

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240144

基于消弧线圈补偿特性的单相接地故障选线方法

罗建¹, 夏豪¹, 钟加勇², 张林²

(1. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044; 2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123)

摘要: 为解决消弧线圈补偿暂态特性等因素影响下的单相接地故障选线问题, 提出基于消弧线圈补偿特性的单相接地故障选线方法。利用消弧线圈感性电流大于容性电流的情况下故障线路特有的消弧线圈掉相补偿特性, 形成基于消弧线圈掉相补偿特性的选线方法。针对消弧线圈感性电流小于容性电流状况, 利用故障线路电流幅值衰减程度大于非故障线路的消弧线圈衰减补偿特性, 构成基于消弧线圈衰减补偿特性的选线方法。通过适应性仿真分析和现场案例分析表明: 基于消弧线圈掉相补偿特性选线方法可实现单线选线, 且不受零序电流互感器极性错误和高阻接地的影响。基于消弧线圈衰减补偿特性的选线方法也可单线选线且不受零序电流互感器极性错误的影响, 但会受到高阻接地的影响。

关键词: 配网单相接地; 消弧线圈补偿; 故障选线

A single-phase ground fault line selection method based on arc suppression coil compensation characteristics

LUO Jian¹, XIA Hao¹, ZHONG Jiayong², ZHANG Lin²

(1. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Grid Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China)

Abstract: To address the challenges of single-phase ground fault line selection affected by transient characteristics of arc suppression coil compensation, a method based on the compensation characteristics of the coil is proposed. When the inductive current of the coil is greater than the capacitive current, the fault line exhibits a unique change-of-phase compensation characteristic. This is utilized to form a line selection method based on the change-of-phase compensation characteristic of the arc suppression coil. In situations where the inductive current of the coil is less than the capacitive current, the method leverages the attenuation compensation characteristic, where the current amplitude of the fault line decays more significantly than that of non-fault lines. Then a line selection method based on the attenuation compensation characteristic of the coil is constructed. Adaptive simulation and field case analyses show that the line selection method based on the change-of-phase compensation characteristic of the coil can realize single line selection, and is not affected by the polarity errors of the zero sequence current transformer and high-resistance grounding. The line selection method based on the attenuation compensation characteristic of the arc suppression coil can also identify a single fault line and is immune to polarity error of the zero sequence current transformer, though it is affected by high-resistance grounding.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51677011).

Key words: distribution network single-phase grounding; arc suppression coil compensation; fault line selection

0 引言

目前为提高供电可靠性, 众多城市配电网广泛采用中性点经消弧线圈接地系统^[1-2]。由于消弧线圈补偿暂态特性等因素的影响, 消弧线圈接地系统的

单相接地故障选线仍为一个尚须解决的问题。多年以来, 消弧线圈接地系统单相接地故障选线方法主要分为稳态法、暂态法和外部干预法3类。

由于消弧线圈接地系统发生单相接地故障后存在零序接地电流从容性到感性的补偿特性, 传统的稳态零序电流幅值法、稳态零序功率方向法等选线方法处于失效状态。为弥补稳态选线方法的不足, 一

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51677011)

些专家学者以接地故障后的五次谐波、负序电流分布特征为判据提出五次谐波法^[3-4]和负序电流法^[5], 考虑到现场实际提取五次谐波和负序电流的困难, 此类方法难以在实际工程中取得较好的效果。

针对消弧线圈接地系统单相接地故障, 利用补偿前故障线路电流方向与非故障线路相反, 且故障线路电流能量大于非故障线路, 专家学者们给出了比较首半波电流极性的首半波法^[6]、判断补偿前零序功率方向的瞬时零序功率法^[7]和暂态无功功率法^[8]、计算暂态能量差异的暂态能量法^[9]、通过小波变换计算电流能量或极性的小波分析法^[10-12], 这些单相接地故障选线方法的有效性、与暂态信号的正确处理和计算精度相关, 且易受消弧线圈补偿暂态特性和信号干扰等因素的影响。另外, 零序电流互感器极性错误会影响利用极性或方向进行选线方法的有效性, 当某一两回线路电容电流占优时会影响需要计算能量的选线方法的有效性。由于非故障线路零序电流、母线零序电压和线路对地电容满足一定的约束, 利用这种约束关系, 文献[13]给出了一种通过比较零序电流与零序电压导数波形实现选线的方法; 在线路零序导纳已知的前提下, 文献[14]给出了一种通过计算并比较零序导纳来选线的方法。这些依据约束关系的选线方法会受到暂态信号处理方法、高阻接地以及零序电流互感器极性错误等因素的影响。

外部干预法通过注入特定信号或利用外加设备调节系统的运行方式, 增强故障特征, 以实现消弧线圈接地系统单相接地故障的选线, 主要有注入特定频率信号的信号注入法^[15-16], 利用中电阻增强有功电气特征量的中电阻法^[17], 通过调整消弧线圈的补偿度或并入电力电子设备使相关电气量变化, 比较变化差异并选出故障线路的扰动法^[18-19]等。外部干预法不受消弧线圈补偿特性、零序电流互感器极性等因素的影响, 其选线准确性较高, 但对电网运行安全性和设备可靠性有一定的影响。

不依靠外加设备的消弧线圈接地系统单相接地选线方法对于有效选线具有明显的优势, 但受消弧线圈补偿暂态特性、零序电流互感器极性错误、一两回线路电容电流占优、高阻接地等因素的影响, 选线方法的有效性仍需提高。虽然可通过复合不同选线方法来提高选线方法的有效性^[20-23], 但复合手段并未从原理上消除上述因素的影响。为了从原理上尽可能消除消弧线圈补偿暂态特性、零序电流互感器极性错误、一两回线路电容电流占优、高阻接地等因素的影响, 本文提出一种基于消弧线圈补偿特性^[24]的单相接地故障选线方法, 利用单相接地故障线路的消弧线圈补偿特性选择故障线路, 给出了

基于消弧线圈补偿特性单相接地故障选线方法的原理、实现手段、仿真分析和现场案例分析。

1 单相接地故障的补偿特性选线原理

在消弧线圈接地系统发生单相接地故障后, 流经故障点的零序电流由对地电容电流和消弧线圈产生的电感电流组成, 电容电流 i_C 包含暂态振荡分量和稳态工频分量, 如式(1)所示^[25]。

$$i_C = I_{Cm} \left[\left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin \omega_f t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right) e^{-\delta t} + \cos(\omega t + \varphi) \right] \quad (1)$$

式中: I_{Cm} 为电容电流的幅值; ω_f 为暂态自由振荡分量的角频率; δ 为衰减系数; φ 为接地瞬间电源电压的相角; ω 为工频角频率。

电感电流 i_L 如式(2)所示^[25]。

$$i_L = I_{Lm} \left[\cos \varphi e^{-\frac{t}{\tau_L}} - \cos(\omega t + \varphi) \right] \quad (2)$$

