

基于雷电记录与行波数据的雷击故障测距结果优化方法

曹璞璘¹, 束洪春¹, 马 仪², 黄 然², 董 俊³, 陈 诺¹

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 云南省昆明市 650500; 2. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南省昆明市 650217; 3. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江省哈尔滨市 150001)

摘要: 针对输电线路故障概率最高的雷击故障存在实测数据故障点反射波难以标定等困难, 提出基于行波测距数据和雷电定位系统记录等多平台来源信息的雷击故障测距结果优化方法。以实测数据中疑似故障点反射波对应的疑似故障点作为基准, 根据最近邻地闪记录与疑似故障点之间的空间距离和时差排除雷电定位系统中非故障雷击地闪记录和实测行波数据中非有效行波的干扰, 初步确定故障点位置。在此基础上, 根据最近邻地闪记录在空间位置上的趋向性, 以线路走廊走势作为基准, 计算最近邻地闪记录与线路走廊各基杆塔之间的空间趋势接近度, 以接近度作为修正系数对行波测距结果进行优化。最后, 以故障实测数据进行验证表明该方法可行、有效。

关键词: 单端行波测距; 波头标定; 信息融合; 线路走廊趋势; 雷击记录

0 引言

行波测距装置已经在 220 kV 及以上电网中得到大规模普及应用^[1], 工程实际中行波测距主要是以双端测距为主, 但是受到施工计划安排等因素影响, 大量线路仅在一端装有有效的行波测距装置。即使在线路两端都装设有行波测距装置时, 依然存在两端测距装置厂家不同、对时无法保证、通信异常导致无法调取对端数据等难以进行双端测距的情况, 因此单端测距在现场运行中能够发挥重大作用^[2-3]。

单端测距的关键难点在于故障点反射波的辨识和标定, 国内外学者对此开展了长期的研究, 文献[4-5]针对雷击故障指出了雷击点与闪络点不一致的可能性, 并从行波波头特征的角度对仿真波形进行了故障点反射波辨识。小波变换、Hilbert-Huang 变换等时频域信号处理方法^[6-7]非常适用于针对电磁仿真波形进行波头标定方面, 基于小波变换模极大值的方法已在双端行波测距和配电网故障选线等方面获得了成功应用^[8-9], 但是实测波形会受到电晕放电、波形后续振荡、电力电子开关动作等因素影响, 存在大量非行波奇异点^[10], 此类时频域处

理方法依然难以准确判定反射波波头。文献[11]针对现场实测数据具有的行波后续振荡提出了多分辨率形态梯度与相关函数结合的标定方法, 克服了行波后续振荡的问题, 但形态结构元素的选取原则尚需进一步研究。文献[12]提出了 Hough 图像处理方法进行行波标定, 取得了较好的效果, 但是在近端故障情况下依然会受到行波后续振荡的影响。根据行波反射存在的频率特征, 也有学者提出利用自然频率进行测距^[13-14], 但是该方法难以有效剔除行波后续振荡的影响。

针对行波故障测距结果优化, 目前通常是采取改变波速、分段定位等基于行波本身波速特点的改良^[15-17], 或是在具备双端测距条件下利用单端、双端多测距方式组合进行故障距离校正^[18-21]。由于行波测距计算的是电磁波在线路上的传播路程, 而线路长度会受到外部环境温度的影响, 弧垂、杆塔跳线等不确定因素也增加了行波的传播距离, 即使在找对波头的前提下, 行波测距计算结果与人工巡线结果之间往往也存在相当的偏差^[22]。单纯从行波自身的特点出发难以有效地提升实际工程中的测距精度。

中国 40%~70% 的线路跳闸都是由雷击引起^[23-24], 有效解决雷击故障情况的线路测距问题, 可以降低大部分线路故障的巡线难度。为有效监测雷电活动, 全国电网都已经建立相应的雷电定位系统 (LLS)。LLS 对所有雷击地闪均无差别记录, 而在雷雨季节, 短时间内线路走廊附近的落雷密度很高

收稿日期: 2015-07-09; 修回日期: 2015-08-24。

上网时间: 2015-12-16。

国家自然科学基金资助项目(U1202233, 51267009); 云南省重点项目(2011FA032); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20105314110001)。

且分布范围较广,但是基于工频量的传统继电保护对故障时间刻画较为粗放,难以与精确至毫秒级甚至微秒级的雷电记录进行准确比较,导致LLS中与故障距离直接相关的有效信息易被非故障雷击记录淹没,故目前对LLS的利用大都限于故障类型判别、雷电密度统计等方面,将LLS数据作为故障测距优化参考的研究很少。

本文针对电网多发的雷击故障,通过LLS记录与故障位置、故障时刻的相关性,对行波实测数据中的非行波振荡与故障点反射波进行判别,剔除行波测距虚假解并初步计算故障距离,发挥LLS记录对雷击地闪位置的重要提示作用,以线路走廊方向和地闪位置空间分布的近似程度对行波测距结果进行修正,获得更符合现场需要的测距结论。

1 典型行波实测波形分析

行波测距装置高速采集卡的采样率至少在500 kHz以上,高压线路电晕放电和通道量化噪声、变电站内电力电子器件开关、邻近线路开关动作等都会向高速采集卡引入高频噪声。非故障高频噪声的引入增加了波形的奇异点,加之雷电流在到达母线量测端后会受到变电站内多种一次设备等杂散电容的影响,致使波形会附加多种突变。

