

DOI: 10.7667/PSPC170963

基于零序电流幅值分布相似性的小电流接地故障定位方法

张乃刚, 张加胜, 郑长明, 丁丽, 张国程

(中国石油大学(华东)信息与控制工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 小电流接地系统发生单相接地故障后, 故障点前后的暂态零序电流波形存在明显差异, 一段时间内幅值分布差别大; 而故障点上、下游同侧的暂态零序电流波形相似度高, 幅值分布差别小。根据各检测点暂态零序电流在故障发生后一段时间内幅值分布的相似性关系确定故障区段, 定义幅值分布差异系数, 以表征不同检测点之间暂态零序电流幅值分布的相似性。分别计算各区段两侧检测点的幅值分布差异系数, 选择幅值分布差异系数最大值对应的区段为故障区段。该方法只用到线路上暂态零序电流信号, 故障信号获取方便; 只需上传检测点幅值分布序列, 数据传输量小。

关键词: 小电流接地系统; 零序电流; 幅值分布; 相似性; 故障区段

Fault section location based on similarity of zero sequence current amplitude distribution in non-solidly-earthed network

ZHANG Naigang, ZHANG Jiasheng, ZHENG Changming, DING Li, ZHANG Guocheng

(College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: The waveforms of transient zero sequence current before and after the fault point is obviously different when single-phase earth fault occurs in non-solid-earthed system, difference of amplitude distribution over a period of time is big. But waveforms of transient zero sequence current on the same side of fault point's upstream and downstream is similar, and the difference of amplitude distribution over a period of time is small. The fault section is determined by similarity relations of the amplitude distribution of transient zero sequence current over a period of time after fault, and the difference coefficient of amplitude distribution is defined to characterize the similarity of amplitude distribution of transient zero sequence current in different testing points. Firstly, it calculates the amplitude difference coefficients of both sides of the testing point in every sections, and then, the fault section is determined by the corresponding maximum amplitude difference coefficient. The signals of transient zero sequence current can only be used in this method, and the fault signal is easy to obtain. Simply uploading the detection point amplitude distribution sequence, it has small data transmission.

This work is supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 16CX06051A).

Key words: non-solid-earthed system; zero sequence current; amplitude distribution; similarity; fault section

0 引言

我国 3~60 kV 电压等级电网普遍采用小电流接地方式^[1]。近年来, 小电流接地故障选线和定位技术得到了广泛发展, 出现了许多故障选线和定位方法, 其中选线技术的发展要快于定位技术, 已经十分成熟。在定位技术方面, 传统的定位方法, 如注

入法^[2]以及利用稳态信号定位的方法存在注入设备复杂和定位时间长的缺点。行波测距法^[3]不太适用于分支复杂的配电网。相比之下, 利用故障暂态信号进行定位的方法, 因其可以快速确定故障位置, 应用前景广阔。文献[4-6]利用了故障暂态信号的电流相似性法、无功功率方向法等, 该类方法主要借助线路上零序电流和电压进行定位, 存在线路电压获取困难以及回传数据量大的不足。随着小波技术的发展, 出现了许多基于小波分析的选线方法^[7-8], 但小波变换在定位方面研究较少, 文献[9]提到一种利用小波能量相对熵进行定位的方法。利用小波变

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目资助 (16CX06051A)

由图 2 和图 3 可知, M 和 N 检测点的暂态零序电流大小接近, 波形相似, P 和 Q 检测点的暂态零序电流幅值接近, 波形近似, 但故障点两侧 N 和 P 的暂态零序电流幅值和波形差别大, 验证了上文对暂态零序电流幅值分布情况的分析。

2 幅值分布相似性故障定位方法

2.1 定位原理

为了充分利用零序电流信号的幅值信息, 将故障发生后 1 个工频周期(20 ms)内的暂态零序电流数据分成 $T_1 \sim T_4$ 共 4 个时间段(分别为故障发生后 0~5 ms、5~10 ms、10~15 ms、15~20 ms), 计算 $T_1 \sim T_4$ 4 个时间段内的有效值作为该时间段内的幅值, 生成各检测点的幅值序列。定义各时间段暂态零序电流幅值计算公式为

$$I_{oi} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n i_0^2(k)} \quad (4)$$

式中: $i=1, 2, 3, 4$; I_{oi} 为第 i 个时间段内的暂态零序电流幅值; n 为第 i 个时间段内暂态零序电流的数据采样点数; i_0 为暂态零序电流。

