

超高压线路暂态保护中雷电干扰与短路故障的识别

段建东^{1,2}, 张保会¹, 郝治国¹, 哈恒旭^{1,3}

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西省西安市 710049; 2. 广西大学电气工程学院, 广西壮族自治区南宁市 530004)

(3. 山东鲁能积成电子股份有限公司, 山东省济南市 250100)

摘要: 未导致故障的雷击可能会造成超高压线路暂态保护的误动, 对这种雷电干扰的识别是暂态保护实用化必须要解决的一个棘手问题。全面分析了输电线路中雷电干扰和故障情形的模量行波大小与行波波形, 发现如下特征: 感应雷作用下三相线路中的线模量远小于地模量; 重型直击雷的波头部分和截波处都突变剧烈; 轻型直击雷的波尾时间显著小于短路行波的持续时间。基于此, 提出了轻型直击雷、感应雷与重型直击雷、普通短路故障的识别原理, 以及利用小波变换的雷电干扰实用识别算法, 大量 EMTP 仿真表明该识别原理可行、算法可靠, 有望解决暂态保护在雷电干扰时的误动问题。

关键词: 暂态保护; 雷电干扰; 故障; 模量行波; 行波波形; 小波变换; 识别

中图分类号: TM773

0 引言

超高压线路不可避免会受到雷电冲击, 雷电中丰富的高频分量对暂态保护^[1,2]动作特性的影响不容忽视。雷电对线路的冲击主要有两种形式^[3]: 感应和直击。前者一般落在线路 50 m 以外, 幅值不超过 400 kV, 不会造成线路短路; 后者直接击在线路甚至导线上, 可能会造成绝缘子闪络或导线短路。若雷击线路但并未造成线路短路(即轻型雷击), 则应视为雷电干扰, 暂态保护不能误动; 另一方面, 若雷击线路并造成线路短路(即重型雷击), 则一并以故障论处, 暂态保护迅速动作。因此, 在进行暂态保护算法研究时必须分析以上两种情况下的暂态特征, 并加以区分。文献[4]提出一种直接法, 比较雷击前后电流变化量的大小来判断直击雷是否导致线路短路; 文献[5]以不同时段信号高频谱能量的大小比较来区分雷电干扰和短路。然而, 上述两种方案中, 区分用的门槛值受多个因素的影响而不易整定, 也未进一步区分重型雷电波和普通故障行波, 给利用初始故障行波的保护算法带来隐患, 还忽略了感应雷击对暂态保护的影响^[6]。

本文全面分析了超高压线路上轻型直击雷、重型直击雷、感应雷、普通故障所呈现的基本特点, 提出雷电干扰与短路故障的识别判据以及基于小波变

换的实用算法。EMTP 仿真表明该识别方法可行, 它的应用将进一步提高暂态保护的抗干扰能力。

1 雷电波与故障行波的特征分析

1.1 轻型直击雷

一般地, 一次雷击有 2 个~3 个间隔几十毫秒的单极性雷电脉冲落在输电线上或其附近^[3]。首个雷电脉冲的波形如图 1 所示, 波头时间 t_f 为 $1 \mu\text{s} \sim 5 \mu\text{s}$, 半峰时间 t_d 为 $20 \mu\text{s} \sim 100 \mu\text{s}$ 。常采用与实测相符的 Heiler 型函数来模拟雷电波^[7]:

$$u(t) = \frac{U_m}{\eta} \frac{(t/T)^2}{1 + (t/T)^2} e^{-t/\tau} \quad (1)$$

式中: U_m 为雷电波峰值; η 为幅值修正系数; T 为波头参数(与 t_f 相关); τ 为衰减参数(与 t_d 相关)。

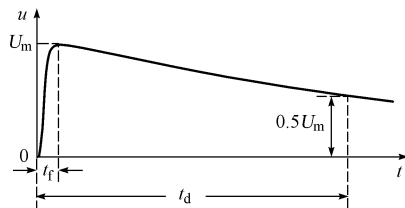


图 1 轻型雷击电压波

Fig. 1 Mild lightning voltage waveform

当线路遭受轻型直击雷(未造成线路短路), 其上雷电波的基本特点是:

a. 整个雷电波持续时间不长, 半峰时间不超过 $100 \mu\text{s}$, 统计上 $t_d = 40 \mu\text{s}$ 。

b. 波头非常陡, 仅几微秒($1 \mu\text{s} \sim 5 \mu\text{s}$)即上升到峰值, 而波尾要比波头平缓得多, 需要几十微秒

(20 μs ~100 μs)才从峰值下降至半峰值,设 k_f, k_t 分别表示波头、波尾的最大陡度(斜率),那么至少有 $k_t/k_f \geq -5/(2 \times 20) = -0.125$,一般意义上 $k_t/k_f \rightarrow -0$ 。

c. 在超高压线路中,由于避雷线的存在,轻型直击雷一般绕击到线路的某一相并沿此相传播 u_α ,同时在其他相上感应生成耦合波 u_β :

$$u_\beta = k_{\alpha\beta} u_\alpha \quad (2)$$

式中: $k_{\alpha\beta}$ 表示导线间的耦合系数(取决于线路的几何尺寸),实际高压线路中耦合度一般小于 0.3^[3]。

这样,当 A 相遭受轻型雷击 u_A 时, B, C 两相上 $u_B = k_{AB} u_A$ 和 $u_C = k_{AC} u_A$ ($0 \leq k_{AB}, k_{AC} \leq 0.3$),那么由 Clark 变换得 $u_1 = (2 - k_{AB} - k_{AC}) u_A / 3$, $u_2 = \sqrt{3}(k_{AB} - k_{AC}) u_A / 3$, $u_0 = (1 + k_{AB} + k_{AC}) u_A / 3$ 。若定义线模量 u_1, u_2 与地模量 u_0 的最大比值为:

$$r_1 = \max \left\{ \left| \frac{u_1}{u_0} \right|, \left| \frac{u_2}{u_0} \right| \right\} \quad (3)$$

则由 k_{AB}, k_{AC} 取值范围可分析出,对于轻型直击雷, $r_1 \geq 0.875$ 。

1.2 重型直击雷

若雷电幅值一旦超过线路临界闪络电压,就会发生绝缘的击穿短路,导致雷电波被截止,截波时刻取决于绝缘子的伏秒特性,如图 2 所示^[8]。

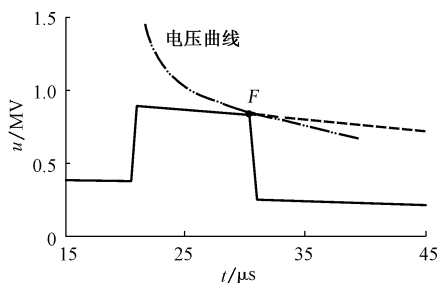


图 2 重型直击雷波形(F 处截波)
Fig. 2 Severe direct-lightning waveform

此时的基本特点是:

a. 雷电故障的发生使得雷电波的持续时间更短,甚至只有几微秒,截波后为线路故障状态,延续传播的是故障行波。

b. 重型直击雷在截波前的波头部分与轻型直击雷的波头没有什么区别,同样地,三相线路中线模量与地模量的最大比值也是 $r_1 \geq 0.875$ 。

c. 重型直击雷的波头非常陡,其最大陡度 k_f 趋近于正无穷大;截波处变化也同样剧烈,其最大陡度 k_t 趋近于负无穷大^[7],理论上认为 $k_t/k_f \rightarrow -1$,这与轻型直击雷存在很大差别。

1.3 感应雷

当雷击线路附近地面(一般距离线路 50 m 外)

时,电磁场的作用使得架空线路的三相导线上同时出现感应雷。直击地面的雷电波如图 1 所示,但是线路上的感应雷显现出不同的特点:

a. 感应雷没有直击雷那么严重,峰值不超过 300 kV~400 kV,处于超高压线路的绝缘水平或耐雷水平以内,不会造成线路的短路故障^[3]。

b. 三相线路上感应雷波形如图 3 所示(图中为两次录波得到的结果),波头部分与直击雷相似,然而当达到峰值以后波形迅速下降^[9],半峰时间长度很短,这与波尾持续几十微秒至几百微秒的轻型直击雷有很大不同。

