

## 考虑后续回击的 500 kV 单回交流线路耐雷水平研究

杜志叶<sup>1</sup>, 何靖萱<sup>1†</sup>, 柳双<sup>1,2</sup>, 岳国华<sup>1</sup>, 甘艳<sup>3</sup>, 蔡泓威<sup>1</sup>

(1. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072;

2. 国网湖北省电力有限公司超高压公司, 湖北 武汉 430077;

3. 国家电网公司华中分部, 湖北 武汉 430077)

**摘要:**雷电严重威胁着电力系统的安全稳定运行,随着电力系统的不断发展,传统的线路防雷评估技术已无法满足目前线路的雷击风险评估需求.基于此,本文利用变异系数法对华中区域十条 500 kV 省间联络线重要输电通道 10 km 范围内近年来的落雷数据进行分析,发现后续回击会对线路的雷击跳闸率产生较大影响,同时多起线路实际雷击跳闸故障与后续回击相关.据此,本文在传统绝缘子串闪络模型的基础上,提出了考虑后续回击的绝缘子串闪络判据模型,分析考虑后续回击的 500 kV 重要输电通道的线路耐雷水平.研究表明:后续回击会使 500 kV 输电线路的耐雷水平降低,降低程度与工频电压周期有关,且后续回击对反击耐雷水平的影响程度与绕击耐雷水平相比更为显著.本文的研究结论可以辅助提升高压输电线路的雷击风险评估准确度,为高压输电线路防雷预警提供帮助.

**关键词:**雷电;后续回击;高压输电通道;变异系数法

**中图分类号:**TM726 **文献标志码:**A

## Study on Lightning Resistance Level of 500 kV Single Circuit AC Transmission Line Considering Subsequent Lightning Return Stroke

DU Zhiye<sup>1</sup>, HE Jingxuan<sup>1†</sup>, LIU Shuang<sup>1,2</sup>, YUE Guohua<sup>1</sup>, GAN Yan<sup>3</sup>, CAI Hongwei<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. State Grid Hubei Extra High Voltage Company, Wuhan 430077, China;

3. Central China Branch of State Grid Corporation, Wuhan 430077, China)

**Abstract:** Lightning seriously threatens the safe and stable operation of power system. With the continuous development of power system, the traditional line lightning protection assessment technology has been unable to meet the requirements of lightning risk assessment. Based on this, this paper uses the coefficient of variation method to analyze the data of lightning falling in recent years within 10 km of ten important transmission channels of 500 kV inter-provincial connection lines in central China, and finds that subsequent lightning return strokes have a great impact on lightning strike trip. At the same time, many circuit actual lightning trip faults are related to subsequent lightning return strokes. Accordingly, this paper proposes a flashover criterion model of insulator string considering

\* 收稿日期:2022-04-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977152), National Natural Science Foundation of China(51977152); 国家电网华中分部科技项目(5214AJ220017), Science and Technology Project of Central China Branch of State Grid Corporation of China(5214AJ220017)

作者简介:杜志叶(1973—),男,河南许昌人,武汉大学教授,工学博士

† 通信联系人, E-mail:729731655@qq.com

subsequent return stroke. The influence of subsequent lightning return stroke on lightning resistance level of 500 kV transmission lines is analyzed. The results show that the lightning resistance level of 500 kV transmission line will be reduced by the follow-up return stroke, which is related to the power frequency voltage cycle, and the impact of the subsequent lightning return stroke on the lightning back-flashover resistance level is more significant than the lightning shielding resistance level. The conclusion of this paper can help improve the accuracy of lightning risk assessment of high-voltage transmission lines and provide help for lightning protection and early warning of high-voltage transmission lines.

**Key words:** lightning; subsequent lightning return stroke; high voltage transmission line; coefficient of variation

雷电作为常见的自然灾害,给电力系统的安全稳定运行带来极大影响.据统计,2018年4月下旬印度安得拉邦13 h内出现超4万次闪电;2020年2月18日澳大利亚新州1 d内遭遇80万次雷击<sup>[1]</sup>;2021年5月14日湖北上空16 h内出现超13万次闪电.同时,传统的雷电参数统计给线路防雷评估带来了较大的误差.

一次云地闪放电过程包括的回击为4次左右<sup>[2-5]</sup>,分为首次回击及后续回击.目前国内外判断后续回击与首次回击是否来自同一放电过程的标准均从时空特点出发,根据二者击中大地的时间间隔及产生地面雷击点的距离进行判断.我国雷电定位系统的判断标准为后续回击与首次回击的时间间隔小于或等于1 s且二者的位置距离小于或等于10 km,同时相邻回击的时间间隔小于或等于500 ms<sup>[6]</sup>.日本雷电定位系统、美国雷电定位系统的判断标准与我国相同<sup>[3,7]</sup>.目前的研究表明,多回击地闪中,绝大部分为负地闪,占多回击总地闪回击总数的99.69%<sup>[8]</sup>.

