

雷电拦截新技术在高压输电线路的应用研究

宋海东¹, 杨 晖², 钟驰宇¹, 李默林³, 周茹萍⁴, 黄 昱⁵, 张 榆⁶, 李建明⁶

(1.四川盐源华电新能源有限公司, 四川 凉山 615000; 2.广州市气象局, 广东 广州 510530;
3.电子科技大学成都学院, 四川 成都 611731; 4.佛山市顺德区气象局, 广东 佛山 528399;
5.金盾防雷技术发展有限公司, 广东 佛山 528308; 6.国网四川省电力公司
电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要:输电线路雷电防护主要依据电气几何模型-保护角法进行设计,是用一次放电(单脉冲)、多次重复实验统计得出。雷击放电包含多个脉冲,单脉冲放电不能完全反映雷电多脉冲放电的物理过程。文中采用CIGRE授权出版的《雷电参数的工程应用》中的观测数据,给出了雷电放电的5个阶段及主要物理参数,同时就避雷针与雷电拦截器对雷电的接闪过程物理参数进行计算。最后,比较分析现有高压输电线路防雷技术的特点和局限性,提出了雷电拦截新技术的应用方法。

关键词:高压送电线路;多脉冲放电;铁塔避雷针;雷电拦截新方法

中图分类号:TM 863 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)06-0068-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220610

Application Analysis of New Lightning Interception Technology in High-voltage Transmission Line

SONG Haidong¹, YANG Hui², ZHONG Chiyu¹, LI Molin³, ZHOU Ruping⁴, HUANG Yu⁵,
ZHANG Yu⁶, LI Jianming⁶

(1.Sichuan Yanyuan Huadian New Energy Co., Ltd., Liangshan 615000, Sichuan, China; 2.Guangzhou Meteorological Bureau, Guangzhou 510530, Guangdong, China; 3. Chengdu College, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China; 4. Meteorological Bureau of Shunde District, Foshan 528399, Guangdong, China; 5.Jindun Lightning Protection Technology Development Co., Ltd., Foshan 528308, Guangdong, China; 6. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The lightning protection of transmission line is designed mainly based on electrical geometric model-protection angle method, and it is obtained by the statistics of a discharge (one pulse) and many repeated experiments. Single lightning discharge contains multiple pulses, and single pulse discharge can not truly reflect the physical process of lightning multi-pulse discharge. Five stages of lightning discharge and main physical parameters are given according to the observation data in "Lightning Parameters for Engineering Applications" authorized by CIGRE, and meanwhile, the physical parameters of tower lightning rod and lightning interceptor against lightning are calculated. Finally, the characteristics and limitations of the existing lightning protection technologies for high-voltage transmission line are compared and analyzed, and a new application method of lightning interception technology is proposed.

Key words: high-voltage transmission line; multi-pulse discharge; tower lightning rod; new lightning interception method

0 引言

现代雷电科学证实,雷电放电是多脉冲放电(正雷击的观测数据极少不足以描述其放电规律,雷电放电是指负雷击放电)^[1]。长期以来,人们基本按照雷电放电为单脉冲放电进行防护研究。2019年,经国际大电网会议(CIGRE)授权,中国出版了《雷电参数的工程应用》^[2]。经过对国内外雷电放电观测结果的系统研究,这里把雷电多脉冲放电分成5个阶段并定量分析了每个阶段的物理参数。显然,这是雷电防护的基本理论依据。

高压送电线路预防直接雷击主要采用安装架空避雷线(屏蔽线)进行保护。架空避雷线相当于一根水平的避雷带,而高压送电线路的铁塔犹如一根垂直的避雷针^[3]。下面对雷击铁塔避雷针的物理参数进行计算,并与雷击雷电拦截器的物理参数进行比较,给出了应用雷电拦截新技术预防直接雷击损害的新方法,为防雷工程设计人员提供参考和借鉴。

1 雷电放电过程及参数特征

1.1 雷电放电的5个阶段及其效应

雷电对铁塔放电的过程可以简单的分为5个阶段。第一阶段:先导的发生及对下风向的屏蔽作用。第二阶段:上行与下行先导的连接,即首次回击。第三阶段:箭式先导。第四阶段:继后回击。第五阶段:末次回击。下面以偶极子负地闪过程为例。