由式(4)计算得到各检测点的幅值分布。

$$I_j = \{I_{01}, I_{02}, I_{03}, I_{04}\} \quad (5)$$

式中, I_j 为第 j 个检测点的幅值序列。

为了体现相邻检测点之间的幅值差异, 如:

$I_1 = \{I_{011}, I_{012}, I_{013}, I_{014}\}$, $I_2 = \{I_{021}, I_{022}, I_{023}, I_{024}\}$, 借鉴相对熵原理^[12]中的差异公式, 同时考虑到计算的对称性, 定义幅值分布差异系数的计算公式为

$$P(I_1, I_2) = \sum_{k=1}^4 \left| I_1(k) \log_2 \frac{I_1(k)}{I_2(k)} \right| + \sum_{k=1}^4 \left| I_2(k) \log_2 \frac{I_2(k)}{I_1(k)} \right| \quad (6)$$

式中: $P(I_1, I_2)$ 为幅值分布差异系数; $I_1(k)$, $I_2(k)$ 为两个相邻检测点的幅值分布序列。

结合相对熵原理, 两个幅值分布序列差异越小, 计算得到的差异系数越小; 反之, 差异系数越大; 当两个幅值分布序列相同时, 幅值差异系数为零。

结合小电流接地系统发生单相接地故障时的暂态零序电流分布特点可得, 故障点同侧(上游或下游)相邻检测点幅值分布差异系数小, 故障点两侧检测点幅值分布差异系数大。在确定故障线路的基础上, 计算该线路各区段两侧检测点的暂态零序电流幅值分布差异系数, 选择暂态零序电流幅值分布差异系数最大值对应的区段为故障区段。

2.2 信号获取

在实际应用中, 在已安装 FTU(Feeder Terminal Unit)的自动化程度高的配电网中, 可以利用 FTU

处的零序电流互感器直接获取零序电流数据; 而对于一些自动化程度低的配电网, 可通过三相电流合成的方式得到零序电流, 如利用带单相电流互感器的故障指示器或其他电流采集设备获取三相电流。故障零序电流由暂态分量和稳态分量组成^[13-15], 其中暂态分量频率较高, 一般在几百到几千赫兹, 而稳态分量为工频 50 Hz, 为了得到暂态零序电流需要对合成的零序电流进行数字滤波^[16]。

需要注意的是, 当部分高阻接地时, 由于接地电阻过大(1 000 Ω 以上), 实际中获取的电流信号幅值较小, 易受干扰, 该方法会存在定位误判的情况。

2.3 线路末端故障分析

考虑到线路最末区段只有一个相邻数据采集终端的情况, 为了提高定位算法的适用性, 结合线路最末区段发生单相接地故障时的特点: 故障点上游各检测点采集到的暂态零序电流相似性高, 计算得到的暂态零序电流各区段幅值分布差异系数接近。为此, 定义暂态零序电流幅值综合相关系数用来计算各区段幅值分布差异系数之间的差异。

$$\rho = \frac{1}{(n-1)} \sum_{k=1}^{n-1} (P_k / P_{k+1}) \quad (7)$$

式中: ρ 为暂态零序电流幅值综合相关系数; P_k 为第 k 个区段两侧检测点的暂态零序电流幅值分布差异系数。当 ρ 值小于设定的阈值 ρ_{set} 时, 判定故障线路最末区段发生故障; 当 ρ 值大于设定的阈值 ρ_{set} 时, 根据暂态零序电流幅值分布差异系数最大值确定故障线路。本文仿真中设定阈值 $\rho_{set}=5$, 该值可根据工程现场和检测设备的精确度设定。

2.4 多分支线路分析

配电网一般有两条以上输电线路组成, 如图 4 所示。当任一分支线路发生故障时, 该分支故障点上游线路及主干线路和健全线路组成的故障电流通路对地电容大, 导致该通路产生的故障电流要远大于另一条支路的故障电流, 故障线路分支两侧检测点电流相似性高, 幅值分布差异系数小。如当 I 支路发生故障时, 接地故障电流大部分经 3 检测点流向母线, 所以 I 故障支路区段[2, 3]计算的幅值分布差异系数要小于 II 支路区段[2, 5]的幅值分布差异系数。