图1为本文研制的行波测距装置所记录的一次雷击故障波形,故障发生于2013年9月12日,由图1可以看出,雷击故障首波头非常明显,易于标定,但是后续多个突变存在一定的相似性,即使利用一定的滤波手段,也不易判别出明显的故障点反射波。

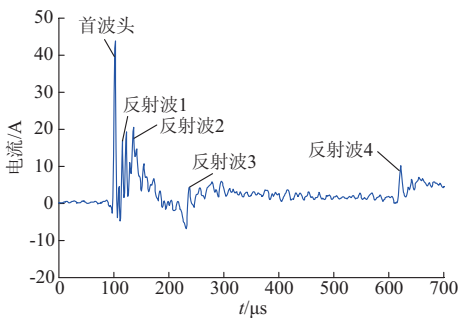


图1 2013年9月12日实测雷击故障行波数据
Fig.1 Measured travelling wave of a lightning induced fault on 2013-09-12

图1所示波形图中,反射波1、反射波2、反射波3、反射波4均为疑似故障点反射波,通过小波模极大值几乎无法自动选取故障点反射波,即使专业人员进行波头人工选取,若经验不够充分,也易在反射波3和反射波4之间难以抉择。根据现场巡线人

员的巡线结果,反射波4为故障点反射波,反射波3为对端母线反射波,而反射波1和反射波2为行波浪涌后续振荡,此类行波浪涌后续振荡可能为互感器传变频率特性中的极点引起,随行波浪涌的到达而出现,难以有效消除。

图2所示为发生于2014年7月30日的某线路雷击故障,初始行波浪涌后存在大量疑似行波浪涌,且存在等间隔分布的特征,极易将反射波1当成故障点反射波,根据现场巡线人员的巡线结果,故障点反射波应为图2所示反射波5。

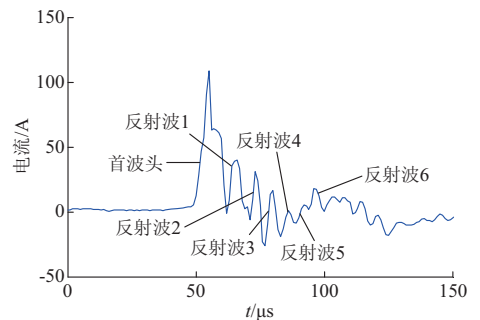


图2 2014年7月30日实测雷击故障行波数据
Fig.2 Measured traveling wave of a lightning induced fault on 2014-07-30

对图1和图2所示波形进行小波变换模极大值处理,所选小波基为3次B样条小波,所得结果如图3所示。

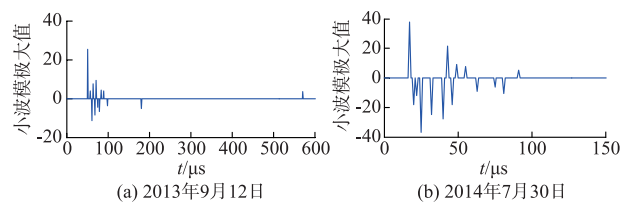


图3 实测波形小波模极大值
Fig.3 Wavelet modulus maximum of measured waves

经过小波模极大值变换后,大量模极大值点以等间隔分布,难以通过小波模极大值自动识别出故障点反射波。由上图可知,故障初始行波浪涌后的大量疑似行波为行波后续振荡,造成行波后续振荡的原因较为复杂,电流互感器的行波传变特性、二次电缆长度及负荷特性密切相关^[10],在本例中可能为互感器频率特性中存在极点,而行波浪涌频率频谱覆盖了互感器频率特性极点对应的自由振荡频率,导致行波到达后会出现后续振荡。

即使在波形后续振荡较少的情况下,若故障线路对端母线为单出线形式,对端母线反射波与故障点反射波极性相同,单端测距结果是否准确难以判断,双端测距又会受到行波波头在单出线一侧波形

较为微弱,波到时刻不易标定的因素影响。虽然变电站出线数量能够通过前期调研获知,但是在系统断点转移、线路检修开断导致个别变电站短时间内出现母线单出线形式的情况下,若未能及时对行波测距配置文件进行修改,依然会出现故障点反射波误判,因此单纯采用行波浪涌极性、幅值等进行行波波头的自动判别存在一定盲目性。若能够有其他辅助信息对故障距离进行判别,则能够对雷击故障情况下的故障点反射波进行判别,得到更为可信的故障测距结果。

2 雷击故障实测数据的故障点反射波搜索

对于雷击导线、杆塔或避雷线引起的闪络故障,除行波测距装置采集的雷击故障行波外,LLS 也会记录下相应的雷击地闪,理论上,行波测距所得故障距离、波到时刻应与雷击地闪记录的时间、位置存在较为准确的对应关系,但是在实际工程中,受到全球定位系统(GPS)对时误差、线路走廊地形起伏、电磁波波速不恒定等不利因素的影响,二者之间会产生不同程度的偏差。尤其是在山地地形区域,若地闪位置与雷电探测站之间有高山或高建筑物阻挡,雷击地闪产生的电磁波在传播过程中需要绕过阻挡物才能到达雷电探测站^[25]。

在雷雨季节,LLS 可能在短时间内记录多次雷击地闪,因此,无论是雷击记录还是行波波行都存在不反映故障点信息的“虚假解”,但是行波波行中真实解的时间与位置信息应与造成故障的雷击记录信息存在时间与空间上的关联性,除直接造成闪络故障的地闪记录外,其余地闪记录皆与闪络故障位置或故障发生时刻存在较大差异。根据这一特点,可以利用雷电记录与行波计算结果在空间和时间方面的关联性剔除 LLS 在故障发生前后记录的大量非故障地闪记录以及行波数据中的非故障点反射波。

