

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231183

基于柔性调控零序电压的不平衡配电网故障检测方法

张炜祺¹, 王连辉², 薛永端^{1,3}, 徐丙垠¹, 王超¹

(1. 山东科汇电力自动化股份有限公司, 山东 淄博 255000; 2. 国网福建省电力有限公司, 福建 福州 350003;
3. 中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 在柔性消弧过程中实现故障选线、过渡电阻测量与故障性质判定对现有配电网单相接地故障检测具有重要意义。针对配电网三相对地参数不对称的柔性接地系统, 首先分析不平衡零序电压对消弧效果的影响, 提出柔性消弧全补偿电流的计算方法。然后分析正常运行状态下和单相接地故障状态下注入电流和母线零序电压之间的约束关系。结果表明: 无论系统处于何种状态, 均可通过改变注入电流来柔性调控母线零序电压, 进而调控各线路零序电流。并根据柔性调控零序电压前后各线路零序电流的变化规律, 提出一种可实现故障选线、过渡电阻测量和故障性质判定的故障检测方法。Matlab/Simulink 仿真验证了该方法的有效性和准确性。

关键词: 单相接地故障; 零序电压; 三相参数不对称; 零序电流; 故障选线; 过渡电阻测量

Fault detection method for unbalanced distribution networks based on flexible regulation of zero-sequence voltage

ZHANG Weiqi¹, WANG Lianhui², XUE Yongduan^{1,3}, XU Bingyin¹, WANG Chao¹

(1. Shandong Kehui Power Automation Co., Ltd., Zibo 255000, China; 2. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350003, China; 3. College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: It is important to realize fault line selection, transition resistance measurement and fault property determination in the process of flexible arc suppression for single-phase grounding fault detection in the existing distribution network. Considering a flexible grounding system with asymmetric three-phase ground parameters in a distribution network, first, the influence of unbalanced zero-sequence voltage on arc suppression effect is analyzed, and a calculation method of full compensation current for flexible arc suppression is proposed. Then, the constraint relationship between the injected current and the bus zero-sequence voltage in normal operation and in single-phase grounding fault is analyzed. The results show that no matter what state the system is in, the bus zero-sequence voltage can be flexibly regulated by changing the injected current, and then the zero-sequence current of each line can be regulated. According to the variation law of zero-sequence current of each line before and after flexible regulation of zero-sequence voltage, a fault detection method that can realize fault line selection, transition resistance measurement and fault property determination is proposed. The effectiveness and accuracy of the method are verified by Matlab/Simulink simulation.

This work is supported by the Management Science and Technology of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5500-202221138A-1-1-ZN).

Key words: single-phase ground fault; zero-sequence voltage; asymmetry of three-phase parameters; zero-sequence current; fault line selection; transition resistance measurement

0 引言

我国配电网主要以小电流接地方式运行且单相接地故障约占总故障的80%, 因小电流接地故障引

发的大停电、触电与山火事故近年来频频发生^[1-7]。为此, 国家电网有限公司提出了“瞬时性故障安全消弧、永久故障就近隔离”接地故障处置原则, 可见故障检测和消弧是减少火灾伤亡事故、保障供配电安全的关键技术。

随着配电网规模不断扩大以及电力电子装置的广泛使用, 中性点柔性接地技术已经逐步成为配

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目资助 (5500-202221138A-1-1-ZN)

网故障快速消弧与检测的新发展方向^[8-12]。目前,柔性接地技术在故障消弧、不平衡电压抑制和故障检测等方向已经有了广泛的运用。例如,文献[13-16]提出通过有源逆变器向配电网注入零序电流,柔性控制零序电压,补偿三相不平衡电流,实现对不平衡电压的抑制;文献[17-18]提出基于有源电流注入的电压消弧法,在单相接地故障发生后,向配电网中性点注入参考电流,钳制故障相电压到零,实现故障消弧的目的;文献[19-20]则是基于柔性接地技术向配电网注入特征信号,实现电网绝缘参数测量、故障选线和故障选相等功能。

快速准确实现故障选线对提升配电网供电可靠性和单相接地故障快速处置能力具有重要意义,现有学者提出了多种选线方法。如文献[21]提出基于5次谐波原理的选线方法,但信号受负荷影响较大,实际应用效果并不理想;文献[22]提出了一种注入异频信号的方法,其可能受高阻接地和系统对地电容的影响,特征信号产生明显衰减,难以可靠准确选线;文献[23]提出利用退出补偿前后的注入电流量及各出线零序电流改变量进行故障选线,文献[24]通过比较故障线路和正常线路的零序导纳计算值的区别进行故障选线,但二者均未考虑配电网自身三相对地参数不对称的影响,在实际应用中灵敏度有待提升。文献[25]考虑了配电网三相对地参数不对称的影响,但该方法采用分相调控零序电压,需三次调控零序电压使其分别与三相电源电动势同相位,其调控时间较长且可能导致故障点电流增大,不利于快速安全消弧。

过渡电阻在线测量对故障类型判定和故障程度监控有着重要作用,但目前对于过渡电阻的测量方法大都独立于柔性消弧过程之外。如文献[26]针对谐振接地系统,分析各出线暂态零序电流与暂态零序电压的约束关系,提出一种提取故障点暂态电流与计算故障点过渡电阻的方法;文献[27]提出利用故障后的稳态零序电流和零序电压构造伏安曲线,通过计算和比较连续多个周期伏安曲线的面积,实现故障性质的预判和过渡电阻的测量;文献[28]根据故障前后零序电压的变化量构造接地电流的关系式,依据接地电流的相位判别故障相,故障相电压除以接地电流来测算过渡电阻。

针对现有配电网单相接地故障检测存在的问题,本文提出一种基于柔性消弧过程中调控零序电压的不平衡配电网故障检测方法,包括故障选线、过渡电阻测量与故障性质判定等。针对配电网三相对地参数不对称的柔性接地系统,首先分析不平衡零序电压对传统电压消弧效果的影响,提出柔性消

弧全补偿电流的计算方法。然后分析正常运行状态下和单相接地故障状态下注入电流和母线零序电压之间的约束关系,根据柔性调控零序电压前后各线路零序电流的变化规律,构造特征参量差,形成故障选线判据,实现故障选线和过渡电阻测量;同时根据注入电流中补偿分量与零序电压的变化关系,实现对故障性质的判定。最后通过仿真验证了本文所提方法的准确性及有效性。

1 不平衡配电网柔性消弧全补偿原理

1.1 配电网中性点柔性接地结构

配电网中性点柔性接地结构一般建立在传统谐振接地的基础上,通常采用有源逆变器经接地升压变压器与消弧线圈并联的结构^[29]。基于有源逆变器向配电网中性点处注入一零序基波电流,改变该注入电流的幅值和相位可实现对零序电压的柔性调控,同时能够实现对故障接地电流的深度补偿。

