

# 输电线路边界保护中雷电冲击与故障的识别

哈恒旭,张保会

(西安交通大学电气学院,陕西 西安 710049)

**摘要:** 输电线路的边界保护原理是在单端利用暂态分量中包含的高频分量是否经过线路边界这一特点构成的,当雷电冲击线路时,会使边界保护发生误动作。通过大量的仿真分析,发现在雷电冲击没有造成短路和造成弧光短路以及普通短路故障情况下,由于线路两端的避雷器造成暂态分量的小波谱随着时间的变化规律不同,并提取这一差别构成了雷电和短路的识别算法。输电系统的仿真模型采用频率相关模型,ZnO 避雷器采用 IEEE 公认的频率相关模型。EMTP 仿真验证说明了该算法的正确性。

**关键词:** 雷电冲击; 弧光故障; 避雷器; 边界保护; 输电线路

**中图分类号:** TM771 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)04-0001-05

## 1 引言

随着电力系统的不断发展,为了减少保护的动作时间,基于暂态高频分量的保护原理相继提出,其主导思想是利用故障引起的高频分量是否经过线路边界导致暂态分量在某个频带下的响应变化来区分区内、外故障,这种保护原理被称为边界保护<sup>[1][2]</sup>。在对边界保护理论研究,特别在对区内外故障差别的研究的基础上,我们发现,当线路受到雷电冲击时,雷电电流是一个波头很陡、持续时间很短的冲击函数,包含数值很大的高频分量,当冲击发生在被保护线路上时,基于高频分量的边界保护将误认为内部故障而动作<sup>[3]</sup>,这是边界保护研究必须解决的重大问题之一。

由于在输电线路的边界通常安装避雷器以保护线路以及线路上连接的电气元件不受雷电过电压的损害,幅值很大的雷电冲击电流将在线路边界产生很高的冲击过电压,避雷器将限制过电压的幅值,而对于普通的短路故障,避雷器则呈现较高的电阻而近似开路。本文利用小波变换分析了短路故障、雷电冲击但没有击穿线路造成短路、雷电击穿线路发生电弧短路三种情况下,保护安装处测量到的暂态电压、电流的小波谱特征,根据这一特征,提出了识别雷电冲击与短路故障的方法。经过大量的 EMTP 仿真发现,当雷电冲击线路没有造成短路的情况下,在保护安装处的电压和电流的小波谱在各个尺度下随着时间的推移并没有明显的衰减,而当短路故障时,其小波谱在各个尺度下随着时间的推移而发生衰减,频率越高的信号的波谱随时间的衰减越快。在此基础上,提出了利用小波变换提取不同时间段

相同频带的两个时频区域内的小波谱能量来识别雷电冲击与短路故障的方法。

## 2 避雷器的模型

目前,超高压输电系统中广泛采用无间隙的 ZnO 避雷器,是由一组非线性伏安特性很好的 ZnO 电阻片串连组成。在正常运行情况下,避雷器呈现很高的电阻,在避雷器中只有很小的泄露电流,而在雷电冲击或开关非正常操作引起过电压的情况下,避雷器呈现很小的电阻值,具有非线性的伏安特性。

在雷电冲击和操作过电压的情况下,避雷器呈现出不同的动态特性,即避雷器的动态特性是频率相关的,当冲击电流的波头很陡时(雷电冲击情况下)避雷器的放电电压较高,而当冲击电流的波头较缓时,避雷器的放电电压较低。因此,仅利用一个非线性电阻来模拟避雷器是不够准确的。IEEE 提供的避雷器的模型如图 1 所示<sup>[4]</sup>,电感 L1 和 R1 构成的低通滤波器将两个非线性电阻 A0 和 A1 分开,对于相同幅值的冲击电流非线性电阻 A0 的两端电压要比 A1 高。当加在避雷器上的冲击电流的波头很缓时(开关操作情况下),L1 和 R1 构成的低通滤波器呈现很小的阻抗值,整个避雷器的伏安特性与 A1 接近,而当波头很陡时(雷电冲击情况下)这个低通滤波器呈现很高的阻抗,整个避雷器的伏安特性与 A0 接近。电感 L0 的作用是,加在避雷器上的冲击电流波越陡,避雷器两端的电压越高,它用来适应不同陡度的雷电波(上升时间从 0.5  $\mu$ s 至 45  $\mu$ s)。这个模型很好地适应了避雷器动态特性反应于波头陡度的情况。

