

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.01.015

基于时频域的雷电扰动识别方法

陈旭¹, 朱永利¹, 赵雪松², 郭小红¹, 赵磊¹, 高艳丰¹

(1. 华北电力大学, 河北 保定 071003; 2. 冀北电力公司检修分公司, 北京 102488)

摘要: 正确识别输电线路雷击和短路故障不仅对暂态保护具有重要意义, 且对雷电流参数收集具有显著的工程意义。笔者就输电线路雷击和短路故障识别问题, 采用小波包变换的多分辨率方法对其进行分析研究, 在移动数据窗时, 其暂态电流附加分量的能量分布有较大差别, 定义主分量所占比重 K 值, 并根据各暂态信号 K 值的差异, 利用变异系数来识别雷击和短路故障。该方法的理论比较直观、简单, 通过大量的EMTP仿真验证了该判据的正确性。

关键词: 雷击; 输电线路; 小波包; 变异系数

Identification of Lightning Strikes Based on Time-frequency Joint Analysis

CHEN Xu¹, ZHU Yongli¹, ZHAO Xuesong², GUO Xiaohong¹, ZHAO Lei¹, GAO Yanfeng¹

(1. North China Electric Power University, Hebei Baoding 071003, China;

2. Maintaining Department, Jibei Electric Power Company, Beijing 102488, China)

Abstract: It is not only important for the transient protection, but also has significant engineering meaning for the lightning current parameters collection to identify the lightning and short-circuit fault of transmission lines correctly. For the problem on identifying the lightning and short-circuit faults, this paper adopts a multi-resolution analysis of wavelet packet and finds that energy distribution of additional components of the transient currents differs when the data windows move. Defining K value as the principal component proportion, according to the differences among the K values of the different transient signals, the lightning and short-circuit fault can be identified by using the coefficient of variation of K values. The theory of the proposed method is intuitive, simple and EMTP simulations are provided its correctness.

Key words: lightning; transmission line; wavelet packet transform; variation coefficient

0 引言

随着信号处理等技术的飞速发展, 基于暂态高频量保护原理的设备受到了国内外的热切关注^[1]。这些反应故障暂态高频分量的保护原理具有动作时间快, 不受负荷、系统运行方式、过度电阻等影响的优点, 然而若在动作时间内, 暂态保护无法区分各种高频干扰就可能导致暂态保护误动作, 降低了暂态保护的可靠性。雷电冲击就是其中最常见、最严重的高频干扰^[2-6]。

为此, 学者们对输电线路的雷击故障识别进行

了大量的研究。文[2]利用非故障性雷击暂态电流行波波形的对称性, 而短路和故障性雷击波形偏向时间轴的一侧这一现象, 提出了积分判据, 实现了雷击扰动的识别。但整定值不好整定, 并且容易受变电站母线结构的影响。文[3]只针对感应雷与短路的识别, 没有对直击雷进行分析。文[4]利用非故障性雷击时, 行波信号的高低频能量的比值小, 而短路故障高低频能量比值大这一特点来识别是否发生故障。有学者指出绕击无故障(雷直接打在导线上)时, 对应电流行波能量比与故障电流能量比相近, 存在判据难以确定的问题。文[5]利用有无雷击故障时雷击前后电流变化的大小来识别非故障

收稿日期: 2016-08-10; 修回日期: 2016-11-25

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014XS74)。

Project Supported by the Fundational Research Funds for the Central Universities(2014XS74).

性雷击与故障性雷击。但文[6]指出上述判据有可能把电流行波过零时误认为雷击前后线路电流分量变化不大,从而引起拒动。进而^[6]依据非故障性雷击与故障时在 3 ms 内波形变化不同,定义“波形一致性系数”进行雷击干扰识别。但文中提的故障分量 3 ms 内波形单调缺乏理论依据。

针对上述方法存在的问题,文中根据雷击与短路时暂态电流经小波包变换其能量分布差异,定义主分量所占比重 K 值,利用 K 值的变化来识别雷击与短路。大量仿真表明该方案可以正确区分非故障性雷击、故障性雷击和短路故障。

