

引用格式:贺芳煜,倪砚茹,曾祥君,等.基于快速开关型消弧装置的不对称配电网故障选线及区段定位方法[J].电力科学与技术学报,2025,40(2):100-109.

Citation: HE Fangyu, NI Yanru, ZENG Xiangjun, et al. Fault line selection and section location method for asymmetric distribution network based on fast switch arc suppression device[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(2): 100-109.

基于快速开关型消弧装置的不对称配电网 故障选线及区段定位方法

贺芳煜,倪砚茹,曾祥君,喻 锐,曾 超

(长沙理工大学电气与信息工程学院,湖南长沙 410114)

摘 要:针对目前不对称配电网高阻接地故障选线及区段定位的难题,提出一种基于快速开关型消弧装置的不对称配电网故障选线及区段定位方法。先分析了快速开关型消弧装置的基本原理;再深入分析系统发生高阻接地故障后,消弧装置动作前后系统各馈线的电气量特征;然后,通过理论推导发现消弧装置动作前、后故障馈线与非故障馈线零序等值导纳的变化量不同,建立故障馈线辨识函数并构造选线与区段定位判据;最后,通过 PSCAD/EMTDC 仿真软件对所提方法进行验证。研究表明,所提方法能够准确辨识高阻接地故障馈线与区段,且该方法不受配电网三相不平衡的影响。

关 键 词:不对称配电网;快速开关;单相接地故障;故障选线;故障区段定位

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.02.011 中图分类号: TM773 文章编号: 1673-9140(2025)02-0100-10

Fault line selection and section location method for asymmetric distribution network based on fast switch arc suppression device

HE Fangyu, NI Yanru, ZENG Xiangjun, YU Kun, ZENG Chao

(School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In consideration of the problem of high-resistance grounding fault line selection and section location in asymmetric distribution networks, a fault line selection and section location method for asymmetric distribution networks based on the fast switch arc suppression device is proposed. Firstly, the basic principle of the fast switch arc suppression device is analyzed. On this basis, the electrical quantity properties of each feeder in the distribution system prior to and following the operation of the device are analyzed in depth after the high-resistance grounding fault occurs in the system. Through theoretical derivation, it is found that the fault feeder and the non-fault feeder before and after the operation of the device differ in the variation of the zero-sequence equivalent admittance. Based on this, the fault feeder identification function is established, and the line selection and section location criteria are constructed. The proposed method is verified by PSCAD/EMTDC simulation software. The results show that the proposed method can accurately identify high-resistance grounding fault feeders and sections and is not affected by the three-phase imbalance of the distribution network.

Key words: asymmetric distribution network; fast switch; single-phase grounding fault; fault line selection; fault section location

中国的中压配电网通常采取中性点不接地和
谐振接地等小电流接地方式^[1-4]。随着城市的发

展以及电网规模的不断扩大,电网线路逐渐从以
架空线为主的结构转变为以电缆为主的结构,系

收稿日期:2023-07-30;修回日期:2024-01-15

基金项目:国家自然科学基金(52037001)

通信作者:曾祥君(1972—),男,博士,教授,主要从事电力系统保护与控制等方面的研究;E-mail: eexjzeng@qq.com

统电容电流不断增加。这些可能导致系统发生弧光接地故障时电弧可靠熄灭的难度较大^[5],降低系统供电可靠性,危及电网设备与人民群众的生命财产安全。近年来,作为消弧线圈的补充与替代,能可靠消弧的快速开关型消弧装置,得到了较为广泛的应用,极大地提升了系统运行的可靠性与安全性^[6-9]。目前,快速开关型消弧装置一般按照以下步骤来处理接地故障:先采集电网数据,检测到故障后辨识故障相;然后,投入装置进行消弧,选线并进行区段定位;最后,就近快速隔离永久性故障^[10-11]。但如果选线或区段定位发生错误,则往往无法及时处理故障,甚至可能扩大故障范围,引发诸如大面积停电、火灾等重大事故。中国配电网结构复杂,电网系统存在铁磁谐振、线路不换位等情况,这些都导致了电网中长期存在着三相对地参数不平衡的问题^[12-14]。因此,研究不平衡配电网的选线与区段定位问题具有极其重要的现实意义。

传统的选线方法在配电网发生高阻接地故障时会可能出现失效的情况^[15-17],针对此问题,近年来一系列相关故障选线方法被提出。文献[18-20]基于对暂态电路的时域分析,提出了投影系数法与暂态能量法,实现了对高阻接地故障的选线,但其将实际中的非线性过渡电阻视作线性的固定电阻,导致零序电流波形具有明显的电弧畸变特征,故该方法的可靠性较低。文献[21-22]基于神经网络算法等人工智能算法对高阻接地故障进行有效选线,但该方法的物理意义不明确,未从根本上解决高阻接地故障的检测问题,解释性差。文献[23]基于馈线特征频率与工频下的零序导纳实现了故障选线,但该方法易受三相不平衡的影响。文献[24-25]利用导纳不对称度与5次谐波进行选线。但该方法中的负荷对相关信号的影响较大,故该方法的应用可靠性较低。在配置快速开关型消弧装置的系统中,除实现快速熄灭故障电弧外,消弧装置投入前、后的系统电气量的变化提供了新的辨识故障馈线的方法切入点。文献[26]利用故障线路与非故障线路零序电流幅值与相位的不同,快速开关型消弧装置动作前、后故障线路与非故障线路零序电流方向的改变情况的差异进行选线,消除了系统三相不平衡的影响,但该方法的可靠性较差,且未结合消弧装置进行故障区段定位。文献[27]利用快速开关型消弧装置投入前、后零序电流的幅值变化情况进行

选线,消除了系统三相不平衡的影响。但该方法在故障线路与其他线路相比长度较大时,选线判据可能会失效。

目前,故障区段定位方法基本可分为基于故障信息^[28-30]和基于注入信号^[31-33]两大类,现有方法不能就地判断故障处于检测装置的哪一侧,需要通过主站进行分析^[34]。这不仅极大地增大了主站的工作量,且一旦发生通信中断,就不能准确实现区段定位。快速开关型消弧装置的广泛应用同样也为故障区段定位提供了新的思路。文献[35]利用快速短接故障相母线熄弧装置动作前、后的零序电流的幅值比与相位差实现了故障区段定位,可就地判断故障位于装置的哪一侧,但是在三相不平衡时该定位判据会失效。

