

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220841

基于零序分量的阻抗法配电网故障定位技术

齐 郑, 黄朝晖, 陈艳波

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 精准故障定位对提高配电网的安全性、可靠性有着重要意义。提出了一种基于零序分量的阻抗法定位技术。依据线电压对称性及零序电压幅值判断是否发生单相接地故障, 再利用安装在母线处及线路末端的同步相量测量单元获取线路发生单相接地故障后的稳态零序信号。在此基础上, 根据线路两端零序电压、母线侧零序电流及线路零序参数建立各区段发生单相接地故障时的测距方程, 以区段线路长度为限制排除伪根、确定真实根, 通过遍历系统各区段可同时实现区段定位及故障测距。在 EMTP/ATP 仿真软件中搭建 10 kV 配电网。结果表明, 所提方法在混合线路、多分支线路等多种配电网结构下都能保持较高精度, 且测距精度不受接地电阻和故障相角的影响。
关键词: 配电网; 故障定位; 零序分量; 阻抗法; 同步相量测量单元

Impedance fault location technology for a distribution network based on a zero-sequence component

QI Zheng, HUANG Zhaohui, CHEN Yanbo

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Accurate fault location is of great significance in improving the safety and reliability of a distribution network. An impedance fault location technology based on a zero-sequence component is proposed. First, a single-phase ground fault can be judged according to the symmetry of line voltages and the amplitude of the zero-sequence voltage. Then the PMU device installed at the bus and the end of the line is used to obtain the steady-state zero-sequence signal after a fault occurs. Then, according to the zero-sequence voltage at both ends of the line, the current at the bus side and the parameters of the line, the fault location equation in each section is established. The pseudo root and real root are distinguished according to the limit of the length of the section. By traversing each section of the system, section and fault location can be realized at the same time. A 10 kV distribution network is built in EMTP/ATP simulation software. The results show that the method can maintain high accuracy under various distribution network structures such as hybrid lines and multi-branch lines, and the ranging accuracy is not affected by the grounding resistance and fault phase angle.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077076).

Key words: distribution network; fault location; zero-sequence component; impedance method; phasor measurement unit

0 引言

中国中压配电网绝大多数采用中性点不接地或经消弧线圈接地的方式, 据统计, 单相接地故障约占故障总数的 80%以上^[1]。因此, 准确进行故障定位对提高配电网供电可靠性有着重要意义, 当配电网发生单相接地故障时, 产生的故障电流较小且故障特征微弱, 使得故障点的定位非常困难。目前输电网络的故障测距技术已经比较完善, 配电网有很多故障测距的方法被提出, 但是由于配电网结构复杂,

线路投入成本过高, 目前在实际工程应用中, 配电网故障定位仍停留在故障选线和故障区段定位阶段。

现有的配电网故障测距技术从原理上可以分为行波法^[2-7]和阻抗法两大类。行波法是通过记录故障产生的行波在故障点与母线之间到达的时间差来计算故障距离。行波法受故障时刻相角影响较大, 当故障时刻相角较小时, 行波信号微弱, 测距误差增大。同时, 配电网线路较短且分支多, 网络拓扑复杂, 安装高采样率的行波测距装置成本较高, 因此行波法在配电网中并未得到广泛应用。

阻抗法是依据故障时测量的电压、电流量来计算故障回路的阻抗, 线路阻抗与长度成正比, 由此

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52077076)

求得测距装置至故障点的距离^[8]。根据所需电气量测量位置的不同, 阻抗法又分为单端法与双端法, 单端阻抗法故障测距只需要一侧信息, 对硬件要求低, 易于实现, 但是单端阻抗法难以规避接地电阻和测量端电源的影响, 不可避免会产生误差, 影响测距精度^[9-10]。

双端阻抗法由于抗干扰性较好、定位精度高的特性, 在配电网故障定位中得到了较广泛的应用^[11-12]。文献[13]利用双端不同步的电压电流数据, 提出一种基于分布参数线路模型的正序分量测距算法, 但该方法仅适用于不带分支的配电网线路单相接地故障定位, 难以适用于日益复杂的配电网结构。文献[14]利用故障点过渡电阻消耗无功功率为零的功率特性建立适用各类型故障的测距方程, 但功率特性受不同接地方式的影响, 将影响测距结果的准确性, 同时在过渡电阻大的情况下测距准确性也受到较大影响。文献[15]提出将阻抗法与行波法结合的方案, 通过故障指示器判断故障所在区段, 使用双端行波法对主线路故障进行测距、阻抗法对支路故障进行测距, 实现多分支线路的故障定位, 但是该方法需加装行波测距装置, 提高设备投入成本, 难以广泛应用到工程中。

综上, 本文研究了基于零序分量的阻抗法配电网故障测距技术。采用集中参数 π 型等值电路建模, 在配电网发生单相接地故障后, 对零序网络进行分析, 利用线路两侧零序电压、母线侧零序电流建立各区段关于故障距离的一元二次测距方程, 同时实现区段定位与故障测距, 有效降低了线路投入成本, 较单端法有效消除了接地电阻等因素的影响, 测距精度高, 适用于多种结构的配电网。最后通过EMTP/ATP 仿真软件验证了本文所提方法的可靠性和准确性。

1 测距模型的建立与分析

1.1 配电网简单线路故障测距模型

对于中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统, 在发生单相接地故障后, 系统会先经过一个暂态过渡过程, 然后再进入带故障运行的稳态过程。配电网线路长度较短, 为提高测距精度, 本文在故障点两侧采用集中参数 π 型等值电路, 对系统带故障运行的稳态过程进行分析, 根据对称分量法分析当系统发生单相接地故障时的等效零序网络, 如图1所示。

