

# 10 kV 配电线路避雷器优化布置研究

雷 潇<sup>1</sup>, 许安玖<sup>2</sup>, 刘 强<sup>1</sup>, 崔 涛<sup>1</sup>, 廖文龙<sup>1</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司广元供电公司, 四川 广元 628000)

**摘要:** 雷击跳闸是 10 kV 配电线路运行维护面临的主要问题之一。文中在 Agrawal 模型的基础上, 在 ATP/EMPT 建立了计及导线耦合效应的 10 kV 三相导线雷电感应过电压模块。研究了雷击距离线路 50 m 情况下的感应雷跳闸概率, 结果发现: 跳闸所需最小雷电流幅值均随绝缘子 50% 闪络电压的增大而呈线性增加; 分支处更易发生绝缘闪络。研究了避雷器布置方式, 结果发现: 相同安装密度下, 三相避雷器分散安装比集中安装的效果更好; 对于分支杆塔, 宜在最近干线或支线杆塔上安装避雷器。

**关键词:** 配电线路; 雷电感应过电压; 避雷器; 优化布置

**中图分类号:** TM 862 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2022)04-0021-05

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20220405

## Research on Optimal Configuration of Lightning Arrester for 10 kV Distribution Line

LEI Xiao<sup>1</sup>, XU Anjiu<sup>2</sup>, LIU Qiang<sup>1</sup>, CUI Tao<sup>1</sup>, LIAO Wenlong<sup>1</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. State Grid Guangyuan Electric Power Supply Company, Guangyuan 628000, Sichuan, China)

**Abstract:** Lightning trip-out is one of the major problems in operation and maintenance of 10 kV distribution lines. Based on the Agrawal model, a lightning-induced overvoltage module of 10 kV three-phase conductor is established in ATP/EMTP considering the conductor coupling effect. The trip-out rate of induced overvoltage is studied when lightning stroke is 50 m far away from the line, and the results show that the minimum lightning current amplitude required for tripping increases linearly with the increase of 50% flashover voltage of insulator, and insulation flashover occurs more easily at branch. The arrangement of lightning arrester is also studied, and the results show that under the same installation density, the effect of scattered installation of three-phase arrester is better than the centralized installation, and for branch tower, it is better to install arrester on the nearest main line or branch line tower.

**Key words:** distribution line; lightning-induced overvoltage; lightning arrester; optimal configuration

## 0 引言

10 kV 配电线路因绝缘强度较低而极易发生雷击跳闸和设备损坏等故障<sup>[1-3]</sup>。部分多雷地区的 10 kV 配电线路雷击跳闸比例超过 50%<sup>[4-6]</sup>。而在雷击故障中, 由雷击线路附近大地或构筑物产生的雷电感应过电压造成的比例占 90%以上<sup>[7]</sup>。因此, 亟需开展雷电感应过电压抑制方法的研究, 以大幅改进雷

电防护性能。

雷电感应过电压的产生机理已较为明确, 并由 Agrawal、Chowdburi 和 Rusck 等人提出了若干理论计算模型<sup>[8-10]</sup>。其中, Agrawal 模型是一种以散射电压表示的外界电磁场机理多导体传输线模型, 在理论上较其他模型更合理, 并且得到了试验验证。在此基础上, 国内学者开展了模型改进完善工作, 建立了雷电感应过电压的仿真计算基础<sup>[11]</sup>。

雷电感应过电压的特征与直击过电压有明显的区别, 文献[12-13]对此开展了仿真分析, 但没有

涉及避雷器等防雷措施对过电压的抑制作用。文献[14]开展了雷电过电压闪络率的研究,但忽略了多相闪络问题。对于 10 kV 配电线路,通常为中性点不接地系统或谐振接地系统,只有两相或三相同步闪络才会触发保护跳闸。部分文献<sup>[15-18]</sup>研究了避雷器安装密度对雷电感应过电压闪络率的影响,并提出了安装密度优化建议,但研究过程未考虑多相闪络和分支线路的问题。文献[11]提及了分支线路台区避雷器对过电压的影响,但没有开展线路避雷器优化配置的研究。实际上,配电线路拓扑结构复杂,潜在雷击范围广,在计及经济投入和后期运维的情况下,必然面临避雷器优化配置的问题。

针对雷电感应过电压造成的雷击跳闸问题,下面以 Agrawal 模型为基础,在 ATP/EMTP 中建立了三相导线的雷电感应过电压仿真模型,开展了两相闪络概率和避雷器配置方式的研究。

