

超高压输电线路雷击干扰分析与识别

陈志鹏, 李琴, 贺海霞, 彭君琪, 李锐, 王志敏, 陈科, 周桂珍*

(湘南学院 电子信息与电气工程学院, 湖南 郴州 423000)

摘 要: 超高压输电线路长度跨度大, 所处地理环境和气候条件复杂, 导致超高压输电线路遭受雷击的概率大。雷击产生的暂态分量会对高压输电线路暂态行波保护产生干扰, 导致保护发生误动作, 因此雷击成为影响超高压输电线路暂态保护的重要因素。本文通过对故障性雷击、非故障性雷击, 以及单相接地短路故障相关暂态过程进行分析研究, 利用相模变换的克拉克公式提取三者的正反行波, 通过小波变换提取行波的低频分量, 依据行波极性、斜率等性质的不同, 设计了一种能识别超高压线路是遭受雷击还是发生短路故障的识别方案。对超高压输电线路雷击干扰及其短路故障的仿真建模结果验证了雷击干扰识别方案的可行性, 实现了故障性雷击、非故障性雷击、单相接地短路故障的有效识别。

关键词: 超高压输电线路; 暂态保护; 雷击干扰识别; 小波变换;

中图分类号: TP183

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8173.2023.05.019

超高压输电线路铺设范围广、线路长、分布环境复杂, 线路受雷击的概率大大增加^[1]。根据是否诱发故障, 雷击可以分为故障性雷击和非故障性雷击^[2]。对超高压输电线路的继电保护必须保证全线速动可靠切除线路故障。因此, 不受系统振荡、线路分布电容等因素影响的基于故障暂态行波信号的行波保护与故障测距被广泛应用于超高压输电线路保护^[3-4]。行波保护依据继电保护装置检测的高频暂态行波分量的特征, 识别本线路是否发生故障。然而, 非故障性雷击产生的高频暂态行波信号与线路故障产生的暂态行波具有相似特性, 从而引起保护装置发生误动作。因此, 准确可靠识别非故障性雷击、故障性雷击与短路故障具有重要意义^[5]。

近年来, 雷击干扰识别方法层出不穷。文献[6]提出一种复合识别算法, 利用行波首波面积比值差异区别雷击与短路故障, 利用短小时内行波积分值差异识别轻型雷击与故障。文献[7]利用改进的希尔伯特-黄变换 (Hilbert-Huang transform, HHT) 算法及积分判据, 提出了一种识别非故障性雷击、故障性雷击与短路故障的方法。文献[8]提出了基于 Prony 算法的雷击干扰识别方案。文献[9]利用小波变换直接分析雷击或故障前后电流行波全量或分量大小来识别雷击干扰, 但识别判据的阈值受多个参数影响整定复杂。文献[10]提出利用“波形一致性系数”实现雷击干扰识别, 但算法数据窗长。

结合以上各方法的优缺点, 本文利用小波多尺度分析提取电流暂态行波能量特征差异, 并结合行波斜率、波头极性的不同, 以期实现故障性雷击、非故障性雷击、单相接地短路故障等状态识别。

1 雷击暂态分析

1.1 雷电流波形

雷电放电特点有: 幅值与陡度大, 放电时间短, 且雷击 90% 以上为负极性^[11]。雷击时, 雷电流波形和大小与气候、地势等因素相关。首个雷电流波形一般为单极性脉冲波, 其波形与各参数如图 1 所示。

通常情况, 测量的雷电流都以雷击时产生的放电路径底部的电流作为雷电基底电流, 本文研究过程采

收稿日期: 2023-03-25

基金项目: 2021 年湘南学院大学生创新创业训练计划项目 (湘南学院校发 [2021] 40 号, No.55); 湖南省教育厅科学研究项目 (18C1037)

作者简介: 陈志鹏 (2001—), 男, 湖南邵阳人, 电气工程及其自动化专业在读本科生; 通信作者: 周桂珍 (1983—), 女, 湖南岳阳人, 讲师, 硕士, 研究方向为智能控制

用的是 $1.2/50 \mu\text{s}$ 的雷电流波形。实际中, 一般采用标准双指数雷电流公式来模拟雷电流^[11-12], 即

$$i = i_0 k (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}), \quad (1)$$

式中: i_0 为雷电流幅值 (一般为几十千安至几百千安); k 为波形修正系数; α 为波前衰减系数; β 为波尾衰减系数。 α 、 β 和 k 系数对波形参数起重要作用, 对 $1.2/50 \mu\text{s}$ 的雷电流波形参数设置如表 1 所示。