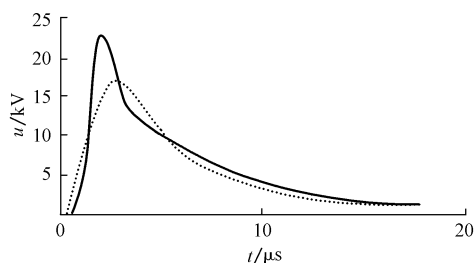


图 3 实录的感应雷波形
Fig. 3 Two recorded lightning-induced voltage waveforms

c. 线路每相上感应雷的波形相似、极性相同,尽管三相导线的排列方式各异,但彼此间感应雷幅值只相差一个接近于 1 的相似系数 $k_{\alpha\beta}'$ ^[10],即 $k_{\alpha\beta}' \in [0.8, 1.0]$ 。与此前轻型直击雷的分析类似,不难得出感应雷的 $r_1 \leq 0.25$ 。

1.4 普通短路故障

当线路某处发生短路故障,将产生由故障点向线路两侧传播的行波。假定在故障发生前故障点的三相电压分别为 U_{fA}, U_{fB}, U_{fC} ,由不同类型故障的相量边界条件可以求出故障点处模量行波 u_{1f}, u_{2f} 与 u_{0f} 的比值表达式,如表 1 第 2 列、第 3 列所示,其中 Z_1 和 Z_0 分别为线路 1,0 模量波阻抗。

从表 1 可以看出,模量间的比值取决于波阻抗的比 Z_1/Z_0 以及故障发生前故障点的相电压(即取决于故障初始角)。

在行波频率范围内,线路的模量波阻抗值是稳定的,保守地取 5 kHz 对应的波阻抗作为行波波阻抗, $Z_0 = 480 \Omega$, $Z_1 = 282 \Omega$ 。若线路上发生 ABG 故障,则故障点处 r_1 的值与故障初始角的关系曲线如图 4 所示,可见 $r_1 \geq 0.441$,并且绝大多数时候 r_1 远大于 0.441。

类似可得其他类型故障条件下 r_1 的取值范围,如表 1 中最后一列。综合表 1,可以得到如下结论:在各种短路情况下,故障点处模行波分量的比 u_{1f}/u_{0f} 和 u_{2f}/u_{0f} 的最大值 r_1 至少存在 $r_1 \geq 0.441$ 。

表 1 不同类型故障条件下模量间的比值
Table 1 Ratio between mode components in various fault types

故障类型	$\frac{u_{1f}}{u_{0f}}$	$\frac{u_{2f}}{u_{0f}}$	r_1 ($Z_0=480\ \Omega, Z_1=282\ \Omega$)
AG	$\frac{2Z_1}{Z_0}$	0	≥ 1.175
BG	$\frac{-Z_1}{Z_0}$	$\frac{\sqrt{3}Z_1}{Z_0}$	≥ 1.018
CG	$\frac{-Z_1}{Z_0}$	$\frac{\sqrt{3}Z_1}{Z_0}$	≥ 1.018
BCG	$\frac{-Z_1}{Z_0}$	$\frac{(Z_1+2Z_0)(U_{fB}-U_{fC})}{\sqrt{3}Z_0(U_{fB}+U_{fC})}$	≥ 0.588
ABG	$-\frac{(Z_1+Z_0)U_{fA}+Z_0U_{fB}}{Z_0(U_{fA}+U_{fB})}$	$\frac{(Z_0-Z_1)U_{fA}-(2Z_1+Z_0)U_{fB}}{\sqrt{3}Z_0(U_{fA}+U_{fB})}$	≥ 0.441
CAG	$-\frac{(Z_1+Z_0)U_{fA}+Z_0U_{fC}}{Z_0(U_{fA}+U_{fC})}$	$\frac{(Z_0-Z_1)U_{fA}+(2Z_1+Z_0)U_{fC}}{\sqrt{3}Z_0(U_{fA}+U_{fC})}$	≥ 1.098
相间短路	∞ 或 1	∞	∞
三相短路	∞	∞	∞

