

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211085

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

陈柏宇¹, 喻 锐¹, 曾祥君¹, 李 理¹, 胥鹏博¹, 彭红海²

(1. 智能电网运行与控制湖南省重点实验室(长沙理工大学), 湖南 长沙 410114; 2. 湖南大学, 湖南 长沙 410082)

摘要: 配电网高阻接地故障选相和选线一般较为困难。为解决这两个问题, 提出了一种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。首先详细分析各馈线零序电流在中性点零序电压调控前后的变化情况。利用不同调控状态下故障与健全馈线零序等值导纳的离散程度来辨识故障馈线, 得出故障馈线辨识函数并构造了选线判据。其次, 根据分相调控过程中馈线零序等值导纳与故障前馈线对地导纳差值的相角关系进行故障相判别, 得出故障选相函数并构造了选相判据。理论分析和 PSCAD/EMTDC 仿真实验表明: 配电网三相对地导纳不对称情况对所提方法并无影响, 低、高阻接地故障时均有较高灵敏度, 故障选相与选线结果准确, 且选相和选线方法得到有效结合。

关键词: 不对称配电网; 选相; 选线; 单相接地故障; 零序电流

A method of phase selection and line selection for grounding faults in an asymmetric distribution network based on a flexible-grounding device

CHEN Boyu¹, YU Kun¹, ZENG Xiangjun¹, LI Li¹, XU Pengbo¹, PENG Honghai²

(1. Hunan Province Key Laboratory of Smart Grids Operation and Control (Changsha University of Science and Technology), Changsha 410114, China; 2. Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: It is generally difficult to select high-resistance ground fault phases and fault lines in distribution networks. This paper proposes a new method of phase selection and line selection for high-resistance faults in asymmetric distribution networks based on a flexible-grounding device. First, the change characteristic of the zero-sequence current of each feeder before and after zero-sequence voltage regulation is analyzed in detail. It identifies the fault feeders using the dispersion degree of zero-sequence equivalent admittance of the faulted feeder and the healthy feeder in different regulation and control states. Thus the fault line identification function is obtained and a line selection criterion is constructed. Secondly, the fault phase is identified according to the angular relationship between the zero-sequence equivalent admittance of the feeder during the phase separation adjustment process and the ground admittance value of the feeder before the fault. The fault phase selection function is derived and the phase selection criterion is constructed. Theoretical analysis and PSCAD/EMTDC simulation show that the asymmetry of the three-phase ground admittance of the distribution network has no effect on the method proposed. Both low and high resistance ground faults have higher sensitivity in the method, the fault phase selection and line selection results are accurate, and the phase selection and line selection methods are effectively combined.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51737002 and No. 52037001).

Key words: unsymmetrical distribution network; phase selection; line selection; single-phase ground fault; zero-sequence current

0 引言

配电网深入用户终端, 布线结构与使用环境复

杂导致配电网接地故障频发, 而高阻接地故障的可靠检测以及快速处理是全球配电网建设始终需要面临的一大挑战^[1-4], 目前使用柔性接地装置处置单相接地故障的步骤一般为故障发生时灵敏感知并进行故障选相, 随后柔性消弧装置启动熄灭故障点电弧, 永久性故障需进行选线并隔离, 如果选相选线出现

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51737002, 52037001); 湖南省自然科学基金项目资助(2021JJ30729)

错误可能会导致单相接地故障长期存在无法及时处理,甚至有可能扩大故障范围,造成更严重的影响^[5]。在配电网中,单芯电缆线路三相参数(包括长度)不相等,三相线路不换位等因素,使得配电网三相对地导纳不平衡的情况普遍存在^[6]。传统选相和选线方法忽略了配电网三相对地导纳不平衡的情况^[7],且线路发生高阻接地故障时故障信息不明显可能导致选相和选线出现错误^[8]。

为解决传统选相方法失效的问题,国内外提出了其他的选相方法,如基于变化量的故障相辨识^[9]、利用暂态量的故障相辨识方法^[10]、基于 CNN 深度学习模型选相法^[11]、基于零序电压轨迹^[12]的故障相辨识方法,基于变化量的故障相辨识在高阻接地故障时变化量不明显,灵敏度较低,利用暂态量的故障相辨识方法对暂态信号提取要求较高,需要采样频率较高的现场设备,且线路扰动对该方法的影响较大。基于 CNN 构建深度学习模型选相其信号获取相对简单,灵敏度与准确度较高,但该方法依赖于历史训练库,物理解释性差,配电网参数一旦改变可能导致原有模型失效^[13]。基于零序电压轨迹的故障相辨识方法其物理解释性较好,对配电网参数变化适应性强,但该方法计算较为复杂,程序较繁琐,在实际中可能难以直接应用。综上所述,现有选相方法在高阻接地故障、系统对地导纳不对称度超过一定数值系统中或多或少存在某种缺陷,无法准确识别接地相。

近年来,多种选线方法已被学者提出,如基于 5 次谐波选线法^[14]、注入异频信号法^[15]、行波法^[16]和零序导纳法^[17]等,但也存在相关的缺陷,如基于 5 次谐波选线法信号受负荷影响较大,实际应用效果并不理想。注入异频信号法可能受到较高的接地过渡电阻和系统对地电容的影响,特征信号衰减明显,难以准确可靠选线。行波法在输电网可以有效进行故障定位,但配电网结构复杂,行波信号同样面临衰减甚至消失导致其可能无法选线。零序导纳法应用较为简单,但其未考虑配电网三相对地导纳不对称情况,且受高阻接地信号微弱的影响较大,在实际应用中灵敏度有待提升。有学者提出了改进的零序导纳法^[18],优化了零序导纳算法并定义了相角差系数,在低阻接地故障时表现较好,但发生高阻接地故障时相角测量误差较大,易出现误判。为解决上述方法特征信号微弱或衰减等问题,有学者提出了扰动法^[19]和残流增量法^[20],这类方法的实质是改变零序回路阻抗进而影响故障电流,通过电流变化量实现选线^[21],这类方法故障特征比较明显,但高阻故障下改变中性点阻抗对零序回路总阻抗影响甚

微,变化量难以检测^[22]。有学者基于残流增量法提出了基于柔性接地装置的选线方法灵活放大故障零序电流^[23],在配电网对地导纳对称时效果较好^[24],但未考虑配电网对地导纳不对称对零序回路的影响^[25]。

针对以上各种技术在处理配电网对地导纳不对称和高阻接地故障时存在的局限性,本文借鉴传统零序导纳法进行故障馈线辨识的思路,在分相调控过程中,监测馈线零序电流的数值变化,综合中性点零序电压计算馈线零序等值导纳,通过馈线零序等值导纳离散程度来识别故障馈线,计算过程中消除馈线固有零序电流以尽可能消除配电网三相对地导纳不对称造成的影响。其次结合配电网对地导纳等数据,通过零序等值导纳与故障前馈线对地导纳差值的相角关系完成配电网故障相的选取。该方法将选相选线有效地结合在一起,大幅提升故障检测效率,实现单相接地故障的动态感知。最后通过仿真验证了论文提出方法的准确性及有效性。