通过线路两侧零序电压、母线侧零序电流及线路参数可以建立关于故障点到线路两侧距离的方程, 求解方程可实现故障测距。零序分量可通过对

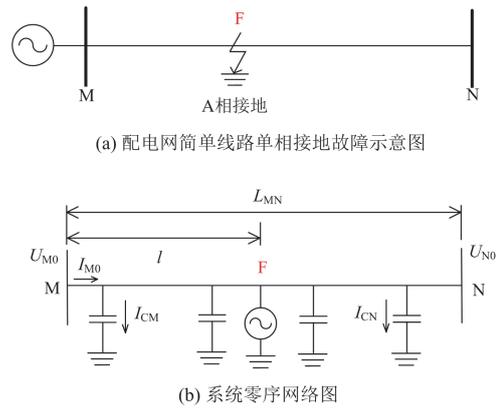


图1 配电网简单线路单相接地故障

Fig. 1 Single-phase-to-ground fault of simple line in distribution network

称分量法由三相基波电压、电流合成求得。 \dot{U}_{M0} 、 \dot{U}_{N0} 和 \dot{I}_{M0} 分别为故障线路 M、N 侧的零序电压、故障线路 M 侧的零序电流, 设电流正方向为从 M 至 N。从线路 M 侧推算故障点处的零序电压 $\dot{U}_{F0.M}$ 为

$$\begin{cases} Z_{CM} = \frac{1}{j\omega C_0 \frac{l}{2}} \\ Z_0 = R_0 + j\omega L_0 \\ \dot{U}_{F0.M} = \dot{U}_{M0} - (\dot{I}_{M0} - \frac{\dot{U}_{M0}}{Z_{CM}})Z_0 l \end{cases} \quad (1)$$

式中: Z_{CM} 为线路 M 侧零序电容的容抗值; C_0 为单位长度线路零序电容; Z_0 为单位长度线路零序阻抗; R_0 为单位长度线路零序电阻; L_0 为单位长度线路零序电感; l 为故障点到 M 端的距离。

同样地, 从线路 N 侧推算故障点处的零序电压 $\dot{U}_{F0.N}$ 为

$$\begin{cases} Z_{CN} = \frac{1}{j\omega C_0 \frac{L_{MN} - l}{2}} \\ \dot{U}_{F0.N} = \dot{U}_{N0} + \frac{\dot{U}_{N0}}{Z_{CN}}Z_0(L_{MN} - l) \end{cases} \quad (2)$$

式中: Z_{CN} 为线路 N 侧零序电容的容抗值; L_{MN} 为线路 MN 的总长度。

令从线路 M 侧推算出的故障点处零序电压 $\dot{U}_{F0.M}$ 及从 N 侧推算出的故障点处零序电压 $\dot{U}_{F0.N}$ 相等, 可得

$$\dot{U}_{M0} - (\dot{I}_{M0} - \frac{\dot{U}_{M0}}{Z_{CM}})Z_0 l = \dot{U}_{N0} + \frac{\dot{U}_{N0}}{Z_{CN}}Z_0(L_{MN} - l) \quad (3)$$

对式(3)进行化简后可得一元二次复数方程:

$$\frac{1}{2}j\omega C_0 Z_0 (\dot{U}_{M0} - \dot{U}_{N0})l^2 + (jL_{MN}\omega C_0 Z_0 \dot{U}_{N0} - \dot{I}_{M0} Z_0)l + \dot{U}_{M0} - \dot{U}_{N0} - \frac{1}{2}j\omega C_0 Z_0 \dot{U}_{N0} L_{MN}^2 = 0 \quad (4)$$

通过求解式(4)得到未知数 l ，即故障点到 M 端的距离。解一元二次复数方程组会遇到多根的情况，真实根即故障距离 l 必然为 $0 \sim L_{MN}$ 内的实数，考虑到信号量测及傅里叶转换中幅值与相角必然存在一定的误差，真实根的判别公式为

$$\begin{cases} -L \cdot \varepsilon \leq \text{Re}(l) \leq L \cdot (1 + \varepsilon) \\ |\text{Im}(l)| < L \cdot \varepsilon \end{cases} \quad (5)$$

式中： L 为该区间线路的总长度； ε 为测距结果允许的最大相对误差，根据实际故障测距的精度需要可设为 5%，也可根据线路具体测距情况调整。

1.2 配电网混合线路故障测距模型

当配电网混合线路发生单相接地故障时，其故障示意图及等效零序网络如图 2 所示。

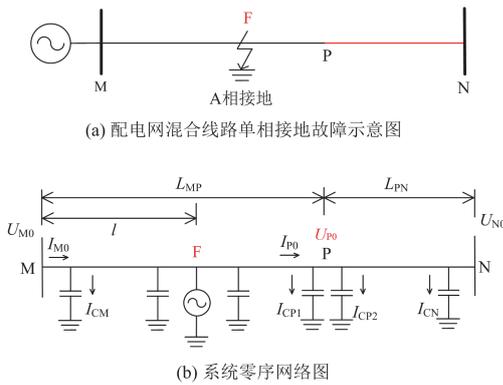


图 2 配电网混合线路单相接地故障

Fig. 2 Single-phase-to-ground fault of hybrid line in distribution network

同样地，可根据量测配电网混合线路两端的零序电压、母线侧的零序电流以及线路参数，建立关于故障点到线路两侧距离的方程，通过求解方程可实现故障测距。

当故障点位于 MP 段时，从线路 M 侧推算故障点处的零序电压 $\dot{U}_{F0,M}$ ，推导过程及公式与式(1)相同，MP 段线路参数与 1.1 节相同。

从线路 N 侧推算混合线路分界处 P 点的零序电压 \dot{U}_{P0} 为

$$\begin{cases} Z_{CN} = Z_{CP2} = \frac{1}{j\omega C'_0 \frac{L_{PN}}{2}} \\ Z'_0 = R'_0 + j\omega L'_0 \\ \dot{U}_{P0} = \dot{U}_{N0} + \frac{\dot{U}_{N0}}{Z_{CN}} Z'_0 L_{PN} \end{cases} \quad (6)$$

式中： Z_{CP2} 为 P 点右侧零序电容的容抗值； C'_0 为 PN 段单位长度线路零序电容； Z'_0 为 PN 段单位长度线路零序阻抗； R'_0 为 PN 段单位长度线路零序电阻； L'_0 为单位长度线路零序电感； L_{PN} 为 PN 段线路总长度。

