

DOI: 10.7667/PSPC171501

基于频谱序列峭度分析的小电流接地故障区段定位研究

许冲冲¹, 罗勋华², 张维², 林涛¹, 迟忠君¹, 陈艳霞¹, 谭卫斌²

(1. 国网北京市电力公司, 北京 100045; 2. 珠海许继电气有限公司, 广东 珠海 519070)

摘要: 针对基于暂态重心频率的配电网故障区段定位方法在故障点下游存在重心频率选取困难的不足, 提出对故障监测点零序电流分量的傅里叶频谱分析序列进一步采用峭度分析。对于故障点上游区段, 零序电流暂态重心频率分量幅值远高于次谐振频率分量幅值, 其频谱分析图近似单一冲击形状, 从而峭度计算值较大。对于故障点下游区段, 零序电流分散分布在各个谐振频率分量上, 其频谱分析图成多冲击形状, 从而峭度计算值较小。因此, 利用相邻两监测点峭度计算值的最大差值即能判定故障区段。大量 ATP/EMTP 仿真证明所提方法在故障点下游暂态重心频率不明显时仍能有效判出故障区段, 可以作为暂态重心频率判据的补充。

关键词: 配电网; 单相接地故障; 故障区段定位; 频谱分析; 峭度

Study on the small-current grounding fault location based on the kurtosis analysis of spectrum sequence

XU Chongchong¹, LUO Xunhua², ZHANG Wei², LIN Tao¹, CHI Zhongjun¹, CHEN Yanxia¹, TAN Weibin²

(1. State Grid Beijing Electric Power Corporation, Beijing 100045, China;

2. Zhuhai XJ Electric Co., Ltd., Zhuhai 519070, China)

Abstract: In order to avoid the difficulty of selecting gravity frequency on the downstream of fault point when transient center frequency method is used for fault location in distribution network, this paper puts forward that the Fourier spectrum sequence of zero sequence current component should be analyzed further using kurtosis analysis. For the upstream section of fault point, the amplitude of zero sequence current transient gravity center frequency is much higher than the other resonance frequency components, and the spectrum diagram is approximate to a single shock shape, thus the calculated kurtosis value is larger. For the downstream section of the fault point, the zero sequence current dispersion is distributed in each resonant frequency components, and its spectrum analysis graph is similar to multi-shock shape, thus the calculated kurtosis value is small. Therefore, the maximum difference of the kurtosis value of adjacent monitoring points is used to determine the fault section. A large number of ATP/EMTP simulations show that the proposed method can effectively find fault segments when the gravity frequency in the downstream of the fault point is not obvious, which can be used as a supplement to the transient center of gravity frequency criterion.

This work is supported by Science and Technology Project of Headquarter of State Grid Corporation of China (No. 52020116000F).

Key words: distribution network; single-phase earth fault; fault section location; spectral analysis; kurtosis

0 引言

配电网作为与用户关系最为紧密的电能分配环节, 其可靠性直接影响电力系统整体性能效率和用户供电质量。配电系统网络结构的复杂化、供电运行方式的多样化增加了控制操作和事故处理的难度。因此, 能实现线路故障区段快速定位、隔离以

及故障远方自动操作处理的配电自动化系统得到了广泛应用。

馈线自动化作为配电自动化最基本也是最重要的组成部分, 按是否需要配电自动化终端与配电主站相互通信来实现区段定位与隔离, 主要分为主站集中型馈线自动化和就地型馈线自动化。其中, 就地型馈线自动化主要包括重合器式和智能分布式两类^[1-4]。重合器式需要与变电站出线断路器或线路首端重合器相配合, 在第一次重合时实现故障定位与

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(52020116000F)

