

基于多重分形谱多项式拟合的雷击与故障识别方法

刘艳云¹, 贾文超¹, 高岩², 姜延卓¹, 戴志辉¹, 梁英³

(1. 华北电力大学电力工程系, 河北保定 071003; 2. 国网保定供电公司, 河北保定 071051; 3. 宁夏大学电子与电气工程学院, 银川 750021)

摘要: 为了解决高压直流输电线路保护易受雷击干扰影响的问题, 提出了一种基于多重分形谱二次多项式拟合的直流输电线路雷击干扰与故障识别的新方法, 这是首次将多重分形谱算法应用于区分雷击和区内故障。该方法通过计算电压暂态信号的多重分形谱, 并利用其二次多项式拟合函数的最高次项系数来表征电压信号的波动程度, 从而实现对雷击干扰与故障情况的辨识。仿真结果显示, 该方法不仅能准确识别雷击干扰和故障, 而且识别速度快。此外, 多项式拟合系数能够更好地表征不同信号的波动差异。因此, 该方法可作为高压直流输电线路保护的一种辅助判据, 对于进一步提高高压直流输电线路保护的可靠性具有重要意义。

关键词: 雷击干扰; 多重分形谱; 多项式拟合; 故障识别; 辅助判据

Lightning Strike and Fault Identification Method Based on Polynomial Fitting of Multifractal Spectrum

LIU Yanyun¹, JIA Wenchao¹, GAO Yan², JIANG Yanzhuo¹, DAI Zhihui¹, LIANG Ying³

(1. Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China; 2. State Grid Baoding Power Supply Company, Baoding, Hebei 071051, China; 3. School of Electronic and Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In order to solve the problem that the protection of high voltage direct current (DC) transmission lines is susceptible to lightning interferences, a new method for the identification of lightning interferences and faults on DC transmission lines based on the quadratic polynomial fitting of the multifractal spectrum is proposed, which is the first time that the multifractal algorithm is applied to distinguish between lightning strikes and in-area faults. The method achieves the identification of lightning interference and fault conditions by calculating the multifractal spectrum of the voltage transient signals and using the coefficients of the highest terms of its quadratic polynomial fitting function to characterise fluctuation of the voltage signals. Simulation results show that the method can not only accurately identify lightning interferences and faults, but also identify them quickly. In addition, the polynomial fitting coefficients can better characterise the fluctuation differences of different signals. Therefore, the method can be used as an auxiliary criterion for high voltage DC transmission lines protection, which is of great significance for further improving the reliability of DC transmission lines protection.

Key words: lightning interference; multifractal spectrum; polynomial fitting; fault identification; auxiliary criterion

0 引言

随着国家“双碳”目标的提出, 跨区域输送清洁

能源的力度将进一步增强, 而高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)以其独特的优势被广泛用于我国跨区域资源优化配置^[1-4]。由于行波保护和暂态量保护工作在较高的频率下采集的数据容易受到多种高频信号的干扰, 从而降低了继电保护的可靠性^[5-6]。

由于直流输电线路的长距离特性和复杂的输电环境, 使其更容易受到雷击影响。在雷击发生时大

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51877084); 河北省自然科学基金资助项目(E2018502063)。

Foundation item: Supported by the National Nature Science Foundation of China(51877084); the Natural Science Foundation of Hebei Province(E2018502063)。

量高频信号会以行波的形式传播到线路两端。这些信号如果不被正确辨识,极易导致保护误动^[7-8]。因此,如何快速、准确地识别出雷击和故障是保障直流输电系统安全稳定运行的关键。

针对上述问题,许多学者对雷击干扰和故障识别作了深入研究,主要方法分为基于暂态高频成分和时域波形特征两大类。在暂态高频成分方面,文献[9-10]采用数学形态学和小波分析等数学工具对暂态信号进行分析,以高、低频能量比作为判定标准,进而区分雷击干扰和故障。然而,在某些情况下雷击干扰和故障在频域特征上可能相似,这使得确定区分二者的阈值变得较为困难。文献[11]通过比较暂态信号突变前后两个数据窗内小波奇异熵的比值,再结合小波变换高频能量含量计算提出一种运用信号复杂度衰减的雷击干扰识别方法。在时域波形特征的研究中,文献[12]根据行波电流波尾时间差异对雷击干扰进行辨识,但由于行波在传输过程中会衰减,需借助其他技术进行补充。文献[13]根据雷击发生后故障雷击波形呈现单调性和非故障雷击波形呈现对称性的差异,通过积分运算结果区分雷击干扰和故障。但该方法受母线结构影响较大,若线路均匀性受到破坏则识别结果有可能不精确。文献[14]提出了一种对瞬时功率波形进行主成分分析(principal component analysis, PCA)聚类并将其与机器算法结合的识别方法,该方法要求对行波的波头进行精确辨识。文献[15]提出一种基于反向电压行波信号的识别方法,并将小波变换系数与中值滤波、线性拟合等方法相结合,实现了对雷击干扰的识别。文献[16]提出了一种基于 50 Hz 正弦波的工频波形拟合方法,利用拟合系数判据实现了对雷电干扰与故障的辨识。

分形理论凭借其处理非线性和非平稳信号方面的优势已被广泛应用于地质、材料和电力等多个领域^[17-19]。在电力系统中故障产生的暂态信号具有突变性和非线性特征^[20],传统的信号处理方法难以有效应对。多重分形能够精细地刻画信号在局部空间的分布特征,从而更全面、更深入地揭示信号的分形特性^[21]。因此考虑到将多重分形算法应用于区分雷击干扰与区内故障,具有重要的实际意义。