进一步地，可从线路分界处 P 点推算故障点处的零序电压 $\dot{U}_{F0,P}$ 为

$$\begin{cases} Z_{CP1} = \frac{1}{j\omega C_0 \frac{L_{MP} - l}{2}} \\ \dot{U}_{F0,P} = \dot{U}_{P0} + \left(\frac{\dot{U}_{N0}}{Z_{CN}} + \frac{\dot{U}_{P0}}{Z_{CP1}} + \frac{\dot{U}_{P0}}{Z_{CP2}} \right) Z_0 (L_{MP} - l) \end{cases} \quad (7)$$

式中： Z_{CP1} 为 P 点左侧零序电容的容抗值； L_{MP} 为 MP 区段线路的长度。

令从 MN 两侧推算的故障点处的零序电压相等，即

$$\begin{aligned} \dot{U}_{M0} - \left(\dot{I}_{M0} - \frac{\dot{U}_{M0}}{Z_{CM}} \right) Z_0 l &= \\ \dot{U}_{P0} + \left(\frac{\dot{U}_{N0}}{Z_{CN}} + \frac{\dot{U}_{P0}}{Z_{CP1}} + \frac{\dot{U}_{P0}}{Z_{CP2}} \right) Z_0 (L_{MP} - l) & \end{aligned} \quad (8)$$

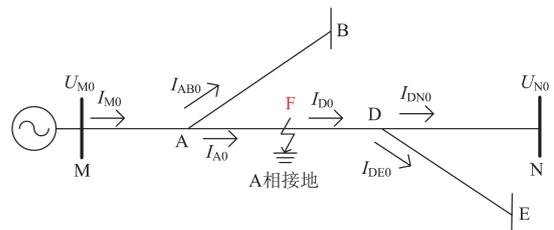
对式(8)进行化简后可得关于 l 的一元二次复数方程，求解方程可得 l 的根，根据式(5)可排除伪根，确定真实根。当式(8)求解的两根均不在范围内，同属伪根，可判断故障点处于线路 PN 段，同理可建立线路 PN 段的故障测距方程为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{P0} - \left(\dot{I}_{M0} - \frac{\dot{U}_{M0}}{Z_{CM}} - \frac{\dot{U}_{P0}}{Z_{CP1}} - \frac{\dot{U}_{P0}}{Z_{CP2}} \right) Z'_0 l' &= \\ \dot{U}_{N0} + \frac{\dot{U}_{N0}}{Z_{CN}} Z_0 (L_{PN} - l') & \end{aligned} \quad (9)$$

式中： l' 为故障点距 PN 区段首端 P 点的距离； $Z_{CM} = Z_{CP1} = 1/(j\omega C_0 L_{MP}/2)$ ； $Z_{CP2} = 1/(j\omega C'_0 l'/2)$ ； $Z_{CN} = 1/[j\omega C'_0 (L_{PN} - l')/2]$ 。求解方程得 l' 的根，再根据式(5)排除伪根，确定真实根即故障点到 P 端的距离。

1.3 配电网多分支线路故障测距模型

当配电网多分支线路发生单相接地故障时，其故障示意图及等效零序网络如图 3 所示。



(a) 配电网多分支线路单相接地故障示意图

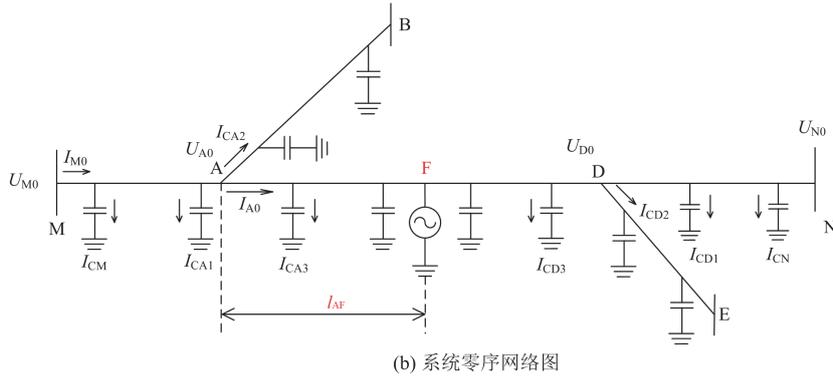


图 3 配电网多分支线路单相接地故障

Fig. 3 Single-phase-to-ground fault of multi-branch line in distribution network

根据配电网多分支线路 M、N 两端的零序电压、母线侧的零序电流以及线路参数, 可建立路径 MN 上每段线路(MA、AD、DN 段)关于故障点到线路两侧距离的方程, 通过求解方程可实现故障测距, 将故障点设置在 AD 段线路, MA、AD、DN、AB、DE 段线路的长度分别为 L_{MA} 、 L_{AD} 、 L_{DN} 、 L_{AB} 、 L_{DE} , 故障点距 A 点的距离为 l_{AF} , 单位长度线路参数与上文 1.1 节相同。

从 M 侧计算分支线路首端 A 点的零序电压 \dot{U}_{A0} 为

$$\begin{cases} Z_{CM} = \frac{1}{j\omega C_0 \frac{L_{MA}}{2}} \\ Z_0 = R_0 + j\omega L_0 \\ \dot{U}_{A0} = \dot{U}_{M0} - (I_{M0} - \frac{\dot{U}_{M0}}{Z_{CM}})Z_0 L_{MA} \end{cases} \quad (10)$$

进一步地, 根据 \dot{U}_{A0} 及 AB 段线路导纳 Y_{AB} 可计算故障点处的零序电压 $\dot{U}_{F0.A}$ 。

$$\begin{cases} Y_{AB} = j\omega C_0 \frac{L_{AB}}{2} + \frac{1}{Z_0 L_{AB} + \frac{1}{j\omega C_0 \frac{L_{AB}}{2}}} \\ \dot{I}_{A0} = \dot{I}_{M0} - (\dot{U}_{M0} + \dot{U}_{A0})j\omega C_0 \frac{L_{MA}}{2} - \dot{U}_{A0} Y_{AB} \\ \dot{U}_{F0.A} = \dot{U}_{A0} - Z_0 l_{AF} (\dot{I}_{A0} - \dot{U}_{A0} j\omega C_0 \frac{l_{AF}}{2}) \end{cases} \quad (11)$$