1.2 行波电流暂态分析

本文选择 500 kV 超高压输电线路作为研究对象, 如图 2 所示。电源 S1、S2 的电压取 500 kV , 单位长度线路正序电阻、电感和电容分别为 $R_1=0.235 \text{ } \Omega/\text{km}$ 、 $L_1=0.857 \text{ mH/km}$ 和 $C_1=0.013 \text{ } \mu\text{F/km}$, 单位长度线路零序电阻、电感和电容分别为 $R_0=0.212 \text{ } \Omega/\text{km}$ 、 $L_0=2.286 \text{ mH/km}$ 和 $C_0=0.008 \text{ } \mu\text{F/km}$, 线路长度选择 $l=300 \text{ km}$, 对地电容取 $1 \text{ } \mu\text{F}$ 。

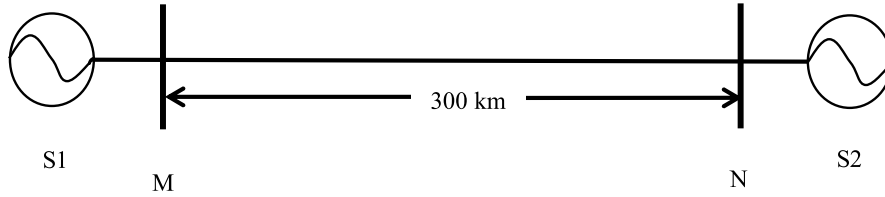


图 2 500 kV 输电系统图

本文利用 Matlab/Simulink 搭建系统仿真系统, 并根据雷电流公式 (1) 构建雷电流产生模型 (图 3), 模拟非故障性雷击、故障性雷击以及发生概率最大的单相短路故障三种情形, 采用双端行波测距法提取线路两端电流行波 (图 4), 通过克拉克实现三相电流行波分量之间的解耦^[13]。解耦变换式为

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 i_α 、 i_β 为线模量, i_0 为零模量。 i_α 比 i_0 在传输过程中更稳定, 我们采用 i_α 为分析对象, 获得的三种电流波形见图 5。

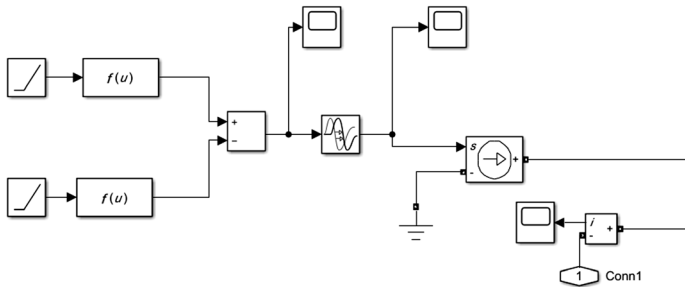


图 3 雷电流生成模型

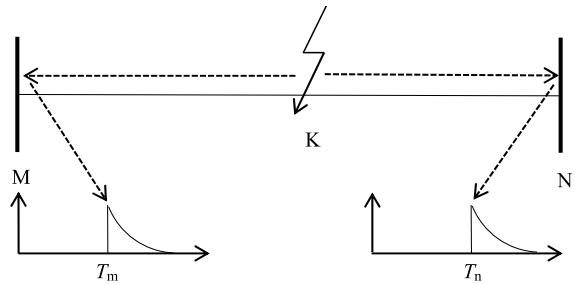


图 4 双端行波测距原理图

由图 5 可知, 单相接地短路、非故障性雷击和故障性雷击电流波形波头相似, 且均呈阶跃式变化, 但波形波尾部分的变换很大。单相接地短路与非故障性雷击时, 波尾变化相对平缓, 但发生故障性雷击时波尾会被直接截断。雷电的放电时延为 $50 \mu\text{s}$, 由图 5 可知, 非故障性雷击与单相接地短路的波头最大斜率都