存在分支线路的配电网进行区段定位时, 首先计算分支节点前后检测点的幅值分布差异系数, 如图 4 所示的区段[2, 3]和区段[2, 5], 选出幅值分布差异系数小的支路为故障支路; 然后计算故障支路上各区段的幅值分布差异系数, 选出区段幅值分布差异系数最大的区段为故障区段。

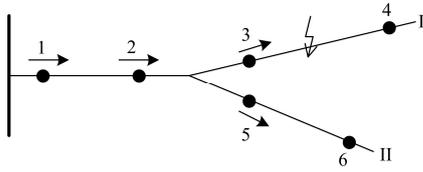


图4 配电网分支线路示意图

Fig. 4 Diagram of distribution network branch line

3 仿真研究

利用 Matlab/Simulink 建立了 10 kV 中性点经消弧线圈接地配电网仿真模型^[17], 仿真模型示意图如图 5 所示。线路总长度为 110 km, 其中 $l_1=30$ km, $l_2=20$ km, $l_3=30$ km, $l_4=10$ km, $l_{4-1}=10$ km, $l_{4-2}=10$ km 架空线路的正序参数 $R_1=0.17 \Omega$, $L_1=1.2e-3H$, $C_1=9.697e-9F$; 零序参数 $R_0=0.23 \Omega$, $L_0=5.48e-3H$, $C_0=6e-9F$ 。各条线路等效负荷阻抗统一采用 $Z_1=400+j20 \Omega$ 。

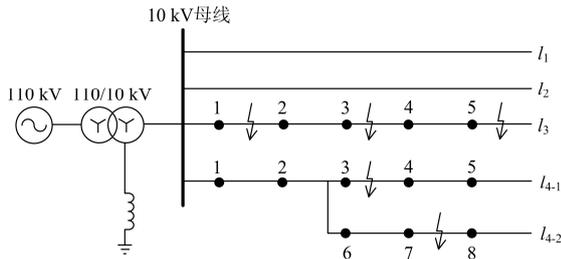


图5 仿真示意图

Fig. 5 Simulation diagram

3.1 单分支线路故障

设置 l_3 线路发生故障, 分别对不同故障位置、接地电阻以及故障初相角进行仿真, 定位结果如表 1 所示。

表1 定位结果

Table 1 Location results

故障区段	R_f/Ω	$\theta/(\circ)$	[1,2]	[2,3]	[3,4]	[4,5]	结果
1	90	71.56	2.42	4.36	7.05	正确	
[1,2]	100	0	22.85	0.16	0.17	0.21	正确
	1 000	45	3.47	0.20	0.31	0.61	正确
1	0	0.16	0.14	35.45	0.22	正确	
[3,4]	100	45	0.23	0.16	18.81	1.02	正确
	1 000	90	0.05	0.04	3.00	0.70	正确

由表 1 可以看出, 不同故障条件下仿真结果均是故障区段计算得到的幅值分布差异系数最大, 且远远大于非故障区段的幅值分布差异系数, 定位结果正确。

3.2 线路末端接地故障

当线路 l_3 最末端发生接地故障时, 接地电阻为

1 000 Ω , 故障初相角为 90° , 各检测点的暂态零序电流如图 6 所示, 根据定位算法计算得到的数据处理结果如表 2 所示。

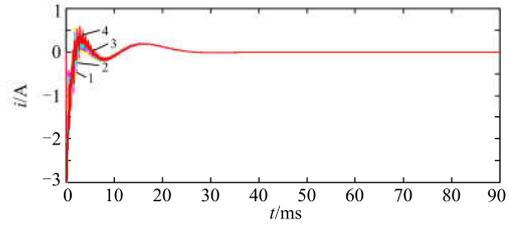


图6 各检测点暂态零序电流波形

Fig. 6 Transient zero-sequence-current of checking point

表2 数据处理结果

Table 2 Data processing results

区段	[1,2]	[2,3]	[3,4]	[4,5]	相关系数
差异系数	0.09	0.05	0.04	0.06	0.06

可以看出, 故障发生后各检测点的暂态零序电流波形相似度高, 经计算得到的各区段幅值分布差异系数小且数值相近, 计算得到的相关系数远小于设定值 5, 判断故障发生在该线路的最末区段。

分别对不同接地电阻和故障初相角进行仿真, 结果如表 3 所示。从数据处理结果可以看出, 当线路最末区段发生接地故障时(故障区段为[5-]), 计算得到的幅值综合相关系数 ρ 值小于 $\rho_{set}=2$, 判定故障最末区段发生故障, 定位结果正确, 验证了该算法对线路末端故障定位的适用性。