同样地, 从线路 N 侧计算分支线路首端 D 点零序电压 \dot{U}_{D0} 为

$$\begin{cases} Z_{CN} = \frac{1}{j\omega C_0 \frac{L_{DN}}{2}} \\ \dot{U}_{D0} = \dot{U}_{N0} + \frac{\dot{U}_{N0}}{Z_{CN}} Z_0 L_{DN} \end{cases} \quad (12)$$

进一步地, 根据 \dot{U}_{D0} 及 DE 段线路导纳 Y_{DE} 可计算故障点处的零序电压 $\dot{U}_{F0.D}$ 。

$$\begin{cases} Y_{DE} = j\omega C_0 \frac{L_{DE}}{2} + \frac{1}{Z_0 L_{DE} + \frac{1}{j\omega C_0 \frac{L_{DE}}{2}}} \\ \dot{I}_{D0} = (\dot{U}_{N0} + \dot{U}_{D0})j\omega C_0 \frac{L_{DN}}{2} + \dot{U}_{D0} Y_{DE} \\ \dot{U}_{F0.D} = \dot{U}_{D0} + Z_0 (L_{AD} - l_{AF}) (\dot{I}_{D0} + \dot{U}_{D0} j\omega C_0 \frac{L_{AD} - l_{AF}}{2}) \end{cases} \quad (13)$$

令从 MN 两侧推算的故障点处零序电压 $\dot{U}_{F0.A}$ 、 $\dot{U}_{F0.D}$ 相等, 可得

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A0} - Z_0 l_{AF} (\dot{I}_{A0} - \dot{U}_{A0} j\omega C_0 \frac{l_{AF}}{2}) = \\ \dot{U}_{D0} + Z_0 (L_{AD} - l_{AF}) (\dot{I}_{D0} + \dot{U}_{D0} j\omega C_0 \frac{L_{AD} - l_{AF}}{2}) \end{aligned} \quad (14)$$

根据式(10)一式(13)对式(14)进行展开后可得关于 l_{AF} 的一元二次复数方程, 求解方程得到 l_{AF} 的根, 同样可根据式(5)排除伪根, 确定真实根。当式(14)求解的两根均为伪根时, 可判断故障点不位于线路 AD 段。根据图 3(a)所示接地故障示意图, 当 AD 区段发生接地故障时, 从 MN 两侧推算故障点处的零序电压以建立关于 l_{AF} 的一元二次复数方程, 过程可简化如下。

从线路 M 侧推算过程为

$$\begin{cases} \dot{U}_{M0} \xrightarrow{L_{MA}, L_0, C_0} \dot{U}_{A0} \xrightarrow{L_{AB}, L_0, C_0} \dot{I}_{AB0} \\ \dot{I}_{M0} \rightarrow \begin{cases} \dot{I}_{A0} \\ \dot{I}_{AB0} \end{cases} \xrightarrow{l_{AF}, L_0, C_0} \dot{U}_0 \end{cases}$$

从线路 N 侧推算过程为

$$\dot{U}_{N0} \xrightarrow{L_{DN}, L_0, C_0} \begin{cases} \dot{U}_{D0} \xrightarrow{L_{DE}, L_0, C_0} \dot{I}_{DE0} \\ \dot{I}_{DN0} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{D0} \\ \dot{I}_{D0} \end{cases} \xrightarrow{L_{AD}, L_{AF}, L_0, C_0} \dot{U}_0$$

可依据相同方法建立 MA、DN 段线路的故障测距方程, 求解出故障距离。

同样地, 在此基础上为实现分支线路 AB 段的故障测距, 只需增加量测 B 端的零序电压。当分支线路 AB 段发生故障时, 主干线路 MA 段测距公式的定位结果将位于 MA 区段末端, AD 段测距公式的定位结果将位于 AD 区段首端。即主干线路 MA 段、AD 段测距公式均存在真实解, 且故障点均位于 A 点附近时, 代表故障点可能位于分支线路 AB 上, 需再应用 AB 段测距公式进行精确定位。

可以看出, 通过线路首端零序电压、零序电流及末端零序电压, 可实现对整条路径上各区段的故障测距。因此该方法在配电网增设分支线路时, 仅需在增设分支线路的末端量测零序电压, 从而实现对增设分支线路的故障测距, 无需在线路中间区段节点处进行电压电流的量测, 可减少数据采集装置的数量, 降低成本。

2 故障测距流程

目前, 随着通信和广域测量技术不断发展, 同步相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)在配电网中也得到了发展与应用, PMU 能够实现量测数据的实时同步, 消除双端阻抗法由于双端信息不同步导致的测距误差。同时, PMU 不仅能精确测量电压和电流的幅值、相角信息, 也能保持着高采样率, 在配电网中有良好的应用前景^[16-20]。

结合上述技术和理论分析, 故障测距算法流程图如图 4 所示, 基于零序分量的阻抗法配电网故障测距包括以下步骤。

步骤 1: 输入配电线路参数信息、对应拓扑结构、PMU 安装位置等必要信息。

步骤 2: 当系统正常运行时, 由母线侧 PMU 及线路末端的微型 PMU 监测三相电压、电流和零序电压、电流。线路实际运行参数也可通过 PMU 量测设备的台账信息计算获取。

步骤 3: 当发生单相接地故障时, 系统的 3 个线电压 \dot{U}_{AB} 、 \dot{U}_{BC} 、 \dot{U}_{CA} 幅值和相位差仍维持不变, 即对称性不变, 系统可延时跳闸, 继续运行^[18], PMU 可根据三相电压和零序电压的变化检测是否发生单相接地故障。

