

文章编号:1671-6833(2023)05-0069-08

基于小波分析的配电网电弧接地故障选线方法

李景丽¹, 任俊跃¹, 袁豪¹, 王子鉴¹, 雷宏¹, 赵子敬²

(1. 郑州大学 电气与信息工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 国网济源供电公司, 河南 济源 459000)

摘要: 鉴于城市中低压配电网电容电流急剧上升, 单相接地故障电弧难以自熄, 易产生电弧接地过电压及扩大事故, 探究谐振接地系统(NES)电弧接地故障的可靠选线方法是保障配网稳定安全运行的基础。首先, 建立 NES 发生电弧接地故障的等值电路, 分析故障、健全线路之间零序电流存在的差异。其次, 通过引入动态弧长参数改进 Schwarz 电弧模型, 并采用 MATLAB/Simulink 搭建改进 Schwarz 电弧仿真模型, 在此基础上搭建某城市中压配电网电容电流超标场景下的纯电缆线路系统电弧接地故障模型。再次, 设置典型故障条件模拟任意线路的电弧接地故障, 提取各线路零序电流进行 coif 小波分解, 提出当出线发生电弧接地故障时, 故障线路与健全线路非工频零序电流模极大值的极性相反; 当母线发生电弧接地故障时, 提出所有出线非工频零序电流模极大值的极性相同的电弧接地故障选线判据。最后, 设置典型的故障条件验证了该方法对 NES 电弧接地故障选线的有效性。结果表明: 在不同的过渡电阻、故障点距离、故障时刻相位角等典型故障工况下, 所提方法均能正确选择出电弧接地故障线路。

关键词: 谐振接地系统; 电弧接地故障; 小波分析; 时频域分解; 故障选线

中图分类号: TM862; TM74

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2023.05.011

随着城市电网的发展, 配电网线路电缆化率提高导致对地电容电流急剧上升, 单相接地后流经故障点的电流很大, 电弧不易熄灭, 容易产生间歇性电弧接地过电压, 同时由于电磁式电压互感器铁芯饱和时容易引起谐振过电压, 导致事故跳闸率明显上升^[1-2]。目前谐振接地系统(resonant earthing system, NES)广泛应用于城市配电网, 能够减小故障点的残余电流, 抑制间歇性电弧过电压及谐振过电压。NES 发生电弧接地故障时, 故障线路与非故障线路的故障特征不明显, 如果不能及时甄别出故障线路, 可能会使事故进一步扩大。因此, 研究 NES 电弧接地故障特征, 提出高阻动态电弧下的精准接地故障选线方法是配电网有效隔离接地故障的基础工作。现有的小电流接地系统故障选线方法主要分为稳态信息选线法、信号注入选线法与暂态信息选线法。吕高^[3]通过对比故障线路与非故障线路零序电流幅值的大小进行选线, 但此方法易受消弧线圈补偿方式的影响, 此方法在 NES 系统中无法可靠

选线。郭威^[4]提取线路零序电流谐波分量, 利用零序电流中的 5 次谐波在故障线路中相位与非故障线路相反进行选线。但谐波分量易受到电网中非线性元件的影响, 导致无法可靠选线。上述稳态信息选线法在 NES 中故障选线准确性较低。袁佳歆等^[5]利用信号探测器对母线电压互感器二次侧注入特定频率的信号进行检测实现选线, 但此方法选线的准确性会受到线路长度和分布电容的影响。由于暂态故障特征信息较为丰富, 相关学者开始研究暂态信息选线法。方毅等^[6]提出能量法, 原理为通过计算各线路故障后的暂态能量, 利用故障后各线路能量在极性方面的差异进行故障选线, 但此方法的准确性受过渡电阻影响较大。康忠健等^[7]对各馈线零序电流的综合相关度进行计算, 利用最大相关度与最小相关度之间的差值与设定阈值作比较来确定故障线路, 但设定阈值的选取没有相关标准。殷培峰等^[8]在故障发生瞬间, 利用所有线路零序电流第一个周波的半波极性差异进行选线, 但该方法

收稿日期: 2023-02-10; 修订日期: 2023-05-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51307152); 河南省高等学校重点研发资助项目(20A470010)

作者简介: 李景丽(1983—), 女, 河南周口人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事配电网故障诊断技术、电磁场数值计算方法、电力系统过电压与接地技术、高电压及绝缘技术等研究, E-mail: lijingli1022@zzu.edu.cn。

引用本文: 李景丽, 任俊跃, 袁豪, 等. 基于小波分析的配电网电弧接地故障选线方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(5): 69-76, 107. (LI J L, REN J Y, YUAN H, et al. Research on arc grounding fault selection method of distribution network based on wavelet analysis[J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science), 2023, 44(5): 69-76, 107.)

