

[输电线路]

架空输电线路雷击故障查找与分析

文/曹明宇 周 能 肖 尧
国网湖南超高压输电公司

分析湖南某公司所辖500 kV及以上线路的跳闸情况，可见雷击为架空输电线路跳闸的首要原因。将故障分析中的若干理论性分析、故障查找过程和故障相关计算进行简要探讨，重点包括故障定性、故障测距、雷电定位、故障查找、耐雷水平计算分析和反向排除分析等方面。

2012年至今，湖南某公司所辖500 kV及以上线路共计发生跳闸174次，其中雷击跳闸104次，占总跳闸次数的59.8%，可见雷击为架空输电线路跳闸的首要原因。本文从故障定性、故障测距、雷电定位、故障查找、耐雷水平计算分析及反向排除分析等方面探讨架空输电线路雷击故障的查找与分析问题。

雷击故障定性

根据故障录波图可以分析出故障属于金属性接地还是非金属性接地（高阻性接地）。故障相发生故障后一个周波内，二次电压下降较多、残压较低，同时二次电流上升较多的，为金属性接地故障；反之二次电压残压较高、二次电流上升较多的，为高阻性接地故障。雷击故障发生时空气间隙被击穿，发生电弧短路，因此表现为金属性或接近金属性接地（风偏跳闸也表现为金属性接地），且故障持续时间短，波形基本无毛刺。根据以上条件，可以初步确定故障是否为雷击或风偏跳闸。图1为典型的金属性接地故障录波图，故障B相二次电压（042通道）在故障后骤降，残压仅约40%，持续约2个周期后突降到0；图2为典型的高阻性接地故障录波图，故障相二次电压（3通道）在故障持续近4个周期后呈收敛性缓慢降至0。

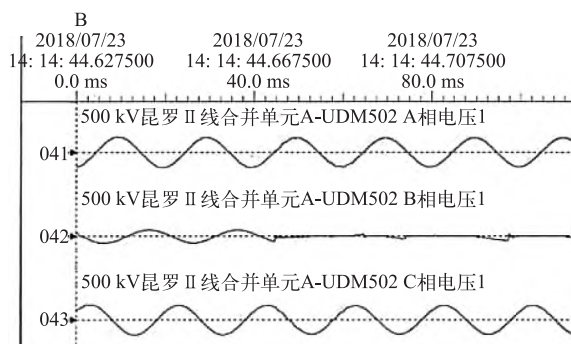


图1 典型金属性接地故障录波图

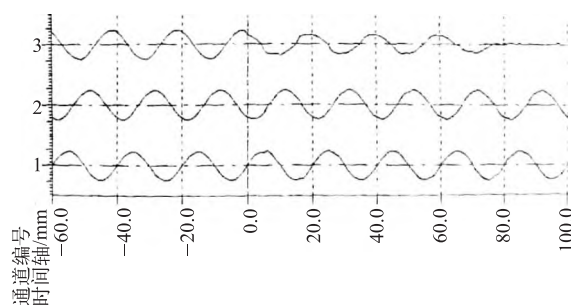


图2 典型高阻性接地故障录波图

故障定位分析

线路常见的故障测距方法有保护动作分析法、故障录波分析法以及分布式行波故障测距法三种。

1. 保护动作分析法

保护动作分析法，即利用多段式距离保护动作

情况判断故障位置范围，可以粗略判断故障的大概位置，但对于较长的线路基本不起作用。

2. 故障录波分析法

故障录波器是电力系统安全运行的重要装置，当发生故障时，根据所录波形可以比较准确地分析判断系统、线路和设备事故情况，同时利用计算机软件建立数学模型，根据相关算法做出故障测距的计算，但因故障过渡电阻、电流互感器电流比误差以及建模忽略的参数等因素会给故障测距带来一定误差。

