

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200630

# 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

刘战磊, 曾祥君, 喻 锐, 刘斯琪, 李 理, 胥鹏博

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 现有配电网单相接地故障保护技术在高阻接地故障时无法可靠启动, 选相与选线结果易受三相不对称的影响。针对这一问题, 提出了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。在三相不平衡过电压动态抑制的基础上, 分析了故障前后注入电流与馈线零序电流特征。根据故障发生后注入电流变化量特点构建了接地故障动态感知判据, 利用注入电流变化量的相角与幅值分别进行故障相识别与过渡电阻计算, 通过比较各馈线零序电流变化量有效值进行故障选线。通过 PSCAD/EMTDC 仿真软件对所提方法进行验证, 结果表明所提方法能够准确识别高阻接地故障, 选相与选线结果不受三相不平衡与系统对地电容大小影响。

**关键词:** 三相不平衡; 单相接地故障感知; 故障相识别; 故障选线

## A new method of single-phase grounding fault protection for a resonant grounding distribution network based on unbalanced overvoltage dynamic suppression

LIU Zhanlei, ZENG Xiangjun, YU Kun, LIU Siqi, LI Li, XU Pengbo

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

**Abstract:** The existing single-phase grounding fault protection method for distribution network cannot be reliably started when a high resistance grounding fault occurs. The results of fault phase selection and fault line selection are greatly affected by three-phase imbalance. To solve the above problem, a new method of single-phase grounding fault protection for a resonant grounding distribution network based on unbalanced overvoltage dynamic suppression is proposed. Based on the dynamic suppression of a three-phase unbalanced overvoltage, the characteristics of injection current and feeder zero sequence current before and after the phase-to-ground fault are analyzed. Given the characteristics of the injection current variation, the dynamic perception criterion of grounding fault is constructed. The fault phase selection and the transition resistance calculation are carried out by adopting the phase and root-mean-square value of the variation respectively and the fault line selection is carried out by comparing the amplitude of the zero-sequence current variation for each feeder. The PSCAD/EMTDC simulation results show that the proposed method can be started accurately for a high resistance ground fault, and the results of phase selection and line selection are not affected by the three-phase imbalance and the capacitance to ground.

This work is supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (No. 51737002 and No. 51807012).

**Key words:** three-phase imbalance; phase-to-ground fault perception; fault phase selection; fault line selection

## 0 引言

我国配电网覆盖面广, 结构复杂, 由于线路不

换位等原因引起的线路三相对地导纳不对称问题长期存在<sup>[1-2]</sup>。高阻接地故障如树障、导线跌落马路、草地等在配电网频繁发生, 由于故障点过渡电阻大, 这类故障的电气量特征不明显<sup>[3-6]</sup>。此时三相不对称对故障后电气量特征的影响无法忽略<sup>[7]</sup>, 使高阻接地故障的检测与处理更加困难, 导致高阻接地故障点

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(51737002, 51807012); 湖南省教育厅科技项目资助(18k047)

长期存在而无法被检测,危害配电网及人身安全<sup>[8-9]</sup>。在谐振接地方式下,三相对地导纳不对称引起的三相电压不平衡还会得到进一步放大成为不平衡过电压,严重的不平衡过电压能够造成零序电压继电器误启动<sup>[10-11]</sup>,在一定程度上影响配电网的稳定运行。

对于谐振接地配电网三相对地导纳不对称引发的中性点不平衡过电压,传统方法主要通过适当增加补偿回路的阻尼率并使消弧线圈尽可能远离谐振点来降低正常运行时的中性点位移电压<sup>[12-14]</sup>。但该方法无法对配电网参数的动态变化进行实时跟踪,难以实现中性点位移电压的动态抑制。近年来随着电力电子技术的发展,采用有源逆变装置灵活改变中性点电压是对谐振接地配电网中性点位移电压进行动态抑制的新方法<sup>[1,15-16]</sup>。这类方法能够在系统参数发生变化时动态调节注入电流使中性点位移电压抑制到 0,从而消除不平衡过电压。但投入装置后位移电压始终被抑制为 0,此时若发生单相接地故障,零序电压继电器将无法根据零序电压越限启动,影响单相接地故障的及时感知与处理。

针对配电网三相对地导纳不对称对单相接地故障保护的影响,目前多数研究主要集中在三相对地导纳不对称对故障选相的影响<sup>[17]</sup>,而关于三相对地导纳不对称对故障选线的影响研究较少。文献<sup>[18-19]</sup>分析了不对称配电网发生单相接地故障时中性点电压的移动轨迹,通过检测故障前后三相电压幅值与相位的变化量消除了三相不对称度对选相的影响,但该方法需要已知系统的补偿状态,现场实施困难。文献<sup>[20]</sup>通过分析故障前后各馈线三相电流变化量得出健全馈线三相电流变化量基本一致的结论,故障馈线中故障相电流变化量大于非故障相,基于此构建了故障选相与故障选线方法。文献假设三相负荷电流不变,但高阻接地故障暂态过程时间长,负荷电流对电流变化量的影响无法完全忽略。文献<sup>[21]</sup>在传统零序导纳选线法的基础上将暂态过程中测量得到的特征频率零序导纳与工频零序导纳结合进行故障选线,但未考虑三相不平衡对馈线零序导纳的影响。文献<sup>[22]</sup>通过注入信号的方式,根据各馈线流过注入信号的大小进行选线。但注入信号的流通回路受馈线不对称度以及过渡电阻的影响较大,当某一健全馈线的不对称度较大时,流过该馈线的注入信号甚至大于故障馈线中流过的注入信号。