本文从暂态电压波形角度出发,首先在时域和频域上对雷击干扰和故障信号的特征进行了对比分析。接着,应用多重分形算法分析故障与雷击干扰信号的

多重分形谱特征,并提出了一种基于多重分形谱二次多项式拟合的直流输电线路雷击干扰和故障识别的新方法。通过 PSCAD 进行了大量仿真,结果表明该方法能够实现对雷击干扰和故障的准确识别,而且多项式拟合的运用使得不同信号的波动差异更加显著。

1 系统模型

1.1 直流输电系统

以天广直流输电系统相关参数为基础,在 PSCAD 中构建了双极直流输电系统的仿真模型^[22],其系统拓扑如图 1 所示,系统参数如表 1 所示。其中,系统电压等级为±500 kV,额定电流为 1.8 kA,输送容量为 1 800 MW, M 点为保护安装处,本文测量电压均取自该处。

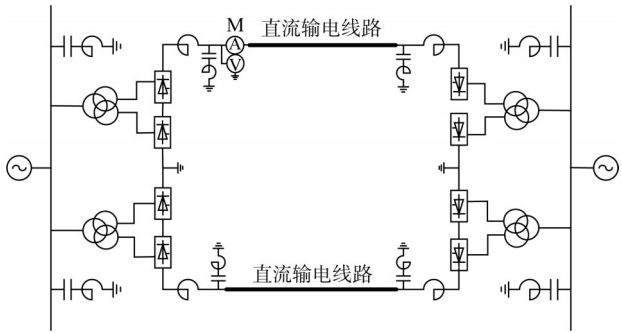


图 1 直流输电系统拓扑

Fig. 1 Topology of the DC transmission system

表 1 直流输电系统参数

Tab. 1 Parameters of the DC transmission system

参数	天生桥站	广州站
交流系统额定电压/kV	230	230
短路容量/GVA	12.1	8.3
换流变额定电压/kV	$\frac{\sqrt{230}}{\sqrt{3}}/208.6$	$\frac{230}{\sqrt{3}}/198.5$
平波电抗器/H	0.15	
输送距离/km	960	

1.2 输电线路和杆塔模型

考虑到输电线路相域频变模型精度高且更适合直流电网的行波特性分析。因此,本文使用相域频变参数模型来建立直流传输线路的数学模型。线路和杆塔结构如图 2 所示,其中 C1、C2 表示正负极线路, C3、C4 表示避雷线。输电线路采用四分裂导线,分裂间距为 0.457 2 m,全长为 960 km。构建含杆塔的直流输电模型时不能轻易忽略避雷线的存在,

因此模型中避雷线不做消去处理。杆塔采用多波阻抗模型, 接地电阻 R_g 取 15Ω , 杆塔高度为 39.5 m 。

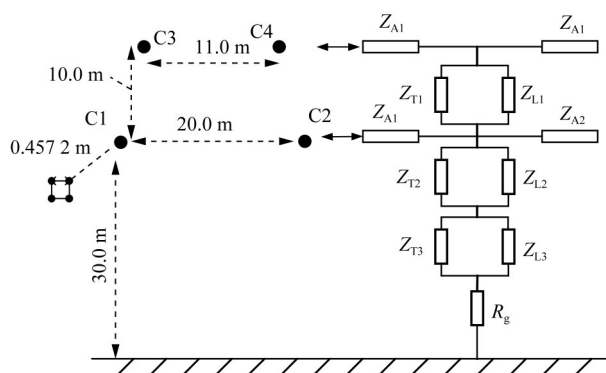


图2 输电线路及杆塔模型

Fig. 2 Model of transmission line and tower

1.3 雷电流模型

雷电流的极性取决于雷云进入大地时所携带电荷的极性。研究表明 75 %~90 % 的雷电流为负极性^[9]。本文采用典型 $2.6/50 \mu\text{s}$ 负极性双指数雷电流模型^[22]进行模拟, 雷电流 $i(t)$ 的数学表达式为:

$$i(t) = -\Lambda I_g (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

式中: Λ 为雷电流 $i(t)$ 的幅值修正系数, 取值为 1.058; I_g 为雷电流幅值, kA; α 和 β 为雷电流波形的时间常数。雷电流 $i(t)$ 的波形如图3所示。

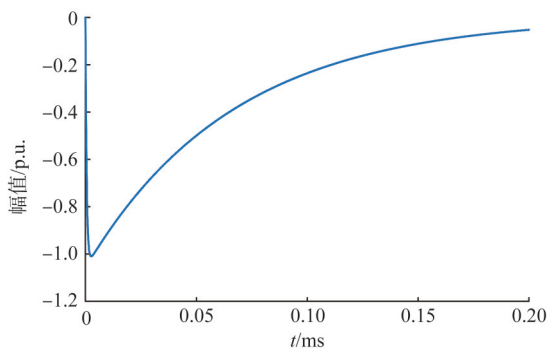


图3 雷电流波形

Fig. 3 Waveform of lightning currents

在直流输电中正负极电压相反, 而雷电流多为负极性。根据同性相斥、异性相吸的原理, 带负电荷的雷云通常会在直流输电线路的正极处进行放电^[22], 因此本文雷击输电线路主要针对正极线路。