3. 分布式行波故障测距法

行波法故障测距法是利用故障产生的高频暂态电压、电流行波波速（接近光速）及其在母线与故障点之间的传播时间进行故障测距的方法，具有受故障点过渡电阻、线路结构等因素的影响小及测距精度高、适用范围广等优点。除了站内的行波测距装置外，近年在线路中间塔位采用分布式增设多套行波测距装置，能够提高测距精度。

4. 测距数据分析

在上述三种故障测距方法中，实际采用的为故障录波测距及行波故障测距，其中行波故障测距可以直接给出最终计算结果，不需要进行二次计算；而故障录波测距因故障过渡电阻不确定，单使用一侧变电站的数据必然存在误差，且无法确定误差大小，因此需要使用两侧变电站的同一套测距数据，对其取中点，则过渡电阻的影响可以抵消。具体推导计算如图3所示。

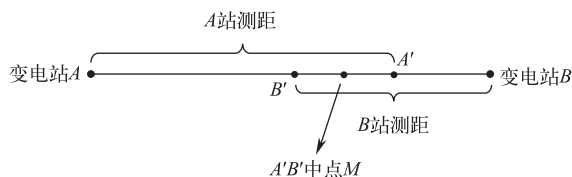


图3 故障录波测距二次计算示意图

二次计算后的故障点与变电站A的距离 $AM = AA' - \frac{AA' + BB' - AB}{2} = \frac{AA' - BB' + AB}{2}$ ，其中AA'为变电站A测距，AB为变电站B测距，AB为线路总长度。上述计算中，最后的数据取决于AA' - BB'，而AA'和BB'中均包含过渡电阻造成的同一数值，相减后抵消，从而得到比较精确的故障测距数据。

由于AA'和BB'中包含过渡电阻造成的同一非负数，因此如果出现情况，则一般可判定该组测距数

据无效，原则上不可作为故障分析查找的依据。

雷电定位分析

雷电定位系统（LLS）20世纪70年代中期由美国研制成功，20世纪80年代引入我国。LLS由若干个定向仪（DF）组成，当某地发生对地雷电时，每个DF站各自测定方位角，然后根据三角定位原理计算雷击点，因此DF站数量越多，分布越广，定位精度越高。

故障发生后，进入雷电定位查询系统查询故障时间附近线路周边的雷电情况，一般可设置为线路周边3~5 km，故障发生时间前后3~5 min。正常情况下雷电监测时间与变电站故障录波器时间均与GPS时钟同步，因此在查询结果中一般可以找到1条或者2~3条与故障时间基本吻合的落雷（落雷时间早于故障时间若干毫秒），同时可以看到与落雷点最近的杆塔，以此作为故障查找的依据，其雷电流值在之后的故障分析中作为耐雷水平计算的依据。建议在实际应用时直接在导出表格中查看最近的杆塔，同时将可能的落雷坐标点导入地图，与线路坐标进行比对，能准确判断故障查找范围。

表1中，某500 kV线路故障时间为2020-03-02 21:30:12.566，故障时间点前后5 min、故障线路周边范围5 km内查到4处雷电记录，其中第2条雷电时间与故障时间相吻合，可初步确定该落雷疑似为引起线路故障的雷电。把该落雷位置与故障线路放到同一张地图中，如图4所示，可以发现落雷位置与故障线路距离较远，即最近杆塔（139~140）与落雷位置距离和前后几基杆塔与落雷位置距离相差不大，因此通过疑似故障区段不能局限于最近杆塔（139~140）范围，更应该扩大至前后几基。

表1 雷电定位系统导出数据样例

序号	时间	经度	纬度	电流/kA	距离/m	最近杆塔
1	2020-03-02 21:29:26.259	112.571 7	28.468 4	-10.8	2	87~88
2	2020-03-02 21:30:12.566	112.764 0	28.431 5	-176.8	1 203	139~140
3	2020-03-02 21:30:12.581	112.764 9	28.430 7	-84.8	1 286	138~139
4	2020-03-02 21:33:39.401	112.646 4	28.471 3	-87.3	1 510	106~107

