

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201149

基于多重分形谱的交流输电线路故障识别方法

李小鹏¹, 丁宣文¹, 束洪春², 安娜², 董俊², 田鑫萃², 张雪飞², 代月²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 通过对高压交流输电系统的区内、区外故障的仿真计算和分析发现: 交流输电线路阻波器和母线对地电容形成的实体物理边界对高频信号具有衰减作用, 使得区外故障时量测端的故障电压高频分量含量低, 在不同时间段内质量分布概率相对均匀。而区内故障时, 量测端的故障电压高频分量含量高, 在不同时间段内质量分布概率不均匀。因此利用短时窗内线路单侧故障相电压计算每次分割形成的多重分形集上各个子集质量概率分布的不均匀程度 $\Delta\alpha$ 来识别区内外故障。该方法仅利用单端电压就可以实现区内、外故障的判别, 不受通道的影响, 可靠性高, 具有较大的工程意义。通过大量的 PSCAD 仿真实验分析得出, 此方法可靠性高, 耐受过渡电阻能力强, 对不同故障类型和远端高阻均有较好的判别能力。

关键词: 交流输电系统; 多重分形谱; 质量分布概率; 故障判别; 远端高阻

A fault identification method of an AC transmission line based on a multifractal spectrum

LI Xiaopeng¹, DING Xuanwen¹, SHU Hongchun², AN Na², DONG Jun², TIAN Xincui², ZHANG Xuefei², DAI Yue²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, China; 2. School of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Simulation and analysis of the internal and external faults of a high-voltage AC transmission system shows that the physical boundary formed by the AC transmission line wave trap and the bus-to-ground capacitance has an attenuation effect on the high-frequency signal. This makes the high-frequency component of the fault voltage at the measuring terminal at external fault low, and the probability of mass distribution is relatively uniform in different time periods. When a fault occurs in the area, the high-frequency component of the fault voltage at the measuring terminal is high, and the probability of mass distribution is uneven in different time periods. Therefore, the non-uniformity $\Delta\alpha$ of the quality probability distribution of each subset on the multifractal set formed by each division is calculated using the single-side fault phase voltage of the line within the short-time window to identify the internal and external faults. This method can distinguish between internal and external faults by only using a single-ended voltage, is not affected by the channel, has high reliability, and has great engineering significance. Through a large number of PSCAD simulation experiments, it is concluded that this method has high reliability, strong ability to withstand transition resistance, and has a good ability to distinguish different fault types and remote high resistance.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U1202233) and the Science and Technology Project of State Grid Sichuan Electric Power Company (No. 521997180013).

Key words: AC transmission system; multi-classification spectrum; mass distribution probability; fault identification; remote high resistance

0 引言

高压交流输电是解决能源大规模、远距离输送

和大范围优化配置的可行技术路线, 但是其输送容量大、输电线路长^[1-5], 因此故障引发系统失稳甚至停运的风险较高, 在高电压的运行环境下一旦发生故障, 输电系统很可能受到过电压过电流输电冲击, 破坏整个输电系统, 从而对电力系统和人民生活造成极为严重的危害及影响^[6]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U1202233); 国网四川省电力公司科技项目资助(521997180013)

高压输电线路是电力系统中发生故障概率最高的地方，由于电力系统规模的不断扩大，越来越多的大容量发电机组和高压输电系统不断投入运行，系统负荷加重、输电距离增大^[7-8]，系统一旦受到扰动，极易发生系统振荡甚至故障跳闸，另一方面，高压输电线路走廊的地理环境较恶劣，极易发生故障。作为保障电网安全的第一道防线，继电保护需要在故障发生后快速、正确、可靠地识别故障，并迅速隔离故障元件，若识别元件无法准确快速地识别出故障，则保护会误动或拒动，从而降低输电系统的供电可靠性^[9-11]。因此，快速准确地识别区内外故障对保护正确动作具有重要意义。

根据区内外不同故障时故障回路拓扑结构的不同，文献[12]提出了基于零序差动阻抗的线路区内、外故障识别，此方法可以准确地识别区内外故障，但是需要两侧的数据才能构成判据，受传输通道影响较大。文献[13]利用行波差动电流的频率分布进行区内、外故障识别，但由于行波信号不易捕捉和不可重复性等这些特性大大降低了该方法的可靠性。文献[14]利用线路两端初始方向电流行波波头开始数十微秒内的积分作为特征值构成保护动作判据，判别区内外故障，但是该方法需要将信息传送到对端，存在通信延时的问题。

分形理论致力于研究自然结构的几何特征，在材料、机械和军事等许多领域得到了广泛的应用^[15-17]，适合于非线性信号的处理和分析。多重分形作为一种在分形基础上发展而来的复杂分形结构，本质上是由多个标度指数的奇异值测度所组成的无限集合^[18]。

将多重分形引入到输电线路故障识别中，本文提出一种基于多重分形谱的交流输电线路故障识别方法，利用故障相电压的不均匀度来识别区内外故障，对不同故障情况进行仿真验证，结果表明所提方法能准确可靠地识别区内故障和区外故障。

1 超高压输电线路故障特性分析

超高压输电系统由于线路两端的阻波器和母线对地电容的存在，交流输电系统线路两侧的阻波器和母线对地电容构成了物理边界^[19-22]，使得线路保护的区外故障和区内故障时的电气量有着显著并且规律性的差别。本文以某 500 kV 输电系统为例，系统结构图和物理边界如图 1 所示，架空输电线路总长为 300 km。M、N 为线路保护的量测端， f_1 为线路故障识别元件的区内故障，为 AB 两相故障； f_2 为线路故障识别元件的区外故障，为 A 相接地故障。系统中的阻波器具体参数为： $L_1=2\text{ mH}$ 、 $L_2=0.338\text{ mH}$ 、

$C_1=528\text{ pF}$ 、 $C_2=3\ 125\text{ pF}$ 、 $R_1=800\ \Omega$ 。

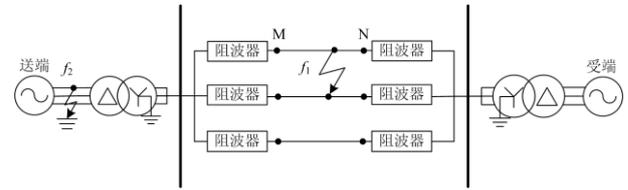


图 1 交流输电线路系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of AC transmission line system

