

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.306

谐振接地系统的配电线路接地故障选线新方法

田晶京, 耿芳, 赵峰, 高锋阳, 李安乐

(兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 兰州 730070)

摘要: 针对因消弧线圈引起的故障电流信号微弱, 造成谐振接地系统发生单相接地故障识别率进一步降低的情况, 考虑故障线路与非故障线路间零序电流波形相似度低的特点, 提出一种谐振接地系统的配电线路接地故障选线新方法。用 HHT(Hilbert-Huang transform)和时频谱带通滤波法处理零序电流波形, 构建各线路零序电流波形的时频能量矩阵, 结合图像识别中的相似度识别法与综合相似系数矩阵, 实现线路接地故障选线。结果表明, 该选线方法对噪声干扰、两点接地故障等情况均有效。

关键词: 谐振接地系统; 故障选线; 零序电流波形; 时频能量矩阵; 相似度识别

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2022)01-059-09

Line detection method for grounding fault in resonant grounding systems

TIAN Jingjing, GENG Fang, ZHAO Feng, GAO Fengyang, LI Anle

(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University,
Lanzhou 730070, P. R. China)

Abstract: The identification rate of fault line for single-phase earth fault in resonant grounding system is normally low due to the weak fault current signal by the arc suppression coil. This paper proposes a new method to detect the fault line in resonant grounding systems based on the characteristics of the low similarity between zero-sequence current waveform through fault line and the one through non-fault line. First, the HHT(Hilbert-Huang transform) method and time-spectrum band-pass filtering method are used to process the zero-sequence current waveform. Then, the time-frequency energy matrix of the zero-sequence current waveform through each line is constructed. Finally, the detection of the fault line is realized by combining the similarity recognition method in image recognition with comprehensive similarity coefficient matrix. Simulation results illustrate that the proposed fault line detection method is effective and reliable for noise interference and two-point grounding fault in resonant grounding systems.

Keywords: resonant grounding systems; fault line detection; zero-sequence current waveform; time-frequency energy matrix; similarity recognition

收稿日期: 2020-03-15 网络出版日期: 2020-05-22

基金项目: 甘肃省重点研发计划资助项目(18YF1FA058)。

Supported by Key Research and Development Plan of Gansu Province (18YF1FA058).

作者简介: 田晶京, 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事电力系统分析, (E-mail) 719204481@qq.com。

通讯作者: 耿芳(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事配电网故障诊断研究。

谐振接地系统经消弧线圈接地方式具有易熄灭电弧和减小过电压危害等优势,广泛应用于 3~60 kV 的中压配电网中,由于消弧线圈的补偿作用,导致故障电流微弱,零序电流方向不定^[1]和出现“虚幻接地”^[2]或“换相”^[3]的现象,未彻底解决谐振接地系统故障选线问题,制约了配电网安全可靠供电运行。目前,主要利用故障信号暂态量实现故障选线^[4-7],以零序电流的能量、电压或电流幅值,极性和突变量为依据筛选故障线路。文献[8]以“能量最大”为标准确定零序电流的特征频带,提出相对能量法实现故障选线;文献[9]通过比较相邻监测点故障电流的极性判别故障线路;文献[10]根据故障时相电压和相电流突变量之间的关系,提出一种故障定位方法。上述方法受到故障电流微弱、方向不定或换相影响出现选线失误,因此,仅利用故障电流某一方面的特征构造选线依据具有片面性,当故障特征不明显时,易出现误判。配电线路发生单相接地故障时,故障线路与非故障线路间零序电流波形明显区别于非故障线路间零序电流波形,从零序电流波形相似度出发,可将图像相似度识别方法^[11-14]应用在单相接地故障选线中。为此,提出一种接地故障选线新方法,该方法以线路间零序电流波形的相似程度为选线依据,对零序电流应用希尔伯特黄变换(HHT, Hilbert Huang transform)得到 Hilbert 时频谱,再用时频谱带通滤波法重构各频带的零序电流,计算得到各线路故障电流的时频能量矩阵,求得综合相似系数矩阵完成故障选线。

1 时频能量矩阵

1.1 HHT 算法

HHT 的处理对象是具有非平稳、非线性特性的零序电流信号,其步骤中的 EMD(empirical mode decomposition)在分解故障信号时,获得 IMF 分量随着原始信号而变化,出现模态混叠问题^[15]。因此,采用时频谱带通滤波法处理零序电流信号来解决上述问题,具体处理步骤见文献[16]。

