

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200780

基于零序电流幅值连调的小电流接地系统故障区段定位方法

刘斯琪¹, 喻 锐¹, 曾祥君¹, 刘战磊¹, 陈小平^{1,2}

(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. 长沙精科电力技术有限公司, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为提高小电流接地系统中利用故障稳态特征实现故障定位方法的准确率和抗过渡电阻能力, 提出基于零序电流幅值连调的单相接地故障区段定位方法。通过注入信号逐次调控中性点电压, 结合各检测区段零序电流特征与过渡电阻、调控系数大小的关系, 确定调控范围。不同程度地放大故障特征, 获取零序电流幅值稳态量。通过叠加特征增强量与设定阈值比较, 从而定位故障区段, 并根据零序电流特征的变化趋势实现高阻故障区段判别。仿真结果表明该方法对于不同过渡电阻值均能准确定位故障区段, 具有较强的适用性。

关键词: 小电流接地系统; 零序电流; 调控系数; 过渡电阻; 故障定位

Fault location method of a non-effective earthed system based on zero sequence current amplitude continuous regulation

LIU Siqu¹, YU Kun¹, ZENG Xiangjun¹, LIU Zhanlei¹, CHEN Xiaoping^{1,2}

(1. Hunan Province Key Laboratory of Smart Grids Operation and Control, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Jingke Electric Power Technology Co., Ltd., Changsha 410114, China)

Abstract: To improve the accuracy of fault location based on a steady-state feature and its resistance to transition resistance in a non-effective earthed system, a fault location method based on amplitude continuous regulation of zero sequence current is proposed. The injected signal is used to flexibly adjust the neutral voltage. Based on the test section of zero sequence current characteristic and the transition resistance, and the size of the adjustment coefficient of relationship, the scope of the regulation is determined. The steady-state amplitude can be obtained by amplifying fault features to different degrees. By superimposing the feature enhancement and comparing with the set threshold value, the fault section is located and the high-resistance fault section is identified according to the variation trend of zero-sequence current characteristics. The simulation shows that this method can eliminate the impact of a false zero-sequence amplitude component caused by three-phase imbalance, and can accurately locate the fault section for different transition resistances, and has strong applicability.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51737002) and the Changsha Science and Technology Project (No. kh1901140).

Key words: non-effective earthed system; zero sequence current; regulation coefficient; transition resistance; fault location

0 引言

国网公司印发的 2020 年重点工作任务中提出全力保障电网安全稳定运行, 推进电网高质量发展。配电网作为近年来建设改造的重点, 为保障其供电可靠性和安全性, 故障发生时需快速准确切除故障^[1-3]。

因此, 研究配电网故障定位技术具有重要意义。

目前, 根据故障定位所使用的信号类型将定位方法主要分为两大类: 1) 利用故障量本身的特征进行故障定位^[4-6]; 2) 通过外加信号完成故障定位^[7-10]。第一类方法受中性点接地方式、过渡电阻和装置灵敏度等因素影响, 在实际应用中效果良莠不齐^[11-15]。在第二类方法中, 除了常用的“S”注入法之外^[16-18], 采用中性点在线注入信号识别单相接地故障的方法也得到了较为广泛的应用。通过中性点向故障系统

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51737002); 长沙市科技计划项目资助(kh1901140)

注入直流电流信号, 对信号寻踪查找故障点, 但注入电流的大小需要依赖检测精度^[19]。文献[20]提出了通过调整逆变器策略, 对配电网注入单一特征信号的故障处理方法, 但高阻接地时, 特征信号流经过渡电阻, 电容的分流作用导致特征信号能量下降, 判别准确度降低。文献[21]利用短时注入电容电流增加故障稳态特征量, 提高了基于故障稳态特征选线定位判据的准确率和抗过渡电阻能力, 该方法仅适用于中性点不接地系统。文献[22]增大注入频率以提高检测的电流水平, 但在接收端用于提取注入频率的带通滤波器会导致测量过程延迟。

基于此, 本文采用注入信号柔性调控中性点电压, 结合各检测区段零序电流特征与过渡电阻、调控系数大小的关系, 确定调控范围, 不同程度放大故障特征获取零序电流幅值稳态量, 叠加特征增强量提高定位精度, 进一步根据各检测区段零序电流特征的变化趋势可定位高阻故障区段。最后搭建仿真模型, 验证了该方法的有效性和适用性。

1 零序电流幅值特征及影响因素分析

1.1 零序电流幅值分布特征

小电流接地系统中 C 相发生金属性接地故障时, 系统等效网络如图 1 所示。

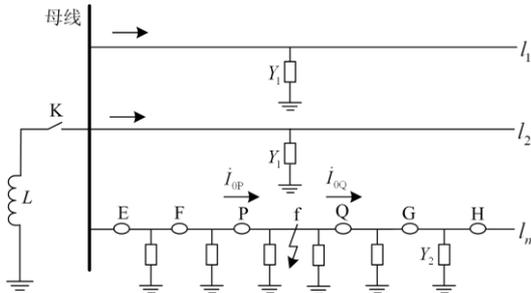


图 1 小电流接地系统等效结构图

Fig. 1 Equivalent structure diagram of non-effective earthed system

图中, K 为接地方式切换开关, L 为消弧线圈电感值, E、F、P、Q、G、H 为沿线检测点, f 为故障发生点。Y₁ 为非故障馈线三相对地分布导纳, Y₂ 表示故障馈线各检测区段的三相对地导纳, \dot{I}_{0P} 、 \dot{I}_{0Q} 分别为流经故障处上下游检测点 PQ 的工频零序电流。以不接地系统为例进行分析, 故障发生后, 上下游检测点零序电流幅值分布与对地参数有关^[18]。流经故障处上下游检测点的零序电流工频分量幅值及幅值比 k 依次为

