

5-8-2021

A novel fault location method for power distribution systems using energy spectrum similarity analysis of single-terminal transient waveform

Zhanchun Zhu

Enshi Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Co.,Ltd., Enshi 445099 , China

Zongjun Pan

Enshi Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Co.,Ltd., Enshi 445099 , China

Jinrui Tang

School of Automation, Wuhan University of Technology,Wuhan 430070 ,China

Hai Zhou

Enshi Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Co.,Ltd., Enshi 445099 , China

Chengqing Yuan

School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology,Wuhan 430063 ,China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

Zhu, Zhanchun; Pan, Zongjun; Tang, Jinrui; Zhou, Hai; Yuan, Chengqing; Wen, Shengxue; and Zhang, Xinyu (2021) "A novel fault location method for power distribution systems using energy spectrum similarity analysis of single-terminal transient waveform," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 36: Iss. 2, Article 22.

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2021.02.022

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol36/iss2/22>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

A novel fault location method for power distribution systems using energy spectrum similarity analysis of single-terminal transient waveform

Authors

Zhanchun Zhu, Zongjun Pan, Jinrui Tang, Hai Zhou, Chengqing Yuan, Shengxue Wen, and Xinyu Zhang

基于单端暂态能量谱相似性的配电网故障区段定位新方法

朱占春¹, 潘宗俊¹, 唐金锐², 周海¹, 袁成清³, 闻生学¹, 张新宇¹

(1. 国网湖北省电力有限公司恩施供电公司, 湖北 恩施 445099; 2. 武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070;
3. 武汉理工大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430063)

摘要:故障行波在配电线路始端与不连续点之间来回反射, 这些来回反射路径下的关联特征频率分量的能量明显强于其他频率分量的能量。根据配电网固有不连续点对应的特征频率划分频段。当故障发生在馈线始端附近、主干线路的 2 个分支点之间、分支点与负荷终端点之间这 3 类情况时, 单端暂态波形在所划分频段的能量谱分布具有显著差异, 据此可构建稳定可靠的故障区段定位算法。对记录的单端故障暂态波形能量谱与各区段典型位置对应的能量谱进行相似性比对, 当能量谱差异指标小于自适应给定阈值时, 即可判定故障区段。所提出的故障区段定位方法不受线路长度误差、导线换位、导线截面积不均匀等影响, 定位可靠性高。仿真结果证明了该方法的正确性和可行性。

关键词:能量谱; 配电网; 故障定位; 暂态行波; 傅里叶变换

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.02.022 中图分类号:TM863 文章编号:1673-9140(2021)02-0180-12

A novel fault location method for power distribution systems using energy spectrum similarity analysis of single-terminal transient waveform

ZHU Zhanchun¹, PAN Zongjun¹, TANG Jinrui², ZHOU Hai¹, YUAN Chengqing³,
WEN Shengxue¹, ZHANG Xinyu¹

(1. Enshi Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Enshi 445099, China; 2. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: The fault-generated traveling waves will bounce back and forth between the beginning point and the discontinuity points on the distribution line. The energy of frequency components in the corresponding characteristic which are related to such reflected paths will be significantly higher than that of other frequency components. The traveling waves are decomposed into different frequency bands according to the characteristic frequencies in discontinuity points of the distribution line which includes the branch points, the load terminal points, and the connection points of overhead lines and underground cables. The fault scenarios can be divided into three categories: the fault section around the beginning point, fault section between one and another branch point of the main power wire, and the fault section between one branch point and the terminal load. The energy spectrums within the divided frequency bands vary sig-

收稿日期:2020-02-14; 修回日期:2020-06-10

基金项目:国家自然科学基金(51707139)

通信作者:唐金锐(1986-),男,博士,副教授,主要从事配电网故障定位与单相接地故障消弧研究;E-mail: tangjinrui@whut.edu.cn

nificantly in different scenarios, and thus these energy spectrum differences can be used to identify the location of fault sections. Once the fault occurred, the similarity between the energy spectrum of the recorded fault-generated waveforms and that corresponds to the typical positions was analyzed. The fault section can then be identified based on the constructed fault location criteria. Since the proposed method is not affected by of the following parameters of the distribution line, including the actual length error, incomplete transposition, and heterogeneous surface, the proposed method provides high reliability in the fault location. The simulation results have proved the accuracy and feasibility of the proposed fault section location method.

Key words: energy spectrum; distribution systems; fault location; transient traveling wave; fourier function transformation

配电网故障区段定位技术是缩短停电时间、提高抢修效率、实现网络自愈重构的关键技术之一。在中国中压配电网中,一般在变电站馈线出口处安装过流保护装置,实现短路故障的检测与隔离^[1],但其无法实现故障区段的精确定位,导致巡线工作量大、故障抢修效率低、停电时间长。尤其是非有效接地配电网中的单相接地故障,传统过流保护更是无法起到保护作用^[2]。

现有的配电网故障区段定位方法按实现方式可分为智能分布式、集中式和就地式 3 种。就地式区段定位方法主要借助重合闸装置与电压时间型馈线终端单元(feeder terminal unit, FTU)实现,其利用 2 次重合闸及 FTU 的 2 个动作整定时限配合完成故障区段定位^[3-4],但其会导致配电网健全区段负荷多次短时停电。文献[5]利用暂态零序电压和零序电流构建的零序电容识别算法和相电流突变量不对称度算法,实现了就地式的单相接地故障区段定位。集中式区段定位方法根据 FTU、环网柜终端单元(distribution terminal unit, DTU)和故障指示器(fault indicator, FI)等配电自动化终端设备同步采集的故障过流和故障方向^[6],构建基于逻辑关系的矩阵^[7]、图论模型^[8],或构建基于代数关系的开关函数模型^[9-11],最终利用优化算法实现具备高容错性的故障区段定位。智能分布式区段定位利用相邻配电自动化终端设备采集的电压电流信息即可实现故障区段的判断^[12]。文献[13]基于故障点两侧 2 点的暂态零模电流与功率信号波形相关性小的原理实现了智能分布式的单相接地故障区段定位;文献[14]进一步利用相关性分析实现了所有故障类型的分布式区段定位。以上方法理论上可以实现配电网故障区段定位,但其需要对广泛存在的配电自动化

