm based on parameter identification of linear differential equation with single end data[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(12): 9-14, 20.
- [10] YANG Weijian, YIN Xiaoqi, TAO Jun, et al. Fault current constrained impedance-based method for high resistance ground fault location in distribution grid[J]. Electric Power Systems Research, 2024, 227.
- [11] 李练兵, 孙腾达, 曾四鸣, 等. 基于多端行波时差的配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 140-147.
LI Lianbing, SUN Tengda, ZENG Siming, et al. Fault location method for distribution networks based on traveling wave time difference[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 140-147.
- [12] 胡冰颖, 李梅. 基于零模线模时差的配电网双端行波故障测距[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 114-120.
HU Bingying, LI Mei. Double ended traveling wave fault location in distribution network based on the time difference of zero-mode and line-mode[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 114-120.
- [13] 刘朕志, 舒勤, 韩晓言, 等. 基于行波模量速度差的配电网故障测距迭代算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 88-93.
LIU Zhenzhi, SHU Qin, HAN Xiaoyan, et al. An iterative fault location algorithm using the difference of wave velocity between zero mode component and aerial mode component of traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 88-93.
- [14] TIAN Shu, YANG Qixiang, XU Yao, et al. Accurate fault location of hybrid lines in distribution networks[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2021, 31(12).
- [15] 郑聪, 周海峰, 郑东强, 等. 基于改进多元宇宙算法的主动配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 169-179.
ZHENG Cong, ZHOU Haifeng, ZHENG Dongqiang, et al. An active distribution network fault location method based on improved multi-universe algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 169-179.
- [16] 刘胤良, 喻磊, 林心昊, 等. 考虑配电网参数误差的相间故障测距方法[J]. 南方电网技术, 2024, 18(4): 141-151.
LIU Yinliang, YU Lei, LIN Xinhao, et al. Interphase fault location method for distribution lines considering their parameter errors[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(4): 141-151.
- [17] 曲振明, 王宾, 张慧芬. 中性点小电阻接地配网多分支电缆线路单相接地故障测距[J]. 电气应用, 2021, 40(5): 28-33, 38.
QU Zhenming, WANG Bin, ZHANG Huifen. Single phase grounding fault location of multi branch cable line in distribution network with neutral point via small resistance grounding[J]. Electrotechnical Application, 2021, 40(5): 28-33, 38.
- [18] 张翠玲, 江雪晨, 宁一. 树型配电网单相接地故障行波测距的组合方法[J]. 高压电器, 2017, 53(8): 166-172.
ZHANG Cuiling, JIANG Xuechen, NING Yi. Combined method for traveling wave location of single phase grounding fault in tree type distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(8): 166-172.
- [19] LI Minqiang, LIU Baiyang, WANG Chen, et al. FDTD analysis of transient fault induced travelling-wave propagation for multi-branch distribution networks[J]. Vibroengineering Procedia, 2020, 33: 124-129.
- [20] 周龙, 齐智平. 微电网保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 147-154.
ZHOU Long, QI Zhiping. A review of the research on microgrid protection development[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 147-154.
- [21] 吴佳享, 孙云莲, 陈楚昭. 微弱行波下多分支配电网故障定位[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(5): 20-27.
WU Jiaxiang, SUN Yunlian, CHEN Chuzhao. Fault