1 小波包理论及其能量分析方法

1.1 小波包理论

给定正交尺度函数 $\phi(t)$ 和小波函数 $\Psi(t)$, 其二尺度关系^[7]为

$$\begin{aligned}\phi(t) &= \sqrt{2} \sum_k h_{0k} \phi(2t-k); \\ \Psi(t) &= \sqrt{2} \sum_k h_{1k} \phi(2t-k).\end{aligned}\quad (1)$$

式(1)中, h_{0k}, h_{1k} 是多分辨率分析中的滤波器系数。

为了进一步推广二尺度方程,定义下列的递推公式

$$\begin{aligned}w_{2n}(t) &= \sqrt{2} \sum_{k \in Z} h_{0k} w_n(2t-k); \\ w_{2n+1}(t) &= \sqrt{2} \sum_{k \in Z} h_{1k} w_n(2t-k).\end{aligned}\quad (2)$$

当 $n=0$ 时, $w_0(t)=\phi(t)$, $w_1=\Psi(t)$ 。以上定义的函数集合 $\{w_n(t)\}_{n \in Z}$ 为由 $w_0(t)=\phi(t)$ 所确定的小波包, 由此, 小波包 $\{w_n(t)\}_{n \in Z}$ 是包括尺度函数 $w_0(t)$ 和小波母函数 $w_1(t)$ 在内的一个具有一定联系的函数的集合。

对于离散小波包分解,其小波包系数递归式见式(3)^[8]。

$$\begin{cases} d_{i,2j}(t) = \sqrt{2} \sum_k g(k) d_{i-1,j}(2t-k) \\ d_{i,2j-1}(t) = \sqrt{2} \sum_k h(k) d_{i-1,j}(2t-k) \\ d_{00} = x(t) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: $h(k)$ 为高通滤波器; $g(k)$ 为低通滤波器; $x(t)$ 为被测信号; $d_{i,j}(k)$ 为小波包分解第 i 层上的第 j 个节点的小波包重构信号。

小波包分析不仅对信号的低频部分进行了分解,而且对高频部分也同样进行了分解,使频带的划分更为精细。

1.2 基于小波包的能量分析方法

设信号 $x(t)$ 的小波包某层各节点重构信号为 $d_{i,j}(k)$ ($k=1,2,\dots,N; 1 \leq i \leq N; j=1,\dots,2i$)。在小波包各节点重构信号上定义一个滑动数据窗,设窗宽 $w \in N$,滑动因子 $\sigma \in N$,则滑动数据窗可表示为

$$w(m, w, \delta) = \{d_{i,j}(k), k=1+m\delta, \dots, w+m\delta\}。 \quad (4)$$

式(4)中: $m=1,2,\dots,(N-w)/\sigma$; m 为滑动数据窗滑动次数; N 为被测信号原始数据长度。

$E(m) = \sum_{j=1}^J E_m(j)$ 为信号 $x(t)$ 在以 $(m\sigma+w/2)$ 时刻为中心的窗内(窗宽为 $w \in N$) 重构信号的能量之和。其中: $E_m(j) = \sum_{k=1+m\delta}^{w+m\delta} [d_{i,j}(k)]^2$ 。

设 $Z(m)$ 为第 i 层分解下的能量最大者,称为主分量,即 $Z(m) = \max[E_m(j)]$ 。定义主分量所占比重 K 为

$$K(m) = Z(m)/E(m)。 \quad (5)$$

2 电磁暂态仿真概述

文中基于电磁暂态仿真软件 ATP-EMTP 建立 500 kV 双电源单回路系统,见图 1。输电线路采用 JMARTI 频率特性架空线,全长 120 km,导线型号为 4LGJ-400/35,分裂间距 450 mm,导线水平排列;全线架设两回 JLB4-150 避雷线;杆塔采用多波阻抗模型,接地电阻采用冲击电阻^[9]; M, N 侧系统参数分别为 $L_{m1}=90.1$ mH, $L_{n0}=83.7$ mH, $R_{m1}=R_{n0}=0$ Ω , $R_{n1}=6.4345$ Ω , $L_{n1}=99.8$ mH, $R_{n0}=1.60024$ Ω , $L_{n0}=89.4$ mH;避雷器型号采用 Y20W-420/995,用 IEEE 金属氧化物避雷器模型^[10];阻波器型号^[11]采用 XZF-3150,阻塞频带为 48~500 kHz。母线杂散电容为 0.05 μ F;仿真中雷电流采用 Heiler 模型^[12],表达式为