2.1 计算疑似故障距离与杆塔坐标归算

行波测距结果仅为疑似故障点距量测端的距离,故需将故障距离折算为可能的故障位置才能与 LLS 记录的地闪信息进行对比。设线路杆塔坐标和海拔为 $[(L_{on1}, L_{at1}, h_1), (L_{on2}, L_{at2}, h_2), \dots, (L_{onN}, L_{atN}, h_N)]$, 其中, N 为故障线路杆塔总数, L_{on}, L_{at}, h 分别为经度、纬度和海拔,根据式(1),可以计算出第 j 基杆塔与第 $j+1$ 基杆塔之间的距离。

$$d_{j,j+1} = \sqrt{R^2 \arcsin^2(\sqrt{a_{j,j+1}^2 + b_{j,j+1}^2}) + h_{j,j+1}^2} \quad (1)$$

$$a_{j,j+1} = \sin^2\left(\frac{L_{atj+1} - L_{atj}}{2}\right) \quad (2)$$

$$b_{j,j+1} = \cos(L_{atj}) \cos(L_{atj+1}) \sin^2\left(\frac{L_{onj+1} - L_{onj}}{2}\right) \quad (3)$$

$$h_{j,j+1} = h_j - h_{j+1} \quad (4)$$

式中:下标 j 为第 j 基杆塔; R 为地球半径,本文选取 $R=6\,371.004$ km。

第 j 基杆塔与线路量测端之间的距离即为:

$$l_j = \sum_{n=1}^{j-1} d_{n,n+1} \quad j > 1 \quad (5)$$

理论上,雷击故障点通常都是线路绝缘子被击穿而引起的,闪络故障位置应当与线路杆塔坐标相重合,但是由于行波测距装置采样率限制以及行波精确波速的不确定性,计算得到的故障点距离往往位于两个杆塔之间,故需对行波测距结果进行近似处理,假设行波测距所得故障距离 x 位于第 j 基杆塔和第 $j+1$ 基杆塔之间,即

$$l_j < x < l_{j+1} \quad (6)$$

可以通过判断 $x - l_j$ 和 $l_{j+1} - x$ 的大小,将距离计算所得故障点最近的杆塔设为疑似故障点,疑似故障点的坐标即为该杆塔坐标。

2.2 包含多次回击的雷击地闪接地位置修正

LLS 通过多个观测站所测电磁波波到时刻或波到方向对地闪位置进行定位。由于地闪产生的电磁波在传播过程中会受到地势起伏、高建筑物遮挡等多种地形影响,LLS 在山地的定位精度较之平原地区有所下降,加之多点时差法或行差法对多点 GPS 同步要求极高,导致对一次雷击的多次回击定位结果可能存在较大差异。

国内外学者通过高速光学记录设备对雷电发展过程展开了大量研究,雷电回击过程存在后续回击产生新雷电通道或一次回击具有多个接地点的情况^[26-28],使得一次雷击所产生的接地点准确位置更加难以获取。根据文献^[29]的报道,在一次雷击具有多个雷电通道接地点的情况下,相邻接地点之间的距离相差很小,不超过 500 m。而在后续回击产生新雷电通道情况下,偏差较大的情况发生次数很少。

鉴于初次地闪接地点与后续回击接地点之间存在空间位置应较为相近的特点,针对包含多次回击的雷击地闪记录中个别接地点位置与其他位置相差较大的问题,可以通过加权质心定位方法^[30]对同一次雷击中与其他回击接地点位置偏差较大的回击接地点的位置进行一定修正。

设 LLS 对一次雷击过程中多次回击的位置记录为 $[(L_{on,rel}, L_{at,rel}), (L_{on,re2}, L_{at,re2}), \dots, (L_{on,reM}, L_{at,reM})]$, 其中 M 为回击次数。根据式(7)求取每个回击接地点位置之间的空间距离为:

$$l_{re}(j,k) = \sqrt{R \arcsin(\sqrt{a_{j,k}} + b_{j,k})} \quad (7)$$

式中: $0 < j \leq M, 0 < k \leq M, j \neq k; a_{j,k}$ 和 $b_{j,k}$ 参考式(2)、式(3)。

根据每个回击接地点之间的空间位置求取总偏差系数 ϵ 以及两个接地点之间距离对总偏差系数的贡献程度 $\epsilon_{j,k}$ 为:

$$\epsilon = \sum_{k=1}^M \sum_{j=1, j \neq k}^M l_{re}(j,k) \quad (8)$$

$$\epsilon_{j,k} = \frac{l_{re}(j,k)}{\epsilon} \quad (9)$$

以两个接地点之间距离对总偏差系数的贡献程度 $\epsilon_{j,k}$ 作为权重因子 ω_k 的组成部分,根据加权质心定位方法对部分定位结果进行修正,修正后的坐标 ($L_{on, revise}, L_{at, revise}$) 为:

$$L_{on, revise} = \frac{\sum_{k=1}^M \omega_k L_{onk}}{\sum_{k=1}^M \omega_k} = \frac{\sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^M (1 - \epsilon_{j,k}) L_{onk}}{\sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^M (1 - \epsilon_{j,k})} \quad (10)$$

$$L_{at, revise} = \frac{\sum_{k=1}^M \omega_k L_{atk}}{\sum_{k=1}^M \omega_k} = \frac{\sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^M (1 - \epsilon_{j,k}) L_{atk}}{\sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^M (1 - \epsilon_{j,k})} \quad (11)$$