- location of multiple branches distribution network under weak traveling waves[J]. *Electric Machines and Control*, 2023, 27(5): 20-27.
- [22] 王宾, 任萱. 中性点经小电阻接地风电场集电线路单相接地故障测距研究[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(6): 2136-2144.
WANG Bin, REN Xuan. Single-line-to-ground fault location in wind farm collection line with neutral point grounding with resistor[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(6): 2136-2144.
- [23] SHI Shenxing, LEI Aoyu, HE Xin, et al. Travelling waves-based fault location scheme for feeders in power distribution network[J]. *The Journal of Engineering*, 2018(15): 1326-1329.
- [24] 王增平, 林富洪. 基于同步相量测量的 N 端输电线路故障测距新算法[J]. *电网技术*, 2010, 34(5): 154-160.
WANG Zengping, LIN Fuhong. A new fault location algorithm for TV-terminal transmission lines based on synchronized phasor measurement[J]. *Power System Technology*, 2010, 34(5): 154-160.
- [25] 李振钊, 王增平, 张玉玺. 基于多源信息融合的有源配电网故障测距新方法[J]. *电网技术*, 2023, 47(8): 3448-3459.
LI Zhenzhao, WANG Zengping, ZHANG Yuxi. New method of fault location for active distribution network based on multi-source information fusion[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(8): 3448-3459.
- [26] 谢李为, 李勇, 罗隆福, 等. 基于极点对称分解的多分支线路故障定位方法[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(21): 7326-7339.
XIE Liwei, LI Yong, LUO Longfu, et al. Fault location method for multi-branch lines based on extreme-point symmetric mode decomposition[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(21): 7326-7338.
- [27] 张斯淇, 李永丽, 陈晓龙. 基于正序电流差的同塔双回 T 型输电线路故障测距新算法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(5): 1488-1495.
ZHANG Siqi, LI Yongli, CHEN Xiaolong. A new fault location algorithm based on positive sequence current difference for double-circuit three-terminal transmission lines[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(5): 1488-1495.
- [28] 李浩, 张禄亮, 栾云飞, 等. 基于子系统划分和注入电流比的配电网故障定位方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(8): 63-72.
LI Hao, ZHANG Luliang, LUAN Yunfei, et al. Fault location method for a distribution network based on subsystem division and injection current ratio[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(8): 63-72.
- [29] 谢李为, 李勇, 罗隆福, 等. 考虑预设偏移值的多分支配电网故障定位方法[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(6): 78-85.
XIE Liwei, LI Yong, LUO Longfu, et al. Fault location method considering preset offset value for distribution network with multi-branch[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(6): 78-85.
- [30] 刘朋跃, 邵文权, 弓启明, 等. 利用零序电流相位变化特征的灵活接地系统故障选线方法[J]. *电网技术*, 2022, 46(5): 1830-1838.
LIU Pengyue, SHAO Wenquan, GONG Qiming, et al. Fault line detection of flexible grounding system based on phase variation characteristics of zero-sequence current[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(5): 1830-1838.
- [31] 李建蕊, 李永丽, 王伟康, 等. 基于零序电流与电压相位差变化的灵活接地系统故障选线方法[J]. *电网技术*, 2021, 45(12): 4847-4855.
LI Jianrui, LI Yongli, WANG Weikang, et al. Fault line detection method for flexible grounding system based on changes of phase difference between zero sequence current and voltage[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(12): 4847-4855.
- [32] CHEN Ming, XU Mingming, WU Wenhao, et al. A faulty line selection method for flexible grounding system based on transient fault data[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2479(1).
- [33] 梁睿, 孙式想. 单端行波故障测距的组合方法研究[J]. *电网技术*, 2013, 37(3): 699-706.
LIANG Rui, SUN Shixiang. A combined method for single-ended traveling wave fault location[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(3): 699-706.
- [34] 张荫洁, 李瑞桂, 瑛军娜. 消弧线圈并联小电阻接地方式分析[J]. *云南电力技术*, 2020, 48(5): 71-73.
ZHANG Hanjie, LI Ruigui, XU Junna. Brief analysis on common implementation problems of a neutral grounding method with an arc suppression coil and a parallel low resistance[J]. *Yunnan Electric Power*, 2020, 48(5): 71-73.

收稿日期: 2024-04-01; 修回日期: 2024-05-11

作者简介:

陶政臣(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 2889935785@qq.com

高湛军(1974—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: jacob-gao@sdu.edu.cn

见文号(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: 2716860659@qq.com

(编辑 姜新丽)