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \times \frac{(t/\tau_1)^n}{1+(t/\tau_1)^n} e^{-t/\tau_2}; \quad (6)$$

$$\eta = e^{-\frac{\tau_1}{\tau_2} \left(\frac{n \tau_2}{\tau_1} \right)^{1/n}}。 \quad (7)$$

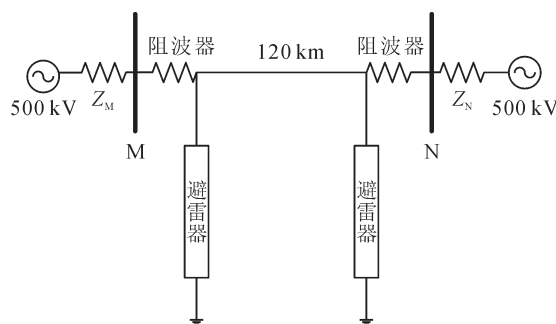


图 1 500 kV 输电系统模型

Fig. 1 500 kV transmission line model

式(6)-(7)中: I_0 为通道头部电流幅值; τ_1 为前沿时间常数; τ_2 为延迟时间常数; η 为幅值校正因子; n 为常数,值域[2, 10];雷电波阻抗为 $400\ \Omega$ 。绝缘子采用相交法来判断是否闪络。

根据雷电过电压形成过程可分为^[13]感应雷和直击雷。感应雷过电压一般不超过 500 kV ,对 35 kV 及以下水泥杆线路会引起一定的闪络事故;对 110 kV 及以上的线路,由于绝缘水平较高,所以一般不会引起闪络事故。文中感应雷采用PA3EBИГ模型的简化模型^[14],并把感应雷归类为非故障性雷击。雷直击于有避雷线线路的情况可分为3种,即:雷击杆塔塔顶(这里简称“反击”)、雷击避雷线档距中间(因为在杆塔设计时经过了验证不会发生雷击故障,故把它分到“反击无故障”里)和雷绕过避雷线击于导线(简称“绕击”)。研究表明,对于带避雷线的输电线路,只有雷电流幅值小于一定值时,雷电才有可能绕击于导线上,并且可以认为在避雷线有效屏蔽情况下^[14, 15],绕击雷仅造成单相闪络故障,故笔者只对绕击引起单相短路故障情况进行分析。

3 识别原理及识别算法

3.1 识别原理

对图1系统进行非故障性雷击、故障性雷击和短路故障仿真模拟,考虑到电流互感器能有效地传输高频分量,采用电流行波进行雷击识别。在母线侧提取电流,采样频率为 1 MHz ,由于输电线路各相之间存在电磁耦合,采用文[16]中的相模变换,变换矩阵见式(8)。

$$S^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & -3 \\ 1 & -3 & 2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

对故障电流附加分量进行解耦变换并取第一个线模分量进行分析。各种故障下暂态电流分量的线模分量见图2。

考虑到雷击频率的复杂性^[4, 17],采用db4小波对其线模分量进行6层小波包分解,取第6层全部小波包节点进行分析,分析的频率范围为 $0\sim 500\text{ kHz}$,每个小波包节点的频段范围大小为 15.625 kHz 。雷击是高频暂态行波,频率范围为 $10\text{ kHz}\sim 3\text{ MHz}$ ^[18],其能量不集中,在各频段内分量不固定。而短路暂态电流附加分量是由故障点的附加工频电压源产生的,对其离散傅里叶变换见图3。由图3可看出,其频率范围主要集中在 10 kHz 以下,高频分量占的比例比较小,故能量主要集中于第一个小波包节点的频段里。取 $50\ \mu\text{s}$ 数据窗对图2的非故障性雷击