隔离, 第二次重合实现非故障区域供电恢复。经过十几年的发展与应用, 以电压时间型、电压电流时间型为代表的产品和运行经验都已比较成熟^[3]。但重合器式馈线自动化需要多次分合闸, 会导致非故障区段供电闪动; 而且其对定值管理水平要求较高, 造成维护困难。主站集中型馈线自动化综合沿线安装的终端控制单元上送采集故障电压电流信息或某一特征量选出故障线路或直接判出故障区段^[5], 可以达到快速切除故障和恢复供电的目的, 符合智能电网建设需要, 是目前国内研究热点。其中, 基于故障后零序稳态电气量的故障选线方法^[6-7]易受消弧线圈的影响, 应用范围受到限制。而中性点补偿电感在高频下阻抗值很大, 近似于开路, 因此, 专家学者主要针对暂态下配电网单相故障定位方法展开研究。文献[8]通过求取相邻检测点之间暂态零模电流相关系数确定故障区段, 只需检测零模电流但需要各检测点严格时间同步; 文献[9]提出利用故障暂态电压、电流特征频段内的无功功率方向确定故障区段, 该方法不需要各检测点时间精确同步, 但需要利用零序电压信号, 而馈线终端大多只配套安装线电压互感器; 鉴于此, 文献[10]利用暂态线电压和零模电流计算故障方向, 再根据故障区段两侧方向参数极性相反的特点定位故障区段, 但现场一般只能直接获取到两个线电压。除使用零模分量外, 文献[11]则利用三相电流中的每两相电流突变量相关系数实现接地故障定位, 但需要先选择合适的带通滤波器滤去合适的高次谐波; 文献[12]则通过比较三相电流中由接地故障产生的故障电流暂态分量的相关系数判别故障区段, 但单相接地故障电流非常小, 容易受负荷电流的影响。

此外, 基于数学分析的配电网故障选线定位方法也多有研究。文献[13]推导了故障点上游和下游零序导纳随频率变化的关系, 提出对零模电流进行快速傅里叶分析, 再根据故障点两侧零序电流重心频率各异的特征区分故障区段; 文献[14]则利用小波分析选取特征频段, 再根据特征频段类零序电压与零序电流的乘积的极性实现故障选线; 上述方法均没有考虑故障点下游区段存在暂态重心频率或特征频带选取困难的情况。文献[15-16]则利用行波法故障定位, 行波信号受配电线路分支众多的影响衰减较大。文献[17-20]则将计算机优化算法如纵横交叉算法、人类进化算法、矩阵运算引入故障区段判别, 其实用性还有待验证。

本文针对基于暂态重心频率的配电网故障区段定位方法^[13]在故障点下游存在重心频率选取困难的不足, 提出对故障监测点零模电流分量的傅里叶

频谱分析序列进一步采用峭度分析, 并利用相邻两监测点峭度计算值的最大差值来判定故障区段。大量 ATP/EMTP 仿真证明, 本文所提方法在故障点下游暂态重心频率不明显下仍能有效判出故障区段, 可以作为暂态重心频率判据的补充。

1 故障暂态零模网络振荡频率分析

配电网发生单相接地故障时, 由于线电压仍然三相对称, 负荷电流保持不变, 故障零模网络的暂态过程主要由配电线路等效对地电容和对地电感间的谐振产生。为简单分析暂态主谐振频率分量特征, 故障点上下游分别选用一个 π 型线路等效模型。考虑线模网络对暂态过程的影响, 可以建立如图 1 所示的等值电路^[21]。图中, L_k 为消弧线圈补偿电感; R_{0s} 、 R_{0x} 分别为故障点上游和下游等效零序电阻; L_{0s} 、 L_{0x} 分别为故障点上游和下游等效零序电感; C_{0s} 、 C_{0x} 分别为故障点上游和下游等效对地零序电容; L_x 为 1、2 模网络等效电感之和。

