

# 10 kV 配电线路防雷保护间隙的设计

朱秀兰 李梦达<sup>1</sup>

(大庆职业学院机电工程系, 大庆 163255; 东北石油大学电气信息工程学院<sup>1</sup>, 大庆 163318)

**摘要** 10 kV 配电线路是电力系统中较靠近用户的一级, 绝缘水平较低, 且中低压架空线路一般无特别的防雷措施。在研究 10 kV 绝缘导线的断线机理基础上, 利用 ANSYS 软件仿真分析防雷保护间隙与绝缘子配合时遭雷击过电压放电过程及电压等级分布, 确定了防雷保护间隙的大小。所设计的防雷保护间隙在非雷击状态不承载电压, 雷击时先于绝缘子可靠放电, 保护了绝缘子不受烧伤和击穿, 保证了线路在雷电过电压下的安全运行。

**关键词** 10 kV 配电线路 防雷技术 保护间隙

**中图法分类号** TM863; **文献标志码** A

10 kV 油田配电网分布广、设备多, 线路结构以 T 接线路为主, 相对于其他配电网, 因雷电过电压引起线路跳闸的几率大。对油田配电网防雷保护方法进行研究, 提出新的防雷保护方案, 设计防雷保护间隙。避免发生雷击断线、绝缘子闪络而造成大面积停电和引起重大人身伤害事故, 提高供电可靠性和经济效益。

## 1 架空绝缘导线断线机理

绝缘导线的雷击断线特性表现为雷电过电压引起绝缘子闪络并击穿导线绝缘层时, 被击穿的绝缘层呈一针孔状, 持续的工频短路电流电弧受周围绝缘的阻隔, 弧根只能在针孔处燃烧, 在极短的时间内导线就会被整齐的烧断。通常在工频续流烧断导线或损坏绝缘子之前就会引起断路器动作, 切断电弧<sup>[1]</sup>。因此, 及时切断雷电流引起的工频续流, 是防止架空绝缘导线线路雷击断线事故的根本方法。传统的防雷措施是直接加装氧化锌避雷器, 该方法虽然可以在一定程度上防止雷击断线及绝

缘子闪络, 但由于避雷器长时间承载电压, 大大缩短了使用寿命, 另外雷击后避雷器保护残压大, 许多时候不能使线路重合闸成功。

本文以氧化锌避雷器为基础设计了其外间隙的形式, 当线路出现雷电过电压时, 外间隙首先放电, 雷电流经氧化锌限流元件释放, 而工频续流则被氧化锌限流元件截断, 从而防止因雷击引起的工频续流高温熔断绝缘线路(雷击断线及绝缘子闪络), 保护绝缘线路。

## 2 安装氧化锌避雷器时保护间隙的确定

### 2.1 雷电冲击过电压下的绝缘配合

对空气间隙施加冲击电压, 使电压随着时间迅速由零上升到峰值后, 又逐渐衰减。研究表明, 空气间隙完成击穿过程所需的时间与电压形式和间隙的结构都有关, 但在任何情况下, 这个时间都反映出有它的偶然性, 这一现象决定了空气间隙击穿的统计性。在多次施加电压时, 击穿时而发生, 存在一个击穿的概率  $P$ 。随着电压峰值的继续升高, 多次施加电压时, 间隙的击穿百分比越来越高。最后, 当电压峰值超过某一值后, 间隙在每次施加电压时都将发生击穿<sup>[2]</sup>。事实上, 这个值在实验中是很难准确求得的, 但已有的试验数据表明, 在雷电冲击击穿电压下, 空气间隙击穿电压或绝缘子串的

闪络电压的概率大体上遵从正态分布,可用式(1)来表示<sup>[3]</sup>

$$P = \int_{-\infty}^u \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{u-u_{50}}{\delta/\sqrt{2}}\right] du \quad (1)$$

式(1)中  $u_{50}$  为击穿概率为 50% 时的峰值电压,  $\delta$  是标准偏差。在极不均匀电场中,由于放电时延较长,雷电冲击击穿电压的分散性也大,其标准偏差可取为 3%。函数  $P(u)$  不存在为 0 和 1 的数值,因此相当于  $P=0$  的耐受电压  $u_0$  和  $p=1$  的保证击穿电压  $u_{100}$  取  $u_0 = u_{50}(1 - 3\delta)$ ,  $u_{100} = u_{50}(1 + 3\delta)$ 。查表可知,当  $u_0 = 0.9u_{50}$ ,  $u_{100} = 1.09u_{50}$  时,其耐受概率和间隙保证击穿的概率均为 99.85%,因此以  $u_0$  和  $u_{100}$  来进行绝缘配合,安全性是足够高的。