目前在超高压输电系统中广泛采用的是无间隙

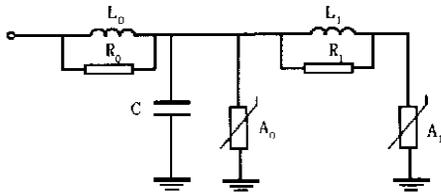


图 1 IEEE 提供的 ZnO 避雷器模型

Fig. 1 The Recommended IEEE Model of ZnO Surge Arrester

的氧化锌避雷器,典型的500 kV系列避雷器模型中的非线性电阻的伏安特性如图 2 所示<sup>[4]</sup>。

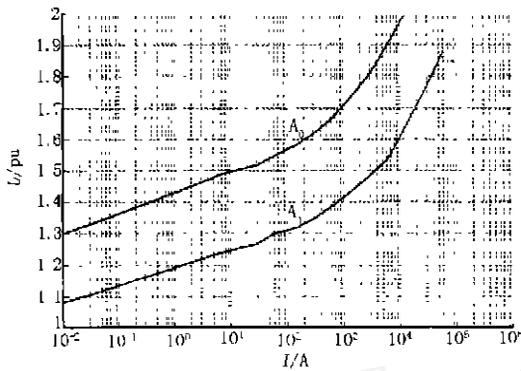


图 2 避雷器模型中非线性电阻的伏安特性

Fig. 2 The V-I characteristic for nonlinear resistor of typical 500kVA Arrester

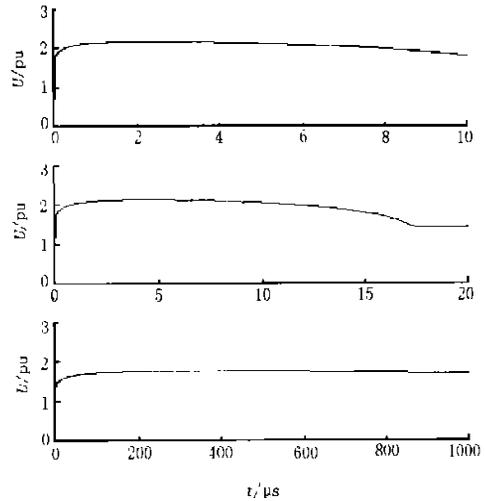
具有冲击性质的雷电流可以用双指数冲击函数来模拟<sup>[6]</sup>,将这个冲击的电流源直接加在避雷器上,避雷器的电压和电流如图 3 所示,图中从上至下分别为 4/10 μs、8/20 μs、300/1000 μs 冲击情况下避雷器的电压和电流波形。图 3 说明,避雷器的放电电压(阈值)与冲击电流波形的陡度有关,冲击电流波形越陡,放电电压越高。

### 3 雷电冲击与故障时暂态电压和电流的差异

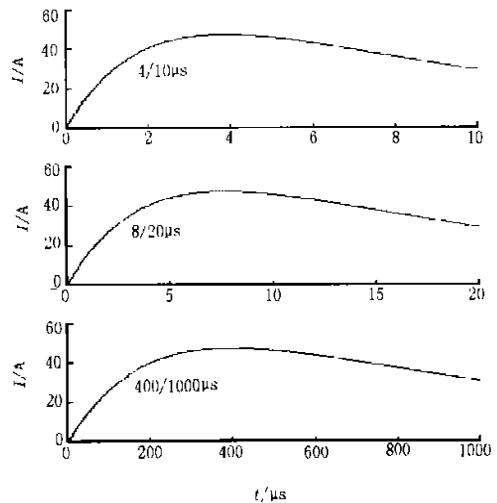
#### 3.1 雷电冲击没有故障时暂态分量的小波谱

当线路上受到雷电冲击没有发生短路故障时,假设雷电冲击电流的陡度为 8/20 μs,在线路边界测量到的暂态电压电流波形及其第一尺度的小波谱如图 4 所示。

通过暂态电压和电流的小波谱发现,在故障后 8 ms 时间内,第一个尺度下的暂态高频分量并没有随着时间的推移而发生衰减。这主要是由于避雷器的作用而造成的,当线路上受到雷电冲击但没有击