终端电流传变、采样及数据处理模块进行改进,且现有相邻的配电自动化终端距离为数千米,故障区段定位的范围也无法进一步缩小。

不同于现有的配电网故障区段定位方法,基于故障行波的定位技术具有响应速度快、不受电力电子设备控制调节特性的影响,已广泛应用于交流^[15]和直流输电网^[16]中。但由于配电网拓扑结构复杂、分支较多,多点布置行波定位装置的经济代价过高等原因,基于故障行波的配电网故障区段定位方法尚处于研究探索的阶段。此类方法大多利用暂态行波到达多点^[17-19]或单点^[20-27]行波监测装置的时间差来进行配电网故障定位,基本不受接地方式、过渡电阻等的影响。文献[17]首先利用零模与线模速度差测距原理初步确定故障线路,然后利用双端行波测距技术进行故障位置的精确定位;文献[18]讨论了行波在配电架空线路和地下电缆中的传播特性,并直接利用多端初始行波到达时刻形成故障支路搜索矩阵,最终实现故障区段的界定。为克服多端行波定位需要严格时间同步难题,文献[19]利用一端初始行波、折反射行波序列与其他端行波序列的映射关系实现了弱时间同步下的定位。多端行波定位算法清晰明确,但其需要多处布点,限制了其应用范围。不同于双端行波定位,单端行波故障区段定位的方法仅利用变电站中压母线处一定时间窗内采集到的行波信号进行故障定位,无需多处布置行波传感器,便于工程实施。文献[20]通过识别来自故障点和不连续点的反射波来确定故障位置,但配电网多分支点造成的折反射波将影响其定位可靠性;文献[21]则提出利用零模和线模行波分量的速度差来进行故障定位,但零模行波衰减较快,其波速不易确定;文献[22-23]提出单端暂态波形的频率成分与故

障距离存在关联,通过对该频率的提取可实现故障定位。该方法物理意义清晰,避免了波头的提取,理论上可实现多分支架空—电缆混联线路的故障定位。但该方法仅利用波形中的一个主频率成分直接计算故障距离,虽然文献[24-25]对主频率成分的准确提取进行了深入地探讨并取得了一定的成绩,但其过于依赖某一特殊频率成分的提取,在多支配电线路中受其他频率成分影响较大,可靠性不高。为此,文献[26-27]对不同故障区段发生故障时单端暂态波形全频率段特征进行了分析,指出同一区段不同故障位置时的单端暂态波形相关性大,而故障发生在不同故障区段时的单相暂态波形相关性小,据此实现配电网故障定位。其重点是构建单端暂态波形的 M 个频段在 N 个时段的连续小波系数矩阵,即构建 M 行 N 列的时频能谱矩阵。该方法充分考虑了单端故障暂态波形的多频率特征,信息利用度高。但其频段的分割由所选小波变换算法决定,无法凸显配电网分支点、混联线路不连续点及故障点等这些特殊位置在整个频谱中的地位,导致整个故障区段定位算法较为复杂。

因此,该文提出基于单端暂态能量谱相似性的配电网故障区段定位新方法,此方法首先建立单端暂态故障波形频段的划分准则,然后形成待定位配电网的单端暂态能量谱特征库。一旦发生故障,分析得到单端故障暂态波形多频段下的暂态能量谱,通过与特征库的比对确定故障位置。仿真结果显示此方法定位准确,不存在故障区间误判现象,满足故障区段定位工程需要。

1 配电网单端暂态波形的频谱特征

1.1 配电线路中行波传输特性分析

对于均匀传输线^[28],有

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} = -(Ri + L \frac{\partial i}{\partial t}) = -(R + j\omega L)i \\ \frac{\partial i}{\partial x} = -(Gu + C \frac{\partial u}{\partial t}) = -(G + j\omega C)u \end{cases} \quad (1)$$

式中 u 、 i 均为沿线各点电压和电流的瞬时值; x 为该点距离线路始端的长度; R 、 L 、 G 、 C 为传输线的参数,分别表示单位电阻、单位电感、单位电导、单

位电容; ω 为电流/电压的角频率。

在行波研究中,可将三相电力线路等效为无损线路。当以线路始端作为计算距离 x 的起点时,利用凯伦布尔变换得到电压时域方程:

$$\begin{bmatrix} L_0 C_0 & 0 & 0 \\ 0 & L_1 C_1 & 0 \\ 0 & 0 & L_1 C_1 \end{bmatrix} \frac{\partial^2 \mathbf{u}_m}{\partial^2 x} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \frac{\partial^2 \mathbf{u}_m}{\partial^2 t} \quad (2)$$

其中

$$\mathbf{u}_m = [u_0 \quad u_\alpha \quad u_\beta]^T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{3} & 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} [u_a \quad u_b \quad u_c]^T \quad (3)$$

式中 u_α 、 u_β 为线模电压; u_0 为零模电压; $L_1 = L_s - L_m$, $L_0 = L_s + 2L_m$, L_s 为每相导线以大地和地线为回路的自感, H/km, L_m 为相间的互感, H/km; $C_1 = C_0 + 3C_m$, C_0 为每相导线对地电容, F/km, C_m 为相间的耦合电容, F/km。

由式(2)可得各模电压的波阻抗和波速为

$$\begin{cases} v_\alpha = v_\beta = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}, v_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \\ Z_\alpha = Z_\beta = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}, Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \end{cases} \quad (4)$$

当线路的参数或波阻抗在某一节点处发生突变,则式(4)给出的各模电压行波将发生折反射。假设线路 1、2 的 i 模波阻抗分别为 Z_{i1} 、 Z_{i2} , 则行波从线路 1 进入到线路 2 时将发生折反射。 i 模电压行波的反射系数 ρ_i 和折射系数 γ_i 计算公式为

$$\begin{cases} \rho_i = \frac{Z_{i2} - Z_{i1}}{Z_{i2} + Z_{i1}}, \\ \gamma_i = \frac{2Z_{i2}}{Z_{i2} + Z_{i1}}, \end{cases} \quad i = \alpha, \beta, 0 \quad (5)$$

1.2 配电线路单端暂态波形的频率特征

虽然故障暂态波形具有从低频到高频的连续频谱,但由于行波在观测点与配电线路不连续点之间来回反射,从观测点记录的暂态波形来看,这一来回反射路径下的关联频率分量的能量将明显强于其他频率分量。

