

# 配电网网络感应雷跳闸可能性分析

陈斌

(珠海康泰明输变电工程有限公司, 广东 珠海 519000)

**摘要:**本文涉及雷电对配网的影响的认识,通过引入对雷电的新认知,在计算雷电感应过程时,加入了大自然的边界条件约束,即电弧弧道表面电场值必定小于 3MV/m 的约束条件,证明了配电线路因感应雷而闪络的说法是错误的。

**关键词:**雷电防护;感应雷;表面电荷极限

**中图分类号:**TM712

**文献标识码:**A

**文章编号:**1004-7344(2021)12-0072-03

## 0 引言

配电网在电力系统中,是面积最大的网络,因为配网线路架设低,是最容易被雷击的网络。近年来,由于环境的变化,雷害事故渐多,受关注的程度渐高。

本文将着重讨论“感应雷”引起配电线路跳闸的说法是否为伪命题。众所周知,一个自然现象在推导和计算时,会有很多结果,甚至错误的结论。这些错误的结论会在工程处理上造成错误的做法和结果,必须给予纠正。在经典理论的计算分析中,一旦加入了合理、正确的边界条件,结果就是唯一的。而边界条件的确定是需要对自然环境的正确认知。

1990 年代末,由日本技术人员发表的一张 PS 照片,引出了关于感应雷造成线路跳闸的说法。感应过电压是存在,但引起具有 100kV 绝缘水平的配网线路跳闸,工程上尚未出现实例。引起争论是因为这些主张“感应雷”引起跳闸的说法被我们一些高校的老师学生大加发挥,甚至提出了数十米外发生地闪就可以破坏线路绝缘的说法<sup>[1]</sup>。照此论点,配电线路根本就无法安全运行了。为了消除这种可能不存在的“感应雷”影响,一些配电系统在配电线路上进行加架避雷线、避雷针、放电招弧间隙、线路避雷器、局部调爬、更换绝缘导线等工程手段,但这些手段基本没减少线路跳闸的现象,反而增加了设备损坏率和设备维修量。从设备损坏所需要的能量看,不可能由“感应”所能提供的<sup>[2]</sup>。

仔细研看众多论文,提出“感应雷”说法的这些学生和老师在雷电的认识太少,不知道弧道内大量电荷不是被用于建立周围电场环境的,所以特作分析证明。

关于“感应雷”引起线路跳闸的论文,国外很少见到。并没有认可“感应雷”的威胁;都是将配网的工作状态看成为容许有限跳闸、可接受雷事故的系统。

本文认为“配网感应雷”学术认识问题出在对雷电流表面情况的认识无知和不了解空间电流段表面电场强度的自然界强约束<sup>[3]</sup>。从数学角度看,是边界条件认识出错。

## 1 雷电理论基础介绍

雷电防护基础理论是这几年出现了新的理论进展<sup>[4]</sup>,其中的主要论点包含:

(1)上行迎击先导出现的必然性,地面物体上的上行先导是否出现决定地闪能否出现。

(2)雷电流主放电中大量电荷是由地面喷上天空的,越靠近地面,电流值越大。

(3)由电晕产生的空间电荷决定放电路径,没有电流先导能穿过密度达到  $10^{-7}C/m^3$  以上的电荷阻挡区。

(4)整个放电回路阻抗大小、上行先导出现的迟早,决定了雷电流的大小等。

### 1.1 配网架空线路满足雷击的必要条件

大气中,一个物体发生雷击的必要条件有 3 个,必须同时满足:

(1)该点一般处在电气最高点,或瞬时最高点,在雷电下行时其上方电场强度最先达到空气击穿水平,上行先导可以最先形成。

(2)接地阻抗小于一定的值,电流大到可以维持上行先导所需要达到数百米高度的要求,由雷云释放出的能量不能过多地消耗在接地阻抗上。

(3)先导的上行路径上没有由电晕过程造成的高浓度空间电荷的阻挡。

这 3 个必要条件只要破坏其一,接闪器就不能稳定接闪。我们常见的普通避雷针就是无法满足第 3 个条件,而不能稳定接闪、保护其他设备和物体。普通物体,只要破坏上述 3 个条件之一,就可以避免被雷击打。比如岭南地区的客家围屋,只是破坏了必要条件第 2 条,数百年无雷击记录。

