

雷击对行波故障测距的影响及识别

郭宁明, 覃 剑, 陈祥训

(中国电力科学研究院, 北京市 100085)

摘要: 雷击是影响行波测距装置精度的主要因素之一, 雷击故障的识别是解决输电线路雷击干扰的基础。通过对雷击故障和短路故障电流行波的暂态特性分析可知, 雷击故障电流具有以下特点: 雷击故障电流具有更大的陡度; 非故障相的电流行波也具有更大的暂态能量。据此, 提出利用小波变换提取故障电流陡度和利用相电流行波暂态能量进行雷击故障识别的新方法, 以及相应的识别判据。EMTDC 仿真及实例验证证明了文中所述雷击识别方法的正确性。

关键词: 行波测距; 小波变换; 暂态特性; 雷击

中图分类号: TM726.3; TM773

0 引言

架空输电线路距离长、跨度大、分布面积广, 雷击事件时有发生。国内外运行经验表明: 线路绝缘闪络的主要原因是操作过电压和雷击闪络, 而这 2 种原因导致的故障中, 雷击闪络占 60%~70%, 即雷害是线路故障的主要原因^[1]。

行波故障测距是利用了故障产生的暂态行波信号, 在对其进行分析和计算的基础上产生的。由于其测距精度较高, 得到了广泛的应用。在雷击故障情况下, 线路上存在多个行波源, 产生了暂态特征不同的几种行波, 这就影响了行波故障测距的精度^[2]。为解决雷击对行波测距法精度的影响, 应首先实现对雷击导致故障和普通短路故障的区分别别。

目前的雷击识别方法主要基于 2 个方面: 雷击故障电流高频分量比例较大^[3-5]和幅值较大^[6], 主要应用于暂态保护中的非故障性雷击识别。短路故障情况下, 非线性弧光电路同样产生了大量的高频分量, 同时也存在出现大幅值故障电流的可能。因此, 在输电线路发生故障情况下, 直接采用非故障雷击识别方法是不合适的。

本文针对行波故障测距中的雷击故障识别问题, 提出了利用小波变换模极大值和非故障相电流小波系数能量实现雷击导致故障和普通短路故障的识别新方法, 并利用现场采集的实际数据进行了验证。

1 输电线路雷击对行波测距的影响

雷击导致故障情况下, 电流行波在传输特性上

与短路故障电流行波相似, 仅仅是行波的幅值、陡度等不同。由于雷击电流幅值差异很大, 会出现 2 种情况^[2]: ①当雷击电流较大时, 在雷击点发生闪络故障; ②当雷击电流较小时, 雷电流在雷击点没有造成闪络, 雷电波沿输电线路传输一段距离后, 在绝缘薄弱处导致闪络。

影响行波故障测距精度的主要是第 2 种情况。当雷击幅值较大时, 雷击点与闪络点位置基本上相同, 因此, 影响行波故障测距装置精度的雷击主要为幅值较小的绕击雷。

2 雷击故障识别理论研究及仿真实例

2.1 故障电流暂态过程的 PSCAD/EMTDC 仿真

在 PSCAD/EMTDC 仿真中系统电压等级为 500 kV, 输电线路模型为频率相关模型^[7], 采样频率为 400 kHz (EMTDC 仿真的系统模型详见附录 A)。从工程实际出发, 本文只分析电流量的暂态特性。在 EMTDC 仿真中利用可控电流源对雷击进行仿真, 控制电流源的函数为下式所示的标准双指数函数^[8]:

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

式中: I_{Lmax} 为雷电流最大值, 雷击仿真中, I_{Lmax} 为 15 kA; α, β 为衰减系数, $\alpha = 1/\tau_2, \beta = 1/\tau_1, \tau_1, \tau_2$ 分别为波头和波尾时间。

影响故障电流行波暂态特性的主要因素有雷电流波形、故障类型、短路过渡电阻等。本文主要研究雷击点与短路点位置不同时的单相故障及两相(相间)故障, 雷击导致三相故障多为幅值较大的反击雷, 因此, 雷击点与短路点位置基本相同。雷击故障过渡电阻均为 10 Ω , 短路故障初相角均为 45°。仿真波形如图 1 所示。