## 1 雷电感应过电压

根据 Agrawal 模型<sup>[10]</sup>,线路上的电压  $U(x, t)$  为入射电压  $U_i(x, t)$  和散射电压  $U_s(x, t)$  之和。入射电压  $U_i(x, t)$  为雷电流在线路垂直方向上电场的积分,如式(1)所示。

$$U_i(x, t) = - \int_0^h E_z(x, y, z, t) \quad (1)$$

式中: $h$  为线路高度; $E_z(x, y, z, t)$  为坐标  $(x, y, z)$  处沿地面垂直方向的电场。散射电压  $U_s(x, t)$  是由雷电流  $i(x, t)$  切向电场分量所激发的,且受自身及邻近导体电流影响的电压分量,其多导体传输线电报方程如式(2)所示。

$$\begin{cases} \frac{\partial U_s(x, t)}{\partial x} + \mathbf{R}i(x, t) + \mathbf{L} \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} = E_x(x, y, z, t) \\ \frac{\partial i(x, t)}{\partial x} + \mathbf{C} \frac{\partial U_s(x, t)}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{L}$  和  $\mathbf{C}$  分别为多导体传输线单位长度的电阻矩阵、电感矩阵和电容矩阵; $E_x(x, y, z, t)$  为雷电流在沿导线方向上产生的电场。

由上述公式可以推导出,导线上的过电压不仅取决于雷电流在其水平和垂直方向上的电场强度,同时也受到自身及邻近导线上瞬时电流的影响。文献[16]研究发现架空地线对雷电感应过电压有较

明显的抑制作用,即验证了邻近接地导体上流过的瞬时电流对散射电压的改变。进一步可知,当一相导体绝缘闪络后,势必会对其他两相导体上的感应过电压产生影响,而这一机制与雷电直击造成多相同时跳闸明显不同。同时,一相导线的雷电流经杆塔入地后,横担电位抬升,也会改变另两相绝缘子上承受的电压。因此,可通过 Agrawal 模型对 10 kV 配电线路多相闪络的现象进行分析。

## 2 仿真建模

文献[12-13]结合 Agrawal 模型和雷电流 Heidler 模型和 Bergeron 模型,在 ATP/EMTP 中建立了单相导线雷电感应过电压计算模块。在其基础上建立了三相导线的计算模块,如图 1 所示。模块两边的 RL 线路模型中只包含  $R$  分量,用于表征导线波阻抗及互阻抗。该计算模块只能监测线路两端的电压,如要观测线路任意点电压则需级联多个计算模块。大地电导率为 0.01 S/m。

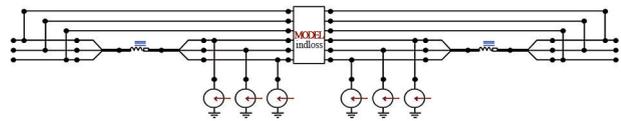


图 1 感应过电压计算模块

雷电流波前时间为  $2.6 \mu\text{s}$ ,半波时间为  $50 \mu\text{s}$ 。雷电流幅值和位置可根据计算需要进行调节。10 kV 线路平均高度一般不超过 10 m,在城乡居民区、山地和丘陵地区的引雷作用不强,一般认为线路附近 65 m 以内为直击。然而,当线路附近 65 m 内有微波塔、输电线路杆塔等引雷构筑物时,由于线路被屏蔽,雷击点与线路的最短水平距离可能不超过 50 m。这里将雷击点距离设置为 50 m,以体现雷电感应过电压计算的最严苛情况。通过仿真计算可获取不发生两相闪络的最大可承受雷电流,结合雷电流幅值概率分布即可评估其雷电感应过电压承受能力。中国多雷地区的雷电流幅值概率函数如式(3)所示。

$$P(I \geq i_0) = 10^{-\frac{i_0}{88}} \quad (3)$$

式中: $I$  为雷电流幅值的变量; $i_0$  为给定的雷电流幅值; $P(I \geq i_0)$  为雷电流幅值超过  $i_0$  的概率。

研究主要考虑配电线路在无分支处和有分支处的两种基本结构。对于无分支处,可以长直线路为

计算对象。为了防止线路末端的反射影响,将线路总长设置为 11 km,雷电点发生在线路中点附近,并将线路两端经与导线波阻抗等值的电阻接地。对于分支线路,在长直线路的中点处垂直引出支线,长度为 5.5 km,终端经与导线波阻抗等值的电阻接地。