步骤 4: 判断故障发生后, 利用快速傅里叶变

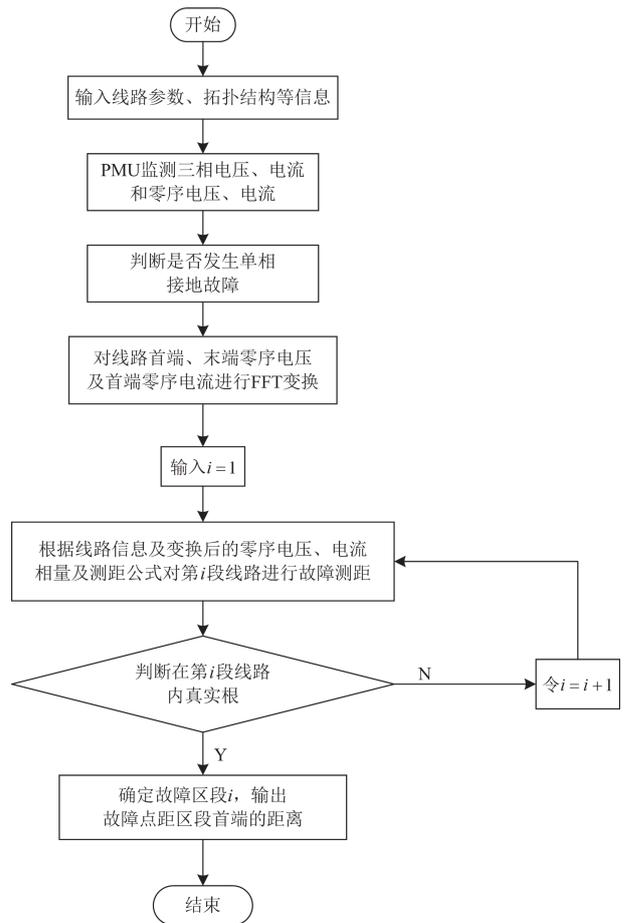


图 4 故障测距算法流程图

Fig. 4 Flow chart of fault location algorithm

换(fast fourier transformation, FFT)滤除高次谐波分量, 提取稳态零序电压、零序电流的工频分量。

步骤 5: 判断配电网线路类型, 若故障线路为单一类型线路, 则利用式(4)计算故障点到线路首端的距离。

步骤 6: 判断配电网线路类型, 若故障线路为混合线路, 则利用式(8)计算故障点到该区段始端的距离。根据式(5)排除伪根, 确定真实根, 当根据式(8)求解的两根均属伪根, 可判断故障点处于其他区段, 依据同样的方法利用式(9)进行下一区段的故障测距, 直至有真实根。

步骤 7: 若故障线路为多分支线路, 则利用式(14)计算故障点到该区段线路始端的距离。根据式(5)排除伪根, 确定真实根, 若无真实根, 则排除该区段, 应用下一区段故障测距公式确定距离, 直至寻得真实根。若整条路径均无真实根, 则短路点位于分支线路, 继续运用分支线路对应的故障测距公式进行计算, 直至有真实根。

3 仿真分析

为了验证上文方法的正确性, 本文分别选取了中性点不接地系统及中性点经消弧线圈接地系统, 利用 EMTP/ATP 软件对图 1、图 3 所示网络进行仿真分析。仿真过程中故障相均设置为 A 相, 设故障发生时刻为 0.1 s, 采样频率为 5 kHz。

3.1 配电网简单线路

图 1 为在 EMTP/ATP 中搭建的配电网简单线路单相接地故障模型, 系统参数: 线路电压等级 10 kV; 配电线路长度为 10 km。单位长度线路零序参数: $R_0 = 1.23 \times 10^{-3} \Omega / \text{m}$; $L_0 = 9.167 \times 10^{-7} \text{ H} / \text{m}$; $C_0 = 2.58333 \times 10^{-10} \text{ F} / \text{m}$ 。

对于中性点不接地系统, 首先将故障点设置在距 M 侧 1 km 处, 接地电阻设置为 10 Ω 。首先, 对 M、N 侧零序电压、M 侧零序电流同步采样, 并进行傅里叶变换, 可得基波零序电压、电流相量值为 $\dot{U}_{M0} = -7574.914 - j3974.029 \text{ V}$ 、 $\dot{I}_{M0} = -1.726 + j3.294 \text{ A}$ 、 $\dot{U}_{N0} = -7594.729 + j3950.942 \text{ V}$ 。将 \dot{U}_{M0} 、 \dot{U}_{N0} 和 \dot{I}_{M0} 代入式(4)得到一元二次复数方程并求解, 可得 l 的两个根: $l_1 = 998.952 - j0.160$ 、 $l_2 = 1.957 \times 10^6 + j8.415 \times 10^6$ 。最后, 根据式(5)可确定 l_1 为真实根, l_2 为伪根, 即故障距离为距 M 侧 998.952 m 处。

为比较在不同故障点处的测距结果及误差, 分别将故障点设置在距 M 侧 1、2、4、5、7 km 处; 将接地电阻设置为 10 Ω 、200 Ω 、1000 Ω 、5000 Ω , 以验证接地电阻的影响, 结果如表 1 所示。

表 1 中性点不接地配电网简单线路测距结果

Table 1 Location results of simple line in isolated neutral distribution network

接地电阻/ Ω	10	200	1000	5000
故障点距 M 点的距离/m	零序分量阻抗法测距距离/m			
1000	998.95	998.96	998.93	998.42
2000	1998.53	1998.53	1998.52	1998.15
4000	3999.50	3999.50	3999.50	3999.36
5000	5000.03	5000.03	5000.02	5000.03
7000	7000.55	7000.57	7000.57	7000.83

通过对比中性点不接地系统发生单相接地故障时, 在不同故障点处的测距结果, 根据表 1 可知, 最大绝对误差为 1.85 m, 最大相对误差为 0.10%, 平均相对误差为 0.04%, 测距精度高, 且不受接地电阻影响。

对于中性点经消弧线圈接地系统, 当发生单相

接地故障时, 消弧线圈电感与线路对地电容形成了并联谐振电路, 使系统的零序阻抗值很大, 会增大计算误差, 对于 10 kV 中性点经消弧线圈接地系统, 一般采用过补偿运行方式, 经消弧线圈补偿后的接地残流一般不超过 5 A^[21-23], 因此, 本文消弧线圈电感值取为 750 mH。中性点经消弧线圈接地配电网简单线路的测距结果, 如表 2 所示。