在 500 kV 交流输电系统中，部分输电线路上加装阻波器设备，阻波器的模型如图 2 所示。阻波器串联在输电线路载波信号点与相邻系统元件(在本模型中，相邻元件为母线)之间，是构成高频保护的重要元件。阻波器串联在输电线路保护安装处与相邻系统元件(如母线)之间，是构成高频保护和载波通信的信号传输通道的重要设备，可阻止高频信号向不需要的方向传送。阻波器一般由主线圈和调谐装置组成，其中主线圈 L_1 用于承载工频电流和系统发生故障时的短路电流，调谐装置由电容器 C_1 和 C_2 、电感器 L_2 、电容器 R_1 组成^[20]。阻波器和母线对地电容构成的线路物理边界如图 3 所示， C_s 为母线对地电容的电容值。

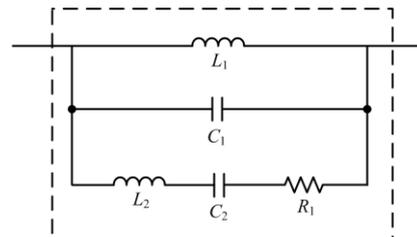


图 2 线路阻波器电路图

Fig. 2 Line wave trap circuit diagram

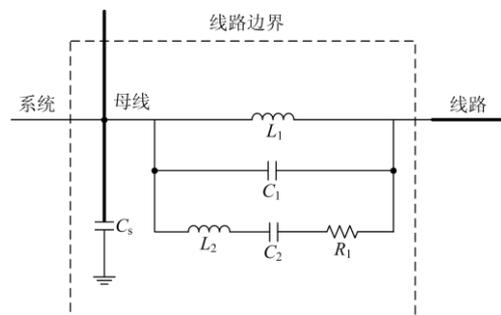


图 3 线路边界

Fig. 3 Line boundary

为了分析阻波器和母线对地电容的边界频率特性，忽略除阻波器和母线对地电容外的元件，即假设输电线路为开路状态。设单个阻波器的阻抗为

Z_1 , 母线对地电容的阻抗为 Z_2 , 根据电路理论可得:

$$Z_1 = \frac{j\omega L_1}{j\omega C_1} // (j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + R) = \frac{j\omega L_1}{j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} // (j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + R) = \frac{j\omega L_1 (j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + R)}{j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} \div (\frac{j\omega L_1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_2} + R) \quad (1)$$

$$Z_2 = \frac{1}{j\omega C_s} \quad (2)$$

为了分析阻波器对传输线路上不同频率的电力信号所响应的不同阻抗特性, 由图 2 可以得到阻波器的频率特性, 频率特性曲线如图 4 所示。

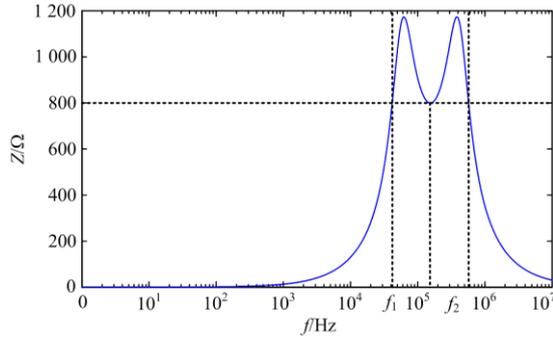


图 4 线路阻波器的频率特性

Fig. 4 Frequency characteristics of line traps

由图 4 可知, 阻波器对位于 $[f_1, f_2]$ 频段内的暂态信号呈现较高的阻抗值, 阻抗值均大于 800Ω , 在 $f = 62.3 \text{ kHz}$ 和 $f = 384.7 \text{ kHz}$ 时, 阻波器的阻抗有最大值, 最大值为 $1.174 \text{ k}\Omega$ 。当 $f > f_2$ 和 $f < f_1$ 时, 阻波器的阻抗小于 800Ω 。换句话说, 阻波器具有一定带宽的阻塞频带, 本文中阻波器的阻塞频带为 $[f_1, f_2]$, 阻波器对于位于阻塞频带内的暂态信号有明显的衰减作用。

若在图 1 所示的系统中发生区内故障时, 量测端的电压故障分量波形如图 5(a)所示, 本文采样率为 100 kHz , 将电压波形沿时间轴方向平均分成几个区域, 定义每个区域的电压故障分量最大值与最小值之差为 Δu 。在图 5(b)中, 将 0.5 ms 时窗分为 5 个区域, 各区域间的 Δu 差距较大。

当发生区外故障时, 量测端的电压故障分量波形如图 6(a)所示, 将 0.5 ms 时窗分为 5 个区域, 各区域间的 Δu 差距较小。

将单个区域内的 Δu 在总区域内占的比例定义为多重分形谱的质量分布概率, 由图 5 和图 6 可知, 区内故障和区外故障时, 电压故障分量的质量分布概率分布差别较大^[23-24]。

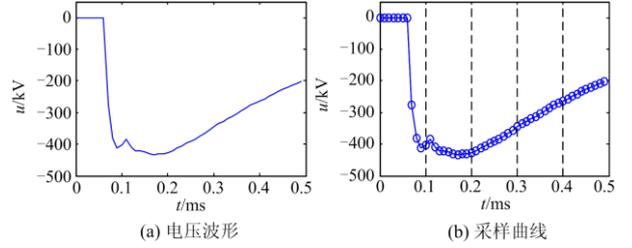


图 5 区内故障时量测点故障电压分量

Fig. 5 Fault voltage component of measuring point in case of fault in the zone

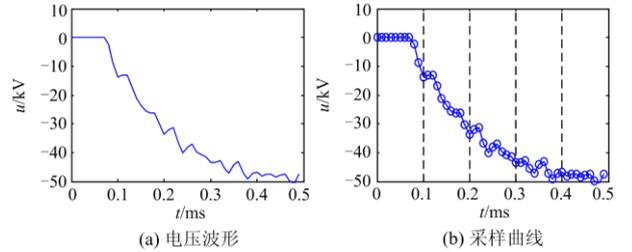


图 6 区外故障时量测点故障电压分量

Fig. 6 Fault voltage component of the measuring point in the case of an outside fault