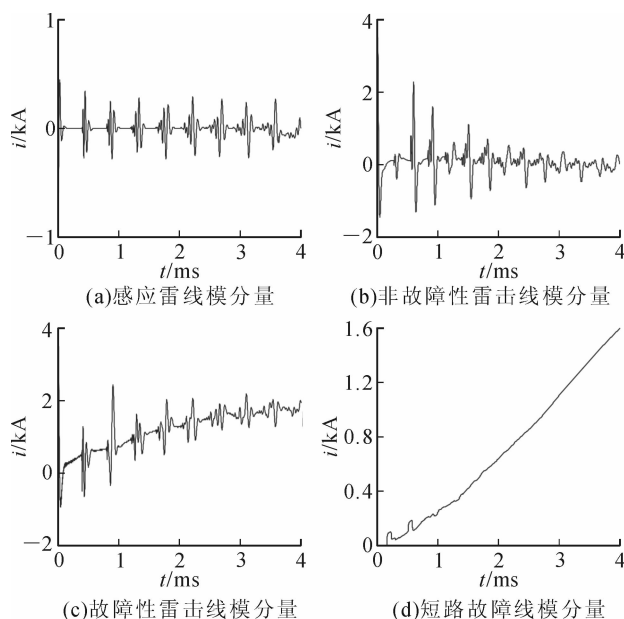


图2 各暂态电流线模分量

Fig. 2 The transient current line mode component

和短路故障进行分析,其在不同的数据窗内主分量所在频段和 K 值见表1。

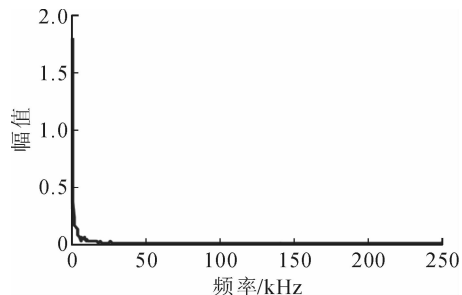


图3 短路故障电流线模分量频谱

Fig. 3 Spectrum for the line-mode components of the short-circuit fault current

表1 各暂态电流能量最大者所在的频段与 K 值
Table 1 The band with K of transient current where the maximum energy value

时间窗/ms	非故障性雷击		短路故障	
	主频段/kHz	K 值	主频段/kHz	K 值
0.005~0.054	46.875~62.500	0.52	0~15.625	0.95
2.000~2.049	31.250~46.875	0.39	0~15.625	1.00
2.800~2.849	15.625~31.250	0.67	0~15.625	1.00
3.300~3.349	15.625~31.250	0.72	0~15.625	1.00

由表1可知,对于非故障性雷击,能量分布不集中,随着数据窗的移动,其主分量所在的频段不固定, K 值也不确定;对于短路故障,不论数据窗移动的位置,其能量主要集中在第一个频率段内,且 K 值在 0.95 以上。考虑短路故障刚开始时高频分量也较大,故取故障元件启动 $50\ \mu\text{s}$ 后的 4 ms 数据,设

数据窗滑动因子 $\delta=1 \mu\text{s}$, 随着数据窗的移动, 对于感应雷、非故障性雷击、故障性雷击和短路故障的 K 值变化见图 4。

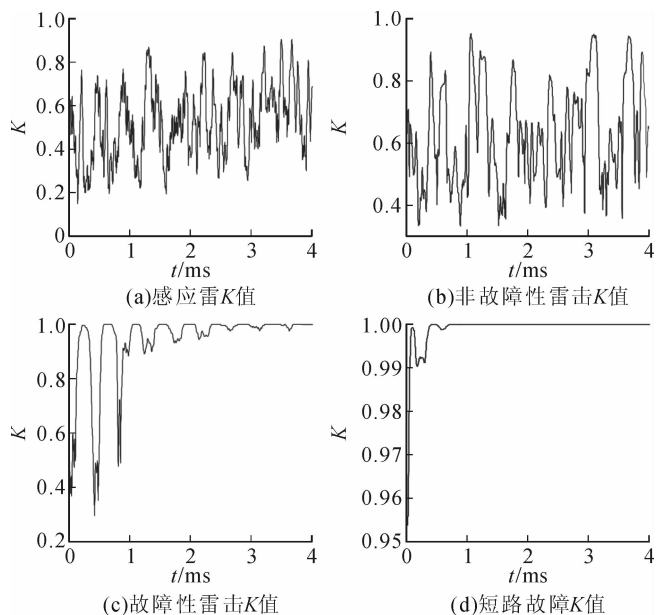


图 4 各暂态电流 K 值曲线

Fig. 4 The transient current K value curve

从图 4 可以看出: 非故障性雷击(包括感应雷) K 值变化毫无规律, 变化幅度比较大; 故障性雷击, 在开始一段时间内, K 值变化毫无规律, 变化幅度比较大, 呈现雷击特性, 由于雷击属于高频暂态分量, 衰减速度比较快, 故在后续时段内 K 值在 1 附近波动, 波动范围不大, 呈现短路特性; 对于短路故障, 开始时间段内, K 值有一段上升的过程, 这是由于短路开始时也有高频分量, 但占的比重比较小, 随着时间的推移, 高频逐渐衰减, K 值取向于 1, 但整体分布都在 0.95 以上。仿真与前面的理论分析相一致, 为了统计其 K 值的差别, 引用统计学中变异系数

