

# 关于输电线路耐雷水平的综合研究分析

曾 奕

(四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

**摘 要:** 雷击是危及输电线路安全可靠运行的主要因素, 深入研究输电线路的耐雷水平对保证电力系统的安全可靠运行具有重要的工程意义。介绍了输电线路的雷击类型, 分别分析了杆塔接地电阻、线路档距、杆塔高度、导线电压、杆塔波阻抗对输电线路耐雷水平的影响, 阐述了输电线路常用的防雷措施: 架设避雷线、降低杆塔接地电阻、增设耦合地线、提高绝缘等级, 为输电线路耐雷水平的深入研究打下基础。

**关键词:** 输电线路; 耐雷水平; 接地电阻; 避雷线

**Abstract:** Lightning stroke is the main factor that endangers the safe and reliable operation of transmission line. Therefore the deep research on lightning withstand level of transmission line has the engineering significance on guaranteeing the safe and reliable operation of power system. The lightning strike types of transmission line are introduced and the influences of grounding resistance of tower, line span, tower height, wire voltage and tower wave impedance on lightning withstand level of transmission line are analyzed respectively. The common protection measures against lightning are described including setting up overhead ground wire, decreasing the grounding resistance of tower, increasing coupling ground wire and improving insulation level, which lays a foundation for the deeper research on lightning withstand level of transmission line.

**Key words:** transmission line; lightning withstand level; grounding resistance; overhead ground wire

**中图分类号:** TM712.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)06-0020-04

## 1 引 言

目前雷击仍是危及输电线路安全可靠运行的主要因素, 国家电网 2003 年生产运行情况统计分析表明<sup>[1]</sup>, 全国 500 kV 输电线路中雷击跳闸占线路跳闸的 46%, 330 kV 输电线路中雷击跳闸占线路跳闸的 29%, 220 kV 输电线路中雷击跳闸占线路跳闸的 33.4%, 110 kV 输电线路中雷击闪络占线路跳闸的 35.3%。国际大电网会议 (CIGRE) 公布的美国、前苏联等 12 个国家连续 3 年的运行资料表明, 总长度  $3.27 \times 10^4$  km 的 275~500 kV 输电线路的雷害事故占总事故的 60%; 对各国数十年的统计资料分析后得知<sup>[2~6]</sup>, 输电线路高杆塔、大保护角时的绕击占雷击的主要地位; 当杆塔高度低、绝缘水平低、冲击接地电阻高时会发生反击闪络事故。因此深入研究输电线路的耐雷水平对保证电力系统的安全可靠运行具有重要的工程意义。

## 2 输电线路的雷击类型

根据雷电过电压形成的物理机理, 雷电过电压可

以分为两种: ①直击雷过电压, 即雷电直接击中杆塔、避雷线或者导线所引起的线路过电压; ②感应雷过电压, 即雷电击中线路附近的大地, 由于电磁感应在导线上产生的过电压。实际运行经验表明, 直击雷过电压对电力系统危害最大, 感应雷过电压只对 35 kV 及以下线路产生威胁。

按照雷击线路的部位不同, 直击雷过电压又可分为两种情况: ①雷击线路杆塔或避雷线时, 雷电流通过雷击点阻抗使得该点对地电位大大升高, 当雷击点与导线之间的电位差超过线路绝缘的冲击放电电压时, 会对导线发生闪络, 使导线出现过电压, 由于杆塔或避雷线的电位 (绝对值) 高于导线, 因此称之为反击; ②雷电直接击中导线 (无避雷线) 或绕过避雷线 (屏蔽失效) 击中导线, 直接在导线上引起过电压, 这种形式的雷击通常称为绕击。反击、绕击示意图如图 1 所示。

在工程实际中, 输电线路防雷性能的优劣主要用耐雷水平和雷击跳闸率这两个指标来衡量。耐雷水平是指线路遭受雷击时所能耐受的不致引起绝缘闪络的最大雷电流幅值 (kA), 耐雷水平越高, 线路防雷