1.2 先导的发生及对下风向的屏蔽作用

雷云内部电荷极性为上正下负,电场强度可达50~100 MV/m。通常,雷云内部会发生放电现象,称为预击穿过程,为下行先导(又叫梯级先导)的形成提供条件。当底部电场强度达到300~500 kV/m时,开始击穿空气形成向下运动的流光,称为下行先导。其主要参数^[4]:梯级先导到地面的平均速度 V 为 2×10^5 m/s;每一梯级先导平均长度 L 为20~50 m;不连续梯级间隔时间 t 为10~200 μ s;通道温度 T 为 1×10^4 K;过程平均总电荷 Q 为5 C;先导头部端点电场强度 E 为5~10 MV/m。

受雷电下行先导端部电场的影响,铁塔端部感应出与下行先导端部电场相反极性的电荷。当其电场强度达到30~50 V/cm时就发生电晕,产生方向向上的流光,称为上行先导。上行先导与下行先导

受电场力的约束作相对运动,为上下先导连接提供必要条件。同时,铁塔端部的电晕会产生大量的离子,在下风向铁塔端部高度以下区域形成离子屏蔽层,抑制此区域地表物体上行先导的发展,其地面电场半峰值距离约为4 km^[5]。

1.3 首次回击及四大效应

当上行先导发展到距铁塔大约100 m左右,就与下行先导连接^[6]。上行先导端部与下行先导端部相连接的距离(最后一跳)叫击距^[4],用 r 表示。通常, r 的大小与雷电放电电流相关,可用经验公式估算: $r = ar^b$,式中 a 为10, b 为0.65^[7]。上下先导连接后,电荷从大地沿着放电通道冲向云端去中和通道和雷云电荷,形成放电通道,这一过程称为首次回击。其主要参数:电流峰值 i 为30 kA;电流陡度 di/dt 为10~20 kA/ μ s;总电荷量 Q 为5 C;传播速度 v 为 $(1 \sim 2) \times 10^8$ m/s;通道半径 r 为1~2 cm;通道温度 T 为 3×10^4 K。

首次回击将产生以下四大效应:1)在铁塔本体产生垂直电位梯度;2)在铁塔周围空间产生强烈电磁场;3)在铁塔所在的地面产生水平电位梯度;4)以铁塔底部为圆心向地下穿透形成电位漏斗^[8]。首次回击发生的同时,往往会有非主通道枝状雷击发生,在地面可见几个雷击点的痕迹。

1.4 箭式先导

箭式先导在首次雷击发生后沿着雷击通道运动,由于其运动路径从通道顶部直到底部,形状像箭一样而得名。它是首次回击与继后回击之间的过渡过程,起到承上启下的作用。其主要参数:传播速度 v 为 $(1 \sim 2) \times 10^7$ m/s;持续时间 t 为1~2 ms;过程通道滞留总电荷量 Q 为1~2 C;电流 i 峰值为1 kA;先导端部平均电场强度 E 为1~2 MV/m;通道温度 $T \geq 2 \times 10^4$ K。

1.5 继后回击及连续电流

继后回击在箭式先导结束后开始,不断重复首次回击的放电过程,幅值约为首次回击的一半。全球平均每次雷击过程存在3~5个回击,2010年9月12日瑞士桑德斯山记录到26个脉冲^[6]。因为每个回击都是一个脉冲,多次回击组成一组有时间间隔的脉冲串。2017年IEC 61643-11:2011/2 PFG《连接到低压配电系统的多脉冲电涌保护装置附加试验——性能要求和试验方法》正式使用“multi-pulses”,

多脉冲电涌保护器 (multi-pulses surge protective devices, MSPD) 成为专有名词^[9]。其主要参数: 电流 i 峰值为 10~15 kA; 电流陡度极值 di/dt 为 100 kA/ μ s; 电流陡度 di/dt (10%~90%) 为 30~50 kA/ μ s; 持续时间 t 为 30~40 μ s; 总电荷 Q 为 1 C; 传播速度 v 为 $(1\sim 2)\times 10^8$ m/s; 通道半径 r 为 1~2 cm; 通道温度 T 为 3×10^4 K。