如果将反射与折射系数当做实数处理,则根据

来回折射路径理论计算,单端暂态波形的能量将主要集中在与这些路径相关联的多点特征频率上,计算公式^[29]为

$$f_{p,i} = \frac{v_i}{n_p L_p} \quad (6)$$

式中 v_i 为 i 模电压暂态行波的传播速度; L_p 为传播路径 p 的长度; n_p 取决于来回反射路径两端的反射系数,同为正或同为负时为 2,相反时为 4。

对于一个具体的配电馈线而言,馈线始端监测到的故障暂态波形,其多点特征频率将主要由馈线始端与分支点、架空—电缆混合线路的连接点、负荷终端以及故障点之间的来回反射路径所决定。

以图 1 所示的配电线路为例,分析变电站母线处(A 处)单端暂态波形的频率特征。在图 1 所示配电线路中,配电网系统中负载通过配电变压器接入。为简化分析,假设 AB、BD、BC、DF 和 DE 线路参数相同。

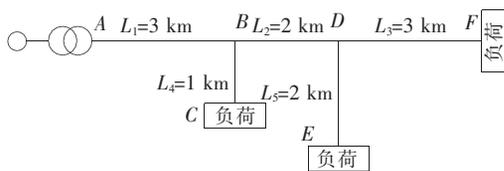


图 1 典型配电网系统

Figure 1 One typical distribution system

若测量位置位于母线 A 处,线路 DE 的 50% 处发生了三相短路故障,则故障暂态行波将在配电系统中传播并在阻抗不连续点发生折反射。以 A 处来看,暂态行波会在 A-B、A-B-C、A-B-D、A-B-D-F、A-B-D-f (f 为故障点)之间来回折反射。

根据式(5)可得,行波在分支节点 B 和 D 处的反射系数为负实数,在馈线终端 C、F 和 E 处反射系数为正实数。

根据式(6)可计算得出,A 处记录的线模暂态电压波形具有的多点特征频率,如表 1 所示,共有 5 个特征频率。对实际记录的波形做 FFT 分析,其结果如图 2 所示,对应应有 3 个频率点:11.23、20.51、34.18 kHz。受限于 FFT 在非平稳信号频谱分析的局限^[30],结果与表 1 理论特征频率存在差别。此处仅用于说明单端暂态波形的多点特征频率与配电馈线来回反射路径存在关联映射。

表 1 故障发生在 DE 线路 50% 处时对应的特征频率

Table 1 Characteristic frequencies corresponding to a fault at middle of line DE

传播路径	传播路程/ km	特征频率(传播速度 假设为光速)/kHz
A-B	4×3	25.00
A-B-C	2×4	37.50
A-B-D	4×5	15.00
A-B-D-F	2×8	18.75
A-B-D-f	4×6	12.50

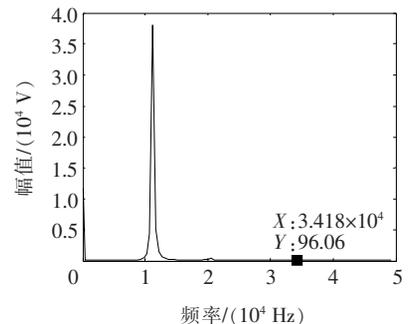


图 2 DE 50% 处故障时 A 处记录波形的 FFT 分析结果

Figure 2 Results of the FFT analysis for the recorded transient waveform at bus A corresponding to a fault at 50 percent of DE

2 基于单端暂态能量谱相似性的配电网区段定位基本原理

馈线始端记录的单端暂态波形频谱丰富,故障发生在配电馈线的不同区段,故障行波的来回反射路径不同,将导致馈线始端记录到的单端暂态波形的暂态能量谱剧烈变化^[31]。为凸显不同故障区段单端暂态能量谱的差异,需要先对暂态波形进行频段划分,然后比较各频段能量谱的差异,继而可靠实现配电网故障区段定位。

根据配电线路单端暂态波形频率特征的分析结果,行波来回反射路径主要由分支点、线路末端、架空—电缆连接处以及故障点共同决定。配电线路始端与分支点、线路末端、架空—电缆连接处之间的来回反射路径由配电网拓扑结构决定。

假设某配电线路有分支点 n_1 个 (B_1, B_2, \dots, B_{n_1})、负荷终端点 n_2 个 (L_1, L_2, \dots, L_{n_2})、架空—电缆混合线路联接点 n_3 个,该条配电线路有不连续点个数 $n = n_1 + n_2 + n_3$,则馈线首端与这 n 个不连续

点之间的来回反射路径,将在馈线始端暂态波形中产生 n 个固有特征频率,暂态波形的能量也主要集中在这几个特征频率上。如果有重复的固有特征频率,则需加以剔除,此时固有特征频率的数量将相应的减小。一般来说,按 n 个固有特征频率考虑,将所有的固有特征频率升序排序,记为 $f_1, f_2, \dots, f_i, \dots, f_n$,则可将首端采集到的故障暂态信号分割为 $n+1$ 个频率段加以分析。第 1 个频率段为 0 至 $f_1/2$,最后一个频率段为 $(f_n + f_{n-1})/2$ 至可分析的最高频率,中间第 $i+1$ 频率段为 $f_i - (f_i - f_{i-1})/2$ 至 $f_i + (f_{i-1} - f_i)/2$ 。这样,将每一个不连续点对应的特征频率划分到了一个具体的频率段中。

一旦发生故障,则馈线始端暂态波形的频谱特征将发生明显变化。假设故障位置发生在区段 k 上,且配电网固有的 n 个行波来回反射路径中有 m 个路径($1 \leq m \leq n$)包含有这个故障位置,则此时单端暂态波形新增了一个与故障位置相关联的特征频率 f_p ,少了 m 个固有特征频率。

为可靠定位故障区段,需分析故障发生在不同区段时始端暂态波形的能量谱特征。根据配电线路的结构,故障位置可能发生的区段可以分为 3 类。

第 1 类 故障发生在配电线路主干线上,位于馈线始端与第 1 个分支点之间。此时故障位置位于配电线路始端附近。传统基于反射波头识别或模量波速差的单端故障定位方法将存在盲区,可能出现故障区段的误判。但是对于该文提出的方法,原有 n 个行波来回反射路径全部包含有这个故障位置,最后单端暂态波形的能量只会集中在与故障位置相关联的特征频率 f_p 上,而非原来的 n 个特征频率上,非常容易辨识。即使故障位置仅离始端 500 m,根据式(6)也可计算出此时 $f_p = 150$ kHz,采样率大于 300 kHz 即可满足要求,不会造成故障区间的误判。