2.3 非故障点反射波排除

将行波数据中的疑似故障点反射波按波到时刻进行升幂排序,得到疑似波头时间序列 $t = [t_1, t_2, \dots, t_n]^T$,根据各个疑似故障点反射波与初始行波浪涌的时间差计算得出疑似故障距离向量 \mathbf{x} 为:

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T = \frac{|t_0 - t|v}{2} \quad (12)$$

式中: v 为行波波速。

根据式(12)将疑似故障距离向量换算为疑似故障点位置坐标 (L_{on}, L_{at}) = $[(L_{on1}, L_{at1}), (L_{on2}, L_{at2}), \dots, (L_{onn}, L_{atn})]^T$ 。

理论上,雷击故障情况下,LLS的地闪记录应与杆塔坐标相重合,但是雷电定位精度与地面传感器的角度分辨率和时域分辨率有关,LLS记录的雷击点位置总是与真实雷击点位置之间存在一定偏差,但是与行波测距的偏差不同,LLS的偏差是与地理位置相关的邻域,而非如行波测距的偏差一样被限制在线路上。假设LLS在各个方向上的偏差可能性相同,则其偏差范围为真实雷击点附近的圆域,而圆域的半径大小与LLS定位精度有关。

以第 j 个疑似故障点的坐标作为几何中心,在

LLS中搜索半径 R_{adius} 范围内的所有雷击地闪记录集合 L_{Rj} ($j = 1, 2, \dots, n$),得到结果如图4所示。图4中,绿色线条代表线路走廊,每个黄色点代表一次雷击记录,褐色圆域代表疑似故障点及其搜索半径 R_{adius} 的范围。

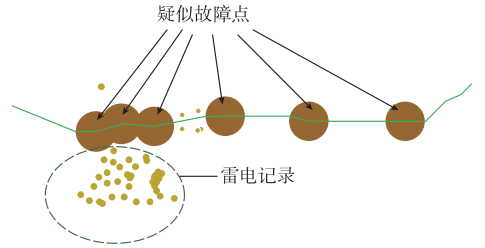


图4 雷电记录集合
Fig.4 Lightning record set

根据 L_{Rj} 是否为空集对疑似故障点坐标进行初步筛选,若 $L_{Rj} = \emptyset$,则剔除第 j 个疑似故障点,若所有 L_{Rj} 都为 \emptyset ,则表明测距结果与LLS记录之间存在较大差距,故障可能为非雷击性故障,不适宜进行测距结果与LLS之间的数据融合。将 L_{Rj} 中记录的落雷时刻,与行波测距装置记录的故障初始行波到达时刻进行比较,得到时间差绝对值序列 $|\Delta t_{jk}|$ ($k = 1, 2, \dots, N_j, N_j$ 为第 j 个疑似故障点所包含的地闪记录个数)。计算得到疑似故障点时间差绝对值序列 $|\Delta t_{jk}|$ 的最小值序列:

$$\Delta t_{minj} = \min(|\Delta t_{jk}|) \quad (13)$$

对每个非空 L_{Rj} 集合的疑似故障点的 Δt_{minj} 进行比较,提取 Δt_{minj} 的最小值作为最近邻地闪记录,即

$$\Delta t_{least} = \min(\Delta t_{minj}) \quad (14)$$

Δt_{least} 对应的疑似故障点即确定为行波测距参考故障点。若多个疑似故障点对应的 Δt_{least} 相同,则选取距离雷电地闪记录坐标最近的疑似故障点作为行波测距参考故障点。为防止误选与行波到达时间相差较大的雷电记录,令

$$\begin{cases} \Delta t_{least} > \eta & \text{不能进行数据融合} \\ \Delta t_{least} \leq \eta & \text{可以进行数据融合} \end{cases} \quad (15)$$

式中: η 为相应阈值。

由于LLS与行波测距装置都是通过GPS实现授时,时间误差主要来源于不同GPS授时设备的卫星搜寻能力、时间显示方式、GPS设备内部计时装置精度等,在授时条件良好的情况下,不同GPS授时设备之间的差距小于1min。

2.4 雷击点与闪络点不一致情况讨论

雷电绕击输电线路时,若雷击点耐雷水平超过雷击过电压,则雷电冲击不会在雷击点处造成闪络,注入导线的雷电流将向线路两侧传播,当沿线绝缘

子存在薄弱部分,则沿线传播的雷电流将击穿绝缘薄弱点,造成雷击点与闪络点不一致情况。由于冲击电晕和线路参数依频特性的影响,以高频分量为主的雷电流行波衰减速度快、畸变程度高,能够在传播一段时间后又造成绝缘子闪络的概率较低^[31]。目前有文献报道的雷击点与闪络点不一致仅相差1 km左右^[32],对测距结果影响不大,由此产生的测距误差在工程可接受范围内。

3 基于地闪记录与线路走廊趋势接近度的测距结果优化

由于LLS与行波测距装置的定位结果都带有固有误差,而二者对雷击线路故障的刻画是从不同视角对同一事件的刻画结果,因此,LLS与行波测距装置之间的数据融合可以视为单一辐射源多测点定位信息之间的偏差校正,而造成雷击故障的雷击一定是击中了导线或者杆塔而导致闪络故障,雷击点准确位置应该位于线路走廊上,故该问题又可以视为带有几何路径限制的多测点定位信息融合定位^[33-34]。