1 不对称配电网故障馈线辨识原理

1.1 传统零序导纳法局限性分析

含有 n 回出线的配电网接地故障拓扑如图 1 所示,中性点接入柔性接地装置, \dot{E}_A 、 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 为三相电源电压, $Y_{X_i} = 1/R_{X_i} + j\omega C_{X_i}$ ($X = A, B, C$) 为馈线 i 上 X 相的对地导纳, $1/R_{X_i}$ 和 C_{X_i} 分别为馈线 i 上 X 相的对地电导与对地电容, 馈线 i 的对地总导纳为 $Y_{\Sigma i} = Y_{A_i} + Y_{B_i} + Y_{C_i}$, Y_0 为中性点接地导纳, 中性点经消弧线圈接地时 $\dot{Y}_0 = 1/(j\omega L)$, L 为消弧线圈电感值。 \dot{I}_{0i} 为馈线 i 的零序电流。 \dot{U}_{0i} 为馈线中性点零序电压, $i, k \in [1, 2, \dots, n], i \neq k$ 。假设馈线 k 的 C 相发生单相接地故障, R_f 为故障点过渡电阻。

任意健全馈线 i 的零序测量导纳由该馈线的对地电导与对地电容构成, 其表达式为

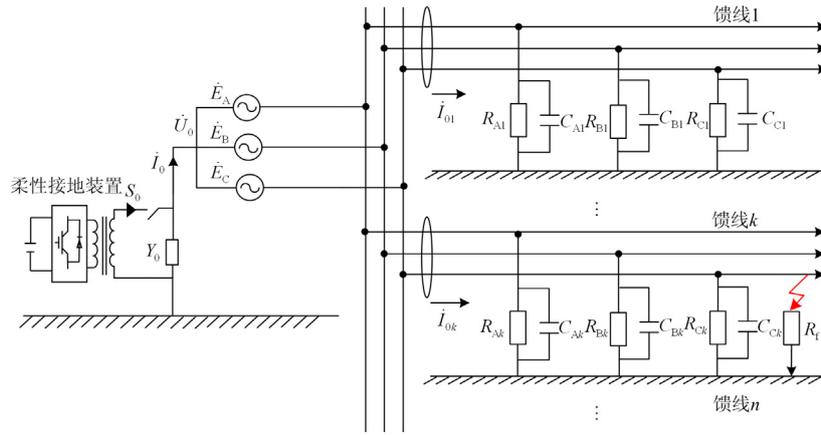
$$Y_{0i} = \dot{I}_{0i} / \dot{U}_{0i} = Y_{A_i} + Y_{B_i} + Y_{C_i} \quad (1)$$

馈线对地电导和对地电容均为正数, 故健全馈线导纳恒位于导纳平面的第一象限。

故障馈线 k 的零序测量导纳为

$$Y_{0k} = \dot{I}_{0k} / \dot{U}_{0k} = -Y_0 - \sum_{i=1, i \neq k}^n (Y_{A_i} + Y_{B_i} + Y_{C_i}) = - \left(\sum_{i=1, i \neq k}^n 1/R_{A_i} + \sum_{i=1, i \neq k}^n \frac{1}{R_{B_i}} + \sum_{i=1, i \neq k}^n 1/R_{C_i} \right) - j \left(\sum_{i=1, i \neq k}^n \omega(C_{A_i} + C_{B_i} + C_{C_i}) + \frac{1}{\omega L} \right) \quad (2)$$

即故障馈线零序测量导纳为消弧线圈零序导纳与健全馈线零序导纳之和的负数, 无论系统采用完

图 1 含有 n 回出线的配电网接地故障拓扑图Fig. 1 Topological diagram of ground fault of distribution network with n -feeders

全补偿、过补偿或欠补偿的运行方式, 由于故障馈线零序测量导纳实数部分均小于 0, 即零序导纳顶点始终位于导纳平面的第二、第三象限, 可以将故障馈线和非故障馈线的零序测量导纳进行区分^[17]。

但由于现场运行中消弧线圈一般设定为过补偿状态^[1], 使得零序测量导纳虚部大于零。又因为电导和电纳存在一定数量级上的差距, 使得零序测量导纳往往位于正虚轴附近, 其相角将接近 90° 。而健全线路由于同样原因, 其零序测量导纳也位于正虚轴附近, 具体情况如图 2 所示, 可以看到在理想情况下故障馈线与非故障馈线区别较小, 判据裕度过低, 容易发生误判, 考虑实际测量过程中, 配电网三相对地导纳不对称的情况对馈线零序电压影响具有不确定性等因素使得故障馈线和健全馈线的区分变得更加困难, 判据难以设定, 可靠性较低^[26]。

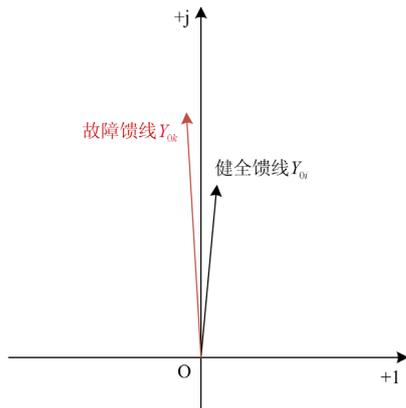


图 2 馈线零序测量导纳平面图

Fig. 2 Zero-sequence measurement admittance plan for feeder

1.2 基于柔性接地装置的不对称配电网故障馈线辨识原理

为避免故障接地过渡电阻较高以及配电网三相

对地导纳不对称的情况下导致的故障动作区与非故障动作区裕度过低, 本文提出了一种与柔性接地装置配合的不对称配电网故障馈线辨识方法, 主动改变零序回路激励, 放大零序电压与电流使其相对易于测量, 减少导纳计算误差。计算过程中减去馈线固有零序电流以消除配电网三相对地导纳不对称造成的影响, 并利用不同调控状态下馈线零序等值导纳离散程度来辨识故障馈线和健全馈线以提高判据裕度, 故障馈线辨识原理具体分析如下。

现场运行过程中, 由于配电网线路的各相对地导纳并不是完全相等, 存在一定的不对称度, 所以配电网存在固有零序电压以及一定的固有零序电流。经过理论推导与整理, 可得配电网系统正常运行状态下任一馈线 i 的固有零序电流^[27]的计算公式为

$$\dot{I}_{0i} = (\dot{E}_A Y_{Ai} + \dot{E}_B Y_{Bi} + \dot{E}_C Y_{Ci}) = \dot{E}_C \dot{k}_{0i} \quad (3)$$

式中, $\dot{k}_{0i} = a^2 Y_{Ai} + a Y_{Bi} + Y_{Ci}$ 为馈线 i 固有对地导纳不对称矢量和, a 为单位向量算子, $a = 1 \angle 120^\circ$ 。