针对以上各种技术在处理三相对地不对称对配电网影响中存在的局限性,本文将三相不平衡过电压动态抑制与接地故障保护结合,利用故障后注入电流变化量的有效值和相角与过渡电阻间的关系实现接地故障的动态感知与故障选相;同时根据注入

电流变化量在各馈线上的流通关系实现故障选线。最后通过 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建典型配电网模型进行仿真,验证了本文所提方法的有效性。

## 1 基于不平衡过电压动态抑制的接地故障保护原理

### 1.1 不平衡过电压动态抑制原理

配电网三相不平衡过电压动态抑制是通过在中性点并联有源逆变注入装置注入零序电流  $i_i$ ,将中性点电压抑制到 0 来实现,原理如图 1 所示。其中,  $\dot{E}_A$ 、 $\dot{E}_B$ 、 $\dot{E}_C$  分别为三相电源电动势,  $\dot{U}_0$  为零序电压,  $Y_{X1} = g_{X1} + j\omega C_{X1}$  ( $X = A, B, C$ ) 分别为馈线 1 三相的对地导纳,  $g_{X1}$  和  $C_{X1}$  分别为馈线 1 三相的对地电导与对地电容,  $Y_{Xn} = g_{Xn} + j\omega C_{Xn}$  ( $X = A, B, C$ ) 分别为馈线  $n$  三相的对地导纳,  $g_{Xn}$  和  $C_{Xn}$  分别为馈线  $n$  三相的对地电导与对地电容,  $Y_N$  为中性点接地导纳,  $g_f$  为故障点过渡电导。

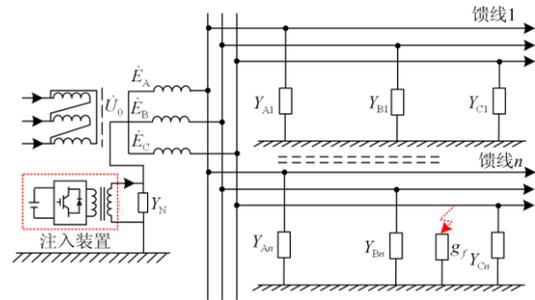


图 1 三相不平衡过电压动态抑制原理

Fig. 1 Three-phase unbalanced overvoltage dynamic suppression principle

谐振接地配电网中  $Y_N = 1/j\omega L$ , 三相对地导纳不对称下, 中性点电压也即零序电压  $\dot{U}_0$  为

$$\dot{U}_0 = \frac{Y_A + Y_B + Y_C}{Y_N + Y_A + Y_B + Y_C} \dot{U}_{bd} = -\frac{jd-1}{jd-\nu} \dot{U}_{bd} \quad (1)$$

$$\dot{U}_{bd} = \frac{-(\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C)}{Y_A + Y_B + Y_C} = -\dot{E}_A \dot{k}_S \quad (2)$$

式中:  $\dot{U}_{bd}$  为配电网线路对地导纳不对称产生的不平衡电压;  $Y_A$ 、 $Y_B$ 、 $Y_C$  分别表示配电网所有馈线的 A、B、C 三相等效对地导纳;  $\dot{k}_S = \frac{Y_A + a^2 Y_B + a Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}$

为配电网的不平衡度,  $a = e^{j120^\circ}$  为相量算子;

$d = \frac{(g_A + g_B + g_C)}{\omega(C_A + C_B + C_C)}$  为系统阻尼率, 配电网的正常

阻尼率在 2%~5% 之间, 馈线受潮或绝缘破损时可达

10%<sup>[10-11]</sup>;  $\nu$  为系统脱谐度, 配电网通常在过补偿且靠近谐振点的情况下运行 ( $-15\% < \nu < 0$ )。当  $d = 5\%$ ,  $\nu = -1\%$  时, 中性点产生的不平衡过电压可达系统不平衡电压的 20 倍, 因此, 必须对谐振接地系统不平衡过电压进行抑制。

通过有源逆变装置向中性点注入电流  $\dot{I}_i$ , 零序电压与注入电流的关系为

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{I}_i}{Y_N + Y_A + Y_B + Y_C} + \frac{Y_A + Y_B + Y_C}{Y_N + Y_A + Y_B + Y_C} \dot{U}_{bd} \quad (3)$$

当抑制不平衡过电压为 0 时, 注入电流满足:

$$\dot{I}_i = \dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C \quad (4)$$

此时, 馈线  $n$  的零序电流  $\dot{I}_{0n}$  为

$$\dot{I}_{0n} = \dot{E}_A Y_{An} + \dot{E}_B Y_{Bn} + \dot{E}_C Y_{Cn} \quad (5)$$

由式(4)、式(5)可得到如下结论:

1) 抑制三相不平衡过电压为 0 时注入电流与系统中性点接地导纳无关, 仅受系统三相对地导纳的影响, 当某一馈线三相对地导纳完全对称时, 注入电流与该馈线的对地导纳无关, 当对地导纳不对称的馈线退出或投入运行时, 系统三相对地导纳随之变化, 注入电流也将变化。

2) 即使不平衡过电压被抑制到 0, 馈线仍可能存在零序电流, 且该零序电流受三相对地导纳不对称度影响, 仅当馈线完全对称时馈线零序电流为 0。

## 1.2 故障保护原理

现有配电网接地故障保护以零序电压超过 15% 相电动势作为接地故障保护的启动量<sup>[23]</sup>。在不平衡过电压动态抑制下, 发生接地故障后零序电压仍然为 0, 现有接地故障保护方法无法启动并进行接地故障处理, 因此, 本文提出了不平衡过电压动态抑制与接地故障处理结合的单相接地故障保护方法。