故障查找

1. 查找区段

根据故障测距数据和雷电定位数据，初步确定故障查找的范围（疑似故障区段）。在故障定位范围内，可优先考虑比较高的杆塔，并通过3D卫星图（Google Earth或奥维互动地图软件）寻找地面倾角较大（即顺线路方向斜山坡上）的杆塔。除此之外，线路周边有水系的区域也是易遭受雷击的区段，这些条件均可在故障查找中提供有效的帮助。如图4所示。



图4 疑似雷电与故障线路相对位置图

2. 查找工作安排

故障查找工作一般分成地面组、登塔组和无人机组3个类别的小组，在疑似故障区段内开展工作。地面组负责排查通道内树竹、外破和异物等情况；登塔组负责检查故障区段内杆塔接地引下线、绝缘子、地线支架以及可视范围内的导电线上等部位是否有闪络痕迹；无人机组除负责登塔组检查范围外还应对档中导地线进行扫描，查找闪络痕迹。

3. 故障点确认

故障点在高压、低压位置均存在明显闪络痕迹，如果沿绝缘子放电，在绝缘子串上也应有明显闪络痕迹。对于雷电直接击中地线的直击（反击）雷，还应在泄流通道（地线支架、接地引下线等）位置有烧灼痕迹。根据故障点确定的放电通道，应符合理论逻辑，一般情况下，即此放电通道为此处最短放电通道。典型雷击故障点闪络痕迹如图5～图7所示。



图5 导线上的闪络痕迹



图6 绝缘子串上的闪络痕迹



图7 均压环上的闪络痕迹

耐雷水平计算与综合分析

输电线路雷击故障一般分为绕击和反击。绕击故障为雷电绕过地线击于导线，直接在导线上引起过电压；反击故障为雷电击中杆塔或地线，雷电流通过接地网泄流不及时，对导线发生闪络，引起过电压。在确认疑似故障点后，应对故障塔位（档段）进行耐雷水平计算，通过理论分析确定落雷电流值满足绕击或反击的条件。

1. 耐雷水平计算

能够发生反击的最小雷电流计算式为

$$I_f = \frac{u_{50\%}}{(1-k)\beta R_i + \left(\frac{h_a}{h_i} - k\right)\beta \frac{L_t}{2.6} + \left(1 - \frac{h_g}{h_c} k_0\right)\frac{h_c}{2.6}} \quad (1)$$

式中， h_i 为杆塔高度； h_a 为横担对地高度； h_g 为避雷线平均高度； h_c 为导线平均高度。

能够发生绕击的最大雷电流计算式为

$$I_{\max} = \left(\frac{h_b + h_d}{2[1 - \sin(\alpha + \theta)] \times 7.1} \right)^{4/3} \quad (2)$$

式中， h_b 为地线高度； h_d 为导线高度； α 为地线保护角； θ 为顺线路方向的山坡倾角。

能够发生绕击的最小雷电流计算式为

$$I_{\min} = 2.2u_{50\%} \div 265 \quad (3)$$

因此，当雷电流幅值 I_a 满足 $I_a \geq I_f$ 时，可以引起反击跳闸；当雷电流幅值 I_a 满足 $I_{\min} < I_a < I_{\max}$ 时，可以引起绕击跳闸。

2. 耐雷水平综合分析

对上述反击计算公式定性分析可以得出：杆塔越高， I_d 越小，越容易发生反击跳闸。

对上述绕击计算公式定性分析可以得出：杆塔越高，防雷保护角和地面倾角越大， $I_{\max}$ 越大，越容易发生绕击跳闸，甚至当达到 $I_{\max} < I_{\min}$ 时， I_a 不存在，即此时不可能发生绕击跳闸，防雷设施做到了雷击绕击的绝对保护。