配电网发生单相接地故障后, 将柔性接地装置等效为可控电压源^[20], 此时闭合开关 S_0 , 通过控制可控电压源调控中性点零序电压, 首先令 $\dot{U}'_N = \lambda \dot{E}_A$ 使得: $\dot{U}'_{0(A)} = \lambda \dot{E}_A$ 。其中: \dot{U}'_N 为柔性接地装置输出电压, $\dot{U}'_{0(A)}$ 为柔性接地装置输出电压相位与电源相电势 \dot{E}_A 同相位时的中性点零序电压, λ 为调控系数。该状态维持一段时间后, 令 $\dot{U}'_N = \lambda \dot{E}_B$ 使得: $\dot{U}'_{0(B)} = \lambda \dot{E}_B$, 该状态维持一段时间后, 令 $\dot{U}'_N = \lambda \dot{E}_C$ 使得: $\dot{U}'_{0(C)} = \lambda \dot{E}_C$, 调控过程中全程测量各馈线零序电流和中性点零序电压。

具体来说, 以柔性接地装置输出电压相位与电源相电势 \dot{E}_A 同相位为例, 由基尔霍夫定律求得此

时故障馈线 k 的零序电流的表达式为

$$\begin{aligned} \dot{I}'_{0k(A)} = & (\dot{U}'_{0(A)} + \dot{E}_A)Y_{Ak} + (\dot{U}'_{0(A)} + \dot{E}_B)Y_{Bk} + \\ & (\dot{U}'_{0(A)} + \dot{E}_C)(Y_{Ck} + \frac{1}{R_f}) \end{aligned} \quad (4)$$

馈线 k 的零序等值导纳计算公式为

$$\frac{\dot{I}'_{0k(A)} - \dot{I}_{0k}}{\dot{U}'_{0(A)}} = Y_{\Sigma k} + \frac{1}{R_f} + \frac{\dot{E}_C}{R_f \dot{U}'_{0(A)}} \quad (5)$$

从式(5)可以看到, 系统零序等值导纳值与中性点零序电压以及接地故障过渡电阻大小之间具有内在联系, 故障馈线 k 的零序等值导纳会随着中性点零序电压变化。其余非故障馈线没有故障支路, 过渡电阻不存在, 即在式(4)中令 R_f 趋于无穷大, 此时非故障馈线 i 的零序电流为

$$\begin{aligned} \dot{I}'_{0i(A)} = & (\dot{U}'_{0(A)} + \dot{E}_A)Y_{Ai} + (\dot{U}'_{0(A)} + \dot{E}_B)Y_{Bi} + (\dot{U}'_{0(A)} + \dot{E}_C)Y_{Ci} \\ i \in & [1, 2, \dots, k-1, k+1, \dots, n] \end{aligned} \quad (6)$$

馈线零序等值导纳为

$$\frac{\dot{I}'_{0i(A)} - \dot{I}_{0i}}{\dot{U}'_{0(A)}} = Y_{\Sigma i} \quad (7)$$

即非故障馈线的零序等值导纳恒定为该馈线三相对地导纳之和。同理, 当柔性接地装置输出电压相位分别与电源相电势 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 同相位时, 上述结论仍然成立。故可通过主动调控配电网系统的中性点电压, 有效测量配电网系统相关参数值(零序电流、零序电压、馈线零序等值导纳等)的变化特征进行故障馈线辨识。

针对图 1 所示的 10 kV 配电网, 取其中一条馈线, 采用表 1 所示参数, 灵活改变中性点零序电压时, 馈线零序电流幅值变化情况如图 3 所示。

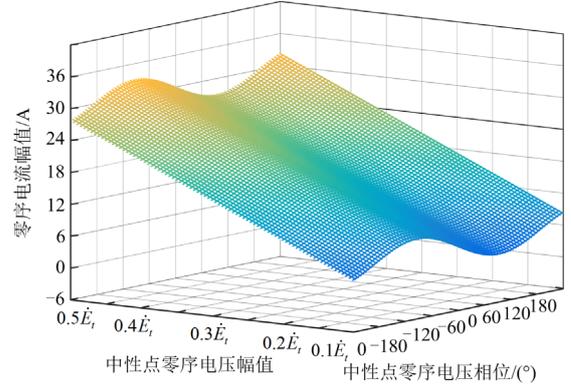
表 1 仿真场景 1 线路参数

Table 1 Line parameters of simulation scenario 1

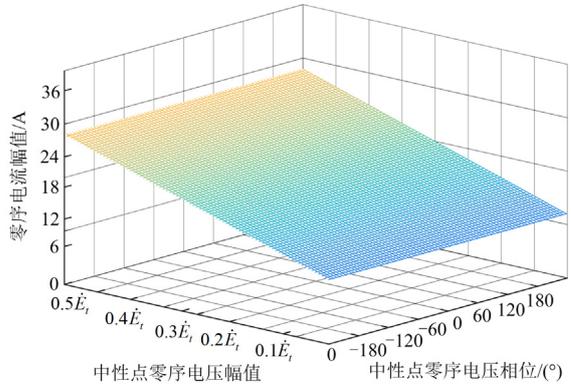
参数	取值
配电网对地等效电容	20 μ F
脱谐度	-10%
线路阻尼率	3%
配电网不对称度	2%
馈线对地电容	6.67 μ F
接地过渡电阻	3 000 Ω

由图 3 可知, 调压过程中, 故障馈线零序电流幅值将同时受中性点零序电压幅值和中性点零序电压相位的影响, 由此推算得到: 零序等值导纳会受到中性点零序电压的影响而发生变化。非故障状态馈线的零序电流幅值不受中性点零序电压相位影响, 零序电流仅随零序电压幅值呈线型关系变化, 由

此推算得到: 非故障馈线零序等值导纳不受中性点零序电压变化影响并保持恒定, 验证了上述理论推导。



(a) 馈线处于故障状态



(b) 馈线处于非故障状态

图 3 零序电流幅值与中性点零序电压幅值、相位关系
Fig. 3 Relationship between the amplitude of the feeder zero sequence current and the neutral point zero sequence voltage amplitude and phase

为有效量化零序等值导纳在调控过程中的变化情况, 取不同调控状态下馈线零序等值导纳, 调控结束后以馈线在各调控状态下零序等值导纳的幅值为样本计算方差, 其中方差值较高的馈线即为故障馈线。

为便于计算与说明, 建立故障馈线辨识函数 $z_i(\dot{I}'_{0i(A)}, \dot{I}'_{0i(B)}, \dot{I}'_{0i(C)})$ 。分相调控中性点零序电压过程中实时测量各馈线零序电流 $\dot{I}'_{0i(t)}$ 和中性点零序电压 $\dot{U}'_{0(t)}$, 同时结合正常运行状态下各馈线的固有零序电流 \dot{I}_{0i} 得到: $y_{i(t)}(\dot{I}'_{0i(t)}) = |(\dot{I}'_{0i(t)} - \dot{I}_{0i}) / \dot{U}'_{0(t)}| \times 10^4$, 其中, 在分相调控过程中, 柔性接地装置输出电压相角与电源相电势 \dot{E}_i 相同, t 代表三相电源电动势的其中一相并作为分相调控状态的标记, 取值为 A、B、C。

$$\text{令 } \bar{y}_i = \frac{y_{i(A)}(\dot{I}'_{0i(A)}) + y_{i(B)}(\dot{I}'_{0i(B)}) + y_{i(C)}(\dot{I}'_{0i(C)})}{3}$$