根据式(4), 若配电网中发生单相接地故障, 则故障相的对地导纳必然发生变化, 注入电流也将随之变化, 且变化量与对地导纳变化量有关, 因此, 可以监测注入电流的变化量, 当注入电流的变化量超过设定阈值即可判断系统发生单相接地故障。

如图 1 所示, 当馈线  $n$  的 C 相经过渡电导  $g_f$  发生单相接地故障, 仍将零序电压抑制到 0 时注入电流为

$$\dot{I}_i = \dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C + \dot{E}_C g_f \quad (6)$$

故障馈线  $n$  与健全馈线  $m$  的零序电流为

$$\dot{I}_{0n} = \dot{E}_A Y_{An} + \dot{E}_B Y_{Bn} + \dot{E}_C Y_{Cn} + \dot{E}_C g_f \quad (7)$$

$$\dot{I}_{0m} = \dot{E}_A Y_{Am} + \dot{E}_B Y_{Bm} + \dot{E}_C Y_{Cm} \quad (8)$$

根据式(4)一式(8)可以看到, 故障后健全馈线零

序电流不变, 而注入电流与故障馈线零序电流随过渡电阻变化并具有相同的变化量, 该变化量即为过渡电导上流过的电流。

$$\Delta \dot{I}_i = \dot{E}_C g_f \quad (9)$$

由此可以实现单相接地故障的动态感知与故障选线: 当注入电流变化量超过整定值即可判断发生单相接地故障, 并比较各馈线零序电流变化量, 变化量最大的馈线即为故障馈线。接地故障动态感知判据与故障选线判据分别如式(10)、式(11)所示。

$$\Delta I_i > \lambda \quad (10)$$

$$K_m = \frac{\Delta I_{0m}}{\max\{\Delta I_{01}, \dots, \Delta I_{0n}\}} = 1 \quad (11)$$

式中:  $\lambda$  为接地故障动态感知判据的整定值, 具体取值在后续进行讨论;  $K_m$  为馈线  $m$  的零序电流变化量与所有馈线中零序电流变化量最大值的比值; 馈线  $m$  的零序电流变化量为  $\Delta I_{0m}$ 。

另外, 由式(9)可以看到, 注入电流变化量相角与故障相电动势相角一致, 有效值为相电动势与过渡电导的乘积。由此得到故障选相判据与过渡电阻  $R_f$  的计算方法分别如式(12)、式(13)所示。

$$\Delta \theta_\varphi = \left| \arg \frac{\Delta \dot{I}_i}{\dot{E}_\varphi} \right| \leq \alpha \quad (12)$$

$$R_f = \frac{1}{g_f} = \frac{E_\varphi}{\Delta I_i} \quad (13)$$

式中:  $\Delta \theta_\varphi$  表示注入电流变化量与  $\dot{E}_\varphi$  相角差的绝对值;  $\dot{E}_\varphi$  ( $\varphi = A, B, C$ ) 表示三相电源电动势。

对于故障相电动势  $\dot{E}_C$ , 理论上  $\Delta \theta_C = 0$ 。考虑测量误差与注入电流误差, 增加整定阈值  $\alpha$ , 由于三相电源电动势相差  $120^\circ$ , 因此  $\alpha$  的取值应小于  $60^\circ$ 。

## 1.3 影响保护可靠性的因素分析

除发生单相接地故障外, 负荷不对称、馈线投切也会影响系统不对称度, 从而使注入电流发生变化, 因此, 需要对可能引起注入电流变化的非故障情况对保护误动的影响进行讨论。

### 1.3.1 负荷不对称对接地故障动态感知的影响

负荷不对称是导致配电网三相不平衡的常见因素。在配电网中负荷接在低压变压器二次侧, 当三相负荷不严格对称时会在变压器二次侧的对应部分产生零序电流。但配电网变压器二次侧通常采用三角形接线, 不存在零序回路。负荷不对称产生的零序电流不会引起高压侧零序电压的变化, 也不会对注入电流产生影响。因此, 负荷不对称不会对故障动态感知造成影响。

### 1.3.2 馈线投切对接地故障动态感知的影响

配电网正常运行时投入或切除馈线*i*会改变配电网三相的对地导纳, 并引起注入电流变化。

$$\Delta \dot{I}_i = \pm (\dot{E}_A Y_{Ai} + \dot{E}_B Y_{Bi} + \dot{E}_C Y_{Ci}) \quad (14)$$

式中:  $Y_{Ai}$ 、 $Y_{Bi}$ 、 $Y_{Ci}$  分别表示馈线*i*的三相对地导纳; 当投入馈线时取“+”, 切除馈线时取“-”。

配电网馈线分为架空线与电缆线两种。对于电缆线路, 无论是三芯或单芯电缆, 由于各相芯线对于接地的电缆金属外皮都处于平衡位置, 因此, 电缆馈线的不对称度等于0<sup>[20]</sup>。由式(14)可知, 投切电缆馈线时注入电流变化量为 0, 不会对单相接地故障动态感知造成影响。

架空馈线的不平衡度一般不超过 1.5%<sup>[24]</sup>。国网《配电网规划设计技术导则》(DL/T 5729-2016)规定配电网馈线长度小于 20 km, 且架空馈线的电容约为 0.05 μF/km<sup>[25-26]</sup>。此时, 10 kV 配电网投切架空馈线时注入电流变化量最大为

$$\begin{aligned} \Delta I_{i \max} &= |\dot{E}_A Y_{Ai} + \dot{E}_B Y_{Bi} + \dot{E}_C Y_{Ci}| = |\dot{E}_A Y_{\Sigma i} \dot{K}_i| \leq \\ &1.5\% \times 20 \times 3 E_A \omega C_0 \sqrt{1+d_{\max}^2} = \\ &0.9 \times \frac{10^4}{\sqrt{3}} \times 100 \times 5 \times 10^{-8} \times \sqrt{1+0.1^2} \times \pi \approx 0.08 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\dot{K}_i = \frac{(Y_{Ci} + a Y_{Bi} + a^2 Y_{Ai})}{Y_{Ai} + Y_{Bi} + Y_{Ci}} \quad (16)$$