在故障电压过零时选线效果不佳。金涛等^[9]利用希尔伯特-黄变换筛选零序电流中的非工频分量,利用故障发生后一定时间段内所有线路非工频分量极性的差异进行选线,但此方法易受到模式混叠的影响。由于故障零序暂态信号具有高频、瞬间突变等特点,而小波分析方法对非平稳暂态信号具有优异的时频分析特性,因此,于永进等^[10]利用小波分析对各线路暂态零序电流进行分解,利用小波系数的幅值和极性特征选出故障线路,此文献使用固定阻值电阻模拟接地故障,但实际场景中的电弧电阻随时间而动态变化,因此上述选线方法的有效性尚待商榷。赵新红等^[11]利用小波变换进行电弧故障选线,利用开关动态开合模拟间歇性电弧故障,但并未搭建考虑动态电阻的电弧模型。由于 db 小波函数对非平稳信号敏感性不佳,因此无法依靠模极大值极性进行故障选线,且此文献并未考虑搭建动态电阻的电弧模型。针对 NES 系统故障选线准确率较低的问题,本文搭建了更符合实际情况的电弧故障模型,为故障选线研究奠定基础,并使用故障线路奇异性检测效果更佳的 coif 小波基函数对零序电流进行分析,从而提出一种 NES 系统的电弧接地故障选线方法。

首先,采用 NES 电弧接地故障等值电路推导零序电流故障特征;其次,引入动态弧长参数改进 Schwarz 电弧模型的数学表达式,并采用 MATLAB/Simulink 搭建改进的 Schwarz 电弧仿真模型,在此基础上搭建某城市中压配电网电容电流超标场景下的纯电缆线路系统电弧接地故障模型;再次采用具有紧支撑性以及非平稳信号的敏感性更佳的 coif 小波对电弧接地故障时各线路零序电流进行信号处理,并利用故障线路与非故障线路非工频零序电流模极大值极性之间的差异提出故障选线判据;最后设置故障电阻、故障位置、故障合闸角等典型的故障条件验证选线方法准确率为 100%,证明了所提选线判据的有效性。

1 NES 系统单相接地故障特征分析

设具有 n 条出线的 NES 系统第 n 条出线发生电弧接地故障,图 1 为其零序等效网络图。其中 X_L 为消弧线圈电感, mH ; $C_{01}, C_{02}, \dots, C_{0n-1}$ 分别为配电线路 1 到 $n-1$ 的零序电容, μF ; R_f 为故障点过渡电阻, Ω 。 U_f 为故障点等值的虚拟电源, V ; I_{0f} 和 I_{0i} 分别为流过故障、健全线路的零序电流, A ; I_L 为流过消弧线圈的零序电流, A ; U_0 为母线零序电压, V 。

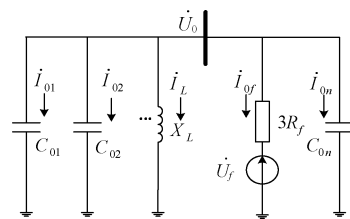


图 1 零序等效网络图

Figure 1 Zero sequence equivalent network diagram

母线零序电压为

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_f \frac{3X_L \parallel \left(\frac{1}{j\omega C_\Sigma} \right)}{3X_L \parallel \left(\frac{1}{j\omega C_\Sigma} \right) + 3R_f} = \frac{\dot{U}_f X_L}{X_L + R_f(1 + 3j\omega X_L C_\Sigma)} \quad (1)$$

式中: C_Σ 为各出线对地零序电容之和, μF 。

根据等值电路,就健全出线来说,其数值为零序容性电流:

$$\dot{I}_{0i} = j\omega C_{0i} \dot{U}_0, i = 1, 2, \dots, n-1. \quad (2)$$

由 KCL 定理,有

$$\dot{I}_{0f} = -\left(\dot{I}_L + \sum_{i=1}^{n-1} \dot{I}_{0i} \right) = -\dot{U}_0 \left(\frac{1}{3X_L} + j\omega C_{\Sigma \text{rest}} \right). \quad (3)$$

式中: $C_{\Sigma \text{rest}}$ 为第 n 条出线故障时,系统所剩全线路零序电容之和。

由文献[12]可知,接地点暂态故障电流表达式如下:

$$\dot{I}_f = I_{C\max} e^{-t/\tau_c} \left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin \omega_f t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right) + I_{L\max} e^{-t/\tau_L} \cos \varphi + (I_{C\max} - I_{L\max}) \cos(\omega t + \varphi). \quad (4)$$

式中: $I_{C\max}$ 为入地容性电流的幅值, A ; τ_L, τ_c 分别为电感电流分量和电容电流分量的时间常数, s ; φ 为故障时刻的电压相角, $(^\circ)$; $I_{L\max}$ 为感性电流的幅值, A ; ω 为工频角频率, Hz ; ω_f 为暂态振荡分量角频率, Hz 。

由式(3)可知,电弧接地点故障电流为流经消弧线圈和对地电容的电流相量之和。由于消弧线圈感性电流对容性接地电流的补偿,可能会使故障线路零序电流与非故障线路零序电流之间相位的差异发生改变,因此无法利用稳态时各线路零序电流的极性差异进行故障选线。

由式(4)可知,电弧接地故障电流中包含按照指数级衰减的非工频电流,而消弧线圈的电感量是根据工频补偿的要求设计的,所以 NES 中消弧线圈只会削弱工频电流,对非工频电流的削弱作用很小,消弧线圈的补偿作用并不会影响各线路之间非工频分量的差异,因此可以利用零序电流非工频分量之