$$\text{变异系数}(C) = \frac{\text{标准偏差}(SD)}{\text{平均值}(MN)} \quad (9)$$

$$\text{式(9)中: } SD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N \left[K(j) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K(i) \right]^2}; MN =$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K(i); N \text{ 为 } K \text{ 的总数目。}$$

对于雷击无故障, SD 比较大而 MN 较小, 故变异系数 C 比较大; 对于短路故障, SD 比较小而 MN 比较大, 故变异系数 C 比较小。考虑到雷击故障时, 开始一段时间内呈现雷击特性, 随着时间的推移, 逐渐呈现出短路特性, 故可取前 1 ms 时间的 K 值的变异系数 C_1 来识别雷击, 采用后 2 ms 时间段 K 值的变异系数 C_2 来识别短路。为了提高算法速度, 可忽略中间时长 1 ms 的数据。

3.2 识别步骤

根据以上的分析, 将识别步骤归纳如下:

1) 故障元件启动 $50 \mu\text{s}$ 后读取 4 ms 数据计算线模分量, 对其进行 6 层小波包分解并重构小波包系数;

2) 建立一个滑动数据窗, 窗宽为 $50 \mu\text{s}$, 滑动步长为 $1 \mu\text{s}$;

3) 根据式(5)求取 K 值;

4) 将滑动数据窗以步长 $1 \mu\text{s}$ 沿时间轴移动得到新的数据, 重复步骤 3);

5) 分别计算 K 值前 1 ms 和后 2 ms 的变异系数 C_1, C_2 ;

6) 如果 $C_1 > KS_1 \times K_0$ (K_0 根据后面的仿真可取 0.05, KS_1 为可靠系数), 且 $C_2 > (KS_2 \times K_1)$ (K_1 根据后面的仿真可取 0.05, KS_2 为可靠系数) 则判断为非故障性雷击; 如果 $C_1 > (KS_1 \times K_0)$, 且 $C_2 < (KS_2 \times K_1)$ 判断为故障性雷击; 如果 $C_1 < (KS_1 \times K_0)$, 且 $C_2 < (KS_2 \times K_1)$ 时, 判断为短路故障。

4 仿真模型验证

采用文中 3 节的条件搭建模型, 对不同故障条件进行仿真, 部分仿真结果见表 2。从表 2 中可以看出, 非故障性雷击时, 在不同的条件下, C_1 和 C_2 都比较大, 都在 0.1 之上; 故障性雷击时, 在不同的条件下, C_1 比较大, 也在 0.1 之上, 而 C_2 比较小, 在 0.01 之下; 短路故障时, C_1 和 C_2 都比较小, 都在 0.01 之下, 对于 C_2 更小, 因为高频分量基本衰减完, 故 C_2 基本接近于 0。由表 2 可知, 该方法不受故障类型、故障距离、过渡电阻等影响, 均能正确的识别非故障性雷击、故障性雷击和短路故障。以上只是列出部分仿真结果, 通过大量仿真, 综合考虑这 3 种暂态类型, 采用 C_1 为 0.05 和 C_2 为 0.05, 能正确识别出非故障性雷击、故障性雷击和短路故障(表 2 中的 I_0 为雷电流幅值, θ 为故障初始角, da 代表 a 相闪络故障或短路, dabw 代表 a、b 相相间短路, dac 代表 a、c 相接地短路, dabc 代表三相短路)。

5 其他条件的影响

当雷击过电压时, 若导线上的冲击电压超过起始电晕电压, 则导线上将发生冲击电晕。出现电晕后, 由于电晕圈的存在使导线的径向尺寸等值地增大了, 相当于增大了导线的对地电容和电导, 使电流行波发生畸变和衰减^[13]。由于冲击电晕的复杂性, 真正用仿真软件模拟非常困难, 故文中没有考虑冲击电晕。由于冲击电晕的存在, 雷击暂态波形会发生畸变, 但能量仍不集中, 在各频段的分量也不固