为了统计雷击杆塔过程中首次回击及后续回击的情况,国内外利用了高速摄像记录仪、宽带电场记录、雷电定位系统、卫星雷电探测、现场记录系统等多种监测手段,在研究过程中多集中于对记录到的云地闪放电过程中的回击数量、回击间隔以及首次回击及后续回击的比例、平均雷击点数、平均回击次数、峰值电流、强度等规律进行统计,并以此为基础分析后续回击对跳闸率的影响.

在雷电回击中有一定数量的后续回击会与首次回击击中同一个点<sup>[3-4]</sup>,而且雷电流幅值相比首次回击更高<sup>[9-10]</sup>.对于后续回击与首次回击击中一个点的情况,由于雷击先导通道前期已经形成,进而影响其雷击感应过电压与反击跳闸率.目前,针对后续回击影响跳闸率以及线路耐雷水平的研究较少,上海交

通大学的江安烽等人<sup>[11]</sup>采用模型计算与理论仿真计算剖析了后续回击对10 kV配电线路的反击跳闸率的影响,研究表明,对于后续回击与首次回击,反击跳闸率与中值电流有紧密联系,当后续回击的中值电流比首次回击大时,其反击跳闸率也更大.江安烽等人<sup>[12]</sup>对110/220 kV双回输电线路反击跳闸率进行研究,发现不同回击类型的反击跳闸率不同,而若后续回击与首次回击的先导通道相同,由于其共用一个通道,其耐雷水平更低,反击跳闸率更高.而首次回击与创造新的通道的后续回击,由于其先导通道之前并未产生,所以反击跳闸率较小.

国外关于后续回击对反击跳闸率的影响也开展了较多的研究.巴西闪电研究中心的Silveira等人<sup>[13]</sup>发现对69 kV线路而言,后续回击对反击跳闸率的影响比首次回击更大.Silveira等人<sup>[14]</sup>研究了后续回击的影响与杆塔高度的联系,当杆塔高度超过30 m时,后续回击对杆塔雷电特性的影响更大(138 kV输电线路).意大利航天电气与能源工程部的Gatta等人<sup>[15]</sup>对150 kV架空线路进行研究发现,后续回击对线路反击跳闸率的影响很大,在进行输电线路反击跳闸率计算时,需要考虑后续回击.

目前国内外对于后续回击的研究主要侧重于低压线路及高压输电线路,基本未涉及超高压输电线路,因此需要结合实际超高压输电线路的雷电统计规律,通过雷击仿真模型的改进来分析后续回击对雷击跳闸率的影响.由于多数多回击地闪为负极性,因此本文讨论的后续回击为负极性.

## 1 后续回击分布规律

### 1.1 回击次数

本文选取华中区域500 kV省间联络线重要输电通道的十条输电线路进行分析,数据来源于国家电

网公司华中分部的调度信息系统,其中包括四条双回输电线路及两条单回输电线路,令十条线路编号为①~⑩,统计十条线路 2016—2019 年 10 km 走廊范围内的负极性落雷如表 1 所示。

表 1 十条线路 10 km 走廊范围内的落雷统计  
Tab. 1 Statistics of lightning fall within 10 km corridor of 10 lines

编号	有效放电次数	首次回击次数	后续回击次数
①	4 877	3 497	1 380
②	5 307	3 805	1 502
③	17 930	9 148	8 782
④	18 057	9 216	8 841
⑤	79 767	36 661	43 106
⑥	80 062	36 987	43 075
⑦	66 532	30 909	35 623
⑧	6 877	3 823	3 054
⑨	7 005	3 894	3 111
⑩	24 289	13 447	10 842
总计	310 703	151 387	159 316

由表 1 可知,2016—2019 年在华中区域十条 500 kV 省间联络线内,后续回击次数平均约为首次回击次数的 1.05 倍,且在此十条线路中有三条的后续回击次数明显超过首次回击次数。

### 1.2 雷电流幅值

我国各个区域的雷电流幅值概率分布曲线差异较大,表明各个区域雷电流的相关变化规律各不相同,此处采用 IEEE 推荐雷电流幅值概率分布曲线表达式

$$P = 1/[1 + (I/a)^b] \quad (1)$$

其中,  $P$  表示雷电流幅值分布概率,  $I$  为雷电流幅值,  $a$  为中值电流,  $b$  反映了曲线的变化幅度。

依照以上公式,对线路⑤的数据进行拟合,得到的参数如表 2 所示,得到相应的雷电流幅值概率分布拟合曲线如图 1 所示。纵坐标  $P(>I)$  表示雷电流幅值超过对应横坐标  $I$  的概率。

由表 2 的中值电流值可知,在不同放电类型的中值雷电流中,含后续回击的首次回击的雷电流幅

表 2 不同放电类型雷电流幅值概率分布表达式的参数  
Tab. 2 Parameters of different discharge type lightning amplitude probability distribution expressions

参数	不含后续回击的首次回击	含后续回击的首次回击	首次回击	后续回击	总回击
$a$	21.71	35.29	28.72	23.86	25.39
$b$	2.577	2.836	2.573	3.028	2.806