(a) 电压曲线



(b) 电流曲线

图 3 避雷器的冲击响应

Fig. 3 The impulse response of Arrester

穿线路时,相当于在雷击点附加一个幅值很大、波头陡度也很大且持续时间很短的冲击电流源,这个冲击电流在冲击点产生幅值很大的初始电压行波,这个初始行波是一个波形与雷电流类似的冲击函数,包含的高频分量的幅值也很大,当初始电压行波传播到线路边界(测量点)时,电压行波在线路边界产生的过电压的幅值超过避雷器的放电电压,避雷器呈现很小的电阻,测量到的电压幅值被限制在一定的范围之内;同时,初始行波发生反射,反射的电压行波和初始行波的波形类似,方向相反,且有一定的衰减,当行波再次反射到测量点时,虽然行波产生了一定程度的衰减,但由于雷电波的幅值很大,产生的

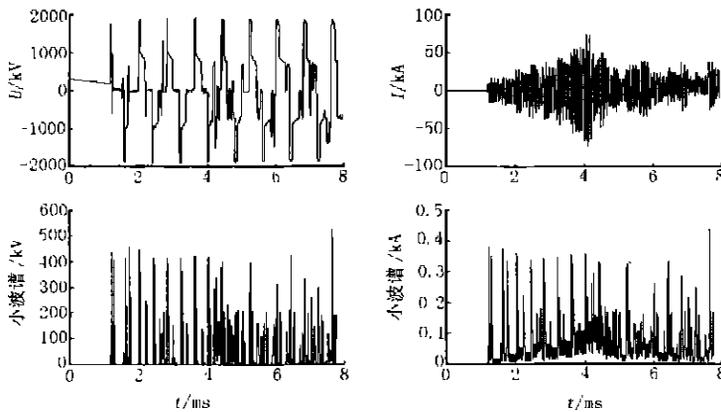


图4 雷电冲击时(没有击穿)电压和电流的波形及其第一尺度的小波谱

Fig. 4 The voltage and current waveform and wavelet spectrum

at the case of lightning stroke

过电压仍然超过避雷器的放电电压,测量到的电压幅值被限制在相同的范围之内,直到在线路上来回反射的电压行波在线路上传播过程中被衰减到避雷器的放电电压以下时(假设时间为  $T$ ),避雷器近似开路,测量到的电压幅值开始以指数规律衰减。因此,测量到的暂态电压中的某个频段的高频分量在故障后  $T$  时间段内,其幅值几乎不发生衰减,而经过时间  $T$  后,将随时间的推移,按照指数规律衰减。

### 3.2 雷电冲击造成弧光接地故障时暂态分量的小波谱

当线路上受雷击发生了弧光接地故障时,暂态电压电流波形及其第一尺度的小波谱如图5所示。

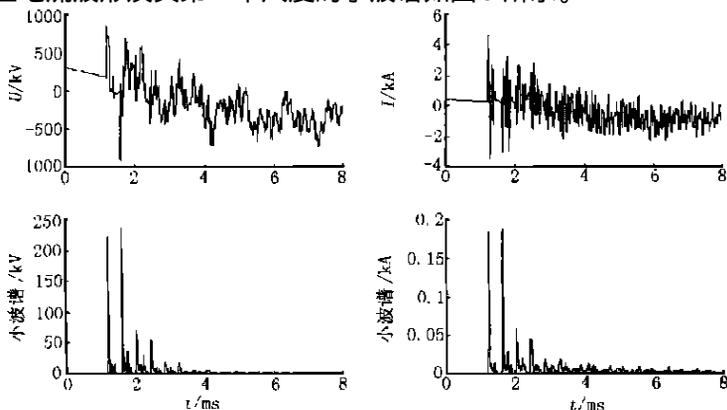


图5 雷电冲击导致弧光接地故障时电压和电流的波形及其第一尺度的小波谱

Fig. 5 The voltage and current waveform and wavelet spectrum at the case of lightning stroke induced Phase A to earth fault