表2 识别雷击与故障的部分仿真实验结果

Table 2 Some simulation results to identify lightning and fault

故障类型	条件		C_1	C_2		
雷击无故障	感应雷	$I_0=100\text{ kA}$	60 km	0.344 8	0.260 7	
		$2.6/50\text{ }\mu\text{s}$ ($I_0=40\text{ kA}$)	60 km	0.471 4	0.229 6	
		$1.2/40\text{ }\mu\text{s}$ ($I_0=50\text{ kA}$)	40 km	0.547 4	0.247 3	
	反击	$4/100\text{ }\mu\text{s}$ ($I_0=70\text{ kA}$)	20 km	0.379 7	0.199 8	
		$2.6/50\text{ }\mu\text{s}$ ($I_0=20\text{ kA}$)	60 km	0.269 7	0.267 3	
		$1.2/40\text{ }\mu\text{s}$ ($I_0=8\text{ kA}$)	40 km	0.249 5	0.231 5	
	绕击	$4/100\text{ }\mu\text{s}$ ($I_0=13\text{ kA}$)	20 km	0.305 5	0.228 3	
		$2.6/50\text{ }\mu\text{s}$ ($I_0=140\text{ kA}$) (dc)	20 km	0.225 4	0.003 8	
		反击	$1.2/40\text{ }\mu\text{s}$ ($I_0=154\text{ kA}$) (dbc)	40 km	0.210 3	0.000 2
$4/100\text{ }\mu\text{s}$ ($I_0=220\text{ kA}$) (dabc)	60 km		0.164 0	0.004 0		
雷击故障	绕击		$2.6/50\text{ }\mu\text{s}$ ($I_0=25\text{ kA}$) (da)	40 km	0.304 6	0.001 8
		$1.2/40\text{ }\mu\text{s}$ ($I_0=27\text{ kA}$) (db)	60 km	0.225 9	0.000 6	
		$4/100\text{ }\mu\text{s}$ ($I_0=30\text{ kA}$) (dc)	20 km	0.331 2	0.001 0	
	短路故障	da	$R=0\text{ }\Omega$ $\theta=60^\circ$	60 km	0.001 1	0.000 0
		dac	$R=300\text{ }\Omega$ $\theta=90^\circ$	60 km	0.005 8	0.000 2
		dabw	$R=0\text{ }\Omega$ $\theta=60^\circ$	40 km	0.002 8	0.000 0
		dabc	$R=300\text{ }\Omega$ $\theta=90^\circ$	40 km	0.006 7	0.000 9

定,故其 K 值波形仍是毫无规律的,对文中的判据影响比较小。冲击电晕使行波发生衰减,由于雷击是高频分量,衰减更加快速;故障性雷击,高频的快速衰减,使得进入短路特性更快速,故 C_2 更加灵敏的识别短路特性,由于 C_1 取得时间段比较短,基本上没有影响;对于雷击无故障来说, C_2 值可能变的小一点,但雷击和短路相比, C_2 差别还是比较大的,因此一样可以识别(或者稍微改动一下阈值即可)。

雷击输电线路杆塔时导线上会有感应过电压,文中没考虑。这是因为感应过电压会使绝缘子串闪络前电流行波的幅值略有增加^[9],但总体上对波形影响不大,所以对文中的判据影响不大。

在实际中,对于 C_1 与 C_2 也有可能出现第4种情况: $C_1 < (KS_1 \times K_0)$, 且 $C_2 > (KS_2 \times K_1)$, 这种情形可能是先发生短路故障之后又遭受雷击事故,但这种情形发生的概率比较小。若发生了,则可判断为短路故障,同时启动雷电收集系统。

6 结语

实现雷击与短路故障的正确识别不仅对暂态保护具有重要意义,而且对雷电流参数收集具有显著的工程意义。文中根据分析和仿真表明:雷击和短路暂态行波经小波包分解之后,在移动数据窗时,其暂态电流附加分量的能量分布有较大差别,定义主分量所占比重 K 值,可以得出输电线路雷击时 K 值变化幅度比较大;而短路故障时 K 值基本上