表 2 中性点经消弧线圈接地配电网简单线路测距结果

Table 2 Location results of simple line in distribution network with neutral grounding via arc suppression coil

接地电阻/ Ω	10	200	1000	5000
故障点距 M 端的距离/m	零序分量阻抗法测距距离/m			
1000	1008.14	1008.13	1008.14	1009.75
2000	2011.33	2011.33	2011.33	2012.56
4000	4004.52	4004.52	4004.52	4005.03
5000	5000.59	5000.59	5000.62	5000.77
7000	6996.96	6996.95	6996.95	6996.44

中性点经消弧线圈接地系统的零序阻抗值很大, 且消弧线圈的存在会减弱零序电流信号, 由表 2 可知, 该方法在中性点经消弧线圈接地系统测距结果的绝对误差最大为 12.56 m, 相对误差最大为 0.98%, 平均相对误差为 0.32%, 相较于中性点不接地系统误差有所增大, 测距精度能够满足要求, 基本不受故障距离及接地电阻的影响。

3.2 配电网多分支混合线路

图 3 为配电网多分支混合线路仿真模型, 线路电压等级为 10 kV, 主线路 MN 全长为 10 km, 单位长度线路零序参数与 3.1 节线路参数相同, 路径上距 M 侧 3 km、6 km 处存在 AB、DE 两段分支线路, 其中: AB 段分支线路长度为 6 km, DE 段分支线路长度为 5 km, 单位长度线路零序参数: $R_1 = 2.1 \times 10^{-4} \Omega / \text{m}$, $L_1 = 7 \times 10^{-6} \text{ H} / \text{m}$, $C_1 = 4.66 \times 10^{-12} \text{ F} / \text{m}$, 接地电阻为 200 Ω 。

将故障点设置于分支线路 AB 段距首端 A 点 1 km 处, 单相接地故障时间设置为 0.1 s。首先应用 MA 区段测距公式, 设故障点位于 MA 段, 距 M 点的距离为 l_{MF} 。对 M、N 侧零序电压、M 侧零序电流同步采样, 并进行傅里叶变换, 可得基波零序电压、电流相量值: $\dot{U}_{M0} = -6763.541 + j899.511 \text{ V}$ 、 $\dot{I}_{M0} = 0.393 + j2.940 \text{ A}$ 、 $\dot{U}_{N0} = -6763.835 + j902.452 \text{ V}$ 。

根据 \dot{U}_{N0} 可求得 D 点零序电压及线路 AD 段 D 侧零序电流: $\dot{U}_{D0} = -6763.291 + j896.881 \text{ V}$ 、 $\dot{I}_{D0} = -0.299 - j2.245 \text{ A}$; 同样, 根据 \dot{U}_{D0} 及 \dot{I}_{D0} 可求得 A 点零序电压及线路 MA 段 A 侧零序电流: $\dot{U}_{A0} =$

$-6762.144 + j855.206 \text{ V}$ 、 $\dot{I}_{A0} = -0.523 - j3.951 \text{ A}$ 。
根据 \dot{U}_{M0} 、 \dot{I}_{M0} 、 \dot{U}_{A0} 、 \dot{I}_{A0} 可建立 MA 区段的测距方程，设故障点距 M 点的距离为 l_{MF} 。

$$\begin{aligned} \dot{U}_{M0} - Z_0 l_{MF} (\dot{I}_{M0} - \dot{U}_{M0} j \omega C_0 \frac{l_{MF}}{2}) = \\ \dot{U}_{A0} + Z_0 (L_{MA} - l_{MF}) (\dot{I}_{A0} + \dot{U}_{A0} j \omega C_0 \frac{L_{MA} - l_{MF}}{2}) \end{aligned} \quad (15)$$

通过求解 MA 区段测距方程可得 l_{MF} 的两个根：
 $l_{MF1} = -3.356 \times 10^6 - j1.438 \times 10^7$ 、 $l_{MF2} = 2998.446 - j0.0298$ 。根据 $-L \cdot \varepsilon \leq \text{Re}(l) \leq L \cdot (1 + \varepsilon)$ 、 $|\text{Im}(l)| < L \cdot \varepsilon$ 可确定 l_{MF1} 为伪根， l_{MF2} 所确定故障点位于 A 点附近，需继续应用 AD 区段测距公式，设故障点位于 AD 段，距区段首端的距离为 l 。

根据 \dot{U}_{M0} 、 \dot{U}_{N0} 和 \dot{I}_{M0} 可求得 AD 区段两端零序电压电流： $\dot{U}_{A0} = -6762.142 + j885.190 \text{ V}$ 、 $\dot{I}_{A0} = 0.618 + j4.646 \text{ A}$ 、 $\dot{U}_{D0} = -6763.291 + j896.881 \text{ V}$ 、 $\dot{I}_{D0} = -0.299 - j2.245 \text{ A}$ 。代入式(14)后求解可得 l_{AF} 的两个根： $l_{AF1} = -1.554 - j0.030$ 、 $l_{AF2} = 4.120 \times 10^6 + j1.759 \times 10^7$ 。根据 $-L \cdot \varepsilon \leq \text{Re}(l) \leq L \cdot (1 + \varepsilon)$ 、 $|\text{Im}(l)| < L \cdot \varepsilon$ 可确定 l_{AF2} 为伪根， l_{AF1} 所确定故障点位于 A 点附近。根据主干线路 MA、AD 区段的测距结果，应继续对分支线路 AB 区段进行故障测距。

根据 \dot{U}_{M0} 和 \dot{I}_{M0} 可求得 AB 区段首端零序电压、电流为 $\dot{U}_{A0} = -6762.142 + j885.190 \text{ V}$ 、 $\dot{I}_{A0} = 1.126 - j8.478 \text{ A}$ 。此时 B 点量测零序电压为 $\dot{U}_{B0} = -6743.988 + j880.994 \text{ V}$ ，根据 \dot{U}_{A0} 、 \dot{I}_{A0} 和 \dot{U}_{B0} 可建立 AB 区段的测距方程。