第 2 类 故障发生在配电线路主干线上,位于分支点 B_k 和 B_{k+1} 之间, B_k 更靠近线路始端,接入分支点 B_{k+1} 的分支线路终端负荷点为 L_{k+1} 。此时原有 n 个行波来回反射路径至少有 2 个路径包含故障位置,即始端至 B_{k+1} 分支点以及始端至 L_{k+1} 终端点的路径,而故障位置的引入将新增一个特征频率 f_p 。整体而言,此时,按照该文提出的频率段划

分方法,单端暂态波形能量谱至少发生了 3 个明显变化:分支点 B_{k+1} 对应特征频率所处的频率段、负荷终端点 L_{k+1} 对应特征频率所处的频率段将发生明显变化,故障位置对应特征频率所处的频率段也将发生明显变化。当故障发生在不同的两分支点组成的区段上时,单端波形在所划分频段下的暂态能量谱分布有明显的差异。

第 3 类 故障发生在配电线路分支线上,位于分支点 B_k 与负荷终端点 L_k 之间。此时原有 n 个行波来回反射路径上只有 1 个路径包含故障位置,即始端至 L_k 终端点的路径。此时负荷终端点 L_k 对应特征频率消失,新增了故障位置对应的特征频率。由于始端与负荷终端点的行波反射系数同为正,而始端与故障点的行波反射系数相反。根据该文提出的频率划分原则,故障点对应的特征频率只有 L_k 对应特征频率的一半,不会出现在同一频段内。因此,单端暂态波形能量谱至少发生了一个明显变化:负荷终端点 L_k 对应特征频率所处的频率段将发生明显变化。

综上所述,配电网的不连续点有分支点、负荷终端点和架空—电缆线路混联点。根据配电网固有不连续点对应的特征频率划分好频段,则当故障发生在馈线始端附近、主干线路的 2 个分支点之间、分支点与负荷终端点之间这 3 类情况时,单端暂态波形在所划分频率段的能量谱分布具有显著的差异,利用这一差异能构建稳定可靠的故障区段定位算法。

因此,该文提出基于单端暂态能量谱相似性的配电网故障区段定位方法,具体步骤如下。

1) 按配电线路始端与所有 n 个线路不连续点来回反射路径对应的 n 个固有特征频率,将首端采集到的故障暂态信号分割为 $n+1$ 个频率段加以分析。第 1 个频率段为 0 至 $f_1/2$,最后一个频率段为 $(f_n + f_{n-1})/2$ 至可分析的最高频率,中间第 $i+1$ 频率段为 $f_i - (f_i - f_{i-1})/2$ 至 $f_i + (f_{i-1} - f_i)/2$ 。这样,将每一个不连续点对应的特征频率划分到了一个具体的频率段中。

2) 利用 PSCAD/EMTDC 等电磁暂态仿真软件,对所研究的配电线路进行建模与仿真,获得配电线路各区段典型故障位置对应的线路始端测量点记录的暂态电压波形。

3)对单端暂态波形进行能量谱分析。由于该文不是直接提取一个主频率成分直接计算故障距离,因此,可以减小频率提取准确性与复杂性的要求。为消除不同待分析信号强弱对结果的影响,频率段能量值需进行规格化处理,规格化处理公式为

$$E_i^* = E_i / \sum_{j=1}^{n+1} E_j \quad (7)$$

式中 E_i 为经 FFT 分析和频率段分割之后第 i 频率段的能量值; $n+1$ 为频率段分割总数; E_i^* 为规格化处理后的能量值。由于零模行波速度不稳定,该文采用线模电压行波进行能量谱分析,则第 p 个区段的第 q 个典型位置对应的能量谱分布:

$$\mathbf{D}_{pq} = [E_{pq,1}^* \quad E_{pq,2}^* \quad \cdots \quad E_{pq,n+1}^*] \quad (8)$$

若所需定位配电线路共有 ρ 个区段,每个区段设定 ω 个典型故障位置,则可得用于故障区段定位的能量谱分布:

$$\mathbf{D}_{\text{line}} = \begin{bmatrix} E_{11,1}^* & E_{11,2}^* & \cdots & E_{11,n+1}^* \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ E_{1\omega,1}^* & E_{1\omega,2}^* & \cdots & E_{1\omega,n+1}^* \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ E_{\rho 1,1}^* & E_{\rho 1,2}^* & \cdots & E_{\rho 1,n+1}^* \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ E_{\rho\omega,1}^* & E_{\rho\omega,2}^* & \cdots & E_{\rho\omega,n+1}^* \end{bmatrix} \quad (9)$$

4)一旦配电线路发生了故障 f ,则对线路始端装设的暂态电压采集装置采集到的暂态波形进行能量谱分析并进行归一化,得到各频率段下的能量谱分布:

$$\mathbf{D}_f = [E_{f,1}^* \quad E_{f,2}^* \quad \cdots \quad E_{f,n+1}^*] \quad (10)$$

5)根据故障发生在馈线始端附近、主干线路的 2 个分支点之间、分支点与负荷终端点之间这 3 类情况时,单端暂态波形在所划分频率段的能量谱分布分析可知,同一个区段上的 2 个故障位置,其对应的单端暂态波形在该文所划分的频段上的分布特性相似;不同区段上的 2 个故障位置,其对应的单端暂态波形在该文所划分频段的分布呈现明显的不同。

对故障产生的单端能量谱分布 \mathbf{D}_f 与能量谱分布 \mathbf{D}_{line} 中第 p 个区段的所有 ω 个典型故障位置对应的能量谱分布进行相似性比对,衡量指标为各频率段能量值差异的平方和 $S_{f,p}$,即

$$S_{f,p} = \sum_{q=1}^{\omega} \sum_{j=1}^{n+1} (E_{f,j}^* - E_{pq,j}^*)^2 \quad (11)$$

构建故障区段判定阈值公式:

$$S_{\text{set}} = K_1 \cdot \frac{1}{\rho - 1} \left(\sum_{k=1}^{\rho} S_{f,k} - \min(S_{f,k}) \right) \quad (12)$$

