

输电线路防雷措施效果浅析

刘安伟, 王琼晶

(泸州电业局, 四川 泸州 646000)

摘要:通过对四川省某地区近年来输电线路遭受的雷击跳闸情况进行分析,并评估已采用的各种防雷措施,总结出了提高输电线路耐雷水平,降低线路跳闸率的一些实践经验。

关键词:输电线路;雷击跳闸;防雷措施

Abstract: Based on the analyses of lightning trip-out in transmission lines in a district of Sichuan province in recent years the different adopted protection measures against lightning are evaluated and some practical experiences are summarized about improving lightning withstand level and reducing the trip-out rate of transmission line

Key words: transmission line; lightning trip-out; protection measures against lightning

中图分类号: TM **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0061-04

2007年至2010年,四川省某市管辖范围内共发生了71次35 kV及以上的输电线路雷击跳闸事故,其中35 kV线路46次,占总雷击跳闸次数的64.8%;110 kV线路19次,占雷击跳闸次数的26.7%;220 kV线路6次,占雷击跳闸次数的8.5%。

在71次雷击事故中,感应雷、绕击雷、反击雷各占一定的比例,泸州电业局从2007年起采取了多种防雷措施,利用大修技改的机会进行全方位改造,以求降低输电线路的雷击跳闸次数。下面力求对目前已采取的防雷措施进行统计分析,通过实际案例对比优劣,总结出各种防雷措施的适用范围。

1 输电线路运行现状

该地区输电线路在运行中存在着以下几个薄弱环节:①线路运行时间较长,线路老化严重,其中运行30年以上的线路有8条,运行10~20年的线路有5条,尤其是35 kV输电线路普遍为老旧线路,雷击跳闸率极高;②部分35 kV线路没有架设架空避雷线,缺少避雷线的屏蔽作用,杆塔及线路完全暴露在雷电的环境中,线路遭受雷电直击的概率极高;③部分输电线路防雷设计考虑比较保守,比如很多同塔双回的220 kV输电线路的避雷线保护角均为 15° ,导致线路的绕击率相当高;④该地区地形较为起伏,北部为丘陵地形,南部为山地地形,大部分线路的杆塔沿着山顶、半坡架设,或者是丘陵地形当中的相对突出点,位

于容易遭受雷击的位置。

2 输电线路雷击跳闸类型

经过统计分析该地区从2007年至今的输电线路跳闸情况,引起线路跳闸雷击形式主要有以下几种。

(1)绕击类跳闸,其故障点的特点为线路架设有架空避雷线,故障点的接地电阻合格,故障点为单基单相或相邻两基同相,跳闸时故障点附近的雷电流幅值较小,故障点所处地形一般为山顶边坡等易绕击地形,故障相一般为水平排列的边相或垂直排列的中、上相。此类跳闸多出现在110 kV、220 kV线路当中;

(2)反击类跳闸,其故障点的特点为故障点的接地电阻不合格,故障点为一基多相或多基多相,跳闸时故障点附近的雷电流幅值较大,故障相一般为水平排列的中相或垂直排列的中、下相。此类跳闸在35~220 kV线路当中均有出现;

(3)感应雷跳闸,其故障点的特点为线路未架设架空避雷线,故障点的接地电阻合格,故障点为一基多相或单相,跳闸时故障点附近的雷电流幅值较大,故障相一般为水平排列的边相或垂直排列的上相,且多发生在35 kV及以下电压等级的输电线路上。

3 典型雷击跳闸及防雷措施浅析

3.1 35 kV新况南线跳闸情况及改造措施

35 kV 新况南线自 2007 年以来共因雷击跳闸 10 次,占 35 kV 线路雷击跳闸总数的 21.7%。表 1 为 35 kV 新况南线 2007 年至今的雷击跳闸次数汇总。

表 1 35 kV 新况南线跳闸情况

跳闸年份	跳闸时间	年跳闸总次数
2007 年	4-2 0:25	6
	6-29 6:20	
	7-6 2:55	
	7-8 21:25	
	7-16 20:55	
2008 年	8-23 14:35	2
	7-27 23:36	
2009 年	8-1 0:14	2
	8-28 23:15	
2010 年	8-28 23:30	2