计算:

$$z_i(I'_{0i(A)}, I'_{0i(B)}, I'_{0i(C)}) = \frac{1}{3} \{ [y_{i(A)}(I'_{0i(A)} - \bar{y}_i)]^2 + [y_{i(B)}(I'_{0i(B)} - \bar{y}_i)]^2 + [y_{i(C)}(I'_{0i(C)} - \bar{y}_i)]^2 \} \quad (8)$$

考虑实际测量过程中, 互感器的漏阻、漏抗及励磁阻抗等因素使得零序电压和零序电流测量均可能存在一定误差, 故采用如下判据选取故障馈线:

测量相关数据, 分别计算每条馈线的故障馈线辨识函数 $z_i(I'_{0i(A)}, I'_{0i(B)}, I'_{0i(C)})$ 并进行比较, 其中函数值最大者所对应馈线即为故障馈线。

2 基于柔性接地装置的接地故障选相原理

在图 1 所示配电网系统中, 仍假设馈线 k 的 C 相发生接地故障, 根据测量的配电网系统相关参数值, 利用各馈线等值导纳变化关系, 结合配电网系统对地导纳, 利用柔性接地装置分相调控中性点零序电压时零序等值导纳与故障前馈线对地导纳差值 $\Delta Y'_i$ 的相角关系, 可进一步完成故障馈线的选相工作。故障选相的原理具体分析如下:

当调控中性点零序电压使得: $\dot{U}'_{0(t)} = \lambda \dot{E}_t$, ($t = A, B, C$), 馈线 k 对应的配电网等值导纳分别为

$$\frac{\dot{I}'_{0k(A)}}{\lambda \dot{E}_A} = \frac{\dot{E}_C(a^2 Y_{Ak} + a Y_{Bk} + Y_{Ck} + \frac{1}{R_f})}{\lambda \dot{E}_A} + Y_{\Sigma k} + \frac{1}{R_f} \quad (9)$$

$$\frac{\dot{I}'_{0k(B)}}{\lambda \dot{E}_B} = \frac{\dot{E}_C(a^2 Y_{Ak} + a Y_{Bk} + Y_{Ck} + \frac{1}{R_f})}{\lambda \dot{E}_B} + Y_{\Sigma k} + \frac{1}{R_f} \quad (10)$$

$$\frac{\dot{I}'_{0k(C)}}{\lambda \dot{E}_C} = \frac{\dot{E}_C(a^2 Y_{Ak} + a Y_{Bk} + Y_{Ck} + \frac{1}{R_f})}{\lambda \dot{E}_C} + Y_{\Sigma k} + \frac{1}{R_f} \quad (11)$$

令:

$$\Delta Y'_i = \frac{\dot{I}'_{0k(t)} - \dot{I}_{0k}}{\dot{U}'_{0(t)}} - Y_{\Sigma k} = \frac{\dot{E}_C}{U'_{0(t)} R_f} + \frac{1}{R_f} \quad (12)$$

当中性点零序电压被调控为故障相电源电动势的 λ 倍时, 有

$$\Delta Y'_C = \frac{\dot{E}_C}{\lambda \dot{E}_C R_f} + \frac{1}{R_f} = \frac{\lambda + 1}{\lambda R_f} \quad (13)$$

同理, 当中性点电压被调控为非故障相电源电动势的 λ 倍时, 有

$$\begin{cases} \Delta Y'_A = \frac{1}{\lambda a^2 R_f} + \frac{1}{R_f} \\ \Delta Y'_B = \frac{1}{\lambda a R_f} + \frac{1}{R_f} \end{cases} \quad (14)$$

式中, $1/R_f$ 和 λ 均为正实数, 接下来对 $\Delta Y'_i$ 的相角进行有效分析。

以 C 相为参考相, 当中性点零序电压与故障相电源电动势相位一致时, 由于 $\Delta Y'_C$ 虚部为 0, 显然其相角 $\theta_{\Delta Y'_C} = 0^\circ$ 。

当中性点零序电压与故障相电源电动势相位不一致时, 对 $\Delta Y'_A$ 和 $\Delta Y'_B$ 的实部虚部进行有效分析, 此时有:

$$\begin{cases} \text{Im}(\Delta Y'_A) = (\frac{1}{\lambda R_f} \sin(-120^\circ)) \\ \text{Re}(\Delta Y'_A) = (\frac{1}{R_f} + \frac{1}{\lambda R_f} \cos(-120^\circ)) \\ \text{Im}(\Delta Y'_B) = (\frac{1}{\lambda R_f} \sin 120^\circ) \\ \text{Re}(\Delta Y'_B) = (\frac{1}{R_f} + \frac{1}{\lambda R_f} \cos 120^\circ) \end{cases} \quad (15)$$

对 $\Delta Y'_A$ 和 $\Delta Y'_B$ 求相角得

$$\begin{cases} \theta_{\Delta Y'_A} = \arctan(\frac{\sqrt{3}}{1-2\lambda}) - \pi \\ \theta_{\Delta Y'_B} = \arctan(\frac{\sqrt{3}}{2\lambda-1}) + \pi \end{cases} \quad (16)$$

对 $\sqrt{3}/(1-2\lambda)$ 分析可知, 当 $0 < \lambda \leq 1/2$ 时, 在该区间内函数单调递增, 由反正切函数性质可得 $\theta_{\Delta Y'_A} \in (-120^\circ, -90^\circ)$; 而对 $\sqrt{3}/(2\lambda-1)$ 进行分析可知, 当 $0 < \lambda \leq 1/2$ 时, 函数单调递减, 由反正切函数性质可得 $\theta_{\Delta Y'_B} \in (90^\circ, 120^\circ)$, 而 $\theta_{\Delta Y'_C}$ 恒等于 0。综上所述, 当 $0 < \lambda \leq 1/2$ 时, 可以看到在不同调控过程中故障相和非故障相的 $\Delta Y'_i$ 相角有较大差异, 故可根据分相调控过程中馈线零序等值导纳与故障前馈线对地导纳差值 $\Delta Y'_i$ 之间相角关系进行故障相判别。

故建立选相判别函数 $f_i(\Delta Y'_i)$: 分相调控中性点零序电压过程中测量各调控状态下的馈线零序电流 \dot{I}'_0 和中性点零序电压 $\dot{U}'_{0(t)}$, 同时结合配电网对地绝缘参数值与馈线固有零序电流, 计算分相调控过程中馈线零序等值导纳与故障前馈线对地导纳差值 $\Delta Y'_i$ 的相角绝对值为

$$\Delta Y'_i = \frac{\dot{I}'_{0k(t)} - \dot{I}_{0k}}{\dot{U}'_{0(t)}} - Y_{\Sigma k} \quad (17)$$

$$f_i(\Delta Y'_i) = |\theta_{\Delta Y'_i}| \quad (18)$$

若调控中性点零序电压与故障相电源电动势同

相位时, 选相判别函数值为 0; 若调控中性点零序电压与非故障相电源电动势同相位时, 选相判别函数取值范围为 $f_i(\Delta Y'_i) \in (90^\circ, 120^\circ)$ 。