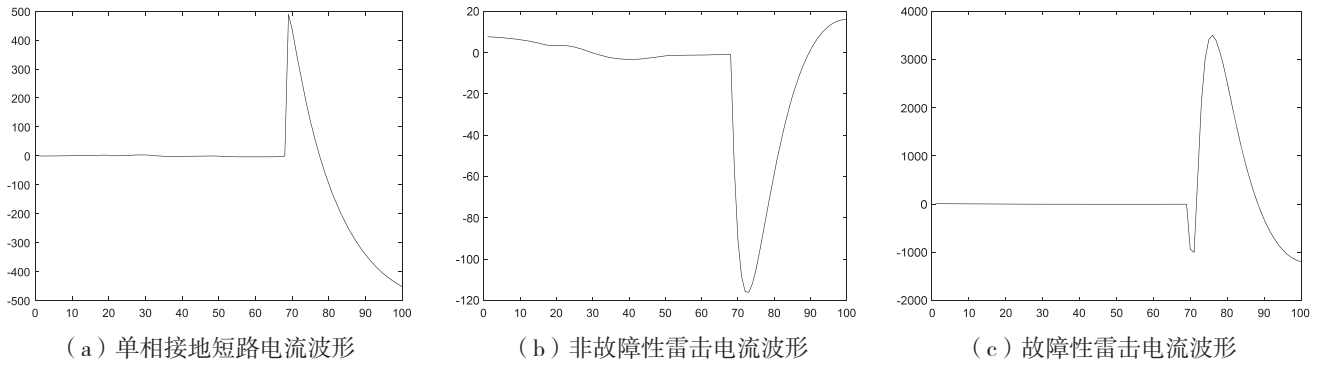


图 5 三种电流波形

很大,波尾最大斜率相对很小,而故障性雷击波头波尾斜率均很大且异号,利用此特征即可区分故障性雷击。

2 多尺度小波分析

2.1 多尺度小波分析理论

根据小波多分辨率分析理论可知,对于任意测量信号 $f(t) \in V_0$,多分辨率分析可将其分解为高频部分 W_j 和低频部分 V_j ,低频部分 V_j 可再次分解为两部分循环嵌套,直至分解至所需的频率成分。

如果小波基为一组正交基,则小波变换能量^[14]守恒。小波能量可由各子信号求得

$$E_{D,j} = \sum_{k=1}^N |d_j(k)|^2, \quad E_{A,M} = \sum_{k=1}^N |a_M(k)|^2, \quad (3)$$

式中: $E_{D,j}$ 表示信号在第 j 尺度下的高频能量, $E_{A,M}$ 表示最后被分解的第 M 尺度下的低频能量。原始信号 E 可表示为

$$E = E_{A,M} + \sum_{j=1}^J E_{D,j} \circ \quad (4)$$

高频含量与低频含量分别为

$$\rho_{D,j} = \frac{E_{D,j}}{E} \times 100\%, \quad \rho_A = \frac{E_{A,M}}{E} \times 100\% \circ \quad (5)$$

2.2 行波电流的多尺度分析

本文采用 Matlab 自带小波工具箱对从模型中提取的行波信号进行小波分析:(1) 打开 Matlab 软件,点击上行的 APP,从中找到小波工具箱 Wavelet Analyzer 并双击打开;(2) 点击 Wavelet 1-D 一维小波分析界面;(3) 点击 File/Import from Workspace/Import Signal 选择保存在 mat 文件中的数据,并选择 i_a 导入信号,选择 db4 小波,最大分解尺度为 5;(4) 点击 Analyze 进行小波分析。图 6 给出了系统单相接地故障下行波电流多尺度分析。

由图 6 可知, s 为原行波电流信号, d_1, d_2, \dots, d_5 分别为行波电流信号 5 层分解中的高频子信号, a_5 为第 5 层低频子信号。