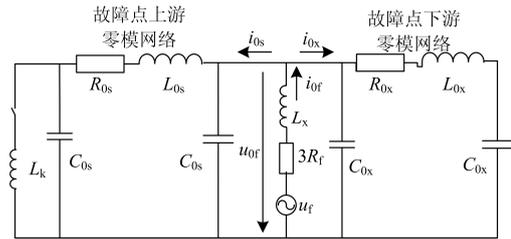


图 1 单相接地故障暂态等值电路图

Fig. 1 Equivalent circuit of transient process of single-phase-to-ground fault

根据图 1, 可以近似认为故障点两侧的暂态过程相互独立, 即上游暂态过程由故障点到母线区间线路以及所有健全线路共同产生, 下游暂态过程仅由故障点到线路末端区间产生^[22]。对于谐振接地系统, 中性点消弧线圈一般按照工频电容 5~10% 过补偿, 补偿电感的高频阻抗非常大, 在暂态零模网络阻抗分析时可以忽略。线模电感 L_x 仅由故障点至母线的线模电感和归算到 10 kV 侧的变压器电感组成^[17], 其数值通常很小, 因此从故障点下游两端看去的戴维南等效阻抗近似为 L_x 产生的阻抗。忽略故障电阻和线路电阻的影响, 得到故障点下游仅含有电感和电容的等效模型如图 2 所示^[23], 从而故障点下游网络 s 域的导纳表达式为

$$Y_{0x}(s) = \frac{s(s^2 L_{0x} C_{0x}^2 + 2C_{0x})}{s^4 L_x L_{0x} C_{0x}^2 + s^2 (L_{0x} C_{0x} + 2C_{0x} L_x) + 1} \quad (1)$$

从式(1)的分母表达式可以看出零模电流有两个谐振频率。而 L_{0x} 、 C_{0x} 都与线路长度线性相关,

分析计算可得零模网络的谐振频率随着线路长度的增加而逐渐变小^[13]。而配电网故障点下游线路长度远小于故障点上游健康馈线等效长度,因此,故障点上下游的暂态谐振频率存在明显差异,可以用于判别故障区段。文献[13]指出选择暂态重心频率要以暂态能量最大为准则。对于故障点上游区段,其仿频谱如图3所示,图中可以看出暂态能量较为集中,很容易正确选择出暂态重心频率。但从 $Y_{0x}(s)$ 的分母表达式中可以看出其为复频率 s 的4阶方程,其解为2组共轭复根,根的虚部将对应谐振频率的计算值,即当使用一个 π 型等效电路时,存在两个主谐振频率分量。由文献[24]分析可得两频率分量的幅值比为

$$K = \frac{\sqrt{L_{0x}}}{(2 - \frac{L_{0x}}{L_x})\sqrt{L_x}} \quad (2)$$

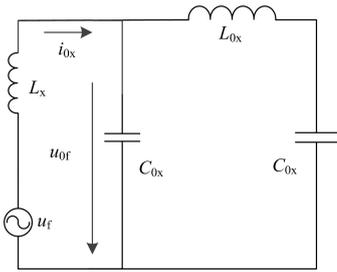


图2 故障点下游简化分析模型

Fig. 2 Equivalent circuit of upstream of the fault line

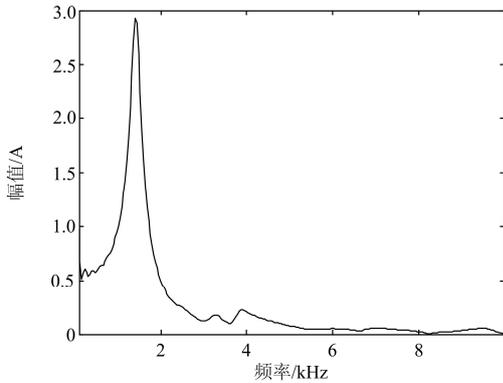


图3 故障点上游区段零模电流频谱

Fig. 3 Spectrum of every section zero modal current in upstream

由于故障点至负荷侧线路较短,故障点下游零模电感 L_{0x} 与线模电感 L_x 近似相等,从而 K 值接近1,即出现两幅值相近的谐振频率分量,造成故障点下游暂态重心频率选取存在困难。因此,可能出现如图4所示的故障点下游各区段频谱仿真图。从图4中可以看出,频谱在100 Hz到4 000 Hz频段内出