图5表明,当线路受到雷电冲击,击穿线路造成短路故障时,电压和电流第一个尺度的小波谱随时间的变化很快按照指数规律衰减。这是由于故障点经弧光电阻接地,雷电流幅值虽然很大,但由于接地支路的存在,使得透射到线路上的初始电压行波的幅值很小,因此不能产生超过避雷器放电电压的过电压,或者超过避雷器阈值的过电压持续时间很短。

### 3.3 普通短路故障时暂态分量的小波谱

当在线路上发生普通短路故障时,暂态电压电流的波形以及其在第一个尺度下的小波谱如图6所示。

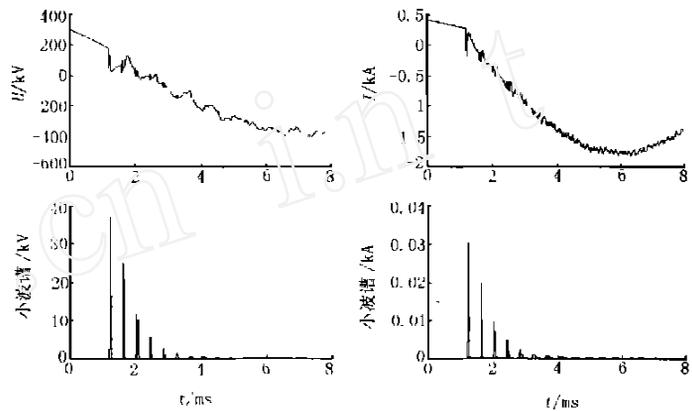


图6 A相短路故障时电压和电流的波形及其第一尺度的小波谱

Fig. 6 The voltage and current waveform and wavelet spectrum at the case of phase A to earth fault

图6说明,普通短路故障时,暂态电压电流的小波谱随着时间的推移按照指数规律衰减,这是因为突然叠加在故障点的电压源产生的初始电压行波,没有超过避雷器的放电电压,因此避雷器近似开路。由于线路的阻尼作用,暂态分量中的高频分量随着时间的推移按照指数规律衰减。

## 4 雷电和短路的识别原理与算法

根据上述分析可知,当雷电冲击线路没有造成短路时,暂态电压和电流的第一尺度小波谱在很长的时间内,不随时间的推移而衰减;在雷电冲击造成弧光短路和普通短路故障的情况下,暂态电压和电流在第一个尺度的小波谱随时间的推移按照指数规律衰减。可以利用小波变换提取暂态分量在两

个时频区域  $R_1 = [T_1, T_1 + T] \times [\text{某个高频频带}]$  和  $R_2 = [T_2, T_2 + T] \times [\text{某个高频频带}]$  的谱能量, 然后进行比较, 如果其比值接近 1, 说明雷电冲击没有造成短路, 如果接近 0, 说明为短路故障。

雷电冲击与短路故障的识别算法如下:

(1) 首先对测量到的暂态电压或电流进行小波

变换,  $W_u(s, t) = \langle u(\cdot), \left[ \frac{t-\cdot}{s} \right] \rangle$ ;

$W_i(s, t) = \langle i(\cdot), \left[ \frac{t-\cdot}{s} \right] \rangle$ ,

其中,  $u, i$  分别为测量到的暂态电压和电流, 为选取的小波函数。

(2) 利用电压或电流的小波变换结果, 检测到故障时刻(或雷电冲击时刻), 假设为  $T_1$ , 选取  $T_2$  为故障后的某个时刻, 利用提取电压(或电流)在时频区域  $R_1 = [T_1, T_1 + T] \times [\text{某个高频频带}]$  和  $R_2 = [T_2, T_2 + T] \times [\text{某个高频频带}]$  的谱能量:

$$E_1(s) = \int_{T_1}^{T_1+T} |W(s, t)|^2 dt$$

$$E_2(s) = \int_{T_2}^{T_2+T} |W(s, t)|^2 dt$$

其中,  $T$  为行波在线路上传播一个来回的时间,  $W(s, t)$  为暂态电压或电流信号的小波变换,  $s$  为尺度参数。

(3) 在某个尺度下(尺度参数代表信号中的频带), 如果  $Ratio = E_2/E_1 > K_k$ , 那么说明高频分量随时间的推移没有衰减, 为雷电冲击无故障。如果  $Ratio = E_2/E_1 < K_k$ , 则说明随时间推移高频分量有很大衰减, 为普通短路故障(或雷电冲击造成的短路故障)。