架空配网线路的运行结构,在很多区域完全满足 3 个必要条件:①其高度在 10m 左右,一般环境中为高点,或者是尺寸最小的点;②一旦受雷,其长线特性波阻抗等效的接地阻抗为 150Ω,符合先导向接地电阻的要求,不论线路是否是中性点接地;③表面电场在雷电流下行前较低,一般不产生电晕,其上方没有高浓度的空间电荷阻挡区存在。所以,配网线路两侧 20m 范围内,不会出现 60°保护角内的落地雷。此范围区间的雷电会由配电线路的导线去承接。

### 1.2 物体表面的最高场强约束

在大气中,一个球体最高所能带的静电电荷量为:

$$Q=4\cdot\pi\cdot\epsilon_0\cdot E_0\cdot r^2 \quad (1)$$

式中： $r$ -球体半径； $\epsilon_0$ -真空介电常； $\epsilon_0=8.85 \times 10^{-12}$ 。

$E_0=3\text{MV/m}$ ，为标准大气压下，大气中空气所能承受的最高电场强度，是自然界赋予空气的一个基本特性。此值是一个经验和试验结论，它与空气气压和空气气体性质有关，在一个标准大气压附近，工程上均以该值作为空气绝缘水平的标准<sup>[3-4]</sup>。

一根金属导线单位长度上所能存住的静电荷：

$$\tau = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot E_0 \cdot r \quad (2)$$

式中： $\tau$ -单位长度上用于建立电场  $E$  的电荷量，如果取  $r=0.1\text{m}$ ， $\tau$  最高为  $1.7 \times 10^{-5}\text{C/m}$ 。这是一个只与半径  $r$  有关的极限值，与导线内部是否流过电流值无关。如果超过此值，则会在半径的方向上出现放电电流发展。我们可以想象一根超导导线流过很大电流，但未必会产生很高的幅向电场强度；被用于构建幅向电场的电荷量可能很少。同样，一根没有通流的导线，只要场强足够，就会出现对其他物体的放电现象。

### 1.3 放电电流通道与导线之间的差别

导体中，电流是由自由电子在金属晶格间流动体现出的，自由电子被导体束缚在导体表面及导体内。大气弧道中，正负离子都在弧道中运动和复合，发出光泽，带电离子被弧道内部的电场约束在弧道内；如果电荷密度过高，直径方面会有少量的扩张。

因为弧道中的发光会产生光晕，弧道并没有我们看见的那么粗<sup>[5]</sup>。表面等值场强  $E_r$  只要超过空气的绝缘水平，则必然出现半径方向的放电发展。

图 1 中，电场  $E_y$  的大小决定了弧道或导体内电流的大小。 $E_y$  是推动电荷流动的动力，电荷流动产生电流  $I$ ，电流  $I$  所产生的磁场  $M$  (右手定则) 在产生约束表面电荷在向前运动的同时，也产生使正电荷向弧道中心收缩的作用力  $F$  (洛仑兹力)。  $F$  会使电弧弧道尽量收窄，集中能量。这是因为空气电弧中，参与导电的正、负离子都有，与金属中只有电子运动参与导电的趋肤效应刚好相反。如果突然失去了  $E_y$ ，也就失去了约束力  $F$ ，在这么小的体积内根本容不下这么多的电荷量，电荷会迅速向外扩散。

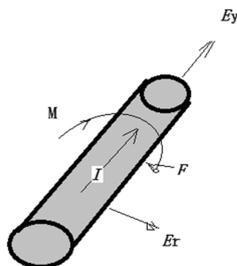


图 1 弧道内电荷产生电场

所以，正在流动的整个电弧段内的电荷与静电场表面电荷的情况是有很大差别的。对外的感应不能等同视之。

### 1.4 雷电流弧道对线路的影响

雷电流在靠近地面时，基本上是垂直于地面的，而线路是平行于地面的；由雷电流产生的磁场线与线路导线是平行的，导线不切割磁场，没有磁感应电压。其他由雷电放电电流产生的物理能量的释放，比如光学照度、声振动、高频干扰等，对线路的绝缘都不会产生影响。因为配网线路的绝缘水平有  $100\text{kV}$  的冲击绝缘耐压。只有类似静电场的影响会使得导线表面感应电场有所增加，但增加的限度是可以估算的。注意，此时导线仍然在雷云电场的影响中。

## 2 导线的感应电场分析

在这个分析中，我们仍然参照感应雷计算的基本方法<sup>[2]</sup>，只是增加了一个电弧弧道表面电场强度小于等于  $3\text{MV/m}$  的自然约束条件，当  $x=0.1\text{m}$  时，电场值  $E_{0.1}=3\text{MV/m}$ 。弧道中其他大量电荷与外界电场无关。

