

基于暂态量低频带的谐振接地系统故障选线研究

胡志明, 王彦文, 马志强, 范美琪

(中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对配电网发生单相接地故障时暂态电容电流大的特点, 提出利用暂态量实现谐振接地系统故障选线的方案, 并搭建仿真模型设置不同故障条件以进行实验分析。小波具有良好的频域分频特性, 对故障后各线路的暂态零序电流、电压进行分解, 可得不同频带的零序电流、电压分量。以暂态量经小波变换得到的低频带作为选定频带, 并根据故障线路与非故障线路在低频带的分量利用首半波原理实现故障选线。大量仿真实验结果表明该选线方案在各种故障条件下均能准确选出故障线路。

关键词: 谐振接地系统; 故障选线; 小波; 暂态量; 低频带

Research on faulty line selection of resonant grounding system based on transients in low frequency band

HU Zhiming, WANG Yanwen, MA Zhiqiang, FAN Meiqi

(School of Mechanical Electrical and Information Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: In view of the large transient capacitive current when a single-phase grounding fault occurs in the distribution network, a scheme based on transients is proposed to realize faulty line selection of resonant grounding system, and build a simulation model to set different fault conditions for experimental analysis. Wavelet has good frequency division characteristics in the frequency domain. The zero sequence current and voltage components of different frequency bands can be obtained by decomposing the transient zero sequence current and voltage of each line after fault. The Selected Frequency Band is determined by the low frequency band obtained by wavelet transform of transients, and then the selection is realized by the first-half wave principle according to the difference between fault line and non-faulted line in low frequency band. A large number of simulation results show that the scheme can accurately select faulty lines under various fault conditions.

Key words: resonant grounding system; faulty line selection; wavelet; transients; low frequency band

0 引言

小电流接地系统发生单相接地故障后可运行 1~2 h, 保障了可靠供电, 但长时间保持故障运行可能扩大故障范围, 从而影响人身和设备安全, 因此, 可靠灵敏地实现故障选线至关重要。谐振接地系统故障时, 受故障特征不明显、消弧

线圈补偿等因素的影响, 导致故障选线较为困难^[1-2], 流过消弧线圈的感性电流将补偿故障容性电流, 导致基于工频稳态选线方法失效^[3-5], 因此谐振接地系统的故障选线问题亟待解决。小电流接地系统故障时的暂态信号具有幅值大、信息量丰富及受消弧线圈和电弧影响较小等优点^[6-8],

测量和数字处理技术的提高使得基于故障暂态信息选线方法不断发展。由于小波分析良好的频域和时域局部化特性及较强的信号奇异性检测能力^[9-10], 有学者将小波分解应用于故障暂态特征提取, 根据分解系数极性关系实现选线^[11]。

本文应用小波分析进行故障选线研究。对系统产生的零序电流、电压进行小波变换分解, 并选取低频带分量作为选定频带, 利用零序电流与零序电压乘积所得的功率极性完成故障选线。

1 暂态过程

接地电流暂态分量^[12-13]

$$\begin{aligned} i_{d.os} &= i_{C.os} + i_{L.os} \\ &= I_{Cm} \left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin \omega t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right) e^{\frac{t}{\tau_c}} + I_{Lm} \cos \varphi e^{-\frac{t}{\tau_L}} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $i_{C.os}$ 为电容电流的暂态分量; $i_{L.os}$ 为电感电流的暂态分量; I_{Cm} 和 I_{Lm} 分别为稳态时电容电流的幅值和电感电流的幅值; ω_f 为暂态自由振荡分量的角频率; φ 为故障初相角; τ_c 和 τ_L 分别为电容和电感回路的时间常数。

故障起始阶段的接地电流暂态分量的特性主要受到电容电流暂态分量影响, 在选定频带内, 就零序电压与 $i_{C.os}$ 的首半波极性关系而言, 故障线路的 $i_{C.os}$ 和零序电压不同, 非故障线路的 $i_{C.os}$ 和零序电压相同; 就零序电流幅值大小而言, 故障线路的零序电流比所有非故障线路都大。因此可依据在选定频带内各线路的 $i_{d.os}$ 与零序电压首半波相位关系作为选线判据。

2 故障选线原理

信号经小波分解后得到两个频带宽度相同的高频信号和低频信号, 第二次小波分解把低频部分再分为两个频带宽度相同的高频信号和低频信号, 以此类推。正交小波变换是线性变换, 因此利用小波分解后的频带能够提取零序电流暂态特征。此外, 信号的突变点对应于小波系数的模极大值点, 模极大值的极性反映信号突变方向, 而信号突变强度由模极大值的幅值反映, 即小波变