10 kV 杆塔为典型的三角形塔头布置,中相线路高为 11 m,边相线路高为 10 m,相间水平距离为 1 m。杆塔采用 8 μH 的电感模拟,接地电阻取 10 Ω。绝缘子简化为常开的理想开关,当电压超过绝缘子 50% 闪络电压时闭合。10 kV 避雷器采用文献[17]给出的伏安特性。典型的杆塔节点处模型如图 2 所示。

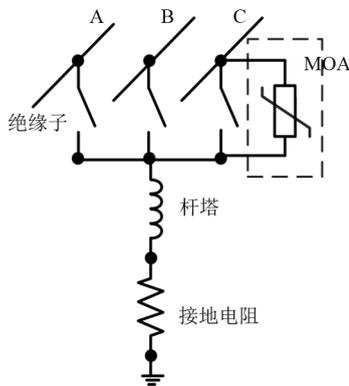


图 2 杆塔节点模型

为了验证模型的有效性,对文献[11]的算例进行仿真。雷电流为 30 kA,落雷点距离线路中相为 50 m,到两端线路距离相等。各观测点至落雷最近位置的 水平距离为 0、250 m、750 m 和 1500 m。仿真结果如图 3 所示,与原文基本一致。

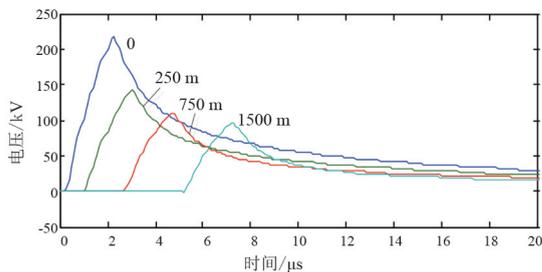


图 3 文献[11]参数下的仿真结果

### 3 感应雷过电压跳闸概率

#### 3.1 无分支处

在雷电流幅值较小时,雷电感应过电压小于绝缘子闪络电压,不会造成绝缘闪络。雷电流幅值增大到一定值会造成单相绝缘子闪络,但不能造成两相闪络。雷电流幅值继续增大将会造成两相闪络,形成两相短路导致跳闸。

当落雷点在线路附近 50 m 处时,各种绝缘强度下的跳闸概率如表 1 所示。所需最小雷电流幅值均随绝缘子 50% 闪络电压的增大而呈现线性增加的规律。对于目前应用最广的绝缘配置,绝缘子 50% 闪络电压接近 200 kV,其两相闪络所需雷电流为 51.9 kA,发生概率为 25.7%。

表 1 不同绝缘强度下的跳闸概率

绝缘子 50% 闪络电压/kV	雷电流/kA	概率/%
100	≥25.9	50.8
150	≥38.9	36.1
200	≥51.9	25.7
250	≥64.8	18.4
300	≥77.7	13.1

#### 3.2 有分支处

分支处距离线路 50 m 的可能落雷点位置如图 4 所示。过电压幅值最高的位置如表 2 所示。可见,当落雷点为 3,即雷击发生在干线和支线交叉处 50 m 时,线路过电压幅值最高,最易发生闪络。为更好地防治雷电感应过电压,应针对该落雷点进行研究。

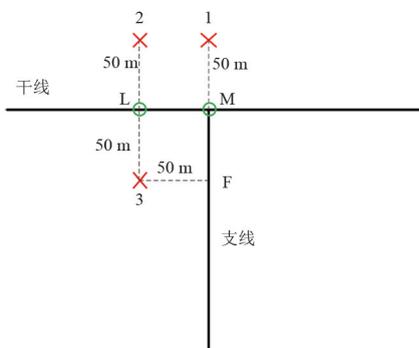


图 4 分支处的落雷位置

表 2 不同雷击位置对应的最大过电压位置

落雷点	位置	幅值/kV
1	M 中相	420
2	L 中相	413
3	L/F 中相	465

注:雷电流幅值为 60 kA,绝缘子闪络电压为 200 kV。落雷点 3、L 和 F 点的过电压数值相同。

当落雷点为 3 时,各种绝缘强度下的闪络概率如表 3 所示,所需最小雷电流幅值均随绝缘子 50% 闪络电压的增大而呈现线性增加的规律。与无分支的情况相比,闪络明显更易发生。如绝缘子 50% 闪络电压为 200 kV 时,跳闸所需雷电流幅值为 28 kA,仅为无分支情况的 0.54 倍。这是雷击同时在主线

和分支线感应出极性相同的过电压所致。

表 3 不同绝缘强度下的闪络概率

绝缘子 50% 闪络电压/kV	雷电流/kA	概率/%
100	≥14.0	69.3
150	≥21.0	57.7
200	≥28.0	48.1
250	≥35.0	40.0
300	≥42.0	33.3