$$I_{0P} = U_{0f} \sqrt{(G_{\Sigma} + G_{01}l_a - G_{01}l_f)^2 + (\omega C_{\Sigma} + \omega C_{01}l_a - \omega C_{01}l_f)^2} \quad (1)$$

$$I_{0Q} = U_{0f} \sqrt{[G_{01}(l_f - l_a)]^2 + [\omega C_{01}(l_f - l_a)]^2} \quad (2)$$

$$k = \frac{I_{0P}}{I_{0Q}} = \frac{\sqrt{(G_{\Sigma} + G_{01}l_a - G_{01}l_f)^2 + (\omega C_{\Sigma} + \omega C_{01}l_a - \omega C_{01}l_f)^2}}{\sqrt{[G_{01}(l_f - l_a)]^2 + [\omega C_{01}(l_f - l_a)]^2}} \quad (3)$$

式中: l_f 为故障馈线长度; l_a 为故障位置即距离母线出口的长度; U_{0f} 为零序电压; G_{Σ} 、 C_{Σ} 分别为系统总分布电导和电容; G_{01} 、 C_{01} 分别为故障馈线单位长度对地分布电导和电容。图 2 为不同故障馈线长度、故障点位置下 k 的变化趋势。

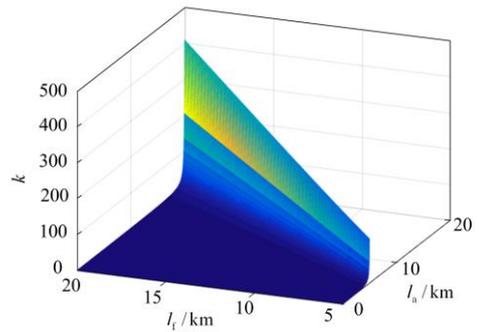


图 2 k 随馈线长度 l_f 和故障位置 l_a 的变化趋势图

Fig. 2 k variation trend chart with l_f and l_a

当故障馈线长度 l_f 越长, 故障区段两端检测点幅值比 k 越大, 即系统总长不变时, l_f 越接近总长, 则上游的范围越大。同时, 随故障位置 l_a 的变化也呈现不同的幅值比, 故障点距离母线出口越远, k 越大。对于非故障区段, 流经的零序电流之差仅为该区段对地等效参数有关, 幅值比接近 1。

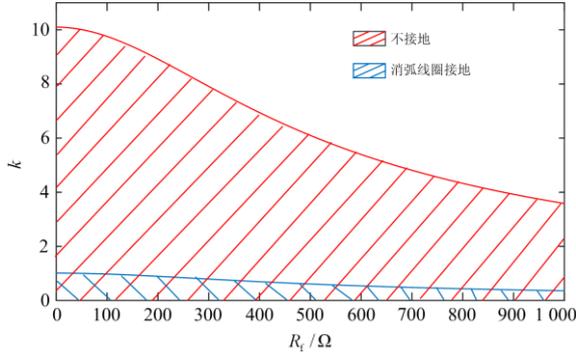
1.2 区段定位影响因素

利用工频零序电流幅值分量的故障定位方法受接地方式和过渡电阻影响较大。根据图 1, K 闭合时, 流经故障点上下游检测点零序电流幅值比为^[23]

$$k_1 = \frac{|\nu \dot{I}_{0\Sigma C} + \dot{I}_{0\Sigma G} - \dot{I}_{0Q}|}{3\sqrt{(1 + G_{\Sigma}R_f)^2 + (\omega C_{\Sigma}R_f)^2} |\dot{I}_{0Q}|} \quad (4)$$

式中: R_f 为过渡电阻; $\dot{I}_{0\Sigma C}$ 、 $\dot{I}_{0\Sigma G}$ 分别为系统总对地电容电流和泄漏电流。考虑脱谐度 $\nu = -5\%$, 故障区段两端零序电流幅值比与过渡电阻的表征关系, 如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 中性点经消弧线圈接地系统由于消弧线圈的补偿作用, 故障区段两端零序电流幅值特征大幅减弱。随着过渡电阻增大, 幅值比 k 逐渐减小, 将难以准确定位故障区段。

图3 不同接地方式下 k 与过渡电阻的关系Fig. 3 Relationship between k and transition resistance under different grounding modes

实际配电网由于对地参数、负荷等因素导致三相不平衡^[24]。当系统 C 相发生接地故障时,此时零序电压为

$$\dot{U}_0 = \frac{-\dot{E}_C (\dot{k}_s + 1/R_f)}{G_\Sigma + j\omega C_\Sigma + (1/j\omega L) + (1/R_f)} \quad (5)$$

式中: \dot{k}_s 为系统不对称矢量和, $\dot{k}_s = \alpha^2 Y_A + \alpha Y_B + Y_C$, $\alpha = e^{120^\circ}$ 。因此,基于零序电流幅值的被动式定位方法还会受到三相不对称引起的虚假零序幅值分量的影响。当过渡电阻过大或不对称程度严重时,存在某个健全区段两侧幅值差异较大的可能,或被误判为故障区段。

2 基于幅值连调的故障区段定位判据

2.1 定位原理

为了增强幅值特征,便于信号检测与采集,通过 PWM 有源逆变装置向小电流接地系统注入可调的零序电流信号,连续调控中性点电压,从而调控故障相电压。图 4 为系统结构原理图。

图中, \dot{E}_A 、 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 为 A、B、C 相电源电压, G_A 、 G_B 、 G_C 、 C_A 、 C_B 、 C_C 为系统的三相对地电导

