

# 220 kV 输电线路防绕击侧针防护效果研究

张仕名<sup>1</sup> 张先怡<sup>2</sup> 许安<sup>3</sup> 崔涛<sup>3</sup> 陈平<sup>1</sup> 李昆<sup>1</sup> 李晓东<sup>1</sup> 江来<sup>1</sup> 李振华<sup>1</sup>

(1. 西昌电业局, 四川 西昌 615000; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031;

3. 四川电力科学研究院, 四川 成都 610072)

**摘要:** 雷击是高压及超高压输电线路的主要事故之一, 反击跳闸发生的概率很低, 绕击是发生故障跳闸的主要原因。可以在地线上架设水平侧向短针的分布式绕击防治措施以有效提高地线引雷能力, 防止绕击跳闸。以西昌 220 kV 输电线路 N148 号杆塔为例, 分析并比较了杆塔附近地线上安装防绕击侧针前后, 线路绕击率、绕击跳闸率以及绕击雷电流幅值的变化情况。通过实例计算发现, 防绕击侧针安装以后明显改善了线路的防绕击能力, 可见安装防绕击侧针作为输电线路的防雷改造措施, 具有较好的实用性。

**关键词:** 防绕击侧针; 绕击; 防护效果; 计算方法

**Abstract:** Lightning stroke is one of the major accidents in HV and EHV transmission lines. The trip-out accidents are mainly caused by shielding failure and rarely caused by back flashover. In order to prevent the trip-out by shielding failure, the lightning rod against shielding failure can be installed on the lightning conductor that can improve the triggered lightning capacity of the ground wires. Taking N148 tower in 220 kV transmission line of Xichang for example, the differences of shielding failure rate, shielding failure trip-out rate and shielding failure lightning peak current of the transmission line which has installed the lightning rod against shielding failure near N148 tower are analyzed. With the help of calculation analysis, it is found that after installing the lightning rod against shielding failure, the ability against shielding failure of transmission lines has been improved obviously. Therefore, it is in high practicality to use lightning rod against shielding failure as the improvement measures of the protection against lightning in transmission lines.

**Key words:** lightning rod against shielding failure; shielding failure; protection effect; calculation method

中图分类号: TM862 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)04-0075-05

## 0 引言

雷击是高压及超高压输电线路的主要事故之一。国家电网公司跨区电网输电线路 2003—2005 年雷击分别占总故障跳闸的 45%、34%、17% (2005 年冰灾占较大比重); 国家电网公司系统 2003 年 110~500 kV 线路雷击闪络跳闸占线路总跳闸的 35.12%; 在湖北超高压线路前 20 年运行中, 发生已查明雷害事故就有 19 次, 占故障跳闸总次数的 57.6%。故雷击跳闸故障是影响输电线路特别是超高压线路安全可靠运行的主要形式。

从雷电流幅值概率分布曲线来看, 雷电流幅值主要集中分布在 5~50 kA 范围, 约占整个雷电次数的 90% 以上; 超过 100 kA 的雷电流较少。而引起线路雷击跳闸的雷电流幅值以 10~50 kA 范围占绝大

多数, 与雷电绕击比率相吻合。加强线路的防雷设计, 对于 500 kV 线路采取以防绕击雷为主, 220 kV 线路以防绕击、反击雷并重, 110 kV 线路以防反击雷为主的技术方针, 有针对性地采取综合防雷技术措施。根据雷电定位系统统计分析, 负极性雷电产生的概率远大于正极性雷电, 但正极性雷电流的平均强度大于 100 kA 的概率较负极性雷电流高。

## 1 输电线路直击雷防护

输电线路直击雷分为绕击雷和反击雷。由于造成反击和绕击的雷电流具有各自特点, 且对输电线路的危害具有差异。因此需要根据线路雷击跳闸后收集和测量的各种相关数据, 对绕击和反击进行判断。判据如表 1 所示, 具体包括: 雷电流大小、线路耐雷水平、地线保护角、杆塔接地电阻、绝缘子类型、