从表 1 中可以看出 35 kV 新况南线在 2008 年之前几乎逢雷必跳,为了降低线路的雷击跳闸率,提高供电可靠性,2008 年 7 月对该线路进行了大规模改造,全线架设了架空避雷线,在 2009 年、2010 年的跳闸次数比往年少了很多。避雷线的主要作用是防止雷直击导线,同时还具有分流作用,以减小流经杆塔的雷电流,从而降低塔顶电位;通过对导线的耦合作用可以减小线路绝缘子的电压;对导线的屏蔽作用还可以降低导线上的感应过电压。对于那些没有架空避雷线的 35 kV 线路,威胁它们的主要是感应雷,而限制感应雷的最有效手段就是全线架设架空避雷线。架设架空避雷线后的感应过电压如式 (1) 所示。

$$U_i = (1 - k)U_i \quad (1)$$

式中, K 为耦合地线或避雷线对导线的耦合系数; U_i 为没有架空避雷线时的感应过电压; U_i' 为架设了架空避雷线之后的感应过电压。

通过式 (1) 看出,由于地线对导线的耦合作用,导线上的感应电压将下降。架空避雷线的存在使导线上的感应雷过电压是没有架空地线时的 $(1 \sim k)$ 倍,耦合系数 k 越大,导线上的感应过电压越小。

3.2 35 kV 洞胡线跳闸情况及改造措施

35 kV 洞胡线自 2007 年以来共因雷击跳闸 7 次,占 35 kV 线路雷击跳闸总数的 15.2%。表 2 为 35 kV 洞胡线 2007 年至今的所有雷击跳闸汇总。

从表 2 中可以看出,绕击的比例为 5%,反击的比例为 0%,感应雷的比例为 95%。因此,35 kV 洞胡线雷击跳闸的主要形式为感应雷跳闸。

从表 2 中还可以看出 35 kV 洞胡线在 2010 年的

雷击次数比往年同期高出了很多,而 2010 年的雷电活动强度并没有 2009 年高,其中一个重要原因就是 2009 年该线路进行改造时在 45 号、46 号、52 号、53 号、54 号、55 号上安装了雷电接闪器。由于 35 kV 洞胡线 3 号~60 号没有架空避雷线,安装的雷电接闪器使得雷电击杆率比往年高了很多,造成了该线路在 2010 年的雷击跳闸率明显增加。并且通过 2010 年的数据可以看出,遭受雷击的杆塔均不是安装了接闪器的杆塔本身,而是其相邻的杆塔,这就说明了雷电接闪器只可以保护安装的杆塔本身,而其相邻的杆塔无法保护。

由于雷电接闪器以及各种类型避雷针都是通过牺牲自我的原理来保护线路,吸引空气中的雷电流到自身间接提高了线路被反击、感应雷击中的风险。原本 35 kV 线路的耐雷水平就比较低,安装了避雷针就相当于增大了线路吸引雷电的能力。因此,雷电接闪器以及各种类型避雷针千万不可随意安装,尤其是对于耐雷水平相对较低的 35 kV 线路更是要慎之又慎。

3.3 35 kV 新况北线雷击跳闸情况

2010 年 6 月 19 日 01:35,35 kV 新况北线跳闸,重合闸不成功。经过故障巡视发现 35 kV 新况北线 9 号杆三相绝缘子遭到雷击,10 号杆也有两相绝缘子遭到雷击,其中 9 号杆中相导线处球头挂环被融化脱落造成接地短路故障,导致重合闸不成功。

经过调查发现 35 kV 新况北线 9 号杆面向大号侧右杆接地引下线被盗,造成该基杆的接地电阻不合格,从现场的情况来看,此次跳闸为多基多相雷击跳闸,符合反击跳闸的故障特征。改善接地电阻可以说是输电线路防雷措施中最常用、最广泛应用的措施。首先,降低接地电阻是防止线路反击跳闸的最有效手段,反击过电压的表达式见式 (2)。

$$U_i = \frac{U_{50\%}}{(1-k)\beta R_{ch} + (\frac{h_a}{h_t} - k)\beta \frac{L_t}{\tau_f} + (1 - \frac{h_g}{h_c} k_0) \frac{h_c}{\tau_f}} \quad (2)$$

式中, $U_{50\%}$ 为绝缘子串的 50% 冲击放电电压; k 为导线、地线间的耦合系数; β 为杆塔分流系数; R_{ch} 为杆塔冲击接地电阻; L_t 为杆塔等值电感; h_a 为导线横担高度; h_t 为杆塔总高度; τ_f 为雷电流波头长度; h_g 为地线平均高度; h_c 为导线平均高度; k_0 为导线与地线间的几何耦合系数。

