

# 输电线路典型非雷击故障机理仿真分析研究

非雷击故障是造成输电线路跳闸的重要原因,且多发生于220 kV及以下输电线路,威胁输电线路安全运行。很多典型非雷击故障是因异物临近绝缘子而造成的,如鸟粪、漂浮物和树枝等故障。以110 kV输电线路为研究对象,首先从理论上分析了异物临近导致闪络的机理,并利用Maxwell仿真软件搭建了异物临近情况下输电线路三维立体模型,研究了不同情况异物临近过程中绝缘子旁间隙电场及电位变化情况,并分析了异物临近闪络机理以及相关影响因素,以此为基础,通过大量仿真计算,最终给出了110 kV线路因异物临近而造成闪络的区域,为110 kV线路防范部分典型非雷击故障提供指导。

何若冰/广东电网有限责任公司阳江供电局

## 0 引言

随着经济的发展,对电能的需求逐渐增加,我国电网规模也逐年扩大,据统计,截止2013年底,国家电网公司66 kV以上架空输电线路里程已超过70万km,远距离大容量送电网络已基本形成<sup>[1-3]</sup>。然而输电线路运行于户外环境,极易受雷击、风灾、鸟害、漂浮物和植被等多种因素的影响而形成跳闸故障,不仅容易损坏电力设施,给电力系统带来冲击,同时也会造成经济损失<sup>[4-6]</sup>。

对于部分典型的非雷击故障,如外破、树障和鸟害(包括鸟粪闪络、鸟巢材料短路以及鸟体撞击)等故障均是因异物临近输电线路,部分甚至全部桥接高低压端空气间隙,导致闪络发生,简称异物临近故障<sup>[7-8]</sup>。这种类型故障多发生于110~220 kV等级输电线路,500 kV及以上线路由于绝缘子空气间隙较长,实际当中很难形成足够长的异物使得闪络发生<sup>[9-10]</sup>。对于异物临近故障,文献

[11-13]用试验方法分析了鸟粪类异物故障闪络机理,并给出了放电相关的影响因素;文献[14]用铁丝进行了鸟巢材料下落时220 kV玻璃绝缘子串间隙击穿试验,分析了几种不同长度鸟巢材料存在时间隙击穿特性。综合来看,目前关于异物临近闪络故障研究已经取得了较多的成果,但研究多针对于鸟粪、鸟巢类异物临近故障,此外,研究多采用试验研究这一方式。由于异物临近闪络为一个动态过程,已有研究均以是否击穿作为最终结果,难以准确定量分析异物长度、空间位置等因素给放电带来的具体影响,空间电场、电位变化趋势不明确。

针对目前输电线路异物临近闪络研究方面存在的一些不足,本文以110 kV输电线路为研究对象,首先通过理论分析给出了异物临近闪络机理,然后通过Maxwell电磁场分析软件搭建了三维模型,模拟了不同长度异物以及异物处于不同空间位置情况下空气间隙电场及电位相关数据,最终给出了110 kV线路异物闪络临界区域,给输电线路防止异物放电提供了一定的理论指导。

## 1 理论分析

异物临近放电主要包括鸟粪、树枝和漂浮物等靠近输电导线产生的放电,经分析,其临近过程主要有以下几种情况:①异物长度足够,在下落过程中其末端未离开横担,前端逐渐靠近高压端直至间隙发生击穿,如长串鸟粪下落、长串异物下坠等;②异物长度较短,下



何若冰/工程师

### 关键词/Keywords

非雷击故障·  
异物临近·  
三维模型·  
闪络区域·  
电场分布·

落过程中末端离开横担，前端未到达高压端时高低压端间隙均发生击穿，如部分鸟粪闪络、短串异物下坠等；③异物从绝缘子侧面临近，如漂浮物、鸟类撞击等。异物临近示意图如图1所示。