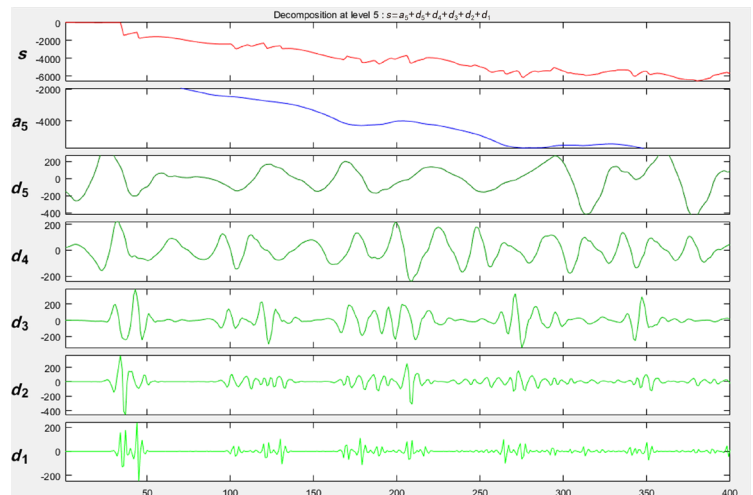


图 6 行波电流小波分析图

利用式(5)可以计算单相接地短路、非故障性雷击和故障性雷击三种情况下的能量分布,用于雷击干扰识别。

3 雷击干扰分析方案

3.1 雷击干扰识别算法

由前述分析可得出一套在实际工程现场上适用的雷击干扰识别方案。

取 $50 \mu\text{s}$ 电流暂态行波, 计算出行波波形的最大正负斜率, 首先计算得到的是波头的最大斜率, 我们将其设为 $k_{1,\max}$, 随后计算得到的是波尾的最大斜率 $k_{2,\max}$ 。由上述理论可知, $\frac{k_{2,\max}}{k_{1,\max}} \rightarrow 0$ 时, 可能是非故障性雷击或单相接地短路; $\frac{k_{2,\max}}{k_{1,\max}} \rightarrow -1$ 时, 为故障性雷击。

初始的行波波形波头与第二个行波波形波头的模的极大值分别设为 m_1 , m_2 。由分析可知非故障性雷击时, 两波头极性相反, 即 $m_1 m_2 < 0$; 而单相接地短路时极性相同, 即 $m_1 m_2 > 0$ 。但是, 当 K 点与母线的间隔极小时, 行波将在二者之间来回往复, 这时提取极性进行判定时就会出现错误。也就是说, $m_1 m_2 > 0$ 时, 则一定为单相接地短路故障。 $m_1 m_2 < 0$ 时, 可能是近端故障或非故障性雷击。由式(3)一式(5)求出各分解尺度能量分布与 ρ_A ; 若 ρ_A 的值逼近 1, 则为短路故障, 反之则为非故障性雷击, 即

(1) 当 $k_{2,\max} / k_{1,\max} \leq k_{\text{set}}$ 时 (k_{set} 为设定阈值), 为故障性雷击;

(2) 当 $k_{2,\max} / k_{1,\max} > k_{\text{set}}$ 且 $m_1 m_2 > 0$ 时, 为单相接地短路;

(3) 当 $k_{2,\max} / k_{1,\max} > k_{\text{set}}$ 且 $m_1 m_2 < 0$ 且 $\rho_A > \rho_{\text{set}}$ 时 (ρ_{set} 为设定阈值), 为单相接地短路;

(4) 当 $k_{2,\max} / k_{1,\max} > k_{\text{set}}$ 且 $m_1 m_2 < 0$ 且 $\rho_A < \rho_{\text{set}}$ 时, 为非故障型雷击。

识别算法流程见图 7。

3.2 识别方案验证

选取暂态近端测量, 距离分别设置为 5 km、10 km、20 km、70 km、140 km 处发生上述三种故障情况。考虑到雷电流幅值与接地电阻可能会对仿真结果有一定的干扰, 利用控制变量法, 设置非故障性雷电流分别取 $I=5 \text{ kA}$ 、 $I=10 \text{ kA}$, 故障性雷电流分别取 $I=20 \text{ kA}$ 、 $I=50 \text{ kA}$, 故障性雷击、单相接地短路接地电阻分别为 $R=0 \Omega$ 、 $R=300 \Omega$ 。故障性雷击识别仿真结果见表 2, 非故障型雷击与单相接地短路的识别仿真结果见表 3。

表 2 显示, 当发生了故障性雷击时, $k_{2,\max} / k_{1,\max}$ 最小为 $-3.638 6$, 非故障性雷击时, $k_{2,\max} / k_{1,\max}$ 最大为 $-0.222 8$, 将 k_{set} 设置为 $-1.707 9$ 即可用于识别出故障性雷击的情况。