现了2次幅值相当的极值点,且低谐振频率分量的幅值略高于高谐振频率分量幅值,因而在提取暂态重心频率时存在一定困难,可能造成基于线路暂态重心频率的配电网故障区段定位方法失效。

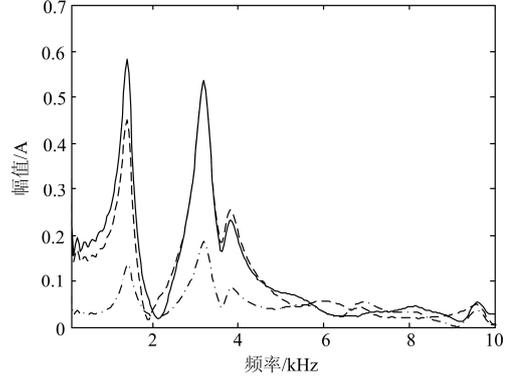


图4 故障点下游区段零模电流频谱

Fig. 4 Spectrum of every section zero modal current in downstream of the fault line

综上所述,利用谐振频率幅值作为暂态重心频率判据进行故障区段判别的方法可能存在故障点下游重心频率选取困难甚至错误的情况,需要补充其他辅助判据。基于此,本文提出一种基于频谱序列峭度分析的小电流接地故障区段定位方法。

2 峭度准则及故障定位方法

2.1 峭度准则

峭度是反映随机变量分布特性的数学统计量,其对冲击信号非常敏感,能用来描述信号波形的尖峰度,目前被较多地应用于机械滚动轴承故障诊断。峭度 K 被定义为信号四阶矩与二阶矩平方的比值,是一个无量纲量,因而不受信号绝对水平的影响,其离散的数学描述表达式为

$$K = \frac{E(x^4)}{E^2(x^2)} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{\sigma^4} \quad (3)$$

式中: $x=(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$ 为输入信号序列; N 为信号长度; \bar{x} 为信号均值; 信号标准偏差 σ 的表达式如(4)所示。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

根据式(3)和(4),峭度计算可以简化为^[25]

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{\left\{ \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right\}^2} = \frac{NM_1}{M_2^2} \quad (5)$$

其中:

$$M_1 = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4 \quad (6)$$

$$M_2 = M_1 + 2 \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{j=1, j \neq i}^N (x_j - \bar{x})^2 \quad (7)$$

式中, \bar{x} 是输入信号序列的平均值, 作为一个全局统计量, 当 x 序列中多一个冲击或者少一个冲击都对均值 \bar{x} 的影响不大, 可以认为近似不变。而当信号序列 x 中多一个冲击时, 即信号值偏离均值较大时, 将导致方差增大, 则表达式 M_2 的第二部分将增加, 那么 K 值将变小, 类推得出冲击越多 K 越小。因此, 当信号中只有单一冲击信号时, K 值越大; 而当信号中有多个冲击成分时, K 值反而明显减小。

从图 3 和图 4 的仿真频谱图中可以分析出, 对于故障点上游, 零模电流暂态重心频率分量幅值远高于其他次谐振频率分量幅值, 其频谱分析极大值序列如图 5(a) 所示, 从图中可以看出其极大值序列近似单一冲击形状, 从而峭度计算值较大。对于故障点下游区段, 零模电流频谱分散分布在多个谐振频率分量上, 其频谱分析极大值序列如图 5(b)~图 5(d) 所示, 其频谱分析图成多冲击形状, 从而峭度计算值较小。因此, 故障点上下游峭度计算值的明显差异可以用于故障区段定位。