间的差异进行选线研究。

2 仿真模型

2.1 NES 电弧接地故障模型

Q/GDW-10-375—2008《中压系统中性点接地方式选用技术导则》规定:变电站每段母线单相接地故障电容电流大于 100 A 时宜采用小电阻接地方式,但经某省电网公司实地调研发现某城市配网电缆化率高、出线电容电流超标现象严重,其中对地电容电流超过 150 A 的线路高达数十条。为模拟电容电流严重超标场景下的 NES 系统电弧接地故障,利用 MATLAB/Simulink 建立含有 l_1 ($l_1=22\text{ km}$)、 l_2 ($l_2=24\text{ km}$)、 l_3 ($l_3=26\text{ km}$)、 l_4 ($l_4=28\text{ km}$) 4 条电缆线路的 10 kV 中性点经消弧线圈接地系统电弧接地故障模型,如图 2 所示。模型包括消弧线圈、外部电源、4 条电缆线路、配电变压器、负荷和改进电弧模型(电弧模型与过渡电阻串联),该系统电容电流达到 151.8 A。仿真模型电缆中线路及重要设备参数见表 1 及表 2。

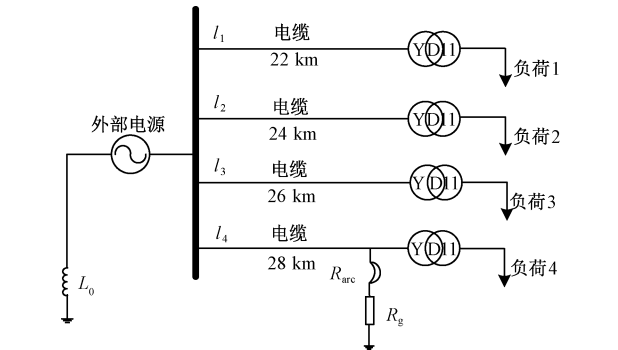


图 2 NES 单相电弧接地故障模型图

Figure 2 NES single-phase arc grounding fault model diagram

表 1 电缆线路参数

Table 1 Parameters of cable line

相序	单位长度电阻/ ($\Omega\cdot\text{km}^{-1}$)	单位长度电感/ ($\text{mH}\cdot\text{km}^{-1}$)	单位长度电容/ ($\mu\text{F}\cdot\text{km}^{-1}$)
正序	0.269	0.255	0.338
负序	0.269	0.255	0.338
零序	2.710	1.019	0.279

表 2 主要模块参数

Table 2 Main module parameters

电源模块			变压器模块		
电压/ kV	电阻/ Ω	电感/ mH	接线 方式	一二次电 阻标么值	一二次电 感标么值
10.5	0.892 9	10.53	Y/D11	0.002	0.08

2.2 考虑动态电弧长度的改进 Schwarz 电弧模型

在小电流接地系统中,电弧接地故障是最常发

生的单相接地故障^[13]。但电弧接地并不等同于金属性接地,故障电弧阻值的变化过程呈非线性。对电弧进行数学建模分析,有利于准确地模拟实际电弧的发展状况。目前已有的电弧模型为 Mayr 模型、控制论模型、Schwarz 模型。文中在 Schwarz 模型基础上引入动态弧长参数,使电弧仿真模型更加贴近现实。

学者们在电弧时间常数与耗散功率不变的基础上提出的 Mayr 电弧数学表达式^[14]如下:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{ei}{P_{\text{loss}}} - 1 \right). \quad (5)$$

式中: g 表示单位长度电弧电导, S; e 表示单位长度电弧电压, V; i 表示电弧电流, A; P_{loss} 为耗散功率, W; τ_m 为 Mayr 模型电弧时间常数, s。

后续学者们通过对大量的电弧实验数据进行分析发现,电弧时间常数和耗散功率可以表示为以电弧电导 g 为自变量的幂函数,即 $\tau_m = \tau_s g^\alpha$, $P_{\text{loss}} = P_s g^\beta$, 将其代入 Mayr 模型数学表达式中得到 Schwarz 模型数学表达式为

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_s g^\alpha} \left(\frac{ei}{P_s g^\beta} - 1 \right). \quad (6)$$

式中: P_s 和 τ_s 分别为 Schwarz 模型的耗散功率常数以及电弧时间常数, s; α 、 β 为常数,其取值受系统电压以及回路电流和环境等方面的影响。

上述 2 种电弧模型均未考虑弧长参数对电弧的影响,但现实中弧长会对电弧的物理特性以及电气特性产生影响,由文献[15]可知描述电弧时间常数与电弧长度关系的数学表达式如下:

$$\tau_s = \zeta \frac{I_s}{l_s}. \quad (7)$$

式中: I_s 为 Schwarz 模型电流的最大幅值, A; l_s 为 Schwarz 模型电弧长度, cm; 系数 ζ 一般取经验值 2.85×10^{-5} 。

将式(6)代入式(7)对 Schwarz 模型加以改进,引入电弧长度这一客观实际因素表征其对电弧发展的作用。基于 Schwarz 模型改进的电弧模型的数学表达式如下:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{l_s}{\zeta I_s g^\alpha} \left(\frac{ei}{P_s g^\beta} - 1 \right). \quad (8)$$

式中: P_s 表示改进 Schwarz 电弧模型的耗散功率常数, W。

改进的 Schwarz 电弧模型在电弧发展过程中不仅引入了以电弧电导为自变量的电弧时间常数和耗散功率,而且引入了电弧长度,使电弧数学模型更加贴近实际。在此基础上设置电弧长度 l_s 以时间 t 为