1.2 零序电流波形特征

在不同故障角下,馈线与母线故障时线路的零序电流波形,如图 1 和图 2 所示。

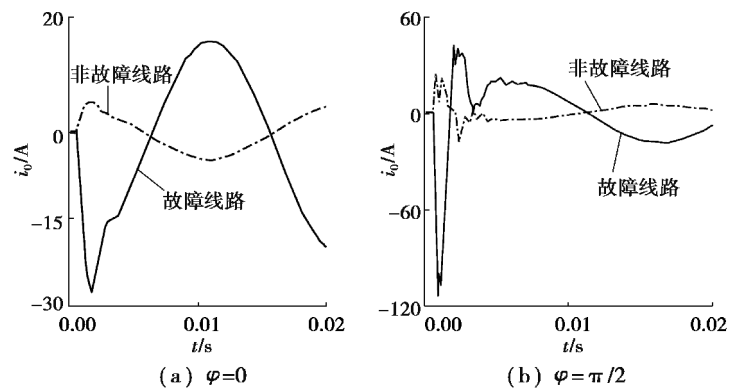


图 1 不同故障角下线路的零序电流波形

Fig. 1 Zero-sequence current waveform of the circuit at different fault angles

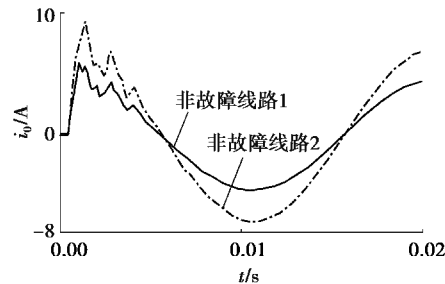


图 2 母线接地时线路的零序电流波形

Fig. 2 Zero-sequence current waveform of the circuit on bus-bar earthed fault

在 $\varphi=0$ 时,零序电流主要是低频感性电流;在 $\varphi=\pi/2$ 时,零序电流主要是高频电容分量,其余时刻,零序电流由 2 个不同频率的电流合成^[8]。由图可知,馈线故障时,故障线路与非故障线路间零序电流波形差异明显,相似度低;母线故障时,非故障线路的零序电流波形在相同时刻所对应的相位基本相同,只是幅值略有差异,各线路的零序电流波形相似度较高。因此,在任意故障角下,均可采用文中方法实现故障选线。

1.3 时频能量矩阵

对经 HHT 处理的各线路电流波形使用时频谱带通滤波法得到 $M(i=1,2,\dots,M)$ 个不同频带的原始信号分量,将各频带原始信号分量按时间轴进行 K 等分,得到 l 个具有相同频带宽度和时间间隔的时频小块,对每个时段进行 P 等分。定义所有分量时频小块的能量为

$$e_{il} = \sum_{m=1}^p |a_{il}(m)\Delta t|, \quad (1)$$

式中: $a_{il}(m)$ 为子频带 i 在时频小块 l 内 m 个数据点的幅值; Δt 为每等分所占的时间。求出所有时频小块的幅值,可获得各线路零序电流的时频能量矩阵为

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1l} \\ e_{21} & e_{22} & \cdots & e_{2l} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ e_{M1} & e_{M2} & \cdots & e_{Ml} \end{bmatrix}。 \quad (2)$$

采用时频谱带通滤波法将各条线路的零序电流波形分解到 16 个不同的频带内,取频带宽度 $\Delta f=300$ Hz,子频带的频率范围是 $[(i-1)\Delta f, i\Delta f](i=1,2,\dots,M)$,将每个子频带内的重构零序电流信号按时间轴等间距划分为 16 个时间段,可以得到 16×16 个时频小块,据式(1)计算所有时频小块的能量值,即时频能量矩阵中的元素。重构的某一子频带内零序电流信号分量及其时频谱,如图 3 所示。