考虑互感器的漏阻、漏抗及励磁阻抗等因素使得零序电压和零序电流测量均可能存在一定误差, 进而导致相角求解过程中出现一定误差, 一定程度上偏离理论推导的计算值, 故采用如下判据选取故障相: 测量相关数据, 分别计算分相调控过程中选相判别函数 $f_A(\Delta Y'_A)$ 、 $f_B(\Delta Y'_B)$ 和 $f_C(\Delta Y'_C)$, 其中故障相判别函数值最小者所对应相为故障相。

3 不对称配电网选相选线实现方案

不对称配电网选相选线实现流程图如图 4 所示, 配电网正常运行时, 实时监测配电网中性点零序电压, 一般认为中性点零序电压变化量大于 3% 系统额定相电压时判定系统发生接地故障。

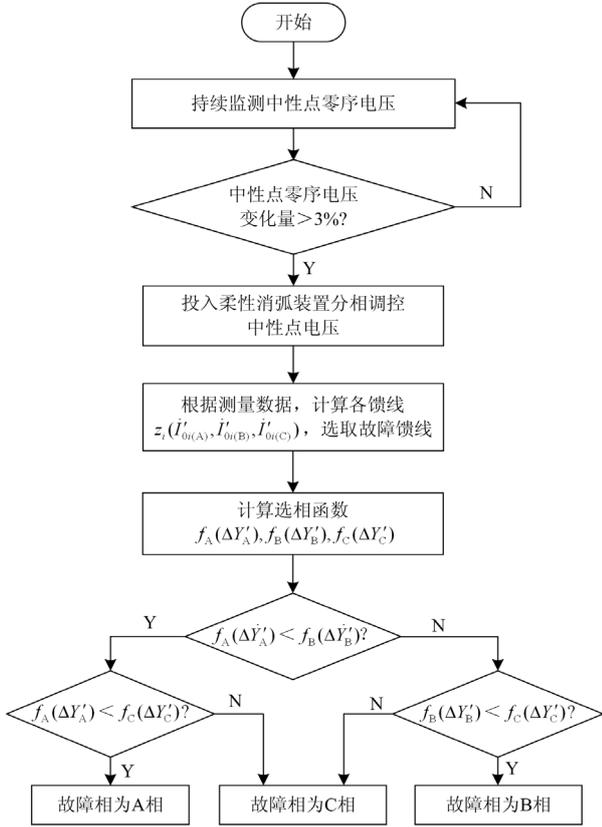


图 4 不对称配电网选相选线实现流程图

Fig. 4 Flow chart of phase selection and line selection for asymmetric distribution network

判定系统发生故障后, 启动配电网故障选相选线方案如下: 闭合开关 S_0 , 通过控制柔性接地装置分相调控中性点零序电压, 使配电网系统中性点零序电压值依次分别为 $\dot{U}'_{0(t)} = \lambda \dot{E}_i (0 < \lambda \leq 1/2, t =$

$A, B, C)$, 各调控状态分别持续几个周波的时间, 分别测量各调控状态下各馈线零序电流 $\dot{I}'_{0i(t)}$ 和中性点零序电压 $\dot{U}'_{0i(t)}$, 同时结合正常运行状态下配电网中各馈线的固有零序电流 \dot{I}_{0i} , 得到各馈线的零序等值导纳, 并分别计算各馈线的故障馈线辨识函数的数值 $z_i(\dot{I}'_{0i(A)}, \dot{I}'_{0i(B)}, \dot{I}'_{0i(C)})$, 其中函数值最大者所对应的馈线即为故障馈线; 随后利用上一步测量得到的故障馈线零序等值导纳, 结合配电网对地绝缘参数值代入公式分别计算 $f_A(\Delta Y'_A)$ 、 $f_B(\Delta Y'_B)$ 和 $f_C(\Delta Y'_C)$, 其中函数值最小者所对应相为故障相。

4 仿真分析

为了验证论文所提的选相与选线方法的可行性, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建了如图 1 所示的 10 kV 配电网单相接地故障模型, 共设定 3 条出线, 中性点经消弧线圈接地, 采用过补偿运行方式, 脱谐度设置为 -5%, 消弧线圈电感为 0.162 H, 三条馈线对地导纳设定如表 2 所示, 馈线 1 对地导纳对称, 其余馈线则全部设置为三相不对称状态, 配电网系统正常工作时测量三条馈线的固有零序电流为 $\dot{I}_{01} = 0.04 \angle 178.98^\circ \text{ A}$ 、 $\dot{I}_{02} = 0.25 \angle 193.77^\circ \text{ A}$ 、 $\dot{I}_{03} = 0.10 \angle 149.33^\circ \text{ A}$, λ 取 $\sqrt{3}/10.5$, 以下均设定馈线 3 的 C 相在 0.5 s 发生故障。

表 2 仿真场景 2 线路参数

项目		馈线 1	馈线 2	馈线 3
对地	A 相	3	3.16	0.41
	B 相	3	3.13	0.38
	C 相	3	3.26	0.43
电容/ μF	A 相	21 989	40 130	18 460
	B 相	21 989	41 260	19 844
	C 相	21 989	41 280	17 628
电阻/ Ω	A 相	0	1.23	2.83
	B 相	0	1.23	2.83
	C 相	0	1.23	2.83
不平衡度/%		0	1.23	2.83

4.1 接地故障选线仿真

当配电网发生单相接地故障时, 0.7 s 后柔性消弧装置开始进行动作, 改变馈线中性点零序电压, 即分别使中性点 $\dot{U}'_{0(A)} = 1 \angle 0^\circ \text{ kV}$ 、 $\dot{U}'_{0(B)} = 1 \angle 240^\circ \text{ kV}$ 和 $\dot{U}'_{0(C)} = 1 \angle 120^\circ \text{ kV}$, 依次维持 0.1 s, 记录各馈线零序电流的幅值和相角, 依照此流程模拟多组不同故障过渡电阻的仿真实验, 仿真记录各馈线零序电流幅值和相角数据如表 3 所示。过渡电阻为 0.13 k Ω 和 10 k Ω 故障的零序电流幅值和相角分别如图 5—图 8 所示。

表 3 分相调控故障选线仿真结果

Table 3 Simulation results of line selection based on phase-separated regulation and control