设保护间隙在雷电冲击 50% 放电电压为  $u_{h50}$ ,在此间隙距离下的雷电冲击波形的保证击穿电压  $u_{h100} = u_{h50}(1 + 3\delta)$ 。另设绝缘子串的雷电冲击 50% 放电电压为  $u_{j50}$ ,则此绝缘子串的雷电冲击耐受电压  $u_j = u_{j50}(1 - 3\delta)$ 。按照雷电冲击电压下保护间隙和绝缘子串的绝缘配合原则,要使保护间隙在雷电冲击过电压下能够保证先于绝缘子串放电,可靠保护绝缘子,使  $u_{h100} = u_j$ ,  $u_{h50}(1 + 3\delta) = u_{j50}(1 - 3\delta)$ ,计算知此时  $u_{h50} = 0.835u_{j50}$ ,即只要保护间隙的雷电冲击 50% 放电电压不大于绝缘子串雷电冲击 50% 放电电压的 0.835 倍,保护间隙就可以在雷电过电压时对绝缘子串进行有效的保护<sup>[4]</sup>。

这种绝缘配合方式下保护间隙对绝缘子串的保护效果分析如下:设  $u_h$  和  $u_j$ ,分别为保护间隙的雷电冲击击穿电压和绝缘子串的闪络电压  $u_h - N(u_{h50}, 0.03^2 u_{h50}^2)$ ,  $u_j - N(u_{j50}, 0.03^2 u_{j50}^2)$ 。当  $u_h < u_j$  时,可知保护间隙对绝缘子进行了有效保护,反之则绝缘子串先于间隙放电,保护失效。由于保护间隙的引弧端头与绝缘子串之间有相当的距离,因此可以设  $u_h$  和  $u_j$  相互独立,  $u_h - u_j - N(u_{h50} - u_{j50}, 0.03^2 u_{h50}^2 + 0.03^2 u_{j50}^2)$ ,令  $t = u_h - u_j$ ,  $u_{h50} = ku_{j50}$ , ( $0 < k < 1$ ),则

$$t - N((k-1)u_{j50}, 0.03^2(k^2 + 1)u_{j50}^2) \quad (2)$$

对式(2)进行标准化,令  $z = \frac{t - (k-1)u_{j50}}{0.03 \sqrt{(k^2 + 1)u_{j50}^2}}$ ,

则  $z$  服从标准正态分布,当  $u_h > u_j$  时保护是小概率,为:  $P(u_h > u_j) = P(t > 0) = P\left(z > \frac{1-k}{0.03 \sqrt{k^2 + 1}}\right)$ 。取  $k = 0.85$ ,查标准正态分布表可得到  $P(u_h > u_j) = P(z > 3.81) = 0.007\%$ ,即保护间隙的雷电冲击 50% 放电电压只要不大于绝缘子串的雷电冲击 50% 放电电压的 0.85 倍,则保护间隙对绝缘子串的保护有效性不小于 99.993%。因此采用  $u_{h50} = 0.835u_{j50}$ <sup>[5]</sup>,即保护间隙雷电冲击 50% 放电电压为绝缘子串放电冲击闪络电压的 0.835 倍,是可以在雷击闪络时对绝缘子串进行有效保护的<sup>[5]</sup>。

以龙北油田东一线为例,10 kV 输电线路一般采用 P—15 绝缘子,有关试验数据表明,雷电冲击作用下,查正极性雷电冲击电压下绝缘子串击穿电压与绝缘子串长的关系曲线可知,10 kV 输电线路绝缘子串的正极性雷电冲击 50% 放电电压为 118 kV。按上述绝缘配合原则,保护间隙的雷电冲击 50% 放电电压应该不大于以上绝缘子串雷电冲击 50% 闪络电压的 0.835 倍,即不大于 90.53 kV 时,才能对绝缘子串进行有效的保护。根据日本 NGK 公司的招弧间隙标准,雷电冲击击穿电压  $u_{50\%}$  与保护间隙距  $H(m)$  的关系公式  $u_{50\%} = 550H + 80$ ,可算得当  $u_{50\%} = 90.53$  kV 时,间隙距离  $H = 21.06$  mm,这就是保护间隙在雷电冲击过电压下与 10 kV 输电线路绝缘子 P—15 进行绝缘配合的间隙距离,即保护间隙的距离应该不大于 21.06 mm,这时才能保证间隙能够先于绝缘子串放电。

