

基于10 kV架空配电线路常用防雷措施 防雷性能的研究

陈宏铭

(中冶赛迪电气技术有限公司, 重庆 400010)

摘要: 鉴于10 kV配电线路在雷雨高发季节易遭受雷击而引发线路故障的问题, 搭建了10 kV配电线路直击雷、感应雷过电压的计算仿真模型, 对不同防雷措施下的线路耐雷水平、雷击跳闸率进行相应测算, 并基于不同安装方式下的防雷效果进行了对比分析。通过仿真结果可知, 利用多腔室间隙的防雷措施取得的感应雷耐雷水平最高, 氧化锌避雷器(Metal Oxide Arresters, MOA)次之, 防弧金具最差; 对于降低线路雷击跳闸率, 采取安装多腔室间隙和避雷器的措施取得的效果最好; 避雷器和多腔室间隙对相邻杆塔仍具备一定程度的保护效果, 但多腔室间隙的保护效果高于避雷器。

关键词: 配电线路; 防雷措施; 安装方式; 多腔室间隙; 耐雷水平

Based on the study on the lightning protection performance of common lightning protection measures in 10 kV overhead distribution lines

CHEN Hongming

(China Metallurgical CCID Electric Technology Co., Ltd., Chongqing 400010, China)

Abstracts: In view of the problem that 10 kV distribution lines are susceptible to lightning strikes and cause line failures during the high incidence of thunderstorms, this paper builds a calculation simulation model of direct lightning strike and induction lightning overvoltage of 10 kV distribution lines, and measures the lightning resistance level and lightning tripping rate of the lines under different lightning protection measures, and compares and analyzes the lightning protection effects based on different installation methods. Through the simulation results, it can be seen that the induced lightning resistance level obtained by using the lightning protection measures of the multi-chamber gap is the highest, followed by zinc oxide lightning arresters, and the worst anti-arc metal; For reducing the tripping rate of line lightning strikes, the best effect is achieved by installing multi-chamber clearance and lightning arresters; The arrester and the multi-chamber gap still have a certain degree of protection effect on adjacent towers, but the protection effect of the multi-chamber gap is higher than that of the arrester.

Key words: distribution lines; lightning protection measures; Installation mode; multi-chamber space; lightning resistant level

0 引言

10 kV配电线路运行中经常出现各种故障, 严重影响配电网运行的稳定性, 尤其是在雷雨季

节, 10 kV线路易遭受雷击而引发线路故障, 增加配电网的运维成本, 降低了供电可靠性。有数据表明^[1]: 因雷击引发的10 kV线路故障的次数

占整个电网雷击事故的70%~80%。

目前,已有众多学者对于10 kV架空线路的雷击过电压、防雷措施以及防雷效果等方面展开深入研究。文献[2]重点分析了相关避雷器的防雷性能以及在不同措施配置下的防雷效果。文献[3]运用ATP-EMTP软件搭建了10 kV线路的感应雷过电压仿真模型,详细分析了避雷器的安装密度对线路感应过电压的影响程度。文献[4]对采用多腔室间隙措施下的防雷效果进行了深入分析,尤其对该措施下的工频续流熄灭状态进行了重点探讨,模拟出该措施下的感应雷击过电压的数值变化。文献[5]提出一种10 kV电压水平下线路装设避雷线的施工方法,并对在不同工况下装设避雷线后所取得的防雷效果进行详细分析。文献[6]利用ATP-EMTP软件对安装线路避雷器进行建模仿真,定量分析了线路的防雷效果。

综上所述,已有的研究主要以单一的防雷措施进行深入分析,未对不同原理的防雷措施进行详细对比研究。因此,综合利用10 kV配电网线路的防雷措施,本文运用ATP-EMT软件对10 kV配电网输电线路开展直击雷、感应雷的过电压建模仿真,对不同防雷措施下的防雷性能进行详细探讨,通过仿真结果说明了综合性防雷措施对预防10 kV线路的雷击过电压有一定的借鉴意义。