式中:  $\dot{K}_i$  表示线路*i*的不平衡度;  $d_{\max}$  表示正常馈线的最大阻尼率, 由 1.1 节的分析, 此处取 0.1。

由式(15)可知, 10 kV 配电网馈线投切时注入电流变化量最大为 0.08 A, 其他电压等级配电网也可由式(15)进行计算。根据式(9), 当 10 kV 配电网发生 5 kΩ 单相接地故障时注入电流变化量约为 1.2 A, 远大于馈线投切引起的注入电流变化。通过对保护启动值进行适当的整定, 馈线投切对保护的影响也可忽略不计。

综合以上对保护可靠性影响因素分析, 在对接地故障保护启动判据进行整定时, 应躲过投切馈线引起的注入电流最大变化量, 即  $\lambda > 0.08A$ 。理论上将  $\lambda$  设置为大于 0.08 A 的任意值时, 所提接地故障动态感知方法便不会将引起注入电流变化的非故障情况判断为单相接地故障, 从而实现对单相接地故障的可靠动态感知。

## 2 接地故障处理流程

国标 GB/T50064-2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》规定: 6~66 kV 配电网

故障点残流应不超过 10 A。由式(9)可知, 对于 10 kV 配电网, 当过渡电阻小于 577.37 Ω 时故障点电流便大于 10 A, 不利于电弧自行熄灭。因此, 当注入电流变化量不小于 10 A 时, 应减小注入电流到 0。此时由于过渡电阻远小于系统对地阻抗, 系统三相对地导纳不对称对故障选相与故障选线的影响可以忽略不计。减小注入电流到 0 后, 使用现有故障选相法与零序导纳选线法、有功分量选线法等基于稳态量的选线方法也能实现接地故障保护。

基于不平衡过电压动态抑制的配电网单相接地故障保护实现流程如图 2 所示。实现流程如下: 配电网正常运行时对三相不平衡过电压进行动态抑制, 并记录此时的注入电流  $\dot{I}_i$ ; 实时监测注入电流变化量有效值  $\Delta I_i$ , 当  $\Delta I_i > \lambda$  时感知到发生单相接地故障, 启动单相接地故障保护, 否则对记录的  $\dot{I}_i$  进行更新; 接地故障保护启动后判断  $\Delta I_i$  是否大于 10 A, 若大于 10 A 则减小注入电流到 0, 并根据三相电压大小进行选相, 通过馈线零序导纳进行选线; 否则, 等待注入电流达到稳态, 分别比较三相电动势与注入电流变化量的相角, 相角差  $\Delta \theta_\varphi$  小于  $\alpha$  的相即为故障相; 同时比较各馈线零序电流变化量, 零序电流变化量最大的馈线即为故障馈线。

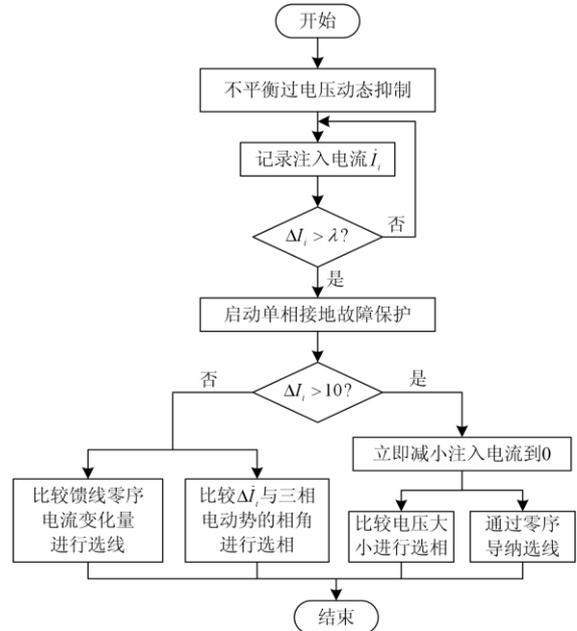


图 2 接地故障保护实现流程

Fig. 2 Realization process of grounding fault protection

## 3 仿真分析

在 PSCAD/EMTDC 仿真环境中搭建如图 3 所示的 10 kV 配电网模型, 对本文提出的基于不平衡

过电压动态抑制的配电网单相接地故障保护新方法进行仿真验证。配电网模型中含有 3 条馈线, 其中馈线 1 为电缆馈线, 馈线 2 和馈线 3 为架空馈线。馈线仿真参数如表 1 所示。