2 多重分形理论

多重分形是由多个标度指数的奇异测度组成的集合, 表明了几何支集上分形测度的分布情况^[25-27]。对分形表面的每一个点用质量分布概率 $P(x)$ 来度量, 将整个分形表面划分为多个尺度为 ε 的小盒子, 第 i 个小盒子的质量分布概率 $P_i(\varepsilon)$ 与尺度 ε 的关系为

$$P_i(\varepsilon) = \frac{\Delta u_i(\varepsilon)}{\sum_{i=1}^n \Delta u_i(\varepsilon)} \quad (3)$$

式中: $\Delta u_i(\varepsilon)$ 为每一维小盒子最大值和最小值之差; $i = 1, 2, \dots, n$ 。

对质量分布概率密度 $P_i(\varepsilon)$ 进行加权求和得到配分函数 $\chi_q(\varepsilon)$, 如式(4)所示。

$$\chi_q(\varepsilon) = \sum_{i=1}^n P_i(\varepsilon)^q \quad (4)$$

式中: $q \in [-10, 10]$; $i = 1, 2, \dots, n$ 。

对每一个 q 值, 利用质量指数 $\tau(q)$ 和配分函数 $\chi_q(\varepsilon)$ 的关系, 在重对数坐标中, 采用直线拟合方法估算出质量指数 $\tau(q)$, 质量指数 $\tau(q)$ 和配分函数 $\chi_q(\varepsilon)$

存在以下关系:

$$\chi_q(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-\tau(q)} \quad (5)$$

对质量指数 $\tau(q)$ 求微分, 得到奇异性指数 α :

$$\alpha = \frac{d\tau(q)}{dq} \quad (6)$$

式中, α 称为标度指数, 描述的是分形表面各个小盒子的奇异程度, 也称为奇异性指数。当 $\varepsilon < 1$ 时, α_{\min} 对应质量分布概率最大的子集, α_{\max} 对应质量分布概率最小的子集, 用 $\Delta\alpha$ 表示多重分形谱宽度, $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$, 多重分形谱宽度表明各个子集的质量分布概率的不均匀程度。

根据质量指数 $\tau(q)$ 和奇异性指数 α 得到多重分形谱 $f(\alpha)$ 为

$$f(\alpha) = q\alpha - \tau(q) \quad (7)$$

3 基于多重分形谱的线路故障识别算法

由第 2 节对阻波器和母线对地电容构成的线路边界分析可知, 当输电线路外部发生故障时, 由于阻波器和母线对地电容构成的线路边界对位于阻塞频段内的暂态信号有明显的衰减作用, 使得线路保护安装处检测到的电气信号中高频分量显著减少。即短时窗内故障电压时域波形的变化相对平缓, 在不同时间内的质量分布概率变化小。而在输电线路发生故障时, 由于线路保护安装处检测到的电气信号不经过线路边界, 使得线路保护安装处检测到的电气信号中高频分量较多^[28-29]。即短时窗内故障电压时域波形表现极为不规则, 在不同时间内的质量分布概率变化较大。

3.1 区内故障时的多重分形谱分析

假设在图 1 所示的系统中距离保护安装处 120 km 处发生 AB 两相故障。本文采样率为 100 kHz, 时窗为 5 ms。首先读取由量测端高速采集装置获取的相电压, 并根据叠加原理求得 5 ms 时窗的电压故障分量, 其公式为

$$u_{Mfg} = u_{Mi} - u_{Mifg} \quad (8)$$

式中: $i=A, B$ 或 C ; u_{Mi} 为故障状态下 M 端 i 相的电压; u_{Mifg} 为非故障状态下 M 端 i 相的电压。

图 7 为发生区内故障时, 故障分量的附加网络图。由图 7 可知, 当发生区内故障时, 由于量测端的信号采集装置位于阻波器与输电线路之间, 因此暂态信号不经过由阻波器和母线对地电容构成的电路边界, 直接到达保护安装处, 因此保护安装处检测到的信号高频分量部分较大, 幅值也较大, 波形更加陡峭。

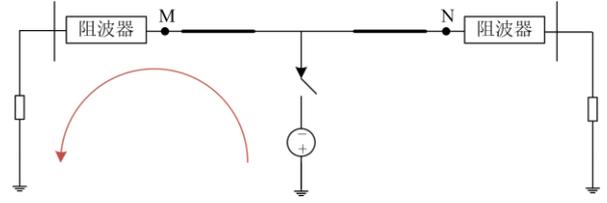


图 7 区内故障时的故障分量附加网络

Fig. 7 Additional network of fault components in the event of a fault in the zone

根据第 2 节可知, 多重分形方法首先要确定质量分布概率, 将电压故障分量沿时间方向划分为许多相同尺度的小盒子, 定义质量分布概率密度 $P_i(\varepsilon)$ 为

$$P_i(\varepsilon) = \frac{\Delta u_i(\varepsilon)}{\sum_i^n \Delta u_i(\varepsilon)} \quad (9)$$

式中: $\varepsilon(\varepsilon < 1)$ 为小盒子的尺度; $i=1, 2, \dots, n$, n 为盒子数; $\Delta u_i(\varepsilon)$ 为每一维小盒子的最大值与最小值之差。

根据多重分形的定义, 得到 A 相故障电压的多重分形谱, 如图 8 所示。

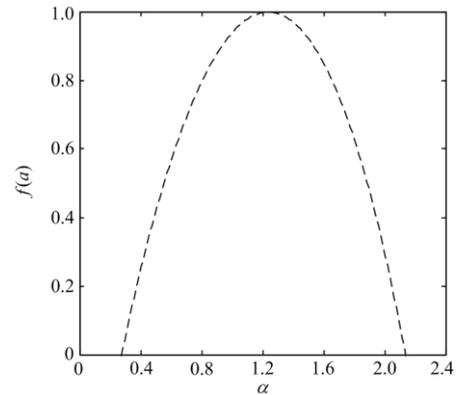


图 8 区内故障时多重分形谱

Fig. 8 Multifractal spectrum in case of faults in the zone

由图 8 可知, 当发生区内故障时, 线路保护安装处检测到的电气信号不经过线路边界, 使得线路保护安装处检测到的电气信号中高频分量较多, 在不同时间内的不均匀度变化较大。在图 8 中, $\alpha_{\min} = 0.2539$, $\alpha_{\max} = 2.1800$, 不均匀度 $\Delta\alpha = 1.9216$, 即质量分布概率相对不均匀程度较大。