1 配电线路雷击过电压计算模型及参数

1.1 雷击过电压建模

本文对10 kV配电线路的直击雷、感应雷模拟建模分析,其雷击过电压的仿真模型如图1所示。对10 kV配电线路的感应雷过电压进行仿真,通过ATP软件中的IDNUS感应过电压模块予以仿真实现,该仿真模块所运用的详细原理见文献[7]。在仿真模块中,所选用的阻抗值与10 kV配电线路的特性阻抗值一致;对于避雷线设计中的参数选择,10 kV配电线路和避雷线间的耦合阻抗值设置为100 Ω 。另外,假定10 kV配电线路在垂直方向上同雷击地面的距离设置为50 m。且直击杆塔与直击线路档距的中央位置设置为直

击雷的雷击位置。

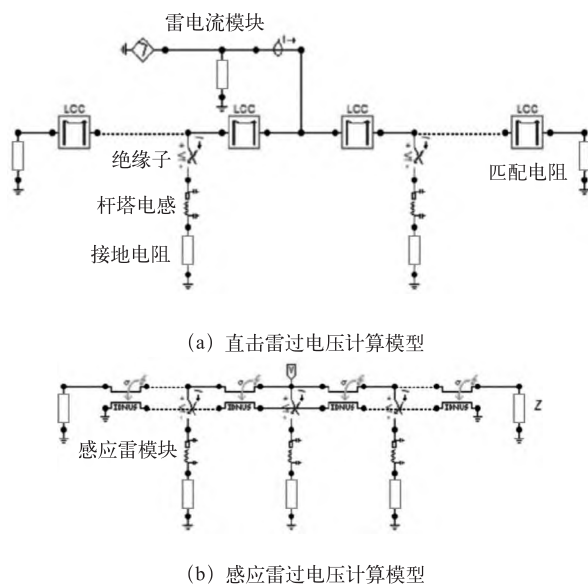


图1 10 kV线路雷击过电压的仿真模型

Fig. 1 Simulation model of a 10 kV line lightning strike over-voltage

1.2 常用的防雷措施

结合文献[8]所述,常用的线路防雷措施可分为堵塞式和疏导式两种。其中,堵塞式防雷措施的典型应用有安装避雷器、装设避雷线和增强线路绝缘等措施;疏导式防雷措施的典型应用有安装防弧金具、加装多腔室间隙等措施。

(1) 装设避雷线

避雷线主要用于降低相导线遭雷电直击的风险概率,同时促进配电线路的屏蔽作用,降低线路上流经的感应雷击电压。对于杆塔上的避雷线的架设高度,可参见文献[9],通常其高度宜规划在相导线的垂直上方2 m位置。

(2) 安装防弧金具

线路采用防弧金具预防雷击电压,其空气间隙的放电电压设置的范围应小于绝缘子的 $U_{50\%}$ 。此外,利用压控开关模型对负极性冲击电压进行模拟,该值选取为 $U_{50\%}$ 。