## 2.2 操作过电压下的绝缘配合

操作过电压产生的原因是电力系统中存在着许多电感和电容元件,如电力变压器、互感器、发电机、消弧线圈、电抗器、线路电感等,它们均可以作为电感元件,而线路导线对地电容和相间电容,补偿用的并联和串联电容器组,和高压设备的杂散电容均可作为电容元件。当系统进行操作或发生故障使其工作状态发生变化时,将产生过渡过程,在过渡过程中,由于电源继续供给能量,而且储存在电感中的磁能将会在一瞬间转变为以静电场能量形式储存在系统的电容中,由此产生了数倍于电源

电压的操作过电压,操作过电压是延续几毫秒至几十毫秒之后才消失的暂态过电压。近年来开展的对操作过电压波形下气体绝缘放电特性的研究表明,操作过电压的波形对放电电压也有很大的影响。试验表明,对于各种形状的空气间隙,操作冲击电压下空气间隙的击穿多发生在波前时间范围内,波尾时间对击穿电压没有影响,并且操作冲击的击穿电压和波前时间之间呈现所谓的“U形曲线”的关系,即空气间隙的50%击穿电压在不同的波前时间下具有极小值,并且对应于极小值的波前时间随着间隙距离的增大而增加。对于7 m以下的间隙,这个波前时间大致在(50—200) μs之间,因此采取规程规定的250/2 500 μs标准操作冲击波形下的保护间隙的击穿电压进行绝缘配合。

10 kV 输电线路的绝缘配合要考虑以下几种操作过电压:空载线路合闸和重合闸过电压、开断空载线路和并联补偿电容过电压、开断空载变压器过电压、以及单相间歇性电弧接地过电压。对于10 kV系统的绝缘配合,系统的最大操作过电压  $U$  可取为4倍的线路最大运行相电压,即40 kV。在操作冲击电压下,空气间隙的击穿电压或绝缘子串的闪络电压的概率分布大体上也遵从正态分布,如同雷电冲击电压一样,也用式(1)表示。但是与雷电冲击电压不同的是,由于空间电荷的形成、扩散和放电时延有很大的统计性,所以操作冲击击穿电压的分散性很大,一般要比雷电冲击击穿电压大得多。对于波前时间在数十到数百微妙的操作冲击电压,极不均匀电场间隙的50%击穿电压的标准偏差  $\sigma$  约为5%,波前时间超过1 000 μs后,可达8%左右。因此保护间隙在操作冲击电压下的耐受电压仍可以取为: $u_0 = u_{50}(1 - 3\sigma)$ 。根据保护间隙在操作冲击过电压下的绝缘配合原则,即要使保护间隙在系统可能的最大操作过电压下击穿的概率足够小,也不降低整个线路的绝缘水平,应使  $u_m = u_0 = u_{50}(1 - 3\sigma)$ 。因为保护间隙的操作冲击击穿电压的波形取为250/2 500 μs的标准波形,这里  $\sigma$  取为5%,得  $(u_{50} - u_m)/u_m = 0.15/0.85 = 0.176$ 。即满足在操作

冲击击穿电压下绝缘配合的要求,保护间隙的操作冲击50%放电电压应该比系统的最大操作过电压高17.6%。

由此可知,10 kV 系统的最大操作过电压为40 kV,因此保护间隙的操作冲击50%放电电压应该大于47.04 kV,可能满足设计要求。因为极不均匀电场中操作冲击击穿电压同样有极性效应,正极性下的操作冲击50%击穿电压要比负极性下小的多,所以进行绝缘配合的保护间隙的操作冲击击穿电压取为正极性下的值。按照  $u_{50} = 47.04$  kV,查正极性下标准操作冲击波50%放电电压和间隙距离的关系曲线,可以得到满足绝缘配合要求的保护间隙的绝缘配合距离为18 mm。