自变量随机变化,便可以构造出考虑动态弧长变化的改进 Schwarz 电弧模型,此模型可以进一步反映电弧长度随机变化引起的故障电压电流信号的随机性。

利用 MATLAB/Simulink 搭建文中所提出的考虑动态电弧长度的改进 Schwarz 电弧模型,设置仿真条件:过渡电阻为 $200\ \Omega$,仿真时间 $0.06\ \text{s}$,弧长 l_s 每 $0.002\ \text{s}$ 随机改变一次,在 $30\sim 50\ \text{mm}$ 之间变化, $I_s = 15\ \text{A}$, $\zeta = 2.85 \times 10^{-5}$, $\alpha = -0.3$, $P_s = 3\ 000\ \text{W}$, $\beta = 0.01$ 。改进 Schwarz 电弧模型仿真结果见图 3。

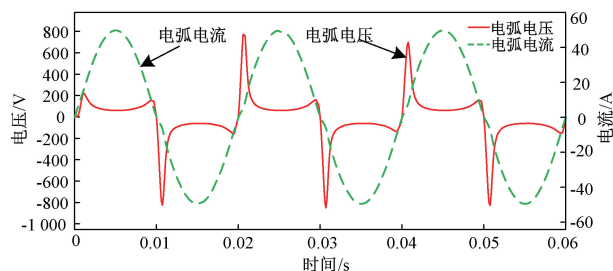


图 3 改进 Schwarz 电弧模型的电压和电流波形

Figure 3 Voltage and current waveforms for improved Schwarz arc models

从图 3 可以看出,改进 Schwarz 电弧仿真模型的电流波形虽然变化不明显,但还是与未发生接地故障时的正弦电流波形有所不同。在过零点处电流波形斜率较小,电流值基本保持为零且变化不明显,此时间段被称为零休期。仿真模型的电压波形与未发生接地故障时的正弦电压波形相比有了明显变化,在零休期内,电弧电压先是急剧上升,然后又突然下降;当燃弧基本稳定时,电弧电压基本保持不变,在此期间其波形与马鞍相似;对比文献[16]中的实测电弧波形,文中仿真模型所得波形与实测电弧波形变化规律基本一致。

为了分析文中提出的考虑动态弧长的改进 Schwarz 电弧模型的仿真效果,利用 MATLAB/Simulink 建立了 Mayr 模型与 Schwarz 模型,将改进的 Schwarz 电弧模型与上述两种模型从电弧电流畸变程度和电弧电阻变化情况两个方面进行仿真对比分析。其中,与电弧模型串联的过渡电阻为 $200\ \Omega$,4 种模型的耗散功率常数均为 $3\ 000\ \text{W}$,改进电弧模型的长度在 $30\sim 50\ \text{mm}$ 之间每隔 $0.002\ \text{s}$ 随机变化,仿真结果见图 4 和图 5。

由图 4 可知,Mayr 电弧模型、Schwarz 电弧模型与改进的 Schwarz 电弧模型的电弧电流在过零点附近均发生了不同程度的畸变,其中文中提出的改进电弧模型的电弧电流畸变最明显,其零休时间最长,而 Mayr 模型和 Schwarz 模型的电弧电流波形畸变

程度均劣于本文提出的改进电弧模型。

由图 5 可知,改进电弧模型在 0.01 、 0.02 、 0.03 、 $0.04\ \text{s}$ 时电阻值分别为 193.9 、 163.1 、 211.4 、 $191.8\ \Omega$,而 Mayr 模型与 Schwarz 模型的电弧电阻在对应时间点分别保持为 137.4 、 $36.8\ \Omega$,可见文中建立的改进电弧模型在电弧电阻变化情况方面随机性更高,更符合实际中电弧燃烧过程中电阻随机改变的实际情况。

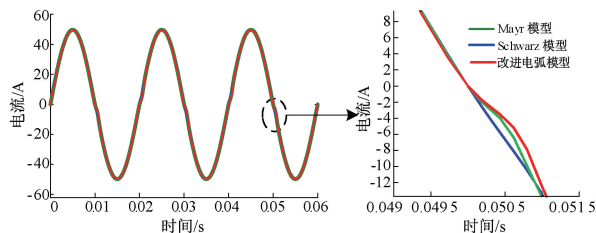


图 4 3 种电弧模型电流波形图

Figure 4 Arc current waveform plot of three arc models

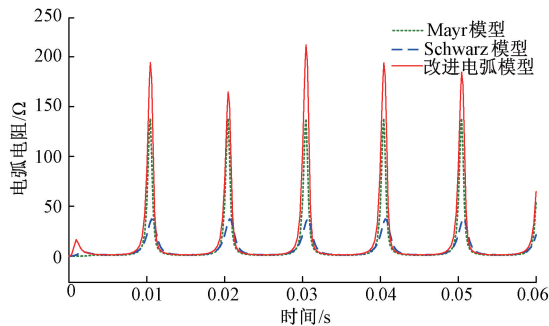


图 5 3 种电弧模型电阻波形图

Figure 5 Resistance waveform plot of three arc models

3 基于小波分析的接地故障选线方法

小波变换是通过小波基函数与时域信号做相关数学处理将信号投射为时频域信息。可以把小波理解为带通滤波器,它只允许频率和本身中心频率相近的信号通过。通过小波基函数的平移与伸缩调整时频窗口,进而分析非工频信号的局部时频域特性。因此可以使用小波分析对电弧接地故障时产生的非工频信号进行局部分析。

3.1 电弧接地故障信号小波分解最优参数选取

步骤 1 采样频率的选取。陈奎等^[17]在 NES 系统中利用 6 、 9 、 $12\ \text{kHz}$ 采样频率信息采样后进行选线,选线准确率分别为 75% 、 77% 、 77% ,即采样频率越高,采样后信号越不容易失真,故障选线准确率越高。为了便于后续信号处理并确保采样后的信号不失真,文中采样频率设置为 $10\ \text{kHz}$ 。