(3) 安装避雷器

通过对MOA进行重点分析,并结合分段函数特性进行拟合仿真,模型中最大标称电流 $I^{[10]}$ 的取值小于5 kA。

(4) 加装多腔室间隙

选择多腔室间隙措施进行线路防雷时, 电极数量宜选择40, 对应的 $U-I$ 特性曲线^[11]如图2所示。

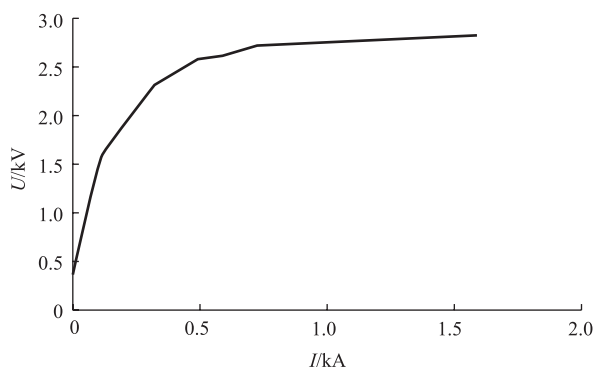


图2 多腔室间隙的 $U-I$ 特性曲线

Fig. 2 Voltammetry characteristic curve of multi-chamber space

由图2可知, $U-I$ 特性曲线反映出电流值在0.8 kA范围内, $U-I$ 曲线呈正比例变化趋势, 随着电流值增大, 该趋势将逐步平缓, 最终电压值稳定在3 kV水平。鉴于多腔室间隙的 $U-I$ 特性和MOA相似, 其 $U-I$ 曲线仍可用分段函数进行拟合, 对应的最大标称电流达到13 kA。

2 案例分析

以某地区的10 kV配电线路工况为例, 本文对其进行仿真模拟研究, 线路总长度设为10 m, 线路中的档距设置为50 m, 线路导线的最高点高度设置为11.0 m, 平均高度设为10.5 m, 线路的弧垂设置为0.5 m, 边相间距设置为2.0 m, 呈三角分布特点, 选取ATP软件中的Bergeron模型对10 kV配电线路进行建模计算。此外, 雷电流的回击速度设为 1.5×10^8 m/s, 雷电波阻抗设定为400 Ω , 大地的电导率设置为0.01 S/m, 相对介电常数设为10。考虑到案例中杆塔高度设定值约为10 m, 案例仿真计算时, 暂时忽略, 而采取单个等效电感进行模拟, 电感值设为0.84 μ H/m, 杆塔的接地电阻设置为10 Ω 。选取P-10型针式绝缘子作为本案例中的使用类型, 其中雷击的负极性放电冲击电压为 $U_{50\%} = 100$ kV, 利用压控开关模拟整个雷击冲击过程。

2.1 不同防雷措施下线路的耐雷水平

采用不同防雷措施时, 线路的耐雷水平对比如图3所示。

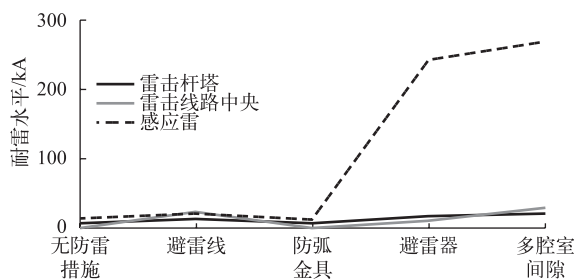


图3 不同防雷措施下的线路耐雷水平

Fig. 3 The level of line lightning resistance under different lightning protection measures

由图3可知, 当10 kV线路采取无防雷措施时, 通过仿真计算得到的雷击杆塔的耐雷水平约为7.7 kA, 线路档距中央的耐雷水平约为0.58 kA, 感应雷的耐雷水平约为14.5 kA, 高于直击雷。10 kV线路加装不同的防雷装置后, 线路的耐雷水平均有不同程度的提升(除防雷金具外)。其中, 安装多腔室间隙后, 线路的感应雷耐雷水平提升效果最好, 原因在于多腔室间隙设计的标称电流最大, 耐雷水平最高。与避雷器对比, 多腔室间隙出现直击线路的耐雷水平高于直击杆塔的现象, 经分析可知, 与多腔室间隙的分流系数相关。当发生直击杆塔现象时, 多腔室间隙的分流作用随时间增加逐渐高于接地电阻, 增加了流过多腔室间隙的电流, 引起耐雷水平下降。