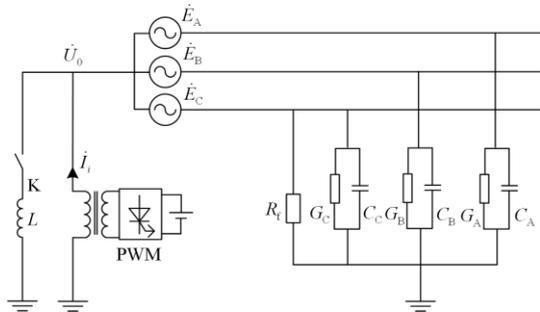


图4 中性点注入信号结构原理图

Fig. 4 Structural schematic diagram of neutral injection signal

和电容, \dot{i}_i 为经 PWM 有源逆变装置注入的零序电流。取 C 相为参考相,当图 4 所示的配电网发生单相接地故障时,中性点电压 \dot{U}_0 与注入电流 \dot{i}_i 关系为

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{i}_i - \dot{E}_C [\dot{k}_s + (1/R_f)]}{G_\Sigma + j\omega C_\Sigma + (1/j\omega L) + (1/R_f)} \quad (6)$$

首先调控中性点电压 $\dot{U}_0 = -\dot{E}_C$, 则故障相电压 $\dot{U}_C = 0$, 实现故障消弧。注入零序电流 \dot{i}_i 值应为

$$\dot{i}_i = -\dot{E}_C (G_\Sigma + j\omega C_\Sigma + (1/j\omega L) - \dot{k}_s) \quad (7)$$

利用 FTU 或故障指示器采集各终端对应的零序电流信号上传主站,对消弧时各区段的零序电流作差并提取幅值。

$$I_{0M0} - I_{0N0} = E_C Y_{MN} \quad (8)$$

式中: M 、 N 为相邻检测点(其中, $N = M + 1$); Y_{MN} 为对地导纳标量和。

延时 5 s 后,改变注入零序电流信号,调控中性点电压,从而调控故障相电压为 λ 倍的故障相电源电压: $\dot{U}_C = \lambda \dot{E}_C$, 此时 $\dot{U}_0 = (\lambda - 1) \dot{E}_C$ 。通过注入信号主动检测,将不依赖发生单相接地故障前后不对称配电网参数的变化,消除三相不平衡产生的虚假零序幅值分量的影响,放大故障特征,同时便于故障稳态分量的采集与测量。考虑到故障相电压和中性点电压不超过 $\sqrt{3}$ 倍相电压,取调控系数 λ 的定义域为 $[0, 1]$ 。根据式(6),对应的注入电流 \dot{i}_i 为此时注入电流信号 \dot{i}_i 。

$$\dot{i}_i = \dot{E}_C \left[(\lambda - 1) [G_\Sigma + j\omega C_\Sigma + (1/j\omega L)] + \frac{\lambda}{R_f} + \dot{k}_s \right] \quad (9)$$

故障消弧延时 5 s 后,调控零序电流一次持续时间为 50 ms,投入补偿消弧 2 s 后改变 λ 值继续调控。在调控过程中存在暂态过程,会出现短时冲击电流。在故障稳态情况下放大故障特征,确定调控系数及调控范围,减小对配电网的不利影响。标准 GB/T 50064-2014 规定 6~66 kV 配电网故障点残流应不超过 10 A^[25]。消弧延时后调控故障相电压大小的系数 λ 满足:

$$\lambda \leq (10R_f / E_C) \quad (10)$$

由式(10)可知,当 $R_f \leq (E_C / 10)$ 时,调控系数 λ 范围为 $[0, 10R_f / E_C]$, 其中 $(10R_f / E_C) \in [0, 1]$; 当 $R_f \geq (E_C / 10)$ 时,调控系数可在整个定义域内取值。调控过程电压相量图如图 5 所示。A、B、C 三相电压分别为 \dot{U}_A 、 \dot{U}_B 、 \dot{U}_C 。

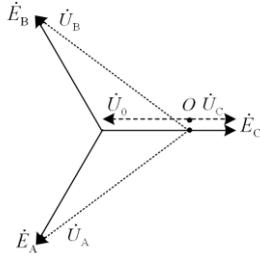


图5 调控过程电压相量图

Fig. 5 Voltage phasor diagram of voltage regulating

图5中,在调控电压过程中,零电位点 O 沿 \dot{U}_0 相量方向移动。故障特征逐步增大,限制非故障相电压上升幅度,降低了非故障相绝缘薄弱处的击穿风险,同时故障电流幅值受到限制,冲击电流较小。对于健全区段,零序电流幅值差异仅与该区段对地参数有关;对于故障区段,除了对地参数还与过渡电阻值相关,因此各区段的零序电流差值幅值为

$$(I_{0Mx} - I_{0Nx})_A = (1 - \lambda_x) Y_{MN} E_C \quad (11)$$

$$(I_{0Mx} - I_{0Nx})_B = D_x E_C \quad (12)$$

式中: $D_x = \sqrt{(1 - \lambda_x)^2 Y_{MN}^2 + \lambda_x^2 / R_f^2 - 2G_{MN} \lambda_x (1 - \lambda_x) / R_f}$, I_{0Mx}, I_{0Nx} 表示第 x 次 $x=(1,2,3,4)$ 调控故障相电压为 λ_x 倍电源电压时 M 、 N 检测点对应的幅值分量,设调控系数间隔值为 $\alpha > 0$, 即 $\lambda_{x+1} = \lambda_x + \alpha$ 。A 表示健全区段, B 表示故障区段。为了使幅值特征最大化,对各检测区段构造故障特征不同程度放大时的幅值特征增强序列:

$$\Delta I_{0MN} = (I_{0M1} - I_{0N1}, I_{0M2} - I_{0N2}, I_{0M3} - I_{0N3}, I_{0M4} - I_{0N4}) \quad (13)$$