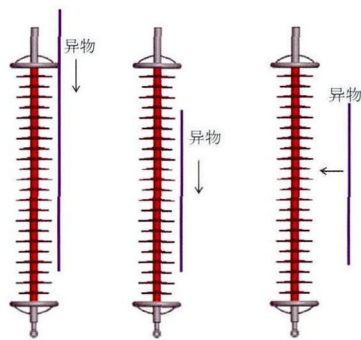


图1 异物临近示意图

异物临近为一个动态过程，间隙击穿过程中异物处于运动状态，由于击穿时刻极短，可认为异物处于静止状态，仿真研究中用静止导体来模拟异物临近时某一时刻的具体状态<sup>[14-15]</sup>。

异物临近时，异物端部和金具之间的空气间隙为极不均匀场，典型的棒-板间隙和棒-棒间隙工频击穿电压与间隙距离的关系如图2所示。从图2可以看出，当间隙距离小于1 m时，击穿电压与间隙距离近似呈线性关系，平均击穿场强约为4 kV/cm，以此作为击穿判据，若间隙平均场强达到4 kV/cm，则认为间隙击穿，反之不击穿。对于情况①来说，当异物前端与高压端之间间隙达到4 kV/cm时，间隙击穿，闪络发生；对于情况②和情况③来说，由于高低压端各有一段空气间隙，仿真研究时首先计算出异物电位 $U_0$ ，然后结合模型坐标信息计算上段空气间隙距离 $d_1$ 和下段间隙距离 $d_2$ ，若线路运行电压为 $U_1$ ，则间隙平均场强为

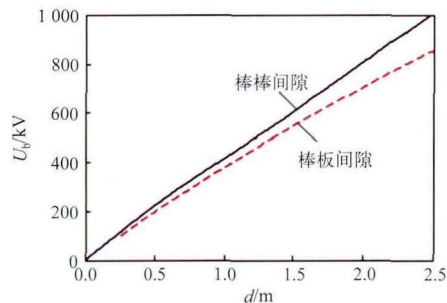


图2 棒-棒和棒-板间隙工频击穿电压与间隙距离关系

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{U_0}{d_1} \\ E_2 &= \frac{U_1 - U_0}{d_2} \end{aligned} \tag{1}$$

式中， $E_1$ 和 $E_2$ 分别为上段间隙和下段间隙平均场强。

如果其中一段空气间隙击穿，则异物电位发生跳变，使得另一段间隙承担电压发生突变，间隙承担电场数据需重新计算，当两段间隙均击穿时，则认为整个间隙发生闪络。

2 试品

试品包括横担、复合绝缘子、导线及金具等，其中复合绝缘子为国内输电线路广泛采用的FXBW4-110系列绝缘子，其型号及参数如下表所示。

表 复合绝缘子参数

| 型号      | FXBW4-110/70 |
|---------|--------------|
| 结构高度/mm | 1 240±15     |
| 盘径/mm   | 150/125      |
| 爬电距离/mm | 3200         |

3 仿真模型建立

本研究中采用Ansoft16.0有限元仿真软件进行分析，仿真模型包括绝缘子、铁塔、导线、连接金具以及异物等。

3.1 异物模型

输电线路容易引起故障的异物一般包括铁丝、湿润树枝、草藤以及高电导率鸟粪等，已有相关研究中常用良导体来模拟这些高电导率异物<sup>[16-18]</sup>。为了方便分析和求解计算，本文研究中用长直圆柱棒进行模拟，此外，将异物端部进行一定的平滑处理。

对于上文中情况②和情况③来说，异物未与横担或高压端接触，其电位为悬浮电位，不能直接对其进行求解。有限元研究中常采用虚拟大介电常数法来求解这类问题，即将悬浮的导电异物用一种介电常数很大的材料进行模拟，本文研究中取值为9 000<sup>[19-20]</sup>。

### 3.2 横担、导线和金具等其余部件模型

为简化分析计算,只选取其中一相进行分析。杆塔及横担用简易长方体导电板进行模拟,其尺寸为 $200\text{ cm} \times 60\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ ;金具及相关导电连接件亦进行简化处理;110 kV导线型号为LGJ-240,计算半径 $r=10.8\text{ mm}$ ,实际取 $12\text{ mm}$ ,大地则用尺寸为 $600\text{ cm} \times 600\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 金属板进行模拟<sup>[21]</sup>。考虑到良好的导电性,将横担、导线和连接金具等材料设置成铁。