地形地貌及防雷设施使用情况等。

表1 绕击与反击的不同特征

序号	比较项目	反击	绕击
1	雷电流幅值	雷电流较大	雷电流较小
2	杆塔接地电阻	大	小
3	闪络基数与相数	一基多相或多基多相	单基单相或相邻两基同相
4	地形特点		上坡或山顶等易绕击处
5	闪络相别	耐雷水平较低相(如下相)	易绕击相(如顶相)

110 kV 线路的反击耐雷水平一般在 45 ~ 75 kA, 220 kV 反击耐雷水平一般为 75 ~ 110 kV, 500 kV 反击耐雷水平一般为 120 ~ 160 kA。这样, 只有当落雷超过耐雷水平时, 才引起跳闸, 但概率很小也属正常。对于运行线路防止反击发生, 主要是通过降低杆塔接地电阻等措施来保证线路的耐雷水平, 减少雷击跳闸率。故运行中通过加强杆塔接地装置的维护, 控制了反击发生的条件, 一般情况下, 超高压线路发生反击的概率极低。

绕击是输电线路雷击跳闸的另一种形式(对于高压输电线路绕击为主要形式)。随着 GPS 雷电定位观测系统的广泛采用, 人们对输电线路雷击故障有了更加清晰的认识。统计资料表明, 大量的雷击跳闸故障都是由相对较小的雷电流引起的, 一般约 15 ~ 30 kA, 如此小的雷电流幅值远未达到反击的条件<sup>[1-2]</sup>。理论分析认为, 在相对较小的雷电流状态下, 避雷线屏蔽失效, 造成雷电绕击导线, 引起输电线路雷击跳闸。

## 2 防绕击侧针的防护机理与安装方式

输电线路的屏蔽系统由地线、杆塔和大地三者构成, 绕击跳闸可归咎于屏蔽系统的引雷能力不够, 针对具体情况增强某一屏蔽体的引雷能力可有效地防止绕击跳闸。这里提出在地线上架设水平侧向短针的分布式绕击防治措施以有效提高地线引雷能力, 防止绕击跳闸。它可保护档距内任意危险段且引针很短, 易于工程实现。

输电线路同一档距内, 不同位置的绕击率也是存在差异的: 临近输电线路杆塔的导线由于受到杆塔的屏蔽作用, 遭受绕击的概率较低, 称为安全区;

在离杆塔稍远的区域, 由于杆塔对周围电场有畸变作用, 同时这一范围得不到杆塔的屏蔽保护, 导致这一区域遭受绕击的概率显著升高, 称为危险区; 而离杆塔更远的区域, 既不存在杆塔对电场的畸变作用, 也没有杆塔的屏蔽保护, 其绕击率恢复正常水平, 称为正常区。

通过小模型试验得出, 一基约 30 m 高的 220 kV 杆塔(如图 1 所示)在其两侧 10 ~ 30 m 的范围内, 绕击概率远高于档距中央部分<sup>[3-4]</sup>。

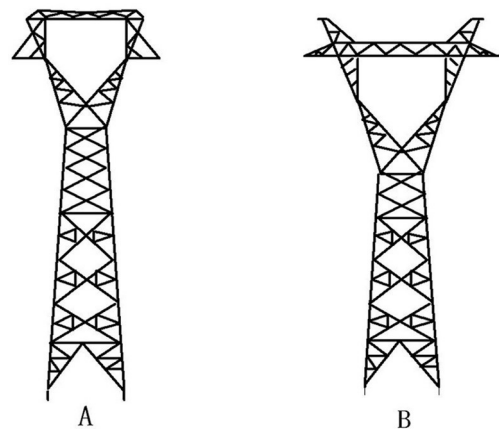


图1 220 kV 典型塔型

根据高压输电线路同一档距内安全区、危险区及正常区域的划分, 在距离杆塔 15 m 及 30 m 处的避雷线上分别水平加装两组长度为 1.2 m 的防绕击预放电避雷针, 安装方式如图 2 所示。