图1所示为配电网中性点柔性接地的系统结构图。图中: \dot{E}_A 、 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 分别为配电网三相电源电动势, \dot{U}_0 为配电网中性点电压; \dot{Y}_0 为谐振接地配电网中性点接地导纳; G_A 、 G_B 、 G_C 分别为配电网三相对地泄漏电导, C_A 、 C_B 、 C_C 分别为配电网三相对地等效电容(当配电网三相对地参数不对称时, $G_A \neq G_B \neq G_C$, $C_A \neq C_B \neq C_C$); R_f 为接地故障过渡电阻;DC为逆变器直流侧电源; \dot{i}_z 为通过有源逆变器注入的幅值、相位可控的零序基波电流。

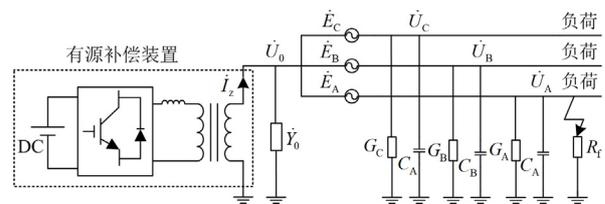


图1 配电网中性点柔性接地结构

Fig. 1 Flexible grounding structure of neutral point in distribution network

1.2 传统柔性电压消弧原理

现有柔性电压消弧理论^[17-18]大都未考虑配电网三相对地分布参数不对称的影响,即在单相接地故障发生后,通过有源电流注入调控中性点电压为故障相电源电动势的负数,以期将故障相电压钳制为0,破坏电弧重燃条件,且认为将故障相(以A相故障为例)电压钳制为0的注入电流值 \dot{i}_{q0} 如式(1)所示。

$$\dot{i}_{q0} = -\dot{E}_A (\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_0) = -\dot{E}_A \dot{Y}_{eq} \quad (1)$$

式中: \dot{E}_A 为故障相 A 相电源电势; \dot{Y}_A 、 \dot{Y}_B 、 \dot{Y}_C 分别为配电网三相对地分布参数, $\dot{Y}_A = G_A + j\omega C_A$, $\dot{Y}_B = G_B + j\omega C_B$, $\dot{Y}_C = G_C + j\omega C_C$; \dot{Y}_0 为中性点接地导纳, 不同接地方式下的 \dot{Y}_0 取值不同, 中性点不接地时 $\dot{Y}_0 = 0$, 经消弧线圈 L_p 接地时 $\dot{Y}_0 = 1/j\omega L_p$; \dot{Y}_{eq} 为配电网总零序导纳, $\dot{Y}_{eq} = \dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_0$ 。

然而在实际中, 配电网三相对地分布参数通常是不对称的, 所引起的不平衡零序电压 \dot{U}_{bd} 和自然不平衡电流 \dot{I}_{bd} 会影响有源补偿装置注入电流时母线零序电压的变化规律^[30]。

$$\dot{U}_{bd} = -\frac{\dot{E}_A \dot{Y}_A + \dot{E}_B \dot{Y}_B + \dot{E}_C \dot{Y}_C}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_0} \quad (2)$$

$$\dot{I}_{bd} = \dot{E}_A \dot{Y}_A + \dot{E}_B \dot{Y}_B + \dot{E}_C \dot{Y}_C \quad (3)$$

当计及配电网三相对地分布参数不对称, 配电网 A 相发生单相接地故障后注入电流 \dot{I}_{q0} 时, 母线零序电压 \dot{U}_{q0} 为

$$\dot{U}_{q0} = \frac{\dot{I}_{q0} - \dot{I}_{bd} - \dot{E}_A G_f}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_0 + G_f} = -\dot{E}_A - \frac{\dot{I}_{bd}}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_0 + G_f} \quad (4)$$

式中, G_f 为接地故障时的过渡电导。

此时故障相 A 相电压为

$$\dot{U}_A = \dot{E}_A + \dot{U}_{q0} = -\frac{\dot{I}_{bd}}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_0 + G_f} \quad (5)$$

$$\dot{I}_{fs} = -\frac{\dot{I}_{bd} G_f}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_0 + G_f} \quad (6)$$

由式(5)可知, 当注入电流 \dot{I}_{q0} 后故障相电压并未被钳制为 0, 而是存在一个由配电网三相对地分布参数不对称所引起的剩余电压。因此, 仅注入电流 \dot{I}_{q0} 无法将不平衡配电网故障相电压钳制为 0, 导致故障点存在剩余电流 \dot{I}_{fs} , 不能实现对故障接地电流的全补偿。

1.3 柔性消弧全补偿电流计算

为消除配电网三相对地分布参数不对称对柔性电压消弧的不利影响, 可通过有源补偿装置注入电流抵消配电网自然不平衡电流, 即将不平衡零序电压抑制为 0, 该方法的有效性已经得到验证^[13-16]。

则计及配电网三相对地分布参数不对称时, 柔性消弧所注入的零序基波电流既需消除式(3)所示的自然不平衡电流, 同时也要实现将故障相电压钳制为 0 的目标, 因此实现不平衡配电网柔性消弧全

补偿的总注入电流 \dot{I}_{zq} 为

$$\dot{I}_{zq} = \dot{I}_{z0} + \dot{I}_{q0} \quad (7)$$

式中, \dot{I}_{z0} 为抑制配电网不平衡零序电压为 0 的注入电流。

针对图 1 所示不平衡配电网中性点柔性接地结构, 建立图 2 所示的等效示意图。图中 \dot{I}_z 代表有源补偿装置向配电网中性点处注入的电流, 可等效为可控电流源。

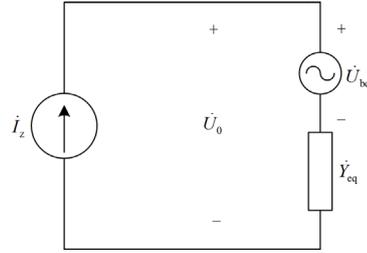


图 2 配电网等效示意图

Fig. 2 Equivalent diagram of distribution network

在图 2 中, 由基尔霍夫电压定律可得

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_{bd} + \frac{\dot{I}_z}{\dot{Y}_{eq}} \quad (8)$$

式中, \dot{U}_0 为母线零序电压。

当通过注入电流使得母线零序电压为 0 时, 即注入的电流实现了抵消不平衡配电网自然不平衡电流 \dot{I}_{bd} 的作用。因此令式(8)中 $\dot{U}_0 = 0$, 可以得到抑制配电网不平衡零序电压的最佳注入电流 \dot{I}_{z0} , 具体如式(9)所示。

$$\dot{I}_{z0} = \dot{I}_{bd} = -\dot{U}_{bd} \dot{Y}_{eq} \quad (9)$$

将式(1)和式(9)代入式(7), 可得

$$\dot{I}_{zq} = \dot{I}_{z0} + \dot{I}_{q0} = -\dot{U}_{bd} \dot{Y}_{eq} - \dot{E}_A \dot{Y}_{eq} = -(\dot{U}_{bd} + \dot{E}_A) \dot{Y}_{eq} \quad (10)$$