式中: I_{Lm} 为电感电流的幅值; τ_L 为电感回路时间常数。

由此, 故障点接地零序电流 i_d 为

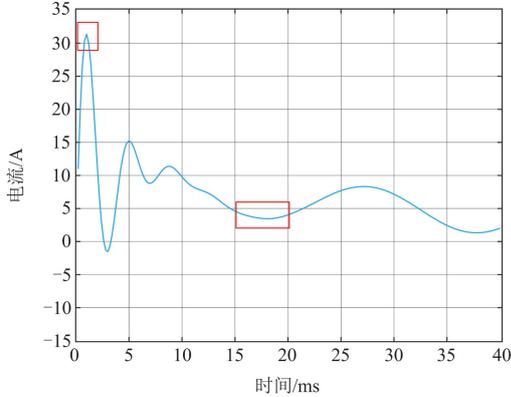
$$i_d = i_C + i_L = (I_{Cm} - I_{Lm}) \cos(\omega t + \varphi) + I_{Cm} \left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin \omega_f t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right) e^{-\frac{t}{\tau_C}} + I_{Lm} \cos \varphi e^{-\frac{t}{\tau_L}} \quad (3)$$

式中: τ_C 为电容回路时间常数。

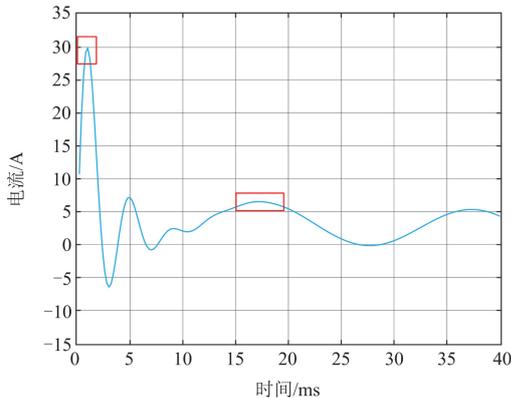
将式(3)代入经验参数后, 可计算感性电流小于容性电流和感性电流大于容性电流时的故障点接地零序电流, 分别如图 1(a)和如图 1(b)所示。将式(1)电容电流 i_C 进行分流反向后可近似计算非故障线路零序电流, 如图 1(c)所示。

由图 1(a)可以看出, 当感性电流大于容性电流时, 20 ms 左右到达波谷, 故障开始阶段接地零序电流两个波峰的间隔约为 30 ms。由图 1(b)可以看出, 在感性电流小于容性电流时, 20 ms 左右接地电流到达波峰, 故障开始阶段接地零序电流两个波峰的间隔约为 20 ms。这是由于在故障初期(0~5 ms), 电容电流和电感电流的频率和幅值相差较大, 两者不能相互抵消, 接地零序电流的相位与电容电流接近, 接地零序电流呈容性。补偿基本完成阶段(15 ms 以后), 电容电流和电感电流的频率趋于相同, 两者能够相互抵消, 在感性电流大于容性电流的情况下, 接地零序电流呈感性。这种零序电流逐渐由容性(零序电流超前于零序电压)向感性(零序电流滞后于零序电压)动态转变的过程, 称为“掉

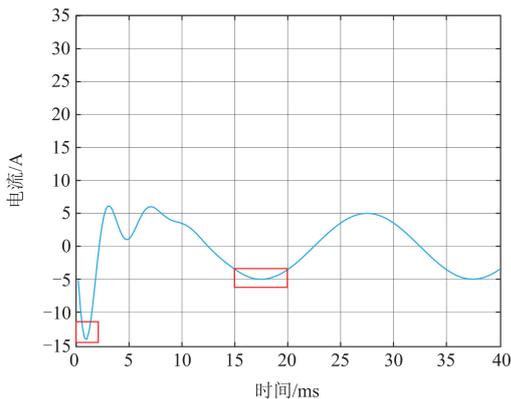
相过程”，此掉相过程是故障线路独有的消弧线圈补偿特性。对于故障线路，可通过故障点接地零序电流观察消弧线圈的掉相补偿特性，也可通过线路出线零序电流观察消弧线圈的掉相补偿特性。



(a) 感性电流大于容性电流时零序电流



(b) 感性电流小于容性电流时零序电流



(c) 非故障线路零序电流

图 1 故障点接地电流

Fig. 1 Fault-point ground current

此外，对于故障线路，在故障初期，接地电流幅值与非故障线路一样由电容电流主导，在补偿基

本完成阶段，电感电流补偿电容电流后的接地电流通常较小，该补偿过程使故障开始时刻的接地电流幅值远大于消弧线圈补偿后的接地电流幅值，存在明显的幅值衰减过程；对于非故障线路，由于没有消弧线圈的补偿作用，非故障线路电流幅值衰减程度小于故障线路。接地电流的这种幅值衰减过程也是消弧线圈补偿时的补偿特性，若能有效计算此衰减补偿特征，可以辅助判断当感性电流小于容性电流时的故障线路。

虽然可通过比较不同时刻零序电流与零序电压之间相位关系来判断零序电流的掉相过程，或通过比较零序电流波峰值来计算幅值衰减程度，但受暂态特性和干扰因素的影响，零序电流与零序电压之间的相位和零序电流波峰位置难以计算，故通过计算分析暂态零序电流的沿线分布来观察和计算消弧线圈的掉相补偿特性和衰减补偿特性。

利用电磁暂态软件 PSCAD/EMTDC，搭建如图 2 所示的 10 kV 配电网仿真模型，图 2 中有 L₁—L₆ 共 6 条出线。在第 4 条电缆馈线上距离母线 8 km 处设置 B 相单相接地故障，依次取线路上距离母线 0 km、3 km、6 km 处作为观测点(图中故障线路上观测点为 M₁、M₂、M₃ 点，非故障线路上观测点为 M'₁、M'₂、M'₃ 点)，采集故障发生后两个工频周期内的零序电流，采样频率为 1.6 kHz。设置故障初相角为 45°，过渡电阻为 10 Ω。相关线路参数如表 1 所示。