性能越好。雷击跳闸率是指折算至年平均雷电日数为 40 d 的标准条件下,每 100 km 线路每年因雷击引起的线路跳闸次数,其计算单位是  $1/100 \text{ km} \cdot \text{a}$ 。雷击跳闸率是衡量线路防雷性能的综合性指标。

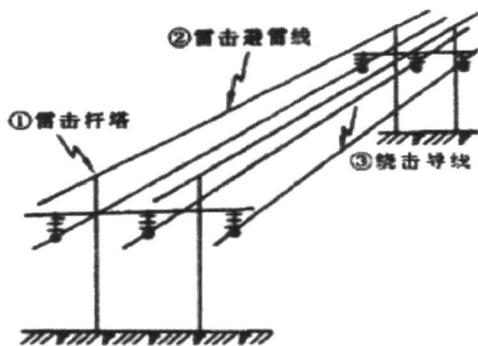


图 1 线路反击、绕击示意图

回到塔顶或横担所需时间增长,致使塔顶或横担电位增高,容易造成反击,导致线路耐雷水平降低,跳闸增大。因此在条件允许的情况下,尽量降低杆塔高度以降低反击跳闸率。耐雷水平随杆塔高度的变化情况如图 4 所示。

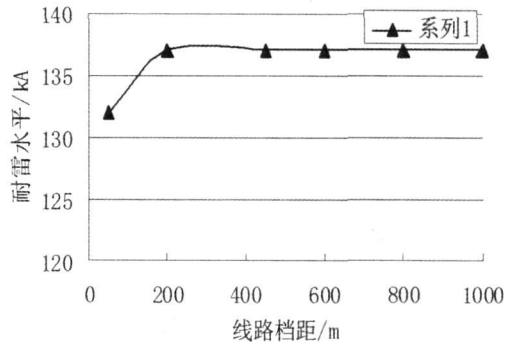


图 3 线路档距对耐雷水平的影响

### 3 耐雷水平的影响因素

#### 3.1 杆塔接地电阻对耐雷水平的影响

当雷击杆塔时,由于杆塔的冲击接地电阻远小于避雷线及输电导线的波阻抗,因而大部分雷电流由杆塔入地,剩余部分则沿避雷线流向邻近杆塔。与传统杆塔集中电感模型相比较,采用多波阻抗模型进行仿真,杆塔接地电阻对耐雷水平的影响在减弱(见图 2),这与实际相符。因此,多波阻抗模型同集中电感模型相比,将会提高输电线路防雷计算的准确性。

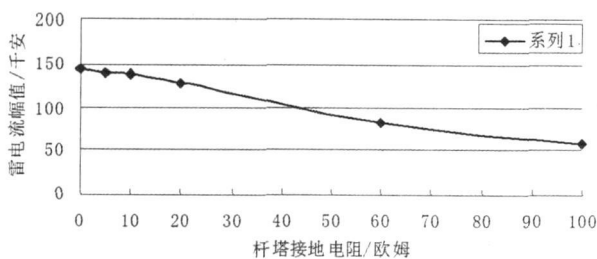


图 2 耐雷水平随接地电阻的变化

#### 3.2 线路档距对耐雷水平的影响

雷击杆塔后,雷电波沿线路传播,传到下基杆塔需要一定的时间,因此当线路档距发生变化时,线路耐雷水平也不同。在接地电阻取值等都不变的情况下,只考虑档距的变化,逐步增大线路的档距,可得到线路档距对耐雷水平的影响,如图 3 所示。