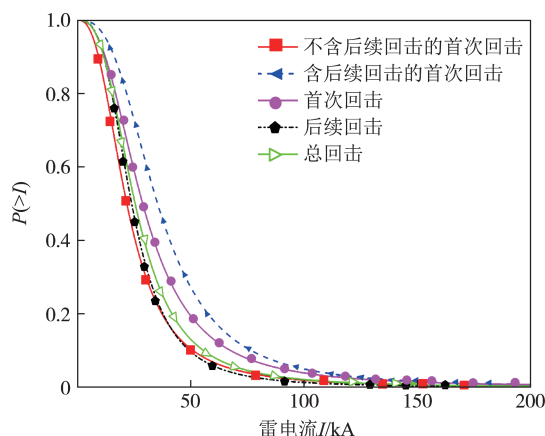


图 1 各种放电类型的负极性回击的雷电流幅值概率拟合图  
Fig. 1 Probability fitting diagram of lightning return strokes current amplitude of negative polarity lightning of various discharge types

值最大,表示在线路⑤ 10 km 范围内含不同放电类型中,雷电流最为显著的是含后续回击的首次回击。

从图 1 可以直观看出,对于雷电流幅值概率分布曲线,总回击的拟合曲线位于后续回击与首次回击之间,表明考虑后续回击后,线路⑤ 10 km 范围内的雷电流会减小。

### 1.3 变异系数法

为了客观展现各个雷击跳闸指标的重要程度,需要计算出待分析的各个指标所占的比重来对各个指标进行客观赋权,以计算出的指标权重反映指标的重要性。若最终计算得出的包含后续回击的放电类型参数的权重较不包含后续回击的放电类型参数的权重更大,则可证明后续回击对雷击跳闸具有较大影响。

变异系数法<sup>[16]</sup>是一种易于操作、计算便捷的客观赋权方法。通过对收集到的客观数据进行分析、计算权重,从而判定各个指标的重要程度。这种方式可以避免人为主观判断,以权重表示重要程度,更具有说服力。

变异系数用来表征对象指标的变异程度水平,反映其离散程度,可消除不同评估指标量纲的影响。在评价指标体系中,指标的变异系数可以反映指标所覆盖的信息量:指标的变异系数越大,表明指标的各个取值差异性高,而差异性更高的指标会给最终结果提供更大的信息值,可说明其在评价对象指标中的重要程度越高,可以客观反映该指标对系统的影响。

在比较多个指标的变异程度时,首先要统一量纲,使用标准偏差与平均值的比值考虑指标。

变异系数法的相关步骤如下:

1) 针对若干个参与对象,分别求解这些对象每个指标的平均数和标准差.

2) 根据指标平均值和标准差计算全部指标的变异系数(此处假设有  $n$  个指标),可通过下式计算:

$$H_i = \sigma_i / x_{av-i}, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中:  $H_i$  表示第  $i$  个指标的变异系数;  $\sigma_i$  表示第  $i$  个指标的标准差;  $x_{av-i}$  表示第  $i$  个指标的平均值.

3) 第  $i$  个指标权重  $W_i$  可通过下式求解得到:

$$W_i = H_i / \sum_{i=1}^n H_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

基于所选华中区域十条 500 kV 线路雷击跳闸的相关负极性放电统计数据进行分析,令含后续回击的首次回击次数、雷电流幅值,不含后续回击的首次回击次数、雷电流幅值及后续回击的次数、雷电流幅值作为指标,将选取的六个负极性放电参数的指标进行分析,由于各个指标值的物理意义与单位不同,因此首先对输入参数进行量纲统一,通过变异系数法计算出六个参数的变异系数值和权重如表 3 所示.

表 3 雷击跳闸的相关负极性放电参数的权重

Tab.3 Weight of negative polarity discharge parameters related to lightning strike trip

参数	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$
变异系数	0.887 1	0.235 8	0.568 6	0.118 2	0.939 3	0.128 9
权重	0.308 2	0.081 9	0.197 6	0.041 1	0.326 4	0.044 8

表 3 中,  $x_1$  表示含后续回击的首次回击次数,  $x_2$  表示含后续回击的雷电流幅值,  $x_3$  表示不含后续回击的首次回击次数,  $x_4$  表示不含后续回击的雷电流幅值,  $x_5$  表示后续回击的次数,  $x_6$  表示后续回击的雷电流幅值.

由表 3 可知,后续回击次数及含后续回击的首次回击次数两个参数对雷击跳闸的影响权重较大,表明后续回击对输电线路的影响较大,需要引起重视.

#### 1.4 实际跳闸情况分析

为了验证通过变异系数法分析得到的结论,对本文所选华中区域十条 500 kV 线路 2016—2019 年的实际雷击跳闸情况进行统计分析,发现四年间十条线路中有 5 条线路总计出现了 6 次雷击跳闸故障,其中有 3 次故障的故障塔在故障时刻的回击数在 5 次以上,选取线路③232#塔,其具体的跳闸情况如表 4 所示.