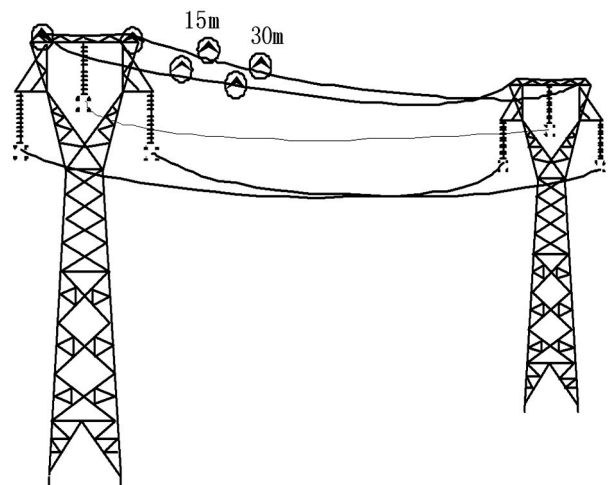


图2 220 kV 猫头塔防绕击侧针安装示意图

由现场统计数据及实验室模拟实验发现, 高压及以上输电线路, 绕击主要发生在杆塔临近区域, 且某些线路杆塔临近区域的绕击远高于档距中央。因此针对临近杆塔附近线路绕击情况进行分析, 可忽略地线和导线的弧垂, 假设地线和导线水平平行。

### 3 防绕击侧针的防护效果与计算方法

#### 3.1 加装防绕击侧针时对保护角的影响

在未安装绕击避雷针时,图3中避雷线对输电线路的保护效果分析如下。

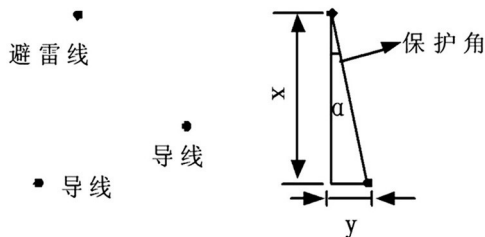


图3 220 kV 典型塔型保护角示意图

根据图3中的参数得到该图所示线路保护角 $\alpha$ 与避雷线和导线间相对位置的关系如下。

$$\tan\alpha = \frac{y}{x} \quad (1)$$

式中 $\alpha$ 为避雷线对边导线的保护角。

当根据导线高度及导线和避雷线的相对位置关系,可以计算得到避雷线的高度 $h_s$ 。

安装防绕击侧针以后,根据防绕击侧针的工作原理以及保护范围,可以近似认为是将避雷线外移,防绕击侧针长度为 $Z$ 得到如图4所示。

根据图4,加装防绕击侧针后,相当于是保护角变小了,此时线路保护角为 $\beta$ 。

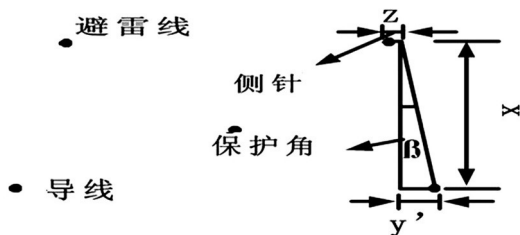


图4 防绕击侧针对保护角的影响

$$\tan\beta = \frac{y'}{x} = \frac{y-z}{x} \quad (2)$$

以西昌220 kV 昌山线、山越线输电线路某基杆塔为例进行分析,昌山线N148号杆塔具体参数如表2所示。

根据N148杆塔参数可得,导线和避雷线间的水平间距为

$$y = 9.5 - 6 = 3.5 \text{ m}$$

根据杆塔及导线安装结构,结合公式(1)可得避雷线与导线垂直距离为 $x$ 。

$$x = \frac{y}{\tan\alpha} = \frac{3.5}{\tan 17.65^\circ} = 11 \text{ m}$$

在距离杆塔15 m及30 m处的避雷线上分别水平加装两组防绕击预放电避雷针,由于侧针长度可以根据实际需要进行调整,假设侧针安装调节后,其在水平方向长度 $Z$ 为1.2 m。