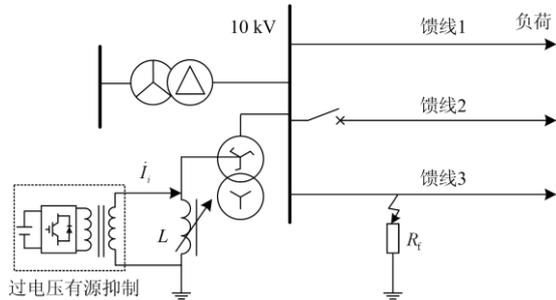


图 3 仿真系统拓扑结构

Fig. 3 Topology of simulation system

表 1 馈线仿真参数

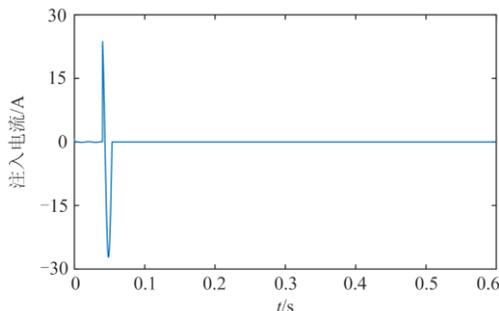
Table 1 Simulation parameters of feeders

项目		馈线 1	馈线 2	馈线 3
相对地电容/ $\mu\text{F}$	A 相	6.23	0.52	0.41
	B 相	6.23	0.48	0.42
	C 相	6.23	0.53	0.43
相对地电阻/ $\Omega$	A 相	25 547	204 040	323 490
	B 相	25 547	249 650	301 340
	C 相	25 547	223 570	323 340

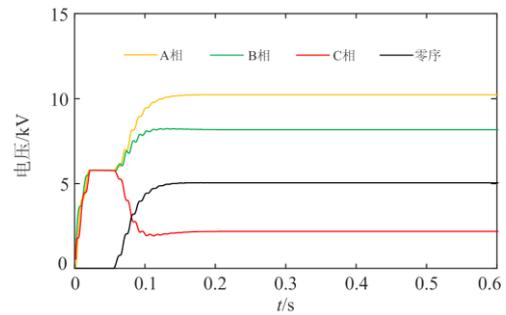
### 3.1 接地故障动态感知与故障选相

设置接地故障动态感知判据的整定值  $\lambda = 0.1 \text{ A}$ , 故障选相整定阈值  $\alpha = 30^\circ$ , 故障在 0.04 s 发生。当馈线 3 的 C 相发生  $300 \Omega$  单相接地故障时, 注入电流波形以及系统电压有效值如图 4 所示。

在 0.04 s 前由于过电压动态抑制零序电压被抑制为 0, 此时注入电流约为 0.01 A。故障发生后, 由于过渡电阻的出现注入电流发生对应变化, 如图 4(a)所示, 此时注入电流变化量超过 10 A, 判断发生单相接地故障。立即减小注入电流到 0 A 后, 故障相电压下降为 2.20 kV, 非故障相电压则出现上升, 如图 4(b)所示。将电压最低相作为选相判据的方法能够准确识别故障相为 C 相。因此, 发生  $300 \Omega$



(a) 注入电流波形



(b) 三相电压与零序电压有效值

图 4  $300 \Omega$  接地故障时注入电流与系统电压有效值

Fig. 4 Injection current and system voltage effective value when grounding fault resistance is  $300 \Omega$

接地故障后减小注入电流到 0, 通过监测三相电压即可准确实现故障选相。

馈线 3 的 C 相经  $8 \text{ k}\Omega$  接地时, 传统没有过电压动态抑制的配电网的电压有效值如图 5 所示。

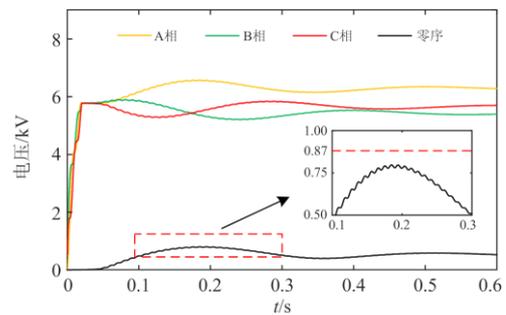


图 5 传统配电网  $8 \text{ k}\Omega$  单相接地故障下系统电压有效值

Fig. 5 System voltage effective value when grounding fault resistance of traditional distribution network is  $8 \text{ k}\Omega$

故障后零序电压最大为 776 V, 小于 15% 的相电压 (866 V), 因此传统故障感知方法未能准确感知发生单相接地故障, 故障将长期存在直至过渡电阻下降至可检测范围内才会被感知并启动保护。此外, 故障后零序电压有效值与系统对地总导纳有关, 随着电缆线路增加以及配电网的扩大, 传统方法对高阻接地故障的感知能力逐渐下降<sup>[19]</sup>。

观察三相电压有效值, 稳态后 C 相电压约为 5.9 kV, 大于相电动势与 B 相电压。这是由于随着过渡电阻的增大, 三相对地导纳不对称对系统零序电压的影响逐渐凸显, 甚至大于过渡电阻对零序电压的影响, 故障相电压小于相电动势的结论将不再适用, 将电压幅值最小相作为故障相的传统选相方法也无法准确选相。此时, 以故障相准确辨识为前提的接地故障处理方法甚至会导致故障性质发生变化<sup>[27-29]</sup>。

对本文所提故障动态感知与故障选相方法进行

验证。馈线3的C相经3kΩ、8kΩ、10kΩ接地时，注入电流变化量的有效值与相角如图6所示。

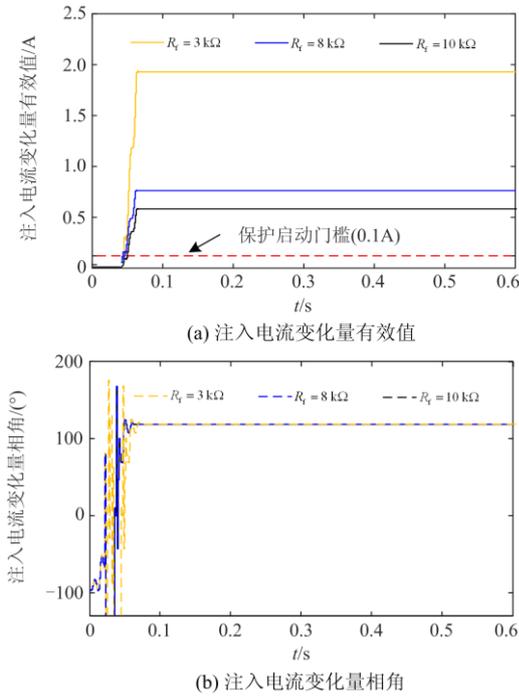


图6 高阻接地故障下注入电流变化量  
Fig. 6 Variation of injection current under high resistance ground fault