雷电过电压通常分为感应雷过电压和直击雷过电压两种。感应雷过电压不会直接作用在线路上, 通常其幅值较小。本文将主要关注直击雷过电压。

直击雷过电压主要分为绕击和反击两种类型。

1.4 绝缘子闪络模型

本文以绝缘子串 50 % 冲击闪络电压作为绝缘子闪络判据, 即当绝缘子串两端电压 U_s 高于 50 % 冲击闪络电压时绝缘子串发生闪络, 其闪络模型如图4所示。

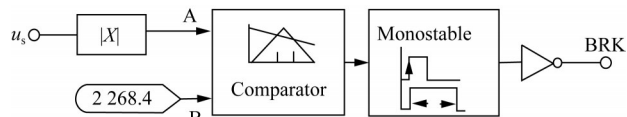


图4 绝缘子闪络模型

Fig. 4 Model of insulator flashover

本文仿真模型绝缘子串长度为 4.8 m , 计及直流工作电压后绝缘子串 50 % 冲击闪络电压 $U_{50\%}$ 为 $2\,268.4 \text{ kV}$ ^[23]。

针对输电线路绕击和反击耐雷水平进行了仿真测试, 测试结果如表2所示, 其中 I_g 为雷电流幅值。

表2 输电线路耐雷水平测试结果

Tab. 2 Test results of lightning withstand levels of transmission line

雷击类型	I_g/kA	U_s/kV	是否闪络
绕击	27	2 213	否
	28	2 305	是
反击	182	2 266	否
	183	2 274	是

由表2可知, 正极输电线路的绕击耐雷水平近似为 28 kA , 反击耐雷水平近似为 183 kA 。

2 雷击与区内故障的波形特征分析

为了分析雷击干扰与区内故障的波形特征差异, 针对绕击未故障、绕击故障和区内普通接地故障进行了仿真分析。以绕击未故障、绕击故障和区内普通接地故障发生在距离保护安装处 96 km 的位置为例, 保护安装处所测得的3种情况下电压故障时域波形如图5所示。

由图5可以看出 1 ms 内3种情况下的电压故障信号均呈现出明显的波动特征。其中绕击未故障和绕击故障的电压信号迅速降低至波谷, 而后迅速上升, 波形陡度较大。区内普通接地故障的电压信号逐渐降低, 波形变化较其他两种信号较为缓慢, 且

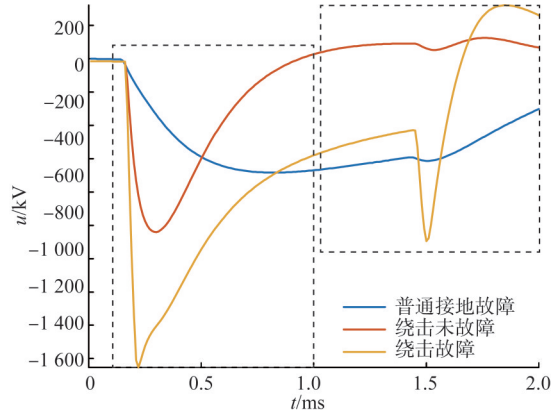


图5 雷击与故障情况下的时域电压波形

Fig. 5 Time-domain voltage waveforms for lightning strikes and fault conditions

未呈现出明显的大幅上下交替变化的情况。但1 ms后绕击未故障电压信号已经大幅度衰减,幅值变化相对较小,电压波动平缓,而绕击故障电压信号仍存在明显波动现象。

为了更全面地分析1 ms内雷击和故障时电压信号的特征差异,对其进行了频谱和能量谱分析。对绕击未故障、绕击故障和普通接地故障的电压故障信号进行了傅里叶变换,3种信号频谱图如图6所示。此外,针对0~7 500 Hz频带上在500 Hz的频率间隔下对信号能量分布进行了计算,其归一化能量值如图7所示。

图7结果与理论分析可得:当直流输电线路受到雷电冲击时产生的暂态电压主要是由于高频雷电波在线路两端边界处折反射所导致,因此暂态电压中含有丰富的高频成分。1 ms内雷击干扰和雷击故障时电压信号中的高频成分比普通接地故障更多,且高频分量的含量更高,因此电压波形的波动程度更高。

3 雷击与区内故障的谱特征分析

3.1 多重分形理论

多重分形能够精细地刻画信号在局部空间的分布特征^[24-25]。由第2节分析可得,雷击与故障产生的暂态电压信号波动程度存在差异,而多重分形算法求得的多重分形谱刚好能够反映信号的波动性。因此运用多重分形算法区分雷击与故障信号。