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A0} - Z_1 l_{AF} (\dot{I}_{A0} - \dot{U}_{A0} j \omega C_1 \frac{l_{AF}}{2}) = \\ \dot{U}_{B0} + Z_1 (L_{AB} - l_{AF}) \dot{U}_{B0} j \omega C_1 \frac{L_{AB} - l_{AF}}{2} \end{aligned} \quad (16)$$

通过求解 AB 区段测距方程可得 l_{AF} 的两个根： $l_{AF1} = 1000.146 + j0.111$ 、 $l_{AF2} = -6.286 \times 10^8 - j5.998 \times 10^7$ ，根据式(5)可确定 l_{AF1} 为真实根， l_{AF2} 为伪根，故障点距 A 点 1000.146 m。

为进一步验证该方法的可行性，验证区段定位效果并比较在不同区段的测距结果及误差，将故障点分别设置于不同区段处，同时接地电阻分别设置为 10 Ω 、200 Ω 、1000 Ω 、5000 Ω ，故障发生时刻故障点处故障相电压相角 α 分别取 90°、45°、0°(对应故障发生时间设置为 0.0984 s、0.1009 s、0.1034 s)，以验证在不同故障电阻、故障相角条件下的适用性，

结果如表 3、表 4 所示。

表 3 中性点不接地配电网多分支混合线路
测距结果($\alpha = 90^\circ$)

Table 3 Location results of multi-branch hybrid lines in isolated neutral distribution network ($\alpha = 90^\circ$)

故障点 设置 区段	接地电阻/ Ω	10	200	1000	5000
	故障点距区段 首端距离/m	零序分量阻抗法测距距离/m			
MA	1000	998.29	998.00	997.95	997.42
	2000	1998.85	1998.62	1998.57	1998.22
AD	1000	998.28	998.28	998.26	998.12
	2000	1998.56	1998.87	1998.98	1998.99
DN	1000	998.85	999.11	998.84	998.97
	2000	1998.88	1998.92	1998.78	1999.02
AB	1000	997.65	1000.16	999.63	996.82
	2000	2001.61	2000.90	2001.27	2002.86
DE	1000	999.81	1000.60	1000.30	1000.96
	2000	1997.02	2000.21	2000.10	1999.99

表 4 中性点不接地配电网多分支混合线路测距结果($\alpha = 0^\circ$)

Table 4 Location results of multi-branch hybrid lines in isolated neutral distribution network ($\alpha = 0^\circ$)

故障点 设置 区段	接地电阻/ Ω	10	200	1000	5000
	故障点距区段 首端距离/m	零序分量阻抗法测距距离/m			
MA	1000	998.02	998.00	998.00	997.32
	2000	1998.61	1998.61	1998.61	1998.09
AD	1000	998.29	998.28	998.28	997.00
	2000	1998.90	1998.89	1998.89	1998.85
DN	1000	999.10	999.08	999.10	1001.56
	2000	1998.90	1998.91	1998.91	2002.61
AB	1000	1000.17	1000.18	1000.18	1000.30
	2000	2001.03	2001.07	2001.06	2001.43
DE	1000	1000.76	1000.42	1000.43	1000.65
	2000	2000.53	2000.09	2000.09	2000.39

由表 3 可知，测距结果中绝对误差最大为 3.18 m，相对误差最大为 0.32%，平均相对误差为 0.10%。对于分支线路处故障，根据式(5)可排除伪根，确定故障区段，可以看出，该方法在分支线路上也能保持较高的准确性。

由表 4 可知，当故障发生时刻故障点处故障相电压相角 α 为 0°时，测距结果中绝对误差最大为 3.00 m，相对误差最大为 0.30%，平均相对误差为 0.09%。当 α 为 45°时，测距精度及误差也相近，可以看出，在不同故障电阻、故障相角等故障条件下，

该测距方法在不同区段均能保持较高的准确性。

在中性点经消弧线圈接地系统中, 由于消弧线圈的存在及线路复杂度的提高, 计算误差也会增大。由表 5 可知, 在中性点经消弧线圈接地的配电网多分支混合线路中, 测距结果绝对误差最大为 17.68 m, 相对误差最大为 1.77%, 平均相对误差为 0.70%, 能保持较高的准确性, 仿真结果证明本文所提出基于零序分量的阻抗测距方法正确有效。

表 5 中性点经消弧线圈接地配电网多分支混合线路测距结果($\alpha = 45^\circ$)

Table 5 Location results of multi-branch hybrid lines in distribution network with neutral grounding via arc suppression coil ($\alpha = 45^\circ$)

故障点 设置 区段	接地电阻/ Ω	10	200	1000	5000
	故障点距区段 首端距离/m	零序分量阻抗法测距距离/m			
MA	1000	1017.02	1017.02	1017.68	997.32
	2000	2011.95	2012.01	2012.53	1998.09
AD	1000	1015.25	1015.20	1015.40	997.00
	2000	2010.17	2010.18	2010.22	1998.85
DN	1000	1009.44	1009.25	1009.87	1001.56
	2000	2010.69	2010.56	2008.17	2002.61
AB	1000	1002.55	1002.60	999.04	1000.30
	2000	1998.47	1998.03	1990.52	2001.43
DE	1000	1001.49	1001.48	1001.29	1000.65
	2000	2007.37	2007.38	2007.04	2000.39

4 结论

本文提出了一种基于零序分量的阻抗法故障定位方法, 适用于中性点不接地或经消弧线圈接地系统。通过安装在母线处及线路末端的 PMU 获取线路发生单相接地故障后的稳态零序信号, 根据线路两端零序电压、母线侧零序电流、线路零序参数建立各区段发生单相接地故障时的等式方程, 遍历各区段可同时实现区段定位及故障测距。通过 EMTP/ATP 对 10 kV 配电网的仿真实验, 仿真结果表明本文提出的方法适用于多分支混合等复杂配电网结构, 受接地电阻的影响较小, 测距精度高。

本文基于常规辐射状配电网进行分析, 对于环网结构以及含分布式电源的配电网, 测量点采集到的故障信息易发生畸变, 同时, 对于间歇性电弧接地, 系统处于多次暂态过渡过程, 谐波含量大, 提取稳态零序分量难度大, 对本文提出的阻抗测距方法是一个挑战, 将在以后的科研工作中进一步深入分析。