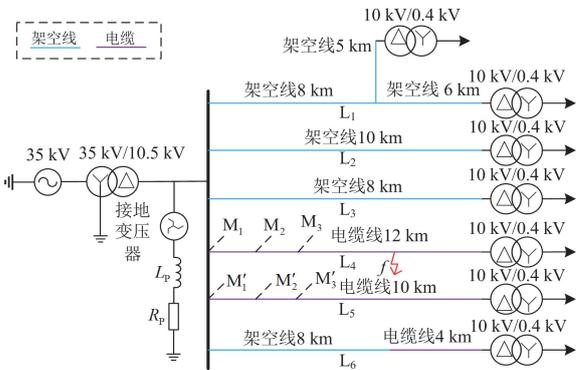


图 2 消弧线圈接地系统仿真模型

Fig. 2 Simulation model of arc suppression coil grounding system

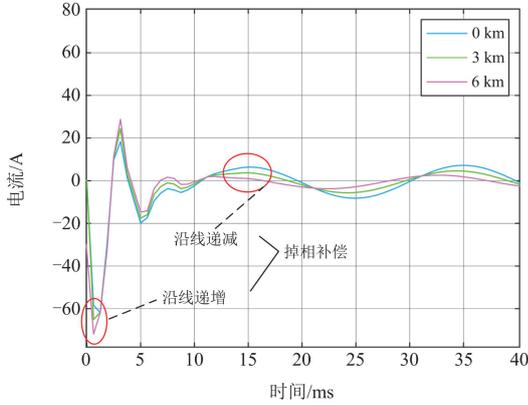
表 1 仿真模型线路参数

Table 1 Circuit parameters of simulation model

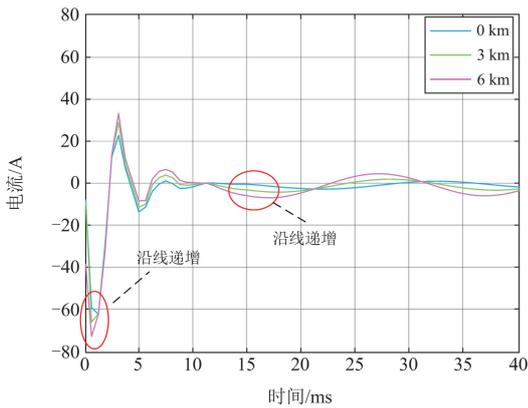
线路类型	正序			零序		
	$R_l/$ (Ω/km)	$X_{L1}/$ (Ω/km)	$X_{C1}/$ (kΩ/km)	$R_0/$ (Ω/km)	$X_{L0}/$ (Ω/km)	$X_{C0}/$ (kΩ/km)
架空线	0.0346	0.423	367.36	0.300	1.14	518.62
电缆	0.0157	0.209	8.16	0.164	1.63	8.16

表 1 中: R_1 、 X_{L1} 、 X_{C1} 、 R_0 、 X_{L0} 和 X_{C0} 分别为单位距离的正序电阻、正序感抗、正序容抗、零序电阻、零序感抗和零序容抗。

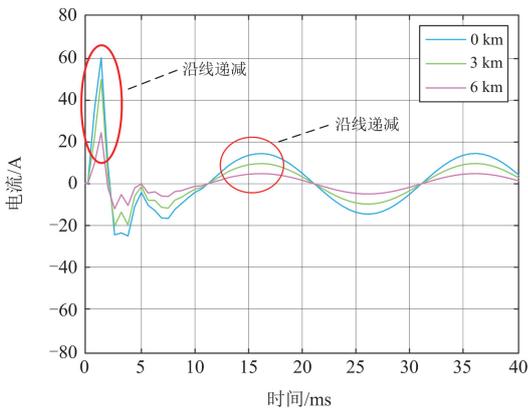
不同补偿度下不同位置的零序电流波形如图 3 所示。



(a) 感性电流大于容性电流时故障线路零序电流(补偿度10%)



(b) 感性电流小于容性电流时故障线路零序电流(补偿度-10%)



(c) 非故障线路零序电流

图 3 不同状态下的不同位置零序电流
Fig. 3 Zero-sequence current under different compensation conditions

由图 3(a)可以看出, 在补偿初期(0~8 ms), 零序电流幅值沿线增大, 在消弧线圈补偿基本完成后(15 ms), 零序电流幅值沿线减小。利用不同时段故障线路零序电流幅值的沿线变化特征, 可捕捉感性电流大于容性电流状况下消弧线圈的掉相补偿特性。由图 3(c)可以看出, 非故障线路零序电流幅值不具备这种沿线变化特征。

对于补偿状态下故障线路的消弧线圈衰减补偿特性, 由图 3 可以看出, 不同时段故障线路零序电流幅值的变化程度大于非故障线路, 利用不同时段零序电流幅值的变化程度大小, 可计算得到故障线路消弧线圈的衰减补偿特性。

由以上可知, 利用线路零序电流幅值的沿线变化特征和不同时段的变化程度, 可以捕捉消弧线圈的掉相补偿特性和计算消弧线圈的衰减补偿特性, 而线路零序电流幅值的沿线变化特征和不同时段变化程度可通过计算不同位置处各个时刻零序电流的幅值获得。

2 基于补偿特性的选线方法

利用消弧线圈的掉相补偿特性和衰减补偿特性判断单相接地故障线路, 需要有效计算线路不同位置各个时刻的零序电流幅值, 再依据线路零序电流幅值的沿线变化特征和不同时段的变化程度选出故障线路。

2.1 线路不同位置零序电流计算

本文采用文献[26]提出的分布参数线路电路模型计算线路不同位置处的零序电流。分布参数线路电路模型将线路视作若干分布参数微元电路的级联, 如图 4 所示。

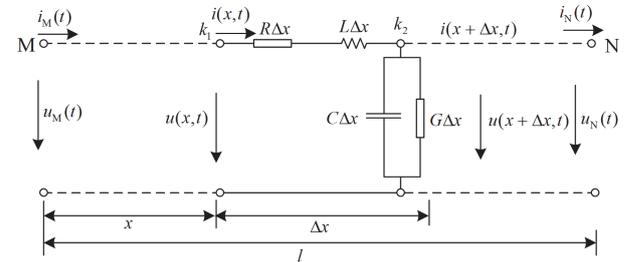


图 4 分布参数线路电路模型

Fig. 4 Circuit model of distributed parametric line

依据分布参数微元电路级联的线路电路模型, 可由一端的电流 $i_M(t)$ 、电压 $u_M(t)$ 计算线路任一点的电流 $i_N(t)$ 、电压 $u_N(t)$, 其表达式为

$$\begin{cases} u_N(t) = u_M(t) - (Rli_M(t) + Lli'_M(t)) + \sum_{j=1}^{\infty} A(j) \\ i_N(t) = i_M(t) - \sum_{j=1}^{\infty} B(j) \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} A(j) = \frac{1}{(2j)!} \sum_{i=0}^j l^{2j} C_j^i R^i L^{j-i} (C^j u_M^{(2j-i)}(t) + G^j u_M^{(2j-i-1)}(t)) - \frac{1}{(2j+1)!} \sum_{i=0}^{j+1} l^{2j+1} C_{j+1}^i R^i L^{j-i+1} \cdot (C^j i_M^{(2j-i+1)}(t) + G^j i_M^{(2j-i)}(t)) \\ B(j) = \frac{1}{(2j-1)!} \sum_{i=0}^{j-1} l^{2j-1} C_{j-1}^i R^i L^{j-i-1} (C^j u_M^{(2j-i-1)}(t) + G^j u_M^{(2j-i-2)}(t)) - \frac{1}{(2j)!} \sum_{i=0}^j l^{2j} C_j^i R^i L^{j-i} (C^j i_M^{(2j-i)}(t) + G^j i_M^{(2j-i-1)}(t)) \end{cases} \quad (5)$$