经计算, B 相故障电压分量多重分形谱的不均匀度 $\Delta\alpha = 2.0890$, C 相故障电压分量多重分形谱的不均匀度 $\Delta\alpha = 0.6641$ 。

通过对图 1 所示的系统中输电线路不同位置发生故障计算多重分形谱, 计算结果如图 9 所示。图

9 中的曲线为三相故障电压分量多重分形谱中不均匀度较大的一相的曲线。由图 9 可知, 当输电线路发生故障时, 由于检测到的电气量没有经过阻波器和母线对地电容形成的线路边界, 高频分量较大, 因此通过计算多重分形谱可以看出, 此时质量分布概率相对不均匀程度较大, 符合上文对区内故障时高频分量较大所带来的概率密度分布不均匀的分析。

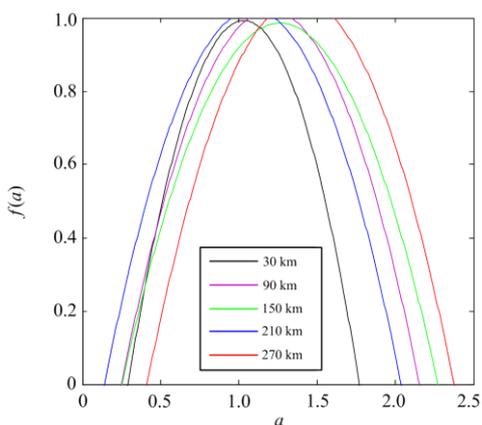


图 9 线路不同位置发生故障时多重分形谱
Fig. 9 Multifractal spectrum when faults occur at different positions of the line

区内故障时, 不同过渡电阻下的电压故障分量的不均匀度 $\Delta\alpha$ 沿线分布特性如图 10 所示。

由图 10 可知, 区内故障时, 电压故障分量的不均匀度 $\Delta\alpha$ 均大于 1.4, 且随着故障距离和过渡电阻的增加, 不均匀度 $\Delta\alpha$ 变化不大, 说明该方法有较好的鲁棒性。

3.2 区外故障时的多重分形谱分析

假设在图 1 所示的系统中送端变压器侧发生 A

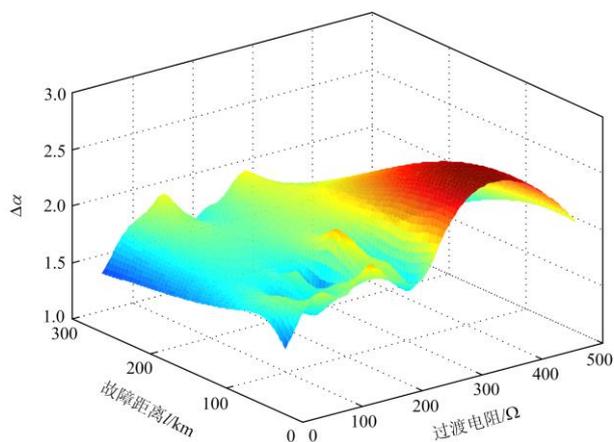


图 10 不同过渡电阻下的不均匀度沿线分布特性
Fig. 10 Distribution characteristics of unevenness along the line under different transition resistances

相接地故障, 首先读取由量测端高速采集装置获取的相电压, 并根据叠加原理求得 5 ms 时窗的电压故障分量。同样按照区内故障时计算多重分形谱的方法来分析区外故障。

图 11 为发生区外故障时故障分量的附加网络图。由图 11 可知, 当发生区外故障时, 由于量测端的信号采集装置位于阻波器与输电线路之间, 暂态信号会经过由阻波器和母线对地电容构成的电路边界, 因此保护安装处检测到的信号高频分量部分较小, 幅值相比区内故障时的较小, 波形更加平缓。

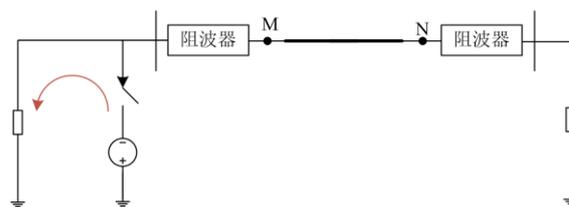


图 11 区外故障时的故障分量附加网络
Fig.11 Additional network of fault component in case of out-of-area fault

根据上文多重分形的定义, 计算得到 A 相故障电压的多重分形谱, 如图 12 所示。

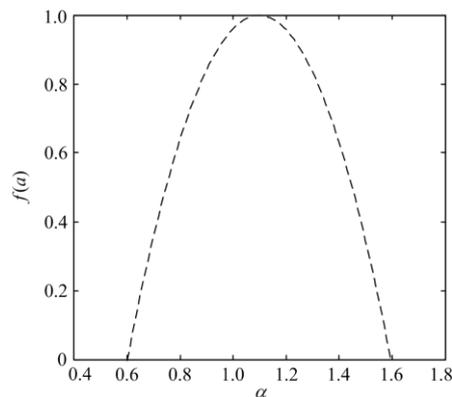


图 12 区外故障时多重分形谱
Fig. 12 Multifractal spectrum in case of out-of-zone fault

由图 12 可知, 当发生区外故障时, 暂态信号经过线路边界后到达保护安装处, 因此线路保护安装处检测到的暂态信号中高频分量较少, 使得在不同时间内的不均匀度变化较小。在图 12 中, $\alpha_{\min} = 0.6094$, $\alpha_{\max} = 1.5890$, 不均匀度 $\Delta\alpha = 0.9796$, 即质量分布概率相对不均匀程度相比区内故障较小。