根据以上分析，当开展雷击故障查找时，在故障定位范围内，可优先考虑比较高的杆塔，并通过Google Earth或奥维互动地图软件的卫星图寻找地面倾角较大（即顺线路方向斜山坡上）的杆塔。除此之外，线路周边有水系的区域也是易遭受雷击的区段，这些条件均可在故障查找中提供有效的帮助。

3. 仿真分析

根据疑似故障点前后杆塔、导线、绝缘子和档距等信息，建立雷电绕击、反击电磁暂态仿真模型，利用电磁暂态仿真方法分析雷击跳闸原因。推荐使用电磁暂态分析软件ATP-EMTP，软件自带架空导线、杆塔、雷电流源和绝缘子串等模块，不需要烦琐的编程环节，即可仿真模拟雷击时线路上的过电压，从而判断发生的放电现象是否与现场发现的放电痕迹吻合。仿真雷电流大小为 -176.8 kA 的雷电击中距某 500 kV 线路143小号侧第4个间隔棒小号方向 3 m 处地线时，相邻各绝缘子串电压波形如图8所示。雷击发生后 $13\text{ }\mu\text{s}$ 时，雷击点空气间隙电压可超过 $10\text{ }000\text{ kV}$ ，而 $16\text{ }\mu\text{s}$ 后绝缘子串电压才可升至 $8\text{ }000\text{ kV}$ ，因此该故障线路故障原因有可能为雷击反击导致击穿空气间隙放电。

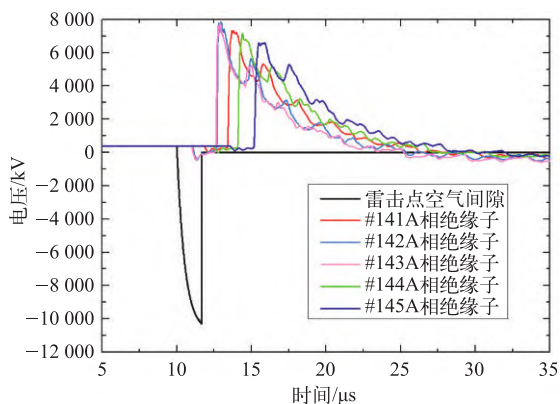


图8 雷击地线时相邻各塔A相绝缘子串两端电压波形

反向排除

根据故障区段通道情况、天气状况和放电痕迹等，排除外力破坏、山火、异物、污闪、鸟害、风偏和树（竹）线放电等因素，可初步确定是雷击故障。如根据现场无施工、无大型机械设备排除外力破坏原因，根据下雨天气、无山火烧伤痕迹排除山火原因，根据风力小、周边无大棚等异物排除异物短路原因，根据非浓雾或毛毛雨天气、录波图为金属性接地等排除污闪原因，根据杆塔无鸟巢、无烧痕排除鸟害原因，根据风力小排除风偏原因，根据通道内无树竹或树竹净空距离满足要求排除树竹放电原因。

结束语

近年随着气候变暖，因雷电、暴雨和大风等恶劣气象条件影响输电线路安全运行的事件不断发生，给输电线路的安全运行提出了新的挑战。线路运维单位应总结故障查找与分析的经验，并在故障分析过程中找寻输电线路稳定运行的薄弱环节，提出相关改造建议或运维典型经验。相信随着输电线路运行经验的不断积累，输电线路的安全运行水平将不断提高。

（收稿日期：2022-07-26）

参考文献

- [1] 黄福勇, 周挺, 王成. 输电线路雷击故障查找探讨[J]. 湖南电力, 2009, 29(6): 23-26, 29.
- [2] 林建涛. 浅谈几种线路故障测距法[J]. 广东电力, 2000, 13(2): 18-21.
- [3] 范春菊, 姜军, 郭煜华, 等. 输电线路行波故障测距技术的发展与应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(4): 129-134.
- [4] 闫斌斌, 叶德武, 葛亮, 等. 一起雷击引起串联补偿装置故障的分析[J]. 电气应用, 2021, 40(9): 67-72, 87.