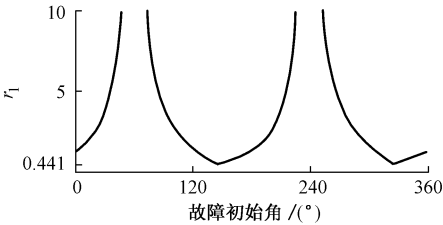


图 4 ABG 条件下 r_1 与故障初始角的关系
Fig. 4 r_1 value under ABG fault inception angles

此外,故障行波波头也有其不同于雷电波的特点。图 5 为一典型的故障行波。可见,故障行波波头是阶跃式突变,波尾持续时间长达几百微秒且幅值变化平缓,换言之,行波波头的最大斜率 k_f 趋于无穷大,而波尾(至少 100 μs 内)的斜率 k_t 趋于 0,因此 $k_t/k_f \rightarrow 0$ 。

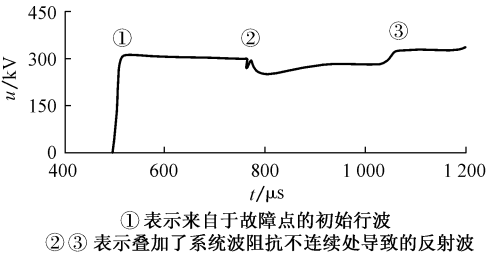


图 5 典型的故障行波波形
Fig. 5 Typical fault traveling-wave waveform

2 雷电干扰与故障的识别算法

2.1 识别原理

上述分析表明,在轻型直击雷、重型直击雷、感应雷或普通短路故障的情况下,电压行波分别呈现出不同的模量大小关系和显著的波形差异,据此可以识别出雷电干扰(感应雷、轻型直击雷)和故障情

况(重型直击雷、普通短路故障)。
首先,判别线路是否遭受感应雷击。若是,则线路无故障,不再进行故障计算。由于感应雷电压波波头部分的模量 u_1, u_2 与模量 u_0 的最大比值 $r_1 \leq 0.25$,而轻型直击雷和重型直击雷情况下 $r_1 \geq 0.875$,普通短路故障的情况下 $r_1 \geq 0.441$,因此可以设置门槛值 K_1 ,若

$$r_1 = \max \left\{ \left| \frac{u_1}{u_0} \right|, \left| \frac{u_2}{u_0} \right| \right\} \leq K_1 \tag{4}$$

则判断来波为感应雷,否则需要转入下一步继续进行识别。理论上,门槛值 K_1 可取 0.25 和 0.441 的中间值,但考虑到短路故障时绝大多数情况下 r_1 远大于 0.441,而且 0 模量比 1,2 模量衰减要严重, K_1 值应取得偏大些,本文选取 $K_1=0.4$,大量仿真表明这个门槛值是合适的。

其次,判别线路是否遭受重型直击雷。若是,则线路有故障,立即进行故障计算。由于重型直击雷电波在波头、截波处最大斜率的比 $r_2 = k_t/k_f \rightarrow -1$,而轻型直击雷和普通故障情况下行波峰值前、后邻域内 $r_2 = k_t/k_f \geq -0.125$,因此设置门槛值 K_2 ,若

$$r_2 = \frac{k_t}{k_f} \leq K_2 \tag{5}$$

则判定来波是重型直击雷,应转入保护算法,否则还需继续下一步的识别。本文选取 $K_2=-0.5$ 。

最后,判别线路是否遭受轻型直击雷。若是,则线路无故障,不需进行故障计算。如图 1 和图 5 所示,轻型雷电波 40 $\mu\text{s} \sim 100\ \mu\text{s}$ 内幅值就降为半峰值(近似认为 200 μs 后雷电波幅值相对于峰值而言几乎降为 0),而故障行波突变后几百微秒内幅值变化不大。因此比较行波峰值 U_m 与其后 200 μs 时的行波幅值 U_{200} ,若

$$r_3 = \left| \frac{U_{200}}{U_m} \right| \leq K_3 \quad (6)$$

则可以判定来波是轻型雷电波,否则来波是故障行波,应立即转入保护算法,本文选取 $K_3=0.5$ 。

2.2 算法实现中的有关问题

a. 实现技术。具有时频局部化特性的小波变换是检测和表达信号突变及其“突变强度”的优良工具,本文采用能反映信号 $f(t)$ 变化率的基于 B 样条函数 $N_3(t)$ 的二进小波变换^[11]:

$$(W_{2^j} f)(t) = \frac{d}{dt} \left[f(t) * N_3 \left(\frac{t}{2^j} \right) \right] \quad j \in \mathbf{Z} \quad (7)$$