建立放大特征下幅值累加策略进行差异性评估,对式(13)中各元素叠加得到各区段的幅值特征增强值为

$$\left(\sum \Delta I_{0MN} \right)_A = (4 - 4\lambda_1 - 6\alpha) Y_{MN} E_C \quad (14)$$

$$\left(\sum \Delta I_{0MN} \right)_B = (D_1 + D_2 + D_3 + D_4) E_C \quad (15)$$

式中, λ_1 表示第一次调控系数。当过渡电阻较小,满足 $R_f \leq (E_C / 10)$ 时,选取初始调控系数 $\lambda_0 = 0$, 调控系数间隔值 $\alpha = 10R_f / 4E_C$, 即 $\lambda_1 = \alpha$ 。当过渡电阻较大,调控范围为 $[0, 1]$ 区间, $\alpha = 0.25$ 。式(14)中健全区段的幅值特征呈递减趋势,考虑健全区段最大幅值特征小于阈值,将式(8)代入,可设定阈值 $\Delta I_{set} = 4(I_{0M0} - I_{0N0}) + \sigma$, 保留一定的裕度 σ , 根据工程现场和检测设备的精确度设定。计算得到的各区段的幅值特征增强值,根据故障馈线零序电流幅值分布特征,选取 $\sum \Delta I_{0MN} > \Delta I_{set}$ 对应的区段为故

障区段。

2.2 定位判据构造及优化

为进一步提高该定位方法适用性,保证高阻故障时的定位准确性,对各区段幅值特征进一步分析。根据图5改变 λ 逐次调控时,故障相电压升高,系统零序电压下降,式(14)中健全区段的幅值特征仅和对地参数有关,其变化趋势相对稳定,呈递减趋势;而故障区段幅值特征受过渡电阻和对地分布参数的影响,在调控过程中呈非线性变化,过渡电阻较低时,零序电流中故障接地电流占主导,随着故障相电压升高,零序电流幅值特征呈非线性递增趋势;过渡电阻较高时,在调控初始阶段故障接地电流较小,随着零序电压下降,零序电流幅值特征减小,当调控系数 λ 增大,故障特征被进一步放大,此时接地电流上升幅度增大,幅值特征变化趋势递增,图6为仿真图中(PQ)区段发生高阻接地故障后的幅值特征变化趋势。

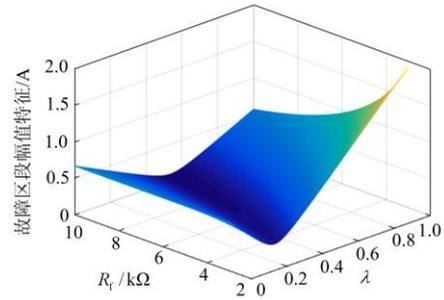


图6 故障区段幅值特征变化趋势图

Fig. 6 Variation trend of fault section amplitude characteristic

因此,定义故障馈线各区段幅值特征在调控过程中的变化值为

$$H(M, N) = \sum_{j=1}^3 [\Delta I_{0MN}(j) - \Delta I_{0MN}(j+1)] \quad (16)$$

式中: j 表示各序列第 j 个元素。将式(11)一式(13)代入式(16)中,分别得到健全区段和故障区段两端的 H 为

$$H_A(M, N) = 3\alpha Y_{MN} E_C \quad (17)$$

$$H_B(M, N) = E_C (D_1 - D_4) \quad (18)$$

式(17)中, $\alpha > 0$, 在调控过程中满足 $H_A(M, N) > 0$, 健全区段的幅值特征变化值为正,即随着调控系数增加,其变化趋势呈递减趋势。式(18)展开得到:

$$H_B(M, N) = \frac{3E_C}{R_f^2} \times \frac{-3\alpha^2(1+b^2) + 2\alpha(b^2+c) - 6\alpha^2c - 2(\alpha+ab^2+2\alpha c)\lambda_1}{D_1+D_4} \quad (19)$$

式中： $b=Y_{MN}R_f$ ； $c=G_{MN}R_f$ 。分母大于零，以 λ_1 为自变量，令式(19)等于0，得到唯一零点：

$$\lambda_{(0)} = \frac{-3\alpha(1+b^2)+2(b^2+c)-6\alpha c}{2(1+b^2+2c)} \quad (20)$$

取式(19)中分子式构造函数 $h(\lambda_1)$ 并求导：

$$h'(\lambda_1) = -2(\alpha + \alpha b^2 + 2\alpha c) \quad (21)$$

由式(21)可以得到： $h'(\lambda_1) < 0$ ，并且满足 $h(1) < 0$ ，因此，在区间 $[\lambda_{(0)}, 1]$ ， $H_B(M,N) < 0$ ，即故障区段幅值特征变化趋势在该调控范围内呈递增趋势。

当过渡电阻较低时，根据上文分析可知幅值特征呈非线性递增趋势，因此在 $[0, 10R_f/E_c]$ 调控范围内满足 $H_B(M,N) < 0$ 。当过渡电阻较大时，使 $\lambda_{(0)} > 0$ ，则选取初始调控系数 $\lambda_0 = \lambda_{(0)}$ ，调控系数间隔值 $\alpha = (1 - \lambda_{(0)})/4$ ，代入式(20)中，由于 $G_{MN} \approx R_f$ ，得到：

$$\begin{cases} \alpha = \frac{3b}{5b^2+10b+5} \\ \lambda_{(0)} = \frac{2(b^2+b)-3\alpha(b^2+2b+1)}{2(1+b^2+2b)} \end{cases} \quad (22)$$

