

线路雷击事故与短路故障的识别方法

代颖, 郭涌涛, 邓武军

(宜宾电业局, 四川 宜宾 644002)

摘要:准确识别雷电冲击发生在输电线路上的位置和频次,对线路防雷保护具有重要的意义。在现有行波测距装置的基础上,提出线路受雷击和出现短路故障的识别新方法。对非故障性雷击、故障性雷击以及短路故障进行了仿真,发现了不同故障类型下暂态电流在各频段能量分布的差异和行波的折反射规律,在此基础上提出了线路雷击与短路故障识别算法。用通用的电磁暂态仿真程序 EMTDC 进行的仿真证明了该放法的正确性。

关键词:线路雷击;短路故障;行波定位;小波包能量谱

Abstract: To identify the locations and times of lightning strike on transmission line is very important for the protection against lightning. Based on the existing traveling-wave fault locating device, a new identification method to detect the lightning strike on transmission line is put forward. The current signals caused by lightning strike without any fault or with fault and by common short-circuit fault are analyzed, and the characteristics are obtained; firstly, energy distributions of all frequency bands are different in the three transient processes; secondly, there is no reflection and refraction on the point of lightning strike that doesn't cause any fault. An algorithm to identify the lightning strike and the short-circuit faults is presented based on wavelet packet energy-spectrum and the transient traveling wave characteristics. EMTDC simulation results show that this method is right and feasible.

Key words: lightning strike; short-circuit fault; traveling wave location; wavelet packet energy-spectrum

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1003-6954(2008)03-0046-05

输配电系统中,线路距离长、跨度大、地域分布广,地理和气象条件都十分复杂,易受雷击。实际运行资料表明,雷击是造成线路停电事故的主要原因之一^[1],因此对进行线路工程人员和运行人员来说,判定电线路发生雷电冲击的次数和位置、识别故障性雷击、非故障性雷击与普通短路故障具有重要的理论价值和工程意义。

由于雷击的随机性,用传统的方法搜集与掌握雷电分布、雷电流概率等具有明显的局限性。雷电定位系统是检测线路雷击频次和位置的可行方法,但需沿线路建立大量探测点,投资较大,实际测距误差在 1~3 km,且测距误差存在明显的地区差异^[2,3]。行波测距装置通过检测故障暂态行波到达母线的时刻进行测距,定位速度快、准确度高,国内外已做了大量研究。由于雷击和短路均在输电线路产生暂态行波,因此行波测距装置不仅能对短路故障进行测距,还能检测线路上的雷击^[4~7]。

输电线路受雷击后,按后果的不同可分为:故障性雷击和非故障性雷击。由雷电冲击和短路产生的行波都能被行波测距装置所捕获,而现有行波测距装置并没有区分雷击和普通短路故障的算法,不能区分雷电和短路。文献[1]提出比较雷击前后电流变化来判断雷击是否导致故障,但受雷电流幅值和波头变化

的影响大,且未能进一步区分雷击与普通短路故障;文献[8]提出利用暂态行波波特征来区分不同性质的雷击与短路故障,但该法受雷电波形和短路相角的影响较大,不易整定区分判据。

利用现有行波测距装置检测与记录线路的扰动特征,通过对非故障性、故障性雷击以及普通短路故障的电流行波信号特征的提取,提出了可应用于测距装置的雷击有普通短路故障识别方法。对某实际线路用 EMTDC 进行仿真,结果证明该方法可行,可用于实际线路中。

1 雷击过电压与雷电模型

1.1 线路雷击过电压

雷击过电压可分为:直击雷过电压和感应雷过电压。按照雷击线路部位的不同,直击雷过电压又可分为两种情况。一种是雷击线路杆塔或避雷线时,引起绝缘闪络,使导线出现过电压,通常称为反击。另一种是雷电绕过避雷线击于导线,直接在导线上引起过电压,称为绕击。无论哪种形式的雷击,在线路上的传播方式及产生的波形都是相同的^[9]。感应雷过电压,是雷击线路附近大地,由于电磁感应在导线上产生的过电压,其幅值一般不会超过 500 kV。

运行经验表明,直击雷过电压对电力系统的危害最大,感应雷过电压只对 35 kV 及以下的线路有威胁^[9]。因此下面只考虑直击雷过冲击的影响。

1.2 雷电模型

实测表明,雷电流的波头时间在 1~5 μs 范围内,平均约为 2~2.5 μs;雷电流波长时间一般在 20~100 μs 范围内,平均约为 50 μs。中国防雷计算一般采用波头为 2.6 μs,波长为 50 μs 的标准雷电冲击波形,记为 2.6/50 μs。采用标准双指数雷电模型,如式(1)。