由图6(a)可以看到，注入电流变化量有效值随过渡电阻增大而减小，当过渡电阻为10kΩ时约为0.58 A，仍然大于接地故障保护启动门槛，保护能够可靠启动。由图6(b)可以看到，在不同过渡电阻下注入电流变化量的相角基本一致，约为118.68°，与C相电动势的相角差 $\Delta\theta_c=1.32^\circ$ ，远小于故障选相整定阈值 $\alpha=30^\circ$ ，能够准确判断C相发生单相接地故障。与传统故障保护启动判据与故障选相方法相比，本文所提故障动态感知方法不受系统对地总导纳影响，故障选相方法不受过渡电阻影响，注入电流变化量相角始终保持与故障相电动势一致。

馈线3的C相经不同过渡电阻接地以及切除不同馈线时，接地故障动态感知与故障选相结果如表2所示。

由表2可以看出：经不同过渡电阻发生单相接地故障时，所提接地故障动态感知方法均能正确判断发生单相接地故障。当发生低阻300Ω单相接地故障时，由于三相不对称对零序电压的影响很小，此时通过选择电压最低相为故障相能够准确判别故障相；当发生700Ω低阻接地故障以及千欧级高阻接地故障时，通过比较注入电流变化量相角与三相电动势相角准确识别故障相为C相。当切除对地导

纳不对称的馈线时虽能够引起注入电流变化，但通过对保护的整定能够在切除馈线时不启动保护。

表2 不同条件下故障动态感知与故障选相结果

Table 2 Fault dynamic perception and fault phase selection results under different conditions

条件	$\Delta I_i / A$	$\Delta \theta_c / (^\circ)$	$\Delta \theta_b / (^\circ)$	$\Delta \theta_a / (^\circ)$	保护启动	选相结果
$R_f = 300 \Omega$	>10	—	—	—	启动	C
$R_f = 700 \Omega$	8.25	0.64	239.36	119.36	启动	C
$R_f = 1 k\Omega$	5.77	0.48	239.52	119.52	启动	C
$R_f = 3 k\Omega$	1.92	1.33	238.67	118.67	启动	C
$R_f = 8 k\Omega$	0.72	1.32	238.67	118.68	启动	C
$R_f = 10 k\Omega$	0.58	1.32	238.67	118.68	启动	C
$R_f = 15 k\Omega$	0.38	1.32	238.67	118.68	启动	C
切除馈线1	0.00	120	120	0	不启动	—
切除馈线2	0.08	234.86	5.14	114.86	不启动	—
切除馈线3	0.04	83.92	156.08	36.08	不启动	—

### 3.2 接地故障选线

在没有进行不平衡过电压动态抑制时，馈线3发生8kΩ高阻接地故障下，零序电压相角、各馈线零序电流相角及有效值如图7所示。

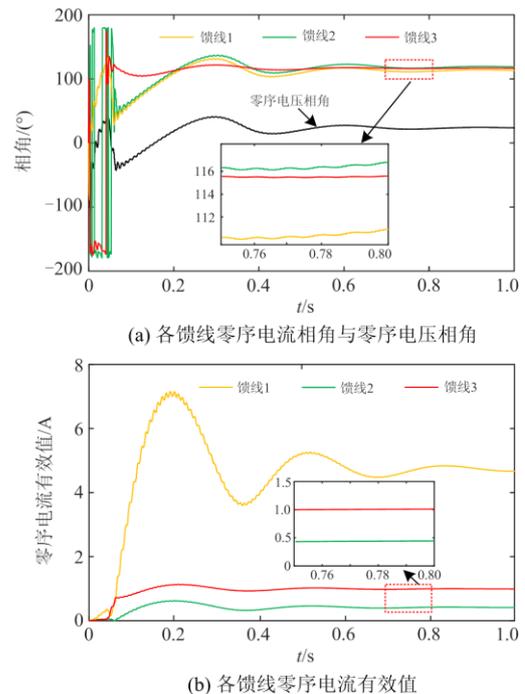


图7 8kΩ高阻故障下馈线零序电流与零序电压变化曲线  
Fig. 7 Change curve of feeder zero sequence current and zero sequence voltage when grounding fault resistance is 8 kΩ

由图 7 可以看出, 当馈线 3 发生 8 kΩ 高阻接地故障时, 馈线 1—馈线 3 的零序电流相角分别为 110.64°、116.17°、115.47°, 馈线 1~馈线 3 的零序电流有效值分别为 4.73 A、0.42 A、0.99 A。由此得到馈线 1~馈线 3 的零序导纳角分别为 88.75°、94.28°、93.58°, 馈线 1—馈线 3 的零序有功电流(零序电流在零序电压方向的投影)分别为 0.10 A、0.03 A、0.06 A。此时, 传统基于零序导纳相角的选线方法将判断馈线 2 与馈线 3 皆为故障馈线。并且由于馈线 1 的零序有功电流最大, 使用有功电流分量的选线方法也会误判馈线 1 为故障馈线。