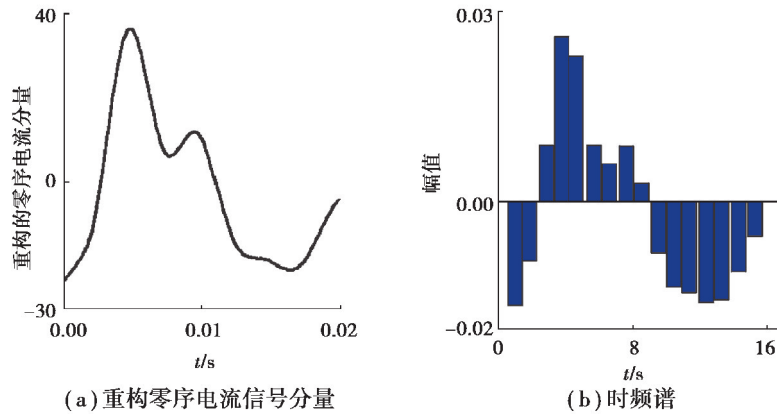


图 3 Hilbert 子频带时频谱

Fig. 3 Time-frequency spectrum for Hilbert sub-band

2 时频能量矩阵相似度识别选线方法

2.1 相似度识别方法

设 \mathbf{E}_A 、 \mathbf{E}_B 分别是 2 条不同线路零序电流信号的时频能量矩阵,则故障波形间的相似度 ρ_{AB} 为

$$\rho_{AB} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^K \mathbf{E}_A(i,j)\mathbf{E}_B(i,j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^K \mathbf{E}_A^2(i,j) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^K \mathbf{E}_B^2(i,j)}}, \quad (3)$$

式中, ρ_{AB} 值越接近于 1,即 2 条线路的故障波形越相似; ρ_{AB} 值越小,说明 2 条线路的故障波形相似度越低。

2.2 接地故障选线判据

根据相似度矩阵求出线路 i 和其他线路间的综合相似系数 k_i ^[16],与阈值 k_{set} 比较判断故障线路,经过多

次仿真表明 k_{set} 取值 0.1。

发生单相接地故障选线判据如下：

- 1) 如果线路 i 均有 $k_i > k_{set}$, $i=1, 2, \dots, H$, 则是母线故障；
- 2) 如果有 $k_i < k_{set}$, $i=1, 2, \dots, H$, 则是线路 i 故障。

故障选线方法流程, 如图 4 所示。

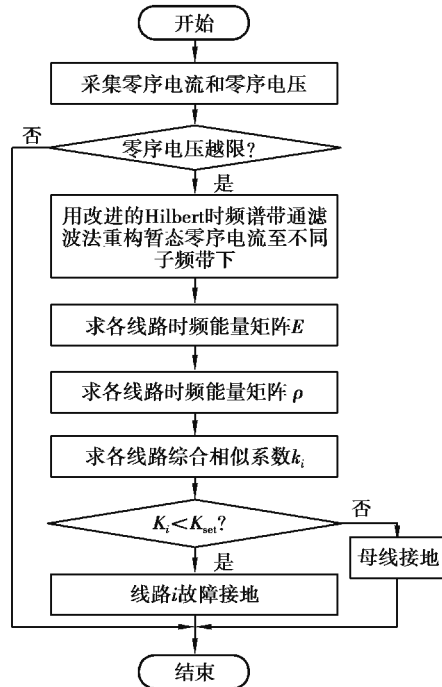


图 4 故障选线方法流程

Fig. 4 Flowchart of fault line detection

3 算例分析

3.1 算例验证

某地区 110 kV/10 kV 的变电站有 $L_1 \sim L_4$ 配电线路, 其母线故障和馈线故障的采样波形数据^[17] 分别如图 5 和图 6 所示, 用来验证文中方法的选线准确性。