#### 3.3 杆塔高度对耐雷水平的影响

杆塔越高,线路截获的雷电越多。一方面,杆塔高度越高,引雷面积增大,着雷次数增加;另一方面,雷击塔顶后沿塔传播至接地装置时引起负反射波返

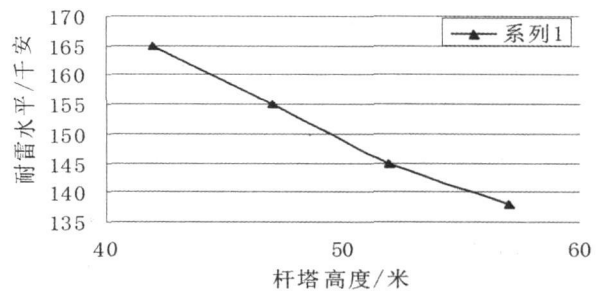


图 4 耐雷水平随杆塔高度的变化情况

#### 3.4 导线电压对耐雷水平的影响

由于 500 kV 线路工作电压较高,反击时,它在绝缘子两端电压已占有相当大的比率。在耐雷水平计算中忽略工频电压的影响将造成较大的误差,因此必须考虑此时导线上的工作电压,而导线上的交流周期电压具有很大的随机性,如图 5 所示,不同相位角下雷击塔顶时的耐雷水平是有差别的。

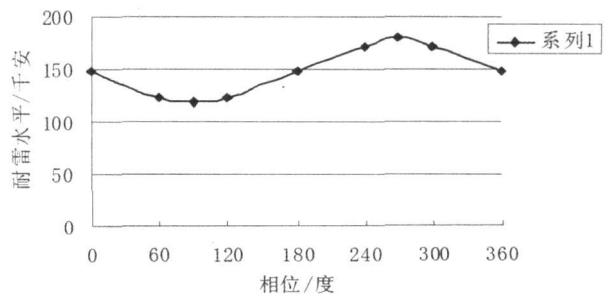


图 5 耐雷水平随运行电压相位的变化

#### 3.5 杆塔波阻抗对耐雷水平的影响

杆塔波阻抗是高塔及特高塔防雷设计中的一个重要参数,波阻抗对反击耐雷水平的影响如图 6 所

示。从图 6 可以看出,对于 500 kV 输电线路,杆塔的波阻抗独立地变化 10%,输电线路的反击耐雷水平相应地变化约 10%。

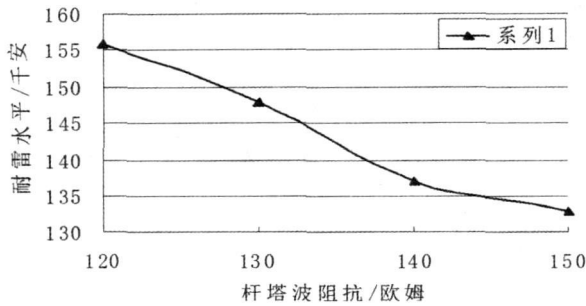


图 6 耐雷水平随杆塔波阻抗的变化

## 4 输电线路常用的防雷措施

### 4.1 架设避雷线

架设避雷线是输电线路防雷保护最基本和最有效的措施。避雷线的主要作用是防止雷直击导线,同时还具有以下作用。

- 1)分流作用,以减小流经杆塔的雷电流,从而降低塔顶电位;
- 2)通过对导线的耦合作用减小线路绝缘子上承受的电压;
- 3)由于对导线的屏蔽作用,能够降低导线上的感应过电压。

通常来说,线路电压越高,采用架设避雷线的方法效果越好,而且避雷线在线路造价中所占的比重也越低(一般不超过线路总造价的 10%)。因此规程规定,220 kV 及以上电压等级的输电线路应全线架设避雷线,110 kV 线路一般也应全线架设避雷线。同时,为了提高避雷线对导线的屏蔽效果,避免雷电绕过避雷线而直接击中导线,即减小绕击率,避雷线对边导线的保护角一般采用  $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ; 220 kV 及 330 kV 双避雷线线路应做到  $20^{\circ}$  左右; 500 kV 及以上的超高压、特高压线路都架设双避雷线,保护角在  $15^{\circ}$  及以下;山区宜采用更小的保护角。但是随着避雷线保护角的减小,避雷线与导线的耦合也会随之增加,耦合损失也会不断增加,因此,对避雷线保护角的确定应当权衡绕击率与耦合损耗二者,采用最经济的保护角。另外,杆塔上两根地线间的距离,不应超过导线与地线间垂直距离的 5 倍。