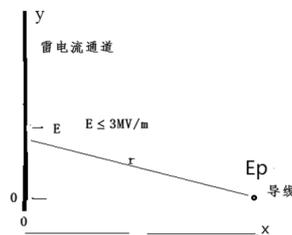


图 2 感应电场计算

如图 2 所示，我们将单位长度上的电荷量集中在该单位所在的中心位置上，电荷量  $Q=\tau$ ，用点电荷来计算。设任意一段电荷  $Q_i$  对  $E_p$  点作用的场强为  $E_{pi}$ ，计算式为：

$$E_{pi} = \frac{Q_i}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2} \quad (3)$$

如果取弧道半径为  $r_0=0.1\text{m}$ ，在弧道表面， $E_{pi}$  的最大值为  $3\text{MV/m}$ ， $Q_i$  的最大值为  $1.7 \times 10^{-6}$  库仑。我们沿  $y$  轴做积分，得到雷电流弧道对导线附近空间  $p$  点的总感应电场强度为：

$$E_p = \int \frac{Q_i}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2} \cdot dr = \frac{Q_i}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r} \left| \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{x^2}} \right| \quad (4)$$

令  $y$  趋向  $\infty$ ，得：

$$E_x = \frac{Q_i}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot x} \quad (5)$$

带入自然界约束边界条件： $x=0.1\text{m}$  时 (电弧道表面)，取电场强度  $E_x \leq 3\text{E}6\text{V/m}$ 。按  $E_x$  的最大值测算，代入式 (5) 得：

$$\frac{Q_i}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} = 3 \times 10^5 \quad (6)$$

当  $x=1\text{m}$  时， $p$  点的感应场强就会低于  $1/10$  的空气绝缘击穿水平，不可能产生线路绝缘击穿的现象；按导线表面电场与半径成反比关系，此时导线半径大于  $10\text{mm}$ ，不会放电。取  $x=10\text{m}$ ，导线半径大于  $1\text{mm}$ ，感应放电也不会发生。配电线路的导线线径一般在  $10\text{mm}$  以上，距导线  $2\text{m}$  以上，就不可能使线路因感应造成绝缘丧失。

击穿空气绝缘的是电场强度。之所以一些文章有感应雷造成线路闪络的说法，就是因为分析计算时缺少和忽略了电弧弧道表面场强极值的大自然边界条件约束。需理解的是：弧道内的电荷并不全是为了建立表面电场而准备的；大量电荷所指的方向并非各向相同，而主要是电弧轴向，是推动电荷流向对面电极的动力。

做电感应强度  $D$  的闭合面积分，轴向正负感应强度几乎相同，像空桶一样，只有表面的电荷才被用来建立周围的电场，所以对周围环境的影响是有限的。

加入约束条件后， $2\text{m}$  距离以外的地闪电流造成的“感应”，完全不足以使  $10\text{kV}$  的架空配电线路闪络。实践中，美、加等国的配电线路常有与超高压线路共塔，从未见到“感应雷”闪络的报道。

配电线路在线路两侧  $20\text{m}$  内是有绝对接闪能力的，如果没

有其他保护设施,配网架空线路的绝缘丧失都是雷电直击线路造成的。配网的保护应该是阻止雷电上线路为上策。

### 3 其他约束

另外,一个空间对地近区无连接的金属物体,其一侧表面感应出电荷,另外一侧表面会感应出另一种电荷,其上电位不一定会立刻有明显变化,短时间内不一定会大量电荷流出,其上的电荷重新分配就像电容器内部电极分配电荷一样。

根据第1章节所述,配电线路架空线是可以接闪的,其对周围物体的保护角度可达到 $60^\circ$ ,线路两侧20m内均是其保护范围,即20m范围内,线路导线就是接闪器,不会有由地面发送出的上行接闪先导出现。

从接地电阻的范围看,使用专用接地金属,按照较为科学的结构敷设的地网,也只能将接地电阻降至几十欧姆;一般地闪电流如果以植物根茎作为接地体,要使接地电阻降到 $100\Omega$ 以下,足以产生更大的电流,是很困难的。在这种接地体上产生数十千安以上的地闪电流也是不可能的。根据雷电监测系统得到的电流数据分析,接地阻抗在 $150\Omega$ 时,最大的雷电流幅值要小于 $50kA$ 。

### 4 结论

在上面几节中,我们了解了流有电流的电弧通道中,中间大量的电荷与外界的静电感应基本无关;电弧表面的电场受大气绝缘的约束,不可能超过 $3MV/m$ 的极限值;用其作为计算的边界条件,计算证明“配电网架空线路因感应雷闪络”的提法是错误的,是伪命题。