式中： l 为计算距离； R 、 G 、 L 、 C 分别为单位距离的电阻、电导、电感、电容； $i'_M(t)$ 为 t 时刻M端电流的一阶导； j 为微元级联阶数； $u_M^{(2j-i)}(t)$ 、 $i_M^{(2j-i)}(t)$ 分别为 t 时刻M端电压、电流的 $(2j-i)$ 阶导，其他电压电流上标的含义与之相同。

依据式(4)和式(5)可以计算线路不同位置的零序电流。

2.2 各个时刻零序电流幅值计算

由于消弧线圈补偿阶段是一个暂态过程，其各个时刻零序电流幅值已不能依据稳态幅值计算方法获取，本文采用文献[27]提出的暂态信号正弦表示分析方法来计算提取各个时刻的零序电流幅值。

文献[27]提出将暂态信号 $f(t)$ 表示成幅值和相位都随时间变化的正弦函数，其数学表示为

$$f(t) = A(t) \cos \omega t + B(t) \sin \omega t = A_m(t) \sin[\omega t + \varphi(t)] \quad (6)$$

式中： $A(t)$ 、 $B(t)$ 为关于时间 t 的函数， $A(t) = A_m(t) \sin \varphi(t)$ ， $B(t) = A_m(t) \cos \varphi(t)$ ； $A_m(t)$ 为瞬时幅值； $\varphi(t)$ 为瞬时初相位。

$$\begin{cases} A_m(t) = \sqrt{A(t)^2 + B(t)^2} \\ \varphi(t) = \arctan[A(t)/B(t)] \end{cases} \quad (7)$$

函数形式 $A(t)$ 、 $B(t)$ 表示为

$$A(t) = \sum_{j=0}^N a_j \cdot t^j \cdot e^{-s \cdot t^2} \quad (8)$$

$$B(t) = H[A(t)] \quad (9)$$

式中： H 表示 $B(t)$ 是 $A(t)$ 的希尔伯特变换，其目的是保证暂态信号正弦函数表示的确定性； N 为 $A(t)$

函数多项式阶数； $a_j(j=0,1,2,\dots,N)$ 为一组待定系数； s 为函数 $A(t)$ 的衰减系数。由式(6)、式(8)、式(9)和一段时间内暂态信号 $f(t)$ 的采样值，可计算得到参数 $a_j(j=0,1,2,\dots,N)$ ，进而将暂态信号 $f(t)$ 用正弦函数表示，即可计算暂态信号 $f(t)$ 的瞬时幅值 $A_m(t)$ ，即消弧线圈补偿阶段各个时刻的零序电流幅值。

2.3 消弧线圈掉相补偿特性的捕捉方法

依据2.1节和2.2节的方法，可计算线路不同位置各个时刻的零序电流幅值。在单相接地故障消弧线圈补偿初期(取0~8ms)，计算线路不同位置(取 P 个位置)各个时刻(在0~8ms中取 K_1 个点)的零序电流幅值 $I_{0m,x_1}(t_k), I_{0m,x_2}(t_k), \dots, I_{0m,x_p}(t_k)(k=1, \dots, K_1)$ 。

在消弧线圈补偿基本完成后(15ms)，计算线路不同位置(取 P 个位置)各个时刻(15ms后取 K_2 个点)的零序电流幅值 $I_{0m,x_1}(t'_k), I_{0m,x_2}(t'_k), \dots, I_{0m,x_p}(t'_k)(k=1, \dots, K_2)$ 。

若消弧线圈补偿初期各个时刻的零序电流幅值总体上满足：

$$I_{0m,x_1} < I_{0m,x_2} < \dots < I_{0m,x_p} \quad (10)$$

记 $F(0) = 1$ ；

若总体上满足：

$$I_{0m,x_1} > I_{0m,x_2} > \dots > I_{0m,x_p} \quad (11)$$

记 $F(0) = 0$ 。

若消弧线圈补偿基本完成后各个时刻零序电流幅值总体上满足：

$$I_{0m,x_1} < I_{0m,x_2} < \dots < I_{0m,x_p} \quad (12)$$

记 $F(1) = 1$ ；

若总体上满足：

$$I_{0m,x_1} > I_{0m,x_2} > \dots > I_{0m,x_p} \quad (13)$$

记 $F(1) = 0$ 。

当 $F(0) \neq F(1)$ 时，线路具有消弧线圈掉相补偿特性，即线路为单相接地故障线路。

2.4 消弧线圈衰减补偿特性的计算方法

参照2.3节线路不同位置处各个时刻的零序电流幅值，计算消弧线圈补偿初期的零序电流幅值平均值。

$$\bar{I}_{0m} = \frac{1}{K_1 P} \sum_{k=1}^{K_1} \sum_{p=1}^P I_{0m,x_p}(t_k) \quad (14)$$

式中： \bar{I}_{0m} 为补偿初期的零序电流幅值平均值； $I_{0m,x_p}(t_k)$ 为补偿初期不同位置处各个时刻的零序电流幅值。

然后再计算消弧线圈补偿基本完成后的零序电

流幅值平均值。

$$\bar{I}'_{0m} = \frac{1}{K_2 P} \sum_{k=1}^{K_2} \sum_{p=1}^P I_{0m,x_p}(t'_k) \quad (15)$$

式中： \bar{I}'_{0m} 为补偿基本完成后的零序电流幅值平均值； $I_{0m,x_p}(t'_k)$ 为补偿基本完成后不同位置处各个时刻的零序电流幅值。

给定零序电流幅值衰减变化程度判断比例 D_I ，若满足 $\bar{I}'_{0m} \geq D_I \bar{I}'_{0m}$ ，则认为线路具有明显的衰减补偿特性，此线路为单相接地故障线路；若满足 $\bar{I}'_{0m} < D_I \bar{I}'_{0m}$ ，则认为此线路为非故障线路。

3 仿真分析

3.1 仿真计算案例

在图 2 的仿真模型和参数条件下，利用在母线处采样的电流电压，采用第 2 节的方法分别计算感性电流大于容性电流时的故障线路、感性电流小于容性电流时的故障线路、非故障线路不同位置处各个时刻零序电流的瞬时幅值。