模拟导线上施加电压为输电线路最大运行相电压有效值,对于110 kV等级,按最大 $\pm 20\%$ 波动来考虑,导线施加电压为 $110\text{ kV} \times (1 + 20\%) / 1.732 = 76.2\text{ kV}$ 。主要部件三维模型如图3所示。

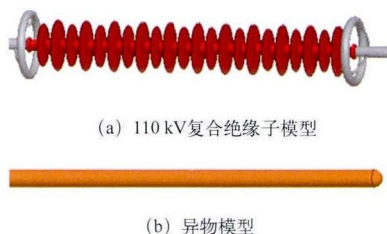


图3 主要部件三维仿真模型

## 4 仿真结果

### 4.1 第一种情况下计算结果

异物的存在使得异物周围空气间隙场强发生严重畸变。对比有无异物两种情况下空间电场分布如图4所示。

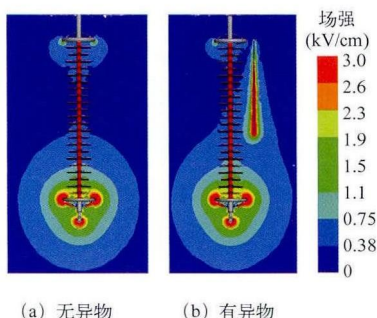


图4 异物对空间电场影响对比

异物下落时,其前端不断向高压端接近,当异物前端与高压端金具间空气间隙达到平均击穿场强时,间隙击穿。由于异物电位始终为0,因此间隙

平均场强可用导线电压除以间隙距离即可求出。为分析异物下落过程中电场变化情况,计算了异物端部场强随异物下落距离 $L$ 的关系,如图5所示。

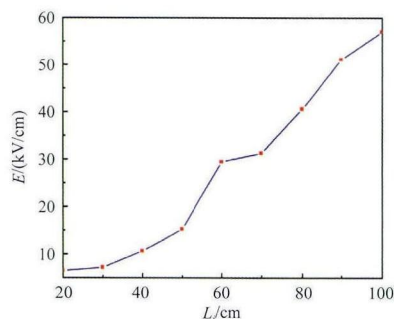


图5 异物场强跟异物下落距离的关系

从图5可看出,随着异物的不断下落,异物前端最大场强越来越大,且在相同下落距离情况下,前端场强增量也越大,间隙更容易击穿,说明越长的异物越容易造成闪络发生。

### 4.2 第二种情况下计算结果

以一段长70 cm异物从绝缘子轴线距离18 cm处下落时为例进行分析,此时上段间隙24.2 cm,下段间隙11 cm。计算结果如图6所示。

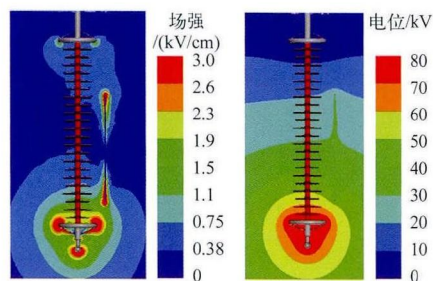


图6 异物存在时绝缘子周围电场及电位分布

异物的存在使绝缘子空气间隙产生了明显畸变,且在异物所在侧更加明显,远离异物一侧变化不明显。进一步分析了轴线距离 $d$ 变化时不同位置空间电场及电位分布对比,保持异物位置不变,分别取 $d=150\text{ mm}$ 、 $180\text{ mm}$ 、 $220\text{ mm}$ 和 $260\text{ mm}$ ,电场及电位分布对比分别如图7、图8所示。

图7和图8中, $d150\text{ N}$ 曲线表示 $d=150\text{ mm}$ 无异物,Y则表示有异物,其他曲线含义与此类似。从图7可以看出,异物存在时,电位梯度发生明显变化,从曲线趋势来看,与异物相同高度区域电位