因此，当发生高阻故障时可进一步利用各区段幅值特征将调控过程中的变化趋势判定故障区段。

2.3 区段定位实现流程

本文所提故障区段定位方法由主站、通信单元和变电所终端、馈线终端共同完成。为了选取合适的调控系数，应估算过渡电阻。

$$R_f = \frac{U_f \sqrt{(G_\Sigma \omega^2 L^2)^2 + (\omega^3 L^2 C_\Sigma - \omega L)^2}}{U_0 \left[(G_\Sigma \omega L)^2 + (1 - \omega^2 L C_\Sigma)^2 \right]} \quad (23)$$

式中： U_f 为故障点电压； ω 为工频电角速度。对于配电自动化主站，故障电压、电感值容易得到。目前已有多种方法可测得系统对地分布参数^[26]。在估算过渡电阻时会产生误差，但调控范围仍在 $[0, 1]$ 区间，设定阈值裕度时将过渡电阻的估算误差考虑在内，因此对所提区段定位方法的准确性不会产生影响。文中所提定位方案具体实现步骤如下所述。

步骤 1：监测配电网零序电压，根据零序电压突变特征判定发生单相接地故障，启动故障选线并上报主站结果。

步骤 2：估算过渡电阻，投入补偿装置故障消弧，终端采集各检测点零序电流。

步骤 3：根据过渡电阻选取初始调控系数调控，确定调控范围。

步骤 4：改变注入电流信号，逐次调控中性点电压，各终端提取零序电流幅值特征。计算各区段的幅值特征增强值，选取 $\sum \Delta I_{0MN} > \Delta I_{set}$ 对应的区段为故障区段。

步骤 5：若所有区段 $\sum \Delta I_{0MN} < \Delta I_{set}$ ，根据各区段幅值特征在调控过程中的变化趋势，搜索 $H(M,N) < 0$ 的区段，即为故障区段，反之则判定故障位于线路末端。

3 仿真研究与分析

3.1 仿真结果与分析

图 7 为在 PSCAD/EMTDC 中搭建的 10 kV 配电网仿真模型。考虑线路阻抗和三相分布参数的不对称，设置系统阻尼率为 1.8%，不对称度为 3.81%。馈线为架空线路，系统三相对地参数分别为： $C_A = 2.93 \mu\text{F}$ 、 $C_B = 2.58 \mu\text{F}$ 、 $C_C = 2.86 \mu\text{F}$ ， $R_A = 210.26 \text{ k}\Omega$ 、 $R_B = 227.79 \text{ k}\Omega$ 、 $R_C = 205.34 \text{ k}\Omega$ 。馈线参数为： $l_1 = 20 \text{ km}$ 、 $l_2 = 15 \text{ km}$ 、 $l_3 = 18 \text{ km}$ 、 $l_4 = 15 \text{ km}$ 。按测量装置划分各区段，消弧线圈按过补偿 10% 计算，则 L 值为 1.1 H。

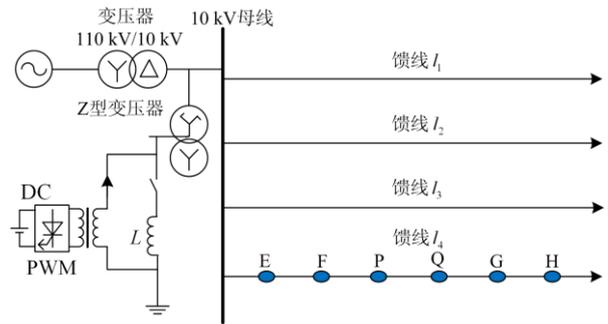


图 7 仿真拓扑结构图

Fig. 7 Topological structure of simulation mode

设定中性点经消弧线圈接地系统在 0.05 s 时刻 l_4 线路发生单相接地故障，E,F,P,Q,G,H 检测点将馈线划分为各个区段。0.1 s 投入补偿装置故障消弧，0.2 s 逐次调控中性点电压，分别对不同故障位置、不同接地电阻进行仿真，表 1 为各区段的零序电流幅值特征增强值及定位结果。仿真设定阈值 $\Delta I_{set} = 4$ 。

由表 1 可以看出，接地电阻较小时，故障区段的零序电流幅值特征值较大，大于文中所设定阈值，非故障区段特征值均小于阈值，从而可以准确判别故障区段。但随着过渡电阻的增加， $R_f > (E_c/10) = 578 \Omega$ 时，故障区段幅值特征将有大于阈值的可能，需进一步分析其变化趋势。当过渡电阻等于 1 k Ω 、5 k Ω 和 10 k Ω ，计算得到的初始调控系数分别为 0，

0.024, 0.34, 对应的调控系数间隔值 α 分别为 0.25, 0.244, 0.15, 计算各区段幅值特征在调控过程中的变化值 H , 结果如表 2 所示。非故障区段幅值特征变化趋势相对稳定, 且呈递减趋势, 变化值大于零, 而故障区段的趋势变化值小于零, 定位结果正确。