由式(10)可知, 仅需实现不平衡零序电压和配电网总零序导纳的测量, 即可计算得到柔性消弧全补偿的总注入电流值。

当配电网正常运行且未注入电流时, 测量此时的母线零序电压 \dot{U}_{01} , 其值等于配电网不平衡零序电压 \dot{U}_{bd} ; 当向配电网中注入任一幅值、相位的基波电流 \dot{I}_{z2} 时, 测量此时的母线零序电压 \dot{U}_{02} 。将 \dot{U}_{01} 、 \dot{U}_{02} 和 \dot{I}_{z2} 代入式(8), 可得式(11)。

$$\begin{cases} \dot{U}_{01} = \dot{U}_{bd} \\ \dot{U}_{02} = \dot{U}_{bd} + \frac{\dot{I}_{z2}}{\dot{Y}_{eq}} \end{cases} \quad (11)$$

求解可得

$$\dot{Y}_{\text{eq}} = \frac{\dot{I}_{z2}}{\dot{U}_{02} - \dot{U}_{01}} = \frac{\dot{I}_{z2}}{\dot{U}_{02} - \dot{U}_{\text{bd}}} \quad (12)$$

将式(12)代入式(9)和式(10), 整理得到

$$\dot{I}_{z0} = -\dot{U}_{\text{bd}} \frac{\dot{I}_{z2}}{\dot{U}_{02} - \dot{U}_{\text{bd}}} \quad (13)$$

$$\dot{I}_{zq} = -(\dot{U}_{\text{bd}} + \dot{E}_A) \frac{\dot{I}_{z2}}{\dot{U}_{02} - \dot{U}_{\text{bd}}} \quad (14)$$

由式(13)和式(14)可知, 在系统正常运行时只需注入一次电流就可分别计算出将不平衡零序电压抑制为 0 的注入电流 \dot{I}_{z0} 和实现不平衡配电网柔性消弧全补偿的总注入电流 \dot{I}_{zq} 。

2 各线路零序电流变化规律

2.1 柔性接地系统零序等效网络

中性点柔性接地与传统接地方式不同, 在单相接地故障发生之后, 通过有源补偿装置向配电网中性点处注入电流, 可以对母线零序电压起到柔性控制作用, 从而使各线路零序电流发生相应变化。配电网中性点柔性接地零序网络示意图如图 3 所示。

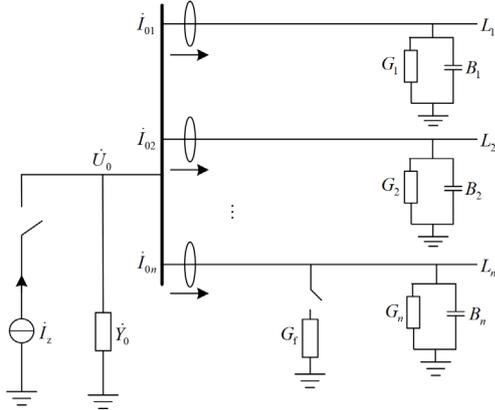


图 3 配电网中性点柔性接地零序网络示意图

Fig. 3 Diagram of neutral point flexible grounding zero-sequence network in distribution network

假设配电网具有 n 条线路, $\dot{I}_{0i} (i=1, 2, \dots, n)$ 分别代表每条线路的零序电流, G_i 和 $B_i (i=1, 2, \dots, n)$ 分别代表每条线路的等效对地电导和电纳。

2.2 正常状态下各线路零序电流

一般而言, 系统正常运行状态下零序回路中无电气量信号, 即零序电压为零, 且各线路中不存在零序电流。但当配电网三相对地参数不对称时, 系统存在不平衡零序电压 \dot{U}_{bd} , 则此时母线零序电压 \dot{U}_0 为

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_{\text{bd}} = -\frac{\dot{E}_A \dot{Y}_A + \dot{E}_B \dot{Y}_B + \dot{E}_C \dot{Y}_C}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_0} \quad (15)$$

线路 i 的零序电流为

$$3\dot{I}_{0i} = (\dot{U}_0 + \dot{E}_A) \dot{Y}_{Ai} + (\dot{U}_0 + \dot{E}_B) \dot{Y}_{Bi} + (\dot{U}_0 + \dot{E}_C) \dot{Y}_{Ci} = \dot{U}_0 \dot{Y}_i + \dot{I}_{\text{bdi}} \quad (16)$$

式中: \dot{Y}_{Ai} 、 \dot{Y}_{Bi} 、 \dot{Y}_{Ci} 分别为第 i 条线路的三相对地分布导纳, $\dot{Y}_{Ai} = G_{Ai} + j\omega C_{Ai}$, $\dot{Y}_{Bi} = G_{Bi} + j\omega C_{Bi}$, $\dot{Y}_{Ci} = G_{Ci} + j\omega C_{Ci}$; G_{Ai} 、 G_{Bi} 和 G_{Ci} 分别为第 i 条线路的三相对地分布电导; C_{Ai} 、 C_{Bi} 和 C_{Ci} 分别为第 i 条线路的三相对地分布电容; \dot{Y}_i 为线路 i 的零序导纳, $\dot{Y}_i = \dot{Y}_{Ai} + \dot{Y}_{Bi} + \dot{Y}_{Ci}$; \dot{I}_{bdi} 为线路 i 的自然不平衡电流, $\dot{I}_{\text{bdi}} = \dot{E}_A \dot{Y}_{Ai} + \dot{E}_B \dot{Y}_{Bi} + \dot{E}_C \dot{Y}_{Ci}$, 其只受系统三相电源电势和线路自身零序导纳的影响, 在调控零序电压的过程中为恒定值不变。

在系统正常运行状态下, 且有源补偿装置向配电网中性点处注入基波电流 \dot{I}_z 时, 母线零序电压变为

$$\dot{U}'_0 = \frac{\dot{I}_z - \dot{I}_{\text{bd}}}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_0} \quad (17)$$

则线路 i 的零序电流变为

$$3\dot{I}'_{0i} = \dot{U}'_0 \dot{Y}_i + \dot{I}_{\text{bdi}} \quad (18)$$

2.3 单相接地故障状态下各线路零序电流

系统发生单相接地故障后, 故障点处产生零序激励源, 设过渡电导为 G_f , 故障线路为线路 n , 故障相电源电势为 \dot{E}_A (以 A 相故障为例), 若不考虑有源补偿装置注入电流的影响, 此时母线零序电压为

$$\dot{U}''_0 = \frac{-\dot{I}_{\text{bd}} - \dot{E}_A G_f}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_0 + G_f} \quad (19)$$

则健全线路的零序电流为

$$3\dot{I}''_{0i} = \dot{U}''_0 \dot{Y}_i + \dot{I}_{\text{bdi}} \quad (20)$$

线路 n 发生单相接地故障时, 第 n 条馈线的零序电流的表达式(16)中 A 相导纳变为 $\dot{Y}_{An} + G_f$, 则故障线路零序电流为

$$3\dot{I}''_{0n} = (\dot{U}''_0 + \dot{E}_A)(\dot{Y}_{An} + G_f) + (\dot{U}''_0 + \dot{E}_B) \dot{Y}_{Bn} + (\dot{U}''_0 + \dot{E}_C) \dot{Y}_{Cn} = \dot{U}''_0 (\dot{Y}_n + G_f) + \dot{E}_A G_f + \dot{I}_{\text{bdn}} \quad (21)$$