1) 消弧线圈补偿初期阶段

从故障发生后 2.5 ms 开始，每 0.625 ms 取一个点，共取 4 个点，计算每个点不同位置处的零序电流瞬时幅值，见表 2。

2) 消弧线圈补偿基本完成

自故障发生后 15 ms 开始，每 0.625 ms 取一个点，共取 4 个点，计算每个点不同位置处的零序电

流瞬时幅值，见表 3。

3) 消弧线圈掉相补偿特性捕捉

由表 2 可见，对于感性电流大于容性电流的故障线路，在消弧线圈补偿初期不同位置处的零序电流瞬时幅值总体上满足：

$$I_{0m,0km} < I_{0m,3km} < I_{0m,6km} \quad (16)$$

记 $F(0) = 1$ 。

由表 3 可见，对于感性电流大于容性电流的故障线路，在消弧线圈补偿基本完成后不同位置处的零序电流瞬时幅值总体上满足：

$$I_{0m,0km} > I_{0m,3km} > I_{0m,6km} \quad (17)$$

记 $F(1) = 0$ 。

由于 $F(0) \neq F(1)$ ，因此当感性电流大于容性电流时，故障线路具有消弧线圈掉相补偿特性，该线路为单相接地故障线路。

由表 2 可见，对于感性电流小于容性电流的故障线路 $F(0) = 1$ ；对于非故障线路 $F(0) = 0$ 。

由表 3 可见，对于感性电流小于容性电流的故障线路 $F(1) = 1$ ；对于非故障线路 $F(1) = 0$ 。

对于感性电流小于容性电流的故障线路和非故障线路，有 $F(0) = F(1)$ ，由于其没有消弧线圈掉相补偿特性，须计算零序电流幅值衰减变化程度来进一步判断单相接地故障线路。

4) 消弧线圈衰减补偿特性计算

给定零序电流幅值衰减变化程度判断比例 D_I 为 5。

表 2 补偿初期不同位置处零序电流瞬时幅值

Table 2 Instantaneous amplitude of zero sequence current at different positions in the initial stage of compensation

零序 CT 极性	计算线路	计算位置(距母线)/km	零序电流瞬时幅值/A			
			第 1 个点	第 2 个点	第 3 个点	第 4 个点
正	感性电流大于容性电流时故障线路	0	63.45	57.97	53.84	50.58
		3	82.80	71.01	62.40	56.12
		6	104.79	86.8	73.60	64.02
	感性电流小于容性电流时故障线路	0	64.29	58.79	54.2	50.28
		3	83.57	72.36	63.82	57.24
		6	105.66	88.48	75.60	65.97
非故障线路	0	54.86	52.77	51.09	49.79	
	3	51.24	41.84	41.61	41.89	
	6	49.21	41.24	36.19	34.65	
反	感性电流大于容性电流时故障线路	0	63.45	57.97	53.84	50.58
		3	48.50	46.27	43.90	41.56
		6	33.80	32.75	31.22	39.44
	感性电流小于容性电流时故障线路	0	64.29	58.79	54.20	50.28
		3	50.07	45.86	42.07	38.68
		6	45.12	42.71	40.05	37.34
非故障线路	0	54.86	52.77	51.09	49.79	
	3	71.08	65.42	61.05	57.75	
	6	88.14	78.43	71.12	65.69	

表 3 补偿完成后不同位置处零序电流瞬时幅值

Table 3 Instantaneous amplitude of zero sequence current at different positions after compensation is completed

零序 CT 极性	计算线路	计算位置(距母线)/km	零序电流瞬时幅值/A			
			第 1 个点	第 2 个点	第 3 个点	第 4 个点
正	感性电流大于容性电流时故障线路	0	6.04	6.64	7.36	8.17
		3	3.19	3.76	4.45	5.27
		6	2.21	2.5	2.85	3.38
	感性电流小于容性电流时故障线路	0	4.53	4.53	4.83	5.39
		3	7.65	7.35	7.02	6.69
		6	9.90	9.62	9.22	8.69
	非故障线路	0	14.72	14.14	13.54	12.89
		3	11.47	10.83	10.18	9.56
		6	8.21	7.51	6.83	6.25
反	感性电流大于容性电流时故障线路	0	6.04	6.64	7.36	8.17
		3	9.15	9.79	10.53	11.30
		6	11.25	11.92	12.68	13.44
	感性电流小于容性电流时故障线路	0	4.53	4.53	4.83	7.39
		3	2.16	2.89	3.71	4.56
		6	1.27	1.99	1.79	1.60
	非故障线路	0	14.72	14.14	13.54	12.89
		3	17.94	17.44	16.87	16.21
		6	21.13	20.70	20.18	19.50

对于感性电流小于容性电流的故障线路，通过式(14)分别计算 3 个不同位置补偿初期 4 个不同时刻的零序电流幅值平均值为 $\bar{I}_{0m} = 70.02 \text{ A}$ ，通过式(15)计算补偿完成后零序电流平均值为 $\bar{I}'_{0m} = 7.12 \text{ A}$ ，满足 $\bar{I}_{0m} > 5\bar{I}'_{0m}$ ，可判断其为单相接地故障线路。

对于非故障线路，通过式(14)分别计算 3 个不同位置补偿初期 4 个不同时刻的零序电流幅值平均值为 $\bar{I}_{0m} = 45.53 \text{ A}$ ，通过式(15)计算补偿完成后的零序电流平均值为 $\bar{I}'_{0m} = 10.51 \text{ A}$ ，满足 $\bar{I}_{0m} < 5\bar{I}'_{0m}$ ，可判断其为非故障线路。

5) 零序电流互感器极性错误的案例计算

在图 2 的仿真模型和参数条件下，利用母线处的电流电压，将电流取反，采用第 2 节的方法计算感性电流大于容性电流时的故障线路、感性电流小于容性电流时的故障线路、非故障线路不同位置各个时刻的零序电流瞬时幅值，计算结果见表 2 和表 3。

对于感性电流大于容性电流时的故障线路，有 $F(0) = 0$ ， $F(1) = 1$ ，显然 $F(0) \neq F(1)$ ，故障线路具有消弧线圈掉相补偿特性，为单相接地故障线路。

对于感性电流小于容性电流时的故障线路，有 $F(0) = 0$ ， $F(1) = 0$ ；对于非故障线路，有 $F(0) = 1$ ， $F(1) = 1$ 。由于 $F(0) = F(1)$ ，不能判断单相接地故障线路。

对于感性电流小于容性电流时的故障线路，通过式(14)分别计算 3 个不同位置补偿初期 4 个不同时刻的零序电流幅值平均值为 $\bar{I}_{0m} = 47.46 \text{ A}$ ，通过式(15)计算补偿完成后的零序电流平均值为 $\bar{I}'_{0m} = 3.44 \text{ A}$ ，满足 $\bar{I}_{0m} > 5\bar{I}'_{0m}$ ，可判断其为单相接地故障线路。