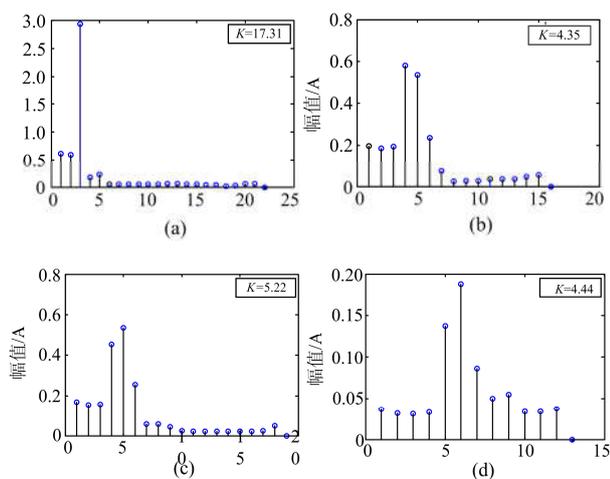


图 5 各区段零模电流频谱极大值序列及其相应峭度值

Fig. 5 Maximum sequence of spectrum of every section zero modal current and corresponding kurtosis value

2.2 基于峭度计算的故障定位方法

本文结合单相接地故障零序电流的频谱分析与峭度分析, 提出的配电网故障区段定位方法如下:

1) 当配电网发生故障时, 首先启动故障类型判别算法, 判断是否发生单相接地故障。

2) 如果判定为单相接地故障, 则利用快速傅里叶变换对各个区段监测点故障后一周波内的零模电流分量进行频谱分析。

3) 找出各个区段监测点频谱分析序列的极大值, 除去对应频率小于 100 Hz 的值, 再保存到新的数组, 作为峭度计算的输入信号序列。

4) 利用式(3)和式(4)计算出各区段监测点零模电流频谱序列极大值的峭度值。

5) 综合区段交互信息, 选出峭度差值最大的区段即为故障区段。

3 仿真验证

3.1 仿真模型

在 ATP/EMTP 环境下搭建配电网单相接地仿真模型, 对图 6 所示的 10 kV 配电线路进行仿真验证。架空线路选用频域相关的 JMarti 模型, 利用仿真平台自带子程序 Line Check 计算出工频下线路参数为: 正序阻抗 $Z_1=0.3199+j0.2895 \Omega/\text{km}$; 正序对地导纳 $b_1=j3.584 \mu\text{s}/\text{km}$; 零序阻抗 $Z_0=0.4571+j1.8067 \Omega/\text{km}$; 零序对地导纳 $b_0=j1.3673 \mu\text{s}/\text{km}$ 。每条线路等效负荷阻抗统一为 $Z_L=400+j20 \Omega$ 。四条馈线长度分别为 $L_1=10 \text{ km}$, $L_2=10 \text{ km}$, $L_3=12 \text{ km}$, $L_4=15 \text{ km}$ 。消弧线圈按过补偿 10% 计算, 对应电感值 $L=9.42 \text{ H}$ 。带有测量装置的成套配电控制终端 FTU1~FTU5 将馈线线路分为 5 个区段。

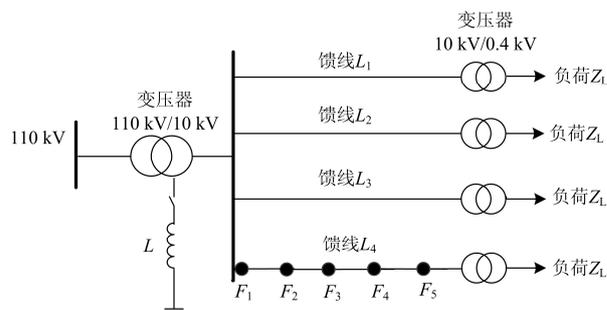


图 6 配电网仿真系统结构示意图

Fig. 6 Structural diagram of the simulation distribution system

3.2 不同故障条件下仿真验证

设定仿真系统发生 A 相接地故障时间为 $t=0.3 \text{ s}$, 故障区段为 $F_3 \sim F_4$ 段, 表 1 给出了不同接地电阻下各监测点零序电流傅里叶频谱分析序列的峭度计算值。当设定故障电阻为 50Ω , 故障区段为 $F_2 \sim F_3$ 段时, 表 2 则给出了不同故障角下各监测点零序电流的峭度计算值。当设定单相接地故障时间为 $t=0.29843 \text{ s}$, 故障电阻为 150Ω 时, 表 3 给出了不同故障区段发生故障时各监测点的峭度计算值。