式中: \dot{Y}_{An} 、 \dot{Y}_{Bn} 、 \dot{Y}_{Cn} 分别为故障线路 n 的三相对地分布导纳; \dot{Y}_n 为故障线路 n 的零序导纳, $\dot{Y}_n = \dot{Y}_{An} + \dot{Y}_{Bn} + \dot{Y}_{Cn}$; \dot{I}_{bdn} 为故障线路 n 的自然不平衡电流。

当考虑有源补偿装置注入电流 \dot{I}_z 的影响时, 即系统中性点和故障点处均产生零序激励源, 此时母线零序电压为

$$\dot{U}_0'' = \frac{\dot{I}_z - \dot{I}_{bd} - \dot{E}_A G_f}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_0 + G_f} \quad (22)$$

健全线路零序电流变为

$$3\dot{I}_{0i}'' = \dot{U}_0'' \dot{Y}_i + \dot{I}_{bdi} \quad (23)$$

故障线路 n 零序电流变为

$$3\dot{I}_{0n}'' = \dot{U}_0'' (\dot{Y}_n + G_f) + \dot{E}_A G_f + \dot{I}_{bdr} \quad (24)$$

由式(17)和式(22)可知, 无论系统处于正常运行状态还是单相接地故障状态, 均可通过有源补偿装置注入电流调控母线零序电压, 进而调控各线路零序电流。由式(23)和式(24)可知, 健全线路和故障线路零序电流均随零序电压的变化而变化, 由于线路自然不平衡电流的存在, 因此二者均与零序电压成非正比例关系变化。

3 基于柔性调控零序电压的故障检测方法

3.1 柔性调控零序电压

当配电网发生单相接地故障后(设故障相电源电动势为 \dot{E}_0), 有源补偿装置投入工作, 注入由式(14)求得的全补偿电流 \dot{I}_{zq} , 实现消除配电网不平衡零序电压也即抵消配电网自然不平衡电流 \dot{I}_{bd} 、同时深度补偿故障点电流的目的。

为方便阅读, 对后续公式中参数的下标特此说明: N 表示正常状态信息, F 表示故障状态信息。

注入全补偿电流 \dot{I}_{zq} 时, 母线零序电压 \dot{U}_{0zqF} 为

$$\dot{U}_{0zqF} = \frac{\dot{I}_{zq} - \dot{I}_{bd} - \dot{E}_0 G_f}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_0 + G_f} \quad (25)$$

式中, \dot{U}_{0zqF} 为单相接地故障发生后注入全补偿电流 \dot{I}_{zq} 时配电网的母线零序电压。

将式(7)和式(9)代入式(25), 可得

$$\dot{U}_{0zqF} = \frac{\dot{I}_{q0} - \dot{E}_0 G_f}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_0 + G_f} \quad (26)$$

延时一段时间后, 通过有源补偿装置调控注入电流为 \dot{I}'_{zq} , 使其满足式(27)。

$$\dot{I}'_{zq} = \dot{I}_{z0} + \dot{I}'_{q0} \quad (27)$$

即在改变注入电流实现柔性调控零序电压的过程中, 始终保持全补偿电流中抑制配电网不平衡零序电压的分量 \dot{I}_{z0} 不变, 改变其中的补偿分量 \dot{I}'_{q0} , 从而消除配电网三相分布参数不对称对故障检测方法的影响。

3.2 故障选线方法

现有单相接地故障选线方法大多未计及配电网三相分布参数不对称, 为此, 提出一种基于柔性

调控零序电压的不平衡配电网选线方法。

单相接地故障发生后(以第 n 条线路发生接地故障为例), 当有源补偿装置投入, 注入电流为全补偿电流 \dot{I}_{zq} 时, 配电网不平衡零序电压被抑制为 0, 近似等效为各线路中不存在线路自然不平衡电流 \dot{I}_{bdi} , 同时也将故障相电压钳制为 0, 去除起弧的电压条件。

则健全线路零序电流为

$$3\dot{I}_{0i} = \dot{U}_{0zqF} \dot{Y}_i \quad (28)$$

故障线路 n 的零序电流为

$$3\dot{I}_{0n} = \dot{U}_{0zqF} (\dot{Y}_n + G_f) + \dot{E}_0 G_f \quad (29)$$

当改变全补偿注入电流为 \dot{I}'_{zq} 时, 母线零序电压调控为 \dot{U}'_{0zqF} 。

$$\dot{U}'_{0zqF} = \frac{\dot{I}'_{q0} - \dot{E}_0 G_f}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_0 + G_f} \quad (30)$$

式中, \dot{I}'_{q0} 为调控后总注入电流 \dot{I}'_{zq} 中的补偿分量。

则健全线路零序电流变为

$$3\dot{I}'_{0i} = \dot{U}'_{0zqF} \dot{Y}_i \quad (31)$$

故障线路 n 零序电流变为

$$3\dot{I}'_{0n} = \dot{U}'_{0zqF} (\dot{Y}_n + G_f) + \dot{E}_0 G_f \quad (32)$$

显而易见, 由式(28)一式(32)可知, 在柔性调控零序电压的过程中, 健全线路零序电流与零序电压成正比例关系变化, 而故障线路零序电流与零序电压成非正比例关系变化。

3.2.1 选线特征参量构造

定义特征参量 $\delta_i (i=1, 2, \dots, n)$, δ_i 为母线零序电压与线路 i 零序电流之比。

$$\delta_i = \frac{\dot{U}_0}{3\dot{I}_{0i}} \quad (33)$$

零序电压调控前后特征参量变化表示为

$$\begin{cases} \delta_i = \frac{\dot{U}_0}{3\dot{I}_{0i}} \\ \delta'_i = \frac{\dot{U}'_0}{3\dot{I}'_{0i}} \end{cases} \quad (34)$$

式中, \dot{U}'_0 、 δ'_i 和 \dot{I}'_{0i} 分别为调控后的母线零序电压、线路 i 的特征参量和零序电流。

由式(28)和式(31)可知, 健全线路零序电流与零序电压成正比例关系变化, 在调控零序电压的过程中, 健全线路零序电流与零序电压之比恒为线路自身导纳, 因此健全线路特征参量为恒定值。

由式(29)和式(32)可知, 故障线路零序电流与零

序电压成非正比例关系变化,在调控零序电压的过程中,由于故障量 $\dot{E}_0 G_f$ 的存在,其零序电流与零序电压之比会随着零序电压的不同而变化,因此故障线路特征参量会发生明显变化。

3.2.2 故障选线判据

柔性调控零序电压前后,理论上健全线路特征参量将保持不变,但由于传感器的测量存在误差,因此其特征参量存在微小变化,相反故障线路的特征参量存在明显变化,将远大于健全线路由测量误差引起的变化,因此可形成故障选线判据:

$$|\Delta\delta_i| = |\delta'_i - \delta_i| = \left| \frac{\dot{U}'_0}{3\dot{I}'_{0i}} - \frac{\dot{U}_0}{3\dot{I}_{0i}} \right| \quad (35)$$