从首次回击建立雷电通道后, 通道中存在着维持通道的电荷直到放电结束。在继后回击的多个回击之间, 可见到在脉冲底部有运动方向不变的脉动电流, 叫连续电流 (continuous current, CC)。连续电流定义为紧接回击过程后的较低幅值电流, 是雷击通道中雷击过程的直流分量, 通常呈现为一系列浪涌的叠加。其主要参数: 电流 I 为 100~200 A; 间隔时间 t 约为 100 ms; 总电荷量 Q 为 10~20 C。

连续电流转移大量的电荷, 会产生包括热效应在内最严重的雷击损坏。持续时间小于 40 ms 的连续电流叫短连续电流, 大于 40 ms 的叫长连续电流, 30%~50% 的负地闪包含长连续电流。连续电流中持续几毫秒或更短时间的扰动称为 M 分量^[10]。

1.6 末次回击

首次回击电流峰值通常比随后的继后回击电流峰值大 2~3 倍。然而, 大约三分之一的地闪包含至少一个具有大电场峰值的继后回击。理论上, 其电流峰值也应大于首次回击。大于首次回击的继后回击可能对供电线路和其他系统构成了额外的威胁。末次回击指的是最后的回击, 其特点是前一个回击到末次回击之间通常有一个长达 300~400 ms 的时间间隔, 幅值大于首次回击, 参数与首次回击类同。从首次回击到末次雷击, 一次完整雷击中多脉冲放电过程结束^[11]。

2 现有防雷技术特点及局限性

目前高压输电线路防雷主要由铁塔接地、避雷线和线路避雷器组成。为了便于比较, 重点分析雷击铁塔时传导电流产生的空间电磁场, 铁塔的垂直电位梯度和地面水平梯度。

2.1 空间电磁场强度

雷击铁塔的电流产生的空间磁场强度, 用比奥-萨伐尔定理, 计算公式^[12]为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (1)$$

式中: B 为磁感应强度, T; μ_0 为真空磁导率, 取 $4\pi\times 10^{-7}$ T·m/A; I 为雷击点传导电流, A; R 为测量点至电流源点的距离, m。

电场强度与磁场强度之间系数为 120π (377)^[13-14], 取雷击电流 30 kA, 其磁场强度按式 (1) 计算, 结果如表 1 所示。

表 1 雷击铁塔空间磁场梯度

距铁塔水平距离/m	磁场强度 B /mT
1	6.00
5	1.20
10	0.60
15	0.40
20	0.30
25	0.24

2.2 垂直电位梯度与地面水平电位梯度

2.2.1 垂直电位梯度

铁塔的垂直电位梯度严格应按 $U_0 = Ldi/dt$ 计算, 按诺顿等效电路, 没有考虑雷电波的反射^[7]。

$$U_g = IZ_l \quad (2)$$

式中: U_g 为铁塔垂直电位, kV; I 为雷击点电流, kA, 这里采用 CIGRE 负雷击平均电流峰值的全球分布 I 为 30 kA; Z_l 为铁塔本体阻抗, 取 10 Ω /m。当铁塔高度为 30 m 时, 其值见表 2。

表 2 铁塔垂直电位梯度

铁塔高度 h /m	电位 U_g /kV
0	300
6	360
12	420
18	480
24	540
30	600

2.2.2 地面水平电位梯度

铁塔地面的水平电位梯度与铁塔接地体的面积和阻抗大小有关, 假定接地体的面积等于铁塔基础面积, 按土壤电阻率 $\rho = 100$ Ω /m 直接计算。距铁塔地面 1 m 处为电位参照点。

$$U_v = \frac{U_0}{\rho l} \times \rho \quad (3)$$

式中: U_v 为铁塔水平距离电位, kV; U_0 为铁塔距地面 1 m 处电位, kV; ρ 为土壤电阻率, Ω /m; l 为地面水平距离, m。设 1 m 处电位为 300 kV, 按式 (3) 计算, 其值见表 3。

表3 铁塔地面的水平电位梯度

距铁塔水平距离/m	电位 U_g /kV
1	300
2	150
3	100
5	60
7	43
10	30

2.3 现有防雷技术的局限性

1) 雷击铁塔时将产生强烈的空间电磁场, 30 kA 雷电流流过铁塔时, 在半径 30 m 处磁场强度高达 0.24 mT, 对铁塔搭载的电子设备安全带来威胁。

2) 雷击铁塔(塔高为 30 m, 雷电流为 30 kA)时, 在铁塔端部产生垂直电位高达 600 kV 和在距铁塔周围地面 10 m 处产生水平电位高达 30 kV, 对安全生产带来威胁。