地闪记录可能出现的范围与真实雷击点位置有关,对于某次独立地闪记录,难以判断其与真实雷击点位置的误差大小,但是若以空间坐标中固定的线路杆塔坐标位置作为权重,则可以在一定程度上对地闪位置的准确性进行判断。若对地闪记录进行坐标变换,分为沿线路走廊趋势方向与沿线路走廊法线方向,地闪记录在法线方向的偏离程度越大,地闪记录位置的准确程度越低,可信度越差,反之,地闪记录在法线方向的偏离程度越小,虽然不能证明地闪记录与雷击点更接近,但是能够说明地闪记录与线路趋势变化更为接近,可信度较高。若利用此偏差在经度和纬度上的偏向性及其与线路走向进行信息融合定位,则可以对行波测距结果进行一定程度地校正。

融合定位方法在雷达探测、卫星定位等方面应用较为广泛,根据使用目的和观测点数量、特征方面的不同,其手段包括基于概率密度、误差分布等多种统计学方法进行定位精度提升。本文利用线路走廊方向、最近邻地闪记录位置、行波测距参考故障点之间的相对位置、方向的关系进行信息融合,对行波测距得到的初步定位结果进行修正。

设与LLS记录的雷击点距离最近的杆塔号为 N_g ,而行波测距装置计算得到的参考故障点所在杆塔号为 M_g ,当 $|N_g - M_g| \leq 1$ 时,LLS记录的雷击点与行波测距计算的参考故障点已经非常相近,无需进行校正。当 $|N_g - M_g| > 1$ 时,构造最近邻地闪

记录至行波测距参考故障点的空间位置向量 $\mathbf{r}_{\text{lightning}}$,以及 $N_g \sim M_g$ 号各基杆塔至行波测距参考故障点的空间位置向量矩阵 \mathbf{r} ,如图5所示。

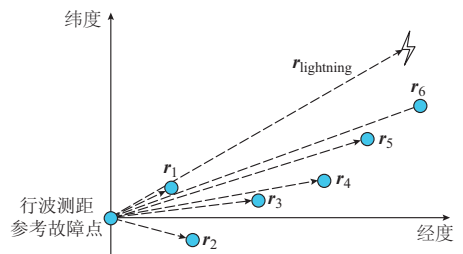


图5 投影坐标图

Fig.5 Projection coordinate system

求得 \mathbf{r} 和 $\mathbf{r}_{\text{lightning}}$ 的内积为:

$$\varphi = (\mathbf{r}, \mathbf{r}_{\text{lightning}}) = [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \cdots \ \mathbf{r}_{|M_g - N_g|}]^T \mathbf{r}_{\text{lightning}} \quad (16)$$

计算各基杆塔空间位置向量 \mathbf{r} 与最近邻地闪记录位置向量的接近度 \mathbf{p} 为:

$$\mathbf{p} = [p_1 \ p_2 \ \cdots \ p_{|M_g - N_g|}]^T = \frac{\varphi}{|\mathbf{r}_{\text{lightning}}|^2} \quad (17)$$

式中: $0 \leq p_i \leq 2 (i = 1, 2, \dots, |N_g - M_g|)$,当 $p_i = 1$ 时,最近邻地闪记录与杆塔坐标重合,当 $p_i = 2$ 时,最近邻地闪记录位于第 i 基杆塔与行波测距参考故障点之间。

接近度的大小体现了杆塔与最近邻地闪记录相对于行波测距参考故障点的相对位置,若 $p_i > 0$,则记录的雷击点与杆塔相对于行波测距参考故障点大致方向相同,反之,则记录的雷击点与杆塔相对于行波测距参考故障点大致方向相反。根据式(18)求得 p_{\max} 。

$$p_{\max} = \|\mathbf{p}\|_{\infty} \quad (18)$$

利用接近度中的最大值 p_{\max} 作为测距结果优化的修正系数,设 p_{\max} 对应杆塔到行波测距参考故障点之间的线路长度 l_{fl} ,根据式(19)对疑似故障距离进行修正。

$$x_{\text{corrected}} = \sum_{n=1}^{j-1} d_{n,n+1} \pm p_{\max} l_{fl} \quad (19)$$

式中: $p_{\max} l_{fl}$ 的正负号与行波测距结果和 p_{\max} 对应杆塔之间的相对位置有关。

根据式(19)将修正后的故障距离调整至最近的杆塔上,此杆塔即为经过修正后的故障定位结果。包含雷击故障点反射波与测距结果优化的方法流程图如图6所示。

p_{\max} 反映的其实是线路走廊趋势与地闪记录之间的接近程度,向量 \mathbf{p} 中的元素大小反映了接近度大小。在行波测距结果、地闪记录与真实故障点都

相差不大的情况下,即使行波测距结果位于地闪记录与真实故障点连线之间,由于二者与真实故障点之间相差不大, l_{fi} 必定很小,与 p_{max} 相乘后,误差往往小于一个档距,经过故障杆塔归算以后,测距结果初步确定的故障杆塔不会改变。在行波测距结果与真实故障点都相差不大而地闪记录与真实故障点相差较大的情况下,鉴于地闪记录误差在经度和纬度上趋向于均匀分布的特点,地闪记录与线路走廊趋势接近的概率很小, p_{max} 的值通常很小,相应的 $p_{max}l_{fi}$ 也较小,对行波测距结果的劣化不会很大。在地闪记录与真实故障点都相差不大而行波测距结果与真实故障点相差较大的情况下, p_{max} 的值较大, $p_{max}l_{fi}$ 的值也会随之增大,对行波测距结果有明显的优化作用。