式中, $\Delta\delta_i$ 为零序电压调控前后各线路特征参量差。

则在柔性调控零序电压的过程中,可根据特征参量差 $\Delta\delta_i$ 的大小来实现故障选线,当 $|\Delta\delta_i|$ 很小或者约等于0时,判断该线路为健全线路,反之当 $|\Delta\delta_i|$ 较大且为最大值时,则判断该线路为故障线路。

3.3 过渡电阻估算

在柔性调控零序电压前后,故障线路零序电流与零序电压满足式(36)。

$$\begin{cases} 3\dot{I}_{0n} = (\dot{Y}_n + G_f)U_{0zqF} + \dot{E}_0 G_f \\ 3\dot{I}'_{0n} = (\dot{Y}_n + G_f)U'_{0zqF} + \dot{E}_0 G_f \end{cases} \quad (36)$$

则联立求解可以得到

$$\dot{Y}_n + G_f = \frac{3\dot{I}'_{0n} - 3\dot{I}_{0n}}{\dot{U}'_{0zqF} - \dot{U}_{0zqF}} = \frac{3\Delta\dot{I}_{0n}}{\Delta\dot{U}_{0zqF}} \quad (37)$$

$$G_f = 3 \frac{\Delta\dot{U}_{0zqF} \dot{I}'_{0n} - \Delta\dot{I}_{0n} \dot{U}'_{0zqF}}{\Delta\dot{U}_{0zqF} \dot{E}_0} \quad (38)$$

式中: $\Delta\dot{I}_{0n} = \dot{I}'_{0n} - \dot{I}_{0n}$; $\Delta\dot{U}_{0zqF} = \dot{U}'_{0zqF} - \dot{U}_{0zqF}$ 。

由式(38)可知,过渡电导等于柔性调控过程中故障线路零序电流和零序电压的关系式与故障相电源电势的比值,基于此可以实现对过渡电阻的估算。

3.4 故障性质判定

3.4.1 瞬时性接地故障

注入全补偿电流 \dot{I}_{zq} 一段时间后,当单相接地故障为瞬时性故障时,在有源补偿的作用下故障点电流被补偿至接近零,电弧熄灭且故障点消除,系统恢复正常运行,此时母线零序电压为

$$\dot{U}_{0zqN} = \frac{\dot{I}_{zq} - \dot{I}_{bd}}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_0} = \frac{\dot{I}_{q0}}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_0} \quad (39)$$

调控注入电流为 \dot{I}'_{zq} 后,母线零序电压变为

$$\dot{U}'_{0zqN} = \frac{\dot{I}'_{zq} - \dot{I}_{bd}}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_0} = \frac{\dot{I}'_{q0}}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_0} \quad (40)$$

整理式(39)和式(40)可得

$$\frac{\dot{I}_{q0}}{\dot{U}_{0zqN}} = \frac{\dot{I}'_{q0}}{\dot{U}'_{0zqN}} = \dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_0 = \dot{Y}_{eq} \quad (41)$$

由式(41)可知,当故障点消除后,注入电流中的补偿分量与母线零序电压成正比例关系变化,其比值恒为配电网总零序导纳。

3.4.2 永久性接地故障

注入全补偿电流 \dot{I}_{zq} 一段时间后,当单相接地故障为永久性故障时,即使在有源补偿的作用下故障点电流被补偿至接近零,但故障点依旧存在,因此母线零序电压仍等于式(26)所示。

当调控注入电流为 \dot{I}'_{zq} 后,母线零序电压变为式(30)所示。

显然,由于故障点始终存在,式(26)与式(30)分子中均含有故障量 $\dot{E}_0 G_f$ 。因此柔性调控零序电压的过程中,注入电流中的补偿分量与母线零序电压成非正比例关系变化。

则在调控注入电流的过程中,若注入电流中的补偿分量与母线零序电压满足正比例关系变化,即表示故障点消除,系统恢复正常运行,判定为瞬时性接地故障;反之,即表示故障点依旧存在,判定为永久性接地故障,快速隔离故障馈线并检修。

3.5 注入电流调控量 $\Delta\dot{I}_{zq}$ 的选择

在实际应用中,注入电流调控量的选择影响着本文故障检测方法的准确性。当注入电流调控量 $\Delta\dot{I}_{zq}$ 越大,母线零序电压和线路零序电流的变化量也越大,传感器测量带来的计算误差就越小;但同时注入电流调控量越大,可能引起故障电弧重燃的风险也会相应增大。

根据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》(GB/T 50064-2014)等规定,系统接地故障残余电流不应大于10 A,且在实际运行中当故障点残流小于5 A时,多数电弧将自行熄灭。因此,为避免柔性调控零序电压的过程中故障点电弧重燃,需限制注入电流调控量不超过5 A。

$$|\Delta\dot{I}_{zq}| = |\dot{I}'_{zq} - \dot{I}_{zq}| \leq 5 \text{ A} \quad (42)$$

3.6 故障检测方法流程

本文研究了基于柔性调控零序电压的不平衡配电网故障选线、过渡电阻估算以及故障性质判定的方法,具体实施流程如图4所示。

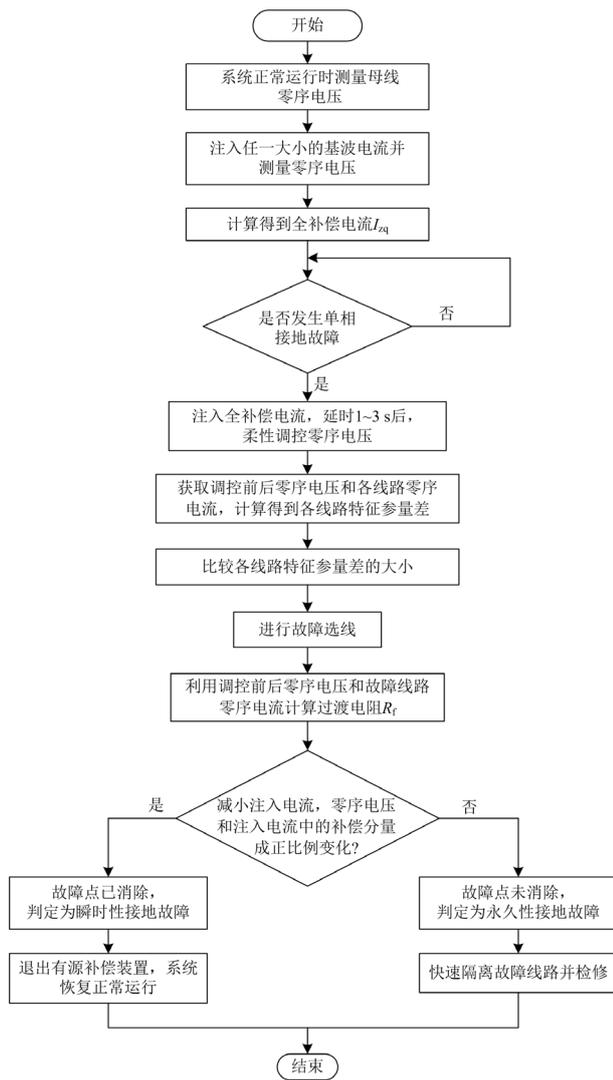


图4 基于柔性调控零序电压的故障检测工作流程

Fig. 4 Fault detection workflow based on flexible regulation of zero-sequence voltage