针对这些问题,结合目前多数安装快速开关型消弧装置的变电站为中性点不接地系统的情况,本文重点研究装设快速开关型消弧装置的中性点不接地系统的故障馈线辨识及区段定位技术,借鉴零序导纳法进行故障选线的思路,提出一种基于消弧装置投入前、后零序导纳变化的选线及区段定位新方法,可实现不平衡配电网的高阻接地故障线路辨识及区段定位,并通过PSCAD/EMTDC软件进行了仿真试验,验证所提方法的有效性与准确性。

1 快速开关型消弧装置基本原理

当中性点不接地运行的配电网发生A相接地故障后,配电网电容电流情况如图1所示。在图1中, \dot{E}_A 、 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 分别为A、B、C三相电源电动势; K_A 、 K_B 、 K_C 分别为消弧装置的快速开关; R_f 为接地故障电阻; C_1 、 C_2 分别为线路I和线路II的相对地等效电容。此时,故障点流过的电流较大,接地电弧不易熄灭。在快速开关型消弧装置识别故障相后,母线处快速开关 K_A 迅速动作,将单相弧光接地变为金属性接地,此时的配电网电容电流情况如图2所示。在图2中,故障电流基本都转移到A相母线的接地处,故障点电压降低到电弧重燃电压以下,故障点接地电流基本为0A,实现快速消弧,且电弧不会重燃。

利用快速开关型消弧装置消弧的方式不受接地电容电流大小的影响,可实现完全消弧,有效抑制配电网因接地故障产生的间歇性弧光过电压,且操作过程较简单,响应时间短。

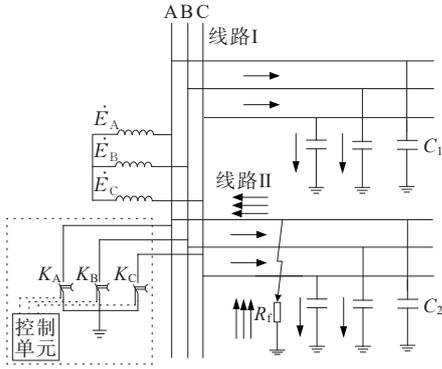


图1 配电网单相接地故障电容电流分布

Figure 1 Capacitance and current distribution of single-phase grounding fault in distribution networks

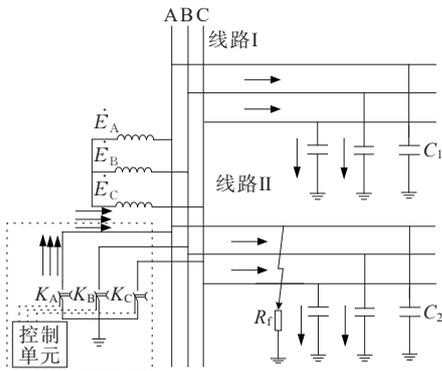


图2 消弧装置动作后配电网接地故障电容电流分布

Figure 2 Capacitance and current distribution of grounding fault in distribution networks after operation of arc suppression device action

2 基于快速开关型消弧装置的不对称配电网故障馈线辨识及区段定位原理

2.1 基于快速开关型消弧装置的不对称配电网故障馈线辨识方法

为准确处理高阻接地故障,避免三相对地导纳不对称造成的选线判据失效,在快速开关型消弧装置得到广泛应用的背景下,本文提出一种不对称配电网故障馈线识别新方法,该方法利用消弧装置投入前、后故障馈线与非故障馈线零序导纳变化量的不同来辨识故障馈线。

不对称配电网故障模型如图3所示。在图3中, Y_{Ai} 、 Y_{Bi} 、 Y_{Ci} , $i=1,2,3$ 分别为A、B、C三相各区段等效对地导纳;标号*i*为第*i*区段馈线终端,忽略线路阻抗;线路 L_2 为所有正常线路的等效线路。设线路 L_1 发生C相接地故障。

线路不换位将导致三相对地导纳不对称与不平衡电压。当故障未发生时,线路存在零序电压与零

序电流。此时,馈线 L_1 、 L_2 的固有零序电流^[36]分别为

$$\dot{I}'_{L_{10}} = \dot{E}_A(Y_{A1} + Y_{A2}) + \dot{E}_B Y_{B1} + Y_{B2} + \dot{E}_C(Y_{C1} + Y_{C2}) \quad (1)$$

$$\dot{I}'_{L_{20}} = \dot{E}_A Y_{A3} + \dot{E}_B Y_{B3} + \dot{E}_C Y_{C3} \quad (2)$$

式(1)、(2)中, $\dot{I}'_{L_{10}}$ 为馈线 L_1 的固有零序电流; $\dot{I}'_{L_{20}}$ 为馈线 L_2 的固有零序电流。

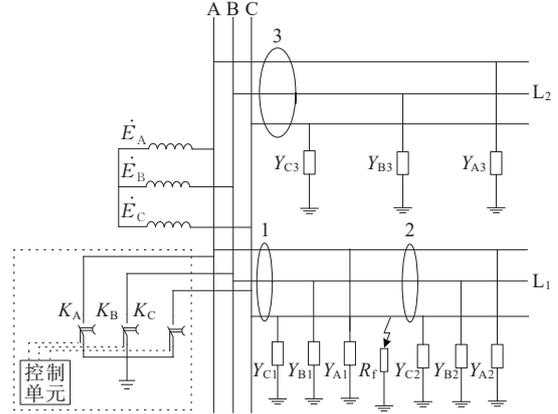


图3 不对称配电网故障模型

Figure 3 Asymmetric distribution network fault model

2.1.1 消弧装置投入前系统电气量特征

在 L_1 线路C相发生故障后至熄弧装置投入前的时间段中,依据节点电压方程,可得到该线路的零序电压,即

$$\dot{U}_0 = -\frac{\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C(Y_C + g_f)}{Y_A + Y_B + Y_C + g_f} \quad (3)$$