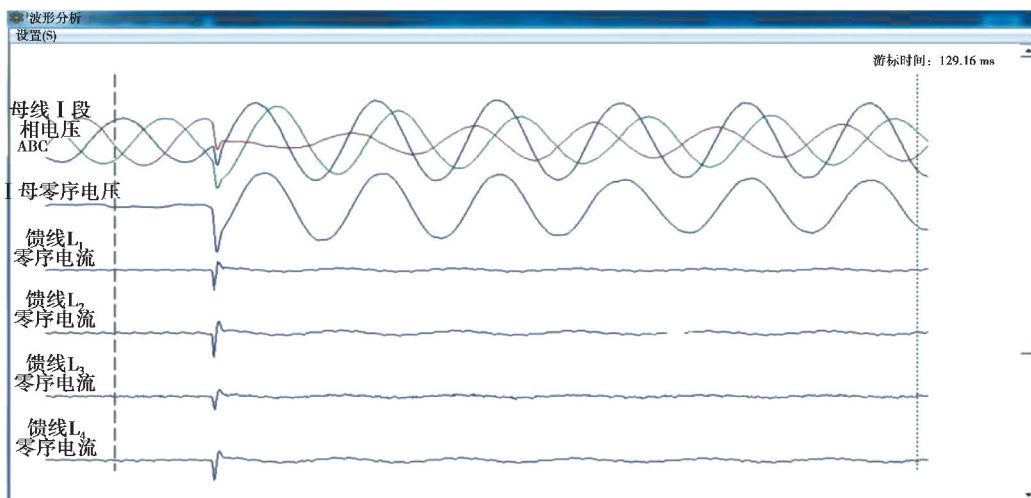


图 5 母线故障的实测录波波形

Fig. 5 Measured recorded waveform of bus-bar fault

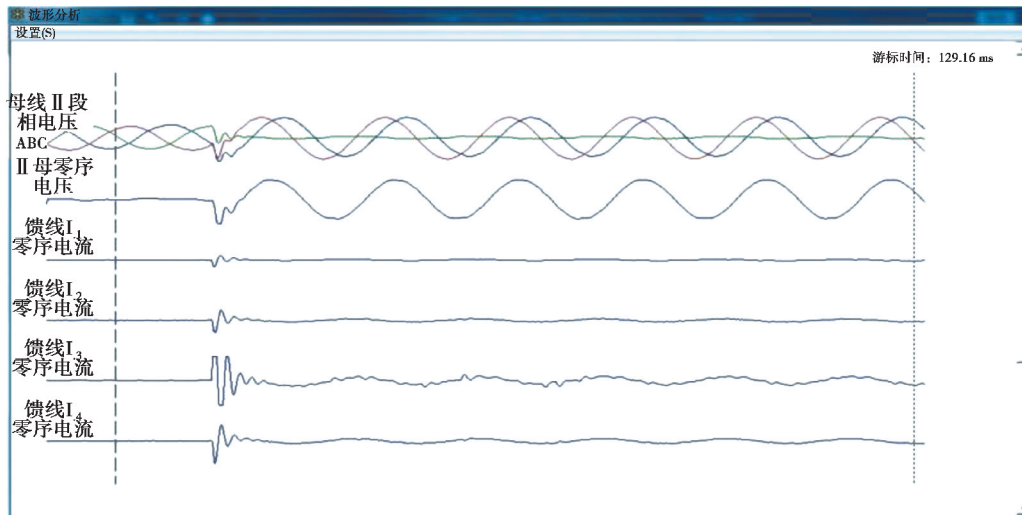


图 6 馈线 L3 故障的实测录波波形

Fig. 6 Measured recorded waveform of feeder L3 fault

3.1.1 母线故障

2013 年 2 月 10 日,母线发生单相接地故障,计算每条线路零序电流的综合相似系数,结果如下:

$$k_1 = 0.976, k_2 = 0.995, k_3 = 0.993, k_4 = 0.995。$$

将综合相似系数与阈值 0.1 比较, k_1 、 k_2 、 k_3 和 k_4 的值均大于 0.1,所以判定母线故障,判定结果与实际情况相符合。

3.1.2 馈线故障

2013 年 5 月 1 日,馈线 L_3 发生单相接地故障,计算每条线路零序电流的综合相似系数,结果如下:

$$k_1 = 0.643, k_2 = 0.651, k_3 = -0.975, k_4 = 0.640。$$

将综合相似系数与阈值 0.1 比较, $k_3 < k_{set} = 0.1$,其他馈线的综合相似系数均大于 0.1,所以故障线路是 L_3 ,判定结果与实际情况相符合。

3.2 方法适应性分析

考虑线路类型对故障选线的影响,用 MATLAB 搭建缆线混合线路的谐振接地系统,其模型如图 7 所示。图中 O_L 、 C_L 分别为架空线路和电缆线路长度。消弧线圈的补偿度取 5%,电感 L 取值 0.35 H,得到 $R_L = 0.03 \omega L = 3.3 \Omega$,每条馈线的负荷大小是 $0.5 + j0.25$ MVA。仿真模型中主变压器和馈线参数分别如表 1 和表 2 所示。