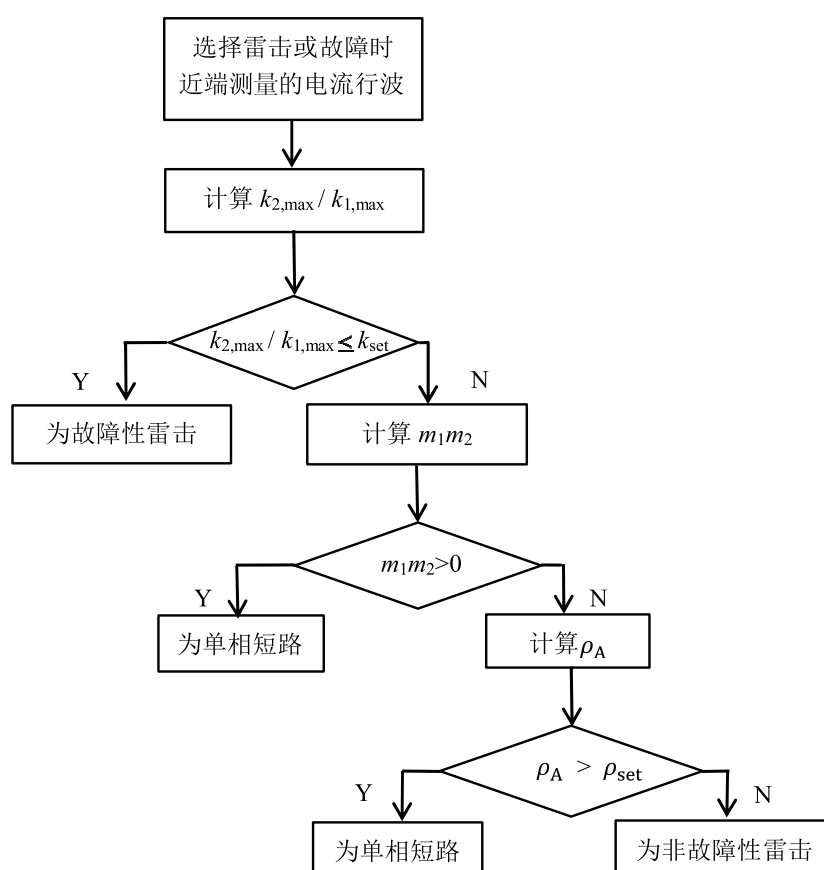


图 7 识别算法流程图

表 2 故障性雷击识别仿真结果

类型	条件	$k_{2,\max}/k_{1,\max}$
故障性雷击	$L=20\text{ km}, I=20\text{ kA}, R=0\ \Omega$	-5.306 6
	$L=20\text{ km}, I=20\text{ kA}, R=300\ \Omega$	-5.296 2
	$L=20\text{ km}, I=50\text{ kA}, R=0\ \Omega$	-4.226 3
	$L=20\text{ km}, I=50\text{ kA}, R=300\ \Omega$	-4.224 6
	$L=70\text{ km}, I=20\text{ kA}, R=0\ \Omega$	-3.648 9
	$L=70\text{ km}, I=20\text{ kA}, R=300\ \Omega$	-3.638 6
	$L=70\text{ km}, I=50\text{ kA}, R=0\ \Omega$	-4.199 3
	$L=70\text{ km}, I=50\text{ kA}, R=300\ \Omega$	-4.197 8
	$L=140\text{ km}, I=20\text{ kA}, R=0\ \Omega$	-4.194 4
	$L=140\text{ km}, I=20\text{ kA}, R=300\ \Omega$	-4.190 4
	$L=140\text{ km}, I=50\text{ kA}, R=0\ \Omega$	-4.079 2
	$L=140\text{ km}, I=50\text{ kA}, R=300\ \Omega$	-4.071 8
非故障性雷击	$L=20\text{ km}, I=5\text{ kA}$ (感应雷, 各相幅值相差 5%)	-0.219 5
	$L=20\text{ km}, I=10\text{ kA}$	-0.222 8
	$L=70\text{ km}, I=5\text{ kA}$ (感应雷, 各相幅值相差 10%)	-0.177 4
	$L=70\text{ km}, I=10\text{ kA}$	-0.177 2
	$L=140\text{ km}, I=5\text{ kA}$	-0.182 6
	$L=140\text{ km}, I=10\text{ kA}$	-0.182 3
单相短路	$L=20\text{ km}, R=0\ \Omega$	-0.249 8
	$L=20\text{ km}, R=300\ \Omega$	-0.249 3
	$L=70\text{ km}, R=0\ \Omega$	-0.167 8
	$L=70\text{ km}, R=300\ \Omega$	-0.168 4
	$L=140\text{ km}, R=0\ \Omega$	-0.182 5
	$L=140\text{ km}, R=300\ \Omega$	-0.182 2