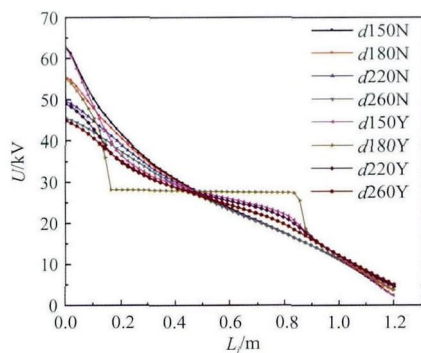


图7 异物存在时电位分布

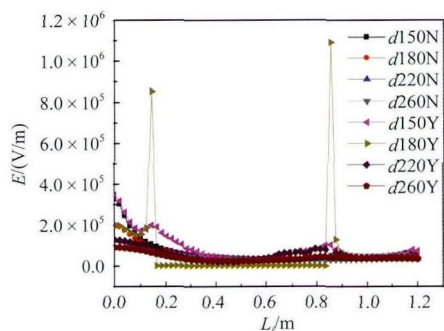


图8 异物存在时电场分布

变化相对较为平缓，而与异物两端高度以外的区域电位梯度增大，当距离达到260 mm时，变化相对不明显。 $d=180$  mm处为异物所处位置，异物悬浮电位为27.6 kV，由于异物本身为导体，因此其为等电位，对应于图7中曲线平直部分。对比图8可知，异物的存在使空间电场发生了畸变，畸变最明显位置为异物两端及附近区域，且越靠近异物两端，这种畸变程度越明显。此外，图8中上下端间隙场强分别为1.1 kV/cm和4.4 kV/cm，显然下端间隙击穿，此时异物悬浮电位突变为导线电压值，使得上端气隙场强从1.1 kV/cm突变为3.1 kV/cm，低于临界击穿场强，因此不发生闪络。

当异物长度为70 cm时，在异物整个下落过程中间隙都无法发生闪络，在此基础上，进一步分析了长度为95 cm异物从相同位置下落时气隙平均场强数据变化，得到结果如图9所示。

从图9可以看出，当异物前端与高压端金具垂直距离 $s$ 在5~15 cm之间区段时，两段间隙平均场强均超过4 kV/cm，发生闪络。当 $s$ 在0~5 cm和20~25 cm时，尽管其中一段间隙击穿，但由于另一段间隙距离过长，无法击穿，因此难以发生闪络。

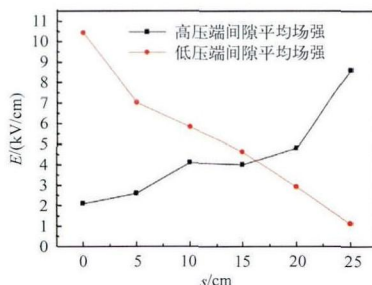


图9 两段间隙平均场强变化趋势 ( $d=30$  cm)

### 4.3 第三种情况下计算结果

为模拟异物从侧面临近过程，仿真中保持异物竖直位置和长度不变，仅改变异物与绝缘子轴线距离 $d$ ，异物上下端端部场强变化如图10所示。

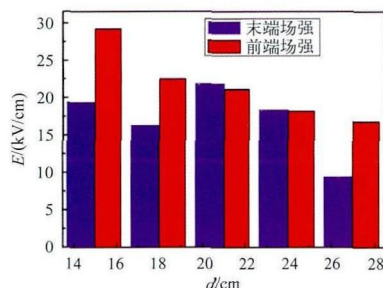


图10 两段间隙平均场强变化趋势

从图10可以看出，当异物与绝缘子轴线距离越近时，异物两端场强总体上呈现出缓慢增加趋势。经过计算发现，异物横向往近绝缘子时，异物悬浮电位变动幅度较小，但由于间隙距离拉近，使得间隙平均场强急剧增加，大大增加了击穿发生的可能性，因此异物越临近绝缘子时越容易发生闪络。

### 4.4 异物临近闪络区域划分

从前面分析可以看出，异物长度越长，以及越靠近绝缘子轴线时，闪络越容易发生。当异物长度足够长时，经计算异物与绝缘子轴线距离34.1 cm范围内为闪络区域。为确定临界闪络区域，需求解出异物-绝缘子轴线距离 $d$ 与临界异物长度 $L_k$ 之间的关系，实际做法是在一个确定的距离 $d$ 下通过初步分析找到一个合适长度的异物，模拟异物从上往下坠落过程，求解不同下落点时两段空气间隙数据，判断是否都击穿，若不是都击穿，适量增加异物长度；若在多个点发生击穿的话，则适量降低异物长