换有着信号奇异性检测的能力。

2.1 小波变换及小波变换分解层数

小波变换公式为

$$f(t) = \sum_{j=-\infty}^J \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j,k} \psi_{j,k}(t) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{J,k} \phi_{J,k}(t) \quad (2)$$

式中, J 为任意尺度。

小波函数

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \psi(2^{-j}t - k) \quad (3)$$

尺度函数

$$\phi_{j,k}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \phi(2^{-j}t - k) \quad (4)$$

近似系数

$$c_{j,k} = \langle f(t), \phi_{j,k}(t) \rangle \quad (5)$$

细节系数

$$d_{j,k} = \langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle \quad (6)$$

函数 $f(t)$ 通过小波变换可以分解为细节分量 D_1 和近似分量 C_1 , 而 C_1 可以继续分解成 D_2 和 C_2 , 经过多层分解后可得到任意尺度上的细节分量和近似分量, 图1为函数经过6层小波分解, 有 $f(t) = D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5 + D_6 + C_6$ 。

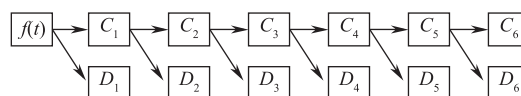


图1 6层小波分解

Fig. 1 6-layer wavelet decomposition

2.2 小波函数的选取

应用小波分析故障选线, 首要考虑的是小波函数的奇异性检测能力和时频局部化能力, 因此, 选取小波函数一般具有正交、消失矩阶数较高和支撑长度长等特性。通过对常用的Haar小波、dB10小波和Coif5小波进行多次仿真比较实验, 本文选取Coif5小波对零序电流和零序电压进行分析。

2.3 边界的处理

为保证选线的快速性, 一般是截取部分信号进行分析, 但因此将导致边界效应。即在小波分析中, 数据窗的边界点被当作奇异点, 从而影响选线可靠性。本文通过选取足够大的数据窗, 去掉小波分解后的分量两端的部分点数据来消除边

界效应的影响。

2.4 故障选线判据

根据首半波原理指出电流与电压的极性关系,选出故障线路。在0~50 Hz的低频带内,零序电流、电压满足首半波原理。当小波分解层数足够多时,其最低频带信息能够可靠地反映出故障线路和非故障线路暂态分量的突变强度和方向,从而选出故障线路。综合考虑选线的可靠性和快速性,对信号进行6层小波分解,选取的低频带为 C_6 子频带。由首半波原理可知,故障线路的 $i_{0j}u_0 < 0$ (单位为kW, j 为线路编号),非故障线路的 $i_{0j}u_0 > 0$,母线故障时所有线路的 $i_{0j}u_0 > 0$,故可通过零序电流、电压经小波分解后在 C_6 内近似分量的乘积 $i_{0j}u_0$ 的正负进行选线。为此,计算各条线路(以5条为例) C_6 内近似分量 $i_{0j}u_0$ 的模极

大值,可构成矩阵 $P=[L1 \ L2 \ L3 \ L4 \ L5]$,同时为便于分析,将故障初相角 $\text{angle}(\circ)$ 、接地电阻值(R_f)、 $i_{0j}u_0$ 模极大值为负值的线路编号(line, line即为故障线路;若 $i_{0j}u_0$ 模极大值均为正值,则故障线路为母线,此时line置0)统一写

入 P 中构成增广矩阵 $\begin{bmatrix} P \\ b \end{bmatrix}$,即

$$\begin{bmatrix} P \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L1 & L2 & L3 & L4 & L5 \\ \text{angle} & R_f & \text{line} & & \end{bmatrix} \quad (7)$$