表 1 谐振系统在不同接地电阻下的峭度计算值

Table 1 Kurtosis calculated value of different grounding resistances in resonant system

接地电阻/ Ω	峭度值	故障区段判定结果
	$[K_1 K_2 K_3 K_4 K_5]$	
0.1	[36.74 40.29 41.20 3.28 4.77]	F_3-F_4
50	[22.49 22.77 22.93 2.48 3.69]	F_3-F_4
100	[10.21 10.22 10.38 1.72 3.4]	F_3-F_4
300	[6.16 6.29 6.74 2.33 1.56]	F_3-F_4

表 2 谐振系统在不同电压故障相角下的峭度计算值

Table 2 Kurtosis calculated value of different voltages fault angles in resonant system

故障角度/ $^\circ$	峭度值	故障区段判定结果
	$[K_1 K_2 K_3 K_4 K_5]$	
30	[7.15 6.87 2.02 3.38 3.71]	F_2-F_3
45	[9.65 9.49 1.66 2.27 3.89]	F_2-F_3
60	[15.33 16.04 1.48 3.71 3.88]	F_2-F_3
90	[8.94 9.71 2.17 2.10 1.92]	F_2-F_3

表 3 谐振系统在不同故障区间下的峭度计算值

Table 3 Kurtosis calculated value of different voltages fault angles in resonant system

故障区段	峭度值	故障区段判定结果
	$[K_1 K_2 K_3 K_4 K_5]$	
F_1-F_2	[13.47 9.06 7.42 7.05 6.72]	F_1-F_2
F_2-F_3	[15.15 16.07 5.64 4.30 5.54]	F_2-F_3
F_3-F_4	[21.07 19.33 18.65 7.54 5.20]	F_3-F_4
F_4-F_5	[28.12 30.35 31.18 31.84 2.21]	F_4-F_5

从仿真结果表 1—表 3 中可以看出, 对于不同故障相角、接地电阻以及不同区段发生单相接地故障时, 故障点两侧零序电流频谱分析极大值序列的峭度计算值的差值总能取到甄别度较大的最大值, 因此能准确判断出故障区段。

3.3 试验数据验证

使用某电科院专项检测各分段开关的故障录波数据验证本文所提算法。图 7 为采用故障录波分析软件融合后的各个检测点的零序电流波形, 从图中可以看出第一个通道的暂态过程与其他两通道的暂态过程差异明显。采用傅里叶进行频域分析所得频谱图如图 8 所示, 从图中可以看出三个故障监测点零序电流的主频都在 200 Hz, 因此基于暂态重心频率的方法将无法判出故障区段。当对频谱序列进一步进行峭度分析后, 可得峭度计算值分别 $K_1=12.0$, $K_2=9.25$, $K_3=8.43$, 即 K_1 与 K_2 的差值最大, 即可以准确区分故障区段。