接地过渡电阻 $R_f = 0.13 \text{ k}\Omega$				
馈线	$\dot{I}'_{0(A)} / \text{A}$	$\dot{I}'_{0(B)} / \text{A}$	$\dot{I}'_{0(C)} / \text{A}$	z_i
L1	$3.14 \angle 63.34^\circ$	$3.14 \angle -56.66^\circ$	$3.14 \angle 183.34^\circ$	0.069
L2	$2.93 \angle 91.57^\circ$	$2.87 \angle -35.46^\circ$	$3.21 \angle 206.99^\circ$	0.062
L3	$38.54 \angle 109.43^\circ$	$37.84 \angle 128.50^\circ$	$48.62 \angle 122.63^\circ$	2.673
接地过渡电阻 $R_f = 1 \text{ k}\Omega$				
L1	$3.14 \angle 63.34^\circ$	$3.14 \angle -56.66^\circ$	$3.14 \angle 183.34^\circ$	0.069
L2	$2.94 \angle 91.57^\circ$	$2.87 \angle -35.46^\circ$	$3.21 \angle 206.99^\circ$	0.062
L3	$5.66 \angle 107.44^\circ$	$4.96 \angle 128.98^\circ$	$6.95 \angle 122.63^\circ$	67.81
接地过渡电阻 $R_f = 5 \text{ k}\Omega$				
L1	$3.14 \angle 63.34^\circ$	$3.14 \angle -56.66^\circ$	$3.14 \angle 183.34^\circ$	0.069
L2	$2.94 \angle 91.57^\circ$	$2.87 \angle -35.46^\circ$	$3.21 \angle 206.99^\circ$	0.062
L3	$1.45 \angle 100.64^\circ$	$0.73 \angle 132.16^\circ$	$1.64 \angle 134.20^\circ$	15.68
接地过渡电阻 $R_f = 10 \text{ k}\Omega$				
L1	$3.14 \angle 63.34^\circ$	$3.14 \angle -56.66^\circ$	$3.14 \angle 183.34^\circ$	0.069
L2	$2.94 \angle 91.57^\circ$	$2.87 \angle -35.46^\circ$	$3.21 \angle 206.99^\circ$	0.062
L3	$0.93 \angle 95.42^\circ$	$0.20 \angle 142.02^\circ$	$1.01 \angle 144.27^\circ$	13.92

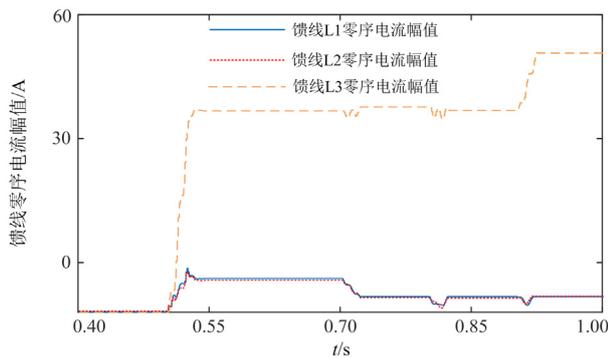


图 5 0.13 kΩ 低阻接地故障各馈线零序电流幅值变化图
Fig. 5 Change of zero sequence current amplitude of each feeder in 0.13 kΩ low resistance ground fault

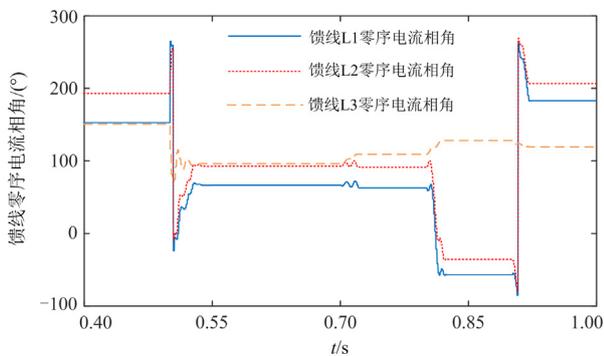


图 6 0.13 kΩ 低阻接地故障各馈线零序电流相角变化图
Fig. 6 Change of zero sequence current phase angle of each feeder in 0.13 kΩ low resistance ground fault

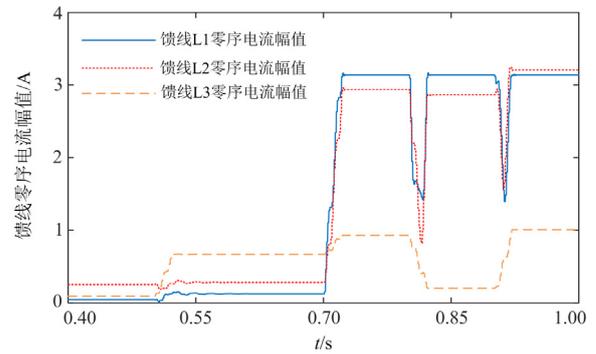


图 7 10 kΩ 高阻接地故障各馈线零序电流幅值变化图
Fig. 7 Change of zero sequence current amplitude of each feeder in 10 kΩ high resistance ground fault

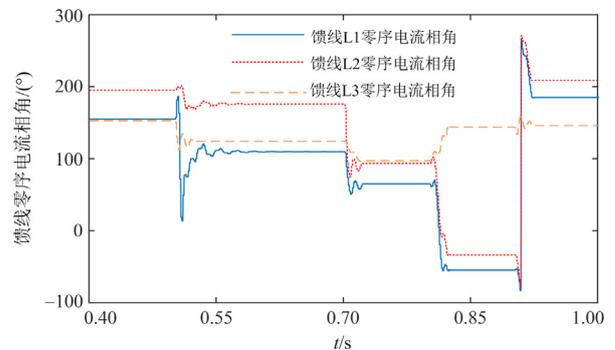


图 8 10 kΩ 高阻接地故障各馈线零序电流相角变化图
Fig. 8 Change of zero sequence current phase angle of each feeder in 10 kΩ high resistance ground fault

通过图 5—图 8 可以看到, 在 0.7~1 s 期间, 柔性接地装置在接入配电网系统调控中性点电压, 无论馈线发生低阻接地故障还是高阻接地故障, 零序电流幅值会随着柔性接地装置输出相位的改变而发生较大的变化, 非故障馈线零序电流幅值则相对保持恒定, 由式(5)和式(7)可以推算故障馈线零序等值导纳将随着中性点电压的变化有较大的波动, 而非故障馈线零序等值导纳则保持恒定, 验证了第 1.2 节所提故障馈线辨识原理; 故障馈线零序电流相角则保持在 $92^\circ \sim 112^\circ$ 之间, 非故障馈线零序电流相角则随着柔性接地装置输出相位的改变而发生较大波动, 该数据将进一步用于后续故障选相。

由表 3 可知, 配电网分别发生 0.13 kΩ、1 kΩ、5 kΩ、10 kΩ 单相接地故障时, 对比三条馈线的故障馈线辨识函数 z_i , 其中函数值最大的对应故障馈线, 四种情况均能准确判定馈线 L3 为故障馈线。可以看到该方法可有效消除配电网各相对地绝缘参数不对称对接地故障选线所产生的不良影响, 接地过渡电阻较高的情况下也能灵敏地辨识故障馈线。