3 仿真分析

3.1 仿真系统

用Simulink搭建5条出线的谐振接地系统单相接地故障模型,系统如图2所示,其中线路1~5长度依次为10 km、12 km、14 km、16 km

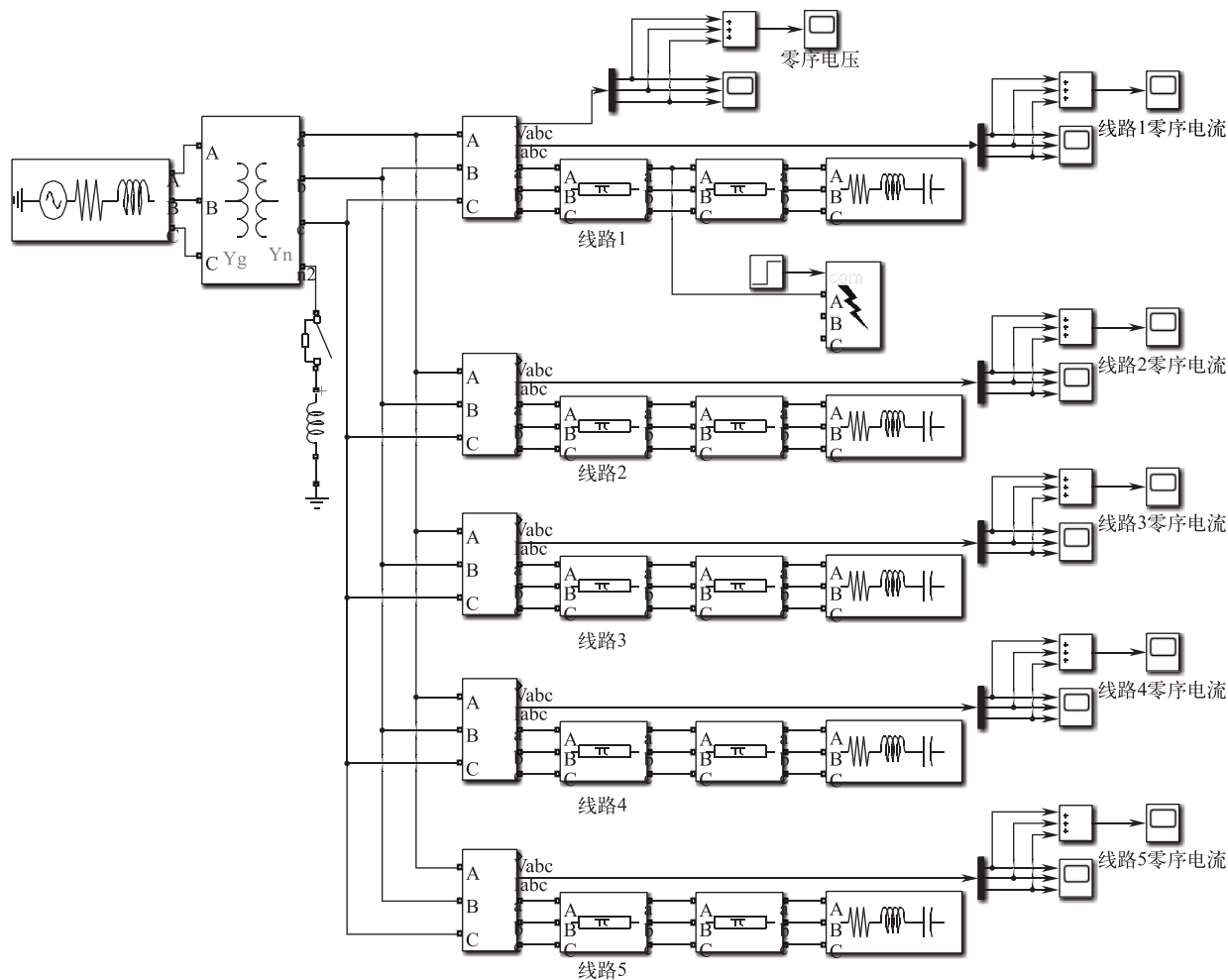


图2 系统模型

Fig. 2 System model

和18 km。每千米线路的正序、零序参数采用系统默认值。电源电压为35 kV, 变压器电压比为35 kV/10 kV, 系统设置为10%过补偿。由于电容电流暂态分量自由振荡频率主要集中在300~3 000 Hz, 以及采样频率越高对硬件要求越严格, 综合考虑后选取仿真采样频率为3.2 kHz。

3.2 仿真算例结果及分析

将Simulink故障仿真数据导入由选线判据所编制的程序中, 可得 $\left[\frac{P}{b}\right]$ 及各线路的 $i_{0j}u_0$ 波形。本文给出几种特殊接地条件下的 $\left[\frac{P}{b}\right]$ 及波形, 此外为使波形更加直观, 选取故障前后部分采样点进行波形绘制。