## 4 避雷器配置方式

### 4.1 无分支处

主要对比研究 6 种避雷器配置方式下的防雷效果。6 种配置方式分别如图 5 所示。配置方式 1、3、5 是在一基杆塔上同时安装三相避雷器,安装间隔距离分别为 150 m、300 m 和 450 m;配置方式 2、4、6 是在不同杆塔的各相上分散安装避雷器,安装杆塔间隔距离分别为 50 m、100 m 和 150 m。配置方式 1 和方式 2、方式 3 和方式 4、方式 5 和方式 6 的安装密度分别相同。

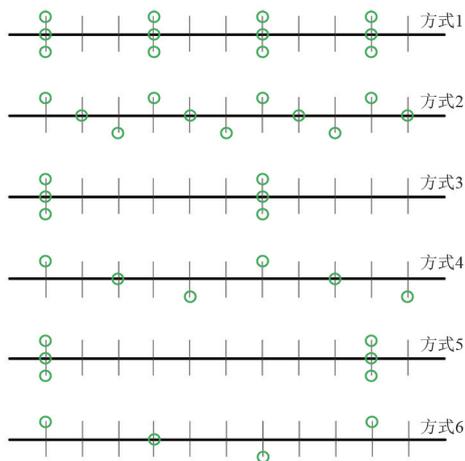


图 5 无分支情况下避雷器配置方式

对于每种配置方式,两相闪络所需雷电流幅值与雷击位置密切相关。这里选择雷击点在线路附近 50 m 处,以最严苛情况进行比较。各配置方式下两相闪络所需雷电流幅值见表 4 所示。在相同配置密度下,各相避雷器分散布置方式的防雷效果更好。如绝缘子 50% 闪络电压为 200 kV 时,配置方式 3 两相闪络需雷电流 77 kA,而方式 4 需雷电流 93 kA。为更清晰地反映三相集中配置和分散配置的防雷效果,计算了两相闪络概率,如图 6 所示。

避雷器动作后,一方面降低了本相导线在相邻杆塔的过电压;另一方面也降低了本基杆塔其他两

相绝缘子承受的过电压。对于三相避雷器集中布置于一基杆塔的情况,若雷击点距避雷器安装杆塔较远,避雷器对雷击点附近三相导线的过电压限制能力弱。而对于分散安装的情况,雷击点附近且离避雷器最远的相导线首先闪络,而此时其他两相的过电压又受近距离避雷器的限制,因此两相闪络的难度更高。

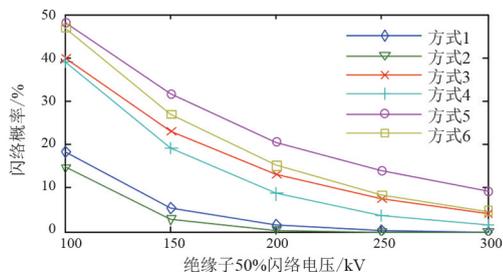


图 6 各配置方式下两相闪络概率

表 4 无分支情况下两相闪络所需雷电流幅值

绝缘子 50% 闪络电压/kV	两相闪络所需雷电流幅值/kA					
	方式 1	方式 2	方式 3	方式 4	方式 5	方式 6
100	65	73	35	36	28	29
150	110	135	56	63	44	50
200	155	200	77	93	60	72
250	205	265	98	123	75	94
300	250	334	119	155	91	116

### 4.2 有分支处

无避雷器时,分支处的两相闪络概率比无分支情况高,分支处为绝缘薄弱点。以干线和支线均按照第 4.1 节中配置方式 4 为例进行研究,各相避雷器分散安装在不同杆塔上,安装杆塔间隔距离为 100 m。选择雷击点在干线和支线交叉处 50 m 处,此时过电压幅值最高。由第 2.2 节可知,离雷击点最近的干线和支线处过电压最高,因此避雷器配置的典型方式可有两种,即雷击点最近处杆塔有避雷器和无避雷器,如图 7 所示。

表 5 有分支情况下两相闪络所需雷电流幅值

绝缘子 50% 闪络电压/kV	两相闪络所需雷电流幅值/kA		
	方式 4	方式 7	方式 8
100	36	42	30
150	63	73	52
200	93	105	74
250	123	137	96
300	155	168	118

将上述两种方式和无分支情况下两相闪络所需雷电流进行对比,如表 5 所示。离雷击点最近的干线和支线杆塔处安装有避雷器时,两相闪络所需雷电流最高。在实际改造中,干线和支线按照各相分散配置