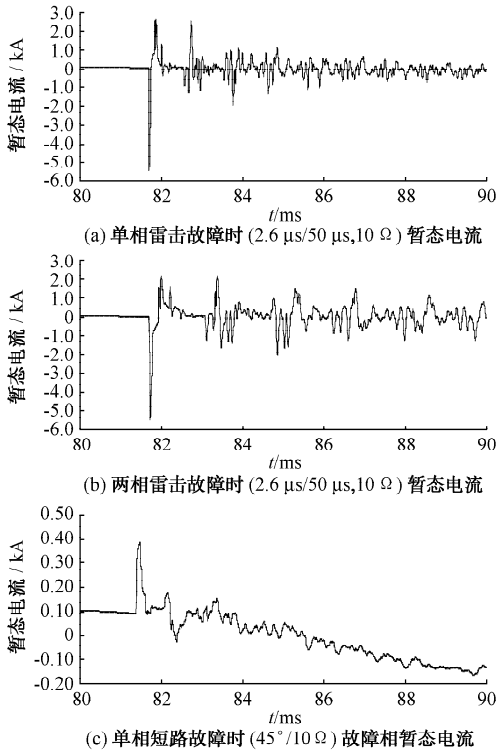


图1 不同故障条件下的暂态电流波形

Fig.1 Waveforms of transient current in various faults

2.2 小波的选择

在利用小波变换对信号进行分析时,必须根据被分析信号的特点选择合适的小波^[9-10]。本文分析雷击故障电流暂态特性时,选择小波基于以下2点:①小波应具有线性相位;②小波是某一平滑函数的一阶导数^[9]。在文献[11-12]中构造了一种满足以上要求的平滑函数导数型小波,即基数B样条导数小波(简称Bd小波),该小波可以通过改变参数(m, ρ)灵活地调节分析尺度。

2.3 利用小波变换模极大值识别雷电波

如图1所示,对比短路故障的故障电流,雷击故障情况下的故障电流具有幅值和陡度较大的特点。在防雷设计中,推荐的雷电流平均陡度为 $\bar{a} = I/2.6$, I 为雷电流幅值。在雷击故障识别中,更有参考价值的是雷电流波头部分的陡度,此时波头部分的陡度为^[8]:

$$i = \frac{1}{2}I(1 - \cos \omega t) \quad (2)$$

式中: $\omega = \pi/2.6$,最大陡度出现在 $t = 1.3 \mu\text{s}$ 时。

当 $I = 15 \text{ kA}$, $i_{\text{max}} = 7500 \text{ A}/\mu\text{s}$,短路故障电流的陡度如下:

$$\frac{di}{dt} = \omega I_m \cos(\omega t + \varphi_0) = \frac{\omega U}{Z_x + Z} \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (3)$$

式中: Z_x 为过渡电阻; Z 为特性阻抗; φ_0 为故障初

相角。

500 kV系统中, $Z = 250 \Omega$, $Z_x = 10 \Omega$, $\cos(\omega t + \varphi_0) = 1$ 时,最大陡度 $\left. \frac{di}{dt} \right|_{\text{max}} \approx 853.85 \text{ A}/\mu\text{s}$ 。

由上述分析可知,雷击故障电流具有较大的陡度且主要受雷电参数的影响;短路故障电流行波的陡度较小且主要受过渡电阻影响。

当把雷击故障电流视为函数 $f(t)$ 时,小波基函数为 $\theta(t)$,在变换尺度 a 、位置 t 处的小波变换表达式^[13-15]为:

$$W_a(f(t)) = f * \left(a \frac{d\theta_a}{dt} \right) (t) = a \frac{d}{dt} (f * \theta_a) (t) \quad (4)$$

由式(4)可知, $W_a(f(t))$ 是函数 $f(t)$ 在尺度 a 下由 $\theta(t)$ 平滑后再取一阶导数,即信号小波变换模极大值对应于信号的突变点,且小波变换模极大值的幅值对应于导数极大值(即陡度最大值)。因此,通过对暂态电流的模极大值幅值比较可以实现对雷击故障的识别。仿真结果如表1所示。

表1 不同故障情况下的暂态电流小波变换模极大值
Table 1 Wavelet modulus maxima of transient current under different fault conditions

故障类型	模极大值			
	雷击故障条件		短路故障条件	
	1.2 μs/40 μs	2.6 μs/50 μs	4 μs/80 μs	45°/10 Ω
单相	408.49	423.70	446.48	17.074
两相	408.47	423.69	446.52	15.604

注:45°代表故障电压初相角;10 Ω代表过渡电阻。

2.4 利用相电流暂态能量识别雷击故障

普通短路故障情况下,非故障相上会出现暂态过电压,此时过电压主要由电磁耦合产生的电磁感应分量构成。在输电线路发生故障性直击雷时,由于主放电通道所产生的磁场迅速变换,在未遭受雷击导线上也感应出与雷电流极性相反的过电压。因此,雷击故障情况下暂态过电压包括静电感应和电磁感应2个分量^[8]。