由式 (2) 可以得知,在线路绝缘水平已经固定的情况下,降低杆塔冲击接地电阻 R_{ch} 是最直接的方法。降低接地电阻的方法多种多样,需要因地制宜,

表 2 35 kV 洞胡线跳闸情况

统计年份	跳闸时间	故障点 / 号	故障相别	雷击定性	故障点总计
2007	8—25 23: 50	41	三相	感应雷	3
		42	中相、右边相	感应雷	
		63	右边相	感应雷	
2008	8—1 1: 15	58	左边相、右边相	感应雷	1
2009	7—14 3: 20 8—28 23: 55	16	右边相、左边相	感应雷	3
		21	右边相	感应雷	
		22	左边相、右边相	感应雷	
2010	6—19 0: 40 7—7 23: 35 7—21 23: 05 8—2 18: 10	25	中相	感应雷	13
		46	三相	感应雷	
		2	上线	绕击	
		22	三相	感应雷	
		46	中相	感应雷	
		60	中相、右边相	感应雷	
		8	右边相	感应雷	
		18	中相、右边相	感应雷	
		22	三相	感应雷	
		50	右边相	感应雷	
51	中相、右边相	感应雷			
57	右边相	感应雷			
59	右边相	感应雷			

目前泸州电业局一直坚持采用的两种降阻方式是：外引接地方式，也就是俗话说的接地引下线暗改明；以及加装石墨接地模块的方法。以上两种方式中，外引接地方式在 110 kV 及以上电压等级线路中已经普遍展开，取得了非常好的实际应用效果。加装石墨接地模块目前已在 35~220 kV 线路中推广，效果比较明显，并且石墨接地模块具有轻便、安装方法简单、灵活等诸多优点。

其他各种类型的防雷措施，比如避雷器、避雷针、接闪器等等，都是建立在杆塔接地电阻合格的基础之上。避雷针、避雷线是将保护范围内的雷电吸引到自己身上，通过接地装置安全导入地中。避雷针、避雷线是引雷针、引雷线，通过牺牲自身，保护一定范围内的物体在此空间内不受雷击。为了使雷电流能顺利下泄，避雷针、避雷线的接地体一定要满足要求。

3.4 220 kV 纳叙一、二线雷击跳闸情况及改造措施

220 kV 纳叙一、二线为该局 2009 年新投运的 220 kV 同塔双回线路，全线均位于泸州南部的山区之中，属于多雷区域。由于该线路的设计时间为 2007 年，对于防雷措施的考虑不够周全，全线直线塔避雷线对上导线的保护角均为 22° 左右，部分直线转角塔的避雷线保护角度数甚至达到了 30° 以上。而经过 2009 年的统计分析，220 kV 纳叙一、二线在以线路为中心半径 1 km 的范围内共落雷 1 274 次，处

于极其容易遭受雷击的区段，在进行防雷设计时应当将线路的保护角设计为 10° 以下。

2009 年全年，220 kV 纳叙一、二线共发生 4 次雷击跳闸，均为绕击形式，故障点均为中、上相。

2010 年，该局在 220 kV 纳叙一、二线上安装了 2 组线路避雷器、8 组雷电接闪器。2010 年 1 月至今共发生 2 次雷击跳闸，2 次均为绕击形式。2 处故障点均不在避雷器、接闪器的保护范围之内。

因此，雷电接闪器、避雷器对于防止线路绕击跳闸还是有作用的，前提是一定要保证杆塔的接地电阻合格。2010 年该局在该线路上安装了雷电接闪器之后跳闸次数减少了 50% 就是一个很好的证明。

从 U_A 表达式可知，绕击时导线上电压幅值随雷电流 I 的增加而增加，若超过线路绝缘子串的，则绝缘子串将闪络。绕击耐雷水平 I_k 可令 $U_A = U_{50\%}$ 来计算，即

$$I_k = U_{50\%} \frac{2Z_s + Z_c}{Z_s Z_c}$$

中国现行标准建议也可以根据 $U_A \approx 100 I$ 来近似估算线路绕击时的耐雷水平，因而有

$$I_k = \frac{U_{50\%}}{100} \quad (3)$$

由上式可以求出 110 kV、220 kV 线路绕击式耐雷水平分别只有 7、12 kA。因此线路的绕击耐雷水平是很低的，要提高线路的绕击耐雷水平只能通过以

下几种途径:一是增加线路的绝缘,比如增加一到两片绝缘子;二是增大避雷线的保护角,部分重要的电源线路采用 0° 甚至负保护角;三是采取其他防雷措施,比如在易击段线路上安装避雷器等防绕击装置。就目前的情况来说,线路投运以后杆塔的形式已经固定,无法再增加线路绝缘、增大避雷线保护角,采取其他防雷措施成为最简单有效的方法。泸州电业局在 220 kV 纳叙一、二线上取得一定的成功经验后,决定采取进一步的防雷措施,在线路上安装防绕击避雷针、加装线路避雷器,以期能够更加减少雷击跳闸次数。