表 1 幅值特征增强值及定位结果

Table 1 Enhancement value and locating results

故障区段	R_f	$\Sigma\Delta I_{EF}$	$\Sigma\Delta I_{FP}$	$\Sigma\Delta I_{PQ}$	$\Sigma\Delta I_{QG}$	$\Sigma\Delta I_{GH}$	结果
E,F	10 Ω	5.64	3.01	2.63	2.31	2.68	正确
	200 Ω	6.21	2.61	2.28	1.96	2.33	正确
	500 Ω	6.83	1.68	1.34	1.16	1.37	正确
	1 k Ω	4.13	1.35	1.11	0.99	1.12	正确
P,Q	10 Ω	2.63	3.02	5.63	2.31	2.68	正确
	200 Ω	2.28	2.61	6.21	1.96	2.33	正确
	500 Ω	1.34	1.69	6.83	1.16	1.37	正确
	1 k Ω	1.12	1.35	4.11	0.99	1.12	正确
末端	10 Ω	2.65	3.02	2.64	2.31	2.68	正确
	200 Ω	2.30	2.62	2.28	1.96	2.33	正确
	500 Ω	1.38	1.70	1.34	1.16	1.37	正确
	1 k Ω	1.09	1.35	1.12	0.99	1.12	正确

表 2 幅值特征变化值及定位结果

Table 2 Variation value and locating results

故障区段	R_f	H (E,F)	H (F,P)	H (P,Q)	H (Q,G)	H (G,H)	结果
E,F	1 k Ω	-1.79	0.66	0.55	0.49	0.56	正确
	5 k Ω	-0.93	0.64	0.54	0.48	0.55	正确
	10 k Ω	-0.38	0.40	0.32	0.29	0.33	正确
P,Q	1 k Ω	0.55	0.66	-1.78	0.49	0.56	正确
	5 k Ω	0.54	0.65	-0.92	0.48	0.55	正确
	10 k Ω	0.33	0.40	-0.39	0.29	0.33	正确
末端	1 k Ω	0.57	0.66	0.55	0.49	0.56	正确
	5 k Ω	0.55	0.66	0.54	0.48	0.55	正确
	10 k Ω	0.34	0.40	0.32	0.29	0.33	正确

表 1 中当单相接地故障发生在故障馈线最末检测点下游时, 各区段幅值特征增强值均小于阈值, 计算 10 Ω 过渡电阻对应各区段幅值变化值 H 分别为: 0.15、0.16、0.18、0.17、0.19, 200 Ω 过渡电阻对应各区段差异值 H 分别为: 0.39、0.33、0.38、0.37、0.39, 500 Ω 过渡电阻对应各区段差异值 H 分别为: 0.48、0.59、0.49、0.44、0.50, 此时各区段幅值特征变化特征均满足 $H(M,N) > 0$, 判定故障点位于馈线末端。

图 8 为区段(P,Q)发生 1 k Ω 接地故障, 故障区段检测点在第一次和第四次调控下的零序电流幅值, 反映幅值特征在调控过程中呈递增趋势。图 9 为高阻故障时故障区段幅值特征的变化值, 若选取

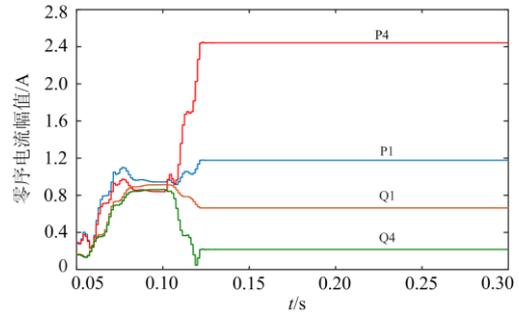


图 8 1 k Ω 过渡电阻故障区段检测点幅值特征

Fig. 8 1 k Ω fault section detecting point amplitude characteristics

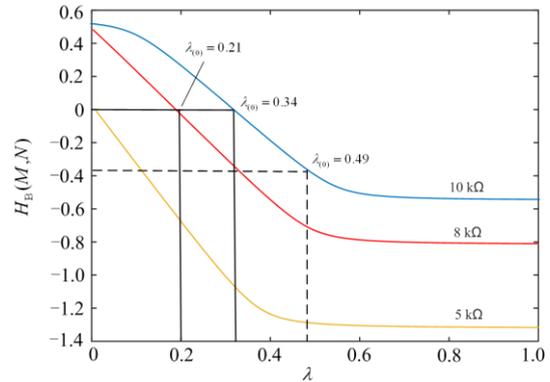


图 9 高阻故障幅值特征变化值

Fig. 9 Amplitude characteristic variation of high resistance fault

初始调控系数大于 $\lambda_{(0)}$, $H_B(M,N)$ 反向增大, 差异对比更明显, 从而提高定位精度。

进一步设置图 7 仿真模型中馈线 l_4 为电缆线路, 对应分布参数为: $C_A=4.65 \mu F$ 、 $C_B=3.90 \mu F$ 、 $C_C=4.35 \mu F$, $R_A=51.3 k\Omega$ 、 $R_B=55.65 k\Omega$ 、 $R_C=50.25 k\Omega$ 。该模型根据 2.1 节分析设定阈值 $\Delta I_{set}=6$ 。区段(P,Q)发生不同过渡电阻下单相接地故障后, 仿真结果如表 3、表 4 所示, 定位结果均正确。

表 3 幅值特征增强值及仿真定位结果

Table 3 Enhancement value and simulation location results

故障区段	R_f	$\Sigma\Delta I_{EF}$	$\Sigma\Delta I_{FP}$	$\Sigma\Delta I_{PQ}$	$\Sigma\Delta I_{QG}$	$\Sigma\Delta I_{GH}$	结果
P,Q	200 Ω	3.45	2.67	8.22	4.38	3.45	正确
	500 Ω	2.57	2.05	8.28	3.11	2.60	正确

表 4 幅值特征变化趋势及仿真定位结果

Table 4 Variation value and simulation location results

故障区段	R_f	H (E,F)	H (F,P)	H (P,Q)	H (Q,G)	H (G,H)	结果
P,Q	5 k Ω	0.22	0.18	-0.57	0.27	0.23	正确
	10 k Ω	0.17	0.14	-0.22	0.30	0.18	正确