表3 定位结果

Table 3 Location results

故障区段	R_f/Ω	θ	[1,2]	[2,3]	[3,4]	[4,5]	系数	结果
1	90	1.20	1.10	0.82	0.66	1.22	正确	
[5-]	10	30	0.32	0.33	0.24	0.23	1.13	正确
	100	60	0.21	0.33	0.21	0.21	1.07	正确
	1 000	45	0.08	0.13	0.07	0.09	1.11	正确

3.3 多分支线路故障

当线路 l_4 分支 2 发生单相接地故障时, 接地电阻为 1 Ω , 故障初相角为 90° , 故障时各检测点的暂态零序电流如图 7 所示, 图中标注数字对应各检测点编号, 下同; 各区段幅值分布差异系数计算结果如表 4 所示。

由图 7 和表 4 可以看出, 在分支节点区段, 2、3 检测点的波形差别大, 幅值分布差异系数大; 2、

表4 数据处理结果

Table 4 Data processing results

区段	[1,2]	[2,3]	[3,4]	[4,5]	[2,6]	[6,7]	[7,8]
差异系数	1.21	25.54	1.65	3.66	3.72	0.91	71.54

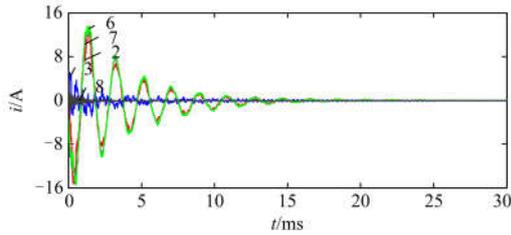


图 7 各检测点暂态零序电流波形

Fig. 7 Transient zero-sequence-current of checking point

6 检测点的波形差别小,幅值分布差异系数小,判定故障发生在分支 2 线路上;再比较分支线路上的各区段差异系数,如表 4 所示。其中[7,8]对应的差异系数最大,判定故障发生在[7,8]区段,跟理论分析结果一致,定位准确。在图 5 所示的仿真模型中,设置线路 l_4 两个分支的不同位置(区段 [3,4]和区段 [7,8])发生单相接地故障,对不同接地电阻和故障初相角进行仿真,定位结果如表 5 所示,定位结果同样正确。

表 5 定位结果

Table 5 Location results

故障区段	R_f/Ω	$\theta(^{\circ})$	[1,2]	[2,3]	[3,4]	[4,5]	[2,6]	[6,7]	[7,8]	结果
[3,4]	5	0	0.17	0.50	32.44	0.21	17.02	0.68	0.84	正确
	50	45	0.32	0.89	21.94	1.74	15.42	1.23	2.01	正确
	500	90	0.12	0.36	4.75	1.28	3.06	0.93	1.47	正确
[7,8]	5	90	1.05	21.11	1.53	3.53	3.35	0.92	60.36	正确
	50	45	0.32	17.06	0.77	1.84	4.68	0.70	33.75	正确
	500	0	0.13	11.98	0.15	0.15	5.12	0.52	18.18	正确

4 结论

本文根据故障点前后暂态零序电流在故障发生后一段时间内幅值分布上存在明显的差异,计算各区段两侧检测点的幅值分布差异系数,选择幅值分布差异系数最大值对应的区段为故障区段,并给出了相应的理论推导分析。研究表明,该方法定位不受接地过渡电阻、故障位置以及故障初相角影响,成功率高;同时,对于多分支线路以及线路末端故障的情况,该方法同样适用。

此外,该方法具有以下特点:算法简单,主站定位速度快;只利用电流信号进行故障定位,避免了在输电线路路上配置电压互感器,降低了硬件及安装成本;FTU 或采集终端只需将幅值序列上传主站,数据传输量小,通信成本低。

参考文献

[1] 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 .

[2] 杜刚, 刘迅, 苏高峰. 基于 FTU 和“S”信号注入法的配电网接地故障定位技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 73-76.
DU Gang, LIU Xun, SU Gaofeng. Research on technology of grounding fault location combining FTU and “S” signal injecting method in distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 73-76.

[3] 杨萃源, 舒勤. 基于线模行波突变的配电网全架空线路单相接地的多端检测定位新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 22-28.