则根据公式(2)安装侧针后避雷线对变相导线的保护角变为

$$\beta = \arctan \frac{3.5 - 1.2}{11} = 11.81^\circ$$

#### 3.2 加装防绕击侧针时对绕击率的影响

线路运行经验、现场实测和模拟实验均证明,雷电绕过避雷线直击导线的概率与避雷线对边导线的保护角、杆塔高度以及线路经过地区的地形、地貌、地质条件有关。按照DL/T 620-1997标准,绕击率 $P_\alpha$ 可用下式计算。

$$\text{对平原线路: } \log P_\alpha = \frac{\alpha \sqrt{h_t}}{86} - 3.9 \quad (3)$$

$$\text{对山区线路: } \log P_\alpha = \frac{\alpha \sqrt{h_t}}{86} - 3.35 \quad (4)$$

式中 $\alpha$ 为避雷线对边导线的保护角; $h_t$ 为杆塔高度,单位为m。

由这两个计算绕击率的公式可知,绕击率与保护角大小有关,安装防绕击侧针后,效果类似保护角减小,故绕击率也会受到影响。

根据安装侧针后的避雷线保护角结合式(3)或者式(4)能求出安装避雷针后杆塔附近导线新的绕击率 $P_\beta$ 。再由安装防绕击侧针前后的绕击率,得到绕击率的下降程度为

$$\Delta P = \frac{P_\alpha - P_\beta}{P_\alpha} \times 100\% \quad (5)$$

安装防绕击侧针前,则根据式(4)可得

$$\begin{aligned} \log P_\alpha &= \frac{\alpha \sqrt{h_t}}{86} - 3.35 = \frac{17.65 \sqrt{34}}{86} - 3.35 \\ &= -2.153 \end{aligned}$$

可以得到 $P_\alpha = 0.00703$ 。

加装防绕击侧针后,由式(4)可得

$$\begin{aligned} \log P_\beta &= \frac{\beta \sqrt{h_t}}{86} - 3.35 = \frac{11.81 \sqrt{34}}{86} - 3.35 \\ &= -2.549 \end{aligned}$$

可以得到 $P_\beta = 0.002823$ ,因此安装防绕击侧针前后绕击率的变化情况为

$$\Delta P = \frac{0.00703 - 0.002823}{0.00703} \times 100\% = 60\%$$

表2 西昌220 kV 昌山线 N148号杆塔具体参数

故障杆、易击杆塔塔号	杆塔全高 $h_t/m$	避雷线水平间距 $/m$	边相保护角 $\alpha /^\circ$	导线排列方式	边相导线距塔中心距离 $/m$	边相导线对地高度 $/m$	绝缘子串长度 $S/mm$	地面倾角 $\theta /^\circ$
昌山线 N148	34	12	17.65	三角	9.5	23	3 176	40

通过上述分析发现,加装防绕击侧针以后,杆塔临近区域的绕击率降低了60%,得到了较好改善。

前面分析中没有考虑防绕击侧针的预放电特性,且针型电极较棒形电极有更强的引雷效果。实际应用中,防绕击侧针有效地将大量绕击雷转变为击中杆塔和避雷线的直击雷。

### 3.3 加装防绕击侧针时对绕击跳闸率的影响

根据雷电统计资料,自然界中的雷闪绝大部分为负雷闪,以负雷闪为例进行分析。雷电绕击导线时的耐雷水平为

$$I = \frac{U_{50\%}}{100} \quad (6)$$

雷击导线超过耐雷水平的雷电幅值概率为

$$P_I = 10^{(-\frac{I}{88})} \quad (7)$$

建弧率为

$$\eta = \left\{ 4.5 \left( \frac{U_n}{\sqrt{3}S} \right)^{0.75} - 14 \right\} \times 10^{-2} \quad (8)$$