避雷器与多腔室间隙线路感应雷的过电压比较如图4所示。

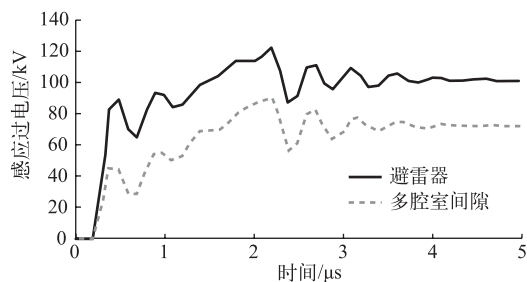


图4 线路感应雷的过电压比较

Fig. 4 Overvoltage comparison of line induction thunder

由图4可知, 在临近雷击点线路杆塔顶部

进行电压监测, 在安装多腔室间隙防雷设施后, 该处杆塔反映的感应雷电压大幅下降。同MOA防雷设施相比较: 前者的直击耐雷水平为30.4 kA, 后者为11.7 kA; 前者发生感应雷击的概率为45.2%, 后者为73.4%。因此, 对于直击雷较高发生率的线路, 通过安装多腔室间隙防雷设施, 获得更好的防雷效果。

综上所述, 对于10 kV配电线路在感应雷防护方面, 多腔室间隙对耐雷水平提升效果最好。

2.2 不同防雷措施下线路的雷击跳闸率

不同防雷措施下线路的雷击跳闸率统计如图5所示。无防雷措施时, 直击雷的跳闸率为9.2次/(km·a), 感应雷的跳闸率为31.5次/(km·a)。配电线路的跳闸主要是由10 kV线路上感应雷击所引起。安装避雷器、多腔室间隙和架设避雷线均可降低雷击跳闸率, 其中安装多腔室间隙可降低直击雷跳闸率约为27.4%, 下降效果明显。安装避雷线对降低感应雷跳闸率效果明显, 下降约为29.4%; 而安装防弧金具后, 10 kV配电线路的直击雷和感应雷跳闸率一定程度上有所增加。总的来说, 安装多腔室间隙可大幅降低10 kV配电线路的雷击跳闸率, 避雷器次之, 避雷线最差。

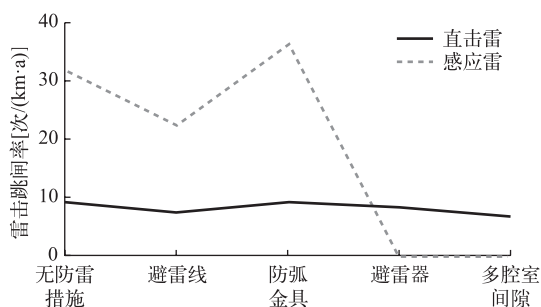


图5 不同防雷措施下的线路跳闸率统计

Fig. 5 Line trip rate statistics under different lightning protection measures

2.3 接地电阻的影响

接地电阻主要对线路的直击雷跳闸率有较大影响。因此, 结合接地电阻变化, 对不同防雷措施下10 kV配电线路的直击雷跳闸率进行详细分析, 具体结果如图6所示。

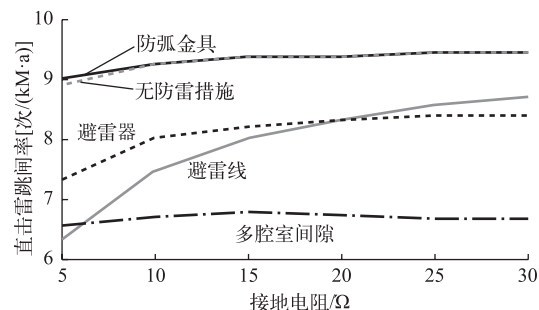


图6 接地电阻的变化影响直击雷跳闸率对比

Fig. 6 The change in ground resistance affects the comparison of the trip rate of the direct strike mine

由图6可知, 随着接地电阻的增加, 采用不同防雷措施的方式, 10 kV配电线路的直击雷跳闸率逐步增大, 最终趋于平缓稳定。其中, 采用多腔室间隙后, 10 kV配电线路的跳闸率降低效果好, 受到接地电阻的变化影响小, 其对应的跳闸率最高增加约2.3%。采取避雷线、避雷器和防弧金具防雷措施后, 分别对应的直击雷跳闸率值增加约36.2%、13.7%和5.4%。但对于安装防弧金具的防雷措施, 对应的直击雷跳闸率反而呈上升趋势。因此, 应合理降低杆塔的接地电阻。当接地电阻无法降低时, 宜采取多腔室间隙的防雷措施进行治理。