3) 理论上, 铁塔的接闪概率比避雷线高。因为避雷线产生的电场是一个面电场, 受高斯定理约束; 铁塔产生的电场是一个点电场(铁塔角钢的 90° 拐弯处形成尖端), 用库仑定律计算。点电场比面电场电晕周围空气所需电场强度要小得多^[15]。

4) 避雷线也是接闪器, 采用电气模型-保护角法计算。当雷击避雷线时, 将对送电线路产生反击或耦合^[16]。

3 雷电拦截器的性能与优势

3.1 雷电拦截

雷电拦截器, 依据电磁波色散、传输线、波导理论, 应用色散波导谐振腔体结构技术, 自动识别雷电的空间位置, 全方位拦截直接雷击(包括过顶雷云产生的雷击和侧面雷云产生的雷击)并衰减雷击点电流。该装置适应雷电多脉冲放电^[17]。

雷电拦截器主要性能和优势^[18]如下:

- 1) 提前放电时间 Δt 为 46.55 μs , 因此比避雷针形成的上行先导长 46.55 m。
- 2) 直击雷接闪概率为 100%。
- 3) 侧击雷接闪概率为大于 90%。
- 4) 衰减雷击点电流 $I_a \geq 40\%$ 。
- 5) 30 kA 雷击点空间磁场强度 0.24 mT 半径为 15 m。

6) 下风向保护范围 $A = \pi r^2/2$, 式中 r 为下风向保护距离, m。

7) 预防过顶雷击和侧面雷击, 使用无需限高。

3.2 雷击铁塔与雷电拦截器的参数比较

设定铁塔高度与拦截器安装高度一致, 雷击电流 30 kA。用 3 组分析数据进行比较, 直观地了解各自的特点。

1) 铁塔周围空间磁场强度见表 4。

表4 铁塔周围空间磁场强度对比

距铁塔空间 距离/m	场强/mT		对比(减少) ΔB /mT
	传统避雷针	雷电拦截器	
1	6.00	3.60	2.40
5	1.20	0.72	0.48
10	0.60	0.36	0.24
15	0.40	0.24	0.16
20	0.30	0.18	0.12
25	0.24	0.14	0.10

2) 铁塔的垂直电位梯度见表 5。

表5 铁塔的垂直电位梯度对比

塔高/m	电位/kV		对比(减少) ΔU /kV
	传统避雷针	雷电拦截器	
0	30.0	18.0	12.0
6	36.0	21.6	14.4
12	42.0	25.2	16.8
18	48.0	28.0	19.2
24	54.0	32.4	21.6
30	60.0	36.0	24.0

3) 铁塔地面的水平电位梯度见表 6。

表6 铁塔地面的水平电位梯度对比

塔高/m	电位/kV		对比(减少) ΔU /kV
	传统避雷针	雷电拦截器	
1	30.0	18.0	12.0
2	15.0	9.0	6.0
3	10.0	6.0	4.0
5	6.0	3.6	2.4
7	4.8	2.6	2.2
10	3.0	1.8	1.2

3.3 雷电拦截器的优势

从 3.1 节和 3.2 节的参数比较可以直观地看出, 雷电拦截器具有显著的优势。

1) 对雷电具有强烈的吸引作用, 其产生的上行先导比避雷针长 46.55 m。

2) 采用的色散波导谐振腔体结构, 衰减雷击点电流 $\geq 40\%$, 而铁塔接闪时没有衰减。

3) 大大优化了雷击点的电磁环境。在雷击电流 30 kA 条件下,距雷击点 0.24 mT 强度的半径由铁塔的 25 m 减少为 15 m;垂直电位梯度在 30 m 高度从 600 kV 减少为 240 kV;水平电位梯度在距雷击点 10 m 处从 30 kV 减少到 12 kV。