## 2.3 基于 ANSYS 的防雷保护间隙与绝缘子配合仿真

根据以上保护间隙和绝缘子串在雷电冲击电压和操作冲击电压下的绝缘配合的结果可知,满足绝缘配合要求的保护间隙最大距离为21.06 mm,最小间隙距离为18 mm,因此满足设计要求的保护间隙两个引弧端头之间的距离要在最大距离和最小距离之间取值,这里取为20 mm,由此设计出来的间隙距离已经可以满足工程上安装的要求。在10 kV输电线路中多采用P-15针式陶瓷绝缘子。其结构以及尺寸如图1所示。现在其两端加装两个球形招弧端子,即保护间隙为20 mm的两个球形放电装置。两个球直径均为20 mm,两球球心距绝缘子边缘10 mm,建模仿真,如图2和图3。

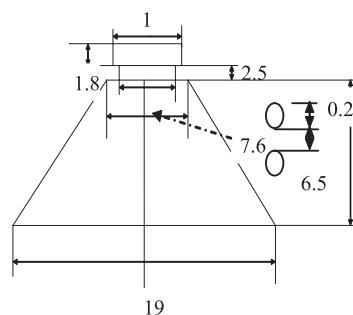


图1 防雷保护间隙与绝缘子配合(图中数据单位 cm)