本文使用一种广泛应用且具有较高计算精度的盒子算法对时间序列信号进行多重分形谱的计算,

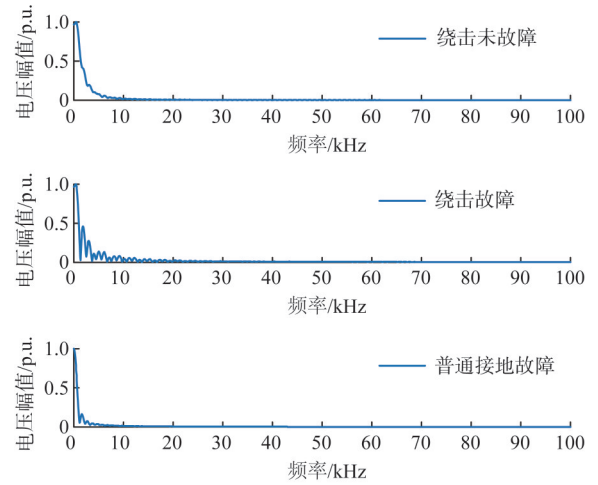


图6 雷击与故障情况下的电压频谱图

Fig. 6 Voltage spectrograms for lightning and fault conditions

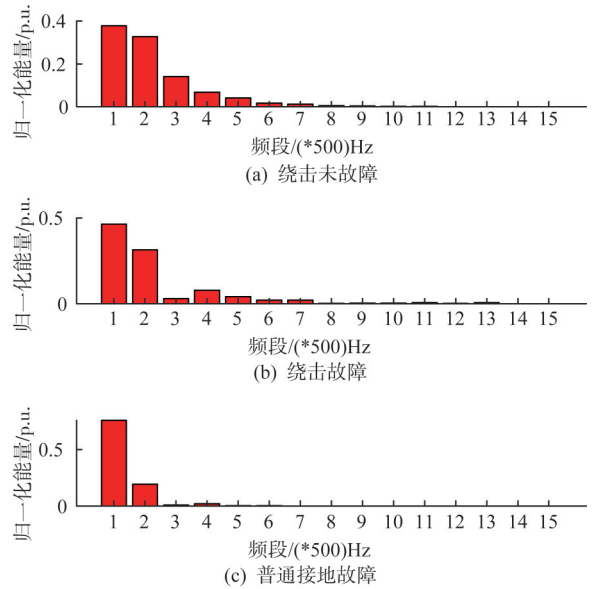


图7 信号频段能量分布

Fig. 7 Distribution of the energy in the signal band

其计算步骤如下。

1)选取时间标度 ε 将故障电压信号样本划分成 N 个区段,若无法均分时则利用向左取整函数 floor 得到 $N = \text{floor}(N_s/\varepsilon)$, N_s 为样本数量。

2)计算分段后各区间样本值总和的归一化概率 $P_i(\varepsilon)$,计算公式为:

$$\begin{cases} P_i(\varepsilon) = \frac{I_i(\varepsilon)}{\sum_{i=1}^N I_i(\varepsilon)}, i = 1, 2, \dots, N \\ \sum_{i=1}^N P_i(\varepsilon) = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $I_i(\varepsilon)$ 为第 i 个子区间的样本数量; N 为子区间数量。

3) 设置 q 的取值范围并计算 q 阶配分函数 $x_q(\varepsilon)$ 。

$$x_q(\varepsilon) = \sum_{i=1}^N P_i^q(\varepsilon) \quad (3)$$

用 $x_q(\varepsilon)$ 来衡量归一化概率 $P_i(\varepsilon)$ 的不均匀程度, 参数 q 为权重因子。理论上 q 的范围可以覆盖整个实数空间, 但研究表明当 q 超过某个范围时结果会趋于饱和和计算结果没有显著变化^[26]。本文 q 的取值范围设定为 $[-20, 20]$ 。

4) 利用分形自相似原理, 推导出配分函数 $\chi_q(\varepsilon)$ 和标度 ε 之间存在幂律关系, 即 $\chi_q(\varepsilon) \sim \varepsilon^{\tau(q)}$ 。通过对两边求对数, 可得式(4)所示关系式。

$$\log x_q(\varepsilon) = \tau(q) \log \varepsilon + M \quad (4)$$

式中: $\tau(q)$ 为质量指数, 在对数坐标下用直线拟合的方式可以估计出; M 为常数, 对结果影响很小, 通常可以忽略不计。若 $\tau(q)$ 和 q 之间存在线性相关, 则所研究的样本序列可视为单分形尺度; 若两者之间存在一定的非线性, 则所研究数据集属于多分形尺度。

5) 利用勒让德变换可以计算出奇异性指数 α 和谱函数 $f(\alpha)$ 。

$$\begin{cases} \alpha = \tau'(q) = \frac{d\tau(q)}{dq} \\ f(\alpha) = q\alpha - \tau(q) \end{cases} \quad (5)$$

式中 α 为衡量在多重分形结构中不同奇异度的分布情况的变量。

用 $\Delta\alpha$ 来表示多重分形谱的宽度, 计算公式为:

$$\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min} \quad (6)$$

式中: $\Delta\alpha$ 为信号的多重分形强度, 随着 $\Delta\alpha$ 的增大, 信号的多重分形性增强, 这意味着信号波动性也会增加; $\alpha_{\min}$ 为最小奇异性指数, 它表示信号局部改变的强度, 随着 $\alpha_{\min}$ 的减小信号的局部变化随之增强; $\alpha_{\max}$ 为最大奇异性指数。

3.2 雷击与区内故障的谱特征分析

为了使不同特征在数值上处于统一量级, 对 1 ms 内电压故障分量数据进行了归一化处理。本文采用线性函数归一化(min-max scaling), 如式(7)所示。

$$x_{\text{nor}} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (7)$$

式中: x 为原始数据; $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 分别为 x 的最大值和最小值, 为归一化的数据。

针对第 2 节 3 种情况电压信号的故障分量进行多重分形分析, 得到第 1 ms 内电压故障分量的多重分形谱如图 8 所示。

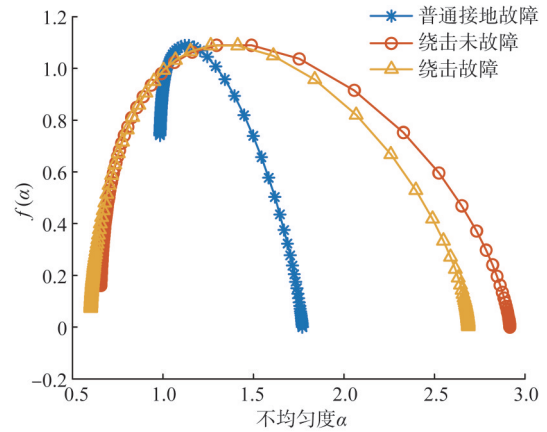


图 8 第 1 ms 电压信号的多重分形谱

Fig. 8 Multifractal spectrums of the 1st ms voltage signals

由理论分析和图 8 结果可得:

1) 图 8 中普通接地故障的多重分形谱最窄, 不均匀度 $\Delta\alpha=0.77$, 而绕击未故障和绕击故障的谱宽度较普通接地故障更宽, 不均匀程度 $\Delta\alpha$ 分别为 2.26 和 2.09。由于绕击未故障和绕击故障的电压信号中包含更丰富的高频信号, 且其波动幅度较大, 所以多重分形谱的不均匀程度 $\Delta\alpha$ 更大, 因此利用 1 ms 数据的多重分形谱可以区分区内直接接地故障和线路是否遭受雷击两种情况。

2) 对于绕击未故障和绕击故障, 其多重分形谱的 $\alpha_{\min}$ 均小于直接接地故障。这也表明雷击信号具有较强的局部奇异性, 即信号的局部变化更剧烈。此结论与绕击未故障和绕击故障的电压信号有明显的“波谷”, 而普通接地故障则均匀下降的结果相吻合。

为进一步区分绕击未故障和绕击故障, 对第 2 ms 内原始电压信号进行多重分形分析, 其多重分形谱如图 9 所示。

由理论分析和图 9 可得: 在 1 ms 后绕击未故障信号已大幅衰减, 而绕击故障信号波动幅度大, 图 9 中绕击故障的多重分形谱不均匀程度 $\Delta\alpha$ 明显高于绕击未故障, 所以利用第 2 ms 的多重分形谱能实现绕击未故障和绕击故障的有效区分。

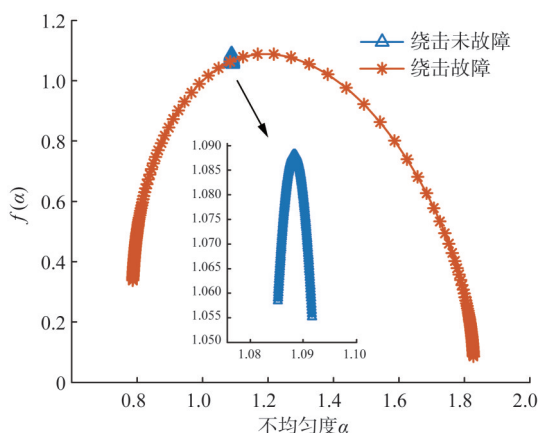


图9 第2 ms电压信号的多重分形谱

Fig. 9 Multifractal spectra of the 2nd ms voltage signals

4 基于多重分形谱二次多项式拟合的雷击干扰识别方法

由式(5)可知,在多重分形谱曲线中 $f(\alpha)$ 和 α 关系函数式较复杂,对其进行定量研究具有一定难度。如图8—9所示,多重分形谱的轮廓线是有规律的且连续可导,呈现出显著的二次多项式特征。为更好地量化分析多重分形谱的走势,本文首先求得电压故障分量的多重分形谱,在此基础上采用最小二乘法对其进行二次多项式拟合,利用拟合函数的最高次项系数来刻画信号的波动程度,从而实现雷击干扰和故障的辨识。

4.1 基于最小二乘法的多项式拟合法

本文根据最小二乘原理,利用二次函数来拟合信号的多重分形谱。二次拟合函数如下。

$$f(\alpha) = A\alpha^2 + B\alpha + C \quad (8)$$

式中: α 为标度奇异性指数; A 、 B 、 C 为待定未知数。

由二次多项式的性质可得, $\Delta\alpha$ 能反应波形的开口大小,二次多项式的最高次项系数绝对值 $|A|$ 同样能反应开口大小。一般而言, $|A|$ 越小则 $\Delta\alpha$ 越大,数据分布越不均匀;反之, $|A|$ 越大则 $\Delta\alpha$ 越小,数据差异越小,分布越集中、越均匀。

4.2 多项式拟合算法的效果分析

为验证多项式拟合算法的效果,以距离保护安装处96 km处发生绕击未故障和正极普通接地故障为例进行分析。第1 ms数据的多重分形谱和多项式拟合结果如图10所示。多重分形谱不均匀度 $\Delta\alpha$ 、多项式拟合的不均匀度 $\Delta\alpha'$ 、多项式最高次系数 $|A|$

及运算误差的计算结果如表3所示。

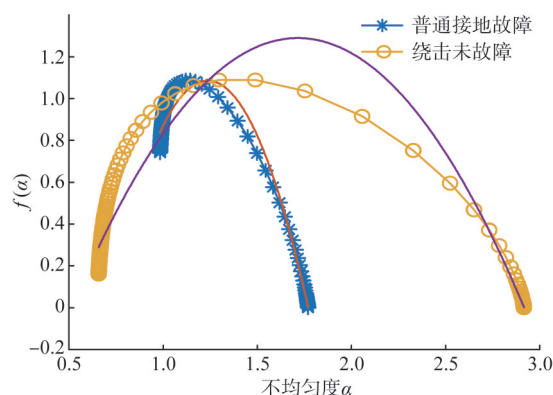


图10 多重分形谱拟合结果

Fig. 10 Fitting results of the multifractal spectra

表3 多重分形谱拟合数据

Tab. 3 Fitting data of multifractal spectra

类型	$\Delta\alpha$	$\Delta\alpha'$	$ A $	$\frac{\Delta\alpha' - \Delta\alpha}{\Delta\alpha}$
普通接地故障	0.773	0.774	4.00	0.13%
绕击未故障	2.258	2.259	0.89	0.04%