在雷击故障情况下,未遭雷击相的暂态过电压与短路故障情况下非故障相暂态过电压相比较,相应暂态电流的幅值也较大。由此可知,雷击导致故障情况下非故障相电流的暂态能量也较大,同时故障相电流的暂态能量主要受雷电波长影响。利用暂态信号的能量分布对暂态信号分类识别已证明是有效且可靠的^[16-17]。因此,可以利用各相电流故障时刻后一段时间内的暂态能量进行雷击识别,仿真中该时间定为0.5 ms。

根据Parseval原理,小波变换的能量与原始信号的能量之间存在对应关系^[13-14],小波能量谱中可

以提取小波系数的平方和作为能量的标志,即

$$E = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} |a(k)|^2 + \sum_{k=-\infty}^{+\infty} |d(k)|^2 \quad (5)$$

由表2、表3可知,雷击故障情况下的各相电流暂态能量幅值远大于普通短路故障情况下相应幅值,尤其是非故障相电流暂态能量变化更为明显,仿真结果证明了以上分析。仿真结果如表2、表3所示。

表2 不同故障情况下电流暂态能量(雷击)

Table 2 Transient energy of current under different fault conditions (lighting strike)

故障类型	故障相	电流暂态能量		
		1.2 μ s/40 μ s	2.6 μ s/50 μ s	4 μ s/80 μ s
单相故障	A相	347.69*	377.99*	426.23*
	B相	223.40	256.17	321.17
	C相	102.86	109.33	118.69
两相故障	A相	324.75*	368.71*	458.15*
	B相	104.78*	111.27*	120.74*
	C相	86.51	97.05	115.41

注:表中*号表示故障相。

表3 不同故障情况下电流暂态能量(短路)

Table 3 Transient energy of current under different fault conditions (phase to earth)

故障类型	故障相	电流暂态能量	故障类型	故障相	电流暂态能量
单相故障	A相	11.184*	两相故障	A相	7.853*
	B相	2.895		B相	11.112*
	C相	0.881		C相	0.426

注:故障条件为 $45^\circ/10 \Omega$; *号表示故障相。

3 雷击识别判据

3.1 小波变换模极大值识别判据

故障电流的小波变化模极大值是由其陡度决定的,不受幅值影响,在采用同样小波及其尺度分析的基础上,可以直接采用故障电流模极大值的幅值作为判据。设故障发生后故障电流的小波变换模极大值最大值为 K_d ,门槛值为 K_{min} ,当 $K_d > K_{min}$ 时,认为输电线路发生雷击故障;当 $K_d < K_{min}$ 时,认为输电线路发生普通短路故障。结合实际故障分析数据(详细数据参见附录B),初步设定门槛值 $K_{min} = 150$ 。在实际计算中,更精确的识别判据可以通过对实际线路情况进行仿真计算获得。

利用小波变换识别雷击故障不受幅值影响,只决定于故障电流陡度的瞬时值,能有效地识别雷击故障;由于基于瞬时值容易受一些高频信号干扰影响,某些短路故障电流的小波变换模极大值也可能出现较大的幅值。因此,将小波变换模极大值作为雷击识别的主要判据,同时利用暂态能量判据予以补充。

3.2 相电流暂态能量识别判据

设故障发生后(0.5 ms内)三相电流暂态能量中最大值为 E_a ,三相电流暂态能量最小值为 E_d 。由于实际故障数据幅值变化范围很大,因此识别判据分为以下2步,初步判断时直接采用幅值判据,同时,避免过小的幅值影响到利用相对值判断。

1)直接利用相电流暂态能量幅值进行判断,设定门槛值 E_{min} ,当 $E_d > E_{min}$ 时,初步认为输电线路发生雷击故障,需要进一步采用相对值进行判断;当 $E_d < E_{min}$ 时,认为输电线路发生普通短路故障。结合实际故障分析数据,初步设定门槛值 $E_{min} = 150$ 。

2)利用故障相与非故障相能量之比进行判断,设定门槛值 P_{max} ,当 $P = E_a/E_d > P_{max}$ 时,认为雷击; $P = E_a/E_d < P_{max}$ 时,认为输电线路发生普通短路故障。结合实际故障分析数据,初步设定门槛值 $P_{max} = 15$ 。