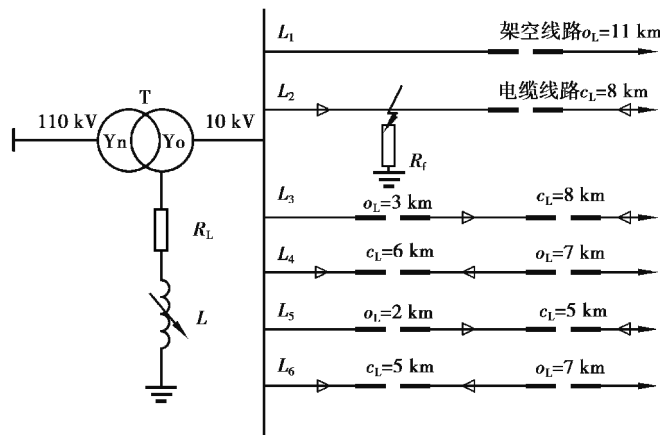


图 7 谐振接地系统仿真模型

Fig. 7 Simulation model of resonant earthed system

表 1 主变压器的参数

Table 1 Parameters of the main transformer

容量/MVA	变比	空载损耗/kW	短路损耗/kW	空载电流百分比/%	短路电压百分比/%
20	110/10	22	135	0.8	10.5

表 2 馈线参数

Table 2 Parameters of the feeder

馈线类型	相序	电阻/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	电感/($\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$)	电容/($\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$)
电缆线路	零序	2.700	1.019	0.280
	正序	0.270	0.255	0.339
架空线路	零序	0.275	4.600	0.005 4
	正序	0.125	1.300	0.009 6

3.2.1 不同故障类型

为了验证文中方法在不同故障情况下的选线有效性,改变馈线类型、故障位置、接地电阻和故障角几种因素完成仿真分析。不同故障情况下接地故障的选线结果如表 3 所示。表中: L_i 是故障线路; l_i 是故障位置(故障点到母线的距离); R_f 是接地电阻; θ 是故障角; $[k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4 \ k_5 \ k_6]$ 是综合相似系数矩阵。

表 3 接地故障选线结果

Table 3 Results of earthed fault line detection

L_i	l_i/km	R_f/Ω	$\theta/(\circ)$	综合相似系数矩阵						选线结果
				$[k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4 \ k_5 \ k_6]$						
L_2	3	20	60	[0.607	-0.975	0.607	0.607	0.607	0.606]	正确
L_2	7	100	90	[0.601	-0.989	0.601	0.600	0.601	0.601]	正确
L_4	6	20	60	[0.606	0.605	0.605	-0.976	0.606	0.606]	正确
L_4	12	100	90	[0.600	0.601	0.600	-0.991	0.601	0.601]	正确
母线	0	20	60	[0.977	0.990	0.997	0.995	0.995	0.985]	正确
母线	0	100	90	[0.976	0.994	0.997	0.996	0.997	0.998]	正确

由表 3 可知,当线路故障时,故障线路的综合相似系数均小于阈值 k_{set} ($k_{\text{set}}=0.1$);当母线故障时,所有线路的综合相似系数均大于 0.1,不同条件下均正确选线。

3.2.2 噪声干扰

设置线路 L_1 和线路 L_3 发生单相接地故障,故障信号中加入高斯白噪声(信噪比为 30 dB)时,仿真结果如表 4 所示。

表 4 高斯白噪声影响的选线结果

Table 4 Results of fault line detection with Gaussian white noise

L_i	l_i/km	R_f/Ω	$\theta/(\circ)$	综合相似系数矩阵						选线结果
				$[k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4 \ k_5 \ k_6]$						
L_1	4	20	0	[-0.995	0.602	0.602	0.601	0.602	0.601]	正确
L_1	11	200	90	[-0.994	0.601	0.600	0.601	0.600	0.601]	正确
L_3	3	20	0	[0.603	0.604	-0.991	0.602	0.604	0.604]	正确
L_3	7	200	90	[0.602	0.603	-0.997	0.602	0.602	0.603]	正确

由表 4 可知,该方法在噪声干扰下准确选线,抗干扰能力强。假设线路 3 在故障角为 90° 时,不对零序电流作 HHT 分解,得到的直接计算结果是 $[0.537 \ 0.536 \ -0.947 \ 0.528 \ 0.553 \ 0.543]$,选线结果正确但选线裕度较低,适应性不强。