4 仿真验证

为验证基于柔性调控零序电压的不平衡配电网故障检测方法的有效性, 利用 Matlab/Simulink 软件搭建仿真模型进行仿真验证。

根据图 1 搭建 10 kV 配电网柔性接地仿真模型如图 5 所示, 仿真系统的总电容电流为 78.766 A, 总有功电流为 1.321 A, 系统不对称度为 1.693%, 阻尼率为 1.677%, 系统中性点不接地情况下的不平衡零序电压为 $97.65 \angle -106^\circ$ V。该系统共有 3 条出线, 具体参数设置见表 1。仿真频率为 50 Hz。

4.1 故障选线方法验证

针对图 5 所示的仿真模型, 对不同线路、不同接地方式、不同过渡电阻情况下发生的单相接地故

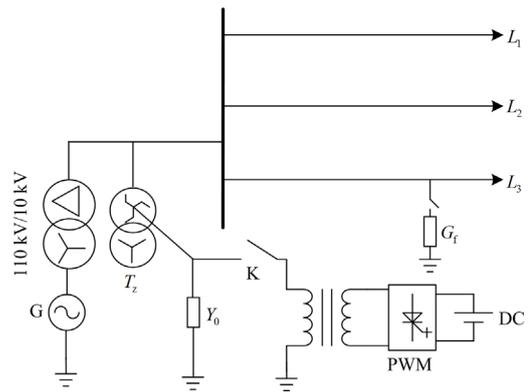


图5 仿真结构图

Fig. 5 Simulation structure diagram

表 1 配电网零序参数设置

Table 1 Zero-sequence parameter settings of distribution network

参数	A 相	B 相	C 相	系统
分布电容/ μF	14.636	14.003	14.809	43.448
分布电阻/ $\text{k}\Omega$	13.140	13.116	13.086	4.371

障进行仿真分析, 以验证所提方法的有效性。随机在该配电网的 3 条线路中任一线路 A 相设置过渡电阻为 100、200、500、1000、2000 Ω 的单相接地故障, 中性点接地方式包含中性点不接地和中性点经消弧线圈接地(过补偿 10%) 2 种方式。配电网发生单相接地故障后, 注入由式(14)计算得到的全补偿电流并延时一段时间后, 通过改变注入电流, 柔性调控零序电压, 得到中性点不同接地方式下各线路零序电流在调控前后的变化状况, 如表 2 和表 3 所示。

根据表 2、表 3 以及式(33)一式(35)计算出柔性调控零序电压前后中性点不接地和中性点经消弧线圈接地情况下各线路特征参量差的大小及选线结果, 见表 4、表 5 所示。

由表 4、表 5 可知, 不同接地方式下健全线路特征参量差的幅值均较小, 基本保持在 0.1 左右, 而故障线路特征参量差的幅值则明显增大, 远大于健全线路(在过渡电阻为 2000 Ω 时, 二者仍有 20 倍以上的差距)。因此, 根据柔性调控零序电压前后各线路特征参量差的幅值差异, 可以准确判断故障线路, 且该方法不受配电网三相参数不对称的影响。

4.2 过渡电阻估算方法验证

为证实式(38)的准确性, 在线路 L_3 上分别设置了过渡电阻为 100、200、500、1000、2000 Ω 的单相接地故障。以过渡电阻 $R_f = 200 \Omega$ 为例, 线路 L_3 上发生 A 相接地故障后, 有源补偿装置投入, 向配电网中注入由式(14)计算得到的全补偿电流, 延时一

表 2 中性点不接地时各线路零序电流变化
Table 2 Zero-sequence current variations in lines with ungrounded neutral point

过渡电阻/ Ω	零序电压/V	线路零序电流 $3I_0/A$		
		L_1	L_2	L_3
100	8155.45 \angle	31.97 \angle	46.56 \angle	32.27 \angle
	-178.7 $^\circ$	-90.45 $^\circ$	-91.03 $^\circ$	-90.15 $^\circ$
	8342.38 \angle	32.79 \angle	47.62 \angle	33.03 \angle
	-178.7 $^\circ$	-93.70 $^\circ$	-91.02 $^\circ$	-90.14 $^\circ$
200	8153.09 \angle	31.96 \angle	46.54 \angle	32.26 \angle
	-178.7 $^\circ$	-90.42 $^\circ$	-91.03 $^\circ$	-90.15 $^\circ$
	8505.80 \angle	33.33 \angle	48.66 \angle	33.67 \angle
	-178.7 $^\circ$	-90.40 $^\circ$	-93.05 $^\circ$	-90.13 $^\circ$
500	8158.25 \angle	31.98 \angle	46.57 \angle	32.28 \angle
	-178.7 $^\circ$	-90.42 $^\circ$	-91.03 $^\circ$	-90.17 $^\circ$
	8566.32 \angle	33.57 \angle	48.91 \angle	33.96 \angle
	-178.7 $^\circ$	-90.41 $^\circ$	-91.01 $^\circ$	-91.51 $^\circ$
1000	8155.97 \angle	31.97 \angle	46.56 \angle	32.27 \angle
	-178.7 $^\circ$	-90.42 $^\circ$	-91.02 $^\circ$	-90.15 $^\circ$
	8611.56 \angle	33.76 \angle	49.16 \angle	34.08 \angle
	-178.7 $^\circ$	-91.18 $^\circ$	-90.98 $^\circ$	-90.12 $^\circ$
2000	8157.55 \angle	31.97 \angle	46.57 \angle	32.28 \angle
	-178.7 $^\circ$	-90.42 $^\circ$	-91.03 $^\circ$	-90.16 $^\circ$
	8677.16 \angle	34.00 \angle	49.54 \angle	34.39 \angle
	-178.7 $^\circ$	-90.40 $^\circ$	-91.01 $^\circ$	-90.60 $^\circ$

表 3 消弧线圈过补偿时各线路零序电流变化
Table 3 Zero-sequence current variations in lines with overcompensated arc suppression coils