4 输电线路防雷保护措施的适用性总结

4.1 架设避雷线

架设避雷线是输电线路防雷保护有效措施。避雷线的主要作用是防止雷直击导线,同时还具有分流作用,可以减小流经杆塔的雷电流,从而降低塔顶电位;此外,通过对导线的耦合作用可以减小线路绝缘子的电压;其次对导线的屏蔽作用还可以降低导线上的感应过电压。从该局的实际运行经验中可以看出,架设避雷线对于耐雷水平较低的 35 kV 线路尤其重要。而对于 110 kV 及以上电压等级线路,从前面的分析可以看出,绕击已经成为威胁 110 kV 及以上线路的主要雷击形式,因此在条件允许的情况下尽可能地增大线路的保护角是非常有必要的,新建的 110 kV、220 kV 同塔双回线路最好是都能够采用 0° 甚至负保护角。

4.2 降低杆塔接地电阻

降低杆塔接地电阻可以减小雷击杆塔时的电位升高,这是配合架设避雷线所采取的一项有效措施。在土壤电阻率低的地区,应充分利用铁塔、钢筋混凝土杆的自然接地电阻。在高土壤电阻率的地区,用一般方法很难降低电阻时,可采用多根放射形接地体,或采用有效的降阻剂降低接地电阻值。目前该局已经将降低接地电阻作为一项运行的基本工作来做,一切的防雷措施都必须建立在接地电阻合格的基础之上。在运行工作中,加装线路杆塔石墨接地、水泥杆接地引下线暗改明均为日常的工作内容。

4.3 安装线路避雷器等其他防雷装置

对于 110 kV 及以上电压等级输电线路,绕击跳闸为主要的雷击跳闸类型,在保证接地电阻合格的情况下,采取安装线路避雷器等其他装置成为了主要的

防绕击措施。目前该局安装的防雷装置有线路避雷器、雷电接闪器、可控避雷针,这 3 种装置当中,避雷器的使用经验已经比较丰富,效果也比较好,但是安装比较麻烦。雷电接闪器的安装比较简单,但是在原理上只能防直击雷,无法防反击雷,使用经验也只有一年。可控避雷针是近年来推出的一种新式防雷装置,从原理上分析可以防绕击和反击,但是使用经验仍然为零,其效果有待验证。

4.4 合理选择输电线路路径

大量运行经验表明,线路遭受雷击往往集中于线路的某些地段,称之为选择性雷击区,或称为易击区。线路若能避开易击区,或对易击区线段加强保护,则是防止雷害的根本措施。因此作为运行单位在日常工作中一定要注意特殊区段的清理建档工作。

5 结 语

架空线的防雷工作是一项长期复杂的系统工程,架空输电线路防雷设计的目的就是提高线路的耐雷水平,降低线路的雷击跳闸率,确保电网的安全运行。在考虑线路防雷方式时,应考虑到线路遭受雷击的类型,进行相应的防雷设计保护,同时应全面考虑线路的重要程度、系统运行方式、线路经过地区雷电活动强弱、地形地貌特点、土壤电阻率的高低条件,结合当地原有线路的运行经验,综合比较,因地制宜,采取合理的防雷保护措施。

参考文献

- [1] 胡毅. 输电线路运行故障分析与防治 [J]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 63—121.
- [2] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册第二版 [Z]. 北京: 中国电力出版社, 121—145.
- [3] DL/T 620—1997, 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [4] 陈文旺. 浅谈电力系统输电线路与防雷措施 [J]. 机电信息, 2009, 36 (246): 105—106.
- [5] 周泽存. 高电压技术 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [6] 沈培坤, 刘顺喜. 防雷与接地装置 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [7] 叶清泉, 林闻达. 输电线路防雷处理 [J]. 中国科技信息, 2008(21): 169—170.
- [8] 张鹏, 陈宇民. 110 kV 输电线路防雷分析 [J]. 云南电力技术, 2008, 36(5): 17—19. (收稿日期: 2010—10—10)