2.4 安装方式的影响

为了充分探讨在不同安装方式下的防雷效果, 本文重点对多腔室间隙、避雷器和防弧金具的安装方式进行探讨。其中, 设定0#杆塔为落雷杆塔, 对线路的直击雷的计算雷电流峰值设置为30 kA, 感应雷的计算雷电流峰值设置为100 kA。具体安装方式如图7所示。

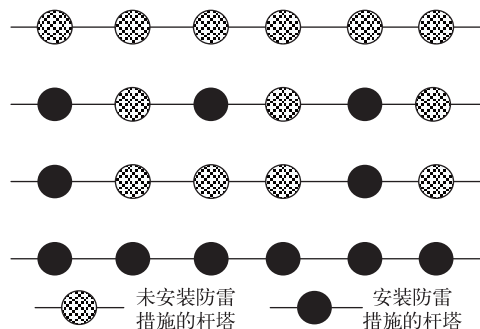


图7 防雷措施的安装方式

Fig. 7 Installation method of lightning protection measures

联合不同的防雷措施及相应的安装方式，仿真计算出10 kV线路绝缘子两端的直击雷、感应雷的过电压峰值结果，见表1、表2。

表 1 杆塔绝缘子的直击雷过电压峰值仿真结果
Tab. 1 Simulation results of direct lightning overvoltage peaks
of tower insulators

杆号	全线安装			隔三级安装			全线 不安装
	多腔室 间隙	避雷 器	防弧 金具	多腔室 间隙	避雷 器	防弧 金具	
0 [#]	8	48	90	9.6	51.5	96	100
1 [#]	6	44	89	100	100	100	100
2 [#]	3	41	62	92	98	88	86
3 [#]	2	39	60	65	82	65	65
4 [#]	1	37.5	61	1.2	39	67	67
5 [#]	0.5	35	62	37	39.5	69	69

由表1可知，全线路安装防雷装置时，仿真计算出线路绝缘子的两端过电压大幅减小，其中多腔室间隙下降幅度明显；采用隔三级安装防雷装置时，以0[#]、4[#]杆塔为例，绝缘子两端的过电压差距较小，对于0[#]杆塔，在利用全线安装和隔三级安装的两种方式下：利用多腔室间隙防雷措施，对应的线路绝缘子过电压差值为1.6 kV；在选择避雷器措施下，对应的绝缘子过电压差值为3.5 kV；在选择防弧金具的措施下，对应的绝缘子两端过电压差值为6 kV。对于未安装防雷装置，以配电线路中的1[#]~3[#]杆塔为例，对应的绝缘子端电压的峰值变化较小。因此，可得出安装防雷装置对本级杆塔有较大的保护作用，但对邻级杆塔的保护效果有限。另外增加防雷安装位置与雷击点的距离，对应的绝缘子端电压值逐步下降，但此状态下对于防弧金具的防雷效果不明显，可忽略。然而对于避雷器和多腔室间隙两种防雷措施，除对本级杆塔有很好的防雷效果外，对雷电流方向上流经的邻近杆塔的防雷效果较为明显。

由表2可知，相较于全线路未装设防雷措施，线路安装避雷器或者多腔室间隙等防雷设施后，杆塔绝缘子对应的过电压峰值明显下降，其中多腔室间隙的控制效果明显，防弧金具效果差。采取隔三级安装方式装设避雷器时，1[#]、