经计算, B 相故障电压分量多重分形谱的不均匀度为 $\Delta\alpha = 0.9167$, C 相故障电压分量多重分形谱的不均匀度为 $\Delta\alpha = 1.0210$ 。

通过对图 1 所示的系统中送端变压器侧线路发生不同类型故障计算多重分形谱, 得到区外不同故

障类型下的多重分形谱,如图 13 所示。图 13 中的曲线为三相故障电压分量多重分形谱中不均匀度较大的一相的曲线。

由图 13 可知,当区外发生故障时,由于暂态信号经过阻波器和母线对地电容形成的线路边界到达保护安装处,故检测到的高频分量较小,因此通过计算多重分形谱可以看出,此时质量分布概率相对不均匀程度较小,符合上文对区外故障时高频分量较大所带来的概率密度分布不均匀的分析。

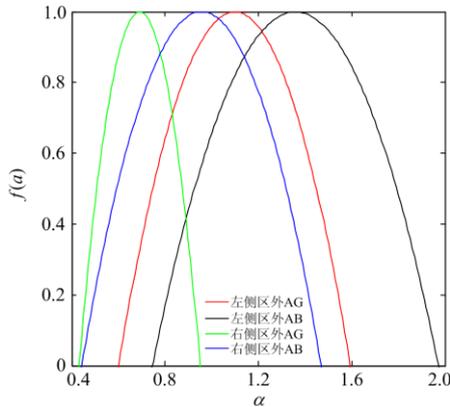


图 13 区外不同故障类型下的多重分形谱

Fig. 13 Multifractal spectra under different fault types outside the area

通过对区外不同故障进行分析,各种区外故障情况下的电压故障分量不均匀度如图 14 所示。其中区外送端单相接地故障 A-G 记为 d1;区外送端两相短路故障 AB 记为 d2;区外送端三相短路故障 ABC 记为 d3;区外受端单相接地故障 A-G 记为 d4;区外受端两相短路故障 AB 记为 d5;区外受端三相短路故障 ABC 记为 d6。

由图 14 可知,当发生区外故障时,各故障情况下的三相故障电压分量的不均匀度 $\Delta\alpha$ 均小于 1.4。

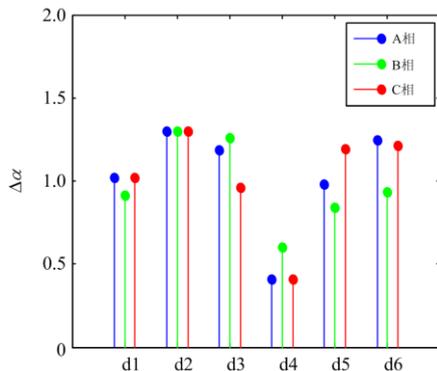


图 14 各种区外故障的不均匀度

Fig. 14 Unevenness of various external faults

3.3 线路故障识别算法

由上文分析可知,利用故障电压的不均匀度可以实现交流输电线路区内区外故障判别。当输电线路外部发生故障时,由于阻波器和母线对地电容构成的线路边界对位于阻塞频段内的暂态信号有明显的衰减作用,使得保护安装处检测到的电气信号幅值减小,波形更加地平缓,在不同时间内的质量分布概率变化小,故障电压的不均匀度较小;而在输电线路上发生故障时,由于线路保护安装处检测到的电气信号不经过线路边界,使得保护安装处检测到的电气信号幅值增大,波形更加地陡峭,在不同时间内的质量分布概率变化较大,故障电压的不均匀度较大。

在获得三相故障电压的不均匀度的基础上,通过比较得出三相中较大的不均匀度 $\Delta\alpha_{\max}$,若 $\Delta\alpha_{\max}$ 大于设定门槛值 $\Delta\alpha_{\text{set}}$,即不均匀度较大,则判定发生区内故障;若 $\Delta\alpha_{\max}$ 小于设定门槛值 $\Delta\alpha_{\text{set}}$,即不均匀度较小,则判定发生区外故障,即

$$\begin{cases} \Delta\alpha_{\max} \geq \Delta\alpha_{\text{set}}, \text{ 则为区内故障} \\ \Delta\alpha_{\max} < \Delta\alpha_{\text{set}}, \text{ 则为区外故障} \end{cases} \quad (10)$$

在本文所示的仿真系统中,设定门槛值 $\Delta\alpha_{\text{set}}$ 为 1.4。

3.4 耐受高阻故障特性分析

由图 10 的遍历结果可知,利用多重分形谱的区内、外故障判别方法具有很强的耐受过渡电阻能力。现本文假设距离保护安装处 120 km 位置发生 A 相接地故障,过渡电阻分别设置为 10 Ω 、50 Ω 、100 Ω 、300 Ω ,来讨论多重分形谱耐受高阻故障的原理。不同过渡电阻故障情况下计算得到的三相不均匀度最大值如表 1 所示,三相不均匀度最大相的多重分形谱如图 15 所示。

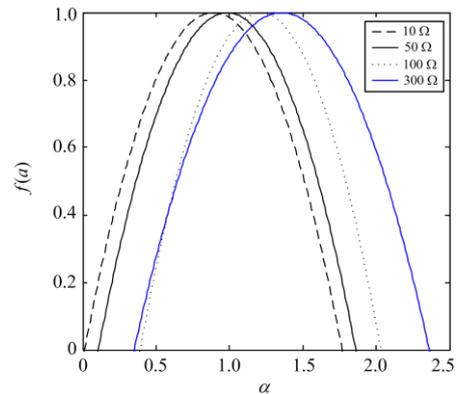


图 15 不同过渡电阻下的多重分形谱

Fig. 15 Multifractal spectrum under different transition resistance

表 1 不同过渡电阻下的三相不均匀度最大值
Table 1 Maximum three-phase unevenness under different transition resistance

过渡电阻/ Ω	10	50	100	300
$\Delta\alpha_{\max}$	1.888 2	1.897 9	1.856 7	2.337 7

根据 3.1 节中对区内故障不同过渡电阻情况进行全线长遍历的结果以及表 1 计算的三相不均匀度最大值 $\Delta\alpha_{\max}$ 可知, 三相不均匀度最大值 $\Delta\alpha_{\max}$ 耐受远端高阻故障能力较强, 受故障距离和过渡电阻影响较小。