参考文献

- [1] 刘健, 张志华, 张小庆, 等. 基于配电自动化系统的单相接地定位[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 145-149. LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing, et al. Single phase to ground fault location based on distribution automation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 145-149.
- [2] 何军娜, 陈剑云, 艾颖梅, 等. 电力系统行波测距方法及其发展[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 148-154. HE Junna, CHEN Jianyun, AI Yingmei, et al. Fault location methods based on traveling wave theory for power system and its development[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 148-154.
- [3] 戴锋, 王政, 程孟晗, 等. 考虑短线路折反射的配电网故障定位研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 122-130. DAI Feng, WANG Zheng, CHENG Menghan, et al. Study on fault location considering refraction and reflection of short lines in a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 122-130.
- [4] 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.
- [5] JAMALI S, BAHMANYAR A, RANJBAR S. Hybrid classifier for fault location in active distribution networks[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 174-182.
- [6] NAMDARI F, SALEHI M. Fault classification and location in transmission lines using traveling waves modal components and continuous wavelet transform (CWT)[J]. Journal of Electrical Systems, 2016, 12(2): 373-386.
- [7] 乔文, 师琛, 李舟, 等. 基于行波折反射特征和网络拓扑的配电网单相接地故障定位方法[J]. 供用电, 2022, 39(1): 65-73. QIAO Wen, SHI Chen, LI Zhou, et al. Single-phase ground fault location method of distribution network based on traveling wave refraction and reflection characteristics and network topology[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(1): 65-73.
- [8] 张健文, 周鹏, 陈焕翔. 基于改进阻抗法的单相接地故障测距仿真[J]. 电测与仪表, 2018, 55(3): 84-87. ZHANG Jianwen, ZHOU Peng, CHEN Huanxu. Simulation of transmission line single-phase ground fault location based on improved impedance method[J]. Electrical

- Measurement & Instrumentation, 2018, 55(3): 84-87.
- [9] KRISHNATHEVAR R, NGU E E. Generalized impedance-based fault location for distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 449-451.
- [10] MORTAZAVI S H, MORAVEJ Z, SHAHRTASH S M. A searching based method for locating high impedance arcing fault in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(2): 438-447.
- [11] 王小君, 任欣玉, 和敬涵, 等. 基于 μ PMU 相量信息的配电网故障测距方法[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 810-818.
WANG Xiaojun, REN Xinyu, HE Jinghan, et al. Distribution network fault location based on μ PMU information[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 810-818.
- [12] 宋连峻, 曲霏, 廉洪波, 等. 基于阻抗分析的复杂配电网接地故障定位方法[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(8): 69-74.
SONG Lianjun, QU Fei, LIAN Hongbo, et al. A grounding fault location method for complex distribution networks based on impedance analysis[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(8): 69-74.
- [13] 杨凌霄, 牛惠平, 张伟, 等. 基于双端阻抗法的配电网故障定位研究[J]. 工矿自动化, 2008(5): 30-32.
YANG Lingxiao, NIU Huiping, ZHANG Wei, et al. Research of fault location of distribution network based on double-end impedance method[J]. Industry and Mine Automation, 2008(5): 30-32.
- [14] 戴志辉, 王旭. 基于改进阻抗法的有源配电网故障测距算法[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 2027-2034.
DAI Zhihui, WANG Xu. Impedance method based fault location algorithm for active distribution system[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 2027-2034.
- [15] 邹祁武, 胡金磊, 孙云莲, 等. 一种基于故障指示器的行波-阻抗法双端带支路配电网故障定位方法, 中国: CN108627741B[P]. 2020-06-16.
ZOU Qiwu, HU Jinlei, SUN Yunlian, et al. Fault positioning method for double-end-band branch power distribution network based on fault indicator, China: CN108627741B[P]. 2020-06-16.
- [16] 谢潇磊, 刘亚东, 孙鹏, 等. 新型配电网线路 PMU 装置的研制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 15-20, 52.
XIE Xiaolei, LIU Yadong, SUN Peng, et al. Development of novel PMU device for distribution network lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 15-20, 52.
- [17] MEIER A V, STEWART E, MCEACHERN A, et al. Precision micro-synchrophasors for distribution systems: a summary of applications[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2926-2936.
- [18] 葛维春, 张硕, 张艳军, 等. 基于 μ PMU 同步量测数据的配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 39-46.
GE Weichun, ZHANG Shuo, ZHANG Yanjun, et al. A novel method for fault location of distribution network based on μ PMU synchronized measurement data[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 39-46.
- [19] 张赢, 魏文震, 李江, 等. 基于北斗授时的 μ PMU 测量误差综合分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 83-91.
ZHANG Ying, WEI Wenzhen, LI Jiang, et al. Comprehensive measurement error analysis of μ PMU based on Beidou time service[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 83-91.
- [20] 王献志, 李铁成, 郭少飞, 等. 基于 μ PMU 电压相位数据的配电网拓扑辨识[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(6): 54-63.
WANG Xianzhi, LI Tiecheng, GUO Shaofei, et al. Identification of distribution network topology based on μ PMU voltage phase data[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(6): 54-63.
- [21] 刘健, 王毅钊, 张小庆, 等. 配电网单相接地故障处理保护化关键技术[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 18-23.
LIU Jian, WANG Yizhao, ZHANG Xiaoqing, et al. Key technologies on single-phase earthed fault protection for a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 18-23.
- [22] 张辉. 关于配电网中性点经消弧线圈接地方式的探讨[J]. 电瓷避雷器, 2019(3): 87-91.
ZHANG Hui. Discussion on earthing mode of neutral point through arc suppression coil in distribution network[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(3): 87-91.
- [23] 杨以涵, 齐郑. 中压配电网单相接地故障选线及定位技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.

收稿日期: 2022-06-04; 修回日期: 2022-10-04

作者简介:

齐郑(1977—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: qizheng319@126.com

黄朝晖(1997—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网故障定位; E-mail: huangzhaohui1221@qq.com

陈艳波(1982—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: yanbochen2008@sina.com

(编辑 许威)