式中 ρ 为配电线路的区段总数; K_1 为可靠系数。若故障暂态波形的能量谱与第 m 个区段的所有典型故障位置的差异指标 $S_{f,m}$ 小于阈值 S_{set} ,则可以判断区段 m 为故障区段。提出的故障区段定位方法利用了每个区段的 ω 个典型故障位置信息做判断,可靠性高。

在确定故障发生在区段 m 上后,由于每一个区段上设定了 ω 个典型位置,若实际故障的能量谱与故障区段 m 的第 q 个典型位置对应的能量谱满足:

$$\sum_{j=1}^{n+1} (E_{f,j}^* - E_{mq,j}^*)^2 < K_{\text{II}} \cdot \frac{S_{f,m}}{\omega} \quad (13)$$

式中 K_{II} 为可靠系数。则判定实际发生的故障在第 q 个典型位置附近,可进一步缩小故障定位的范围。

3 适应性分析

文 2 中提出的故障区段定位方法是建立在准确的配电线路电磁暂态仿真模型基础上的。实际中配电线路的长度一般不太能够准确获取,线路杆塔、截面不均匀等因素也会导致波阻抗不连续点,实际配电线路具有多重分支,这些都会对该文提出的故障区段定位方法带来影响。

3.1 配电线路长度不准确带来的影响

实际配电网中配电线路长度往往并不准确,而该文所提方法在频率段划分、能量谱相似性分析当中均需要较为准确的配电线路模型。需要分析配电线路长度不准确带来的影响。

如图 3 所示,对于不连续点 n_e ,紧挨的不连续点分别为 n_{e-1} 和 n_{e+1} 。始端至 n_{e-1} 的实际长度为 L_a ,至 n_e 的实际长度为 $L_a + L_e$,至 n_{e+1} 的实际长度为 $L_a + L_e + L_{e+1}$ 。

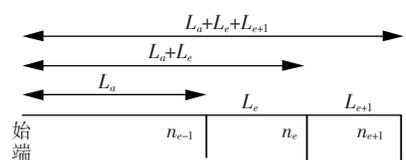


图 3 配电线路长度误差对所提方法的影响

Figure 3 The impact of the length measurements error of the line on the fault location algorithm performance

不连续点 n_e 所对应的特征频率为

$$f_e = \frac{v_i}{2n_p \cdot (L_a + L_e)} \quad (14)$$

假设节点 n_{e-1} 至 n_e 的区段长度 L_e 在建模过程中数据不准确,长度误差为 $\delta\%$;则依据该文所提出的频率划分原则,不连续点 n_e 所处的频段为

$$\frac{v_i}{2n_p [L_a + L_e(1 + \delta\%)]} + \frac{v_i}{2n_p [L_a + L_e(1 + \delta\%) + L_{e+1}]}$$

至 $\frac{v_i}{2n_p [L_a + L_e(1 + \delta\%)]} + \frac{v_i}{2n_p L_a}$ 。

为正确定位故障区段,需要 n_e 对应的实际特征频率 f_e 处于所给定的频段内。据此可以推算出此时 L_e 的线路长度误差需满足条件:

$$-\frac{L_{e+1}}{2L_e} < \delta\% < \frac{L_a + L_e}{L_a - L_e} \quad (15)$$

也就是说,当配电线路长度存在误差的情况下,只要保证误差满足式(15),则各不连续点依然处于对应的划分频段内,不影响该文所提故障区段定位方法的有效性。对于一般配电网拓扑结构而言,当长度误差为 $-50\% \sim 100\%$ 时,该文所提方法均可实现准确的故障区段定位。

3.2 线路换位与截面不均匀带来的影响

该文在频率划分及故障区段定位算法中,主要考虑分支点、负荷终端点及电缆—架空线连接点等固有波阻抗不连续点。实际配电线路存在导线换位、截面不均匀等情况,此时配电线路波阻抗也将发生变化,需要对此情况进行分析。

根据式(4)可得线路的线模波阻抗为

$$Z_\alpha = Z_\beta = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \ln \frac{D_m}{r} (\ln \frac{D_m}{r} + \frac{1}{4})} \quad (16)$$

式中 D_m 为三相导线的互几何均距; r 为线路自身半径。在导线换位时, D_m 会发生变化;导线截面积不均匀时, r 会发生变化。此时线路线模波阻抗也将出现不连续点。

一般而言,导线换位造成的三相导线互几何均距不会超过 10% ,截面积不均匀时的变化也不会超过 10% 。而配电线路导线互几何均距约为 0.9 m ,导线半径约为 8 mm ,根据式(16),线路波阻抗的变化不会超过 2% ,根据式(5)可得此时的返回系数小于 0.01 。也就是说,行波在这类情况下的反射波非常小,一个来回幅值就衰减了 99% 。其在线路始端

单端暂态波形中可以忽略不计,不会影响到该文所提故障区段定位的有效性。

3.3 配电线路多重分支带来的影响

实际配电线路往往具有更多分支和区段,突出表现为具有多重分支,如图4所示,如此将给配电网故障区段定位算法带来一定的影响。

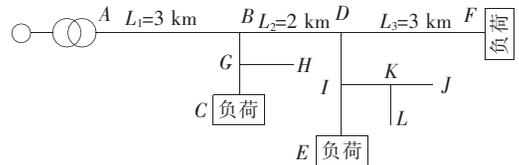


图4 具有多重分支的配电网线路

Figure 4 One distribution feeder with multi-level branches

相比图1所示的配电线路,图4所示的配电线路具有更多的分支和区段。相对于主干线路 $A-B-D-F$,图1仅含有一级分支 $B-C$ 和 $D-E$,图4则增加了二级分支 $G-H$ 和 $I-K-J$ 以及三级分支 $K-L$ 。

对于图4而言,对应的主干线路和一级分支线路来回反射路径有 $A-B$ 、 $A-B-D$ 、 $A-B-D-F$ 、 $A-B-C$ 、 $A-B-D-E$ 。而实际配电线路中还存在二级和三级分支线路上的不连续点,此时一级分支 $B-C$ 上的二级分支线路有不连续点 G 和 H ,其来回反射路径为 $A-B-G$ 、 $A-B-G-H$;一级分支 $D-E$ 上的二级分支线路有不连续点 I 、 J ,其来回反射路径由 $A-B-D-I$ 、 $A-B-D-I-K-J$ 以及三级分支线路的点 K 和 J ,其来回反射 $A-B-D-I-K-L$ 、 $A-B-D-I-K$ 。