雷电穿越避雷线保护绕击导线引起杆塔绝缘闪络雷击跳闸率次数为

$$n_{dx} = N_{dx} P_{I_{ij}} \eta \quad (9)$$

式中  $P_{I_{ij}}$  为雷击导线时超过阈值的雷电值概率;  $N_{dx}$  为100 km年(40个雷暴日)线路雷电绕击次数,即

$$N_{dx} = N_L P_\alpha \quad (10)$$

式中  $N_L$  为100 km年架空线路雷击总数;  $P_\alpha$  为在正的避雷线保护角(避雷线比导线更靠近杆塔轴心布置)时,雷电绕击导线概率。

因此,加装防雷侧针后,由于绕击率受到影响,绕击跳闸率也会随着受到影响。

雷电绕击导线时,导线的耐雷水平为

$$I = \frac{1\ 200}{100} = 12 \text{ kA}$$

建弧率为

$$\eta = \left\{ 4.5 \left( \frac{220}{\sqrt{3} \times 3\ 176} \right)^{0.75} - 14 \right\} \times 10^{-2} = 57.8\%$$

雷击导线超过耐雷水平的雷电幅值概率为

$$P_I = 10^{(-\frac{12}{88})} = 0.7305$$

安装防雷侧针前,绕击跳闸率为

$$n_{dx} = 0.28 \times (12 + 4 \times 34) \times 0.578 \times \frac{0.703}{100} \times \frac{73.05}{100} = 0.123$$

安装防雷侧针后,可以等效为避雷线外移,两避雷线间距增加2.4 m,绕击跳闸率为

$$n_{dx} = 0.28 \times (14.4 + 4 \times 34) \times 0.578 \times \frac{0.2823}{100} \times \frac{73.05}{100} = 0.05$$

以上计算分析表明,安装防绕击侧针后,输电线路绕击跳闸率也得到了明显改善。

### 3.4 加装防绕击侧针时对绕击雷电流幅值的影响

经典电气几何模型如图5所示。根据电气几何模型分析±220 kV直流输电线路的最大绕击雷电流幅值在安装防绕击前后的变化情况<sup>[5-6]</sup>。

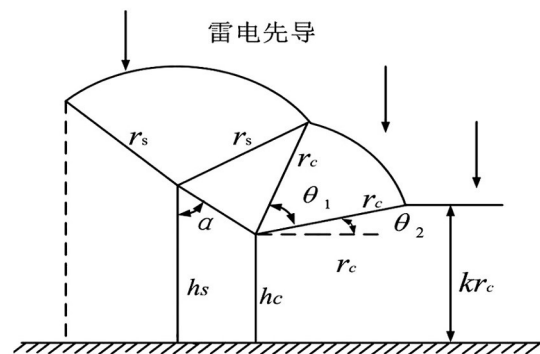


图5 经典电气几何模型示意图

图5中  $r_c$  为雷电先导对导线击距;  $r_s$  为雷电先导对避雷线击距;  $h_c$  为导线悬挂总高度,  $h_s$  为避雷线悬挂点高度;  $kr_c$  为对地击距;  $k$  为击距系数,经典电气几何模型中认为  $k=1$   $r_c=r_s$ 。

导线击距与雷电流的关系计算公式参照 IEEE std 123-1997。

$$r_c = 10I^{0.65} \quad (11)$$

当  $\theta_1 = \theta_2$  时,暴露弧为0,不再发生绕击,此时对应的击距为最大击距。当地面倾角  $\theta=0$  时,最大击距  $r_{sm}$  为

$$r_{sm} = \frac{(h_s + h_c) + 2\sqrt{h_s h_c} \sin \alpha}{2 \cos^2 \alpha} \quad (12)$$