## 5 EMTP 仿真

仿真模型是典型双端电源 500 kV 输电系统(如图 7), 在线路的两侧边界分别接有三相 Y20W-420/1046 型无间隙氧化锌避雷器, 线路为四分裂单回线, 长度为 120 km, 线路两端的短路容量分别为 8 GVA 和 40 GVA。输电线路采用频率相关模型, 雷电引起的短路故障模拟为弧光电阻接地。雷电冲击电流用双指数冲击函数模拟, 雷电波的幅值为 50 kA, 上升时间为 8  $\mu$ s, 持续时间为 20  $\mu$ s; 采样频率为 400 kHz, 小波变换采用三阶 Cui 样条小波。为了能反应不同类型的故障, 利用相模变换将三相的电压和电流转换成 1 模分量, 即  $u = (u_a - 2u_b + u_c)/3$ ,  $i = (i_a - 2i_b + i_c)/3$ 。

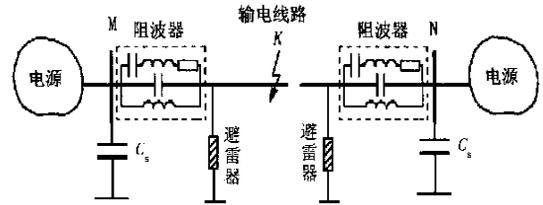


图 7 仿真输电系统模型

Fig. 7 The configuration of power transmission system

线路长度为 120 km, 因此选择小波能量窗的长度  $N = 300$  (0.75 ms),  $E_1$  为故障发生时刻电压(电流)在时间窗  $N = 300$  (0.75 ms) 内的小波谱能量,  $E_2$  为故障发生后 2 ms 时刻的电压(电流)在该时间段内的小波谱能量。短路故障、雷电冲击(没有击穿线路)以及雷电冲击造成弧光故障三种情况下暂态电流的第一尺度的小波谱能量及其比率如表 1 所示(暂态电压的情况与电流类似)。

表 1 雷电冲击和故障时暂态电流的小波谱能量

Tab. 1 The Wavelet spectrum energy of transients current at the case of lightning stroke and fault

	雷电冲击						A 相接地
	未击穿线路			击穿线路造成短路			
	4/10 $\mu$ s	8/20 $\mu$ s	40/100 $\mu$ s	4/10 $\mu$ s	8/20 $\mu$ s	40/100 $\mu$ s	—
$E_1$	2218.0	1883.6	1469.5	238.7264	716.771	34.0303	38.5545
$E_2$	2253.8	1764.7	1159.5	54.746	207.644	9.3120	3.7529
$R = E_2/E_1$	1.0162	0.9369	0.8555	0.23353	0.2935	0.2736	0.079
判断结果	>0.8 不动	>0.8 不动	>0.8 不动	<0.7 动作	<0.7 动作	<0.7 动作	<0.7 动作

根据表 1 的数据可以看出, 当线路受到雷电冲击但没有击穿线路时, 在故障发生时刻和故障后 2 ms 时刻的电压电流在时间窗 0.75 ms 内的小波谱能量的大小差别很小, 其比率接近 1, 这说明, 在故障后 2 ms 内, 电压电流中 100 ~ 200 kHz 的高频分量几乎没有衰减。而在短路故障和雷电冲击短路的情况下, 两个时刻的小波谱能量差别很大, 普通短路时  $Ratio = E_2/E_1$  分别为 0.079, 雷电冲击短路时分别为 0.29, 这说明, 在 2 ms 时刻, 电压电流中 100 ~ 200 kHz 的高频分量相比故障发生时刻已经大量衰减。选择可靠系数  $K_k = 0.8$ , 在雷电冲击没有击穿线路时, 保护不动作; 在普通短路故障和雷电冲击短路故障时, 保护动作。