利用相电流暂态能量识别雷击故障主要与故障电流一段时间内的幅值相关,避免了由于高频干扰信号导致的误判,但受电流幅值影响较大,因此,适合作为小波变换模极大值识别判据的辅助判据。

4 结语

随着行波故障测距的广泛应用,雷电波作为影响行波故障精度的一个主要因素,逐渐得到关注。与普通短路故障电流相比,雷击故障电流陡度较大,并且非故障相相对受影响较大,从而拥有较大的暂态能量。本文在上述2点基础上,提出利用小波变换模极大值和暂态电流能量进行雷击故障识别。EMTDC仿真及实例验证证明所提出的识别方法可实现对雷击故障的识别。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 易辉,崔江流.我国输电线路运行现状及防雷保护.高电压技术,2001,27(6):44-50.
YI Hui, CUI Jiangliu. The present state and lightning protection of transmission line in China. High Voltage Engineering, 2001, 27(6): 44-50.
- [2] 覃剑.影响输电线路行波故障测距方法的主要因素分析.电网技术,2007,31(2):28-35.
QIN Jian. Analysis of the main influence factors for transmission line fault location methods based on traveling wave. Power System Technology, 2007, 31(2): 28-35.
- [3] 段建东,张保会,郝治国,等.超高压线路暂态保护中雷电干扰与短路故障的识别.电力系统自动化,2004,28(18):30-35.
DUAN Jiandong, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, et al. Identification of lightning and fault in EHV transmission line

- transient-based protection. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(18): 30-35.
- [4] 王钢,李海锋,赵建仑,等.基于小波多尺度分析的输电线路直击雷暂态识别.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. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 139-144.
- [5] DIPANKAR C, KISHORE N K, AVINASH K S, et al. A wavelet multiresolution-based analysis for location of the point of strike of a lightning overvoltage on a transmission line. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(4): 1727-1733.
- [6] 董杏丽,葛耀中,董新洲.行波保护中雷电干扰问题的对策.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 traveling waves. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 74-78.
- [7] 能源部东北电力设计院.电力工程高压输电线路设计手册.北京:水利电力出版社,1991.
- [8] 林福昌.高电压工程.北京:中国电力出版社,2006.
- [9] 陈祥训.对几个小波基本概念的理解.电力系统自动化 2004, 28(1):1-6.
CHEN Xiangxun. Some basic concepts of wavelets. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(1): 1-6.
- [10] 何正友,钱清泉.电力系统暂态信号分析中小波基的选择原则.电力系统自动化,2003,27(10):45-48.
HE Zhengyou, QIAN Qingquan. Mother wavelet option method in transient signal analysis of power systems. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 45-48.
- [11] 陈祥训. Bd 小波的滤波参数与小波变换快速算法.电网技术, 1999,23(8):44-46.
CHEN Xiangxun. Fast algorithms of filters coefficients and wavelet transform for Bd wavelets. Power System Technology, 1999, 23(8): 44-46.
- [12] 陈祥训.一类样条函数导数型小波.中国电机工程学报,1999, 19(8):76-79.
CHEN Xiangxun. A new class of derivative wavelets based on cardinal B-spline. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(8): 76-79.
- [13] 彭玉华.小波变换与工程应用.北京:机械工业出版社,1999.
- [14] MALLAT S.信号处理的小波导引.2版.杨力华,戴道清,黄文良,等译.北京:机械工业出版社,2002.
- [15] MALLAT S, HWANG W L. Singularity detection and processing with wavelets. IEEE Trans on Information Theory, 1992, 38(2): 617-643.
- [16] 李海锋,王钢,李晓华.基于暂态电流谱能量的母线保护新原理.电力系统自动化,2005,29(6):51-54.
LI Haifeng WANG Gang, LI Xiaohua. A novel busbar protection based on transient current spectrum energy. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 51-54.
- [17] LI K K, YU Weiyong, CHAN W L. Study of protection scheme for transmission line based on wavelet transient energy. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2006, 28(7): 459-470.