步骤 2 小波基函数的选取。综合考虑小波的对称性、紧支撑性以及非平稳信号的敏感性,采用 db 系列小波、sym 系列小波、coif 系列小波处

理故障数据,并对比分析处理结果,本文选择故障特征提取效果最佳的 coif4 小波对零序电流进行小波变换。

步骤 3 分解尺度的选取。陈博博等^[18]指出电弧接地故障频率主要集中在 1 000 Hz 附近,故对信号进行 4 层小波分解,提取第 4 层的高频系数(对应频率为 625~1 250 Hz)。

3.2 故障选线判据的确立

NES 的电弧接地故障类型可主要分为以下 2 类:出线故障和母线故障。利用 3.1 节所述的 coif 小波对不同故障条件下的零序电流进行小波分解,通过对比故障线路与健全线路之间的故障特征差异从而提出选线判据。通过设置多组故障条件,经过对比分析发现同种故障类型下经过 coif 小波分解的零序电流时频域故障特征差异类似,从出线故障与母线故障分别列举其中一组仿真数据,并提出故障选线判据。

3.2.1 出线故障时电弧接地故障选线方法

设置 NES 的 l_4 线路 A 相在 0.005 s 时刻发生电弧故障接地,故障相合闸角 90°、故障点距离 10 km,过渡电阻设置为 250 Ω。提取各线路零序电流进行小波分解,所得结果如图 6 所示。

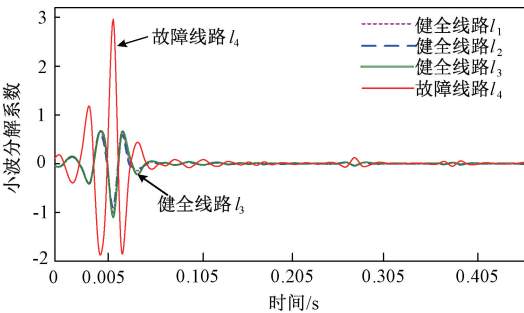


图 6 各线路零序电流小波分解系数图
Figure 6 Zero sequence current wavelet decomposition coefficient of each line

由图 6 可知,线路 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 的小波分解系数模极大值分别为 -1.102 4、-0.923 7、-1.203 5、2.875 4。通过分析发现,当发生出线故障时,故障线路 l_4 和健全线路 l_1 、 l_2 、 l_3 的模极大值的极性相反,且故障线路的模极大值较大,并且故障线路模极大值的绝对值约等于其余所有健全线路模极大值的绝对值之和。

3.2.2 母线故障时电弧接地故障选线方法

设置 NES 的母线在 0.005 s 时发生电弧故障接地,故障相合闸角 90°,过渡电阻设置为 250 Ω。提取各线路零序电流进行小波分解,所得结果如图 7 所示。

由图 7 可知,线路 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 的小波分解系数模极大值分别为 0.976 1、0.997 6、1.002 5、1.013 8,通过分析可以发现,当发生母线故障时,健全线路 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 模极大值的极性相同,且大小相差不大。

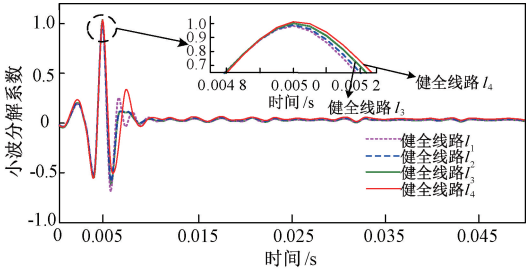


图 7 各线路零序电流小波分解系数图
Figure 7 Zero sequence current wavelet decomposition coefficient of each line

通过对比多组实验数据,提出电弧接地故障选线依据如下:当出线发生电弧接地故障时,故障线路与健全线路在发生故障时非工频零序电流小波分解系数模极大值的极性相反;当母线发生电弧接地故障时,所有出线非工频零序电流在发生故障时的小波分解系数模极大值极性相同。

3.3 基于 coif 小波变换的电弧故障选线流程

(1)设置采样频率为 10 kHz,故障发生后,对每条故障线路的零序电流进行采样,提取每条出线的零序电流。

(2)利用 coif4 小波对每条出线零序电流进行 4 层小波变换,提取第 4 层的高频小波分解系数。

(3)提取各出线高频小波分解系数的模极大值,利用故障时刻各线路非工频信号的小波分解系数模极大值的极性差异进行故障选线。

(4)对所有出线零序电流中的小波分解系数模极大值极性进行对比,如果所有出线模极大值的极性相同,则母线发生单相接地故障;如果出现一条出线 l ,其模极大值的极性与其他出线的模极大值极性不同,则出线 l 发生单相接地故障。

4 选线判据准确性验证

第 3 节提出了基于 coif 小波分析的电弧接地故障选线判据,为了验证该判据的有效性,在建立的 NES 配网模型中,通过改变过渡电阻、故障位置、故障合闸角等故障条件,验证 NES 在发生电弧接地故障时选线的可靠性。