式中, \dot{U}_0 为消弧装置投入前的系统零序电压。

其中,

$$\begin{cases} Y_A = Y_{A1} + Y_{A2} + Y_{A3} \\ Y_B = Y_{B1} + Y_{B2} + Y_{B3} \\ Y_C = Y_{C1} + Y_{C2} + Y_{C3} \\ g_f = 1/R_f \end{cases} \quad (4)$$

为方便表示,设

$$\begin{cases} Y'_A = Y_{A1} + Y_{A2} \\ Y'_B = Y_{B1} + Y_{B2} \\ Y'_C = Y_{C1} + Y_{C2} \end{cases} \quad (5)$$

则此时馈线 L_1 、 L_2 零序电流分别为

$$\dot{I}_{L_{10}} = (\dot{E}_A + \dot{U}_0)Y'_A + (\dot{E}_B + \dot{U}_0)Y'_B + (\dot{E}_C + \dot{U}_0)(Y'_C + g_f) \quad (6)$$

$$\dot{I}_{L_{20}} = (\dot{E}_A + \dot{U}_0)Y_{A3} + (\dot{E}_B + \dot{U}_0)Y_{B3} + (\dot{E}_C + \dot{U}_0)Y_{C3} \quad (7)$$

式(6)、(7)中, $\dot{I}_{L_{10}}$ 为消弧装置投入前流经馈线 L_1 的零序电流; $\dot{I}_{L_{20}}$ 为消弧装置投入前流经馈线 L_2 的零序电流。

在消除三相对地导纳不对称的影响后,馈线 L_1 零序等效导纳为

$$Y_{\Sigma L10} = \frac{\dot{I}_{L10} - \dot{I}'_{L10}}{\dot{U}_0} = Y' + g_f + \frac{\dot{E}_C g_f}{\dot{U}_0} = Y' + g_f + \frac{g_f(Y_A + Y_B + Y_C + g_f)}{a^2 Y_A + a Y_B + Y_C + g_f} \quad (8)$$

式中, $Y_{\Sigma L10}$ 为消弧装置投入前馈线 L_1 的零序等效导纳; $a = e^{j120^\circ}$ 为相量算子。

其中,

$$Y' = Y_{A1} + Y_{A2} + Y_{B1} + Y_{B2} + Y_{C1} + Y_{C2} \quad (9)$$

在消除三相对地导纳不对称的影响后,馈线 L_2 零序等效导纳为

$$Y_{\Sigma L20} = \frac{\dot{I}_{L20} - \dot{I}'_{L20}}{\dot{U}_0} = Y_{A3} + Y_{B3} + Y_{C3} \quad (10)$$

式中, $Y_{\Sigma L20}$ 为消弧装置投入前馈线 L_2 的零序等效导纳。

2.1.2 消弧装置投入后系统电气量特征

消弧装置投入后,此时系统零序电压为^[36]

$$\dot{U}'_0 = -\dot{E}_C \quad (11)$$

式中, \dot{U}'_0 为消弧装置投入后的系统零序电压。

此时,馈线 L_1 、 L_2 零序电流分别为

$$\dot{I}''_{L10} = (\dot{E}_A + \dot{U}'_0)Y_{A1} + (\dot{E}_B + \dot{U}'_0)Y_{B1} + (\dot{E}_C + \dot{U}'_0)Y_{C1} \quad (12)$$

$$\dot{I}''_{L20} = (\dot{E}_A + \dot{U}'_0)Y_{A3} + (\dot{E}_B + \dot{U}'_0)Y_{B3} + (\dot{E}_C + \dot{U}'_0)Y_{C3} \quad (13)$$

式(12)、(13)中, \dot{I}''_{L10} 为消弧装置投入后流经馈线 L_1 的零序电流; \dot{I}''_{L20} 为消弧装置投入后流经馈线 L_2 的零序电流。

则馈线 L_1 、 L_2 零序等效导纳分别为

$$Y'_{\Sigma L1} = \frac{\dot{I}''_{L10} - \dot{I}'_{L10}}{\dot{U}'_0} = Y_{A1} + Y_{A2} + Y_{B1} + Y_{B2} + Y_{C1} + Y_{C2} \quad (14)$$

$$Y'_{\Sigma L2} = \frac{\dot{I}''_{L20} - \dot{I}'_{L20}}{\dot{U}'_0} = Y_{A3} + Y_{B3} + Y_{C3} \quad (15)$$

式(14)、(15)中, $Y'_{\Sigma L1}$ 为消弧装置投入后馈线 L_1 的零序等效导纳; $Y'_{\Sigma L2}$ 为消弧装置投入后馈线 L_2 的零序等效导纳。

在消弧装置投入前、后,馈线 L_1 、 L_2 零序等效导纳差值分别为

$$|\Delta Y_{\Sigma L1}| = \left| g_f + \frac{g_f(Y_A + Y_B + Y_C + g_f)}{a^2 Y_A + a Y_B + Y_C + g_f} \right| \quad (16)$$

$$|\Delta Y_{\Sigma L2}| = 0 \quad (17)$$

式(16)、(17)中, $|\Delta Y_{\Sigma L1}|$ 为消弧装置投入前后,馈线

L_1 零序等效导纳差值; $|\Delta Y_{\Sigma L2}|$ 为消弧装置投入前、后馈线 L_2 零序等效导纳差值。

从式(16)、(17)中可以看出,故障线路的消弧装置投入前、后的零序等效导纳差值不为0 S,而非故障线路零序导纳差值基本为0 S。建立故障馈线辨识函数:

$$y_i = |\Delta Y_{\Sigma i}| \times 10^4 \quad (18)$$

式中, y_i 为馈线 L_i 的故障馈线辨识函数; $|\Delta Y_{\Sigma i}|$ 为消弧装置投入前、后的馈线 L_i 零序等效导纳差值。

零序电流和电压的实测值存在误差,故设定故障选线判据:计算各线路的故障线路辨识函数 y_i ,函数最大值即为故障线路。

2.2 基于快速开关型消弧装置的接地故障区段定位原理

从图3可以看出,消弧装置投入的前后,区段1与区段3的零序导纳的差值等于线路 L_1 和 L_2 的零序导纳的差值,即区段1和区段3的零序导纳差值分别为

$$|\Delta Y_{\Sigma 1}| = |\Delta Y_{\Sigma L1}| = \left| g_f + \frac{g_f(Y_A + Y_B + Y_C + g_f)}{a^2 Y_A + a Y_B + Y_C + g_f} \right| \quad (19)$$

$$|\Delta Y_{\Sigma 3}| = |\Delta Y_{\Sigma L2}| = 0 \quad (20)$$

式(19)、(20)中, $|\Delta Y_{\Sigma 1}|$ 为消弧装置投入前、后的区段1的零序导纳差值; $|\Delta Y_{\Sigma 3}|$ 为消弧装置投入前、后的区段3的零序导纳差值。

区段2的固有零序电流 \dot{I}'_{o2} 为

$$\dot{I}'_{o2} = \dot{E}_A Y_{A2} + \dot{E}_B Y_{B2} + \dot{E}_C Y_{C2} \quad (21)$$

当 L_1 线路的C相发生故障后且熄弧装置投入前,流过区段2的零序电流 \dot{I}_{o2} 为

$$\dot{I}_{o2} = (\dot{E}_A + \dot{U}'_0)Y_{A2} + (\dot{E}_B + \dot{U}'_0)Y_{B2} + (\dot{E}_C + \dot{U}'_0)Y_{C2} \quad (22)$$

消除三相对地导纳不对称的影响后,区段2的零序等效导纳 $Y_{\Sigma 2}$ 为

$$Y_{\Sigma 2} = \frac{\dot{I}_{o2} - \dot{I}'_{o2}}{\dot{U}'_0} = Y_{A2} + Y_{B2} + Y_{C2} \quad (23)$$

消弧装置投入后,区段2的零序电流 \dot{I}''_{o2} 为

$$\dot{I}''_{o2} = (\dot{E}_A + \dot{U}'_0)Y_{A2} + (\dot{E}_B + \dot{U}'_0)Y_{B2} + (\dot{E}_C + \dot{U}'_0)Y_{C2} \quad (24)$$

则消弧装置投入后区段2的零序等效导纳 $Y'_{\Sigma 2}$ 为

$$Y'_{\Sigma 2} = \frac{\dot{I}''_{o2} - \dot{I}'_{o2}}{\dot{U}'_0} = Y_{A2} + Y_{B2} + Y_{C2} \quad (25)$$

那么,消弧装置投入前、后的区段2的零序导纳的差值 $|\Delta Y_{\Sigma 2}|$ 为

$$|\Delta Y_{s2}| = 0 \tag{26}$$

由式(23)可知,故障区段与非故障区段零序导纳的差值不同,建立故障区段辨识函数 y_i 。故障区段为 y_i 值最大的区段。

如果 y_i 为最大,则判断该设备位于故障路径,记故障判据记为1;否则,若 y_i 不是最大,判断该设备位于正常路径中,记故障判据为0。

该故障区段定位方法步骤可分为5步。

1) 配电网发生高阻接地故障前,馈线终端设备录波,得到由于系统三相相对地导纳不对称的零序电流。

2) 系统发生高阻接地故障后,变电站迅速选相,然后控制快速开关型消弧装置将故障相母线接地。

3) 系统线路终端设备在检测到故障信号之后进行录波,提取系统工频零序电压和零序电流。

4) 计算熄弧装置动作前、后零序导纳差值,若该差值为最大值,则判断其位于故障路径;否则,则判断其位于非故障路径。

5) 系统线路终端显示本区段的路径类别。如果某区段的故障判据为1,则故障区段就是故障判据由1转为0的区段;如果所有区段的故障判据都为0,则判断故障为母线单相接地故障。

该区段定位方法不受系统三相不平衡的影响,且其抗过渡电阻能力较强,在系统发生高阻接地故障时也能有效、准确地定位故障区段。

3 接地故障选线及区段定位实现流程

配置快速开关型消弧装置的不对称配电网的接地故障选线与区段定位实现流程如图4所示。

消弧装置中的微控制单元(micro controller unit, MCU)实时采集系统三相电压数据和零序电压数据。当系统发生单相接地故障时,MCU先通过对三相电压数据和零序电压数据进行分析,根据三相电压的波形、幅值、相位、频率等与零序电压之间的关系确定发生单相接地的故障相,快速输出可控硅调压组件的控制信号;驱动故障相可控硅调压组件动作,调节故障相对地电压,迅速将故障相对地电压调节到故障点绝缘耐受电压之下,消除弧光放电;然后,继续监测系统三相电压和零序电压;若故障相再次发生弧光放电,算法将重新调整可控硅调压组件动作,配合故障点绝缘耐受电压的变化;最后,算法将计算各区段零序等值导纳,依据式(18)得到故障馈线辨识函数值,其中函数值最大者的线路即为故障线路,实现区段定位。

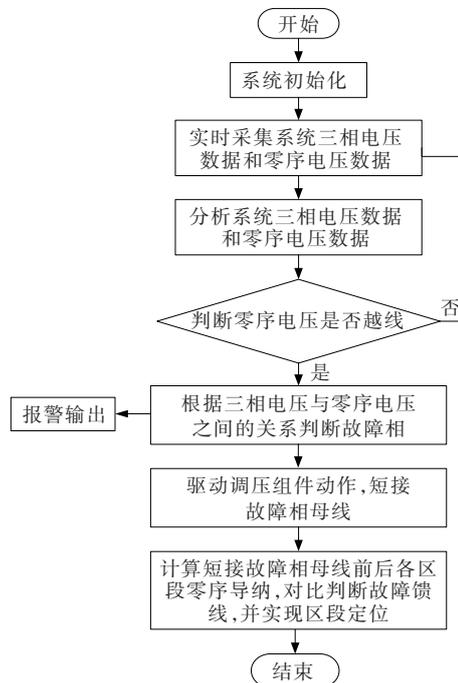


图4 故障选线及区段定位流程

Figure 4 Fault line selection and section location process

4 仿真分析

利用PSCAD/EMTDC仿真软件,搭建如图5所示的仿真模型。该仿真模型包含 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 共4条线路。其中,线路 l_1 、 l_2 、 l_3 为电缆线路,线路 l_4 为架空线路。同时,按测量装置划分各区段, D 、 E 、 F 、 G 检测点将馈线 l_4 划分为不同区段,该馈线仿真具体参数见表1。