由于实际建设中,大部分高压杆塔处于山区,所

在位置地形复杂多变,地面倾角不为0(如图6所示)。因此当线路所处位置存在地面倾角 $\theta$ 时,线路背山侧的保护角相还增加地面倾角的角度。

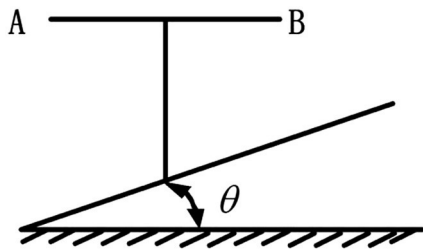


图6 杆塔地面倾角示意图

当地面倾角 $\theta \neq 0$ 时,最大击距 $r_{sm}$ 为

$$r_{sm} = \frac{(h_s + h_c) \cos \theta + \sqrt{(h_s + h_c)^2 \cos^2 \theta - \frac{\cos^2(\alpha + \theta)}{\cos^2 \alpha} (h_s - h_c)^2 \sin(\alpha + \theta)}}{2 \cos^2(\alpha + \theta)} \quad (13)$$

针对临近杆塔附近线路绕击情况进行分析,可忽略地线和导线的弧垂,假设地线和导线水平平行。即此处计算取 $h_s$ 和 $h_c$ 为避雷线和导线悬挂点高度,地面倾角为 $\theta = 40^\circ$ 。

利用式(13)可计算出最大击距: $r_{sm} = 140.02$  m

输电线路的最大绕击雷电流 $I_{max}$ 与最大击距 $r_{sm}$ 有关,即

$$I_{max} = (0.1 r_{sm})^{1.54} \quad (14)$$

由此公式可以得出: $I_{max} = 58.23$  kA

安装防绕击侧针以后,由之前分析可知避雷线对边相导线的保护角改变为 $\beta = 11.81^\circ$

利用式(13)可得: $r_{sm} = 101.43$  m

带入式(14)可得: $I_{max} = 35.44$  kA

根据上述分析可得,安装防绕击侧针后最大绕击雷电流幅值明显减小。根据上一小节的分析得到, $\pm 220$  kV输电线路的耐雷水平为 $I_{min} = 12$  kA。由此可以看出,由于加装防绕击侧针以后,发生绕击的最大雷电流幅值已经大大减小。雷电流幅值只有在输电线路的耐雷水平与最大绕击雷电流幅值之间,即 $[I_{min}, I_{max}]$ 才能发生绕击跳闸,而最大雷电流幅值的减小,即发生绕击跳闸的雷电流幅值区间变小,意味着发生线路跳闸的可能也越小。因此防绕

击侧针较好地抑制输电线路的绕击跳闸故障。

## 4 总 结

通过对220 kV杆塔线路加装防绕击保护侧针分析可知:加装侧针后,线路的绕击率、绕击跳闸率、绕击雷电流幅值都有了明显的改善;侧针长度越长,侧针的保护作用越大,改善的效果越好。所以在加装侧针时,应侧针长度越长越好。

但是在实际应用中,首先,可以肯定侧针越长保护作用越好的性能,但侧针的运输、制造、购买以及加装等也是需要一定的成本,不能一味使用加装较长的侧针来防绕击雷,必须综合考虑杆塔避雷线与导线的水平距离,侧针的制造、运输和加装成本,以及杆塔周围环境等因素,尽量使得加装侧针经济实用。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 钱冠军, 王晓瑜, 徐先芝, 等. 沿输电线路档距方向绕击概率的变化[J]. 高电压技术, 1999, 25(1): 23-25.
- [4] 樊春雷, 吴广宁, 李瑞芳, 等. 高压输电线路绕击跳闸率的研究[J]. 电瓷避雷器, 2009(2): 36-39.
- [5] 马御棠, 吴广宁, 张星海, 等. 地形对输电线路最大绕击雷电流的影响[J]. 电瓷避雷器, 2010(1): 29-32.
- [6] 李瑞芳, 吴广宁, 曹晓斌, 等. 复杂地形输电线路绕击耐雷性能计算方法的改进[J]. 高压电器, 2011, 47(4): 96-100.

作者简介:

张仕名(1964),男,本科,高级工程师,主要从事输电线路在山区的防雷研究;

张先怡(1988),男,硕士研究生,主要研究方向为过电压防护与接地技术。

(收稿日期:2013-03-10)

# 促进节能减排 推动低碳经济发展