度。经仿真计算,求解异物—绝缘子轴线距离 $d$ 与临界异物长度 $L_k$ 之间的关系如图11所示。

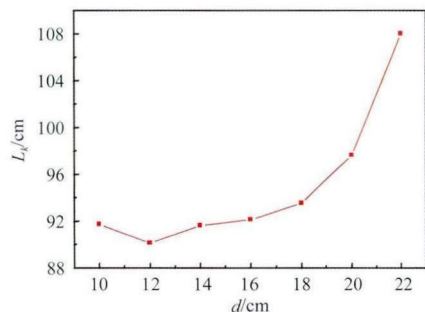


图11 临界异物长度与异物—绝缘子距离的关系

$d < 14$  cm为均压环圆环区域内部,临界异物长度变化较小;当 $d > 16$  cm时,临界异物长度随 $d$ 增加而增加,表明较长的异物对应的闪络区域更大。对于图11来说,93 cm长度异物闪络区域约为 $d < 18$  cm区域,实际应用中可根据情况进行针对性的防范措施。

## 5 结束语

本文对输电线路因异物临近而发生的典型非雷击故障机理进行了分析,并对其造成间隙闪络的影响因素及闪络机制进行了总结,初步得出了如下结论:

1) 当异物临近绝缘子串时,导电性良好的异物使得间隙电场及电位发生突变;当间隙平均场强超过间隙临界击穿场强时,发生击穿。异物长度越长、离绝缘子距离越近时闪络越容易发生。

2) 异物临近时,对于多段间隙存在情况下,由于不同段间隙场强达到临界击穿场强有先后顺序,因此击穿过程也有先后之分,当所有间隙都击穿时才完成闪络过程。

3) 对于110 kV线路,容易引起闪络的最短异物长度约为90 cm。若异物长度足够,离绝缘子轴线距离34.1 cm范围为闪络区域,需重点防范,为减少闪络发生,应尽量避免异物临近绝缘子。

### 参考文献

[1] 林伟芳,汤涌,孙华东,等.巴西“2.4”大停电事故及对电网安全稳定运行的启示[J].电力系统

自动化,2011,35(9):1-5.

[2] 胡毅,刘凯,吴田,等.输电线路运行安全影响因素分析及防治措施[J].高电压技术,2014,40(11):3491-3499.

[3] 梁志峰.2011—2013年国家电网公司输电线路故障跳闸统计分析[J].华东电力,2014,42(11):2265-2270.

[4] 胡毅,刘凯,吴田,等.输电线路运行安全影响因素分析及防治措施[J].高电压技术,2014,40(11):3491-3499.

[5] 程思明,曲斐.1995~1998年吉林省电网220 kV输电线路故障统计分析[J].电网技术,1999,23(12):57-59.

[6] 梁志峰,董昱,张智刚.2006—2012年国家电网公司直流输电系统强迫停运统计分析[J].电力系统自动化,2014,38(6):1-5.

[7] Ledger J A, Hobbs J C A, Smith T V. Avian interactions with utility structures; Southern Africa experience [C]. Proceedings of the International Workshop on Avian Interactions with Utility Structures, Florida, USA: Electric Power Research Institute, 1992.

[8] 李李,许圣,苏伟.220 kV输电线路不明原因跳闸事故分析[J].电瓷避雷器,2011(3):10-15.

[9] 贾志东,张威,方苏,等.湿污环境中的复合绝缘子异物闪络[J].高电压技术,2010,36(8):1893-1898.

[10] 梁曦东,黄峻嶒,王绍武.绝缘子鸟粪闪络的试验研究与不明原因闪络的分析[C].2000年华北五省市(区)电机工程(电力)学会第十届学术交流会,2000:231-236.

[11] 徐旭,崔吉峰,周远翔,等.500 kV绝缘子鸟粪闪络实验研究[C].中国电机工程学会高压专委会2007年学术年会,2007.

[12] 杨庆,董岳,司马文霞,等.鸟粪导致交流输电线路塔窗—导线空气间隙放电的特性研究[J].高电压技术,2014,40(1):55-60.