(1) 实验1

线路1中部在故障初相角为 0° , 即故障时刻为0.02 s, 接地电阻为10 Ω 时发生单相接地故障, 可得 $\left[\frac{P}{b}\right]$ 如式(8)所示, 未经小波分解的 $i_{0j}u_0$ 、非低频带的 $i_{0j}u_0$ 及低频带的 $i_{0j}u_0$ 波形如图3~图5所示。

$$\left[\frac{P}{b}\right] = \begin{bmatrix} -1 & 826 & 289 & 338 & 386 & 435 \\ 0 & 10 & 1 & & & \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(8)可知线路1的 $i_{0j}u_0$ 模极大值为负值, 即故障线路为线路1, 且线路1模极大值幅值最大。

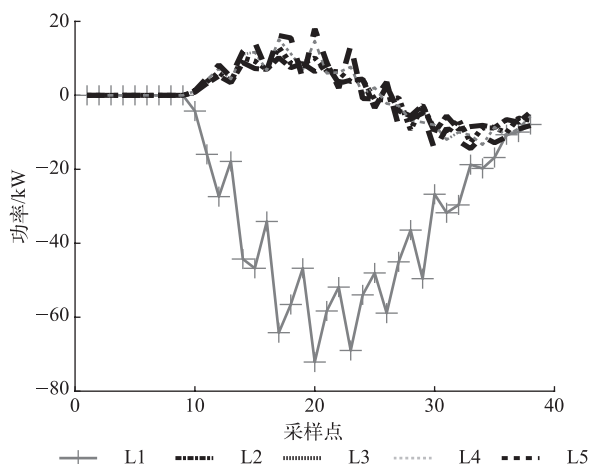


图3 未经小波分解的 $i_{0j}u_0$ 波形
Fig. 3 Waveform without wavelet decomposition

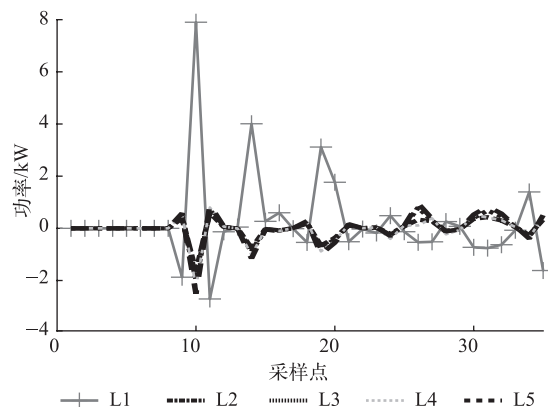


图4 非低频带的 $i_{0j}u_0$ 波形
Fig. 4 Waveforms in the non-low frequency band

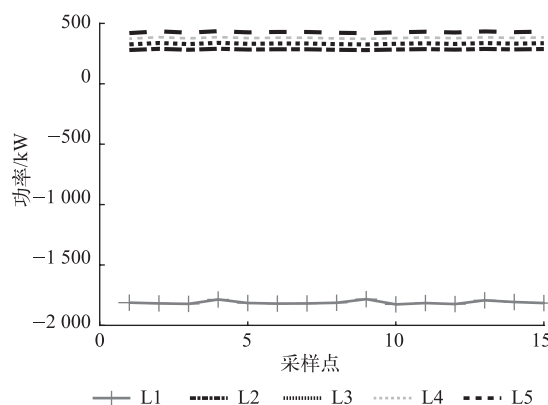


图5 低频带的 $i_{0j}u_0$ 波形
Fig. 5 Waveforms in the low frequency band

由图4可知, 非低频带的 $i_{0j}u_0$ 波形杂乱无序, 满足首半波原理的采样点所占的比例极低, 因此非低频带不适用于故障选线。

对比图3、图5可知, 虽然未经小波分解的 $i_{0j}u_0$ 可以正确选线, 但低频带内的各线路的 $i_{0j}u_0$ 幅值明显大于未经小波分解的 $i_{0j}u_0$ 幅值。就满足首半波原理的采样点所占的比例而言, 低频带高于未经小波分解, 即利用低频带选线的可靠性更高, 抗干扰能力更强。

(2) 实验2

线路2中部在故障初相角为 90° , 即故障时刻为0.025 s, 接地电阻为1 000 Ω 时发生单相接地故障, 可得 $\left[\frac{P}{b}\right]$ 如式(9)所示, 未经小波分解的 $i_{0j}u_0$ 、非低频带的 $i_{0j}u_0$ 及低频带的 $i_{0j}u_0$ 波形如图6~图8所示。

$$\left[\frac{P}{b}\right]=\left[\begin{array}{ccccc}76 & -759 & 107 & 122 & 138 \\90 & 1\,000 & 2 & & \end{array}\right] \tag{9}$$