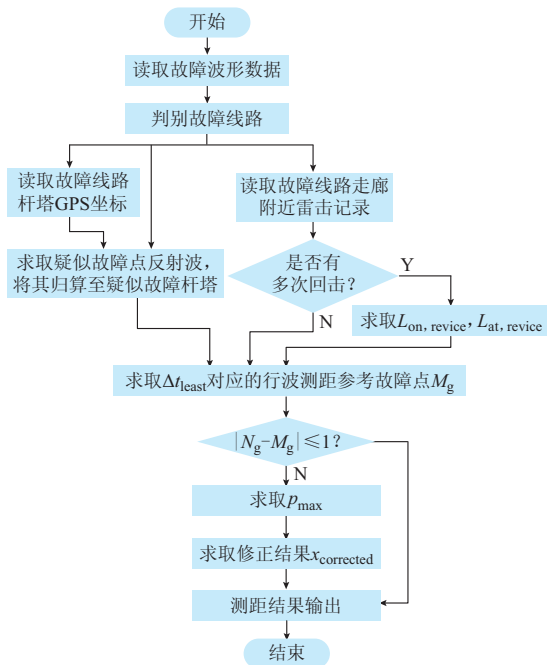


图6 本文算法流程图

Fig.6 Flow chart of the proposed algorithm

4 应用实例

现以图1所示的故障波形为例,对本文所提出的方法进行验证,计算疑似故障点对应的疑似故障距离,经验波速定为 2.98×10^8 m/s,根据式(1)至式(6)折算为疑似故障点,每个疑似故障点在半径为 R 的圆内包含的雷击地闪记录数量及相应 Δt_{min} 如表1所示, $R=5$ km, GPS授时设备的误差阈值 $\eta=30$ s。

第4个疑似故障点反射波对应的 Δt_{min} 最小,将第4个疑似故障点坐标作为行波测距参考故障点, Δt_{min} 对应的地闪记录为最近邻地闪记录。最近邻

地闪记录的坐标为(99.624 35, 25.344 65), $r_{lightning}$ 为(-0.010 689, 0.000 361),与其最接近的杆塔为151号杆塔,则151, 152, 153号各基杆塔至行波测距参考故障点的空间位置向量分别为(-0.007 883, -0.002 914), (-0.004 886, -0.001 797), (-0.000 917, -0.000 256),接近度分别为0.727, 0.451, 0.085。

表1 疑似故障点包含的地闪记录数量及相应 Δt_{min}
Table 1 Cloud-to-ground flash records of suspected fault positions and Δt_{min}

标号	故障距离/ km	疑似故障点 坐标(杆塔号)	包含地闪 记录数量/个	$\Delta t_{min}/$ ms
1	2.235	6号	0	
2	5.215	14号	0	
3	20.264	47号	1	602
4	77.480	154号	4	1

可知, $p_{max}=0.727$, 151号杆塔与154号杆塔之间距离 $l_{fi}=857.28$ m, 计算得到 $x_{corrected}=77.092$ km, 修正后的故障定位结果为第152号杆塔。根据现场巡线人员的巡线结果,在第150号杆塔发现绝缘子被击穿痕迹,与未进行测距结果优化的结果相比,经过优化的测距结果和实际巡线结果更接近。

为进一步验证测距结果优化方法的可靠性,对一些实际工程中测距结果与巡线结果相差较大的雷击故障历史记录进行测距结果优化,所得结果如附录A表A1所示。

可以看出,由于引入了LLS地闪记录作为行波测距结果修正,本文所提方法能大幅提升与雷击故障的单端自动测距可靠性,利用地闪记录剔除了测距结果伪根,避免了雷击故障的测距结果谬误。测距优化结果更加趋近于巡线呼称距离,降低了因波速、弧垂、温度等现场不确定因素造成的行波测距误差过大的概率。

5 结论

1) 在实测数据中,受到现场电磁噪声等因素的干扰,故障点反射波波头不易准确标定;现场线路投切时刻不确定导致故障时刻线路的配置文件难以及时更新,单纯利用极性或幅值难以判定故障点反射波。

2) 以初始行波极性相同的突变作为疑似故障点反射波,计算得到相应的疑似故障距离,搜索疑似故障点附近一定范围内的雷击地闪记录,求取满足最小时间差和空间位置最近邻的地闪记录,从LLS和行波波形的多个可能解当中求取近似解,可以

排除 LLS 记录的大量非故障雷击并剔除非故障点反射波。

3) 以行波测距参考故障点与最近邻地闪记录之间的线路走廊趋势作为基准, 以接近度判断最近邻地闪记录位置与线路走廊趋势之间的吻合程度, 以接近度大小作为修正系数, 对行波测距结果进行修正, 利用实测数据进行验证, 证明了该方法在实际中具有可行性。