为进一步说明不同过渡电阻情况下不均匀度变化不大的原因, 现对过渡电阻为 $10\ \Omega$ 和 $500\ \Omega$ 的电压故障分量在时间轴上分为 5 个区域, 如图 16 所示, 区域 1 为 $(0,0.1)$ ms, 区域 2 为 $(0.1,0.2)$ ms, 区域 3 为 $(0.2,0.3)$ ms, 区域 4 为 $(0.3,0.4)$ ms, 区域 5 为 $(0.4,0.5)$ ms。各个区域的最大值与最小值之差以及各区域的质量分布概率如表 2 所示。

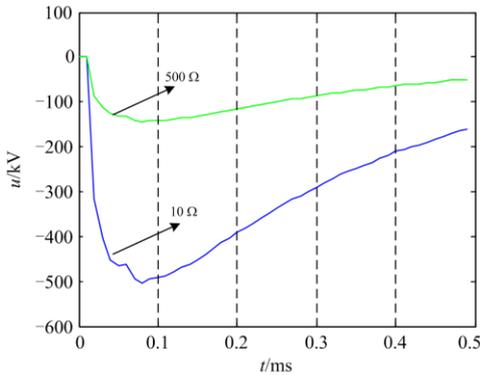


图 16 不同过渡电阻下的电压故障分量区域划分
Fig. 16 Division of voltage fault components under different transition resistances

表 2 不同过渡电阻下的概率密度

Table 2 Probability density under different transition resistance

过渡电阻/ Ω	差值和质量分布概率/%	区域				
		1	2	3	4	5
10	差值 Δu	503.74	87.23	91.50	72.78	49.93
	质量分布概率/%	62.57	10.83	11.36	9.04	6.20
500	差值 Δu	143.42	22.83	25.70	20.69	14.35
	质量分布概率/%	63.18	10.06	11.32	9.12	6.32

本文定义的质量分布概率为任一区域内电压故障分量的最大值与最小值之差 Δu 在总区域内占的比例, 由表 2 可知, 过渡电阻为 $10\ \Omega$ 和 $500\ \Omega$ 时, 相同区域下的 Δu 值相差很大, 但是各个区域的质

量分布概率基本相同, 因此, 所提出的基于多重分形谱的故障识别方法基本不受过渡电阻的影响。

4 仿真实验及实测数据验证

4.1 仿真实验

对交流输电线路区内、外不同故障位置的单相接地故障进行仿真实验, 过渡电阻分别为 $10\ \Omega$ 、 $50\ \Omega$ 、 $100\ \Omega$ 和 $300\ \Omega$, 仿真实验结果如表 3 所示。从仿真实验结果可以看出, 无论是近端故障还是远端故障, 该方法均能正确识别区内故障和区外故障, 并且发生远端高阻的情况下, 该方法仍可以可靠地识别。

表 3 不同故障情况下的三相不均匀度最大值
Table 3 Maximum three-phase unevenness under different fault conditions

故障位置/km	过渡电阻/ Ω	判断结果	
		$\Delta\alpha_{\max}$	结果
2	10	1.562 6	区内故障
	50	1.882 9	区内故障
	100	1.757 3	区内故障
	300	1.636 4	区内故障
150	10	2.366 2	区内故障
	50	1.851 5	区内故障
	100	1.570 1	区内故障
298	300	1.582 6	区内故障
	10	2.178 2	区内故障
	50	2.109 9	区内故障
	100	2.056 0	区内故障
300	1.932 1	区内故障	

对交流输电线路不同故障类型进行仿真实验, 故障位置分别为输电线路首端、中端和末端, 过渡电阻为 $10\ \Omega$, 故障类型分别为单相接地故障、两相短路故障、两相接地故障、三相短路故障。通过计算多重分形谱, 得到三相不均匀度最大值 $\Delta\alpha_{\max}$, 计算结果如表 4 所示。仿真实验结果可以看出, 本文的方法对不同的故障类型有很强的适应性。

综上仿真结果可以看出, 该方法不受过渡电阻、故障位置和故障类型的影响, 在各种工况下均能可靠、快速地识别故障, 具有较强的鲁棒性和普适性。

4.2 实测数据验证

将基于多重分形谱的交流输电线路故障识别方法用于实际测量数据中, 以验证该方法的可靠性。

2019 年 7 月 3 日 19 时某电网里月输电线路发生故障, 选取木里保护侧的录波数据验证该方法的可靠性。由故障电压图 17(a)可以看出, 三相电压高频分量含量较多, 对故障电压进行多重分形谱分析, 求取三相电压的不均匀度。经计算得, A 相电压的

不均匀度 $\Delta\alpha = 1.2698$ ，B 相电压的不均匀度 $\Delta\alpha = 2.0281$ ，C 相电压的不均匀度 $\Delta\alpha = 1.0146$ ，B 相不均匀度值最大， $\Delta\alpha_{\max} = 2.0281$ ，B 相的多重分形谱如图 17(b)所示。

表 4 不同故障类型的三相不均匀度最大值

Table 4 Maximum three-phase unevenness of different fault types

故障位置	故障类型	判断结果	
		$\Delta\alpha_{\max}$	结果
2 km	单相接地故障	1.562 6	区内故障
	两相短路故障	1.594 1	区内故障
	两相接地故障	1.533 0	区内故障
	三相短路故障	1.564 5	区内故障
150 km	单相接地故障	2.366 1	区内故障
	两相短路故障	1.622 6	区内故障
	两相接地故障	1.654 6	区内故障
	三相短路故障	1.641 3	区内故障
298 km	单相接地故障	2.178 2	区内故障
	两相短路故障	1.882 5	区内故障
	两相接地故障	1.920 8	区内故障
	三相短路故障	2.294 9	区内故障