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

2 雷电冲击与故障时的行波特征分析

线路雷击或发生故障时,在故障点将产生向两侧运动的行波。当线路上的行波传播且到达两个不同波阻抗线路的连接点或到达接有集中参数的节点时,行波就会发生折射与反射。如图 1 所示。

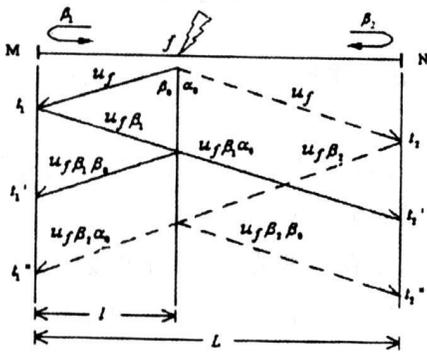


图 1 行波网格图

当发生故障性雷击或短路故障时,在故障点波阻抗不连续,在故障点会出现行波的折射与反射。在一定的时间内,母线处检测到的行波信号中含有雷击点的初始行波、故障点反射行波和母线的反射行波。故障发生在线路前半段时(相对于近端母线),故障点的反射波先到达;故障发生在线路后半段时,对端母线的反射波先到达。当发生非故障性雷击时,由于没有引起故障,雷击点的波阻抗连续,行波在雷击点没有折反射,故信号中无反射行波。

对某 500 kV 线路,如图 2,进行 EMTDC 仿真。线路长 180 km,用频率相关模型,采样频率 100 kHz;雷电流采用标准 2.6/50 μs 波形,对应非故障雷击和故障性雷击,雷电流幅值分别取 5 kA 和 25 kA;雷击和故障点距 M 端 60 km,取 2 ms 的数据进行分析。

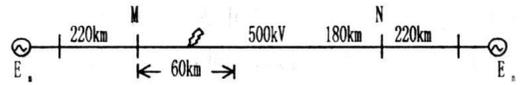


图 2 500 kV 仿真系统线路模型

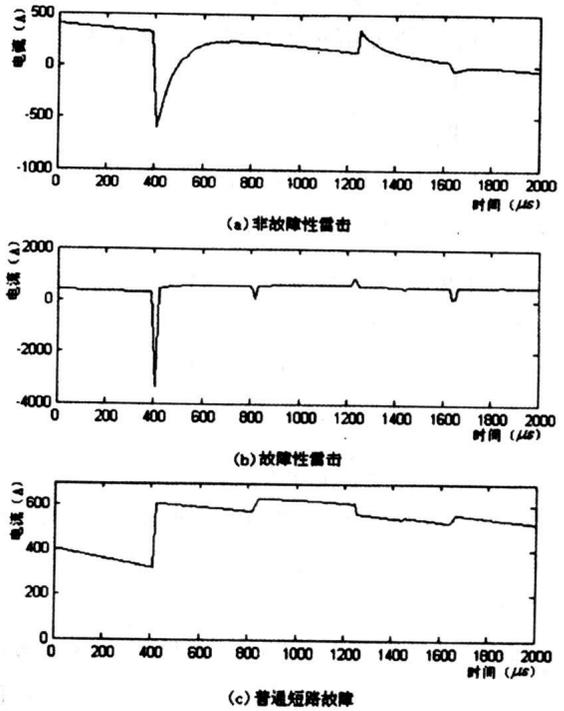


图 3 三种暂态过程的电流行波信号

图 3 给出了雷击和短路故障发生在线路前半段时,相应母线处的行波测距装置检测到的三种暂态过程的电流行波信号。

从图 3 可见,当发生故障性雷击或普通短路故障时,线路近端母线处捕获的前两个电流行波波头分别为:雷击或故障的初始行波和故障点的反射行波;当发生非故障性雷击时,由于在雷击点没有行波的折反射,则前两个行波波头分别为:雷击初始行波和对端母线的反射行波。据此可通过比较线路近端母线处第二个行波波头的性质,区分非故障性雷击与故障性雷击或普通短路故障。

3 暂态过程的小波包能量谱分析

3.1 信号的小波包分解及小波包能量谱

小波变换的多分辨率分析实际上是对采样信号进行二进频带划分,将信号分解为细节部分 W_1 (高

频)和大尺度逼近部分 V_1 (低频),然后将大尺度逼近部分 V_1 进一步分解,如此重复就可以得到任意尺度上的逼近部分和细节部分,即: $V_0 = V_1 + W_1 = V_2 + W_2 + W_1 = V_3 + W_3 + W_2 + W_1 = \dots$ (2)