### 4.2 降低杆塔接地电阻

避雷线与塔脚电阻相配合,在雷击时能够起到大幅度的降压作用,故而对 110 kV 及以上的混凝土杆塔或铁塔线路,是一种最有效的防护措施,尤其在电阻率  $\rho \leq 300 \Omega \cdot \text{m}$  的土壤中,降低接地电阻较易,经济投资小。计算表明:杆塔接地电阻每增加 10~20  $\Omega$ ,雷击跳闸率将会增加 50%~100%。

目前降低杆塔接地电阻的方法主要有以下几种。

#### 4.2.1 利用接地电阻降阻剂

在接地极周围敷设了降阻剂后,可以起到增大接地极外形尺寸,降低与周围大地介质之间的接触电阻的作用,从而能在一定程度上降低接地极的接地电阻。降阻剂用于小面积的集中接地、小型接地网时,其降阻效果较为显著。降阻剂是由几种化学物质配制而成的混合物,是具有良好导电性能的强电解质和水分。这些强电解质和水分被网状胶体所包围,网状胶体的空格又被部分水解的胶体所填充,使它不至于随地下水和雨水而流失,因而能长期保持良好的导电作用。

#### 4.2.2 采用爆破接地技术

通过爆破制裂,再用压力机将低电阻率材料压入爆破裂隙中,从而能够起到改善很大范围内土壤导电性能的目的,相当于大范围的土壤改性。

#### 4.2.3 扩大接地网面积

接地网的接地电阻与接地网面积的平方根近似成反比,地网面积越大,其接地电阻值越低。增大地网面积无疑是一种降低接地电阻的好方法。但是这种方法所消耗的金属材料多,将导致经济性能的下降。

#### 4.2.4 外引接地

将主接地网与主接地网区域外某一低土壤电阻率区域敷设的辅助接地装置相连,以达到降低整个接地系统接地电阻的目的。其缺点同样是增加了经济投资。如果接地装置附近有导电良好及不冻的河流湖泊,可采用此法。但是在设计安装时,考虑到连接接地极干线自身电阻所带来的影响,外引式接地极长度不宜超过 100 m。

除了以上 4 种较常用的降低接地电阻的方法外,增加地网的埋深、采用自然接地体、深井接地、局部换土等方法也可以有效降低接地网的接地电阻。在确定降低接地电阻的具体措施时,应根据当地原有运行经验、气候状况、地形地貌的特点和土壤电阻率的高低等条件进行全面、综合分析,因地制宜地选择合理

的方法。这样既可保障线路、设备的正常运行,又可避免接地装置工程投资过高情况的发生。

### 4.3 增设耦合地线

在降低杆塔接地电阻有困难时,可采用架设耦合地线的措施,即在导线下方再架设一条地线。它的作用主要有以下两个方面。

1)加强避雷线与导线间的耦合,从而减小绝缘子串两端电压的反击电压和感应电压的分量;

2)增加了雷击塔顶时向相邻杆塔分流的雷电流。

运行经验表明,耦合地线对减小雷击跳闸率的效果是显著的,尤其在山区的输电线路其效果更明显。中国曾对 110 kV 和 220 kV 有避雷线线路采用过加装耦合地线的做法。