据此,对单端暂态波形能量谱分析需要根据主干线路和一、二、三级分支线路上的所有不连续点进行频段划分。

根据多重分支配电网的拓扑结构特点,在二级分支线路上发生故障时,如 $G-H$ 区段上发生故障,始端至主干线路和一级分支线路不连续点的来回反射路径将不受影响,即始端 A 点采集到的暂态波形能量谱中,主干线路和一级分支线路不连续点各自所处的频段不会发生明显变化。在三级分支线路上发生故障时,如 $K-L$ 区段上发生故障,始端至主干线路、一级和二级分支线路不连续点的来回反射路径将不受影响,即主干线路、一级和二级分支线路不连续点各自所处的频段不会发生明显变化。

因此,可以在故障区段定位算法中对流程进行优化。避免多频段内的能量谱相似性评价。一旦出

现故障,首先对主干线路和一级分支线路不连续点各自所处频段的能量谱进行分析,如果发生了明显的变化,则故障区段在主干线路或一级分支线路上,此时只需对这些频段进行第 2 节的步骤 5 分析即可完成区段定位。如果主干线路和一级分支线路不连续点各自所处频段的能量谱没有发生变化,则故障区段在二级分支线路上。此时只需对二级分支所处的频段进行文 2 中的步骤 5 分析,完成区段定位。同理,如果主干线路和一、二级线路上不连续点所处频段的能量谱均没有发生变化,则故障区段在三级分支线路上,此时只需要对三级分支所处的频段进行分析完成区段定位。

4 算例仿真

以配电网系统(图 1)为例进行仿真验证。首先,只考虑三相短路故障类型,故障阻抗取为零,每个区段设定 ω 个典型故障位置。 ω 的选取根据实际应用中定位结果允许的误差来确定,至少取 2,一个为区段首端,一个为区段末端。

为体现该文所提方法的精确性,此处按每个区段设定 50 个典型位置考虑。每隔 2% 区段长度选取。仿真过程中采样频率为 1 MHz,取故障后 3 ms 的暂态行波进行分析,由于 FFT 分析在频率上是离散的,故实际仿真中频率段分割会有近似处理。部

分典型位置对应的能量谱分布如表 3 所示,可以看出,不同区段发生故障时记录波形的各频段能量值有其特殊规律,如 DE 区段发生故障时记录波形 FFT 分析结果显示其第 1 频率段能量值较大,而 BC 线路发生故障时记录波形 FFT 分析结果显示其第 4 频率段能量值较大。故障位置发生在不同区段,单端暂态能量谱分布有明显的差异。

配电网系统(图 1)不同线路上的不同故障位置、发生三相短路故障时定位系统给出的部分定位结果如表 4 所示。测试的故障位置与定位数据库中典型故障位置不同。表 4 中定位误差的含义为

$$\text{定位误差} = \frac{\text{定位位置} - \text{实际故障位置}}{\text{故障所在线路长度}} \quad (17)$$

表 4 给出的定位结果显示故障区间定位不存在误判现象,这将给故障隔离带来极大地方便。由于每个区段设定了 50 个典型位置,因此,可进一步缩小具体故障区段上故障发生的位置范围。

BC 线路上不同故障位置发生两相短路故障、两相接地短路时的定位结果一致,如表 5 所示;BD 线路上单相接地故障定位结果如表 6 所示。结果表明,该文所提方法均可以可靠实现故障区段定位。

将该文提出的方法应用于一个具有更多分支的配电网,其拓扑结构见图 4,图中配电网有分支点、线路末端、架空与电缆连接处共 9 个,则该配电网含 9 个固有特征频率。同样在每个区段设置 50 个典

表 3 图 1 所示配电网典型位置对应能量谱分布

Table 3 Energy spectrum of the typical fault locations for the distribution system showed in Fig. 1

故障实际 发生位置	不同频率段能量值						对应 编号
	1	2	3	4	5	6	
BC 线路 40% 处	0.044 3	0.000 6	0.003 2	0.883 4	0.096 6	0.021 4	170
BC 线路 42% 处	0.050 9	0.001 1	0.005 0	0.862 2	0.110 0	0.023 3	171
BC 线路 44% 处	0.059 2	0.001 6	0.004 7	0.869 8	0.078 1	0.021 8	172
BC 线路 46% 处	0.059 2	0.001 2	0.002 4	0.896 6	0.038 2	0.018 5	173
BC 线路 48% 处	0.060 9	0.000 6	0.001 1	0.903 3	0.025 3	0.018 4	174
DE 线路 30% 处	0.893 8	0.116 7	0.011 4	0.019 3	0.007 5	0.015 4	215
DE 线路 32% 处	0.908 9	0.084 5	0.010 2	0.019 5	0.007 1	0.014 1	216
DE 线路 34% 处	0.929 9	0.051 2	0.008 0	0.018 4	0.006 3	0.012 8	217
DE 线路 36% 处	0.928 2	0.050 3	0.008 9	0.018 5	0.007 0	0.012 5	218
DE 线路 38% 处	0.914 6	0.062 0	0.011 4	0.020 3	0.008 9	0.013 0	219

型位置,每2%长度建立一个能量谱分布特征数据。最终部分故障区段定位结果如表7所示,定位结果显示,该文提出的故障区间定位新方法不存在误判现象,定位误差也在一定程度上满足工程上的需要。

表4 三相短路故障定位结果

Table 4 Results of fault location for the three-phase short-circuit faults in the distribution system showed in Fig. 1

故障实际发生位置(三相短路故障)	故障定位结果	定位结果表示故障发生位置	定位误差	
			区间定位是否正确	所在区间定位误差/%
AB 线路 25%处	12	AB 线路 24%处	正确	1
AB 线路 45%处	22	AB 线路 44%处	正确	1
AB 线路 65%处	33	AB 线路 66%处	正确	1
AB 线路 95%处	46	AB 线路 92%处	正确	3
BD 线路 25%处	64	BD 线路 28%处	正确	3
BD 线路 45%处	73	BD 线路 46%处	正确	1
BD 线路 65%处	82	BD 线路 64%处	正确	1
BD 线路 95%处	97	BD 线路 94%处	正确	1
DF 线路 25%处	113	DE 线路 26%处	正确	1
DF 线路 45%处	120	DE 线路 40%处	正确	5
DF 线路 65%处	133	DE 线路 66%处	正确	1
DF 线路 95%处	146	DE 线路 92%处	正确	3
BC 线路 45%处	176	BC 线路 52%处	正确	7
BC 线路 65%处	183	BC 线路 66%处	正确	1
BC 线路 95%处	197	BC 线路 94%处	正确	1
DE 线路 45%处	222	DF 线路 44%处	正确	1
DE 线路 65%处	232	DF 线路 64%处	正确	1
DE 线路 95%处	248	DF 线路 96%处	正确	1