后,方式7和方式8会随机出现。对于方式8则应在距离分支处最近的干线、支线杆塔上增加避雷器。

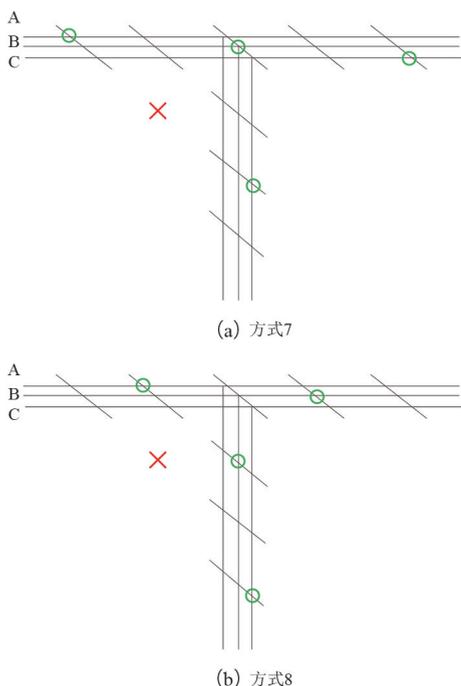


图7 有分支情况下避雷器配置方式

## 5 结论

上面研究了10 kV配电线路避雷器配置方式,得出如下结论:

1)雷电感应过电压闪络所需雷电流幅值随绝缘强度的提升而线性增加。在相同雷击距离下,分支杆塔的闪络概率明显高于普通杆塔。

2)对于雷电感应过电压的防治,三相避雷器分散布置的防治效果优于集中布置。对于分支处,应在最近的干线和支线杆塔上安装避雷器。

### 参考文献

[1] 李琳,齐秀君.配电线路感应雷过电压计算[J].高电压技术,2011,37(5):1093-1099.

[2] 罗大强,唐军,许志荣,等.10 kV 架空配电线路防雷措施配置方案分析[J].电瓷避雷器,2012(5):113-118.

[3] 苏宜靖,董立,唐律,等.柔性直流配电网过电压及避雷器配置研究[J].浙江电力,2019,38(3):20-24.

[4] 张利庭.雷电对配电安全运行的影响及防范研究[D].杭州:浙江大学,2008.

[5] 区伟潮.10 kV 配用电避雷器故障分析[J].高电压技术,2006,32(7):127-128.

[6] 王敬春,罗军,吕诗月,等.降低配电线路雷击断线和跳闸

率的防护措施[J].高电压技术,2009,35(12):2958-2962.

[7] 文习山,彭向阳,谢广润.架空配电线路感应雷过电压的数值计算[J].中国电机工程学报,1998,18(4):76-78.

[8] Singarajah C, Chowdhuri PRITINDRA. Voltage surges induced on overhead lines by lightning strokes[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1973(10):1259-1260.

[9] A PIANTINI, J M JANISZEWSIJ. Induced voltages on distribution lines due to lightning discharges on nearby metallic structures[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1998,34(5):2799-2802.

[10] A AGRAWAL, H PRICE, S GURBAXANI. Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field[C]. 1980 Antennas and Propagation Society International Symposium, IEEE:1980.

[11] 边凯,陈维江,李成榕,等.架空配电线路雷电感应过电压计算研究[J].中国电机工程学报,2012,32(31):191-199.

[12] H Kr HOIDALEN. Analytical formulation of lightning-induced voltages on multiconductor overhead lines above lossy ground[J]. IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility, 2003, 45(1):92-100.

[13] H Kr HOIDALEN. Calculation of Lightning-induced Voltages in MODELS Including Lossy Ground Effects[C]. International Conference on Power Systems Transients, New Orleans,2003.

[14] 雷潇,刘强,刘守豹,等.土壤电阻率对10 kV 架空线路雷害风险的影响研究[J].电瓷避雷器,2016(6):116-119.

[15] 王希,王顺超,何金良,等.安装避雷器后10 kV 配电线路的雷电感应过电压特性[J].电网技术,2012,36(7):149-154.

[16] 边凯,陈维江,沈海滨,等.配电线路架设地线对雷电感应过电压的防护效果[J].高电压技术,2013,39(4):993-999.

[17] Jankov V, Grzybowski S. Flashover rates of overhead distribution lines caused by nearby lightning strokes[C]. Proceedings of the 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Montreal, IEEE, 1997:134-135.

[18] 横山茂.配电线路雷害对策[M].北京:中国电力出版社,2008.

### 作者简介:

雷潇(1988),男,博士,主要研究方向为过电压与接地技术。

(收稿日期:2021-12-01)