表 4 列举了线路③雷电回击的综合回击点离故

表 4 线路③某一时刻记录到的回击情况

Tab.4 Lightning return strokes recorded at sometime on line 3

雷电流/ kA	回击	回击点离故障点距离/km
-15.7	首次回击(含 10 次后续回击)	9.195
-48.4	后续第 1 次回击	3.103
-20.6	后续第 3 次回击	7.104
-29.5	后续第 4 次回击	3.437
-15.6	后续第 5 次回击	8.750
-12.5	后续第 6 次回击	8.958
-13.5	后续第 8 次回击	9.788
-15.7	后续第 9 次回击	6.222
-15.9	后续第 10 次回击	8.757
-14.2	首次回击(含 1 次后续回击)	6.826
-78.2	后续第 1 次回击	1.744

障杆塔的距离及雷电流幅值.由表中可知,在 11 次雷击中,含 1 次后续回击的首次回击的第一次后续回击点离故障点的距离为 1.744 km.此回击在上述雷击中离故障点距离最近,且雷电流幅值达到了 78.2 kA,可以判断 232#塔跳闸是含 1 次后续回击的首次回击的第一次后续回击引起的.

同理,对故障时刻的回击数在 5 次以上的故障塔进行分析,数据表明,线路⑥21#塔故障由含 2 次后续回击的首次回击引起,线路⑦445#塔故障由含 3 次后续回击的首次回击引起.

综上所述,在充分考虑杆塔发生雷击跳闸故障时的雷电流幅值及回击点离故障点的距离两个因素后,分析得出含后续回击的首次回击与后续回击这两种放电类型是引起杆塔跳闸的原因.

## 2 考虑后续回击的绝缘子串闪络判据模型

### 2.1 常规的绝缘子串闪络判据模型

绝缘子串闪络的三种判断方法的主要特点如下:规程法是以根据运行经验得到的绝缘子串 50% 冲击击穿电压  $U_{50\%}$  为基础,通过比较绝缘子串两端的实时过电压值与  $U_{50\%}$  的大小来判断其是否闪络;相交法是以实验得到的绝缘子串的伏秒特性曲线为基础,通过观察绝缘子串两端的实时电压波形与伏秒特性曲线是否相交来判断其是否闪络,  $U_{50\%}$  以及伏秒特性曲线均在雷电冲击电压条件下通过实验获得.

先导法对应的理论中的放电过程与实际情况下

服规程法及相交法的缺点,采用与绝缘子串等长空气间隙的闪络过程<sup>[17]</sup>替代绝缘子串的实际闪络过程,可以判断任意波形造成的闪络.由于自然雷电主要为非标准雷电冲击波,且先导法通过分析雷电放电机理形成闪络判据,因此本文选取先导法<sup>[18]</sup>作为常规的绝缘子串闪络判据.

对于长空气间隙放电,间隙击穿时间可以近似为流注放电时间 $t_1$ 及先导发展时间 $t_2$ <sup>[19]</sup>之和,若流注放电时间大于0,则表明会发生流注放电过程.

$$t_1 = 1/(1.25E_{\max}/E_{50} - 0.95) \quad (4)$$

其中, $E_{\max}$ 为绝缘子串闪络前的最大平均场强, $E_{50}$ 为50%放电电压对应的空气间隙的平均场强.

$$\int_0^{t_2} v_2 dt = L_1 \quad (5)$$

其中, $v_2$ 为先导发展的速度, $L_1$ 为先导发展部分的间隙长度.

$$v_2 = 170d \exp(1.5 \times 10^{-3} \frac{u(t)}{d}) (\frac{u(t)}{L_2} - E_0) \quad (6)$$

其中, $d$ 为长空气间隙的长度, $u(t)$ 为绝缘子串两端的瞬时电压差, $L_2$ 为长空气间隙的剩余长度, $E_0$ 为先导发展的初始场强,是由绝缘子串种类及其两端施加电压的极性确定的常数.

在先导发展时间 $t_2$ 内,若先导发展速度大于0,则表明先导完全发展导致长空气间隙击穿,则绝缘子串的闪络判据为 $t_1 > 0$ 及 $v_2 > 0$ .

## 2.2 考虑后续回击的绝缘子串闪络判据模型

由式(4)可知,流注放电时间与绝缘子串闪络前的最大平均场强 $E_{\max}$ 及50%放电电压对应的空气间隙的平均场强 $E_{50}$ 有关,其中 $E_{\max}$ 与绝缘子串两端的瞬时电压差 $u(t)$ 有关, $E_{50}$ 为常数,则流注放电时间与回击放电类型无关.

由式(5)可知,先导发展部分的间隙长度 $L_1$ 与先导发展速度 $v_2$ 及先导发展时间 $t_2$ 有关.由式(6)可知, $v_2 > 0$ 与绝缘子串两端的瞬时电压差 $u(t)$ 、间隙的剩余长度 $L_2$ 及先导发展的初始场强 $E_0$ 有关, $E_0$ 为常数, $L_2$ 为长空气间隙长度 $d$ 与 $L_1$ 之差.