表5 两相短路和两相接地短路故障定位结果

Table 5 Results of fault location for the phase-to-phase short-circuit and two-phase-to-ground faults in the distribution system showed in Fig. 1

故障实际发生位置	故障定位结果	定位结果表示故障发生位置	定位误差	
			区间定位是否正确	所在区间定位误差/%
BC 线路 25%处	156	BC 线路 12%处	正确	13
BC 线路 45%处	176	BC 线路 52%处	正确	7
BC 线路 65%处	183	BC 线路 66%处	正确	1
BC 线路 95%处	197	BC 线路 94%处	正确	1

表6 单相接地故障定位结果

Table 6 Results of fault location for the single phase-to-ground faults in the distribution system showed in Fig. 1

故障实际发生位置(单相接地短路故障)	故障定位结果	定位结果表示故障发生位置	定位误差	
			区间定位是否正确	所在区间定位误差/%
BD 线路 15%处	58	BD 线路 16%处	正确	1
BD 线路 25%处	62	BD 线路 24%处	正确	1
BD 线路 45%处	72	BD 线路 44%处	正确	1
BD 线路 65%处	83	BD 线路 66%处	正确	1
BD 线路 95%处	97	BD 线路 94%处	正确	1

表7 三相短路故障定位结果

Table 7 Results of fault location for the three-phase faults in the distribution system showed in Fig. 3

故障实际发生位置(三相短路故障)	故障定位结果	定位结果表示故障发生位置	定位误差	
			区间定位是否正确	所在区间定位误差/%
BC 线路 25%处	66	BC 线路 32%处	正确	7
BC 线路 45%处	77	BC 线路 54%处	正确	9
BC 线路 65%处	83	BC 线路 66%处	正确	1
BC 线路 95%处	97	BC 线路 94%处	正确	1
CD 线路 25%处	112	CD 线路 24%处	正确	1
CD 线路 45%处	123	CD 线路 46%处	正确	1
CD 线路 65%处	132	CD 线路 64%处	正确	1
CD 线路 95%处	148	CD 线路 96%处	正确	1
DE 线路 25%处	162	DE 线路 24%处	正确	1
DE 线路 45%处	173	DE 线路 46%处	正确	1
DE 线路 65%处	182	DE 线路 64%处	正确	1
DE 线路 95%处	198	DE 线路 96%处	正确	1
DI 线路 25%处	362	DI 线路 24%处	正确	1
DI 线路 45%处	373	DI 线路 46%处	正确	1
DI 线路 65%处	382	DI 线路 64%处	正确	1
DI 线路 95%处	398	DI 线路 96%处	正确	1

5 结语

该文提出了基于单端暂态能量谱相似性的配电网故障区段定位新方法。该方法依据配电线路分支点、终端负荷点、架空—电缆混合线路连接点对应的

特征频率,对单端暂态波形进行频段划分,当故障发生在不同区段时,单端暂态波形在划分频段上的能量谱分布差异明显,据此实现故障区段定位。主要结论如下:

1)不同于传统直接提取单端暂态波形一个主频率成分而直接计算故障距离的方法,该文将配电线路所有不连续点对应的特征频率划分进各自的频段内,提高了暂态信息的利用率,因此故障区段定位更可靠;

2)所提单端暂态能量谱相似性不受配电线路长度误差、线路换位与截面不均匀、多重分支的影响,均可实现故障区段定位;

3)根据每个区段设定的典型位置个数的不同,该文所提方法还可以在确定故障区段的同时,还可以进一步缩小具体故障区段上故障发生的位置范围。

参考文献:

[1] 黄昱翰,蔡泽祥,潘天亮,等.面向闭环运行配电网的广域保护控制方案[J].电力科学与技术学报,2019,34(2):47-52.
HUANG Yuhan, CAI Zexiang, PAN Tianliang, et al. Research on wide area protection and control scheme for closed-loop distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 47-52.

[2] 刘坤,赵丽萍,李建萍,等.考虑开关状态集调整的含光伏并网配电网动态故障恢复方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(1):24-31.
LIU Shen, ZHAO Liping, LI Jianping, et al. Dynamic fault recovery method of a photovoltaic distribution network considering switch state set adjustment[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 24-31.

[3] 刘刚,陈莎,全进,等.含分布式电源接入的配电网故障恢复方法[J].电测与仪表,2020,57(18):50-56.
LIU Gang, CHEN Sha, TONG Jin, et al. Fault restoration method for power distribution networks considering distributed generations[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(18): 50-56.

[4] Farajollahi M, Fotuhi-firuzabad M, Safdarian A. Sectionalizing switch placement in distribution networks considering switch failure[J]. IEEE Transactions on Smart

Grid, 2019, 10(1): 1080-1082.

[5] 封士永,蔡月明,刘明祥,等.考虑单相接地故障处理的自适应重合式馈线自动化方法[J].电力系统自动化,2018,42(3):92-97.
FENG Shiyong, CAI Yueming, LIU Mingxiang, et al. Adaptive reclosure feeder automation method considering processing of single phase grounding fault[J]. Automatic of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 92-97.

[6] Ling W, Liu D, Yang D, et al. The situation and trends of feeder automation in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 50: 1138-1147.

[7] 徐彪,尹项根,张哲,等.矩阵算法和优化算法相结合的配电网故障定位[J].电力系统自动化,2019,43(5):152-157.
XU Biao, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Fault location for distribution network based on matrix algorithm and optimization algorithm[J]. Automatic of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 152-157.

[8] 高湛军,李思远,彭正良,等.基于网络树状图和改进 D-S 证据理论的配电网故障定位方法[J].电力自动化设备,2018,38(6):65-71.
GAO Zhanjun, LI Siyuan, PENG Zhengliang, et al. Fault location method of distribution network based on tree structure diagram and improved D-S evidence theory [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 65-71.