由式（9）可知线路2的*i_{0j}u₀*模极大值为负值，即故障线路为线路2，且线路2模极大值幅值最大。

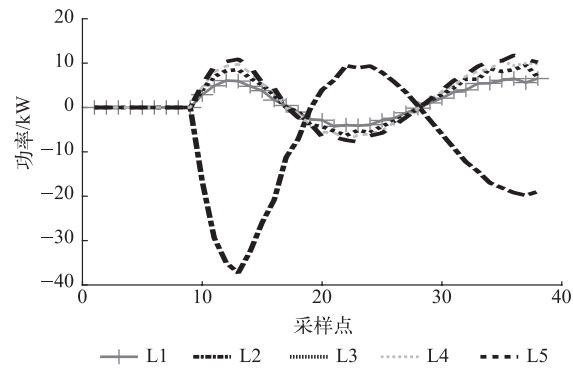


图 6 未经小波分解的*i_{0j}u₀*波形
Fig. 6 Waveform without wavelet decomposition

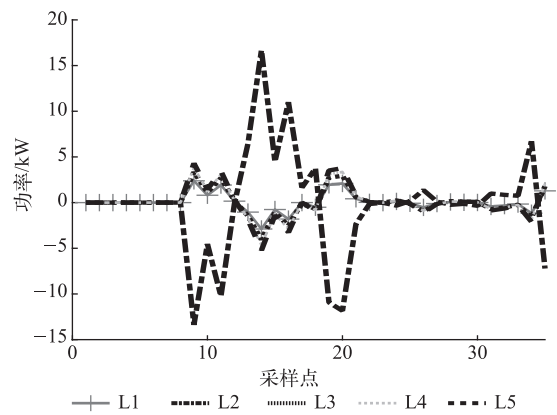


图 7 非低频带的*i_{0j}u₀*波形
Fig. 7 Waveforms in the non-low frequency band

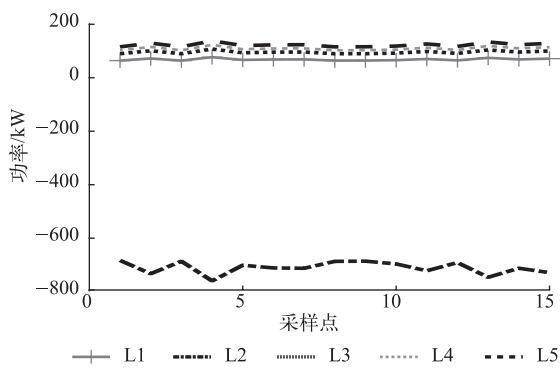


图 8 低频带的*i_{0j}u₀*波形
Fig. 8 Waveforms in the low frequency band

由图6、图7可知，未经小波分解的*i_{0j}u₀*及非

低频带的*i_{0j}u₀*均有部分点不满足首半波原理，易发生误判，因此未经小波分解的*i_{0j}u₀*及非低频带不适用于故障选线。

对比图7、图8可知，就满足首半波原理的采样点所占的比例而言，低频带高于非低频带，即利用低频带选线的可靠性更高，抗干扰能力更强。

(3) 实验3

对不同故障条件下故障进行仿真实验，限于篇幅仅列出部分数据，选线结果见表1。

表 1 选线结果

Tab. 1 Line selection results

故障线路	初相角	接地电阻	$\left[\frac{P}{b}\right]$	选线结果
3	90	10	$\left[\begin{array}{ccccc}67 & 80 & -1\,250 & 108 & 120 \\90 & 10 & 3 & & \end{array}\right]$	正确
3	90	100	$\left[\begin{array}{ccccc}68 & 81 & -1\,176 & 110 & 123 \\90 & 100 & 3 & & \end{array}\right]$	正确
3	90	10 000	$\left[\begin{array}{ccccc}5 & 6 & -40 & 8 & 9 \\90 & 10\,000 & 3 & & \end{array}\right]$	正确
母线	0	1 000	$\left[\begin{array}{ccccc}90 & 108 & 126 & 144 & 162 \\0 & 1\,000 & 0 & & \end{array}\right]$	正确
母线	0	1 000	$\left[\begin{array}{ccccc}73 & 88 & 102 & 112 & 132 \\90 & 1\,000 & 0 & & \end{array}\right]$	正确
母线	0	1 000	$\left[\begin{array}{ccccc}175 & 210 & 245 & 280 & 315 \\225 & 1\,000 & 0 & & \end{array}\right]$	正确