过渡电阻/ Ω	零序电压/V	线路零序电流 $3I_0/A$		
		L_1	L_2	L_3
100	8152.18 \angle	31.95 \angle	46.54 \angle	32.26 \angle
	-178.7 $^\circ$	-90.42 $^\circ$	-91.03 $^\circ$	-90.13 $^\circ$
	8267.27 \angle	32.40 \angle	47.20 \angle	32.77 \angle
	-178.7 $^\circ$	-90.41 $^\circ$	-91.02 $^\circ$	-92.13 $^\circ$
200	8151.26 \angle	31.94 \angle	46.53 \angle	32.25 \angle
	-178.7 $^\circ$	-90.42 $^\circ$	-91.02 $^\circ$	-90.15 $^\circ$
	8464.38 \angle	33.17 \angle	48.41 \angle	33.49 \angle
	-178.7 $^\circ$	-90.40 $^\circ$	-92.82 $^\circ$	-90.14 $^\circ$
500	8163.17 \angle	32.00 \angle	46.60 \angle	32.30 \angle
	-178.7 $^\circ$	-90.45 $^\circ$	-91.03 $^\circ$	-90.15 $^\circ$
	8553.90 \angle	33.56 \angle	48.83 \angle	33.86 \angle
	-178.7 $^\circ$	-91.68 $^\circ$	-91.01 $^\circ$	-90.14 $^\circ$
1000	8166.34 \angle	32.00 \angle	46.62 \angle	32.32 \angle
	-178.7 $^\circ$	-90.41 $^\circ$	-91.05 $^\circ$	-90.14 $^\circ$
	8581.65 \angle	33.63 \angle	49.13 \angle	33.96 \angle
	-178.7 $^\circ$	-90.39 $^\circ$	-92.18 $^\circ$	-90.12 $^\circ$
2000	8157.82 \angle	31.97 \angle	46.57 \angle	32.28 \angle
	-178.7 $^\circ$	-90.42 $^\circ$	-91.02 $^\circ$	-90.16 $^\circ$
	8665.55 \angle	33.96 \angle	49.47 \angle	34.35 \angle
	-178.7 $^\circ$	-90.41 $^\circ$	-91.00 $^\circ$	-90.59 $^\circ$

表 4 中性点不接地各线路特征参量差及选线结果
Table 4 Differential characteristic parameters and line selection results for lines with ungrounded neutral points

过渡电阻/ Ω	特征参量差 $ \Delta\delta $			选线结果
	L_1	L_2	L_3	
100	14.4646	0.0404	0.1617	L_1
200	0.1314	6.1811	0.1395	L_2
500	0.0855	0.0720	5.9250	L_3
1000	3.4284	0.1223	0.1433	L_1
2000	0.1011	0.0625	1.9791	L_3

表 5 消弧线圈过补偿各线路特征参量差及选线结果
Table 5 Differential characteristic parameters and line selection results with overcompensated arc suppression coils

过渡电阻/ Ω	特征参量差 $ \Delta\delta $			选线结果
	L_1	L_2	L_3	
100	0.0453	0.0325	8.8232	L_3
200	0.0921	5.5082	0.0450	L_2
500	5.4782	0.0612	0.1131	L_1
1000	0.0912	3.4852	0.0924	L_2
2000	0.0446	0.0614	1.9473	L_3

段时间后调控注入电流，测量调控前后对应的故障线路零序电流和零序母线电压，根据式(38)计算得到过渡电阻的估算值。不同过渡电阻下，计算得到的过渡电阻估算值如表 6 所示。

表 6 不同过渡电阻下过渡电阻估算结果及误差
Table 6 Estimation results and errors for different transition resistances

过渡电阻 R_f/Ω	过渡电阻估算值/ Ω	误差/%
100	100.47	0.47
200	201.44	0.72
500	508.34	1.67
1000	1029.16	2.92
2000	2062.34	3.12

由表 6 可知，式(38)对于过渡电阻具有较高的测量精度，其误差均可控制在 4%以内，相对于传统的过渡电阻辨识方法，其在柔性消弧的过程中仅通过调控一次零序电压即可实现过渡电阻的测量，操作步骤简便。

4.3 故障性质判定

单相接地故障发生后，注入由式(14)计算得到的全补偿电流补偿接地故障电流，同时抑制配电网不平衡零序电压，促使故障相电压为 0，实现瞬时性故障 100%消除，延时一段时间后，进行接地故障性质判定，逐渐减小注入电流，注入电流中的补偿分量与零序电压的变化关系如表 7、图 6 所示。

表 7 故障消除后补偿分量与零序电压的关系

Table 7 Relationship between compensation component and zero-sequence voltage after fault elimination

零序电压幅值 U_0/kV	注入电流中补偿分量幅值 I_{q0}/A
8.152	11.172
7.243	9.919
6.117	8.380
4.326	5.926
2.188	2.997

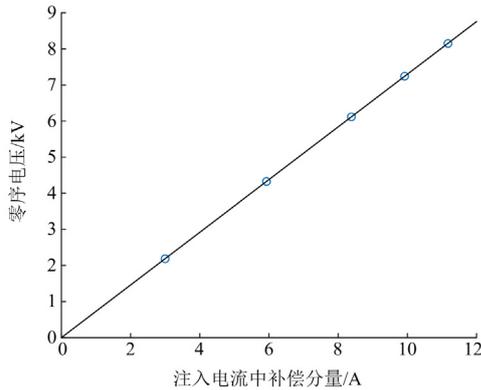


图 6 故障消除后补偿分量与零序电压的关系

Fig. 6 Relationship between compensation component and zero-sequence voltage after fault elimination

根据图 6 可以看出, 减小注入电流、调控零序电压的过程中, 零序电压与注入电流中的补偿分量成正比例变化, 且拟合的直线通过坐标原点, 则可判定故障点已消除, 系统恢复正常运行, 判定为瞬时性接地故障; 反之, 若零序电压减小速度缓慢, 且与注入电流中的补偿分量不成正比例变化, 则表明故障点依旧存在, 判定为永久性接地故障, 须快速隔离故障馈线并检修。

5 结论

针对配电网三相对地参数不对称的柔性接地系统, 本文提出一种基于柔性消弧过程中调控零序电压的故障检测方法, 包括故障选线、过渡电阻测量与故障性质判定等, 实现了故障消弧与检测一体化, 结论如下所述。

1) 本文分析了不平衡零序电压对传统电压消弧效果的影响, 提出柔性消弧全补偿电流的计算方法, 只需故障前注入一次电流即可求得, 有效消弧的同时消除了配电网三相对地参数不对称对故障检测的影响。

2) 在柔性消弧全补偿过程中, 根据调控零序电压前后各线路零序电流的变化规律, 构造特征参量

差, 形成选线判据, 实现故障选线; 同时利用调控前后故障线路零序电流和零序电压的关系, 实现对过渡电阻的估算; 最后根据注入电流中补偿分量与零序电压的变化关系, 实现对瞬时性故障和永久性故障的准确判定。本文所提故障检测方法准确性高且基本不受配电网三相对地参数不对称的影响。