当故障发生在不同位置时均能够准确判别故障区段,同时仿真表明该定位方法对于中性点不接地系统同样适用,限于篇幅不再详述。

3.2 故障性质判别

设定 0.05 s 时刻区段(P,Q)发生单相接地故障,随后 0.1 s 注入零序电流调控故障相电压为零,故障消弧。如果为瞬时性故障,电弧熄灭后,在系统等效零序回路中,仅有注入的电流信号作为外部激励,根据电路的齐次定理,响应零序电压和注入信号正比例变化,其关系如图 10 所示。

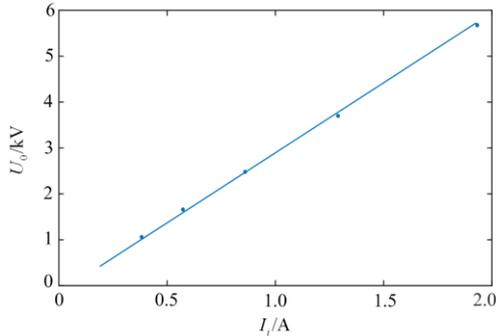


图 10 故障消除后注入电流与零序电压关系

Fig. 10 Relationship of U_0 and I_i after arc suppression

故障消除后,系统存在三相不平衡电压 \dot{U}_{bd} ,根据式(7),抑制 $\dot{U}_{bd}=0$,需向中性点注入的电流为

$$\dot{I}_i = \dot{E}_C k_S = \dot{E}_C (\alpha^2 Y_A + \alpha Y_B + Y_C) \quad (24)$$

因此,图 10 中直线未经过原点。若 0.3 s 注入式(24)所求得的电流值,不平衡电压将被抑制为零,故障馈线零序电流迅速下降,接近于零,同时三相电压强制平衡,电压波形如图 11 所示。

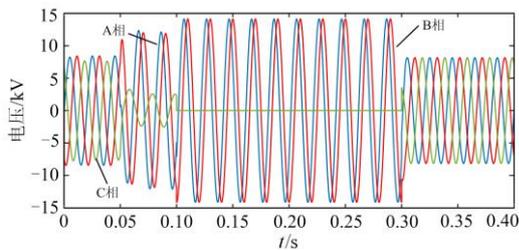


图 11 瞬时性故障三相电压波形

Fig. 11 Three-phase voltage waveform of transient fault

如果接地故障为永久性故障,0.3 s 注入上述电流后,故障特征被放大,幅值大幅增加,变化波形如图 12 所示。进一步改变注入电流信号调控中性点电压时,瞬时性故障和不同过渡电阻永久性故障时馈线零序电流幅值变化如表 5 所示。由表 5 可以看出,若减小注入电流,响应零序电流幅值与注入电

流成线性变化,判断为瞬时性故障,退出装置;如果零序电压和电流减小速度缓慢,不成比例变化,则判断为永久性故障。

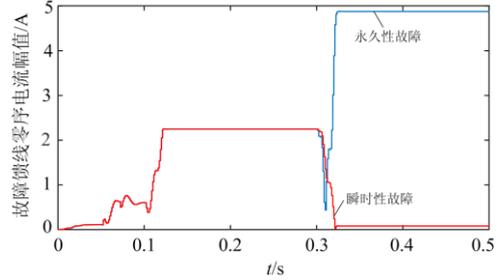


图 12 抑制不平衡电压时 50 Ω 过渡电阻零序电流幅值

Fig. 12 Zero sequence current amplitude of 50 Ω when suppressing \dot{U}_{bd}

表 5 不同故障类型下调控过程中零序电流幅值

Table 5 Zero sequence current amplitude under regulation

注入电流/A	故障馈线零序电流幅值/A			
	故障消除	200 Ω	500 Ω	1 Ω
1.934	4.355	4.492	4.488	4.479
1.289	2.907	4.471	4.430	4.340
0.860	1.942	4.457	4.400	4.271
0.573	1.295	4.450	4.381	4.240
0.382	0.865	4.440	4.370	4.226

4 结论

为提高小电流接地系统中利用故障稳态特征实现故障定位方法的准确性和抗过渡电阻能力,提出了基于零序电流幅值连调的定位方法。该方法和同类故障定位方法相比具有以下优点:

1) 通过注入信号逐次调控中性点电压,放大故障特征,增强可检测性,避免注入单一特征信号在故障苛刻条件下失效,提高了定位准确性;

2) 结合零序电流特征与过渡电阻、调控系数大小的关系,确定调控范围,对注入信号精准调控,根据各区段零序电流特征的变化趋势准确定位高阻故障区段。

本文所提方法采用的装置可以同时实现故障性质判别、定位和消弧,具有很好的实用价值。

参考文献

[1] 苏韵掣,刘俊勇,刘友波,等.大规模中压配电网可靠性建设改造措施优选模型及求解方法[J].电网技术,2017,41(1):201-210.
SU Yunche, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Optimization model of selecting power supply reliability reconstruction measures in large-scale MV distribution network and its