4.1 出线发生电弧接地故障时选线结果

4.1.1 出线故障时不同过渡电阻下选线效果分析
设置在出线 l_1 距离母线 9 km 处发生 A 相接地

故障,故障时间设置为 0.005 s,故障相角设置为 90°,为验证此方法在高过渡电阻下的选线效果,令过渡电阻在 500~5 000 Ω 之间变化。选线结果见表 3。由表 3 分析可知,当过渡电阻从 500 Ω 升高到 5 000 Ω 时,各线路零序电流小波分解系数的模极大值绝对值逐渐减小,但 l_1 的模极大值始终为正值, l_2 、 l_3 、 l_4 的模极大值始终负值,并且故障线路 l_1 模极大值的绝对值约等于其余所有健全线路模极大值的绝对值之和。通过极性的不同可以根据第 3 节提出的选线判据判断 l_1 为故障线路,与实际仿真故障中设置的故障线路一致。

表 3 出线故障时不同过渡电阻下的选线结果

Table 3 Line selection results under different transition resistances in case of outgoing line faults					
过渡电阻/ Ω	各线路小波分解系数的模极大值				故障 线路
	l_1	l_2	l_3	l_4	
500	1.368 0	-0.388 1	-0.471 7	-0.507 0	l_1
1 000	0.679 5	-0.200 5	-0.236 8	-0.259 5	l_1
2 000	0.351 0	-0.101 7	-1.145 8	-0.123 6	l_1
3 000	0.241 7	-0.071 4	-0.084 4	-0.090 8	l_1
4 000	0.175 7	-0.052 4	-0.585 5	-0.060 4	l_1
5 000	0.143 0	-0.044 1	-0.470 9	-0.050 4	l_1

4.1.2 出线故障时不同故障相角下选线效果分析
设置距离母线 15 km 处出线 l_2 发生 A 相接地故障,故障时间设置为 0.005 s,过渡电阻设置为 300 Ω,将故障相电压初相角在 0~90°之间变化。选线结果见表 4。

由表 4 分析可知,当故障相角从 0°增加到 90°时,各线路零序电流的小波分解系数模极大值的绝对值逐渐变大。健全线路 l_1 、 l_3 、 l_4 在故障相角非 90°时模极大值极性保持一致均为正值,在故障相角为 90°时健全线路模极大值极性为负值,但健全线路 l_1 、 l_3 、 l_4 始终与故障线路 l_2 模极大值极性相反。通过模极大值极性的不同可以根据第 3 节提出的选线判据判断 l_2 为故障线路,与实际仿真故障中设置的故障线路一致。

表 4 出线故障时不同故障初相角下的选线结果

Table 4 Line selection results for different fault initial phase angles during outgoing line faults					
故障相角/ (°)	各线路小波分解系数的模极大值				故障 线路
	l_1	l_2	l_3	l_4	
0	0.082 4	-0.207 0	0.056 9	0.041 4	l_2
30	0.398 2	-1.120 7	0.387 7	0.386 9	l_2
60	0.617 3	-1.739 7	0.604 3	0.594 7	l_2
90	-0.799 4	2.868 5	-1.029 7	-1.025 2	l_2

4.1.3 出线故障时不同故障位置下选线效果分析
设置在出线 l_3 发生 A 相接地故障,故障时间设置为 0.005 s,故障相角设置为 90°,过渡电阻设置为 300 Ω,故障位置在 1~26 km 之间(出线首端至出线末端)变化。选线结果见表 5。由表 5 分析可知,当故障发生位置从出线首端 1 km 增加到出线末端 26 km 时,故障线路与健全线路模极大值的极性均相反,并且故障线路 l_3 模极大值的绝对值约等于其余所有健全线路模极大值的绝对值之和。通过模极大值极性的不同可以根据第 3 节提出的选线判据判断 l_3 为故障线路,与实际仿真故障中设置的故障线路一致。

表 5 出线故障时不同故障位置下的选线结果

Table 5 Line selection results under different fault locations in case of outgoing line faults					
故障位置/ km	各线路小波分解系数的模极大值				故障 线路
	l_1	l_2	l_3	l_4	
1	0.890 4	0.823 2	-2.544 5	0.855 4	l_3
10	0.681 2	0.646 0	-1.869 7	0.639 7	l_3
15	-0.807 0	-0.899 2	2.721 0	-1.027 3	l_3
20	-0.972 2	-1.021 0	3.038 4	-1.090 1	l_3
26	-0.999 8	-1.043 6	3.131 8	-1.108 6	l_3

4.2 母线发生电弧接地故障时选线结果

4.2.1 母线故障时不同过渡电阻下选线效果分析
设置在母线发生 A 相接地故障,故障时间设置为 0.005 s,故障相角设置为 90°,过渡电阻在 500~5 000 Ω 之间变化,仿真结果见表 6。

表 6 母线故障时不同过渡电阻下的选线结果

Table 6 Line selection results for different transition resistances in case of busbar faults					
过渡电阻/ Ω	各线路小波分解系数的模极大值				故障 线路
	l_1	l_2	l_3	l_4	
500	0.508 4	0.505 2	0.507 9	0.504 5	母线
1 000	0.258 2	0.257 0	0.256 7	0.251 2	母线
2 000	0.124 5	0.124 3	0.123 8	0.122 8	母线
3 000	0.084 8	0.083 8	0.085 1	0.084 0	母线
4 000	0.061 4	0.059 9	0.059 7	0.058 8	母线
5 000	0.048 7	0.047 6	0.047 9	0.046 9	母线

由表 6 分析可知,当过渡电阻从 500 Ω 升高到 5 000 Ω 时,各线路零序电流小波分解系数模极大值的绝对值逐渐减小,但 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 的模极大值的极性始终相同,通过极性的相同可以根据第 3 节提出的选线判据判断母线为故障线路,与实际仿真故障中设置的故障线路一致。