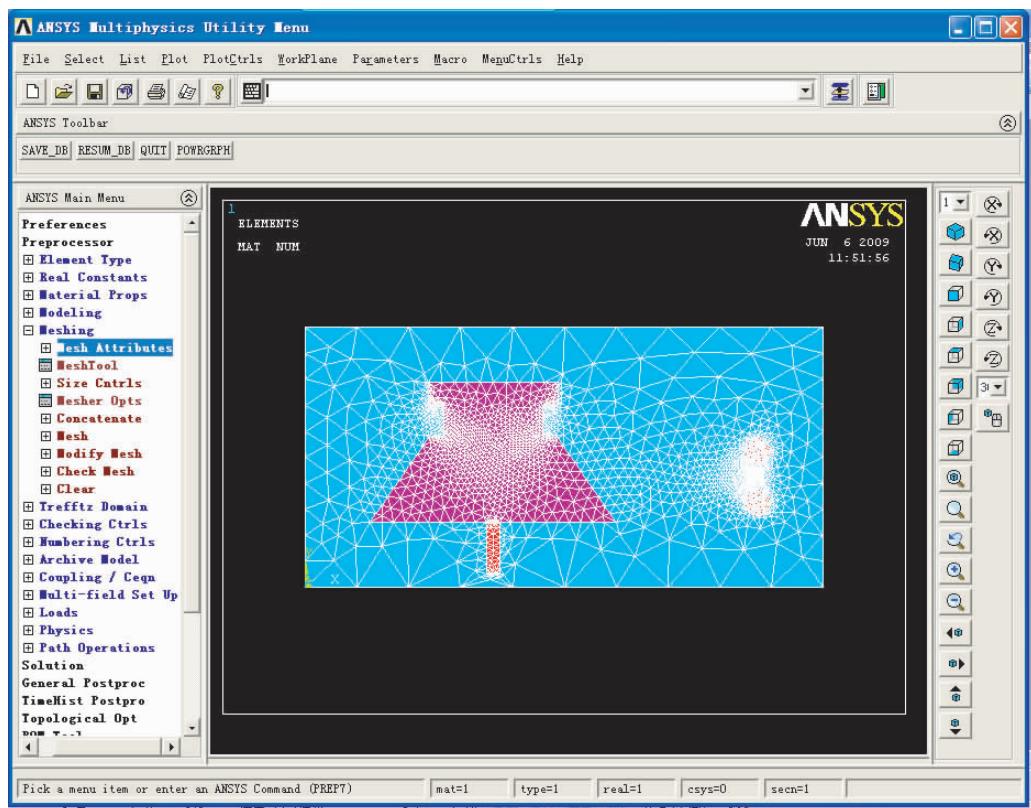


图2 绝缘子与间隙建模

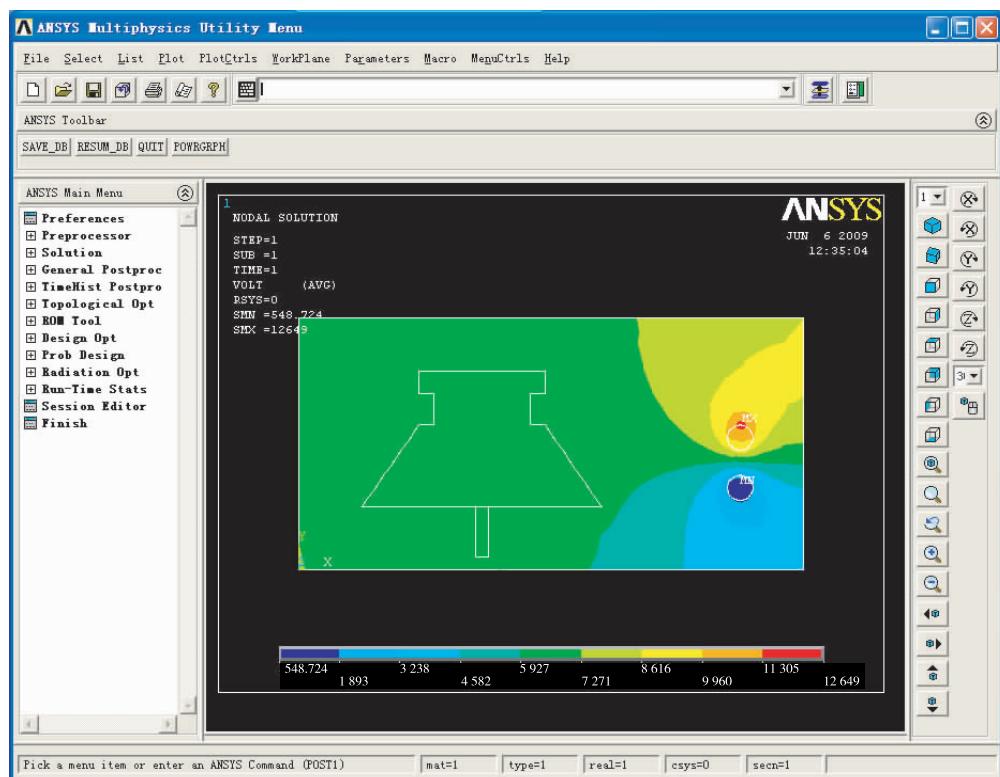


图3 绝缘子与保护间隙配合时雷击过电压下的电位分布

### 3 结论

以上所设计的防雷保护间隙在 10 kV 线路遭受雷击时输导雷电流和工频续流,不使放电电弧沿绝缘子串形成,保护了绝缘子不受烧伤和击穿,防止了线路掉线停电事故的发生,保证了线路在雷电过电压下的安全运行。以上的雷电冲击 50% 闪络电压仿真结果,验证了所设计的防雷保护间隙的有效性和可靠性,因此该防雷保护间隙具有实用价值。

### 参 考 文 献

- 1 李建龙. 输电线路的防雷措施. 农村电气化, 1997;3(5):4—5
- 2 朱德恒, 严 璋. 高电压绝缘. 北京: 清华大学出版社, 1992; 68—70
- 3 日本电气学会通信教育会. 绝缘子. 北京: 机械工业出版社, 1990
- 4 YoKoyama S, Tan A, Morooka Y. Lightning performance of over-head power distribution lines considering effect of nearby trees. Proc 27th ICLP A Vignon, France, NO. OC-1, 2004
- 5 Sugimoto H, Asakawa A, Yokoyama S. Lightning protection method of power distribution lines located in mountainous areas tacing the sea of Japan. Trans IEE of Japan, 2001;120—B(1), 38—43

## The Design of the Clearance of Lightning-proof in a 10 kV Distribution Line

ZHU Xiu-lan, LI Meng-da

(Daqing Vocational College, Mechanical and Electrical Engineering Department, Daqing 163255 P. R. China;  
EE Dept. North East Petroleum University<sup>1</sup>, Daqing 163318, P. R. China)

**[Abstract]** A 10 kV power distribution line is in vicinity to the user in the electricity system, which has very lower insulation. Also the lower and medium voltage aerial lines usually have no efficient methods to protect from lightning. Based on the reason why the 10 kV insulated wire breaks down, using ANSYS to decide the lightning-proof clearance by analyzing the course of over-voltage discharging and its voltage rates distribution when lightning hits the circuit while the clearance cooperates with insulator. The clearance provided is only to arrest the lightning and does not serve any other purpose. But it prior to insulator to discharge when lightning hits so that the insulator can be well protected from being broken down or burnt, which ensures the line operates safely under over-voltage lightning.

**[Key words]** 10 kV power distribution line lightning-proof technology protecting clearance