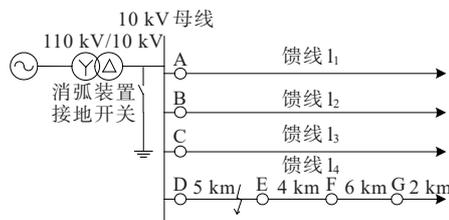


图5 配电网故障选线及区段定位仿真拓扑结构

Figure 5 Simulation topology of fault line selection and section location in distribution networks

表1 线路仿真参数

Table 1 Feeder simulation parameters

馈线	对地电容/ μF			对地电阻/ Ω			不平衡度/%	阻尼率/%
	A相	B相	C相	A相	B相	C相		
l_1	5.00	5.00	5.00	23 564	23 564	23 564	0.00	2.70
l_2	3.34	3.26	3.38	32 456	33 547	31 467	1.07	2.95
l_3	2.34	2.14	2.16	53 412	44 519	56 948	2.68	2.82
l_4	0.42	0.44	0.47	203 070	225 780	213 490	3.18	3.36

4.1 接地故障选线仿真

设定系统在 0.50 s 时刻馈线 l_4 发生 C 相接地故障,快速开关型消弧装置在 0.55 s 动作,系统各馈线在过渡电阻分别为 500、3 000 Ω 的零序电流有效值和相位、中性点电压分别如图 6~11 所示。

从图 6~11 中可以看出,无论在低阻还是高阻的情况下,消弧装置的动作均引起了系统各馈线零序电流有效值和相位的改变。当配电网出现低阻接地故障时,非故障馈线零序电流有效值和相角增大,而故障馈线零序电流有效值和相角减小。当配电网出现高阻接地故障时,健全线路零序电流有效

值和相角增加,故障线路零序电流有效值基本不变,相角减小。中性点电压在消弧装置动作前、后也发生了变化,且变化波动幅度较大,由式(8)~(10)和式(14)、(15)可以推知,故障馈线的导纳变化量比非故障馈线的导纳变化量更大。

当系统未发生故障时,馈线 l_1 的固有零序电流 \dot{I}'_{o1} 大小为 0.063 A,相角为 -139.14° ;馈线 l_2 的固有零序电流 \dot{I}'_{o2} 大小为 0.038 A,相角为 113.44° ;馈线 l_3 的固有零序电流 \dot{I}'_{o3} 大小为 0.086 A,相角为 -4.58° ;馈线 l_4 的固有零序电流 \dot{I}'_{o4} 大小为 0.026 A,相角为 151.24° 。馈线识别仿真结果分别见表 2~4。在表 2~4 中, \dot{I}_o 与

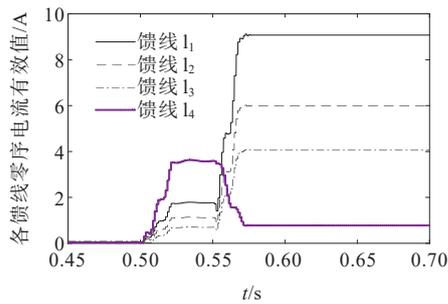


图 6 过渡电阻为 500 Ω 时各馈线零序电流有效值变化

Figure 6 Effective value variation of zero-sequence current of each feeder when transition resistance is 500 Ω

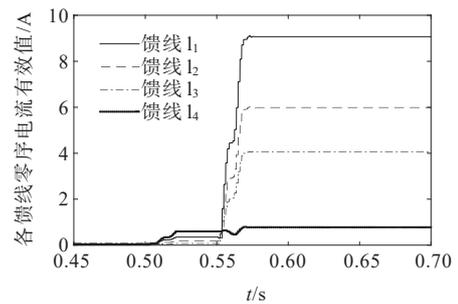


图 9 过渡电阻为 3 000 Ω 时各线路零序电流有效值

Figure 9 Effective value of zero-sequence current of each feeder when transition resistance is 3 000 Ω

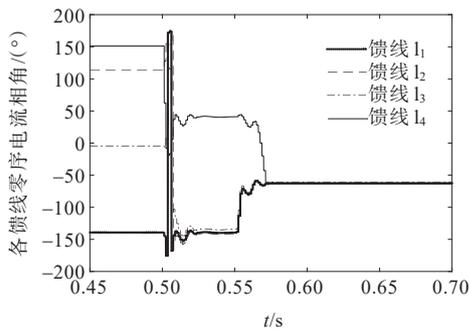


图 7 过渡电阻为 500 Ω 时各线路零序电流相角

Figure 7 Phase angle of zero-sequence current of each feeder when transition resistance is 500 Ω

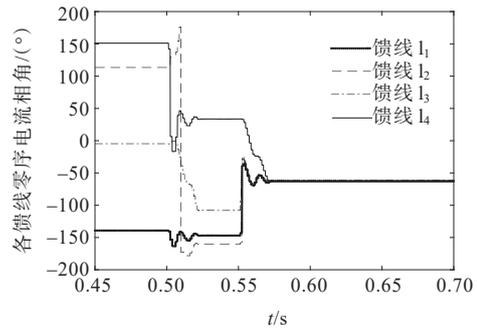


图 10 过渡电阻为 3 000 Ω 时各馈线零序电流相角

Figure 10 Phase angle of zero-sequence current of each feeder when transition resistance is 3 000 Ω