4.2.2 母线故障时不同故障相角下选线效果分析
设置母线发生 A 相接地故障,过渡电阻设置为

300 Ω,故障时间设置为 0.005 s,故障相角在 0~90° 之间变化,仿真结果见表 7。

由表 7 分析可知,当故障相角从 0°增加到 90° 时,各线路零序电流经小波变换后的模极大值绝对值逐渐变大,但 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 的模极大值的极性始终相同,通过极性的相同可以根据第 3 节提出的选线判据判断母线为故障线路,与实际仿真故障中设置的故障线路一致。

表 7 母线故障时不同故障初相角下的选线结果

Table 7 Line selection results for different fault initial phase angles during busbar faults

故障相角/ (°)	各线路小波分解系数的模极大值				故障 线路
	I_1	I_2	I_3	I_4	
0	0.074 0	0.065 2	0.059 5	0.050 2	母线
30	0.364 7	0.400 2	0.437 0	0.444 3	母线
60	0.687 1	0.678 2	0.738 9	0.728 9	母线
90	0.857 5	0.800 2	0.830 9	0.840 5	母线

5 结论

(1)本文在已有 Schwarz 电弧模型基础上引入动态变化的弧长参数,推导了改进 Schwarz 电弧模型的数学表达式,并使用 MATLAB/Simulink 建立了具有动态弧长的改进 Schwarz 电弧仿真模型,通过与 Mayr 电弧和 Schwarz 电弧对比分析,证明了文中提出的改进电弧模型在电弧电流畸变特性以及电弧电阻动态变化方面的优异性。

(2)在 NES 电弧接地故障电路中,消弧线圈仅会影响各条线路零序电流的工频分量,非工频分量的性质并不会受影响,因此可以使用对非平稳信号的敏感性更佳的 coif 小波将暂态故障非工频信息投射为时频域信息,利用 coif 小波变换后的时频域信息进行选线,准确率可达 100%。

(3)本文提出了当线路发生电弧接地故障时,故障线路与健全线路在故障时刻非工频零序电流模极大值的极性相反,当母线发生电弧接地故障时,所有出线非工频零序电流在故障时刻非工频零序电流模极大值的极性相同的选线判据,并在不同过渡电阻、不同故障位置、不同故障相角等典型故障工况下验证了选线判据的准确性。

由于现实场景中配电网的线路结构为架空线路与电缆线路混合的配电网结构,后续搭建了架空线路与电缆线路混合的配电网模型,并在不同的过渡电阻、故障点距离、故障时刻相位角等典型故障工况下进行了故障选线,均可以通过本文所提方法完成正确选线,针对实际配电网中架空线路与电缆线路

混合结构的故障选线问题,还需对实际数据作进一步的研究。

参考文献:

[1] WANG Z X, ZHANG H J, WANG H Y, et al. Analysis of modeling and fault line selection method for Single-phase Intermittent fault of distribution network[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2355(1): 012047.

[2] DENG F, ZU Y R, MAO Y, et al. A method for distribution network line selection and fault location based on a hierarchical fault monitoring and control system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 123: 106061.

[3] 吕高. 基于零序电流比幅法的故障选线法[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2014, 35(4): 473-478.

LYU G. Method of fault line selection based on zero-sequence current comparison of amplitude[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2014, 35(4): 473-478.

[4] 郭威. 小电流接地系统五次谐波选线法研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2012.

GUO W. Study on fifth harmonic line selection method for small current grounding system[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.

[5] 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 J X, LI X, ZHANG Z W. 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.

[6] 方毅, 薛永端, 宋华茂, 等. 谐振接地系统高阻接地故障暂态能量分析与选线[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5636-5645.

FANG Y, XUE Y D, SONG H M, et al. Transient energy analysis and line selection of high resistance grounding fault in resonant grounding system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5636-5645.

[7] 康忠健, 李丹丹, 刘晓林. 应用非工频暂态分量的配电网故障选线方法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 1-6.

KANG Z J, LI D D, LIU X L. Faulty line selection with non-power frequency transient components of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 1-6.

[8] 殷培峰, 刘石红. 基于谐波与首半波结合的单相接地选线分析与研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2013(4): 19-21, 225.