对于非故障线路，通过式(14)分别计算 3 个不同位置补偿初期 4 个不同时刻的零序电流幅值平均值为 $\bar{I}_{0m} = 63.93 \text{ A}$ ，通过式(15)计算补偿完成后的零序电流平均值为 $\bar{I}'_{0m} = 17.11 \text{ A}$ ，满足 $\bar{I}_{0m} < 5\bar{I}'_{0m}$ ，可判断其为非故障线路。

可以看出，零序电流互感器极性不影响基于消弧线圈补偿特性选线方法的准确性。

3.2 适应性仿真分析

为验证本文所提方法的适应性，在图 2 仿真模型的基础上改变故障条件，分析掉相补偿特性和衰减补偿特性在不同故障条件下的选线结果。

3.2.1 消弧线圈掉相补偿特性分析

1) 故障位置

设置第 4 条馈线 A 相单相接地，过渡电阻为 10Ω ，补偿度为 10%，设置故障分别发生在距离母线 1 km、4 km、8 km 处，利用母线处采集到的零序电流、电压计算 $F(0)$ 、 $F(1)$ ，计算结果如表 4 所示。计算结果表明，掉相补偿特性不受故障距离的影响，选线结果正确。

表 4 故障判据计算结果

Table 4 Calculation results with failure criterion

距母线距离/km	计算线路	$F(0)$	$F(1)$	判断是否故障
1	L ₄	1	0	是
	L ₅	0	0	否
4	L ₄	1	0	是
	L ₅	0	0	否
8	L ₄	1	0	是
	L ₅	0	0	否

2) 故障初相角

依次设置故障初相角为 0°、30°、60°、90°，计算 $F(0)$ 、 $F(1)$ 如表 5 所示。计算结果表明，掉相补偿特性仍不受故障初相角的影响，能够正确选线。

表 5 故障判据计算结果

Table 5 Calculation results with failure criterion

故障初相角/(°)	计算线路	$F(0)$	$F(1)$	判断是否故障
0	L ₄	1	0	是
	L ₅	0	0	否
30	L ₄	1	0	是
	L ₅	0	0	否
60	L ₄	1	0	是
	L ₅	0	0	否
90	L ₄	1	0	是
	L ₅	0	0	否

3) 过渡电阻

设过渡电阻分别为 20 Ω、200 Ω、2000 Ω，故障判据计算结果如表 6 所示。计算结果表明，2000 Ω 以下的过渡电阻对掉相补偿特性没有影响。

表 6 故障判据计算结果

Table 6 Calculation results with failure criterion

过渡电阻/Ω	计算线路	$F(0)$	$F(1)$	判断是否故障
20	L ₄	1	0	是
	L ₅	0	0	否
200	L ₄	1	0	是
	L ₅	0	0	否
2000	L ₄	1	0	是
	L ₅	0	0	否

4) 补偿度

设补偿度分别为-10%、5%、10%、20%，故障判据计算结果如表 7 所示。

计算结果表明，感性电流小于容性电流的情况下没有掉相补偿特性，需要结合衰减补偿特性才能完成故障线路的选线。在感性电流大于容性电流的情况下，选线结果正确。

表 7 故障判据计算结果

Table 7 Calculation results with failure criterion

补偿度/%	计算线路	$F(0)$	$F(1)$	判断是否故障
-10	L ₄	1	1	否
	L ₅	0	0	否
5	L ₄	1	0	是
	L ₅	0	0	否
10	L ₄	1	0	是
	L ₅	0	0	否
20	L ₄	1	0	是
	L ₅	0	0	否

可以看出，在消弧线圈感性电流大于容性电流的情况下，依据掉相补偿特征的选线方法能够不受故障距离、故障初相角、过渡电阻的影响，在不同运行状况下均能准确选出故障线路。

3.2.2 消弧线圈衰减补偿特性分析

在 3.2.1 节所设故障条件下，计算消弧线圈衰减补偿特性，计算结果如下。

1) 故障位置

由表 8 可见，衰减补偿特性不受故障距离的影响，依靠衰减补偿特性也可正确选线。

表 8 故障判据计算结果

Table 8 Calculation results with failure criterion

距母线距离/km	计算线路	$\bar{I}_{0m} / \bar{I}'_{0m}$	判断是否故障
1	L ₄	12.81	是
	L ₅	3.34	否
4	L ₄	9.60	是
	L ₅	3.42	否
8	L ₄	10.24	是
	L ₅	3.59	否

2) 故障初相角

由表 9 可见，衰减补偿特性不受故障初相角影响，能够正确判断故障线路。

表 9 故障判据计算结果

Table 9 Calculation results with failure criterion

故障初相角/(°)	计算线路	$\bar{I}_{0m} / \bar{I}'_{0m}$	判断是否故障
0	L ₄	9.61	是
	L ₅	3.56	否
30	L ₄	8.19	是
	L ₅	2.46	否
60	L ₄	10.28	是
	L ₅	3.14	否
90	L ₄	10.08	是
	L ₅	3.54	否

3) 过渡电阻

由表 10 可见, 衰减补偿特性在低阻情况下较为明显, 中高阻情况下计算得出的衰减特性不明显, 无法正确选线。

表 10 故障判据计算结果

Table 10 Calculation results with failure criterion

过渡电阻/ Ω	计算线路	$\bar{I}_{0m} / \bar{I}'_{0m}$	判断是否故障
20	L ₄	11.59	是
	L ₅	2.84	否
200	L ₄	2.95	否
	L ₅	2.16	否
2000	L ₄	1.34	否
	L ₅	1.12	否

4) 补偿度

由表 11 可见, 补偿度的变化不影响衰减补偿特性的判断, 能够实现故障线路的正确选取。

表 11 故障判据计算结果

Table 11 Calculation results with failure criterion

补偿度/%	计算线路	$\bar{I}_{0m} / \bar{I}'_{0m}$	判断是否故障
-10	L ₄	10.49	是
	L ₅	1.78	否
5	L ₄	11.48	是
	L ₅	1.77	否
10	L ₄	9.98	是
	L ₅	1.75	否
20	L ₄	7.21	是
	L ₅	1.72	否

4 现场案例分析

为了进一步验证本文所提选线方法的正确性, 选取重庆某地 10 kV 消弧线圈接地系统配电线路单相接地故障录波数据进行分析计算。

1) 案例 1: 感性电流大于容性电流时故障线路

图 5 为案例 1 的单相接地故障录波数据, 红色是零序电流, 蓝色是零序电压, 数据采样频率为 1600 Hz。距母线不同距离处的零序电流计算结果如图 6 所示。

由图 6 可见, 在消弧线圈补偿初期, 不同位置的零序电流幅值沿线增大, 计算可得 $F(0)=1$; 在消弧线圈补偿基本完成后, 不同位置的零序电流幅值沿线减小, $F(1)=0$ 。由于 $F(0) \neq F(1)$, 可知该回线路具有消弧线圈掉相补偿特性, 即该回线路是单相接地故障线路。