在馈线 1 与馈线 3 上分别设置 700 Ω、1 kΩ、3 kΩ、8 kΩ、10 kΩ 单相接地故障对本文所提选线方法进行验证。当馈线 3 发生 8 kΩ 高阻接地故障时, 馈线零序电流如图 8 所示。

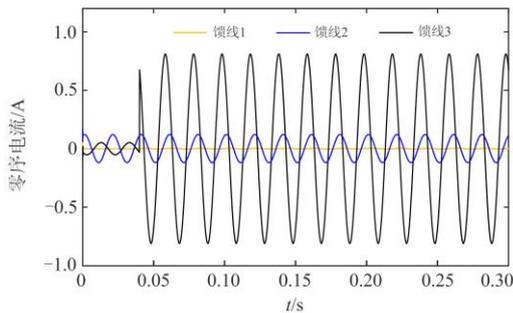


图 8 8 kΩ 高阻接地故障时各馈线零序电流波形  
Fig.8 Zero sequence current waveform of feeders when grounding fault resistance is 8 kΩ

由图 8 可以看出, 在发生故障前, 由于馈线 2 与馈线 3 的三相对地导纳不完全相等, 因此馈线零序电流并不为 0, 这与式(5)的结论一致。发生故障后, 故障馈线零序电流明显增加, 而健全馈线由于馈线对地导纳并未发生变化, 因此零序电流不变, 故障馈线与健全馈线的零序电流具有明显的区分度。通过比较各馈线零序电流变化量能够准确识别故障馈线为馈线 3。

馈线 1 与馈线 3 经不同过渡电阻接地时, 故障选线结果如表 3 所示。

由表 3 可以看出, 不同馈线经同一过渡电阻发生单相接地故障时, 故障馈线零序电流变化量一致, 非故障馈线零序电流变化量为 0。使用所提选线判据计算馈线零序电流变化量与所有馈线中零序电流变化量最大值的比值  $K$ , 故障馈线的计算结果均为 1, 非故障馈线的计算结果均为 0, 使用本文所提故障选线方法能够准确识别故障馈线。

表 3 不同故障条件下选线结果

故障条件		馈线信息					
馈线	$R_f / \Omega$	$\Delta I_{01} / A$	$K_1$	$\Delta I_{02} / A$	$K_2$	$\Delta I_{03} / A$	$K_3$
1	700	8.24	1	0.00	0	0.00	0
	1 000	5.76	1	0.00	0	0.00	0
	3 000	1.91	1	0.00	0	0.00	0
	8 000	0.72	1	0.00	0	0.00	0
	10 000	0.58	1	0.00	0	0.00	0
3	700	0.00	0	0.00	0	8.24	1
	1 000	0.00	0	0.00	0	5.76	1
	3 000	0.00	0	0.00	0	1.91	1
	8 000	0.00	0	0.00	0	0.72	1
	10 000	0.00	0	0.00	0	0.58	1

#### 4 结论

本文提出了基于三相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, 将注入电流变化量有效值越限作为故障动态感知判据; 感知发生单相接地故障后判断注入电流变化量有效值是否超过 10 A 决定是否立即减小注入电流到 0; 需要减小注入电流到 0 时, 使用现有基于稳态量的方法进行故障选相与选线; 不需要减小注入电流到 0 时, 分别计算注入电流变化量相角与三相电动势相角差, 其中相角差最小者对应的相即为故障相; 选相同时比较各馈线零序电流变化量, 零序电流变化量最大的馈线即为故障馈线。最后在 PSCAD/EMTDC 仿真环境中对所提方法的可行性进行了验证, 并得到以下结论:

- 1) 本文所提故障动态感知方法对过渡电阻的感知能力不受系统对地总导纳的影响, 能够有效应对配电网馈线增加以及电缆线路比例增大导致配电网对地总电容增加而引起的过渡电阻识别能力下降的问题。
- 2) 高阻单相接地故障下传统选相与选线方法失效的主要原因是过渡电阻远大于对地总阻抗, 过渡电阻对三相电压与馈线零序电流的影响小于三相不对称对三相电压与馈线零序电流的影响。
- 3) 本文所提选相与选线方法不受系统不对称的影响。故障馈线故障选相与选线方法的判据无需进行复杂的计算, 操作简单, 便于在工程上进行应用。