YIN P F, LIU S H. Analysis and research on single-

- phase grounding line selection based on harmonic and first half wave[J]. Automation & Instrumentation, 2013(4): 19-21, 225.
- [9] 金涛, 褚福亮. 基于暂态非工频零序电流的含 DG 新型配电网的接地选线方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17): 96-105.
- JIN T, CHU F L. A fault line-selection method in new distribution network with DG based on transient non-power frequency zero sequence current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17): 96-105.
- [10] 于永进, 臧宝花. 基于小波变换的小电流接地系统故障选线方法[J]. 煤炭工程, 2011, 43(1): 48-50.
- YU Y J, ZANG B H. Fault wire line selection method of small current grounding system base on wavelet conversion[J]. Coal Engineering, 2011, 43(1): 48-50.
- [11] 赵新红, 车伟. 基于小波变换的小电流接地系统电弧故障选线[J]. 电力科学与工程, 2003, 19(4): 22-25.
- ZHAO X H, CHE W. Arc-grounding fault selection for small current neutral grounding systems based on wavelet analysis[J]. Power Science and Engineering, 2003, 19(4): 22-25.
- [12] 赵铁军, 孟菁, 宋岳奇, 等. 组串式光伏系统直流串联电弧故障检测与保护策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 74-82.
- ZHAO T J, MENG J, SONG Y Q, et al. Series arc detection and protection on the DC side of string-type PVs[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 74-82.
- [13] 杨明波, 龙毅, 樊三军, 等. 基于组合 Mayr 和 Cassie 电弧模型的弧光接地故障仿真及分析[J]. 电测与仪表, 2019, 56(10): 8-13.
- YANG M B, LONG Y, FAN S J, et al. Simulation and analysis of arc grounding fault based on combined Mayr and Cassie arc models[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(10): 8-13.
- [14] 马祖涛, 李淑蓉. 小电流接地故障电弧建模分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(9): 103-108.
- MA Z T, LI S R. Modeling analysis of arc grounding fault in non-solidly earthed system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(9): 103-108.
- [15] 刘艳丽, 郭凤仪, 李磊, 等. 一种串联型故障电弧数学模型[J]. 电工技术学报, 2019, 34(14): 2901-2912.
- LIU Y L, GUO F Y, LI L, et al. A kind of series fault arc mathematical model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(14): 2901-2912.
- [16] 蔺华, 王子龙, 郭振华, 等. 考虑弧长动态变化的配电网电弧接地故障建模及辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 31-39.
- LIN H, WANG Z L, GUO Z H, et al. Modeling and identification of a distribution network arc grounding fault considering arc length dynamic variation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 31-39.
- [17] 陈奎, 唐轶. 小电流接地系统电弧接地选线方法的研究[J]. 继电器, 2005, 33(16): 5-9.
- CHEN K, TANG Y. Analysis of detecting fault line of arcing grounded fault in isolated neutral system[J]. Relay, 2005, 33(16): 5-9.
- [18] 陈博博, 屈卫锋, 杨宏宇, 等. 小电流接地系统单相接地综合电弧模型与选线方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 1-7.
- CHEN B B, QU W F, YANG H Y, et al. Research on single phase grounding arc model and line selection for neutral ineffectively grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 1-7.

Research on Arc Grounding Fault Selection Method of Distribution Network Based on Wavelet Analysis

LI Jingli¹, REN Junyue¹, YUAN Hao¹, WANG Zijian¹, LEI Hong¹, ZHAO Zijing²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Jiyuan Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Jiyuan 459000, China)

Abstract: Chinese urban low-voltage distribution network capacitance current rose sharply, single-phase ground fault arc was difficult to self-extinguish and easy to produce arc light ground overvoltage and lead to accidents. The resonant grounding system (NES) arc ground fault reliable line selection method to ensure the stable and safe operation of the distribution network basis was explored. The equivalent circuit of arc ground fault in NES was first established, and the difference between the zero-sequence current between the fault and the sound line was analyzed. Secondly, the Schwarz arc model was improved by introducing dynamic arc length parameters, and the Schwarz

(下转第 107 页)

Effect of Broken Cable on Mechanical Properties of Curved Cable-stayed Bridge

YANG Yaxun^{1,2}, WANG Chengzhi¹, CHAI Wenhao¹, ZHANG Yuhang¹, ZHANG Fuhua¹

(1. School of highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. The Engineering Design Academy of Chang'an University Company Limited, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to study the mechanical response of long-span curved cable-stayed bridge caused by cable breaking, Xigu Chaiji Xia cable-stayed bridge in Gansu Province was taken as an engineering example, the finite element model was established by using the beam lattice method, and 15 typical cable breaking conditions were selected to analyze the changes of residual cable force, main beam deflection, main beam stress and tower top offset before and after cable breaking at different positions and different numbers. The results showed that single cable breaking would only produce local effects, the peak value of the change occurred near the broken cable anchorage zone and decreased to the surrounding. The combined fracture condition had a greater impact than the single cable fracture condition. Long cable fracture had the greatest impact, followed by medium cable and short cable. The impact of cable fracture in the middle span was greater than that in the side span. The influence of cable fracture on the broken span was greater than that of non broken span, and the influence on the broken cable surface was greater than that of non broken cable surface. The effect of cable breaking on the peak stress of the main beam and the stress distribution of the whole bridge was very small, but only on the main beam stress near the anchorage zone.

Keywords: curved cable-stayed bridge; broken cable condition; cable force; deflection and stress of main beam; tower top offset

(上接第 76 页)

arc simulation model was improved by using MATLAB/Simulink, and on this basis, the arc-optic grounding fault model of the pure cable line system in the scenario of exceeding the capacitance current of a medium-voltage distribution network in a city was constructed. Then, the typical fault conditions were set to simulate the arc grounding fault of any line, and the zero sequence current of each line was extracted for coif wavelet decomposition, and it was proposed that when the arc grounding fault occurred in the outlet line, the polarity of the fault line and the non-power frequency zero sequence current mode maximum of the sound line was opposite. When the arc ground fault occurred on the busbar, the polarity of the non-power frequency zero sequence current mode maximum of all out lines was the same as the arc ground fault selection criterion. Finally, the typical fault conditions were set to verify the effectiveness of the method for selecting wires for NES arc ground faults. The results showed that in different typical fault conditions such as transition resistance, fault point distance, and phase angle at fault time, this method could correctly select the arc light ground fault line.

Keywords: resonant grounding system; arc grounding fault; wavelet analysis; time-frequency domain decomposition; fault routing