(2)上式可见,小波分解没有对信号高频部分进行再分解,因此不能提高高频部分的频率分辨率,而小波包正好弥补了这一不足,它比小波分解具有更好的局部化性能,使分解更加精细。引入符号:

$$\begin{cases} U_j^0 = V_j \\ U_j^1 = W_j \end{cases} \quad j \in Z \quad (3)$$

因为 $V_j = V_{j+1} + W_{j+1}$, 所以有:

$$U_j^n = U_{j+1}^{2^n} + U_{j+1}^{2^n+1}, \quad n \in Z^+ \quad (4)$$

小波包分解的一般表达式为:

$$\begin{cases} W_j = U_{j+1}^2 + U_{j+1}^3 \\ W_j = U_{j+2}^4 + U_{j+2}^5 + U_{j+2}^6 + U_{j+2}^7 \\ \dots \\ W_j = U_{j+k}^{2^k} + U_{j+k}^{2^k+1} + U_{j+k}^{2^k+2} + \dots + U_{j+k}^{2^k+2^k-1} \end{cases} \quad (5)$$

可见,小波包变换将细节空间 W_j 进一步分解,将频带 j 又按二进方式细分为 2^k 个频带,提高了频率分辨率。

对信号进行小波包变换后,各尺度小波系数的平方和可以表示信号在这个频带内的能量^[11]。对任一频带内的信号,其小波包变换结果为 $\{w(k) | k=1, 2, \dots, L, n\}$, n 为该频带信号序列长度,其能量为:

$$E = \sum_{k=1}^n |w(k)|^2 \quad (6)$$

小波包能量谱分析是将信号的能量分解在频率范围相同的不同的频率空间。根据信号在不同频段上的能量分布特点,对信号的特性进行分析,从而实现不同暂态信号的有效识别。

3.2 线路各种暂态信号的小波包能量谱分析

电力输电线路在分别遭受非故障雷击、故障性雷击和短路故障后,由于其暂态电流信号之间存在较大的差异,信号在不同频率段的能量分布也有较大的不同。利用小波包分解的方法来分析研究上述三种暂态电流信号在不同频率段的能量分布特点。考虑到需满足小波的光滑性好和支撑集短的要求,选用 DB8 小波进行 4 层小波包分解。对应 100 kHz 的采样频率,则分析的频率范围为 0~50 kHz,按照小波包频率二分原理,4 层小波包分解将整个分析频带划分为 16 个频段,每个频段的宽度为 3 125 Hz。小波包分解后各个频带的宽度相同,按照各个频带能量的比例关系

作出一系列直方图,使各直方图的高度和为 1,那么,该直方图就表示出了各频带能量在总能量中的比例关系。图 4 给出了图 3 所示的三种暂态电流信号的小波包能量谱分析结果。

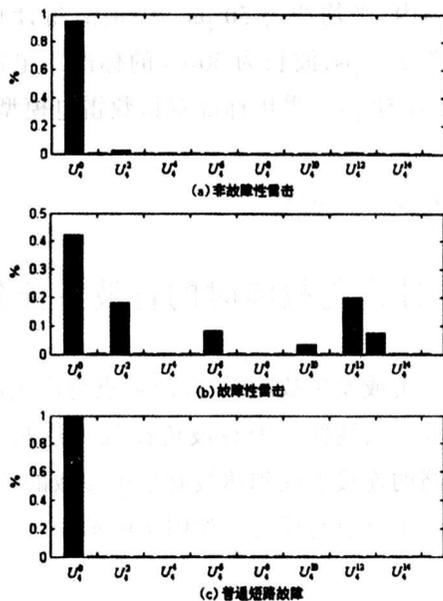


图 4 暂态电流信号的小波包能量谱

输电线路发生非故障性雷击时,行波测距装置所检测到的暂态电流包含了工频分量和雷击注入的高频分量。由于在这种情况下,雷电流幅值通常比较小,那么在 2 ms 的时间窗内,暂态电流高频分量的能量在信号总能量中所占的比重很小;而低频分量(主要是 0~3 125 Hz)则占有相当大的比重,如图 4(a)所示。

发生普通短路故障时,暂态电流主要由短路点的附加工频电源和系统的工频分量组成。此时,电流信号的低频分量的能量远远大于高频分量,从图 4(c)可看出,0~3 125 Hz 频段的能量占有总能量的 90% 以上。

发生故障性雷击后,暂态电流同时具有短路故障和非故障性雷击的特征。然而由于此时的雷电流幅值特别大,同时又伴随有雷击故障时的截波作用,这使 3 kHz 以上的高频能量占有相当大的比重,而低频段的能量所占比重有了明显减小,对于本例在 40% 左右。