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

参考文献

- [1] 覃剑, 葛维春, 邱金辉, 等. 输电线路单端行波测距法和双端行波测距法的对比[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 92-95.
QIN Jian, GE Weichun, QIU Jinhui, et al. Study on single terminal method and double terminal method of traveling wave fault location in transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(6): 92-95.
- [2] 张峰, 梁军, 李建超, 等. 基于初始反极性行波检测的单端故障测距算法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 108-113.
ZHANG Feng, LIANG Jun, LI Jianchao, et al. Single ended fault location algorithm based on detection of initial reverse polarity traveling wave [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 108-113.
- [3] 张峰, 梁军, 丛志鹏, 等. 考虑透射模量的初始反极性行波的辨识方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(10): 108-112.
ZHANG Feng, LIANG Jun, CONG Zhipeng, et al. An identification method for initial reverse polarity traveling wave considering module traveling wave coupling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 108-112.
- [4] 覃剑, 葛维春, 邱金辉, 等. 影响输电线路行波故障测距精度的主要因素分析[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 28-35.
QIN Jian, GE Weichun, QIU Jinhui, et al. Analysis on main influencing factors for transmission lines fault location precision based on traveling wave[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 28-35.
- [5] 郭宁明, 覃剑. 输电线路雷击故障情况下的短路点定位方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 74-77.
GUO Ningming, QIN Jian. Locating method of short-circuit for transmission lines under lightning stroke fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 74-77.
- [6] 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.
DONG Xinzhou, GE Yaozhong, XU Bingyin. Research of fault location based on current travelling waves[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 76-80.
- [7] 张小丽, 曾祥君, 马洪江, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的电网故障行波定位方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 64-68.
ZHANG Xiaoli, ZENG Xiangjun, MA Hongjiang, et al. Power grid faults location with traveling wave based on Hilbert-Huang transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 64-68.
- [8] 王志华, 尹项根, 张小波, 等. 利用 CVT 捕捉电压行波实现故障测距的分析与实践[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 63-68.
WANG Zhihua, YIN Xianggen, ZHANG Xiaobo, et al. Analysis and practice of fault location by voltage traveling wave of CVT [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(22): 63-68.
- [9] 高立克, 丁涛, 俞小勇, 等. 小电流接地系统行波法选线的 RTDS 测试可行性分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 113-118.
GAO Like, DING Tao, YU Xiaoyong, et al. Feasibility analysis using RTDS for line selecting based on traveling wave method in neutral un-effectual grounded systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 113-118.
- [10] 甄威, 陈卫, 陈平, 等. 输电线路行波仿真方法及行波试验技术[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 74-79.
ZHEN Wei, CHEN Wei, CHEN Ping, et al. Simulation method and test technology of transmission line traveling wave [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 74-79.
- [11] 刘万超, 李玮, 孙佳佳, 等. 基于多分辨形态梯度-相关函数综合测距算法的单端行波故障测距[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 225-229.
LIU Wanchao, LI Wei, SUN Jiajia, et al. Single terminal traveling wave fault location based on fault location algorithm integrating multi-resolution morphological gradient with correlation function [J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 225-229.
- [12] 张广斌, 束洪春, 于继来. 基于 Hough 变换直线检测的行波波头标定[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 165-173.
ZHANG Guangbin, SHU Hongchun, YU Jilai. Surge identification for travelling wave based on straight lines detection via Hough transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 165-173.
- [13] 徐高, 龚庆武, 李勋, 等. 一种利用行波自然频率的杆塔故障定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 78-82. DOI: 10.7500/AEPS20130531008.
XU Gao, GONG Qingwu, LI Xun, et al. A novel method of tower fault location using natural frequencies of traveling wave [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5): 78-82. DOI: 10.7500/AEPS20130531008.
- [14] 廖凯, 何正友, 李小鹏. 基于行波固有频率的高压直流输电线路故障定位[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 104-109.
LIAO Kai, HE Zhengyou, LI Xiaopeng. Fault location of HVDC transmission line based on the natural frequency of traveling wave [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 104-109.
- [15] 吴刚, 林湘宁. 通用行波测距修正方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 142-149.
WU Gang, LIN Xiangning. Generalized amending method on fault location algorithms based on traveling wave [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 142-149.
- [16] 刘永浩, 蔡泽祥, 徐敏, 等. 基于波速优化与模量传输时间差的直流线路单端行波测距新算法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(10): 72-76.