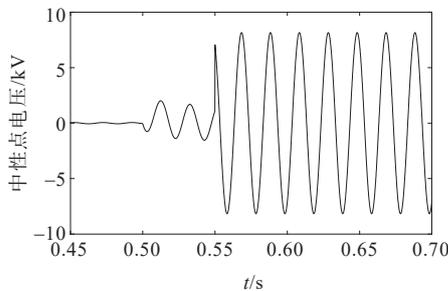


图 8 过渡电阻为 500 Ω 时中性点电压

Figure 8 Neural point voltage when transition resistance is 500 Ω

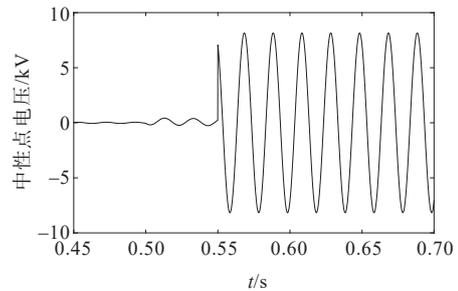


图 11 过渡电阻为 3 000 Ω 时中性点电压

Figure 11 Neural point voltage when transition resistance is 3 000 Ω

i_0'' 分别为消弧装置投入前、后的零序电流。

由表2~4可知,在过渡电阻分别为500、1 000和3 000 Ω 的3种接地故障情况下,馈线 l_4 的故障馈线辨识函数值均最大。因此,在这3种过渡电阻情况下,该算法均能准确判断出馈线 l_4 为故障馈线。

这些理论分析及仿真结果均表明,在配电网三相不平衡的情况下,无论发生的是低阻接地故障还是高阻接地故障,该方法均能准确、有效地判断出故障馈线,消除三相不平衡的影响。

表2 过渡电阻为500 Ω 时基于消弧装置动作前后
导纳变化选线仿真结果

Table 2 Simulation results of line selection based on admittance variation before and after operation of arc suppression device when transition resistance is 500 Ω

馈线	i_0'		i_0''		y_i
	大小/A	相角/(°)	大小/A	相角/(°)	
l_1	1.77	-139.63	9.07	-62.45	5.0
l_2	1.12	-141.64	5.99	-62.17	7.9
l_3	0.70	-134.78	4.06	-61.10	2.2
l_4	3.58	40.68	0.78	-63.65	32.6

表3 过渡电阻为1 k Ω 时基于消弧装置动作前后
导纳变化选线仿真结果

Table 3 Simulation results of line selection based on admittance variation before and after operation of arc suppression device when transition resistance is 1 k Ω

馈线	i_0'		i_0''		y_i
	大小/A	相角/(°)	大小/A	相角/(°)	
l_1	0.93	-144.61	9.07	-62.45	1.2
l_2	0.57	-148.95	5.99	-62.17	0.8
l_3	0.32	-135.24	4.06	-61.10	0.5
l_4	1.83	35.68	0.78	-63.65	32.6

表4 过渡电阻为3 k Ω 时基于消弧装置动作前后
导纳变化选线仿真结果

Table 4 Simulation results of line selection based on admittance variation before and after operation of arc suppression device when transition resistance is 3 k Ω

馈线	i_0'		i_0''		y_i
	大小/A	相角/(°)	大小/A	相角/(°)	
l_1	0.35	-146.85	9.07	-62.45	2.6
l_2	0.19	-160.13	5.99	-62.17	1.8
l_3	0.08	-107.88	4.06	-61.10	1.2
l_4	0.60	33.60	0.78	-63.65	29.2

4.2 接地故障区段定位仿真

设定区段(D,E)发生接地故障,在该算法已识

别出故障馈线的基础上,仿真得到馈线 l_4 各区段故障区段辨识函数,函数值最大的区段即为故障区段,具体仿真结果分别见表5~7。

表5 过渡电阻为500 Ω 时基于消弧装置动作前后
导纳变化区段定位仿真结果

Table 5 Simulation results of section location based on admittance variation before and after operation of arc suppression device when transition resistance is 500 Ω

区段	i_0'		i_0''		y_i
	大小/A	相角/(°)	大小/A	相角/(°)	
(D,E)	3.790	39.31	0.23	-64.22	38.000
(E,F)	0.069	-83.39	0.18	-63.08	0.014
(F,G)	0.110	-85.48	0.28	-63.90	0.700

表6 过渡电阻为1 000 Ω 时基于消弧装置动作
前后导纳变化区段定位仿真结果

Table 6 Simulation results of section location based on admittance variation before and after operation of arc suppression device when transition resistance is 1 000 Ω

区段	i_0'		i_0''		y_i
	大小/A	相角/(°)	大小/A	相角/(°)	
(D,E)	0.190	32.59	0.23	-64.22	4.100
(E,F)	0.062	-75.13	0.18	-63.08	0.018
(F,G)	0.097	-77.58	0.28	-63.90	0.028

表7 过渡电阻为3 000 Ω 时基于消弧装置动作
前后导纳变化区段定位仿真结果

Table 7 Simulation results of section location based on admittance variation before and after operation of arc suppression device when transition resistance is 3 000 Ω

区段	i_0'		i_0''		y_i
	大小/A	相角/(°)	大小/A	相角/(°)	
(D,E)	0.42	24.64	0.23	-64.22	18.0
(E,F)	0.059	-68.02	0.18	-63.08	4.5
(F,G)	0.093	-70.64	0.28	-63.90	0.1

由表5~7可知,在过渡电阻分别为500、1 000和3 000 Ω 的3种接地故障情况下,区段(D,E)的故障区段辨识函数值最大。无论哪种情况下,该方法均能准确判断出区段(D,E)为故障区段,精准、有效地定位不对称配电网高阻接地故障区段。

5 结语

本文针对现有不对称配电网高阻接地故障选线及区段定位难题,提出了基于快速开关型消弧装

置的故障线路辨识及区段定位方法,分析快速开关型消弧装置处理单相接地故障的基本原理,建立不对称配电网高阻接地故障模型,分析消弧装置投入前后各区段零序等值导纳,建立故障馈线及区段辨识函数,以实现故障选线及区段定位。在PSCAD/EMTDC仿真软件中,搭建10 kV配电网单相接地故障模型,验证了所提方法的有效性与可靠性,得出如下结论:

1) 本文分析了快速开关型消弧装置的基本原理,在配电网发生接地故障后,快速将故障相母线金属性接地,使故障点电流降为0 A,并使故障相电压低于电弧重燃电压,以实现故障消弧。该装置响应时间短,应用广泛;

2) 提出了与快速开关型消弧装置结合的不对称配电网选线及区段定位方法,根据消弧装置动作前后的零序等值导纳实现故障选线及区段定位,充分考虑了三相对地导纳不对称的情况,提高了配电网运行的可靠性与安全性;

3) 本方法适用于配置有快速开关型消弧装置的配电网系统,在工程应用上具有较强的实用性,下一步将研究负荷电流对选线及区段定位方法的影响。

参考文献:

- [1] 亓志滨,田君杨,薛永端,等.不接地系统异名相两点接地故障工频电气量及其对选线的影响分析[J].电工技术学报,2023,38(13):3539-3551.
QI Zhibin, TIAN Junyang, XUE Yongduan, et al. Analysis of power frequency electrical quantity and line selection applicability for two-point grounding faults occurring on different phases in isolated neutral system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(13):3539-3551.
- [2] 周兴达,陆帅.一种基于消弧线圈和静止同步补偿器协同作用的配电网消弧结构与方法[J].电工技术学报,2019,34(6):1251-1262.
ZHOU Xingda, LU Shuai. An arc-suppression method based on the coordinated operation of the Petersen coil and the static synchronous compensator in distribution networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6):1251-1262.
- [3] 郭成,陈波,陈慧,等.基于相空间重构的中性点非有效接地系统铁磁谐振故障辨识研究[J].电力系统保护与控制,2024,52(15):131-141.
GUO Cheng, CHEN Bo, CHEN Hui, et al. Identification of ferromagnetic resonance fault in non-effectively grounded neutral system based on phase space reconstruction[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(15):131-141.
- [4] 李冠华,徐凯,栗罡,等.66 kV系统消弧线圈分散式补偿策略研究[J].高压电器,2024,60(12):103-112.
LI Guanhua, XU Kai, LI Gang, et al. Research on distributed compensation strategy of arc suppression coil of 66 kV system[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(12):103-112.
- [5] 藺华,王子龙,郭振华,等.考虑弧长动态变化的配电网电弧接地故障建模及辨识[J].电力系统保护与控制,2022,50(7):31-39.
LIN Hua, WANG Zilong, GUO Zhenhua, et al. Modeling and identification of a distribution network arc grounding fault considering arc length dynamic variation [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7):31-39.
- [6] 刘健,田晓卓,李云阁,等.主动转移型熄弧装置长馈线重载应用问题分析[J].电网技术,2019,43(3):1105-1110.
LIU Jian, TIAN Xiaozhuo, LI Yunge, et al. Application analysis of active transfer type arc-extinguishing device under long feeder line and heavy load[J]. Power System Technology, 2019, 43(3):1105-1110.
- [7] 杨文勇,戴宇,刘丽,等.配电网开关型消弧装置选相失败的特性及对策研究[J].供用电,2019,36(2):78-83.
YANG Wenyong, DAI Yu, LIU Li, et al. Research on characteristics and countermeasures of phase selection failure of switch-type arc suppression device[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(2):78-83.
- [8] 常新建,邵文权,程远,等.基于模型预测控制的配电网单相接地故障有源消弧[J].电力工程技术,2023,42(2):161-169.
CHANG Xinjian, SHAO Wenquan, CHENG Yuan, et al. Active arc suppression of a single-phase grounding fault in distribution network based on model predictive control [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2):161-169.
- [9] 曾先锋,赵希才,张海强,等.配电线路保护控制设备演进探讨[J].供用电,2024,41(8):134-140.
ZENG Xianfeng, ZHAO Xicai, ZHANG Haiqiang, et al. Discussion on evolution of feeder protection and control equipment in distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(8):134-140.
- [10] 廖德辉,金鑫,田君杨,等.灵活接地配电网单相接地故障全过程特征分析[J].智慧电力,2024,52(5):90-97.
LIAO Dehui, JIN Xin, TIAN Junyang, et al. Analysis of the entire process characteristics of single phase-to-ground faults in flexible grounded distribution networks [J]. Smart Power, 2024, 52(5):90-97.
- [11] 周姣.城市配电网快速开关型消弧技术研究[D].武汉:武汉大学,2017.
ZHOU Jiao. Study on fast switching type arc-suppression technology in urban distribution network[D]. Wuhan:

- Wuhan University,2017.
- [12] 王振浩,佟林,李赫,等. 66 kV中压配电网中性点位移电压产生机理及有源抑制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020,48(4):11-21.
WANG Zhenhao, TONG Lin, LI He, et al. 66 kV medium voltage distribution network neutral displacement voltage generating mechanism and active suppression method[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4):11-21.
- [13] 刘战磊,曾祥君,喻锴,等. 基于不平衡过电压动态抑制的谐振接地配电网单相接地故障保护新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021,49(8):41-49.
LIU Zhanlei, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. A new method of single-phase grounding fault protection for a resonant grounding distribution network based on unbalanced overvoltage dynamic suppression[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8):41-49.
- [14] 肖白,赵雪纯,董光德. 电能质量综合评估方法综述与展望[J]. 发电技术, 2024,45(4):716-733.
XIAO Bai, ZHAO Xuechun, DONG Guangde. Summary and prospect of comprehensive evaluation methods of power quality[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(4):716-733.
- [15] 蔡军,周波,黄跃,等. 基于S变换时频特性的谐振接地系统故障选线新方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022,37(3):109-116.
CAI Jun, ZHOU Bo, HUANG Yue, et al. A fault line selection method based on time-frequency characteristics in S-transform for resonant grounded systems[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(3):109-116.
- [16] 赵建文,范文璐,胡雨佳. 基于零序电流包络线拟合斜率的配电网故障选线方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(3):117-125.
ZHAO Jianwen, FAN Wenlu, HU Yujia. A distribution network fault line selection method based on zero-sequence current envelope fitting slope[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(3):117-125.
- [17] 白浩,黄升平,潘姝慧,等. 配电网中性点电压主动调控的接地故障零序电流多判据选线方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022,37(4):105-113.
BAI Hao, HUANG Shengping, PAN Shuhui, et al. Zero sequence current multi-criteria line selection method based on active regulation of neutral voltage in distribution networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4):105-113.
- [18] 薛永端,李娟,陈筱蕾,等. 谐振接地系统高阻接地故障暂态选线与过渡电阻辨识[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17):5037-5048+5223.
XUE Yongduan, LI Juan, CHEN Xiaoru, et al. Faulty feeder selection and transition resistance identification of high impedance fault in a resonant grounding system using transient signals[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17):5037-5048+5223.
- [19] 方毅,薛永端,宋华茂,等. 谐振接地系统高阻接地故障暂态能量分析与选线[J]. 中国电机工程学报, 2018,38(19):5636-5645+5921.
FANG Yi, XUE Yongduan, SONG Huamao, et al. Transient energy analysis and faulty feeder identification method of high impedance fault in the resonant grounding system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19):5636-5645+5921.
- [20] 金翠,刘洋,李琦,等. 基于CatBoost的常用电器负载电弧故障识别方法[J]. 电测与仪表, 2023,60(7):193-200.
JIN Cui, LIU Yang, LI Qi, et al. CatBoost-based arc fault identification method for common electrical load[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(7):193-200.
- [21] 何小龙,高红均,高艺文,等. 基于GA优化BP神经网络的有源配电网高阻接地故障选线方法[J]. 智慧电力, 2023,51(4):54-61.
HE Xiaolong, GAO Hongjun, GAO Yiwen, et al. High resistance grounding fault line selection method for active distribution network based on GA optimized BP neural network[J]. Smart Power, 2023, 51(4):54-61.
- [22] 王建元,张宇辉,刘铖. 基于参数优化VMD和改进K聚类判据融合的配电网故障选线方法[J]. 南方电网技术, 2023,17(7):135-145.
WANG Jianyuan, ZHANG Yuhui, LIU Cheng. Fault line selection method of distribution network based on the fusion of parameter optimized variational modal decomposition and improved K clustering criterion[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(7):135-145.
- [23] 李振兴,王新,王朋飞,等. 综合工频与特征频率零序导纳角差的选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019,47(12):13-21.
LI Zhenxing, WANG Xin, WANG Pengfei, et al. Line selection method based on the zero-sequence admittance angle difference of power frequency and characteristic frequency[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12):13-21.
- [24] 韦莉珊,贾文超,焦彦军. 基于5次谐波与导纳不对称度的配电网单相接地选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020,48(15):77-83.
WEI Lishan, JIA Wenchao, JIAO Yanjun. Single-phase fault line selection scheme of a distribution system based on fifth harmonic and admittance asymmetry[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15):77-83.
- [25] 李浩,解超,周伟绩,等. 采用分相重合方式的风电送出线路自适应重合闸策略[J]. 电力建设, 2023, 44(5):94-107.
LI Hao, XIE Chao, ZHOU Weiji, et al. Adaptive reclosing scheme for wind power outgoing line using partial-phase

- reclosing[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(5): 94-107.
- [26] 艾绍贵,李秀广,黎炜,等. 配电网快速开关型消除弧光接地故障技术研究[J]. *高压电器*, 2017, 53(3): 178-184.
AI Shaogui, LI Xiuguang, LI Wei, et al. Arc suppression technology based on fast switch for distribution network [J]. *High Voltage Apparatus*, 2017, 53(3): 178-184.
- [27] 徐栋杰,刘文泽,李晓华. 开关型消弧装置的故障选相及选线方法[J]. *广东电力*, 2019, 32(1): 125-131.
XU Dongjie, LIU Wenzhe, LI Xiaohua. Fault phase selection and line selection methods for switch-type arc suppression devices[J]. *Guangdong Electric Power*, 2019, 32(1): 125-131.
- [28] NAIDU O D, PRADHAN A K. Precise traveling wave-based transmission line fault location method using single-ended data[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(8): 5197-5207.
- [29] 李振兴,王鹏飞,王新,等. 基于幅值特征和 Hausdorff 距离的配电网故障定位方法[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(7): 169-177.
LI Zhenxing, WANG Pengfei, WANG Xin, et al. Fault location method of distribution network based on amplitude feature and Hausdorff distance[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(7): 169-177.
- [30] 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.
- [31] 刘健,芮骏,张志华,等. 智能接地配电系统[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(8): 130-134.
LIU Jian, RUI Jun, ZHANG Zhihua, et al. Smart grounding power distribution systems[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(8): 130-134.
- [32] 齐郑,庄舒仪,刘自发,等. 基于并联电阻扰动信号的配电网故障定位方法分析[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(9): 195-200.
QI Zheng, ZHUANG Shuyi, LIU Zifa, et al. Analysis on distribution network fault location method based on parallel resistance disturbed signal injection[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(9): 195-200.
- [33] 韩茂岳,尹忠东,付瑜,等. 基于多源数据融合的配电网线损研究[J]. *电网与清洁能源*, 2024, 40(7): 71-80.
HAN Maoyue, YIN Zhongdong, FU Yu, et al. Research on the distribution network line loss based on multi-source data fusion[J]. *Power System and Clean Energy*, 2024, 40(7): 71-80.
- [34] 相朋达. 配电网故障区段定位的研究[D]. 天津:天津理工大学, 2017.
XIANG Pengda. The research of fault section location in distribution grid[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2017.
- [35] 齐郑,刁春燕,李鸿毅,等. 基于快速短接故障相母线熄弧装置的故障区段定位方法[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(23): 157-164.
QI Zheng, DIAO Chunyan, LI Hongyi, et al. Fault section location method based on arc suppression device adopting fast earthing of faulty phase bus[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(23): 157-164.
- [36] 陈柏宇,喻锬,曾祥君,等. 基于柔性接地装置的不对称配电网接地故障选相选线方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(12): 1-10.
CHEN Boyu, YU Kun, ZENG Xiangjun, et al. A method of phase selection and line selection for grounding faults in an asymmetric distribution network based on a flexible-grounding device[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(12): 1-10.