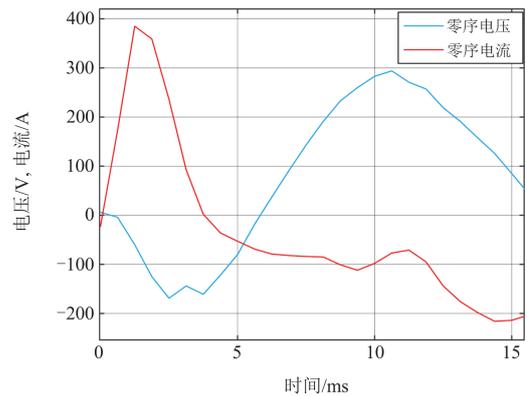


图 5 案例 1 故障线路零序电流电压录波

Fig. 5 Zero sequence voltage and current recording of fault line in Case 1

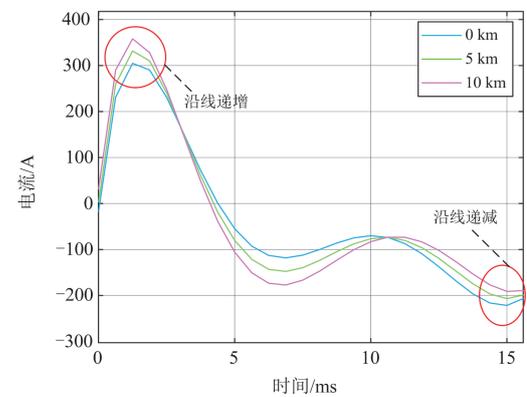


图 6 案例 1 故障线路不同位置处零序电流

Fig. 6 Zero sequence current at different positions of the fault line in Case 1

2) 案例 2: 零序电流互感器极性错误时故障线路

图 7 是案例 2 的单相接地故障录波数据。距母线不同距离处的零序电流计算结果如图 8 所示。

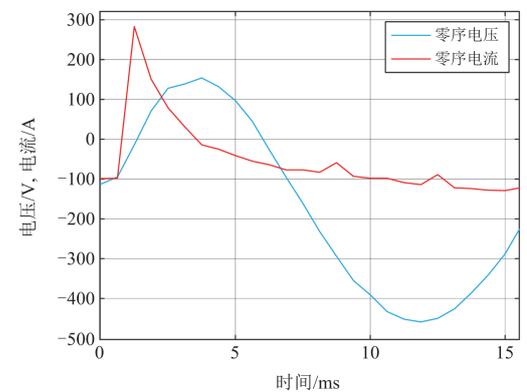


图 7 案例 2 故障线路零序电流电压录波

Fig. 7 Zero sequence voltage and current recording of fault line in Case 2

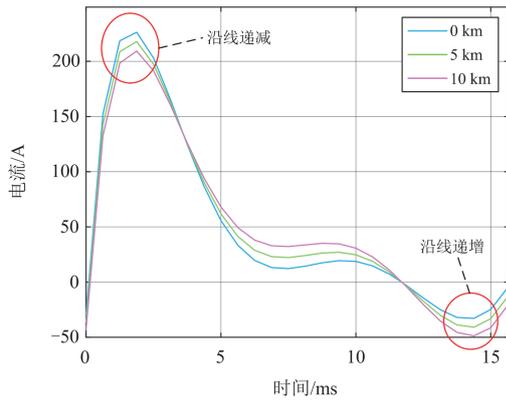


图8 案例2故障线路不同位置处零序电流

Fig. 8 Zero sequence current at different positions of the fault line in Case 2

由图8可见,在消弧线圈补偿初期,不同位置的零序电流幅值沿线减小, $F(0)=0$;在消弧线圈补偿基本完成后,不同位置的零序电流幅值沿线增大, $F(1)=1$ 。由于 $F(0) \neq F(1)$,可知该回线路具有消弧线圈掉相补偿特性,即该回线路是零序电流互感器极性错误情况下的故障线路。

3) 案例3:感性电流小于容性电流时的故障线路

图9是案例3的单相接地故障录波数据。距母线不同距离处的零序电流计算结果如图10所示。

由图10可见,在消弧线圈补偿初期,不同位置的零序电流幅值沿线增大, $F(0)=1$;在消弧线圈补偿基本完成后,不同位置的零序电流幅值沿线增大, $F(1)=1$ 。由于 $F(0)=F(1)$,该回线路不具有消弧线圈掉相补偿特性。计算其补偿初期零序电流幅值平均值为 $\bar{I}_{0m}=197.41\text{ A}$,补偿基本完成后零序电流幅值平均值为 $\bar{I}'_{0m}=16.88\text{ A}$,计算可得 $\bar{I}_{0m}/\bar{I}'_{0m}=11.69$,因此其满足消弧线圈衰减补偿特性,故可判断其为感性电流小于容性电流状况下的故障线路。

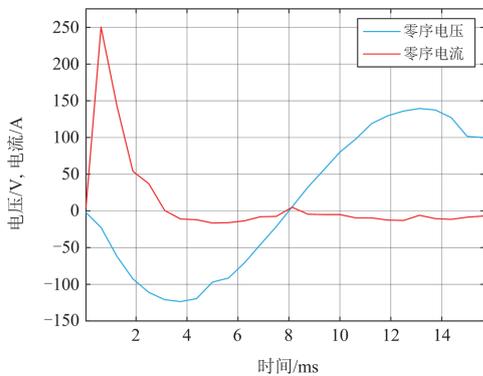


图9 案例3故障线路零序电流电压录波

Fig. 9 Zero sequence current and voltage recording of fault line in Case 3

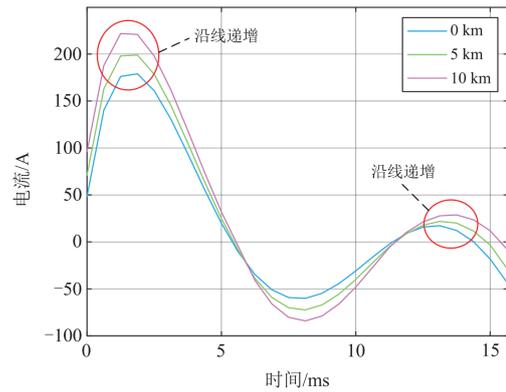


图10 案例3故障线路不同位置处零序电流

Fig. 10 Zero sequence current at different positions of the fault line in Case 3

5 结论

消弧线圈补偿暂态特性影响消弧线圈接地系统单相接地故障选线的正确性,本文提出了基于消弧线圈补偿特性的单相接地故障选线方法,给出了选线方法的实现手段和过程,进行了选线方法的适应性仿真分析和现场案例分析。结论如下:

1) 在消弧线圈感性电流大于容性电流的情况下,消弧线圈掉相补偿特性是单相接地故障线路特有的性质,由此形成了故障选线方法的理论依据。

2) 基于消弧线圈的掉相补偿特性可以实现单线选线,避免了群比选线效率低,有利于选线功能与馈线保护集成。

3) 消弧线圈掉相补偿特性选线方法不受零序电流互感器极性错误的影响,能提高现场实际故障选线的正确率。

4) 消弧线圈掉相补偿特性选线方法在高阻接地情况下仍能正确选出故障线路,弥补了现有一些故障选线方法的不足。

5) 对于消弧线圈感性电流小于容性电流的状况,利用消弧线圈衰减补偿特性可形成故障选线方法的补充理论依据。

6) 除了受高阻接地的影响外,消弧线圈衰减补偿特性选线方法也可单线选线,不受零序电流互感器极性错误的影响。

7) 利用现有的配电网分布录波数据,可提高分布式故障选线的正确率。

参考文献

[1] ZENG Han, YANG Pinghao, CHENG Hongbo, et al. Research on single-phase to ground fault simulation base on a new type neutral point flexible grounding mode[J].

- IEEE Access, 2019, 8: 782563-82570.
- [2] 刘健, 陈曦子, 张志华, 等. 基于消弧线圈调制信号相关检测的高阻单相接地选线[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 63-70.
LIU Jian, CHEN Xizi, ZHANG Zhihua, et al. High resistance single-phase grounding line selection in resonant grounding systems based on correlation detection[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 63-70.
- [3] 邵文权, 程畅, 卫晓辉, 等. 利用暂态电流 Hausdorff 距离的谐振配电网故障选线方案[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 33-42.
SHAO Wenquan, CHENG Chang, WEI Xiaohui, et al. Fault line selection scheme using the Hausdorff distance of transient current in resonant distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 33-42.
- [4] 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.
- [5] 严敏敏, 陈平, 周新军, 等. 基于瞬时负序分量的小电流接地选线[J]. 广东电力, 2017, 30(3): 87-93.
YAN Minmin, CHEN Ping, ZHOU Xinjun, et al. Fault line selection for small current based on instantaneous negative-sequence component[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(3): 87-93.
- [6] 刘漫雨, 吕立平, 丁冬, 等. 基于 TDFT 非同步采样的首半波法小电流接地故障研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(23): 22-28, 33.
LIU Manyu, LÜ Liping, DING Dong, et al. Study of the small current neutral grounding fault based on TDFT sampling method of first half wave[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2018, 55(23): 22-28, 33.
- [7] 罗建, 何建军, 王官洁. 消弧线圈接地系统的单相接地选线研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(4): 1-4.
LUO Jian, HE Jianjun, WANG Guanjie. Research on fault line selection in network grounded with arc extinguishing coil[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(4): 1-4.
- [8] 张玉玺, 王增平, 李振钊, 等. 基于特征频带暂态无功功率的配电网故障选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 1-11.
ZHANG Yuxi, WANG Zengping, LI Zhenzhao, et al. A new method of fault line selection in a distribution network based on characteristic frequency band transient reactive power[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 1-11.
- [9] WANG X, ZHANG H, ZHANG H, 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.
- [10] WANG X, ZHANG H, SHI F, 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.
- [11] 王智, 贺星, 苏玉萍, 等. 基于小波分析的智能电能表动态测试信号模型与误差分析[J]. 电测与仪表, 2024, 61(8): 203-210.
WANG Zhi, HE Xing, SU Yuping, et al. Dynamic test signal model and error analysis of smart electricity meter based on wavelet analysis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(8): 203-210.
- [12] 夏晓荣, 胡鹏飞, 王飞, 等. 基于小波变换与优化 BP 神经网络的超短期光伏发电功率预测[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(10): 159-166.
XIA Xiaorong, HU Pengfei, WANG Fei, et al. ultra-short-term photovoltaic power prediction based on wavelet transform and optimal BP neural networks[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(10): 159-166.
- [13] 冯光, 管廷龙, 王磊, 等. 利用电流 - 电压导数线性度关系的小电流接地系统接地故障选线[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 302-311.
FENG Guang, GUAN Tinglong, WANG Lei, et al. Grounding fault line selection of non-solidly grounding system based on linearity of current and voltage derivative[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 302-311.
- [14] LIU B, MA H, XU H, et al. Single-phase-to-ground fault detection with distributed parameters analysis in non-direct grounded systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(1): 139-147.
- [15] NIU L, WU G, XU Z. Single-phase fault line selection in distribution network based on signal injection method[J]. IEEE Access, 2021: 21567-21578.
- [16] 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 Jiixin, LI Xiang, ZHANG Zhewei. Research on single-phase grounding fault selection technology for active distribution network based on injected signal[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2020, 57(5): 44-49.
- [17] 周宇, 汤涛, 曾祥君, 等. 基于零序电流幅值比倍增系数的灵活接地系统故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23): 112-120.

- ZHOU Yu, TANG Tao, ZENG Xiangjun, et al. Fault line detection method for a flexible grounding system based on a zero-sequence current amplitude ratio multiplication coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23): 112-120.
- [18] 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, 35(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, 35(20): 41-44.
- [19] 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.
- [20] SHEN Q. A novel method of fault line selection in low current grounding system using multi-criteria information integrated[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 209.
- [21] NA W. Fault line selection of power distribution system via improved bee colony algorithm based deep neural network[J]. Energy Reports, 2022, 8(S12): 43-53.
- [22] 喻锬, 胥鹏博, 曾祥君, 等. 基于模糊测度融合诊断的配电网接地故障选线[J]. 电工技术学报, 2022, 37(3): 623-633.
YU Kun, XU Pengbo, ZENG Xiangjun, et al. Grounding fault line selection of distribution networks based on fuzzy measures integrated diagnosis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(3): 623-633.
- [23] WANG Yikai, YIN Xin, XU Wen, et al. Fault line selection in cooperation with multi-mode grounding control for the floating nuclear power plant grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 1-10.
- [24] 张捷, 罗建, 何建军, 等. 消弧线圈接地系统单相接地选线方法: 中国, CN107064729A[P]. 2017-08-18.
- [25] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版, 2009.
- [26] 张开迪. 分布参数电路模型及其在特高压线路保护中的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
ZHANG Kaidi. Distributed parameter circuit model and its application in UHV line protection[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [27] 罗建, 石家炜. 基于希尔伯特变换的暂态信号正弦表示分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 1-7.
LUO Jian, SHI Jiawei. Sinusoidal representation of a transient signal based on the Hilbert transform[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 1-7.

收稿日期: 2024-01-31; 修回日期: 2024-12-13

作者简介:

罗建(1960—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: luojian10000@x263.net

夏豪(1999—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障分析. E-mail: 1242426075@qq.com

(编辑 许威)