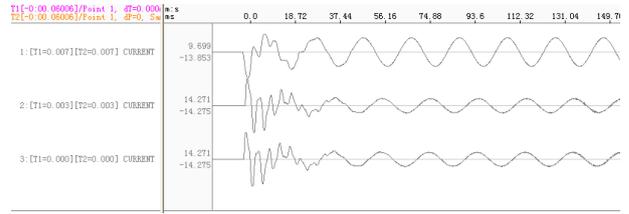


图 7 零序电流试验波形图

Fig. 7 Experimental waveform of zero-sequence current

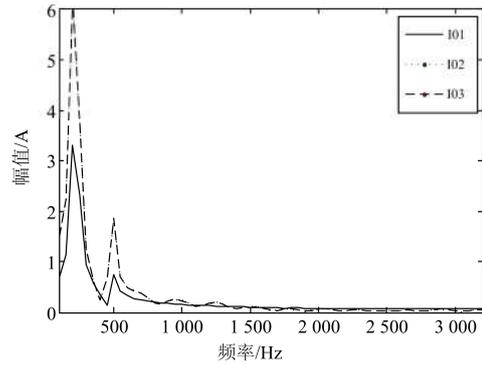


图 8 零序电流试验波形图频谱图

Fig. 8 Spectrum of experimental waveform of zero-sequence current

4 结论

1) 峭度作为数学统计分析工具, 能反映输入信号序列中冲击信号的多少, 当输入序列中有一个冲击时, 峭度值最大, 当输入信号中出现多个冲击信号时, 峭度值反而明显减小。

2) 配电系统发生单相接地故障时, 故障点上游零序电流暂态重心频率明显, 频谱分析近似于单冲击形状, 而故障点下游零序电流在多个谐振频率上均出现一定幅值, 近似于多冲击形状, 因而故障点两侧频谱图存在差异明显。

3) 采用各监测点零序电流傅里叶频谱分析序列的极大值作为峭度计算的输入信号, 能在暂态重心频率不明显下通过各区段峭度差值最大值判定故障区段, 可作为辅助判据。

参考文献

[1] 刘健, 同向前, 张小庆, 等. 配电网继电保护与故障处理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 105-147.

[2] 孙桂花, 王敬华, 张璇, 等. 分布式智能的小电流接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 72-78.

SUN Guihua, WANG Jinghua, ZHANG Xuan, et al. Small current grounding fault location method of distributed intelligence[J]. Power System Protection and Control,

- 2017, 45(16): 72-78.
- [3] 陈勇, 海涛. 电压型馈线自动化系统[J]. 电网技术, 1999, 23(7): 31-34.
CHEN Yong, HAI Tao. Voltage type feeder automation system[J]. Power Systems Technology, 1999, 23(7): 31-34.
- [4] 李振强, 彭庆华, 李辉, 等. 国家电网公司小电流接地情况及故障处理技术[J]. 供用电, 2017, 34(5): 2-6.
LI Zhenqiang, PENG Qinghua, LI Hui, et al. Small current grounding system presentation and fault processing technology of state grid[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(5): 2-6.
- [5] 伊洋, 刘育权, 陈宇强, 等. 基于信息综合判断的智能变电站网络通信故障定位技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 135-140.
YI Yang, LIU Yuquan, CHEN Yuqiang, et al. Research of network communication fault location technique in smart substation based on comprehensive information judgment[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 135-140.
- [6] 齐郑, 杨以涵. 中性点非有效接地系统单相接地选线技术分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 1-5.
QI Zheng, YANG Yihan. Analysis of technology of fault line selection for single-phase-to-earth faults in neutral point non-effectively grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 1-5.
- [7] 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): 67-75.
MA Tianxiang, CHENG Xiao, DU Xuhao, et al. A new location method of single phase to earth faults in distribution automation system[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(8): 67-75.
- [8] 马士聪, 徐丙垠, 薛永端, 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, XUE Yongduan, 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.
- [9] 孙波, 孙同景, 薛永端, 等. 基于暂态信息的小电流接地故障区段定位[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 52-55.
SUN Bo, SUN Tongjing, XUE Yongduan, et al. Single phase to ground fault section locating based on transient signals in non-solidly earthed network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 52-55.
- [10] 倪广魁, 鲍海, 张利, 等. 基于零序电流突变量的配电网单相故障带定位判据[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(31): 118-122.
NI Guangkui, BAO Hai, ZHANG Li, et al. Criterion based on the fault component of zero sequence current for online fault location of single-phase fault in distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31): 118-122.
- [11] 宋国兵, 李广, 于叶云, 等. 基于相电流突变量的配电网单相接地故障区段定位[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(10): 84-90.
SONG Guobing, LI Guang, YU Yeyun, et al. Single-phase earth fault section based on phase current fault component in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(10): 84-90.
- [12] 孙波, 张承惠, 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.
- [13] 张姝, 杨健维, 何正友, 等. 基于线路暂态重心频率的配电网故障区段定位[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2463-2470.
ZHANG Shu, YANG Jianwei, HE Zhengyou, et al. Fault section location of the distribution network based on transient center frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2463-2470.
- [14] 龚静. 利用小波包分解系数实现配电网单相接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 94-99.
GONG Jing. Using wavelet packet decomposing coefficient to achieve distribution network single-phase ground fault line selection[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 94-99.
- [15] 刘晓琴, 王大志, 江雪晨, 等. 利用行波到达时差关系的配电网故障定位算法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4109-4115.
LIU Xiaoqin, WANG Dazhi, JIANG Xuechen, et al. Fault location algorithm for distribution power network based on relationship in time difference of arrival of traveling wave[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4109-4115.
- [16] 唐金锐, 尹项根, 张哲, 等. 零模检测波速度的迭代提取及其在配电网单相接地故障定位中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 202-211.
TANG Jinrui, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Iterative extraction of detected zero-mode wave velocity and its application in single phase-to-ground fault location in distribution networks[J]. Transactions of China

- Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 202-211.
- [17] 于盛楠, 鲍海, 杨以涵. 配电线路故障定位的实用方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 86-90.
YU Shengnan, BAO Hai, YANG Yihan. Practicalization of fault location in distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28): 86-90.
- [18] 殷豪, 李德强, 孟安波, 等. 纵横交叉算法在配电网故障定位中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 109-114.
YIN Hao, LI Deqiang, MENG Anbo, et al. Fault location of distribution network based on crisscross optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 109-114.
- [19] 马腾飞, 高亮. 含多微网的主动配电网故障区段定位算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 64-68.
MA Tengfei, GAO Liang. Fault location algorithm for active distribution network with multi micro-grids[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 64-68.
- [20] 严太山. 基于人类进化算法的配电网故障定位[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 694-700.
YAN Taishan. Fault location for distribution network based on the human evolutionary algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3): 694-700.
- [21] 姜晓东, 任力, 刘铭, 等. 基于 BP 神经网络的小电流接地故障选线算法[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2017, 31(1): 67-70.
JIANG Xiaodong, REN Li, LIU Ming, et al. Research on fault line detection for non-effectively earthed system based on BP neural networks algorithm[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 31(1): 67-70.
- [22] 王磊, 曹现峰, 骆玮. 基于模糊神经网络的小电流接地系统故障选线[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(6): 750-755.
WANG Lei, CAO Xianfeng, LUO Wei. Fault line selection of small current neutral grounding system based on fuzzy neural network[J]. Journal of Heifei University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 39(6): 750-755.
- [23] 薛永端, 徐丙垠, 李天友, 等. 配网自动化系统小电流接地故障暂态定位技术[J]. 电力自动化设备, 2013, 23(12): 27-32.
XUE Yongduan, XU Bingyin, LI Tianyou, et al. Small-current grounding fault location based on transient signals of distribution automation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 23(12): 27-32.
- [24] 孙波. 基于暂态信息的配电网单相接地故障定位技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2007: 13-26.
- [25] 谭继勇, 陈雪峰, 何正嘉. 冲击信号的随机共振自适应检测方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(23): 61-67.
TAN Jiyong, CHEN Xuefeng, HE Zhengjia. Impact signal detection method with adaptive stochastic resonance[J]. Journal of Mechanical of Engineering, 2010, 46(23): 61-67.

收稿日期: 2017-10-10; 修回日期: 2018-03-16

作者简介:

许冲冲(1986—), 男, 工程师, 硕士研究生, 从事配电网自动化技术研究;

罗勋华(1989—), 男, 通信作者, 博士, 研究方向为电力系统继电保护与电气信号处理; E-mail: luoxunhuas@163.com

张维(1984—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与配电网自动化。

(编辑 葛艳娜)