由本文 1.1 节分析可知传统选线方法在不对称配电网高阻接地故障情况下受影响较大, 在如图 1 所示的配电网模型基础上, 断开开关 S_0 退出柔性接地装置, 其余参数不变, 分别设置馈线 3 的 C 相发生 $5\text{ k}\Omega$ 和 $10\text{ k}\Omega$ 的高阻接地故障, 仿真结果如表 4 所示, 其中 \dot{U}'_0 、 \dot{I}'_0 分别为馈线中性点电压和电流。

表 4 其他选线法在高阻接地故障时的仿真结果

Table 4 Simulation results of other line selection method under high-resistance ground fault

馈线	\dot{I}'_0 / A	\dot{U}'_0 / V	零序导纳 相角	相角差 系数 ^[16]
接地过渡电阻 $R_f = 5\text{ k}\Omega$				
L1	$0.30\angle 96.82^\circ$		63.34°	53.1°
L2	$0.40\angle 152.1^\circ$	$95.67\angle 33.48^\circ$	118.62°	-21.9°
L3	$1.27\angle 119.66^\circ$		86.18°	-31.2°
接地过渡电阻 $R_f = 10\text{ k}\Omega$				
L1	$0.17\angle 105.9^\circ$		63.34°	49.18°
L2	$0.31\angle 168.12^\circ$	$54.50\angle 42.56^\circ$	125.56°	-22.32°
L3	$0.68\angle 122.10^\circ$		79.54°	-26.87°

传统选线法判据认为故障馈线零序导纳在第二或第三象限, 从仿真结果表明当接地过渡电阻高于 $5\text{ k}\Omega$ 时, 故障馈线 L3 零序导纳顶点位于第一象限, 非故障馈线 L2 零序导纳顶点位于第二象限, 故障馈线将误判为 L2, 与实际情况不符。改进的零序导纳法提出的相角差系数在接地过渡电阻高于 $5\text{ k}\Omega$ 时, 非故障馈线 L2 和故障馈线 L3 相角差系数均为负数, 无法判别故障馈线。而本文所提的与柔性接地装置配合的故障馈线辨识方法可以在可控范围内有效放大故障残流, 在接地过渡电阻高于 $5\text{ k}\Omega$ 时依然准确识别故障馈线, 具有良好的稳定性。

图 9 为 $10\text{ k}\Omega$ 单相接地故障时故障点电流波形图, 可以看到分相调控过程中仅 $0.9\sim 1\text{ s}$ 时间内故障点电流升高约 0.1 A , 调控结束后即可恢复, 故分相

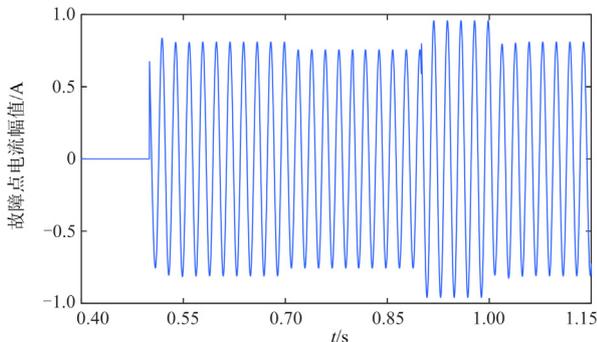


图 9 $10\text{ k}\Omega$ 高阻接地故障故障点电流波形图

Fig. 9 Fault point current waveform of $10\text{ k}\Omega$ high-resistance ground fault

调控不会进一步增大故障点电流, 加剧单相接地故障的严重程度。

4.2 接地故障选相仿真

前文已识别出故障馈线为 L3, 通过收集故障馈线 L3 的对地导纳 $Y_{\Sigma 3}$ 和固有零序电流 \dot{I}_{03} , 并同时结合表 3 中馈线 3 的零序电流、中性点零序电压完成故障选相函数 $f_A(\Delta Y'_A)$ 、 $f_B(\Delta Y'_B)$ 、 $f_C(\Delta Y'_C)$ 的计算, 其中函数值最小者所对应相即为故障相。

由表 5 可知, 配电网分别发生 $0.13\text{ k}\Omega$ 、 $1\text{ k}\Omega$ 、 $5\text{ k}\Omega$ 、 $10\text{ k}\Omega$ 单相接地故障时, 对比三相的 $f_i(\Delta Y'_i)$, 可以看到 C 相所对应的 $f_C(\Delta Y'_C)$ 在三相中均为最小值, 根据判据判定故障相为 C 相, 验证了第 2 节故障相判别原理推导的正确性。综合上述仿真结果即可得出单相接地故障发生在馈线 3 的 C 相, 与实际情况相符。

表 5 分相调控选相仿真结果

Table 5 Simulation results of phase selection based on phase-separated regulation and control

调控相别	R_f / Ω	$\dot{U}''_{0(c)} / \text{V}$	$\dot{I}'_{3(c)} / \text{A}$	$f_i(\Delta Y'_i)$
A 相	0.13	$1000\angle 0^\circ$	$38.54\angle 109.43^\circ$	109.54°
B 相		$1000\angle 240^\circ$	$37.84\angle 128.50^\circ$	111.37°
C 相		$1000\angle 120^\circ$	$48.62\angle 122.63^\circ$	2.12°
A 相	1	$1000\angle 0^\circ$	$5.66\angle 107.44^\circ$	108.12°
B 相		$1000\angle 240^\circ$	$4.96\angle 128.98^\circ$	110.07°
C 相		$1000\angle 120^\circ$	$6.95\angle 122.63^\circ$	0.92°
A 相	5	$1000\angle 0^\circ$	$1.45\angle 100.64^\circ$	101.24°
B 相		$1000\angle 240^\circ$	$0.73\angle 132.16^\circ$	103.75°
C 相		$1000\angle 120^\circ$	$1.64\angle 134.20^\circ$	1.02°
A 相	10	$1000\angle 0^\circ$	$0.93\angle 95.42^\circ$	92.02°
B 相		$1000\angle 240^\circ$	$0.20\angle 142.02^\circ$	95.20°
C 相		$1000\angle 120^\circ$	$1.01\angle 144.27^\circ$	0.27°

5 结论

论文首先从零序电压调控下的等值电路入手, 分析零序等值导纳随零序电压调控的变化规律, 进而提出了与柔性接地装置配合的不对称配电网选线方法, 并结合分相调控过程中馈线零序等值导纳与故障前馈线对地导纳差值的相角关系进一步提出与柔性接地装置配合的不对称配电网选相方法, 最后在 PSCAD/EMTDC 仿真实验中验证了文章所提方法的可行性, 并得出如下结论:

1) 论文分析了传统零序导纳法的失效机理, 在配电网三相对地导纳不对称和故障接地过渡电阻较高的情况下判据难以设定, 可靠性较低。

2) 论文提出了与柔性接地装置配合的不对称

配电网故障选相选线新方法, 该方法与柔性接地装置配合, 根据分相调控过程中零序等值导纳相关数据快速有效完成故障馈线辨识和故障相选取; 该方法充分考虑了配电网高阻接地故障零序电压电流微弱、三相对地导纳不平衡的实际情况, 对配电网低阻/高阻接地故障均有较高的灵敏度, 能大幅提升单相接地故障检测效率, 提高电网运行安全性。