[9] 郭壮志,陈涛,洪俊杰,等.基于故障辅助因子的配电网高容错性故障区段定位方法[J].电力自动化设备,2017,37(7):93-100.
GUO Zhuangzhi, CHEN Tao, HONG Junjie, et al. High-tolerance faulty section locating based on fault accessory factors for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 93-100.

[10] 何瑞江,胡志坚,李燕,等.含分布式电源配电网故障区段定位的线性整数规划方法[J].电网技术,2018,42(11):3684-3690.
HE Ruijiang, HU Zhijian, LI Yan, et al. Fault section location method for DG-DNs based on integer linear programming[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3684-3690.

[11] 王秋杰,金涛,申涛,等.利用多因素降维的配电网区段定位完全解析模型[J].电工技术学报,2019,34(14):3012-3024.

- WANG Qiuji, JIN Tao, SHEN Tao, et al. A complete analytic method of section location in distribution network based on multi-factor dimensionality deduction [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(14): 3012-3024.
- [12] 朱正谊, 徐丙垠, Tony YIP, 等. IEC 61850 应用于分布式馈线自动化系统的模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(23): 148-154.
- ZHU Zhengyi, XU Bingyin, TONY YIP, et al. IEC 61850 based models for distribution feeder automation system [J]. Automatic of Electric Power Systems, 2018, 42(23): 148-154.
- [13] 田书, 王晓卫, 王娟娟. 基于相关分析的暂态零模电流与功率故障定位方法比较[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 206-211.
- TIAN Shu, WANG Xiaowei, WANG Juanjuan, et al. Comparative research on fault location by transient zero-module current and transient zero-module power based on correlation analysis [J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 206-211.
- [14] 童晓阳, 张绍迅. 基于灰色关联度的配电网故障区段定位与类型识别方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 113-118+145.
- TONG Xiaoyang, ZHANG Shaoxun. Grey relational degree based fault section location and type recognition method for distribution network [J]. Automatic of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 113-118+145.
- [15] Peng N, Zhou L, Liang R, et al. Fault location of transmission lines connecting with short branches based on polarity and arrival time of asynchronously recorded traveling waves [J]. Electric Power Systems Research, 2019, 169: 184-194.
- [16] 张安安, 周志通, 庄景泰, 等. 基于行波瞬时振幅的高压直流输电线路故障测距方法研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(2): 78-84.
- ZHANG Anan, ZHOU Zhitong, ZHUANG Jingtai, et al. Fault location method of HVDC Transmission line based on traveling wave instantaneous amplitude [J]. Smart Power, 2020, 48(2): 78-84.
- [17] 李振兴, 吴李群, 田斌, 等. 采用区域电网多点测量信息的行波故障定位[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 146-152.
- LI Zhenxing, WU Liqun, TIAN Bin, et al. Traveling wave fault location using multi-point measurement information of regional power grid [J]. Automatic of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 146-152.
- [18] 邓丰, 李欣然, 曾祥君, 等. 基于多端故障行波时差的含分布式电源配电网故障定位新方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4399-4409.
- DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun, et al. A novel multi-terminal fault location method based on traveling wave time difference for radial distribution systems with distributed generators [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4399-4409.
- [19] 靳维, 陆于平. 基于双端弱同步的配电网行波测距方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 102-109.
- JIN Wei, LU Yuping. Fault location method based on traveling wave with dual-terminal weak synchronization for distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 102-109.
- [20] 齐郑, 庄舒仪, 何锡祺, 等. 基于母线扰动信号的配电网混合线路行波故障测距技术[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(13): 124-130.
- QI Zheng, ZHUANG Shuyi, HE Xiqi, et al. Traveling wave fault location technology for hybrid lines in distribution network based on disturbance signal injection at busbar [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(13): 124-130.
- [21] 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.
- [22] Borghetti A, Bosetti M, Nucci C A, et al. Integrated use of time-frequency wavelet decompositions for fault location in distribution networks: Theory and experimental validation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 3139-3146.
- [23] Hao Yongqi, Wang Qian, Li Yanan, et al. An intelligent algorithm for fault location on VSC-HVDC system [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 94: 116-123.
- [24] 王磊, 黄力, 黄照厅, 等. 基于VMD-后向预测prony的

- 直流混合线路故障测距方法[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(10): 61-67+72.
- WANG Lei, HUANG Li, HUANG Zhaoting, et al. A fault location method of the DC hybrid line based on VMD-backward prediction prony[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(10): 61-67+72.
- [25] 于华楠, 马聪聪, 王鹤. 基于压缩感知估计行波自然频率的输电线路故障定位方法研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 140-148.
- YU Huanan, MA Congcong, WANG He. Transmission line fault location method based on compressed sensing estimation of traveling wave natural frequencies[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(23): 140-148.
- [26] 邓丰, 李欣然, 曾祥君. 基于全波形信息的混联线路单端行波定位方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(15): 3471-3485.
- DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun. Single-ended traveling-wave-based fault location algorithm for hybrid transmission line based on the full-waveform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(15): 3471-3485.
- [27] 邓丰, 李欣然, 曾祥君, 等. 基于波形唯一和时-频特征匹配的单端行波保护和故障定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1475-1487.
- DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun, et al. Research on single-end traveling wave based protection and fault location method based on waveform uniqueness and feature matching in the time and frequency domain[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1475-1487.
- [28] 邱关源. 电路[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 431-438.
- [29] 戴锋, 王政, 程孟晗, 等. 考虑段线路折反射的配电网故障定位研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 122-130.
- DAI Feng, WANG Zheng, CHENG Menghan, et al. Study on fault location considering refraction and reflection of short lines in a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 122-130.
- [30] 余昌佳, 梅飞, 叶昱媛, 等. 基于优化 VMD 与噪声估计的间隔阈值局部放电去噪方法[J]. 高压电器, 2020, 56(3): 141-149.
- SHE Changjia, MEI Fei, YE Yuyuan, et al. Partial discharge signal denoising method based on optimized VMD and noise estimation for interval threshold[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 141-149.
- [31] 柴鹏, 周灏, 张煜, 等. 基于双端行波法的电缆线路短路故障定位改进[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 168-174.
- CHAI Peng, ZHOU Hao, ZHANG Yu, et al. Short-circuit fault location for power cables based on improved two-terminal traveling wave method[J]. Electric Power, 2020, 53(11): 168-174.