3.2.3 两点接地故障

设置线路 L_2 在 $l_f=7$ km 和线路 L_4 在 $l_f=5$ km 处发生 B 相接地故障,接地电阻是 $20 \ \Omega$,其仿真选线结果如表 5 所示。结果表明,此方法在线路同时和不同时发生两点接地故障均正确选线,适应性较好。

表 5 两点接地故障时的选线结果
Table 5 Results of fault line detection with two earthed faults

L_i	$\theta/(^\circ)$	综合相似系数矩阵						选线结果
		k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	
$L_2 \ L_4$	0	0.220	-0.642	0.221	-0.467	0.232	0.231	正确
$L_2 \ L_4$	30	0.210	-0.605	0.217	-0.566	0.215	0.213	正确
L_2	0	0.226	-0.638	0.234	-0.578	0.235	0.235	正确
L_4	30							正确

3.2.4 不同暂态时间范围

当消弧线圈处于过补偿状态时,谐振接地系统发生单相接地故障时零序电流减小,其减小量与补偿度有关,而且零序电流波形特征的持续时间短暂,因此,设置线路 L_1 末端在故障角接近 0 ,接地电阻是 $2 \text{ k}\Omega$ 时发生接地故障,选用不同补偿度 p 下,不同暂态时间范围内的零序电流波形,其仿真选线结果如表 6 所示。由表 6 可知,此方法在消弧线圈处于过补偿状态,即使零序电流波形特征的持续时间短暂,仍可正确选线。

表 6 不同暂态时间范围的故障选线结果
Table 6 Results of fault line detection with different transient time ranges

$P/\%$	故障后采集的波形周期数	综合相似系数矩阵						选线结果
		k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	
5	1/4	-0.986	0.601	0.602	0.601	0.602	0.601	正确
5	1	-0.957	0.607	0.607	0.607	0.606	0.607	正确
10	1/4	-0.988	0.601	0.602	0.602	0.601	0.601	正确
10	1	-0.943	0.609	0.609	0.609	0.609	0.609	正确

3.3 方法优越性比较

假设故障线路是 L_3 ,在接地电阻 $R_f=20 \ \Omega$ 、故障位置 $l_f=3$ km 和故障角 $\theta=0$ 时,故障信号中加入高斯白噪声(信噪比为 30 dB)进行仿真,分别用文中方法、基于 EMD 的选线方法^[7]和基于小波包的选线方法^[8]进行选线,结果如表 7 所示。

表 7 故障选线结果
Table 7 Results of different methods of fault line detection

选线方法	特征指标	线路编号						结果
		1	2	3	4	5	6	
文中方法	综合相似系数	0.603	0.604	-0.991	0.602	0.604	0.604	正确
EMD 法	能量权重因子	0.431	0.025	0.022	0.045	0.057	0.018	错误
小波包法	相对能量	0.36	0.35	1.24	0.37	0.38	0.35	正确

由表7可知,在恶劣的故障环境下零序电流幅值会受到影响而减小,影响故障特征提取,引起基于EMD选线方法失误。而基于小波包的选线方法虽然选线正确,但小波包选线方法中的小波基函数的确定具有主观性,选线效果依赖于小波基函数的确定,在恶劣复杂的故障工况下会出现误选。文中所用HHT自适应分解零序电流,利用时频带通滤波法重构零序电流,解决了HHT分解故障信号存在的模态混叠问题,实现正确的故障选线。

4 结 论

利用故障后各线路零序电流波形图像的相似度,结合各线路电流波形的时频能量矩阵,提出一种配电线路的接地故障选线新方法。

1)采集零序电流波形数据实现接地故障选线,充分利用幅值和极性等信息,克服了单一型选线依据的片面性所造成的选线错误问题。

2)该方法有效放大了故障电流特征,可以区分母线故障和馈线故障,在外界噪声干扰和发生两点接地故障情况下其适应性较好。

3)采用复杂的时频能量矩阵相似度实现故障选线,解决了仅利用波形相似度选线需提取整个频带故障信号特征时所忽略的故障信号时变性问题。

参考文献:

- [1] 龙茹悦,黄纯,汤涛,等.一种谐振接地系统的配电线路接地故障选线新方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(21):21-29.
Long R Y, Huang C, Tang T, et al. A new method of grounding fault line selection for distribution line in resonant grounding system[J]. Protection and Control of Power System, 2019,47(21):21-29. (in Chinese)
- [2] 束洪春.谐振接地系统虚幻接地的辨识和综合选线方法[J].电力自动化设备,2016,36(6):122-129.
Shu H C. Identification and comprehensive line selection method of illusory grounding in resonant grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6):122-129. (in Chinese)
- [3] 束洪春.配网选线保护与故障定位[M].北京:科学出版社,2016:28-30.
Shu H C. Line selection protection and fault location of distribution network[M]. Beijing: Science Press, 2016: 28-30. (in Chinese)
- [4] Cheng S W, Fu Z X. Single-phase ground fault line selection for distribution network based on frequency domain parameter identification method[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 267(4):147-151.
- [5] 刘谋海,王媛媛.基于暂态相电流特征分析的故障选线新方法[J].电力系统及其自动化学报,2017,29(1):30-36.
Liu M H, Wang Y Y. A new fault line selection method based on transient phase current characteristics analysis[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(1):30-36.(in Chinese)
- [6] Wei X, Yang D. An adaptive fault line selection method based on wavelet packet comprehensive singular value for small current grounding system[C]// 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). IEEE, 2015.
- [7] 王清亮,杜辉.基于固有模态能量的暂态量选线方法[J].工矿自动化,2013,39(9):92-95.
Wang Q L, Du H. Line selection method with transient state based on intrinsic mode energy[J]. Industrial and Mining Automation, 2013, 39(9): 92-95.(in Chinese)
- [8] 束洪春,彭仕欣.配网缆-线混合线路故障选线相对能量法[J].电力自动化设备,2009,29(11):1-5.
Shu H C, Peng S X. Relative energy method for fault line selection of distribution cable hybrid line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(11):1-5.(in Chinese)
- [9] 庞清乐,刘昱超,李希年,等.基于电流极性比较的主动配电网故障定位方法[J].电力系统保护与控制,2018,46(20):107-114.
Pang Q Y, Liu Y C, Li X N, et al. The fault location method based on current polarity comparison in active distribution network[J]. Protection and Control of Power System, 2018, 46(20):107-114.(in Chinese)
- [10] 常仲学,宋国兵,黄炜,等.基于相电压电流突变量特征的配电网单相接地故障区段定位方法[J].电网技术,2017,41

(7):2363-2369.

Chang Z X, Song G B, Huang W, et al. The single-phase grounding fault location method based on the sudden change characteristics of phase voltage and phase current for distribution network[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2363-2369. (in Chinese)

[11] Xu X. Underwater target recognition based on time-frequency matrix[C]// International Conference on Intelligent Human-machine Systems & Cybernetics. IEEE, 2012.

[12] Xiao X, Xu F, Yang H. Short duration disturbance classifying based on S-transform maximum similarity[J]. International Journal of Electrical Power And Energy Systems, 2009, 31(7/8):374-378.

[13] 李泽文, 贺子凝, 郭田田, 等. 基于时频矩阵相似度的输电线路暂态保护方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 121-134.

Li Z W, He Z N, Guo T T, et al. Transmission line transient protection method based on time-frequency matrix similarity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5):121-134. (in Chinese)

[14] Yuan Y, Chen X, Yang L, et al. A novel fault line selection method of resonant grounding system[C]// 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing: IEEE, 2017: 1-5.

[15] 蒋海峰, 张曼, 赵斌炎, 等. 基于改进 Hilbert-Huang 变换的电网故障诊断[J]. 电工技术学报, 2019, 34(S1): 336-342, 351.

Jiang H F, Zhang M, Zhao B Y, et al. Power network fault diagnosis based on improved Hilbert-Huang transform[J]. Journal of Electrical Technology, 2019, 34(S1):336-342, 351. (in Chinese)

[16] Guo M F, Yang N C, Chen W F. Deep-Learning-based fault classification using Hilbert-Huang transform and convolutional neural network in power distribution systems[J]. IEEE Sensors Journal, 2019:1.

[17] 张宁. 小电流接地选线方法研究与装置研制[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.

Zhang N. Method research and equipment development of small current grounding line selection[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)