后续回击沿首次回击的先导发展通道向下延伸时,由人工引雷的大量实验数据可知,后续回击的先导发展速度与首次回击相比较快<sup>[20]</sup>,令考虑后续回击时的先导发展速度为 $v_3$ ,相应的先导发展部分的间隙长度为 $L_3$ ,则

$$\int_0^{t_3} v_3 dt = L_3 \quad (7)$$

$$v_3 = (1 + a)v_2 \quad (8)$$

其中, $a$ 为比例系数,表示后续回击发展比首次回击快的程度,与沿首次回击的先导发展通道的后续回击比例 $a_1$ 及后续回击与首次回击之比 $a_2$ 有关.

$$a = a_1 a_2 \quad (9)$$

根据已有研究可知<sup>[21-22]</sup>,与沿首次回击的先导发展通道的后续回击比例约为45.5%,即根据第1节后续回击分布规律的统计分析可知,对负极性放电,由表1可推出,后续回击是首次回击的1.33倍,则 $a$ 取0.6.式(6)变为

$$v_3 = 1.6 \cdot 170d \exp(1.5 \times 10^{-3} \frac{u(t)}{d}) (\frac{u(t)}{L_2} - E_0) \quad (10)$$

则考虑后续回击的绝缘子串闪络判据为 $t_1 > 0$ 及 $v_3 > 0$ .考虑后续回击的绝缘子串闪络判据流程图如图2所示.

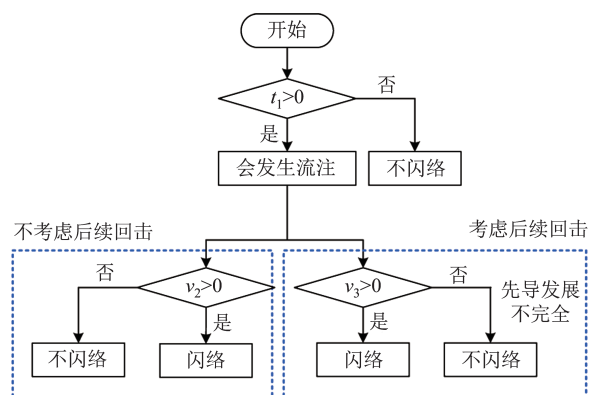


图2 考虑后续回击的绝缘子串闪络判据流程图

Fig. 2 Flow chart of insulator string flashover criterion considering subsequent return stroke

## 3 后续回击对单回输电线路耐雷水平的影响

### 3.1 反击耐雷水平

当输电杆塔遭受雷击后,输电线路绝缘子串承受的电压差幅值可用式(11)表示

$$U_{ii} = U_a - U_1 - U_{i(c)} - U_2 \quad (11)$$

其中, $U_a$ 为绝缘子串的横担侧电压, $U_1$ 、 $U_{i(c)}$ 、 $U_2$ 分别为导线上的耦合电压、感应过电压及工频电压.

负极性雷击中杆塔塔顶时,塔顶为负电位, $U_1$ 与 $U_{i(c)}$ 分别为负极性、正极性.首次回击跳闸且重合闸成功之后,绝缘子串两端的电压差恢复到跳闸之前的电压水平,此时再考虑后续回击的情况与首次回击未跳闸的情况相同,因此本文考虑后续回击对线路耐雷水平的影响时,仅考虑首次回击未跳闸的

情况。

根据如图2所示的考虑后续回击的绝缘子串闪络判据及考虑后续回击的雷电流模型,建立基于图3原理流程的考虑后续回击的仿真模型,为贴近华中区域雷击频发的老旧线路运行工况,模型不含避雷器等防雷装置,杆塔塔型为酒杯型。

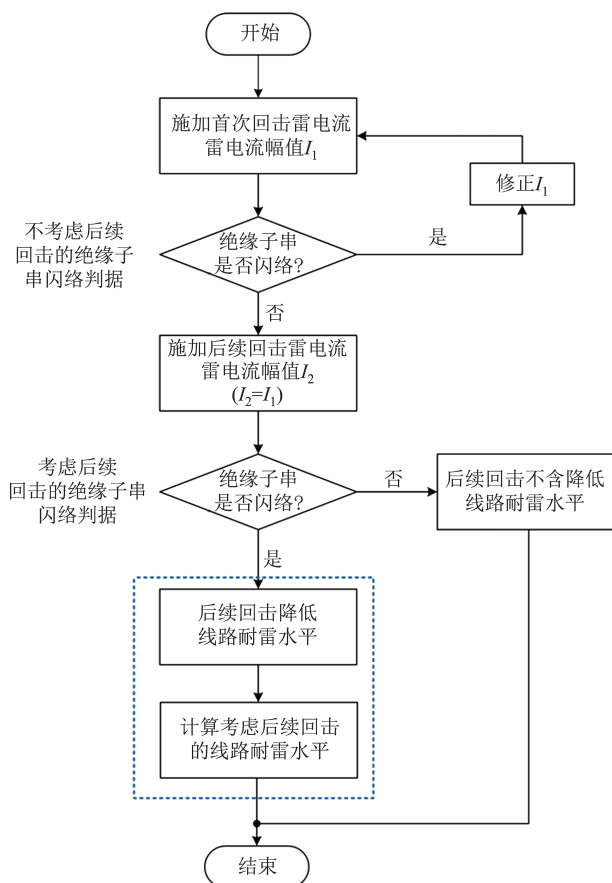


图3 考虑后续回击的线路雷击仿真模型原理逻辑图

Fig. 3 Schematic diagram of line lightning simulation model considering subsequent lightning return stroke