以小波变换的极大值表征行波信号的波头、波尾及其最大斜率,并确定行波峰值 U_m 的位置。

b. 实现流程。在线路暂态保护中,故障启动后就进行雷电干扰和故障行波识别,此即为雷电干扰识别模块,当确有故障发生才转入保护算法模块,本文研究的雷电干扰识别模块的主流程见图 6。其中的相模变换、小波变换等可以直接利用行波启动算法^[12]中的处理结果,因而计算量小、速度快。

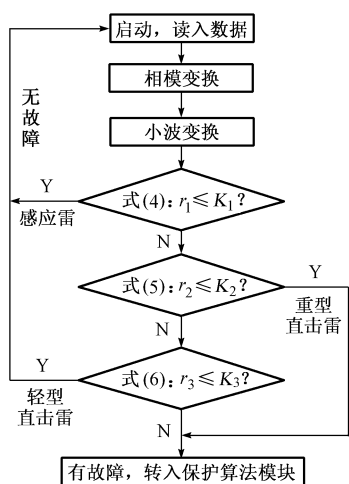


图 6 雷电干扰识别的流程图

Fig. 6 Flow chart of lightning identification

c. 采样率问题。由于雷电波波头时间仅为 $1 \mu s \sim 5 \mu s$,完整采集波头需要 2 MHz 以上的采样率,这对雷电识别的实用化提出了很高的要求。实际上,选用符合当前暂态保护设计条件的 500 kHz 采样率,不会影响到雷电识别的正确性。这是因为,一方面,对于感应雷和轻型直击雷,若不能将雷电波波头、峰值采集到,而将峰值后不到 $2 \mu s$ 的波尾上的点(此点幅值与峰值相差不大)作为峰值点,此时峰值两侧波形陡度的规律仍然得到保持,不会造成误动;另一方面,对于普通故障和重型直击雷,若不能将行波波头、峰值采集到,那么有可能将峰值后不到 $2 \mu s$ 的波尾上的点作为峰值点(此时也不改变在

峰值两侧波形陡度的规律),也可能直接采集到故障行波部分(不管是雷电故障还是普通故障,都当做故障行波进行处理),不会造成拒动。

d. 避雷器的影响。目前,超高压输电系统中广泛采用无间隙的 ZnO 避雷器,当雷电冲击到达避雷器上,若雷电波的幅值和陡度达到避雷器的保护水平,则避雷器动作并保持冲击残压水平直至雷电波的能量被避雷器完全泄放。由于避雷器只是起到一个削弱峰值、削平雷电波的作用,不会改变雷电波峰值前后的陡度规律,因此避雷器不会影响到雷电干扰的正确识别。

3 EMTP 仿真研究

如图 7 所示 500 kV 超高压输电系统,线路参数取自华中电网平武线(水平排列),土壤电阻率为 $100 \Omega \cdot m$,以频率相关线路模型加以模拟;母线杂散电容设为 $C_s=0.015 \mu F$;LA 为避雷器,以 IEEE 推荐的频率相关模型来模拟^[13];TP 为被研究的暂态保护,采样率为 500 kHz。

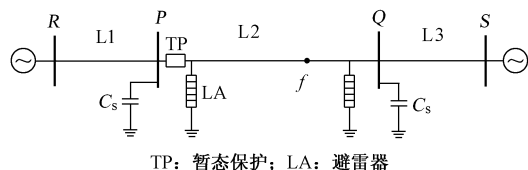


图 7 超高压输电系统

Fig. 7 Simulated EHV transmission system

分别在不同位置 f 设置不同强度的感应雷、重型直击雷、轻型直击雷和普通短路故障,考查 TP 中雷电干扰的识别性能,对雷击故障和普通短路还进行了不同故障类型、过渡电阻、短路相角等条件下的仿真试验。限于篇幅,表 2 列出部分试验结果,其中:感应雷 1,2 分别为距保护 10 km 和 100 km 处线路遭受感应雷击(三相间强度相差 10%);重型直击雷 1 为距保护 10 km 处线路遭受直击雷并在雷电波波头 $2 \mu s$ 时引起线路短路;重型直击雷 2 距保护 100 km,在雷电波波尾 $10 \mu s$ 时引起线路短路;轻型直击雷 1,2 分别距暂态保护 10 km 和 100 km;普通故障 AG, AB, ABG, ABCG (故障过渡电阻 50Ω 、故障初始角 30°)发生在保护 100 km 外。