- solution method[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(1): 201-209.
- [2] 邓丰, 李欣然, 曾祥君, 等. 基于多端故障行波时差的含分布式电源配电网故障定位新方法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(15): 4399-4409, 4640.
DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun, et al. A novel multi-terminal fault location method based on traveling wave time difference for radial distribution systems with distributed generators[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(15): 4399-4409, 4640.
- [3] XIAO Yang, OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu, 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] 李卫国, 许文文, 乔振宇, 等. 基于暂态零序电流凹凸特征的配电网故障区段定位方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(10): 164-173.
LI Weiguo, XU Wenwen, QIAO Zhenyu, et al. Fault section location method for a distribution network based on concave and convex characteristics of transient zero sequence current[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(10): 164-173.
- [5] 尤向阳, 葛笑寒, 吴萍. 基于零序电流波形相似度的接地故障定位方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(14): 125-130.
YOU Xiangyang, GE Xiaohan, WU Ping. Grounding fault location method based on waveform similarity of zero-sequence current[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(14): 125-130.
- [6] WANG Xue, ZHANG Hengxu, FANG Shi, et al. Location of single phase to ground faults in distribution networks based on synchronous transients energy analysis[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(1): 774-785.
- [7] 杨以涵, 齐郑. 中压配电网单相接地故障选线及定位技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [8] 张姝, 杨健维, 何正友, 等. 基于线路暂态重心频率的配电网故障区段定位[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(10): 24-28.
ZHANG Shu, YANG Jianwei, HE Zhengyou, et al. Fault section location of the distribution network based on transient center frequency[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(10): 24-28.
- [9] MAJIDI M, ETEZADI A M. A new fault location technique in smart distribution networks using synchronized/nonsynchronized measurements[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, 33(3): 1358-1368.
- [10] 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.
- [11] 杨斌, 张翠娟, 江聪, 等. 加窗小波包变换及其在故障测距中的应用[J]. *高压电器*, 2020, 56(11): 245-250.
YANG Bin, ZHANG Cuijuan, JIANG Cong, et al. Windowed wavelet packet transform and its application in fault location[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(11): 245-250.
- [12] 刘健, 张小庆, 申巍, 等. 中性点非有效接地配电网的单相接地定位能力测试技术[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(1): 138-143.
LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, SHEN Wei, et al. Performance testing of single phase to earth fault location for distribution network with neutral point non-effectively grounded systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(1): 138-143.
- [13] JMALI S, BAHMANYAR A, RANJBAR S. Hybrid classifier for fault location in active distribution networks[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(2): 174-182. DOI: 10.1186/s41601-020-00162-y.
- [14] 薛永端, 李娟, 徐丙垠. 中性点经消弧线圈接地系统小电流接地故障暂态等值电路及暂态分析[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(22): 5703-5714.
XUE Yongduan, LI Juan, XU Bingyin. Transient equivalent circuit and transient analysis of single-phase earth fault in arc suppression coil grounded system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(22): 5703-5714.
- [15] NIU Geng, XIAO Tianying, XIAO Hao, et al. Fast fault location and isolation scheme for active distribution network with effectively earthed neutral[C] // 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific, August 7-10, 2017, Harbin, China: 1-5.
- [16] 周军, 刘娜, 李曙光. 基于等效半波注入法的小电流接地故障选线[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(4): 55-60.
ZHOU Jun, LIU Na, LI Shuguang. Line selection of low current ground fault based on equivalent half wave injection method[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(4): 55-60.
- [17] 唐金锐, 尹项根, 张哲, 等. 配电网故障自动定位技术研究综述[J]. *电力自动化设备*, 2013, 33(5): 7-13.
TANG Jinrui, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Survey of fault location technology for distribution networks[J].

- Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 7-13.
- [18] KRISHNATHEVAR R, NGU E E. Generalized impedance-based fault location for distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 449-451.
- [19] 高志鹏, 张慧芬, 孙旭娜. 注入半波直流的小电流接地故障选线定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 139-145.
GAO Zhipieng, ZHANG Huifen, SUN Xuna. A method of fault line selection and fault point location with half-wave DC injection in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 139-145.
- [20] 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.
- [21] 黄坛坛. 基于注入原理的小电流接地故障选线技术研究[D]. 济南: 济南大学, 2019.
HUANG Tantan. Research on line selection technology of small current grounding fault based on injection principle[D]. Jinan: University of Jinan, 2019.
- [22] FARUGHIAN A, POLUEKTOV A, PINOMAA A, et al. Power line signalling based earth fault location[J]. The Journal of Engineering, 2018(15): 1155-1159.
- [23] 刘伟生, 徐丙垠, 刘远龙, 等. 基于暂态电流的小电流接地故障分界方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(24): 157-162.
LIU Weisheng, XU Bingyin, LIU Yuanlong, et al. Transient current based demarcation method of small current grounding fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24): 157-162.
- [24] 吴俊, 诸军, 沈海平, 等. 配电网三相不平衡度近似计算方法简析[J]. 高压电器, 2019, 55(12): 211-214.
WU Jun, ZHU Jun, SHEN Haiping, et al. Brief analysis of approximate calculation method of three-phase unbalance in distribution network[J]. High Voltage Electrical Equipment, 2019, 55(12): 211-214.
- [25] 王毅, 陈晓红, 刘丰, 等. 配电网电容电流测量新方法[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 150-155.
WANG Yi, CHEN Xiaohong, LIU Feng, et al. A new method for measuring capacitance current in distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 150-155.
- [26] 喻锬, 邹豪, 曾祥君, 等. 谐振接地配电网对地绝缘参数双端谐振测量新方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 154-164.
YUN Kun, ZOU Hao, ZENG Xiangjun, et al. A novel double-terminal resonant measurement method of insulation-to-ground parameters for resonant grounding distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 154-164.

收稿日期: 2020-07-05; 修回日期: 2020-11-26

作者简介:

刘斯琪(1996—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网故障定位和保护; E-mail: 781039403@qq.com

喻锬(1989—), 男, 博士, 讲师, 从事电力系统微机保护与控制的教学和研究开发工作; Email: 1393009168@qq.com

曾祥君(1972—), 男, 博士, 教授, 从事电力系统微机保护与控制的教学和研究开发工作。E-mail: eexjzeng@qq.com

(编辑 姜新丽)