由表 3 可知, 当 $m_1 m_2 > 0$ 时, 为单相接地故障。当 $m_1 m_2 < 0$ 时, 可根据 ρ_A 的大小用于识别出非故障性雷击与单相接地短路, 即根据表 3 中 ρ_A 最高达 99.97%, 最低也有 97.03%, 所以 ρ_{set} 取 96% 可区分非故障性雷击与单相接地短路。仿真结果证实了方案的可实施性与切实性。

4 结语

为实现雷击干扰识别, 本文设计了依据行波波头极性、斜率等性质的不同, 结合小波多尺度分析提取出行波低频能量分布的识别方案。仿真结果表明, 该识别方案能有效识别故障性雷击、非故障性雷击、单相接地短路故障, 具有可实施性。

参考文献

- [1] 纪思, 李天权, 杨桥伟, 等. 一种基于零序电流的输电线路行波保护雷击干扰识别方法 [J]. 电瓷避雷器, 2019(5):37-44.
- [2] 张宇辉, 吴家明, 武东斌, 等. 雷击与短路故障的分形-时域差分识别方法 [J]. 广东电力, 2016, 29(3):81-85.

表 3 非故障型性雷击与单相接地短路的识别仿真结果

类型	条件	m_1, m_2	$\rho_A / \%$
非故障性雷击	$L=5 \text{ km}, I=10 \text{ kA}$	-	77.68
	$L=10 \text{ km}, I=5 \text{ kA}$	-	70.39
	$L=10 \text{ km}, I=10 \text{ kA}$	-	70.11
	$L=20 \text{ km}, I=5 \text{ kA}$	-	60.72
	$L=20 \text{ km}, I=10 \text{ kA}$	-	60.77
	$L=70 \text{ km}, I=5 \text{ kA}$ (感应雷, 各相幅值相差 5%)	-	56.56
	$L=70 \text{ km}, I=10 \text{ kA}$	-	55.68
	$L=140 \text{ km}, I=5 \text{ kA}$ (感应雷, 各相幅值相差 10%)	-	60.79
单相短路	$L=140 \text{ km}, I=10 \text{ kA}$	-	60.61
	$L=5 \text{ km}, R=0 \Omega$	-	99.97
	$L=5 \text{ km}, R=300 \Omega$	-	99.64
	$L=10 \text{ km}, R=0 \Omega$	+	99.87
	$L=10 \text{ km}, R=300 \Omega$	+	99.55
	$L=20 \text{ km}, R=0 \Omega$	+	99.68
	$L=20 \text{ km}, R=300 \Omega$	+	99.45
	$L=70 \text{ km}, R=0 \Omega$	+	99.47
	$L=70 \text{ km}, R=300 \Omega$	+	98.88
	$L=140 \text{ km}, R=0 \Omega$	+	97.38

- [3] 刘兴茂, 林圣, 李小鹏, 等. 利用基波电流相量变化率识别行波保护中雷击干扰[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 55-61.
- [4] JAFARIAN P, SANAYE-PASAND M. A traveling-wave-based protection technique using wavelet / PCA analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 588-599.
- [5] 刘兴茂, 林圣, 何正友, 等. 基于 S 变换的新型波阻抗方向继电器[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 113-119.
- [6] 甘燕, 胡红霞. 输电线路的雷电识别研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(1): 21-25.
- [7] 朱永利, 梁泽慧, 杨慧凌, 等. 输电线行波故障定位中雷击干扰与故障的识别[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2013, 40(6): 1-6.
- [8] 杨玉坤, 陈曦, 田浩. 基于 Prony 算法的输电线路雷击干扰识别研究[J]. 陕西电力, 2010, 38(10): 14-18.
- [9] 董杏丽, 葛耀中, 董新洲. 行波保护中雷电干扰问题的对策[J]. 中国电机工程学报, 2002(9): 75-79.
- [10] 司大军, 束洪春, 陈学允, 等. 输电线路雷击的电磁暂态特征分析及其识别方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005(7): 64-69.
- [11] 刘学谷, 陈景堃. 雷电的产生原因及预防雷电灾害的相关措施探讨[J]. 农业与技术, 2016, 36(8): 217.
- [12] 钟林, 廖敏夫, 袁幸, 等. 雷电流识别与在线检测系统设计[J]. 电测与仪表, 2016, 53(6): 69-73.
- [13] 冯腾, 董新洲. 双端行波故障测距装置性能测试方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 114-120.
- [14] 付宝刚, 李红义. 基于小波包能量分布和大小变化的结构损伤识别对比分析[J]. 中国建材科技, 2020, 29(4): 90-95.