理论和仿真验证了方法的准确性及有效性, 下一步将开发相应的样机进行现场实测验证, 实现本文方法的落地应用。

参考文献

- [1] 王建, 姚江宁, 刘泽青, 等. 恶劣天气下配电网故障统计分析及其概率分布拟合[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 143-153.
WANG Jian, YAO Jiangning, LIU Zeqing, et al. Fault statistical analysis and probability distribution fitting for a power distribution network in adverse weather conditions[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 143-153.
- [2] 于洋, 范荣奇, 徐丙垠, 等. 小电流接地故障保护技术及其发展[J]. 供用电, 2023, 40(2): 1-8.
YU Yang, FAN Rongqi, XU Bingyin, et al. Small current earth fault protection and its developments[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(2): 1-8.
- [3] 徐丙垠, 薛永端, 冯光, 等. 配电网接地故障保护若干问题的探讨[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(20): 1-7.
XU Bingyin, XUE Yongduan, FENG Guang, et al. Discussion on several problems of earthing fault protection in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20): 1-7.
- [4] 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 fault location for non-solidly grounding fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19): 180-187.
- [5] 刘萃萃, 薛永端, 王超, 等. 小电流接地保护跳闸给故障检测与保护带来的机遇与挑战[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(3): 213-220.
LIU Cuicui, XUE Yongduan, WANG Chao, et al. Opportunities and challenges brought by tripping of small current grounding fault protection to fault detection and protection[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(3): 213-220.
- [6] 田君杨, 柳影, 薛永端, 等. 小电流接地故障选线装置零序电压启动分析[J]. 供用电, 2022, 39(5): 54-60.
TIAN Junyang, LIU Ying, XUE Yongduan, et al. Analysis

- of zero sequence voltage starting of small current grounding fault line selection device[J]. *Distribution & Utilization*, 2022, 39(5): 54-60.
- [7] 刘健, 常小强, 张志华, 等. 基于零序电压的小电流接地系统高阻单相接地检测启动性能分析及其应用[J]. *供用电*, 2023, 40(9): 27-35, 73.
LIU Jian, CHANG Xiaoqiang, ZHANG Zhihua, et al. Analysis and applications of startup performance based on zero-sequence-voltage for single phase grounding fault detection of small current grounding systems[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(9): 27-35, 73.
- [8] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000: 26-37.
- [9] 曾祥君, 王媛媛, 李健, 等. 基于配电网柔性接地控制的故障消弧与馈线保护新原理[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(16): 137-143.
ZENG Xiangjun, WANG Yuanyuan, LI Jian, et al. Novel principle of faults arc extinguishing & feeder protection based on flexible grounding control for distribution networks[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(16): 137-143.
- [10] SOLEIMANISARDOO A, HOSSEIN H K, ZEINELDIN H H. Differential frequency protection scheme based on off-nominal frequency injections for inverter-based islanded microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(2): 2107-2114.
- [11] 刘健, 张志华, 张小庆. 中性点非有效接地系统单相接地故障处理新技术[J]. *供用电*, 2022, 39(5): 48-53.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing. New technology of single-phase grounding fault processing in neutral non-effectively grounded systems[J]. *Distribution & Utilization*, 2022, 39(5): 48-53.
- [12] 周江华, 万山明, 闫文博, 等. 配电网柔性接地暂态过程分析与优化方法研究[J]. *高电压技术*, 2019, 45(10): 3149-3156.
ZHOU Jianghua, WAN Shanming, YAN Wenbo, et al. Research on transient process analysis and optimization method of flexible grounding in distribution networks[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(10): 3149-3156.
- [13] 曾祥君, 胡京莹, 王媛媛, 等. 基于柔性接地技术的配电网三相不平衡过电压抑制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(4): 678-684.
ZENG Xiangjun, HU Jingying, WANG Yuanyuan, et al. Suppressing method of three-phase unbalanced overvoltage based on distribution networks flexible grounding control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(4): 678-684.
- [14] 谢菁, 薛永端, 徐丙垠. 小电流接地系统不对称电压有源补偿控制方法[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(5): 115-121.
XIE Jing, XUE Yongduan, XU Bingyin. An active compensation and control method of asymmetrical voltage in non-solidly grounded system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(5): 115-121.
- [15] 曾祥君, 黄明玮, 王文, 等. 配电网三相不平衡过电压有源抑制方法研究[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(9): 61-69.
ZENG Xiangjun, HUANG Mingwei, WANG Wen, et al. Research on active suppression method of three-phase unbalanced overvoltage for distribution networks[J]. *Transaction of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(9): 61-69.
- [16] 刘宝稳, 曾祥君, 张慧芬, 等. 不平衡零序电压快速精准抑制与电压消弧全补偿优化控制方法[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(3): 645-654.
LIU Baowen, ZENG Xiangjun, ZHANG Huifen, et al. Optimal control method for accurate and fast suppression of unbalanced zero-sequence voltage and voltage arc suppression full compensation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(3): 645-654.
- [17] 彭沙沙, 曾祥君, 喻琨, 等. 基于二次注入的配电网接地故障有源电压消弧方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(20): 142-149.
PENG Shasha, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. Active arc-suppression method of grounding fault for distribution network based on secondary injection[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(20): 142-149.
- [18] 刘维功, 薛永端, 徐丙垠, 等. 可适应线路结构动态变化的有源消弧算法[J]. *电网技术*, 2014, 38(7): 2008-2013.
LIU Weigong, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. An active arc-suppression algorithm adaptable to dynamic structure variation of transmission line[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(7): 2008-2013.
- [19] 张帆, 薛永端, 徐丙垠. 基于信号注入的谐振接地系统故障点残流测算方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(13): 132-138.
ZHANG Fan, XUE Yongduan, XU Bingyin. A method for calculating residual current in a resonant grounding system based on signal injection[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(13): 132-138.
- [20] 曾祥君, 黄慧, 喻琨, 等. 基于柔性调控零序电压的配电网高阻接地及单相断线故障的选相方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(3): 9-18.
ZENG Xiangjun, HUANG Hui, YU Kun, et al. Voltage phase selection method for high resistance grounding and

- a single-phase disconnection fault of a distribution network based on flexible control of zero-sequence voltage[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 9-18.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 郭谋发, 陈静洁, 张伟骏, 等. 基于单相级联H桥变频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.
GOU 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 薛永端, 李娟, 陈筱菁, 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.
- [27] 董俊, 李一凡, 束洪春, 等. 配电网馈出线路单相永久性接地故障性质辨识方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(21): 4576-4585.
DONG Jun, LI Yifan, SHU Hongchun, et al. Study on identification method of single phase permanent ground fault in distribution network feedout line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(21): 4576-4585.
- [28] 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.
- [29] 周江华, 万山明, 张勇. 基于参数闭环控制的配电网柔性接地消弧方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1189-1197.
ZHOU Jianghua, WAN Shanming, ZHANG Yong. Flexible-grounding arc-suppression method for distribution network based on parameter closed-loop control[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1189-1197.
- [30] 刘宝稳, 曾祥君, 马宏忠, 等. 参数不对称配电网的等效模型与接地故障检测方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(13): 159-167.
LIU Baowen, ZENG Xiangjun, MA Hongzhong, et al. Equivalent model and grounding fault detection method for distribution lines with asymmetry parameters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13): 159-167.

收稿日期: 2023-09-10; 修回日期: 2023-11-28

作者简介:

张炜祺(1998—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网接地故障分析与保护; E-mail: zwq2121@qq.com

王连辉(1976—), 男, 本科, 高工, 研究方向为电网建设管理; E-mail: huangchaoyi@qq.com

薛永端(1970—), 男, 博士, 教授, 研究方向为配电网接地故障分析与保护、配电网触电与电气安全防护等。
E-mail: xueyd70@126.com

(编辑 魏小丽)