初步设置  $t=0$  时, B 相的工频电压值为  $0.500 \text{ kV}$  导线上的工作电压的频率为  $50 \text{ Hz}$ . 通道波阻抗设为  $300 \Omega$ , 接地电阻设为  $10 \Omega$ , 不考虑后续回击时线路的反击耐雷水平为  $191.434 \text{ kA}$ , B 相绝缘子串两端的过电压为  $3.85 \text{ MV}$ .

取首次回击雷电流幅值  $I_1$  为  $191.434 \text{ kA}$ , 即首次回击不会跳闸, 设仿真时间为  $0.2 \text{ s}$ , 取其中一个运行周期 ( $0.1 \text{ s} \leq t \leq 0.12 \text{ s}$ ) 进行分析, 在  $t$  时刻施加雷电流, 其幅值  $I_2=191.434 \text{ kA}$ , 若绝缘子串闪络, 可证明考虑后续回击后, 线路的反击耐雷水平降低, 并计算线路的反击耐雷水平。

以  $t=0.105 \text{ s}$  为例, 如图4所示。

从图4中可以看出, 考虑首次回击未跳闸, 稳定之后绝缘子串两端的电压为线路的工频电压, 考虑后续回击跳闸后, 跳闸相绝缘子串两端的电压变为  $0$ , 绝缘子串闪络, 线路的反击耐雷水平降低。

一个运行周期 ( $0.1 \text{ s} \leq t \leq 0.12 \text{ s}$ ) 中, 考虑后续回击后线路的反击耐雷水平如表5所示。

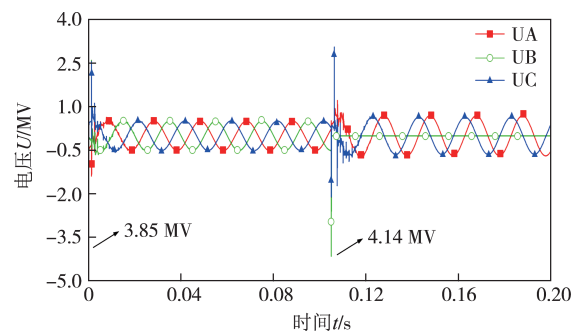


图4  $t=0.105 \text{ s}$  考虑后续回击绝缘子串两端电压变化图

Fig. 4 Diagram of voltage changes at both ends of subsequent lightning return stroke when  $t=0.105 \text{ s}$

表5 考虑后续回击后线路的反击耐雷水平

Tab. 5 The lightning back-flashover resistance level of the line considering the subsequent return

$t/\text{s}$	过电压幅值/ MV	反击耐雷水平/ kA	降低百 分比/%
0.1	3.63	126.759	33.0
0.105	4.14	113.706	40.6
0.11	3.64	126.450	34.0
0.115	3.12	120	37.3
平均值	—	—	36.4

对于雷击产生的过电压幅值, 在  $t=0.1 \text{ s}$ 、 $0.11 \text{ s}$  及  $0.12 \text{ s}$  三种情况下考虑后续回击, 即在 B 相的工频电压过零点考虑后续回击, 跳闸时 B 相绝缘子串两端的过电压幅值小于  $3.85 \text{ MV}$ 。

在  $t=0.105 \text{ s}$  时考虑后续回击, 即为 B 相的正半周工频电压峰值点, 当考虑后续回击跳闸时, B 相绝缘子串两端的过电压幅值大于  $3.85 \text{ MV}$ ; 在  $t=0.115 \text{ s}$  时考虑后续回击, 即为 B 相的负半周工频电压峰值点, 当考虑后续回击跳闸时, B 相绝缘子串两端的过电压幅值小于  $3.85 \text{ MV}$ 。

因此, 后续回击雷电流为原反击耐雷水平时, 绝缘子串承担的过电压与原来承担过电压之间的关系与导线工频电压周期有关。

对于线路反击耐雷水平, 由表5可知, 考虑后续回击后, 计算出的线路的反击耐雷水平降低, 同时, 不同时刻的降低程度不同, 且与工频电压周期有关,

平均降低原反击耐雷水平的36.4%。

### 3.2 绕击耐雷水平

在考虑后续回击的反击仿真模型的基础上,改变雷电流模型的通道波阻抗为 $400\ \Omega$ ,改变雷击点的位置,建立考虑后续回击的绕击仿真模型。

调整交流电源的相位使 $t=0$ 时刻A相的工频电压值为 $500\ \text{kV}$ 。 $t=0\ \text{s}$ 时, $U$ 为 $500\ \text{kV}$ ,此时发生首次回击,接地电阻设为 $10\ \Omega$ ,不考虑后续回击时线路的绕击耐雷水平为 $25.259\ \text{kA}$ ,A相绝缘子串两端的过电压为 $3.90\ \text{MV}$ 。