由表3可知:

1) 从误差的角度,拟合误差均小于1%,多项式拟合结果能够正确表征多重分形谱的结果。

2) 表3中普通接地故障的不均匀度为0.77,其拟合曲线最高次系数 $|A|=4.00$;而雷击干扰的不均匀度较普通接地故障大, $\Delta\alpha=2.26$,但其多项式拟合最高次系数为0.89。结果表明 $|A|$ 和 $\Delta\alpha$ 均能有效反映多重分形谱的开口大小,且用多项式最高次拟合系数 $|A|$ 的区分度更加明显。

4.3 识别判据

在线路保护启动后,计算第1 ms和第2 ms电压信号多重分形谱的最高次项拟合系数,分别记为 $|A_1|$ 和 $|A_2|$ 。根据多重分形谱的拟合结果,提出一种新的识别判据如式9所示。

$$\begin{cases} |A_1| \geq |A_{set1}|, & \text{普通短路故障} \\ |A_1| \geq |A_{set1}| \text{ 且 } |A_2| < |A_{set2}|, & \text{雷击引起的故障} \\ |A_1| \geq |A_{set1}| \text{ 且 } |A_2| \geq |A_{set2}|, & \text{雷电干扰} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $|A_{set1}|$ 为按照实测的雷击信号多重分形谱最高次项拟合系数最大值进行整定的二次多项式最高次拟合系数阈值; $|A_{set2}|$ 为按照实测雷击干扰的多重分形谱最高次拟合系数的最小值进行整定的二次多项式最高次拟合系数阈值。为保证整定值可靠区

分的同时需留有一定裕度，取可靠系数 $K_{\text{rel}}=1.3$ ， $|A|_{\text{set1}}=2.26$ ， $|A|_{\text{set2}}=18.5$ 。

4.4 雷击干扰识别整体方案

本文提出了一种基于波形拟合系数判据的雷击干扰识方法，其整体方案如图 11 所示。该识别方法仅需 2 ms 的时间窗口，能够对各种故障进行区分。通过两个时段的协调配合，可以加快对雷击干扰的辨识。

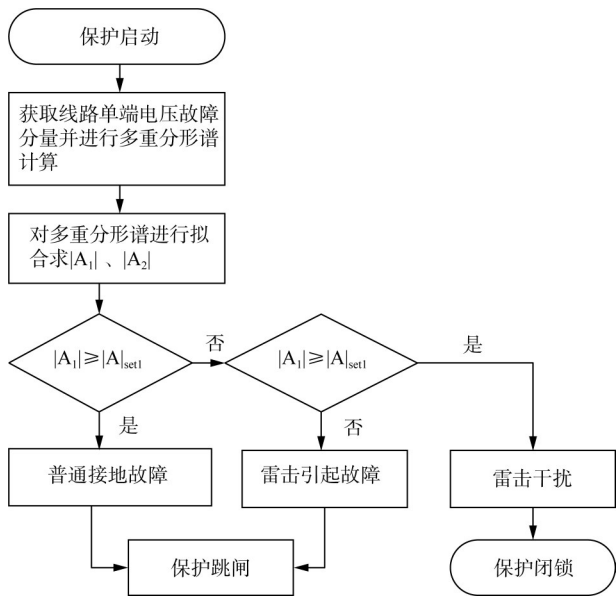


图 11 雷击干扰识别方法流程图

Fig. 11 Flowchart of lightning interference identification Method

5 仿真验证

为了验证本文提出的方法，以图 1 所示系统为例，在 PSCAD 仿真软件中进行了仿真验证，仿真采样频率为 100 kHz，雷电流幅值的选取见表 4。

表 4 不同情况雷电流幅值

Tab. 4 Amplitudes of the lightning currents for different cases

雷击类型	I_g/kA
反击未故障	130
绕击未故障	15
反击故障	200
绕击故障	50

5.1 不同位置发生雷击和故障的仿真

以正极直流输电线路为研究对象，保护测点位于直流输电线路首端。针对线路 96 km、480 km 和 864 km 发生的绕击未故障、反击未故障、绕击故

障、反击故障和普通接地故障等不同情境进行仿真验证，各种情况下多重分形谱拟合多项式的最高次项系数 $|A_1|$ 和 $|A_2|$ 的仿真结果见表 5 所示。

表 5 不同位置下发生雷击及故障情况的仿真结果

Tab. 5 Simulation results of lightning strikes and faults at different locations

位置	雷击及故障类型	第 1ms		第 2ms		结果
		$\Delta\alpha$	$ A_1 $	$\Delta\alpha$	$ A_2 $	
96 km	绕击未故障	2.26	0.89	0.006	3.049	1
	反击未故障	2.09	0.86	0.013	1.477	1
	绕击故障	2.09	0.86	1.040	3.330	2
	反击故障	1.79	1.43	1.180	2.640	2
	普通金属性接地	0.77	4.00			3
480 km	绕击未故障	1.63	1.69	0.015	1.221	1
	反击未故障	2.34	0.78	0.006	3.319	1
	绕击故障	2.27	0.95	1.260	2.22	2
	反击故障	2.38	0.89	1.060	2.86	2
	普通金属性接地	0.88	4.13			3
864 km	绕击未故障	2.00	1.18	0.320	24	1
	反击未故障	1.80	1.28	0.024	766	1
	绕击故障	1.84	1.41	0.740	6.35	2
	反击故障	1.62	1.74	1.290	2.75	2
	普通金属性接地	0.86	5.87			3