大量仿真分析还发现,对于雷击线路而言,各频段能量所占的比重与雷电流幅值的大小也有一定的关系。雷电流幅值越大,高频段能量所占的比重也越

大,相应低频段能量的比重则减小。而普通短路故障的能量分布特点则基本不受接地电阻大小、故障相角和故障类型等因素的影响,低频能量所占比重都在95%以上。

通过以上分析可以看出,分析比较不同暂态信号能量在各个频段的分布情况,可以对输电线路的故障性雷击和普通短路故障进行有效识别。

4 雷电冲击与故障的识别算法

上述分析表明,在非故障性雷击、故障性雷击和普通短路故障情况下,行波测距装置检测的电流行波信号呈现不同特征,同时电流信号各频段的能量分布存在差异,据此可以识别出雷电冲击与普通线路故障,识别步骤如下:

步骤1,判别线路是否发生故障。利用双端行波测距装置,在同步采样的条件下,通过比较初始行波的到达先后时刻,判断出离扰动点近的一端母线。例如,若行波初始波头到达两端母线的时刻 $t_N > t_M$,则M端母线离扰动点近。分析近端母线处测得的电流行波信号,利用文献[12,13]介绍的比较行波波头极性的方法,判定测距装置检测到的第二个行波波头为对端母线反射的行波还是故障点的反射行波。若是对端母线的反射行波波头,则线路发生了非故障性雷击,将此雷击记录下来;若是故障点的反射行波,则线路某处发生故障,识别算法自动进入下面的步骤。

步骤2,判别线路发生故障性雷击还是普通短路故障。对所测得的电流信号进行4层小波包分解,分析信号的小波包能量谱,如果信号低频段(0~3 125 Hz)的能量在总能量中的比重 k 满足 $k < k_0$,则判定该线路发生故障性雷击,将此雷击记录下来;如果 $k > k_0$,则判定线路发生的是普通短路故障。 k_0 为设定的阈值,考虑到雷击的不确定性,不同雷击时低频能量的比重变化相对较大,而对于系统的短路故障,其低频能量所占的比重较为稳定,所以 k_0 的值应取偏大些,这里取 $k_0 = 0.9$,大量仿真表明,这个阈值是合适的。此外,分析表明选取2 ms的信号数据进行分析是合适的。若信号时间窗选得太长,则由于高频分量衰减较快,低频信号能量比重增加,将会导致识别出错。

5 仿真分析及结果

对图2系统进行EMTDC仿真,仿真数据处理通

过MATLAB完成。雷击选取不同的雷电流幅值和波形进行仿真,普通短路故障的仿真也分别在故障类型不同的条件下进行(故障过渡电阻为10,故障初始相角为30°)。

6 结论

1)现有行波测距装置能有效地检测到输电线路上的各种雷击,若其能区分雷击与普通短路故障,则可用于线路雷击数据的检测与记录。

2)与故障性雷击和短路故障不同,非故障性雷击的电流暂态行波中不存在故障点的反射行波波头;进行小波包能量谱分析后发现,普通短路故障时低频信号能量所占比发生故障性雷击时大得多。利用这两点特征,可对线路各种雷电冲击与短路故障进行识别。

3)EMTDC仿真分析表明,该方法能有效区分线路的各种雷击和短路故障,可用于行波测距装置。

参考文献

- [1] 董杏丽,葛耀中,董新洲.行波保护中雷电干扰问题的对侧[J].中国电机工程学报,2002,22(9):74-78.
- [2] 赵文光,陈家宏,张勤,王光财.新的雷电综合定位系统的定位计算[J].高电压技术,1999,25(4):66-68.
- [3] 樊灵孟,李志峰,何宏明,等.雷电定位系统定位误差分析[J].高电压技术,2004,30(7):61-63.
- [4] Dipankar C, N K Kishore, 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 [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(4):1727-1733.
- [5] Harry L, Abdul M M. GPS traveling wave fault locator systems: Investigation into the anomalous measurements related to lightning strikes [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(3):1214-1223.
- [6] Robertson D C, Camps O I, Mayer J S, et al. Wavelets and electromagnetic power system transients [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2):1050-1058.
- [7] 范春菊,张兆宁,郁惟镛.小波方法在超高压输电线路故障测距中的应用[J].电网技术,2003,27(8):50-53.
- [8] 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故障的识别[J].电力系统自动化,2004,28(18):30-35.
- [9] 张纬钺,何金良,高玉明,过电压防护及绝缘配合[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [10] 程正兴.小波分析算法与应用[M].西安:西安交通大