4) 预防直接雷击和侧面雷击。拦截器直接雷击接闪概率 100%,侧击雷接闪概率 90%;而避雷针侧击雷接闪概率只有 10%。

4 结 论

上面通过分析全球自然雷电的观测数据,雷暴云时空变化与拦截点避雷针接闪的物理模型^[19-20],对雷电拦截技术^[21]与现有防雷技术进行比较:

1) 将雷击过程分为先导发展、首次回击、箭式先导、继后回击及末次回击 5 个阶段,并给出每个阶段的主要物理参数。

2) 通过计算雷击铁塔时的空间电磁场、铁塔的垂直电位梯度和水平电位梯度,进而提出了现有高压输电线路直击雷防护技术的局限性。

3) 提出可实现更长上行先导并衰减雷击点电流的雷电拦截新技术,通过与传统避雷针的参数比较,直观体现了雷电拦截新技术的优势。

应用雷电拦截新技术,可有效克服高压输电线路现有防雷技术的局限性,具有重要的现实意义。2021 年,在四川省盐源县的 3 条高压输电线路应用了该雷电拦截新技术,到目前为止未再发生高压断路器跳闸及损坏设备现象,防雷效果初显。

参考文献

- [1] 戈尔德(R.H.Golde).雷电(上)[M].周诗健,孙景群,译.北京:水电出版社,1981.
- [2] 洛可夫(Rakov.V.A).雷电参数的工程应用[M].高焱,杨少杰,译.北京:气象出版社,2019.
- [3] 李建明.电力系统过电压测量及分析[M].北京:中国电力出版社,2018.
- [4] 洛可夫(Rakov.V.A),乌曼(Uman M.A)等.雷电[M].张云峰,吴建兰,译.北京:机械工业出版社,2016.
- [5] 郗秀书,张其林,袁铁,等.雷电物理学[M].北京:科学出版社,2016.
- [6] 克里斯丁.布克纽,王雪颖.雷电科学史话[M].北京:清

华大学出版社,2010.

- [7] 戈尔德(R.H.Golde).雷电(下)[M].李文恩,李福寿,译.北京:水电出版社,1981.
- [8] 苏邦礼,崔秉球,吴望平,等.雷电与避雷工程[M].广州:中山大学出版社,1996.
- [9] 国际电工委员会.连接到低压配电系统的多脉冲电涌保护装置附加试验——性能要求和试验方法:IEC 61643-11;2011/2 PFG[S].日内瓦:德国莱茵公司技术监督公司,2011.
- [10] 张义军,言穆弘,孙安平,等.雷暴电学[M].北京:气象出版社,2009.
- [11] 杨少杰,杨晖,杨彦,等.一种雷电抑制装置:217087135U[P].2022-07-29.
- [12] 杨晖,杨彦,陈绿文,等.区域防雷的理论和应用技术研究[J].广东气象,2018,40(4):69-73.
- [13] 杨慧春.电磁场与电磁波[M].北京:北京邮电大学出版社,2017.
- [14] 路宏敏,赵晓凡,谭康伯,等.工程电磁兼容[M].西安:西安电子科技大学出版社,2003.
- [15] 福田务,赵立竹.图解电与磁[M].赵立竹,译.北京:科学出版社,2000.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑物防雷设计规范:GB 50057—2010[S].北京:中国计划出版社,2010.
- [17] 杨少杰,杨晖,杨彦,等.一种雷电拦截装置:217087138U[P].2022-07-29.
- [18] 北京雷闪防雷设施检测服务中心.试验报告[R].北京:S/N(京)雷检字[2019]第(L1011)号,[2020]第(L0504)号.
- [19] 杨晖,杨彦,李燕玉,等.雷暴云时空变化与拦截点避雷针接闪的物理模型[J].广东气象,2019,41(4):61-64.
- [20] 何量,高子钦,罗小峰,等.风力发电机雷击电磁场强度梯度分布的计算和应用[J].广东气象,2021,43(5):65-69.
- [21] 全国雷电灾害防防御行业标准化技术委员会.烟花爆竹生产企业防雷技术规范:QX/T 430—2018[S].北京:气象出版社,2018.

作者简介:

宋海东(1985),男,硕士,工程师,从事电力系统监测技术研究;

杨晖(1981),男,硕士,工程师,从事雷电科学和技术研究;

钟驰宇(1987),男,硕士,工程师,从事雷电技术及防雷接地研究。

(收稿日期:2022-08-08)