YANG Luoyuan, SHU Qin. A new multiterminal detecting location method of single-phase grounding to the overhead-line for distribution network based on travelling-wave mutation of line-mode[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 22-28.

[4] 孙波, 徐丙垠, 孙同景, 等. 基于暂态零模电流近似熵的小电流接地故障定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 83-87.
SUN Bo, XU Bingyin, SUN Tongjing, et al. New fault locating method based on approximate entropy of transient zero-module current in non-solidly earthed network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 83-87.

[5] 张林利, 徐丙垠, 薛永端, 等. 基于线电压和零模电流的小电流接地故障暂态定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 110-115, 198.
ZHANG Linli, XU Bingyin, XUE Yongduan, et al. Transient fault locating method based on line voltage and zero-mode current in non-solidly earthed network[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 110-115, 198.

[6] 田书, 王亚彩, 王晓卫, 等. 基于磁场测量的配电网单相接地选线及定位新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 61-67.
TIAN Shu, WANG Yacai, WANG Xiaowei, et al. A new magnetic field measurement based method to detect faulty line and fault location for single phase to ground fault occurred in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 61-67.

[7] 张先泰, 李天友, 蔡金锭. 基于小波特征量的瞬时性

- 绝缘故障选线技术[J]. 供用电, 2010, 27(5): 46-49.
ZHANG Xiantai, LI Tianyou, CAI Jinding. Line selection technology of transient insulation fault based on wavelet characteristic quantity[J]. Distribution & Utilization, 2010, 27(5): 46-49.
- [8] 吴乐鹏, 黄纯, 林达斌, 等. 基于暂态小波能量的小电流接地故障选线新方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 70-75.
WU Lepeng, HUANG Chun, LIN Dabin, et al. Faulty line selection based on transient wavelet energy for non-solid-earthed network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 70-75.
- [9] 卢继平, 徐兵. 基于小波包能量相对熵的配电网单相接地故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 33(20): 26-31, 37.
LU Jiping, XU Bing. Single-phase earth fault section location based on wavelet packet energy relative entropy in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 33(20): 26-31, 37.
- [10] 马士聪, 徐丙垠, 高厚磊, 等. 检测暂态零模电流相关性的小电流接地故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 48-52.
MA Shicong, XU Bingyin, GAO Houlei, et al. An earth fault locating method in feeder automation system by examining correlation of transient zero mode currents[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 48-52.
- [11] 孙波, 张承慧, 孙同景, 等. 基于暂态相电流的小电流接地故障定位研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 69-74.
SUN Bo, ZHANG Chenghui, SUN Tongjing, et al. Earth fault location based on transient phase current in non-solidly earthed network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 69-74.
- [12] 何正友, 刘志刚, 钱清泉. 小波熵理论及其在电力系统中应用的可行性探讨[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 17-21.
HE Zhengyou, LIU Zhigang, QIAN Qingquan. Study on wavelet entropy theory and adaptability of its application in power system[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 17-21.
- [13] 王清亮. 单相接地故障分析与选线技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [14] 周杨璐, 高立克, 欧阳健娜. 基于改进微分进化算法的配电网故障定位计算分析方法[J]. 智慧电力, 2017, 45(10): 56-60, 65.
ZHOU Yangjun, GAO Like, OUYANG Jianna. Calculation and analysis method for distribution network fault location based on improved differential evolution algorithm[J]. Smart Power, 2017, 45(10): 56-60, 65.
- [15] 马天祥, 程肖, 杜旭浩, 等. 配电自动化系统中单相接地故障定位新方法[J]. 陕西电力, 2016, 44(8): 67-70, 75.
MA Tianxiang, CHENG Xiao, DU Xuhao, et al. A new location method of single phase to earth fault in distribution automation system[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(8): 67-70, 75.
- [16] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [17] 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 Bobo, QU Weifeng, YANG Hongyu, 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.

收稿日期: 2017-06-27; 修回日期: 2017-11-08

作者简介:

张乃刚(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网故障诊断; E-mail: 1095608104@qq.com

张加胜(1957—), 男, 博士, 博士生导师, 研究方向为电力电子及电气自动化装置、配电网自动化、电力谐波抑制与无功补偿等; E-mail: zjsycy2003@126.com

郑长明(1992—), 男, 博士研究生, 研究方向为电机控制与新能源并网变换器。E-mail: jsxzzcm@126.com

(编辑 张爱琴)