从表 2 可以看出,文中所提出的算法能有效、可靠地判别各种雷电干扰和短路故障。该算法能正确区分普通短路行波和导致短路的重型直击雷电波,这对于基于故障初始行波的行波保护而言是非常有意义的,避免了在重型直击雷故障情形下将雷电波作为故障初始行波置入保护算法中加以计算而导致可能出现的错误。

表 2 识别雷电干扰与故障的部分仿真试验结果
Table 2 Test results of identification between fault and lightning disturbance

雷电干扰与故障		r_1	r_2	r_3	识别结论及其判断依据
标准雷电波 $t_f=2.6\ \mu\text{s}$ $t_d=40\ \mu\text{s}$	感应雷 1($U_m=300\ \text{kV}$)	0.16			感应雷($r_1\leq 0.4$)
	感应雷 2($U_m=300\ \text{kV}$)	0.25			感应雷($r_1\leq 0.4$)
	重型直击雷 1($U_m=1\ 200\ \text{kV}$)	1.08	-0.80		重型直击雷($r_1\geq 0.4, r_2\leq -0.5$)
	重型直击雷 2($U_m=1\ 200\ \text{kV}$)	3.69	-1.13		重型直击雷($r_1\geq 0.4, r_2\leq -0.5$)
	轻型直击雷 1($U_m=600\ \text{kV}$)	1.31	-0.08	0.07	轻型直击雷($r_1\geq 0.4, r_2\geq -0.5, r_3\leq 0.5$)
	轻型直击雷 2($U_m=600\ \text{kV}$)	3.42	-0.13	0.06	轻型直击雷($r_1\geq 0.4, r_2\geq -0.5, r_3\leq 0.5$)
雷电波 $t_f=5\ \mu\text{s}$ $t_d=100\ \mu\text{s}$	感应雷 1($U_m=150\ \text{kV}$)	0.15			感应雷($r_1\leq 0.4$)
	感应雷 2($U_m=150\ \text{kV}$)	0.24			感应雷($r_1\leq 0.4$)
	重型直击雷 1($U_m=800\ \text{kV}$)	1.10	-0.79		重型直击雷($r_1\geq 0.4, r_2\leq -0.5$)
	重型直击雷 2($U_m=800\ \text{kV}$)	3.67	-0.68		重型直击雷($r_1\geq 0.4, r_2\leq -0.5$)
	轻型直击雷 1($U_m=400\ \text{kV}$)	1.30	-0.05	0.18	轻型直击雷($r_1\geq 0.4, r_2\geq -0.5, r_3\leq 0.5$)
	轻型直击雷 2($U_m=400\ \text{kV}$)	3.27	-0.09	0.25	轻型直击雷($r_1\geq 0.4, r_2\geq -0.5, r_3\leq 0.5$)
普通短路故障	AG	2.94	-0.004 0	1.31	短路故障($r_1\geq 0.4, r_2\geq -0.5, r_3\geq 0.5$)
	AB	35.00	-0.000 9	1.02	短路故障($r_1\geq 0.4, r_2\geq -0.5, r_3\geq 0.5$)
	ABG	35.50	-0.000 6	1.03	短路故障($r_1\geq 0.4, r_2\geq -0.5, r_3\geq 0.5$)
	ABCG	34.50	0	1.06	短路故障($r_1\geq 0.4, r_2\geq -0.5, r_3\geq 0.5$)