注：仿真结果中数字代表的识别类型含义为：1 为绕击未故障或反击未故障，2 为绕击故障或反击故障，3 为普通接地故障。

由表 5 可知，本文所提的雷击干扰识别方法能够准确区分雷击干扰与故障。当输电线路发生接地故障时，第 1 ms 数据的多项式拟合最高次项系数 $|A_1|$ 值较大，能准确识别；且与直接采用 $\Delta\alpha$ 相比，采用最高次项系数作为识别判据，保护的灵敏性更高。借助第 2 ms 的 $|A_2|$ 值可进一步区分雷击干扰和雷击故障。

5.2 过渡电阻的影响

为测试所提算法的抗过渡电阻能力，在线路中点设置经不同过渡电阻发生普通接地故障，仿真结果如表 6 所示。

由表 6 可知，经不同过渡电阻发生故障时，随

表 6 不同过渡电阻仿真结果

Tab. 6 Simulation results with different transition resistances

过渡电阻/ Ω	$\Delta\alpha$	$ A_1 $	判断结果
0.01	0.88	4.13	接地故障
100.00	0.90	3.88	接地故障
200.00	0.91	3.80	接地故障

着过渡电阻的增大多重分形谱谱宽几乎不变, $|A_1|$ 变化很小, 因此所提方法几乎不受过渡电阻的影响。

5.3 雷电流幅值的影响

为了验证不同雷电流幅值对该方法的适用性, 以线路480 km处为例, 分别对线路和杆塔施加不同幅值的雷电流干扰, 评估该方法的有效性。仿真结果如表7所示。

表7 不同雷电流幅值的影响

Tab. 7 Simulation results for different amplitudes of lightning currents

干扰类型	雷电流幅值/kA	$\Delta\alpha$	$ A_1 $
绕击未故障	15	1.63	1.69
	10	1.64	1.65
	5	1.70	1.60
反击未故障	130	2.34	0.78
	120	2.34	0.78
	110	2.34	0.78

由表7可知, 雷电流幅值的改变对实验结果几乎没有影响, 该方法在不同雷电流幅值下均能有效识别雷电流的注入。这表明该方法具有良好的适应性, 能够在不同雷电流条件下保持稳定的性能。

6 结语

本文深入分析了直流输电系统雷击和故障时的电压时域波形和频域特征, 首次将多重分形算法应用于区分雷击和区内故障, 根据电压暂态信号的多重分形谱特征差异提出了一种基于多重分形谱二次多项式拟合的雷击干扰识别新方法。

理论分析与仿真结果表明, 多重分形谱拟合函数的最高次项系数能表征雷击干扰和故障的电压波动程度, 且比直接采用 $\Delta\alpha$ 灵敏度高。这种方法不仅能准确识别各种雷击干扰和故障, 而且仅需单端电气量信息, 因此识别速度快, 且具有良好的抗过渡电阻能力。该方法可作为高压直流输电线路保护的辅助判据, 可进一步增强保护的可靠性。

参考文献

[1] 高志远, 张晶, 庄卫金, 等. 关于新型电力系统部分特点的思考[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(6): 137-143, 151.
GAO Zhiyuan, ZHANG Jing, ZHUANG Weijin, et al. Thoughts on some characteristics of new style power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(6):

137-143, 151.
[2] 王顺亮, 谢洋, 赵远, 等. 基于谐波状态空间理论的12脉动换流站阻抗建模[J]. 南方电网技术, 2024, 18(6): 1-9.
WANG Shunliang, XIE Yang, ZHAO Yuan, et al. Impedance modeling of 12-pulse converter station based on harmonic state space theory [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(6): 1-9.
[3] ZHU R, ZHOU X, YIN H, et al. Calculation method for commutation failure fault level in LCC-HVDC system under single-line-to-ground faults considering DC current variation [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(6): 1995-2002.
[4] 李康, 黄萌, 查晓明, 等. 高压直流输电系统可靠性分析方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 174-187.
LI Kang, HUANG Meng, ZHA Xiaoming, et al. An overview of reliability analysis methods for an HVDC transmission system [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 174-187.
[5] 李书勇, 郭琦, 崔柳, 等. 特高压直流输电线路雷击暂态过程与行波保护响应特性分析[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2830-2835.
LI Shuyong, GUO Qi, CUI Liu, et al. Thunderstruck transient process of UHVDC transmission line and response characteristic of traveling wave protection [J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2830-2835.
[6] 舒兵成, 李海峰, 武霁阳, 等. 采样频率对直流线路行波保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 91-95.
SHU Bingcheng, LI Haifeng, WU Jiyang, et al. Influence of sampling frequency on traveling wave protection of DC line [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 91-95.
[7] ZOU G, HUANG Q, SONG S, et al. Novel transient-energy-based directional pilot protection method for HVDC line [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 1-10.
[8] 高艳丰, 黄晓胤, 闫红艳, 等. 输电线路雷击故障的综合识别研究[J]. 广东电力, 2016, 29(3): 93-98.
GAO Yanfeng, HUANG Xiaoyin, YAN Hongyan, et al. Study on synthetic identification of lightning fault of power transmission lines [J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(3): 93-98.
[9] 段建东, 任晋峰, 张保会, 等. 超高速保护中雷电干扰识别的暂态法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 23(7): 7-13.
DUAN Jiandong, REN Jinfeng, ZHANG Baohui, et al. Study of transient approach of discriminating lightning disturbance in ultra-high-speed protection [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 23(7): 7-13.
[10] 赵军, 吕艳萍, 王汉广. 基于多尺度形态分解的特高压线路雷击干扰识别新方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(5): 994-998.
ZHAO Jun, LÜ Yanping, WANG Hanguang. New scheme to identify lightning disturbance for the UHV transmission lines based on multi-scale morphology decomposition [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(5): 994-998.
[11] 齐国强, 王增平, 裴愉涛, 等. 基于信号复杂度衰减的特高压直流输电线路雷电暂态识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 1-8.
QI Guoqiang, WANG Zengping, QIU Yutao, et al. Transient identification method of lightning strokes based on the attenuation of signal complexity for UHVDC transmission lines [J].

- Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 1-8.
- [12] 彭向阳, 李鑫, 姚森敬, 等. 基于行波电流暂态特性的输电线路故障原因辨识[J]. 南方电网技术, 2012, 6(5): 43-47.
- PENG Xiangyang, LI Xin, YAO Senjing, et al. The identification of the fault cause of overhead transmission lines based on the transient characteristics of travelling wave current [J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(5): 43-47.
- [13] 邹贵彬, 高厚磊, 朱峰, 等. 输电线路雷击与故障的积分识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 43-48.
- ZOU Guibin, GAO Houlei, ZHU Feng, et al. Integral identification method of lightning stroke and fault for transmission line [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 43-48.
- [14] 束洪春, 曹璞璘, 杨竞及, 等. 考虑互感器传变特性的输电线路暂态保护雷击干扰与线路故障识别方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 1-12.
- SHU Hongchun, CAO Pulin, YANG Jingji, et al. A method to distinguish between fault and lightning disturbance on transmission lines based on CVT secondary voltage and CT secondary current [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 1-12.
- [15] 吴通华, 黎钊, 李新东, 等. 适配柔直系统快速性及可靠性需求的雷击干扰识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 1-12.
- WU Tonghua, LI Zhao, LI Xindong, et al. Lightning interference identification method for the speed and reliability of a flexible DC system [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 1-12.
- [16] 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.
- [17] XIAO C, YANG R, MA X, et al. Damage evaluation of rock blasting based on multi-fractal study [J]. International Journal of Impact Engineering, 2024(188): 104953.1-104953.12.
- [18] 樊佳, 齐咏生, 高学金, 等. 基于形态学多重分形的风电机组轴承故障诊断[J]. 振动测试与诊断, 2021, 41(6): 1081-1089, 1234-1235.
- FAN Ji, QI Yongsheng, GAO Xuejin, et al. Fault diagnosis of wind turbine bearing based on morphological multi-fractal analysis [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(6): 1081-1089, 1234-1235.
- [19] 曹文思, 吴擎, 徐铭铭, 等. 基于分形理论与聚类分析的小电阻接地系统高阻接地保护方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(4): 204-209, 224.
- CAO Wensi, WU Qing, XU Mingming, et al. Protection method based on fractal theory and cluster analysis for grounding fault with high resistance of low resistance grounding system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 204-209, 224.
- [20] 朱华, 姬翠翠. 分形理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 37-38.
- [21] LIU H M, WANG X, LU C. Rolling bearing fault diagnosis based on LCD-TEO and multifractal detrended fluctuation analysis [J]. Mechanical System and Signal Processing, 2015(60): 273-288.
- [22] 陈明, 相艳会, 郭倩雯, 等. 天广±500kV高压直流输电系统建模及仿真[J]. 中国电力, 2013, 46(6): 30-33, 43.
- CHEN Ming, XIANG Yanhui, GUO Qianwen, et al. Modeling and Simulation of Tianshengqiao—Guangdong ±500 kV HVDC Transmission System [J]. Electric Power, 2013, 46(6): 30-33, 43.
- [23] 顾垚彬, 宋国兵, 郭安祥, 等. 针对直流线路行波保护的雷击识别方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(13): 3837-3845, 4024.
- GU Yaobin, SONG Guobing, GUO Anxiang, et al. A lightning recognition method for DC line traveling-wave protection of HVDC [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3837-3845, 4024.
- [24] WANG Fuwang, WANG Hao, GAO Jinhua, et al. A driving fatigue feature detection method based on multifractal theory [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(19): 19046-19059.
- [25] DU W, KANG M, PECHT M. Fault diagnosis using adaptive multifractal detrended fluctuation analysis [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(3): 2272-2282.
- [26] 苏岭东, 翟明岳. 宽带电力线通信信号多重分形特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4430-4436.
- SU Lingdong, ZHAI Mingyue. Research on multi-fractal characteristics of broadband power line communication signal [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4430-4436.

收稿日期: 2024-06-06; 网络首发日期: 2024-12-10

作者简介:

刘艳云(1999), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制, 2623258823@qq.com;

贾文超(1984), 男, 通信作者, 讲师, 硕士生导师, 博士, 研究方向为电力系统保护与控制, jiawenchao_snow@163.com;

高岩(1982), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为继电保护和电网调控运行。