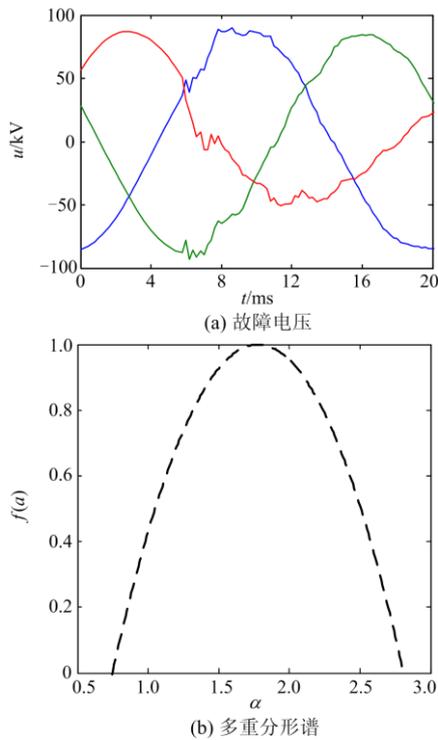


图 17 2019 年 7 月 3 日里月输电线路故障下的电压波形和多重分形谱

Fig. 17 Voltage waveform and multifractal spectrum under the fault of the Liyue transmission line on July 3, 2019

2019 年 7 月 8 日 02 时某电网核塘输电线路发生故障，选取塘坎街保护侧的录波数据验证该方法的可靠性。由故障电压图 18(a)可以看出，三相电压高频分量含量较多，对故障电压进行多重分形谱分析，求取三相电压的不均匀度。经计算得，A 相电压的不均匀度 $\Delta\alpha = 1.8581$ ，B 相电压的不均匀度 $\Delta\alpha = 0.8422$ ，C 相电压的不均匀度 $\Delta\alpha = 0.7313$ ，A 相不均匀度值最大， $\Delta\alpha_{\max} = 1.8581$ ，A 相的多重分形谱如图 18(b)所示。

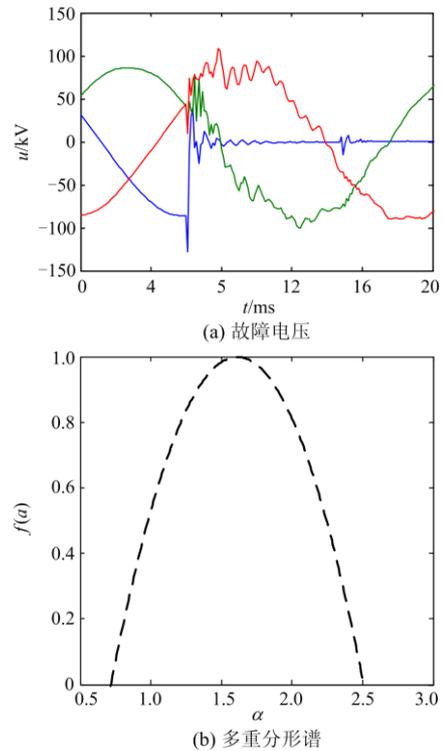


图 18 2019 年 7 月 8 日核塘输电线路故障下的电压波形和多重分形谱

Fig. 18 Voltage waveform and multifractal spectrum under the fault of Hetang transmission line on July 8, 2019

5 结论

1) 由于阻波器和母线对地电容构成的线路边界的存在，当输电线路外部发生故障时，使得线路保护安装处检测到的电气信号中高频分量显著减少，在不同时间内的质量分布概率变化小；而在输电线路发生故障时，使得线路保护安装处检测到的电气信号中高频分量较多，在不同时间内的质量分布概率变化较大。

2) 多重分形谱是刻画的数据在最小盒子上的分布情况，根据区内外故障时电压故障分量几何特征差异，提出了利用最小盒子上的最大值和最小

值之差来计算概率密度, 通过概率密度来计算不均匀度的算法。

3) 通过仿真比较验证, 不同的过渡电阻故障下电压故障分量的质量分布概率密度差别不大, 计算所得不均匀度相近, 因此该方法耐受过渡电阻能力较强。

4) 大量的仿真和实测数据表明, 该方法具有较强的鲁棒性, 不受故障距离、过渡电阻和故障距离的影响, 具有较强的自适应性, 能够可靠快速地判别区内外故障。

参考文献

- [1] LIN T, JUN A D. Novel complex filter with recursive algorithm for phasor computation in power-quality monitoring[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(3): 283-290.
- [2] DAMBHARE S, SOMAN S A, CHANDORKAR M C. Adaptive current differential protection schemes for transmission-line protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 1832-1841.
- [3] 周华良, 宋斌, 安林, 等. 特高压输电线路分布式故障诊断系统研制及其关键技术[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 115-122.
ZHOU Hualiang, SONG Bin, AN Lin, et al. Key technologies and development of distributed fault diagnosis system for EHV transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 115-122.
- [4] 庄文兵, 章涵, 王建, 等. 新疆 750 kV 特高压输电线路沿线地形及大风特征时空分析[J]. 高压电器, 2019, 55(1): 190-196.
ZHUANG Wenbing, ZHANG Han, WANG Jian, et al. Temporal and spatial analysis of terrain and wind characteristics along 750 kV UHV transmission lines in Xinjiang[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 190-196.
- [5] 吕佳宁, 叶小晖, 杨明玉. 混合级联多端直流输电系统的功率协调控制策略[J]. 智慧电力, 2020, 48(9): 9-15.
LÜ Jianing, YE Xiaohui, YANG Mingyu. Power coordination control strategy for hybrid cascaded multi-terminal HVDC system[J]. Smart Power, 2020, 48(9): 9-15.
- [6] 刘倪铭, 宁联辉, 高亮, 等. 混合多端直流输电系统故障线路识别方法[J]. 智慧电力, 2020, 48(3): 1-6.
LIU Niming, NING Lianhui, GAO Liang, et al. Fault line identification method for multi-terminal hybrid DC transmission system[J]. Smart Power, 2020, 48(3): 1-6.
- [7] 束洪春. 电力工程信号处理应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [8] DONG Xinzhou, GE Yaozhong, HE Jiali. Surge impedance relay[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1247-1256.
- [9] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2005.
- [10] 夏明超, 黄益庄, 赵沃泉. 利用多端暂态电流的高压输电线路保护新算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 40-43.
XIA Mingchao, HUANG Yizhuang, ZHAO Woquan. A novel protect algorithm for high voltage transmission line using multi-end transient currents[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 40-43.
- [11] 吕哲, 王增平. 基于暂态波形特征的输电线路雷击干扰与故障识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 18-26.
LÜ Zhe, WANG Zengping. Identification of lightning strike disturbance and faults for transmission line based on transient waveform characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 18-26.
- [12] 吴继维, 童晓阳, 廖小君, 等. 基于零序差动阻抗的输电线路保护新原理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 11-17.
WU Jiwei, TONG Xiaoyang, LIAO Xiaojun, et al. Transmission line protection principle based on zero sequence differential impedance[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 11-17.
- [13] 雷敏宇, 董新洲. 超/特高压输电线路宽频窗短时窗行波差动保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6826-6835, 7096.
LEI Aoyu, DONG Xinzhou. Wide-frequency and short-time window based traveling wave differential protection method for EHV/UHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 6826-6835, 7096.
- [14] 蒋小平, 张红菊, 马速良, 等. 特高压带高压并联电抗器线路的行波差动保护研究[J]. 高压电器, 2016, 52(2): 121-127.
JIANG Xiaoping, ZHANG Hongju, MA Suliang, et al. Study on traveling-wave differential protection on UHV transmission line with high voltage shunt reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(2): 121-127.
- [15] 刘凡, 司马文霞, 孙才新, 等. 多重分形在铁磁谐振过电压信号分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 138-142.
LIU Fan, SIMA Wenxia, SUN Caixin, et al. Application of multifractal spectrum to analyze ferroresonance overvoltage signals in neutral grounded system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18): 138-142.
- [16] 盛永刚, 徐耀, 李志宏, 等. 气体吸附法测定二氧化硅干凝胶的分形维数[J]. 物理学报, 2005, 54(1): 221-228.