[13] 董岳,杨庆,司马文霞.鸟粪影响下的塔窗—导

(下转第49页)

可知 $V_{OUT}$ 与 $R_1/R_2$ 成线性关系, 对此可以得到: 当 $R_1/R_2$ 最大时,  $V_{OUT}$ 最大; 当 $R_1/R_2$ 最小时,  $V_{OUT}$ 最小, 而本设计 $R_1/R_2$ 的范围为

$$\frac{R_1 - 0.01}{R_2 + 0.01} \leq \frac{R_1}{R_2} \leq \frac{R_1 + 0.01}{R_2 - 0.01} \quad (5)$$

由式(5)可得最大时 $V_{OUT}$ 最大正常的输出电压范围分别是:

升压输出最大值为

$$V_{\max} = 0.6 \text{ V} \times \left(1 + \frac{100 \text{ k}\Omega(1+0.01)}{5.1 \text{ k}\Omega(1-0.01)}\right) = 12.6 \text{ V}$$

最小值为

$$V_{\min} = 0.6 \text{ V} \times \left(1 + \frac{100 \text{ k}\Omega(1-0.01)}{5.1 \text{ k}\Omega(1+0.01)}\right) = 12.1 \text{ V}$$

降压输出最大值为

$$V_{\max} = 0.81 \text{ V} \times \left(1 + \frac{49.9 \text{ k}\Omega(1+0.01)}{12 \text{ k}\Omega(1-0.01)}\right) = 4.24 \text{ V}$$

最小值为

$$V_{\min} = 0.81 \text{ V} \times \left(1 + \frac{49.9 \text{ k}\Omega(1-0.01)}{12 \text{ k}\Omega(1+0.01)}\right) = 4.11 \text{ V}$$

由以上数据可得, 升压输出的电压正常范围为12.1~12.6 V, 而降压输出的电压正常范围为4.11~4.24 V, 所以得出本设计的输出电压在正常范围之内。

## 5 结束语

本设计能够直接对采集设备和GPRS实现两者不同位置但能正常通信的支持, 当采集设备处于连接不上外网的位置时, 可以将GPRS延长并与外网通信, 从而实现了智慧城市的基本目的。

### 参考文献

- [1] Q/GDW 1375.1—2013 电力用户用电信息采集系统型式规范 第一部分: 专变采集终端型式规范[S].
- [2] 童诗白, 华成英. 模拟电子技术基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [3] 宋雪臣, 单振清, 郭永欣. 传感器与检测技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [4] 易飞, 余刚, 何凌, 等. 现代通信网络技术丛书: GPRS网络信令实例详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.
- [5] 刘倩, 孙鸣, 陈健. 无线携能通信系统能量获取研究[J]. 电气工程学报, 2016, 11(7): 46-50.
- [6] 姜开山. GPRS远程抄表系统应用实践[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

(收稿日期: 2016-02-10) **EA**

(上接第46页)

线间隙交流放电特性研究[C]. 重庆市电机工程学会2012年学术会议论文, 2012.

- [14] 黄道春, 余俊, 张宇, 等. 220 kV线路悬式绝缘子串异物临近放电机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(24): 4161-4170.

- [15] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

- [16] Naidoo K, Ijumba N M, Britten A C. Bird streamer initiated breakdown characteristics under HVDC conditions[C]. 2006 International Conference on Power System Technology.

- [17] Sundararajan R, Burnham J, Carlton R, et al. Preventive measures to reduce bird related power

outages-part II: streamers and contamination[J].

IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4).

- [18] 陈昊, 朱超, 李义峰, 等. 输电线路工频电场的计算与测量研究[J]. 电气工程学报, 2016, 11(5): 40-45.

- [19] 钟山. 复合绝缘子电场计算与分析[D]. 北京: 清华大学, 2000.

- [20] 尹创荣, 李恒真. 220 kV线路复合绝缘子鸟巢草危害有限元分析[J]. 广东电力, 2009, 22(5): 40-45.

- [21] 陈剑光. 复合绝缘子导线上缠绕绝缘护套对鸟粪闪络的防护效果分析[J]. 高压电器, 2016, 52(7): 136-149.

(收稿日期: 2016-11-29) **EA**