究其错误的来源,忽视了自然界边界条件的约束是主要错误,特别是大气中,任何物体的表面电场强度是有条件限制值的;超过该值就会有该方向上的放电发展;我们在分析问题,不能凭胆量去想象。

对配网雷电防护和安全运行,有下几条建议:

(1)配网架空线路是有接闪能力的,在做雷电防护时,方法应以阻止雷电直击线路为主。

(2)在实施配网的雷电防护工程时,要遵循“绝缘配合”原则。如果不能消除雷电直击,则应让放电发生在线路的空气绝缘上,不能让站、房的固体绝缘承受过电压的破坏。

#### 参考文献

- [1] 梁江东,程文锋.现代工程防雷击技术[M].北京:中国电力出版社,2016.
- [2] 刘峻岐,王小霖,张弦,等.10 kV 配电网感应雷过电压的计算及影响因素分析[J].广东电力,2015(4):98-105.
- [3] 冯慈璋,马西奎.工程电磁场导论[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [4] 清华大学,西安交通大学.高压绝缘[M].北京:电力工业出版社,1980.
- [5] 陈渭民.雷电学原理(第2版)[M].北京:气象出版社,2006.
- [6] 沈海滨,陈维江,王颂虞,等.10kV 架空线路雷击断线故障的模拟试验研究[J].电网技术,2011,35(1):117-121.

收稿日期:2021-02-01

作者简介:陈斌(1980—),男,汉族,广东茂名,工程师,本科,主要从事电力电气设计、拓展、工程施工等工作。

(上接第71页)

(4)有些班级的积木材料不符合单元积木的规格,限制了孩子们的艺术创作。

(5)各班的阅读区的活动多为幼儿自主阅读的模式,更深层次的学习有待进一步改进、引导。

(6)班级的生活区用电存在一定安全隐患。

### 9 今后的研究设想

(1)继续开展课题研究活动。

教研永远在路上。我们要继续寻求促进幼儿区域活动主动学习的策略,以问题为导向,采用观察记录、个案分析法、小组教研、大组教研的方式进行研究,从而解决所发现的问题,并不断修正和完善,从而探索适合我园的区域活动指导策略。

(2)继续探索“大带小”模式。继续研究适合我园,并能促进幼儿主动学习的串班模式,我们将持续进行混龄区域游戏的研究,在研究中生成“大带小”的模式。

(3)收集整理课题资料:①整理教师在课题研究过程中的所有研究材料,包括文案(教案、反思录、学习体会、经验总结、个案论文)、视频、相片等等;②撰写课题研究报告,将研究经验整理成册。

(4)推广和分享。将研究的成果经验总结成文字并在全园班级和手拉手帮扶幼儿园推广和分享。

(5)继续优化区域环境,促进教师教研活动的积极性。

充分考虑区域设置的教育目标,以不断优化区域为目的开展教研活动,从而不断提高教师游戏的指导策略,提高教师的教研能力。

(6)加大对教师的培训力度,提高教师课题研究能力和信息

技术应用能力。①加强课题研究的培训,让老师掌握更多的科学研究方法,促进教师积极参加课题研究活动;②在课题研究过程中学会收集整理第一手研究材料,提高课题研究质量。

#### 参考文献

- [1] 陈艳,程陈莉.计划·实施·回顾:幼儿区域活动三部曲[J].幼儿教育研究,2016(2):50-51.
- [2] 安·S·爱泼斯坦.学前教育中的主动学习精要:认识高宽课程模式[M].霍力岩,郭瑶,译.北京:教育科学出版社,2012.
- [3] 徐敏婕.幼儿园区域活动中如何培养幼儿自主学习能力[J].时代教育,2016(2):254.
- [4] 李芳,何敏.小朋友,今天你做了什么?:从“分享”环节切入为区域活动把脉[J].学前教育研究,2005(9):24-26.
- [5] 陈磊.体验孩子:宋庆龄幼儿园[M].上海:华东师范大学出版社,2001.
- [6] 北京师范大学教育系,北京崇文区光明幼儿园自选游戏课题组.幼儿园游戏指导:光明幼儿园自选游戏实验的思路与方法[M].北京:北京师范大学出版社,1997.
- [7] 董旭花,刘霞,赵福云,等.幼儿园自主性学习区域活动指导[M].北京:中国轻工业出版社,2014.
- [8] 秦元东,王春燕.生态式幼儿园区域活动指导[M].北京:北京师范大学出版社,2012.

收稿日期:2021-02-01

作者简介:王素群(1969—),女,汉族,广西博白人,幼儿园高级教师,本科,主要从事幼儿教育等工作。