- SHENG Yonggang, XU Yao, LI Zhihong, et al. Determination of fractal dimensions of silicon dioxide xerogel by means of gas adsorption[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(1): 221-228.
- [17] 杜干, 张守宏. 基于多重分形的雷达目标的模糊检测[J]. 自动化学报, 2001, 27(2): 174-179.
- DU Gan, ZHANG Shouhong. Fuzzy detection of radar ship targets based on multi fractal analysis[J]. Acta Automation Sinica, 2001, 27(2): 174-179.
- [18] 李东东, 周文磊, 郑晓霞, 等. 基于多重分形谱和支持向量机的风电机组行星齿轮箱故障诊断与研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 43-48.
- LI Dongdong, ZHOU Wenlei, ZHENG Xiaoxia, et al. Diagnosis and research of wind turbine planetary gearbox faults based on multifractal spectrum support vector machine (SVM)[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 43-48.
- [19] GANGADHARAN G, ANBALAGAN P. Microprocessor based three step quadrilateral distance relay for the protection of EHV/UHV transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(1): 91-97.
- [20] 段建东, 张保会, 任晋峰, 等. 超高压输电线路单端暂态量保护元件的频率特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 37-43.
- DUAN Jiandong, ZHANG Baohui, REN Jinfeng, et al. Single-ended transient-based protection for EHV transmission lines basic theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 37-43.
- [21] 哈恒旭, 张保会, 吕志来. 边界保护的理论基础 第一部分故障暂态分析[J]. 继电器, 2002, 30(9): 7-10, 14.
- HA Hengxu, ZHANG Baohui, LÜ Zhilai. The basic theories of boundary protection part I fault transient analysis[J]. Relay, 2002, 30(9): 7-10, 14.
- [22] MAJD A A, SAMET H, GHANBARI T. K-NN based fault detection and classification methods for power transmission systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(4): 359-369. DOI: 10.1186/s41601-017-0063-z.
- [23] 束洪春, 田鑫萃, 董俊, 等. 基于多重分形谱的高压直流输电线路区内故障识别方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 251-258.
- SHU Hongchun, TIAN Xincui, DONG Jun, et al. Recognition method of HVDC transmission line fault based on multifractal spectrum[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 251-258.
- [24] 束洪春, 安娜, 董俊, 等. 高压直流输电线路故障识别的分形算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(12): 49-54, 106.
- SHU Hongchun, AN Na, DONG Jun, et al. Fractal algorithm of faults identification for HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(12): 49-54, 106.
- [25] 钟明寿, 龙源, 谢全民, 等. 基于分形盒维数和多重分形的爆破地震波信号分析[J]. 振动与冲击, 2010, 29(1): 7-11, 233.
- ZHONG Mingshou, LONG Yuan, XIE Quanmin, et al. Signal analysis for blasting seismic wave based on fractal box-dimension and multi-fractal[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(1): 7-11, 233.
- [26] 周炜星, 王延杰, 于遵宏. 多重分形奇异谱的几何特性 I. 经典Renyi定义法[J]. 华东理工大学学报, 2000(4): 385-389.
- ZHOU Weixing, WANG Yanjie, YU Zunhong. Geometrical characteristics of singularity spectra of multifractals I. classical Renyi definition[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2000(4): 385-389.
- [27] 周炜星, 吴韬, 于遵宏. 多重分形奇异谱的几何特性 II. 配分函数法[J]. 华东理工大学学报, 2000(4): 390-395.
- ZHOU Weixing, WU Tao, YU Zunhong. Geometrical characteristics of singularity spectra of multifractals II. partition function definition[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2000(4): 390-395.
- [28] AGUILERA C, ORDUNA E, RATA G. Fault detection, classification and faulted phase selection approach based on high-frequency voltage signals applied to a series-compensated line[J]. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(4): 469-475.
- [29] 李跃, 郑涛, 文安. 基于单端量的超高压交流输电线路单相接地故障测距方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 27-33.
- LI Yue, ZHENG Tao, WEN An. A new location method for UHVAC transmission lines with high resistance faults based on single terminal volume[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 27-33.

收稿日期: 2020-09-18; 修回日期: 2020-12-16

作者简介:

李小鹏(1987—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 研究方向为交直流混联电网故障分析与保护。E-mail: lxpbsd@163.com

(编辑 葛艳娜)