2[#]、3[#]杆塔绝缘子的过电压峰值分别下降50%、55%和47%；采取隔三级安装方式装设多腔室间隙时，分别下降55%、31%和38%。采取隔一级安装方式装设避雷器时，未安装的1[#]、3[#]杆塔绝缘子的过电压峰值分别下降49%、45%；采取隔一级安装方式装设多腔室间隙时，分别下降78%、68%。综上所述，在不同安装方式下，多腔室间隙对本级、邻级杆塔的保护效果要强于避雷器，防弧金具对附近杆塔的保护效果有限。另外，相较于避雷器，多腔室间隙防雷措施对本级、邻级杆塔绝缘子的感应雷过电压抑制效果明显。

表 2 杆塔绝缘子的感应雷过电压峰值仿真结果
Tab. 2 Simulation results of induced lightning overvoltage peaks
for tower insulators

杆号	全线安装			隔三级安装			全线 不安装
	多腔室 间隙	避雷 器	防弧 金具	多腔室 间隙	避雷 器	防弧 金具	
0 [#]	5.5	5.5	48	48	92	92	100
1 [#]	21	46	51	51	86	97	100
2 [#]	3.5	75	44	48	88	98	100
3 [#]	35	58	52	52	100	100	100
4 [#]	4	4	47	47	91	91	100

3 结束语

本文对10 kV配电线路的直击雷、感应雷过电压进行仿真建模，详细探讨了10 kV配电线路防雷措施的配置方案，通过仿真分析得出在不同配置方式下各种防雷措施的计算效果。

- 1) 避雷器、多腔室间隙可大幅降低感应雷跳闸率，多腔室间隙的保护效果最为明显。
- 2) 接地电阻增加，将增大线路的直击雷跳闸率，而多腔室间隙防雷措施受接地电阻的影响小，避雷线受接地电阻的影响大。
- 3) 避雷器、多腔室间隙除对本级杆塔有保护作用外，对邻近杆塔也有一定的保护效果，且多腔室间隙的保护效果好。考虑10 kV配电线路主要遭受感应雷击，因此本文建议综合多腔室间隙、避雷器防雷措施进行线路防雷。

参考文献

- [1] 蒿峰, 卢泽军, 王晓光, 等. 10 kV架空配电线路临近变电站防雷保护措施[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(28): 159-164.
- [2] 廖民传, 蔡汉生, 贾磊, 等. 基于雷击特性的配网避雷器可靠性与经济性研究[J]. 南方电网技术, 2017, 11(6): 22-28.
- [3] 陈小波, 叶铁丰, 郑明, 等. 浙南地区10 kV配电线路综合防雷措施仿真研究[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(8): 200-204.
- [4] 沈海滨, 雷挺, 贺子鸣, 等. 10 kV线路用多腔室间隙防雷装置工频续流遮断能力选择建议[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1480-1486.
- [5] 李海涛, 胡元潮, 安韵竹, 等. 10 kV配电线路感应雷过电压特性及影响因素[J]. 水电能源科学, 2017(6): 190-194.
- [6] 王博闻, 陆佳政, 方针, 等. 一种10 kV配电线路防雷复合绝缘子的绝缘设计及防雷性能[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 2001-2008.
- [7] 陈成财. 架空配电线路雷击跳闸率的计算方法[J]. 电瓷避雷器, 2015(5): 145-148, 153.
- [8] 吴辉, 江彪. 10 kV配网架空绝缘线路防雷措施组合应用[J]. 电瓷避雷器, 2020(4): 143-149.
- [9] 刘刚, 陈荣锋, 莫芸. 10 kV架空配电线路避雷线架设高度的探讨[J]. 电瓷避雷器, 2012(4): 33-38.
- [10] 秦如意, 刘宗良, 陈洲, 等. 某地区配电线路防雷现状分析及防雷装置研究[J]. 中国电力, 2018, 51(4): 39-44, 95.
- [11] PODPORKIN G V, ENKIN E Y, KALAKUTSKY E S, et al. Overhead lines lightning protection by multi-chamber arresters and insulator-arresters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 214-221.

作者简介

陈宏铭（1988—），男，工程师，研究方向为电力系统及电气一次设计。

（收稿日期：2022-09-06）