## 6 结论

通过对雷电冲击和短路情况下暂态电压和电流的小波谱分析发现, 当雷电冲击线路但没有击穿时,

由于线路两侧避雷器的作用,使得暂态电压和电流中某个频带的高频分量在一个时间段内几乎不发生衰减;而当雷电冲击击穿线路引发弧光短路或者普通短路故障的情况下,暂态电压和电流中某个频带的高频分量将随着时间的推移,按照指数规律衰减。提取两个不同时间段某个高频分量的谱能量之比构成雷电冲击和短路的区分,EMTP 仿真表明,利用这个特征提出的雷电冲击和故障识别的算法是可行的。

#### 参考文献:

- [1] Johns A T, Aggarwal R K, Bo Z Q. Nonunit Protection Technique for EHV Transmission Systems Based on Fault generated Noise. Part 1: Signal Measurement [J]. IEE Proc Gener, Transm Distrib, March 1994, 141(2):137 - 140.
- [2] Bo Z Q. A New noncommunication Protection Technique for Transmission Lines [J]. IEEE Trans on Power Delivery, October 1998, 13(4):1073 - 1078.
- [3] 哈恒旭,张保会,吕志来.利用暂态电流的输电线路单

端暂态量保护探讨[J].中国电机工程学报,2000,20(11):56 - 61.

- [4] IEEE Working Group 3.4.11, Application of Surge Protective Devices Subcommittee, Surge Protective Devices Committee. Modeling of Metal Oxide Surge Arrester. IEEE Trans On POWER DELIVERY January 1992, 7(1).
- [5] Ikmo Kim, Toshihisa Funabashi, Harao Susaki, et al. Study of ZnO Arrester Model for Steep Front waves. IEEE Trans On POWER DELIVERY, April 1996, 11(2).
- [6] Tonomi Narita, Takishi Yamada, Eiichi Zaima, et al. Observation of Current Wave shapes of Lightning Strokes on Transmission Towers. IEEE Trans on POWER DELIVERY, Jan 2000, 15(1):429 - 435.

收稿日期: 2002-09-25; 修回日期: 2002-11-05

#### 作者简介:

哈恒旭(1972 - ),男,博士,研究方向为电力系统继电保护;

张保会(1953 - ),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统继电保护及通讯。

### The study on identification of fault and lightning strokes in boundary protection for EHV transmission lines

HA Heng-xu, ZHANG Bao-hui

(Dept. of Electric Engineering, Xi 'An Jiaotong Univ., Xi 'An 710049, China)

**Abstract:** Lightning strokes on transmission line will lead to the wrong response of boundary protection relays, which based on the high frequency transient components at single line terminal, due to the large amount of high frequency component produced by lightning strokes. Based on researching the characters of surge arresters and large amount of ElectroMagnetic Transient Program (EMTP) simulations, the different characters of transients between lightning stroke and common faults are found out, and the algorithm based on wavelet transform for identification of short circuit fault and lightning strokes is proposed. The IEEE recommended frequency dependent model of ZnO surge arrester and lightning model, the frequency dependent line models and the lightning fault arcs models are utilized in the model. The EMTP simulations show that the result is correct.

**Key words:** lightning strokes; arc fault; surge arrester; boundary protection; transmission lines

## 高压直流输电(HVDC)和灵活交流输电(FACTS)

### 学术研讨会及论文征稿启事

随着我国电力系统的快速发展,特别是三峡工程建设和西电东送的实施,以及网间互联的加强,HVDC 输电技术和 FACTS 系统越来越受到电力运营设计单位和专家学者的关注。为了促进我国电力技术的发展,增进相互交流、活跃学术气氛,国家电力公司电教中心与《继电器》杂志社拟于今年十月左右在许昌联合举办相关学术研讨会(范围包括:一、二次设备的研制开发,学术研究,运行经验,测试实验等),有关论文将在我刊开辟专栏或专集发表。热烈欢迎广大专家学者踊跃投稿。来稿截止日期 6 月 30 日。来稿请注明专题征文字样。会议具体日期另行通知。

来稿请寄 河南许昌许继大道 32 号《继电器》杂志社或发 E-mail:DEPS@xjgc.com

国家电力公司电教中心 联系人:王宏斌 联系电话:010 - 85383669  
继电器杂志社 联系人:张志强 联系电话:0374 - 3212254