在1附近变化。根据其 K 值的差异,提出利用变异系数对雷击和短路故障进行识别。大量仿真结果表明,该判据基本不受故障相角、过渡电阻、距离和雷电波形等影响,能有效地识别非故障性雷击、故障性雷击和短路故障。该原理简单明了,识别判据准确,易于工程使用。

参考文献:

- [1] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 第2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 256-333.
GE Yaosheng. Principle and technology of new protective relay and fault location[M]. 2nd ed.. Xi'an: Xi'an Jiaotong University press, 2007: 256-33.
- [2] 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.
ZHOU 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.
- [3] 李海锋, 王钢, 赵建仓. 输电线路感应雷击暂态特征分析及其识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 114-119.
LI Haifeng, WANG Gang, ZHAO Jiancang. Study on characteristics and identification of transients on transmission lines caused by indirect lightning stroke[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 114-119.
- [4] 王钢, 李海锋, 赵建仓, 等. 基于小波多尺度分析的输

- 电线路直击雷暂态识别[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 139-144.
- WANG Gang, LI Haifeng, ZHAO Jiancang, et al. Identification of transients on transmission lines caused by direct lightning strokes based on multiresolution signal decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 139-144.
- [5] 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, 22(9): 74-78.
- DONG Xingli, GE Yaozhong, DONG Xinzhou. Effect of lightning on protection based on travelling waves[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 74-78.
- [6] 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, 25(7): 64-69.
- SI Dajun, SHU Hongchun, HEN Xueyun, et al. Study on characteristics and identification of transients on transmission lines caused by lightning stroke[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 64-69.
- [7] 飞思科技产品研发中心. 小波分析理论与 MATLAB7 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 110-117.
- Product Research and Development Center of Fly Technology. The wavelet analysis theory and MATLAB 7 realize [M]. Beijing: Publishing House of Electronics, 2005: 110-117.
- [8] 陈继开, 李浩昱, 杨世彦, 等. Tsallis 小波包奇异熵与功率谱分析在电力谐波检测的应用[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 193-199.
- CHEN Jikai, LI Haoyu, YANG Shiyan, et al. Identification of transients on transmission lines caused by direct lightning strokes based on multiresolution signal decomposition [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 193-199.
- [9] 李景禄. 实用电力接地技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 53-60.
- LI Jinglu. Practical power grounding technology. Beijing: China Electric Power Press, 2002: 53-60.
- [10] IEEE Working Group 3.4.11. Surge protective devices committee. Modeling of metal oxide surge arrester[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1992, 7(1): 302-309.
- [11] 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.
- [12] CIGRE. Guide to procedure for estimating the lightning performance of transmission lines: CIGRE Brochure 63[R]. France: CIGRE, 1991.
- [13] 周泽存. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 265-275.
- ZHOU Zecun. High voltage technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007: 265-275.
- [14] 詹花茂. 输电线路特高杆塔雷电过电压的理论与试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2002.
- ZHAN Huamao. The theory and experiment research on Lightning overvoltage of ultra-high transmission tower[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2002.
- [15] 姚陈果, 王琪, 吴昊, 等. 基于故障选相及时域、频域分析的输电线路直击雷识别方法及其应用[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1298-1305.
- YAO Chenguo, WANG Qi, WU Hao, et al. Direct lightning identification method and its application based on fault phase selection and time/frequency domain analysis[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5): 1298-1305.
- [16] 宋国兵, 李森, 康小宁, 等. 一种新相模变换矩阵[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 57-60.
- SONG Guobing, LI Sen, KANG Xiaoning, et al. A novel phase-mode transformation matrix[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 57-60.
- [17] 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, 26(23): 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, 26(23): 7-13.
- [18] 吴文辉, 曹祥麟. 电力系统电磁暂态计算与 EMTP 应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012: 5-6.
- WU Wenhui, CAO Xianglin. Electromagnetic transient calculation and EMTP application of power system[M]. Beijing: China water & Power Press, 2012: 5-6.
- [19] 杜林, 戴斌, 司马文霞, 等. 架空输电线路雷电过电压识别[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 590-597.
- DU Lin, DAI Bin, SIMA Wenxia, et al. Lightning overvoltage identification in overhead power transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(3): 590-597.
- 陈旭(1989—), 男, 硕士, 主要研究方向为输电线路故障诊断。