3)装设线路避雷器。即使全线架设避雷线,也不能完全排除在导线上出现雷击过电压的可能性,将带有间隙的复合外套氧化锌避雷器安装在雷电活动强烈、土壤电阻率高、降低杆塔接地电阻有困难的线路段,可以使由于雷击所产生的过电压超过一定的幅值时动作,给雷电流提供一个低阻抗的通路,使其泄放到大地,从而限制了电压的升高,当三相绝缘子串旁都配置线路避雷器时,可大大减少输电线路的雷击跳闸率,提高耐雷水平,保障线路、设备的安全运行。

然而,线路避雷器的防雷效果只对安装点起保护作用,完全达到防雷效果需全线安装线路避雷器,投资巨大,在线路的部分杆塔上安装线路避雷器,如果选点不合适就达不到应有的保护效果,通常都是在遭受雷击严重的部分杆塔点处装设线路避雷器。因此,为避免在使用线路避雷器时的盲目性,必须掌握线路的运行现状及重要性,有针对性地选用线路避雷器。

### 4.4 提高绝缘等级

在所有防雷措施中,采用不平衡绝缘和加强绝缘是最经济、也是最容易实现的。增大绝缘时的效果,一是提高了绝缘水平,从而提高了反击和绕击的耐雷水平;二是降低了建弧率;三是减少了保护角。由于大跨越、高杆塔线路雷击过电压高于一般线路段,为降低其跳闸率,可加大大跨越档距导线与避雷线之间的间距,或者增加线路绝缘子串的片数,以加强绝缘。

对于同杆架设的双回路线路,其绝缘子串的片数应有所差别,其目的是:在雷击时绝缘子串片数少的回路先发生闪络,闪络后的导线相当于地线,增加了对另一回路的耦合作用,可降低其绝缘子串上的过电

压,保证可以继续供电,一般认为两回路的绝缘水平相差相电压峰值为宜。

## 5 结束语

分析了耐雷水平的影响因素,发现与传统杆塔集中电感模型相比较,采用多波阻抗模型进行仿真,杆塔接地电阻对耐雷水平的影响在减弱,这与实际情况相符;在接地电阻取值等都不变的情况下,只考虑档距的变化,逐步增大线路的档距,发现初期可以提高耐雷水平,后期几乎无影响;杆塔越高,线路截获的雷电越多,因此在条件允许的情况下,尽量降低杆塔高度以降低反击跳闸率;在耐雷水平计算中忽略工频电压的影响将造成较大的误差,因此必须考虑此时导线上的工作电压;杆塔波阻抗是高塔及特高塔防雷设计中的一个重要参数,随着波阻抗的增大,耐雷水平逐渐降低。

此外,还阐述了输电线路常用的防雷措施,架设避雷线是输电线路防雷保护最基本和最有效的措施;避雷线与塔脚电阻相配合,在雷击时能够起到大幅度的降压作用,故而对 110 kV 及以上的混凝土杆塔或铁塔线路,是一种最有效的防护措施;在降低杆塔接地电阻有困难时,可采用架设耦合地线的措施,即在导线下方再架设一条地线;在所有防雷措施中,采用不平衡绝缘和加强绝缘是最经济、也是最容易实现的。

## 参考文献

- [1] 国家电网公司生产运营部. 国家电网公司 2003 年生产运行情况 [R]. 北京: 国家电网公司生产运营部, 2004.
- [2] 李培国. 国外对特高压输电线路雷击跳闸原因的一个新观点 [J]. 电网技术, 2000, 24(7): 63-65.
- [3] 马宏达. 各种避雷针的结构及其防雷性能 [J]. 电网技术, 2000, 24(12): 53-57.
- [4] 维列复金, 吴维韩. 俄罗斯超高压和特高压输电线路防雷运行经验分析 [J]. 高电压技术, 1998, 24(2): 76-79.
- [5] 易辉, 崔江流. 我国输电线路运行现状及防雷保护 [J]. 高电压技术, 2001, 27(6): 44-45.
- [6] 钱冠军. 500 kV 线路直击雷典型事故调查研究 [J]. 高电压技术, 1997, 23(2): 73-75.

(收稿日期: 2009-10-10)