取首次回击雷电流幅值 $I_1$ 为 $25.259\ \text{kA}$ ,即首次回击不会跳闸,由于线路发生首次回击后,所引起的绝缘子串两端电压差恢复成正弦状态所需时间较短,因此为方便仿真计算,将考虑后续回击的时刻 $t=0.5\ \text{s}$ 类同于 $t=0.1\ \text{s}$ ,施加后续回击雷电流,其幅值为 $I_2=25.259\ \text{kA}$ ,若绝缘子串闪络,可证明考虑后续回击后,线路的反击耐雷水平降低,并计算线路的耐雷水平。

设仿真时间为 $0.2\ \text{s}$ ,取其中的一个周期( $0.1\ \text{s} \leq t \leq 0.12\ \text{s}$ )进行分析得出考虑后续回击后线路的绕击耐雷水平如表6所示。

表6 考虑后续回击后线路的绕击耐雷水平

Tab 6 The lightning shielding resistance level of the line considering the subsequent return

$t/\text{s}$	过电压幅值/ MV	绕击耐雷水平/kA	降低百分比/%
0.1	3.53	19.735	21.9
0.105	3.31	21.635	14.4
0.11	3.09	20.628	18.3
0.115	3.37	21.308	15.6
平均值	—	—	17.6

由表6可知,考虑后续回击后线路的绕击耐雷水平会降低,同时,不同时刻的降低程度不同,且与工频电压周期有关,平均降低原绕击耐雷水平的17.6%。

综合考虑后续回击对输电线路耐雷水平的影响发现,后续回击会使 $500\ \text{kV}$ 输电线路的耐雷水平降低,且后续回击对绕击耐雷水平的影响程度与反击耐雷水平相比较小。

## 4 原因分析

本文考虑后续回击对输电线路跳闸的影响时,

重点在于与首次回击保持相同通道的后续回击,在分析后续回击对反击及绕击耐雷水平的影响时,导致跳闸的后续回击出现的概率假设一致均为 $k$ ,则根据图1可得,在已知首次回击的雷电流幅值概率分布曲线时,雷电流幅值概率 $k$ 提高,对应的雷电流降低值如图5所示。

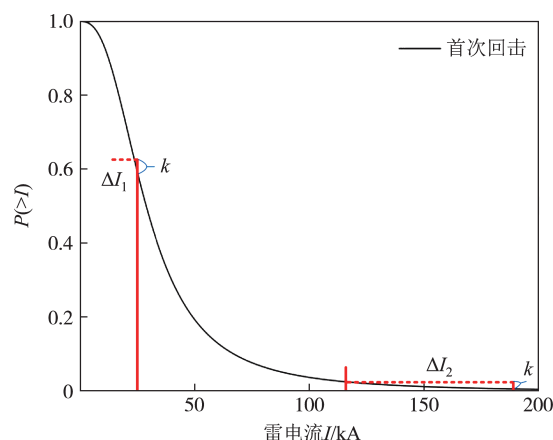


图5 雷电流幅值概率分布拟合图

Fig. 5 Lightning current amplitude probability distribution fitting diagram

由图5可知,当雷电流幅值概率 $k$ 提高时, $25\ \text{kA}$ 对应的绕击雷电流降低值 $\Delta I_1$ 小于 $190\ \text{kA}$ 对应的反击雷电流降低值 $\Delta I_2$ ,则后续回击对反击耐雷水平的影响程度更为严重,与仿真计算结果一致。

## 5 结论

本文通过对华中区域十条 $500\ \text{kV}$ 省间联络线重要输电通道线路走廊 $10\ \text{km}$ 范围内近年来的落雷数据进行分析,得出如下结论:

1)得到了后续回击的分布规律,后续回击次数为首次回击次数的1.33倍,后续回击次数30%以上比首次回击次数多,且考虑后续回击后线路走廊范围内的雷电流会减小。

2)利用变异系数法完成了后续回击对输电线路影响的分析,并利用实际线路运行跳闸数据进行验证,结果表明后续回击次数的两个参数对雷击跳闸的影响权重较大,需要引起重视。

3)建立了考虑后续回击的绝缘子串闪络判据模型,仿真结果表明后续回击会使 $500\ \text{kV}$ 输电线路的耐雷水平降低,且降低程度与工频电压周期有关,后续回击对反击耐雷水平的影响程度与绕击耐雷水平相比更为显著。