#### 参考文献

[1] 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.
- [2] 向国杰, 曾祥君, 喻锟, 等. 基于相位差的不对称配电网接地故障选相方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(22): 70-76, 83.
- XIANG Guojie, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. Phase selection method for grounding faults of asymmetric distribution network based on phase difference[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(22): 70-76, 83.
- [3] XIAO Y, OUYANG J, XIONG X, et al. Fault protection method of single-phase break for distribution network considering the influence of neutral grounding modes[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 111-123. DOI: 10.1186/s41601-020-00156-w.
- [4] 熊卫红, 毛兴华, 李景禄, 等. 小电阻接地方式对人身安全的影响及智能电阻接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 166-172.
- XIONG Weihong, MAO Xinghua, LI Jinglu, et al. Influence of small resistance grounding mode on personal safety and research of intelligent resistance grounding mode[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 166-172.
- [5] 董凯达, 蔡燕春, 余群兵, 等. 小电阻接地系统灵活高阻接地保护研究[J]. 广东电力, 2019, 32(1): 109-117.
- DONG Kaida, CAI Yanchun, YU Qunbing, et al. Research on flexible high impedance grounding protection of low-resistance grounded system[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(1): 109-117.
- [6] 王鹏, 张贺军, 徐凯, 等. 主动干预型消弧装置的附加电阻故障选相方法[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 180-186.
- WANG Peng, ZHANG Hejun, XU Kai, et al. Additional resistance based fault phase identification method suitable for active interference arc suppression device[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 180-186.
- [7] GONZALEZ C, TANT J, GERMAIN J, et al. Directional, high-impedance fault detection in isolated neutral distribution grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2474-2483.
- [8] 王磊, 张贺军, 徐铭铭, 等. 基于同步波形与关联规则的单相接地故障诊断[J]. 智慧电力, 2019, 47(10): 112-119.
- WANG Lei, ZHANG Hejun, XU Mingming, et al. Single phase to ground fault diagnosis based on synchronous waveforms and association rules[J]. Smart Power, 2019, 47(10): 112-119.
- [9] 陈景文, 褚恩亮, 李英春, 等. 基于贝叶斯分类器的谐振接地故障选线系统设计[J]. 智慧电力, 2019, 47(8): 99-104, 119.
- CHEN Jingwen, CHU Enliang, LI Yingchun, et al. Design of resonant ground fault line selection system based on bayesian classifier[J]. Smart Power, 2019, 47(8): 99-104, 119.
- [10] 邱涛, 梁英哲, 刘世富. 零序电压 3U<sub>0</sub> 异常问题的分析及处理[J]. 山东电力技术, 2013(5): 44-45.
- YU Tao, LIANG Yingzhe, LIU Shifu. Analysis and countermeasures of abnormality of zero-sequence voltage 3U<sub>0</sub>[J]. Shandong Electric Power, 2013(5): 44-45.
- [11] LIU K, XIANG G, GUO X, et al. Method for suppressing neutral point displacement overvoltage and suppression circuit in distribution network[C] // 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), September 17-19, 2018, Tianjin, China: 1726-1729.
- [12] 林海. 谐振接地电力系统调谐相关问题的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- LIN Hai. Research on tuning related problems of resonant grounding power system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [13] SHIRKOVETS A I, TELEGIN A V, KOCHURA D V. Conditions for effective ground fault suppression in distribution networks with capacitive current compensation[C] // 2016 Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ), 2016, Tallinn, Estonia: 301-307.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 孙立明, 杨博. 蓄电池/超导混合储能系统非线性鲁棒分数阶控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 76-83.
- SUN Liming, YANG Bo. Nonlinear robust fractional-order control of battery/SMES hybrid energy storage systems[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 76-83.
- [17] 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 Wenze, LI Xiaohua. Fault phase

- selection and line selection methods for switch-type arc suppression devices[J]. *Guangdong Electric Power*, 2019, 32(1): 125-131.
- [18] 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[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.
- [19] 赵军, 邓杰文, 胡晨旺, 等. 不对称电网单相接地故障中性点位移电压轨迹分析及应用[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(5): 159-173.  
ZHAO Jun, DENG Jiewen, HU Chenwang, et al. Analysis and application of trajectory of neutral point displacement voltage during single-phase grounding fault in asymmetrical power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(5): 159-173.
- [20] 曾祥君, 王媛媛, 夏云峰, 等. 基于电流采样值相间差的小电流接地系统接地保护方法[J]. *长沙理工大学学报: 自然科学版*, 2006, 3(3):78-83.  
ZENG Xiangjun, WANG Yuanyuan, XIA Yunfeng, et al. Single-phase grounding fault protection with sampled current difference between phases for ineffectively earthed distribution systems[J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology: Natural Science*, 2006, 3(3): 78-83.
- [21] 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.
- [22] ZHANG Y, ZHANG H. Fault line selection for single-phase earthed fault based on injected active component[C] // 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, 2011, Yichang, China: 5270-5273.
- [23] 陈忠仁, 张波, 黄健. 配电网单相接地故障的识别与智能补偿控制[J]. *电瓷避雷器*, 2014(2): 66-70, 76.  
CHEN Zhongren, ZHANG Bo, HUANG Jian. Identification and intelligent compensation control of single-phase grounding fault in distribution network[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2014(2): 66-70, 76.
- [24] 林海雪. 电能质量国家标准系列讲座第 5 讲三相电压不平衡标准[J]. *建筑电气*, 2011, 30(10): 25-29.  
LIN Haixue. Lectures on national standard of power quality lecture five standards of three-phase voltage unbalance[J]. *Building Electricity*, 2011, 30(10): 25-29.
- [25] 杨耿杰, 郭谋发. *电力系统分析*[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [26] 吴玉硕, 杨志华, 贺得王君, 等. 中性点不接地系统单相接地电容电流的工程计算方法[J]. *电气技术*, 2014(9): 108-111, 118.  
WU Yushuo, ZHANG Zhihua, HEDE Wangjun, et al. Engineering calculation method of single-phase grounding capacitance current in ungrounded neutral system[J]. *Electrical Engineering*, 2014(9): 108-111, 118.
- [27] WANG W, ZENG X, YAN L. 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.
- [28] OUYANG S, LIU J, YANG Y, et al. Control strategy for arc-suppression-coil-grounded star-connected power electronic transformers[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(6): 5294-5311.
- [29] CHEN K, ZHANG W, XIAO X. Faulted terminal open circuit voltage controller for arc suppression in distribution network[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2020, 14(14): 2763-2770
- 
- 收稿日期: 2020-06-05; 修回日期: 2020-12-12  
作者简介:  
刘战磊(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 893420985@qq.com  
曾祥君(1972—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: exjzeng@qq.com  
喻 锟(1989—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: 1393009168@qq.com  
(编辑 张爱琴)