- LIU Yonghao, CAI Zexiang, XU Min, et al. Single-end fault location algorithm based on traveling wave speed optimization and modal propagation time difference for DC transmission line [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 72-76.
- [17] 张峰,梁军,车仁飞,等.基于行波理论的先进故障测距系统实现算法[J].电力自动化设备,2012,32(8):54-59.
ZHANG Feng, LIANG Jun, CHE Renfei, et al. Advanced algorithm of fault location system based on traveling wave theory [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8): 54-59.
- [18] 于桂音,陈平,徐丙垠,等.基于行波原理的优化组合故障测距技术[J].继电器,2008,36(9):11-15.
YU Guiyin, CHEN Ping, XU Bingyin, et al. An optimal combined transmission line fault location technique based on travelling wave principles[J]. Relay, 2008, 36(9): 11-15.
- [19] 贾惠彬,赵海锋,方强华,等.基于多端行波的配电网单相接地故障定位方法[J].电力系统自动化,2012,36(2):96-100.
JIA Huibin, ZHAO Haifeng, FANG Qianghua, et al. A single-phase earth fault location method for distribution network based on multi-terminal traveling wave [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 96-100.
- [20] 王阳,曾祥君,黎锐峰,等.基于图论的配电网故障行波定位新算法[J].电力系统自动化,2012,36(18):143-147.
WANG Yang, ZENG Xiangjun, LI Ruifeng, et al. A traveling wave fault location algorithm for distribution network based on graph theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 143-147.
- [21] 周会峰,曾祥君,邓丰,等.输电线路故障行波网络定位新方法[J].电力系统自动化,2013,37(19):93-99.
ZHOU Huifeng, ZENG Xiangjun, DENG Feng, et al. A new network-based algorithm for transmission line fault location with traveling wave [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(19): 93-99.
- [22] 张广斌.实测数据环境下的输电线路行波故障测距关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [23] 陈家宏,张勤,冯万兴,等.中国电网雷电定位系统与雷电监测网[J].高电压技术,2008,34(3):425-431.
CHEN Jiahong, ZHANG Qin, FENG Wanxing, et al. Lightning location system and lightning detection network of China power grid[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 425-431.
- [24] 周文俊,喻剑辉,陈荣,等.雷电流全参数及避雷器状态在线监测研究[J].高电压技术,2008,34(10):2054-2058.
ZHOU Wenjun, YU Jianhui, CHEN Yong, et al. Research on whole parameters of lightning current waveform and on-line monitoring of arresters[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(10): 2054-2058.
- [25] 胡志祥.雷电定位算法和误差分析理论研究[D].武汉:华中科技大学,2012.
- [26] 孔祥贞,鄒秀书,陈成品,等.回击过程中具有多个接地通道闪电的研究[J].高电压技术,2005,31(4):61-63.
KONG Xiangzhen, QIE Xiushu, CHEN Chengpin, et al. Researches on the cloud-to-ground lightning with multiple-grounding-point[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(4): 61-63.
- [27] 李俊,张义军,吕伟涛,等.一次多回击自然闪电的高速摄像观测[J].应用气象学报,2008,19(4):401-411.
LI Jun, ZHANG Yijun, LÜ Weitao, et al. Observation of a natural cloud-to-ground lightning with multiple return strokes [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19(4): 401-411.
- [28] 张义军,吕伟涛,郑栋,等.负地闪先导一回击过程的光学观测和分析[J].高电压技术,2008,34(10):2022-2029.
ZHANG Yijun, LÜ Weitao, ZHENG Dong, et al. Optical observations and analysis of leader-return stroke processes involved in negative cloud-to-ground lightning flashes[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(10): 2022-2029.
- [29] THOTTAPPILLIL R, RAKOV V A, UMAN M A, et al. Lightning subsequent-stroke electric field peak greater than the first stroke peak and multiple ground termination[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1992, 97(7): 7503-7509.
- [30] 杨新宇,孔庆茹,戴湘军.一种改进的加权质心定位算法[J].西安交通大学学报,2010,44(8):1-4.
YANG Xinyu, KONG Qingru, DAI Xiangjun. An improved weighted centroid location algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(8): 1-4.
- [31] 吴昊.基于线路雷电流波形特征的雷击故障定位及雷电参数反演研究[D].重庆:重庆大学,2014.
- [32] 郭宁明,覃剑.输电线路雷击故障情况下的短路点定位方法[J].电力系统自动化,2009,33(10):74-77.
GUO Ningming, QIN Jian. Locating method of short-circuit point for transmission lines under lightning stroke fault [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 74-77.
- [33] 刘海军,柳征,姜文利,等.基于星载测向体制的辐射源定位融合算法[J].系统工程与电子技术,2009,31(12):2875-2878.
LIU Haijun, LIU Zheng, JIANG Wenli, et al. Integration algorithm of emitter position based on satellites direction-finding systems [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(12): 2875-2878.
- [34] 梁涛,陈雄,孔庆生.移动节点路径规划和几何限制的无线传感器网络定位算法[J].信息与控制,2011,40(5):577-582.
LIANG Tao, CHEN Xiong, KONG Qingsheng. Localization algorithm based on mobile node path planning and geometric constraint for wireless sensor network [J]. Information and Control, 2011, 40(5): 577-582.
- 曹璞璘(1986—),男,博士,主要研究方向:故障测距与新型继电保护。E-mail: 200530181060@sina.com
束洪春(1961—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:故障测距与新型继电保护。E-mail: kmshe@sina.com
马 仪(1969—),男,高级工程师,主要研究方向:输电线路建设及安全运行。

(编辑 万志超)

Optimization of Lightning Induced Fault Location Based on Information Fusion of Traveling Wave Data and Lightning Record

CAO Pulin¹, SHU Hongchun¹, MA Yi², HUANG Ran², DONG Jun³, CHEN Nuo¹

1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
2. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co. Ltd., Kunming 650217, China;
3. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The lightning induced fault which is the most common fault reason may cause difficulty in detecting reflex wave and other problems. This paper proposes a new type of algorithm aimed at optimizing the fault location results by lightning location system record and traveling wave data. The suspected distance correspond to suspected reflex wave is assumed to be a kind of standard, so the nearest cloud-to-ground flash record is searched from all suspected fault locations calculated by suspected reflected surge from the fault point from measured data for removing the pseudo-root of fault location and finding the seemingly traveling wave fault location. According to the line direction of line corridor and the tendency of the nearest cloud-to-ground flash record, the space trend approach index of nearest cloud-to-ground flash record and tower is calculated, and the space trend approach index is used to optimize the traveling wave fault location result. The feasibility of the proposed method is validated by the measured traveling records.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1202233, No. 51267009), Key Projects of Yunnan Province (No. 2011FA032) and Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (SRFDP) of China (No. 20105314110001).

Key words: single-ended travelling wave fault location; wavefront detection; information fusion; direction of line corridor; lightning record