郭宁明(1980—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:电力系统故障诊断. E-mail: guonm@epri. ac. cn

覃剑(1967—),男,博士,教授级高级工程师,主要研究方向:电力设备及电力系统故障分析和诊断、小波变换技术在电力系统的应用. E-mail: jqin@epri. ac. cn

陈祥训(1939—),男,教授级高级工程师,主要研究方向:半导体器件、电测量仪器、模拟与数字信号处理、光纤传感器以及小波变换在电力系统中的应用. E-mail: xxchen@epri. ac. cn

Lighting Strike Identification and Its Effects on the Traveling Wave Fault Location

GUO Ningming, QIN Jian, CHEN Xiangxun

(Electric Power Research Institute of China, Beijing 100085, China)

Abstract: Lightning strike is one of the major factors that affect the precision of traveling wave fault location devices. Identification of lightning strike is key to mitigate the lightning strike influences on the transmission lines. In comparison with short circuit currents, lightning fault currents are more acute in gradients and the non-fault phase currents carry much more transient energy in their traveling waves. Based on this, a new wavelet transform method is proposed to identify lightning faults by extracting the gradients of fault currents and transient energy in the non-fault phase currents. Also, the corresponding criteria are proposed. EMTDC simulation and experimental results verify the correctness of the proposed method.

Key words: traveling wave fault location; wavelet transform; transient characteristics; lightning strikes

本刊原则上不受理电子邮件投稿或纸质稿件,请直接登录 www.aeps-info.com,经作者注册后投稿,并可由此查询稿件处理状态。

附录 A EMTDC 仿真系统模型

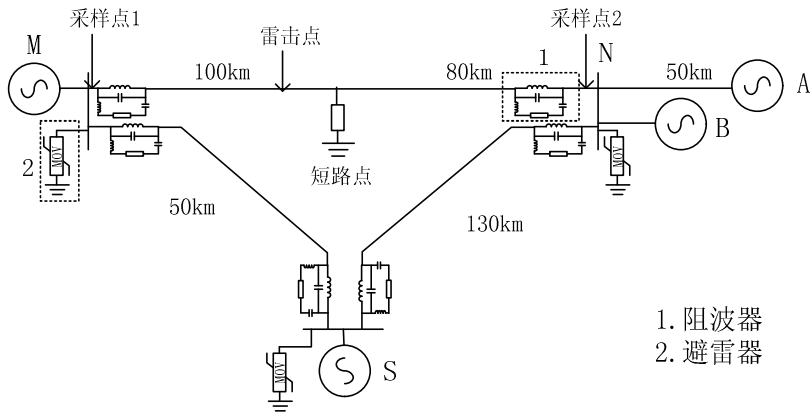


图 A1 500kV 输电线路模型

Fig.A1 Model of 500kV transmission line

附录 B 现场采集数据分析

本文分析中采用了现场实际采集数据对所述雷击识别方法予以验证，其中雷击故障 8 组（单相 6 组、两相 2 组），短路故障 4 组（单相 2 组、两相 2 组）。

表 B1 现场采集故障电流分析数据(模极大值)

Table B1 Analysis data of field sampling fault current (modulus maxima)

性质	编号	故障条件			小波变换模极大值
		电压等级/kV	故障类型	线路长度/km	
雷击故障	1	220	单相	72.177	456.37
	2	220	单相	229	225.23
	3	220	单相	33.25	292.88
	4	220	单相	349	164.57
	5	500	单相	180.044	242.24
	6	500	单相	346	494.91
	7	220	两相	80.979	395.73/295.26
	8	500	两相	229	182.27/188.16
短路故障	1	220	单相	16.953	6.8438
	2	220	单相	83.9	8.9219
	3	500	两相	25.1	85.805/57.922
	4	500	两相	349	40.914/19.266

表 B2 现场采集故障电流分析数据(暂态能量)

Table B2 Analysis data of field sampling fault current (transient energy)

类型	性质	故障编号	各相小波系数能量绝对值			各相小波系数能量相对值		
			A	B	C	A	B	C
单相故障	雷击故障	1	2310.6	2854.1	* 10734	4.65	3.76	1
		2	* 1560.8	362.26	452.48	1	4.3	3.45
		3	* 1290.8	195.28	215.23	1	6.61	6
		4	497.78	* 2480.6	636.61	4.98	1	3.89
		5	79.037	* 20196	200.02	255.37	1	100.96
		6	1112.8	602.31	* 2410	2.17	4.01	1
	短路故障	1	4.3666	* 1897.3	6.1037	435.16	1	311.03
		2	* 182.22	1.4482	18.907	1	125.83	9.93
两相故障	雷击故障	7	1564.4	*2073.9	* 5836.8	3.73	2.81	1
		8	5309.2	* 8834.3	* 11449	2.16	1.29	1
	短路故障	3	6.8762	* 8454.3	* 8588.4	1249	1.01	1
		4	* 51.853	*49.637	1.0218	1	1.04	50.83

注: 以上分析数据经归一化处理; 表中*号相为故障相。