3) 本方法适用于配电网中性点经消弧线圈接地系统和经电阻接地系统及多种单相接地故障工况, 在工程应用上有较强的实用性。下一步将考虑在更多配电网供电方式下单相故障辨识的适应性。

参考文献

- [1] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] WANG Wen, ZENG Xiangjun, YAN Linjie, et al. Principle and control design of active ground-fault arc suppression device for full compensation of ground current[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 4561-4570.
- [3] 肖瑞超, 李海锋, 梁海锋, 等. 20 kV 小电阻接地系统高灵敏性接地故障检测方法[J]. 广东电力, 2021, 34(8): 70-79.
XIAO Ruichao, LI Haifeng, LIANG Haifeng, et al. High-sensitive ground fault detection method for 20 kV low-resistance grounding system[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(8): 70-79.
- [4] 李卫国, 刘柏岑, 卢广旗. 含分布式电源的配电网单相接地故障精确定位方法[J]. 供用电, 2020, 37(9): 58-63.
LI Weiguo, LIU Baicen, LU Guangqi. A method for precise location of single-phase grounding fault in distribution network with distributed generation[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(9): 58-63.
- [5] 叶远波, 蔡翔, 谢民, 等. 配电网单相接地故障快速选相方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 96-103.
YE Yuanbo, CAI Xiang, XIE Min, et al. Fault phase fast detection of the single-phase-to-ground fault in a power distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 96-103.
- [6] 刘战磊, 曾祥君, 喻锟, 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.
- [7] MENG J, WANG W, TANG X, et al. Zero-sequence voltage trajectory analysis for unbalanced distribution networks on single-line-to-ground fault condition[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 161: 17-25.
- [8] WANG B, WANG H, ZHANG L, et al. A data-driven method to detect and localize the single-phase grounding fault in distribution network based on synchronized phasor measurement[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2019(1): 1-13.
- [9] 赵军, 袁雪琼, 阮琦, 等. 基于对地参数跟踪测量的不接地系统单相接地故障选相研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 81-85.
ZHAO Jun, YUAN Xueqiong, RUAN Qi, et al. Research on single phase grounding fault phase selection based on ground parameter tracking and measurement[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 81-85.
- [10] BHATRAJ A, PARESH K N. Transient energy-based combined fault detector and faulted phase selector for distribution networks with distributed generators[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020, 30(4).
- [11] 徐舒玮, 邱才明, 张东霞, 等. 基于深度学习的输电线路故障类型辨识[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 65-74, 323.
XU Shuwei, QIU Caiming, ZHANG Dongxia, et al. A deep learning approach for fault type identification of transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 65-74, 323.
- [12] 刘宝稳, 王崇林, 李晓波. 不对称电网不完全接地故障零序电压轨迹及应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4959-4967.
LIU Baowen, WANG Chonglin, LI Xiaobo. Analysis and application of zero-sequence voltage of single-phase ground fault asymmetrical system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4959-4967.
- [13] SANAYE-PASAND M, JAFARIAN P. Adaptive protection of parallel transmission lines using combined cross-differential and impedance-based techniques[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 1829-1840.
- [14] 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.

- [15] 袁佳歆, 李响, 张哲维. 基于注入信号的有源配电网单相接地故障选线方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(5): 44-49.
YUAN Jiaxin, LI Xiang, ZHANG Zhewei. Research on single-phase grounding fault selection technology for active distribution network based on injected signal[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(5): 44-49.
- [16] 曾祥君, 毛宇, 邓丰, 等. 基于多端行波时差的海底观测网故障定位方法[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3280-3287.
ZENG Xiangjun, MAO Yu, DENG Feng, et al. Fault location method for seafloor observation network based on multi-terminal traveling wave time difference[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3280-3287.
- [17] 林湘宁, 高艳, 刘沛, 等. 基于零序补偿导纳的小电流接地系统单相故障保护新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 45-49.
LIN Xiangning, GAO Yan, LIU Pei, et al. A novel method to identify the single phase-to-earth fault in the neutral un-effectual grounded system using the zero-sequence compensated admittance[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 45-49.
- [18] 栾晓明, 武守远, 贾春娟, 等. 基于改进零序导纳法的单相接地故障选线原理[J/OL]. 电网技术: 1-8[2021-09-30]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0425>.
LUAN Xiaoming, WU Shouyuan, JIA Chunjuan, et al. Fault line selection principle of single-phase-to-ground fault based on improved zero-sequence admittance[J/OL]. Power System Technology: 1-8[2021-09-30]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0425>.
- [19] 陈锐. 基于快速消弧线圈的扰动法选线分析及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(20): 41-44.
CHEN Rui. Analysis with applications on selecting single-phase line faulting by disturbance method based on fast-responding arc suppression coil[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(20): 41-44.
- [20] LIN X N, HUANG J G, KE S H. Faulty feeder detection and fault self-extinguishing by adaptive Petersen coil control[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 1290-1291.
- [21] 郭谋发, 陈静洁, 张伟骏, 等. 基于单相级联H桥变压器的配电网故障消弧与选线新方法[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2677-2684.
GUO Moufa, CHEN Jingjie, ZHANG Weijun, et al. A novel approach for fault arc extinguishing and feeder selection in distribution networks based on single-phase cascade H-bridge converter[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2677-2684.
- [22] 李振兴, 王新, 王鹏飞, 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.
- [23] 刘宝稳, 马宏忠. 零序电压产生机理及过渡电阻测量和选相方法[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1444-1449.
LIU Baowen, MA Hongzhong. Transition resistance measurement and fault phase selection under single-phase ground fault based on producing mechanism of zero-sequence voltage[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1444-1449.
- [24] 邹豪, 曾祥君, 喻锟, 等. 基于零序电压调控的故障选线选相新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 69-76.
ZOU Hao, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. A new method of fault line selection and phase selection based on zero sequence voltage regulation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 69-76.
- [25] SINGH A R, PATNE N R, KALE V S, et al. Digital impedance pilot relaying scheme for STATCOM compensated TL for fault phase classification with fault location[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(10): 2586-2598.
- [26] KANT M G, SINGH Y. A fast-executing single ended fault location method using transmission line characteristics for wind parks integrated HVDC network[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 201.
- [27] TOADER D, GRECONICI M, VESA D, et al. The influence of the characteristics of the medium voltage network on the single line-to-ground fault current in the resistor grounded neutral networks[J]. Designs, 2021, 5(3).

收稿日期: 2021-08-13; 修回日期: 2021-11-24

作者简介:

陈柏宇(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: cboyu@live.com

喻 锟(1989—), 男, 通信作者, 博士, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 1393009168@qq.com

曾祥君(1972—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: eexjzeng@qq.com

(编辑 周金梅)