由表1可知，暂态量低频带的选线方法在不同故障条件下均能可靠选线。其中，故障线路的*i_{0j}u₀*模极大值为负值且幅值最大，非故障线路的*i_{0j}u₀*模极大值为正值。所有线路的*i_{0j}u₀*模极大值均为正值时，判断为母线故障。

(4) 实验4

对仅有L4、L5两条出线的系统进行故障仿真实验，在不同故障条件下的选线结果见表2。

由表2可知，对仅有两条出线的系统在各种条件下均能正确选线，其中故障线路的*i_{0j}u₀*模极大值为负值且幅值最大，非故障线路的*i_{0j}u₀*模极大值为正值。

表2 选线结果

Tab. 2 Line selection results

故障线路	初相角	接地电阻	$\left[\frac{P}{b}\right]$	选线结果
4	90	10	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1808 & 562 \\ 90 & 10 & 4 & & \end{bmatrix}$	正确
4	90	100	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1686 & 524 \\ 90 & 100 & 4 & & \end{bmatrix}$	正确
4	90	10 000	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -84 & 31 \\ 90 & 10 & 000 & 4 & \end{bmatrix}$	正确
5	0	1 000	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 210 & -386 \\ 0 & 1000 & 5 & & \end{bmatrix}$	正确
5	90	1 000	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 73 & -606 \\ 90 & 1000 & 5 & & \end{bmatrix}$	正确
5	225	1 000	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 306 & -945 \\ 225 & 1000 & 5 & & \end{bmatrix}$	正确

4 结束语

本文提出利用暂态量经小波变换确定低频带的选线方案，主要具有以下特点：

1) 应用小波分解确定的低频带不仅滤除了其他频带的干扰，而且能充分利用零序电流的幅值和相位信息，从而避免了故障特征丢失。

2) 延长了首半波法的幅值和极性关系成立的时间，能有效解决因干扰、测量误差等不利因素导致的故障特征不明显的问题。

3) 该选线方案同时利用了零序电流、电压的相位关系，因此当系统仅两条出线时，仍能正确选线。

经过大量仿真实验得出，该选线方案在不同的初相角及接地电阻的条件下均能可靠、灵敏地选出故障线路。

参考文献

- [1] 史泽兵, 丁晓兵, 余江, 等. 基于功角聚类分析的配电网选线保护方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(3): 29-35.
- [2] 程文傲, 徐明, 高金峰. 小电流接地系统单相接地故障选线空间域图像生成及融合方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(7): 97-103.
- [3] 何瑞江, 胡志坚, 王天一. 计及分布式电源注入

谐波的谐振接地系统故障选线方法[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 670-680.

- [4] 洪书文, 李悦, 周威, 等. 配电网经消弧接地系统不对称度对高阻接地故障选线影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2021, 4(1): 103-110.
- [5] 龙茹悦, 黄纯, 汤涛, 等. 一种谐振接地系统的配电网接地故障选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 21-29.
- [6] 苏小青, 余锐, 白杰, 等. 利用暂态零序电流波形特征的谐振接地系统故障选线方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(4): 106-111.
- [7] 邱进, 田野, 李冠华, 等. 基于现场实录波形的小电流接地故障暂态选线研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 180-187.
- [8] 李天友, 王超, 陈敏维, 等. 典型小电流接地故障实例及暂态选线分析[J]. 电测与仪表, 2019, 56(2): 116-122.
- [9] 黄建明, 李晓明, 瞿合祚. 基于综合小波奇异距离的谐振接地系统故障选线[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(6): 534-541.
- [10] 王建元, 张峰. 基于注入信号与小波能量的小电流接地故障选线研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(5): 28-32.
- [11] 汪洋. 基于小波分解-暂态信号的综合极性比较故障选线法[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(6): 59-66.
- [12] 李广, 薛永端, 徐丙垠, 等. 小电流接地系统接地故障电弧重燃暂态特征分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 189-196.
- [13] 金鑫, 薛永端, 彭振华, 等. 仅利用零序电流的谐振接地系统接地故障方向算法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(9): 164-170.
- [14] 郭谋发, 杨耿杰, 黄世远. 谐振接地系统暂态特征自适应故障选线方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(10): 35-41.

作者简介

胡志明(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。

(收稿日期: 2021-01-20)