## 参考文献

- [1] 柳双,杜志叶,王俊,等. 基于熵权法的华中500kV高压输电线路雷击跳闸情况分析[J]. 现代电力,2021,38(3):332-338.  
LIU S, DU Z Y, WANG J, et al. Entropy weight method based analysis on lightning trip in central China 500kV transmission lines [J]. Modern Electric Power, 2021, 38(3): 332-338. (in Chinese)
- [2] MATSUI M, MICHISHITA K, YOKOYAMA S. Characteristics of negative flashes with multiple ground strike points located by the Japanese lightning detection network [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61(3): 751-758.
- [3] RAKOV V A, UMAN M A, THOTTAPPILLIL R. Review of lightning properties from electric field and TV observations [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1994, 99(D5): 10745.
- [4] SABA M M F, BALLAROTTI M G, PINTO O Jr. Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2006, 111(D3): D03101.
- [5] ZHU B Y, MA M, XU W W, et al. Some features of negative cloud-to-ground flashes from a local thunderstorm based on accurate-strokecount study [C]//2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP). Shanghai, China: IEEE, 2014: 1657-1660.
- [6] 基于雷电定位系统(LLS)的地闪密度 总则:GB/T 37047—2018 [S].北京:中国标准出版社,2018.  
Lighting density based on lightning location systems (LLS) -General principles [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018. (in Chinese)
- [7] CUMMINS K L, MURPHY M J, BARDO E A, et al. A combined TOA/MDF technology upgrade of the US national lightning detection network [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1998, 103(D8): 9035-9044.
- [8] 王学良,成勤,王清龙,等. 基于LLS的多回击地闪及其雷电流幅值分布特征[J]. 热带气象学报,2021,37(3):309-319.  
WANG X L, CHENG Q, WANG Q L, et al. The distribution characteristics of multiple strokes of cloud-to-ground lightning and their lightning current magnitude based on LLS [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2021, 37(3): 309-319. (in Chinese)
- [9] SILVEIRA F H, VISACRO S. On the lightning-induced voltage amplitude: first versus subsequent negative strokes [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2009, 51(3): 741-747.
- [10] NAG A, RAKOV V A, SCHULZ W, et al. First versus subsequent return-stroke current and field peaks in negative cloud-to-ground lightning discharges [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2008, 113(D19): D19112.
- [11] 江安烽,包炳生,顾承昱,等. 后续雷击对10kV配电线路防雷性能及防雷措施的影响[J]. 电网技术,2014,38(6):1657-1663.  
JIANG A F, BAO B S, GU C Y, et al. Influences of subsequent stroke on lightning withstand performance and effects of lightning protection measures of 10 kV distribution lines [J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1657-1663. (in Chinese)
- [12] JIANG A F, FU Z C, HUANG B, et al. Backflashover rate of quadruple-circuit transmission lines due to first and subsequent return strokes [J]. Electric Power Systems Research, 2016, 139: 47-51.
- [13] SILVEIRA F H, VISACRO S, DE CONTI A, et al. Backflashovers of transmission lines due to subsequent lightning strokes [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2012, 54(2): 316-322.
- [14] SILVEIRA F H, VISACRO S, DE CONTI A. Lightning performance of 138-kV transmission lines: the relevance of subsequent strokes [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2013, 55(6): 1195-1200.
- [15] GATTA F, GERI A, LAURIA S, et al. Monte Carlo evaluation of the impact of subsequent strokes on backflashover rate [J]. Energies, 2016, 9(3): 139.
- [16] 张文朝,顾雪平. 应用变异系数法和逼近理想解排序法的风电场综合评价[J]. 电网技术,2014,38(10):2741-2746.  
ZHANG W C, GU X P. Comprehensive evaluation of wind farms using variation coefficient method and technique for order preference by similarity to ideal solution [J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2741-2746. (in Chinese)
- [17] 曾嵘,庄池杰,余占清,等. 长空气间隙放电研究的挑战与进展 [J]. 高电压技术,2014,40(10):2945-2955.  
ZENG R, ZHUANG C J, YU Z Q, et al. Challenges and achievement in long air gap discharge research [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 2945-2955. (in Chinese)
- [18] 肖萍. 基于先导法闪络判据的线路及变电站的防雷研究 [D]. 长沙:湖南大学,2012.  
XIAO P. Lightning protection research of transmission line and substation based on flashover criterion by leader [D]. Changsha: Hunan University, 2012. (in Chinese)
- [19] 庞启成,张宇,阮江军. 基于先导发展法的绝缘闪络判据的研究 [J]. 广西电力,2006,29(2):51-53.  
PANG Q C, ZHANG Y, RUAN J J. Study on criterion of insulation flashover based on antecedent development method [J]. Guangxi Electric Power, 2006, 29(2): 51-53. (in Chinese)
- [20] 王宇,谷山强,孟刚,等. 雷电定位系统反演地闪回击电流的准确度受回击速度取值的影响 [J]. 高电压技术,2021,47(5): 1617-1624.  
WANG Y, GU S Q, MENG G, et al. Effect of lightning return stroke speed on accuracy of inversed return stroke peak current using lightning location system [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1617-1624. (in Chinese)
- [21] FLEENOR S A, BIAGI C J, CUMMINS K L, et al. Characteristics of cloud-to-ground lightning in warm-season thunderstorms in the Central Great Plains [J]. Atmospheric Research, 2009, 91(2/3/4): 333-352.
- [22] VALINE W C. Statistics and characteristics of cloud-to-ground lightning with multiple ground contacts [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2002, 107(D20): 4441.