- 学出版社, 1998.
- [11] 段建东, 张保会, 周艺. 超高速暂态方向继电器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 7-12.
- [12] 覃剑. 输电线路单端行波故障测距的研究[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 65-70.
- [13] 董新洲, 葛耀中, 徐丙垠. 利用暂态电流行波的输电线路故障测距研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 76-80.
- [14] 覃剑, 陈祥训, 郑健超, 等. 利用小波变换的双端行波测距新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 6-10.
- [15] 李海锋, 王刚, 赵建仓. 输电线路感应雷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.
- [16] 严居斌, 刘晓川, 杨洪耕, 等. 基于小波变换模极大值原理和能量分布曲线的电力系统短期扰动分析[J]. 电网技术, 2002, 26(4): 16-18.
- 作者简介**
- 代颖(1969-), 男, 本科毕业, 工程师, 长期从事电力系统生产运行管理工作。
- 郭涌涛(1974-), 男, 本科毕业, 工程师, 长期从事线路运行与管理工作。
- 邓武军(1967-), 男, 硕士学位, 高级工程师, 长期从事电力系统研究和运行、管理。 (收稿日期: 2008-02-10)

云南变压器电气股份有限公司简介

云南变压器电气股份有限公司于1999年1月4日在云南变压器厂(建于1936年)的基础上成立, 属国有大二型企业、国家二级企业, 是国家定点生产220 kV及以下电压等级的变压器专业制造厂家之一。

云南变压器电气股份有限公司占地面积116 126 m², 现有职工750人, 其中工程技术人员113人。公司技术力量雄厚, 拥有一批从事变压器研制工作三十年以上, 经验丰富的工程师、技术人员及管理人员。

公司拥有各类设备400台(套), 其中引进的生产线和专业加工关键设备68台(套)。先进设备有: 从德国乔格公司引进的硅钢片自动纵、横剪切线和德国海德里希公司的300 m³煤油气相干燥设备、美国数控高速冲床、美国数控高速绕线机、意大利数控箔式绕线机、先进的表面处理车间、数控等离子切割机、500 t折弯机、立式绕线机、片式散热器生产线、160 t吊车、2 800 kV冲击电压发生器、2 000 kVA中频试验机组、7 500 kVA工频试验机组及其全套试验设备。

公司目前年生产能力600万kVA, 主要生产和经营10~240 000 kVA/10~220 kV电力变压器、铁道电气化用牵引变压器、特种变压器、H级绝缘干式变压器及组合式变压器, 计有十几大系列, 650多个规格容量, 全部采用国家标准和等效采用国际IEC标准。由法国TRANSFIX公司引进的专利技术, 经消化吸收, 二次开发出高原型H级绝缘“赛格迈(SECURAMID)”干式变压器, 达到国际20世纪90年代末先进水平, 投放市场后, 即获得用户的好评和欢迎, 且已通过两部鉴定。

为满足海拔4 500 m及以下高原地区的环境要求, 公司特别设计了高原型系列变压器, 该类变压器普遍运行于云、贵、川以及青海、西藏等地区, 并赢得了良好的信誉; 此外, 公司还专门研制了耐雷变压器、矿用变压器、农用变压器和最新型的S9、S10、S11系列全密封配电变压器系列产品。

云南变压器电气股份有限公司多年来十分注重计算机应用与管理, 在全国同行业中处于领先地位。目前拥有计算机100多台, CAD及CAPP已广泛应用于产品设计及工艺、企业管理信息系统, MIS已成熟应用多年, 实现了管理信息联网、自动控制、绘制图表和数据处理。目前, 公司四分之一的员工普及了计算机技术。

公司在巩固国内市场的同时, 还积极开拓国际市场, 且在多次国际招标中中标, 产品出口巴基斯坦、缅甸、越南、也门、苏丹、喀麦隆等国家和地区(其中1988年一次就出口巴基斯坦1850台小型全密封配电变压器)。

公司已取得ISO9001质量体系认证, 但此认证仅是一个起点。公司将本着“用户至上”的原则及“品质为本、不断创新、持续改进、增进顾客满意”的企业质量方针, 积极向广大用户提供技术先进、性能优良、质量可靠、价格合理的产品及周到、及时的售前、售后服务; 同时, 公司坚持以“满足客户的需求”为中心, 致力于与客户共同开发、研制新产品, 使公司的产品具有广泛的适用性, 且能更好地满足广大客户的需求; 另外, 公司也期望与广大海内外客商就产品销售、技术合作和资金引进等方面建立长期友好的合作关系。