4 结论

对于利用暂态量的超高压线路保护,要使其保护正确动作,必须对未造成线路短路的轻型直击雷、感应雷与造成线路短路的重型直击雷、普通短路故障进行区别,本文通过对各种雷电波和故障行波的分析与仿真,得出以下结论:

a. 轻型直击雷、重型直击雷、感应雷或普通短路故障时行波分别呈现出的模量间大小关系、行波波形具有显著的特征差异;感应雷击时三相行波波头非常相似,而短路和直击雷时三相行波波头不相同;重型直击雷时波头部分和截波处都突变剧烈,而轻型直击雷和短路时波头部分突变剧烈,但波尾部分相对平缓;轻型直击雷波尾时间要明显小于短路故障行波的持续时间。

b. 基于上述特征差异,利用线路线模量与地模量行波波头的大小比较来识别感应雷;利用行波峰值两侧最大斜率的大小比较来识别重型直击雷;利用行波峰值 U_m 与其后 $200\ \mu\text{s}$ 时行波幅值 U_{200} 的大小比较来区分轻型直击雷和普通短路故障。

c. 不仅识别出雷电干扰和短路故障,而且进一步将普通短路行波和导致短路的重型直击雷电波相区别,这非常有利于提高利用故障初始行波的行波保护算法的可靠性。

d. 采用能反映信号突变和突变强度的小波变换实现了雷电干扰识别的实用算法,与行波启动算法相结合,计算简便,大量的 EMTP 仿真表明该识别原理可行、算法可靠,有望解决长期困扰暂态保护的雷电干扰问题。

参考文献

1 董杏丽,葛耀中(Dong Xingli, Ge Yaozhong). 基于小波变换的高

压电网行波保护原理与技术的研究:〔博士学位论文〕(Principles and Technologies of High Voltage Power Network Protection Based on Traveling Wave and Wavelet Transform, Doctoral Dissertation). 西安:西安交通大学(Xi'an: Xi'an Jiaotong University),2003

2 哈恒旭,张保会(Ha Hengxu, Zhang Baohui). 超高压输电线路边界保护的研究:〔博士学位论文〕(Study of the EHV Transmission Line Boundary Protection, Doctoral Dissertation). 西安:西安交通大学(Xi'an: Xi'an Jiaotong University),2002

3 邱毓昌,施 围,张文元(Qiu Yuchang, Shi Wei, Zhang Wenyuan). 高电压工程(High Voltage Engineering). 西安:西安交通大学出版社(Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press),1995

4 董杏丽,葛耀中,董新洲,等(Dong Xingli, Ge Yaozhong, Dong Xinzhou, et al). 行波保护中雷电干扰问题的对策(Effect of Lightning on Protection Based on Traveling Waves). 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE),2002,22(9):74~78

5 哈恒旭,张保会(Ha Hengxu, Zhang Baohui). 输电线路边界保护中雷电冲击与故障的识别(The Study of Identification of Fault and Lightning Strokes in Boundary Protection for EHV Transmission Lines). 继电器(Relay),2003,31(4):1~5

6 李海锋,王 钢,赵建仓(Li Haifeng, Wang Gang, Zhao Jiancang). 输电线路暂态保护中的感应雷击识别(Identification of Induced Lightning in Transmission Line Transient Protection). 见:高校电力系统及其自动化专业第十九届学术年会论文集(In: Proceeding of 19th CUS-EPSSA). 成都(Chengdu): 2003. 1134~1138

7 Dudurych I M, Gallagher T J, Corbett J, et al. EMTP Analysis of the Lightning Performance of a HV Transmission Line. IEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(4): 501~506

8 The IEEE Working Group. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines. New York: IEEE Press, 1997

9 Araujo A E A, Paulino J O S, Silva J P, et al. Calculation of Lightning-induced Voltages with Rusck's Method in EMTP: Part I Comparison with Measurement and Agrawal's Coupling Model. Electrical Power Systems Research, 2001, 60(1): 49~54

- Committee. Modeling of Metal Oxide Surge Arrester. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(1): 302~309

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、安全稳定控制和电力线通信。

郝治国(1976—),男,博士研究生,研究方向为电力系统继电保护。

Duan Jiandong^{1,2}, Zhang Baohui¹, Hao Zhiguo¹, Ha Hengxu^{1,3}

(2. Guangxi University, Nanning 530004, China)

(3. Shandong LuNeng JiCheng Electronic Co Ltd, Jinan 250100, China)

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50277027) and XUJI Bounty of China Electricity Fund.

Key words: transient-based protection; lightning disturbance; fault; modulus traveling-waves; traveling-wave waveform; wavelet transform; identification

