

涪江大跨越雷电性能研究

佟继春

(四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610016)

摘要:采用规程法、电气几何模型 (EGM) 和先导发展模型算法对“±500 kV 宝鸡换流站—德阳换流站直流线路”涪江大跨越的绕击闪络率进行了计算。在电气几何模型算法中, 采用了随杆塔高度变化的击距系数 β 以暴露弧为 0 时对应的雷电流作为雷电的最大绕击电流。分析了地线保护角对绕击闪络率的影响, 结果表明, 绕击闪络率随保护角的减小而减小。对涪江大跨越的雷电性能的分析计算方法可以做为国内同类大跨越线路防雷设计的参考。

关键词:输电线路; 大跨越; 绕击闪络

Abstract: The shielding failure flashover of FuJiang river crossing is calculated by using empirical formula, the improved electro-geometric model (EGM) and leader progress model. The calculations with electro-geometric methods of shielding analysis essentially depend on the joint premises of a lightning stroke distance and of a functional relationship between this stroke distance and the crest current amplitude of return stroke. With the increase of shielding angle and the height of the towers, the shielding failure flashover increases. The result shows that the lightning performance of FuJiang river crossing has reached the requirements.

Key words: transmission line; river crossing; shielding failure flashover

中图分类号: TM863 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0057-04

0 前言

从中国近几年的架空输电线路故障分类统计表明, 在引起高压架空输电线路跳闸的各种因素中, 雷击引起的跳闸次数占 40%~70%。对于 500 kV 线路, 雷击跳闸主要不是雷击杆塔时反击引起的, 而是由于雷电流绕击导线造成的。广东省从 1999 年开始在全省安装了雷电定位系统, 较全面地统计了引起 110~500 kV 线路雷击跳闸的雷电流分布情况。从统计结果来看, 雷击引起跳闸的雷电流大部分都小于各级电压水平的耐雷水平。而这些小于耐雷水平的雷电流若直击于杆塔塔顶或避雷线上时一般不能导致跳闸, 其跳闸的原因只有这些雷电流绕击到导线, 因为直击导线的耐雷水平远低于直击塔顶和避雷线的耐雷水平。因此, 准确计算输电线路绕击跳闸率非常重要, 尤其是塔高很高的大跨越线路 (由于雷击架空输电线路绝缘闪络后, 交流和直流系统的保护动作方式是不同的, 因此交、直流系统对雷电性能指标的要求也不同。

交流输电系统对线路雷电性能用“雷击跳闸率”

作为控制指标, 直流输电系统则用“雷击闪络率”来表征雷电性能)。

目前, 计算绕击的方法主要有以下几种: 规程法、电气几何模型 (EGM)^[1-3] 及其改进算法和先导发展模型算法等。

规程法中的线路绕击率计算公式在工程中的应用起来简单方便, 而且它经过了实践的检验, 对于一般线路的防雷屏蔽设计, 能够满足要求。但是, 其缺点也很明显, 由于规程法中的线路绕击率计算公式是根据多年的运行经验和小电流下的模型试验结果而提出的, 所以带有综合的平均性质, 不能反映具体线路的特点, 无法解释屏蔽失效的现象。

美国的 E. R. Whitehead 等人自 20 世纪 60 年代末期开始进行雷电屏蔽技术的理论研究, 并提出了怀氏电气几何模型 (EGM)。目前在日本、美国、欧洲等国家均采用该方法, 在中国也得到了电力研究人员的普遍认可。

输电线路雷电绕击的先导发展模型是 Rizk 在实验研究的基础上提出的, 该模型认为雷击是由于下行雷电先导和产生于结构物上的上行先导相遇而发生的, 先导发展模型引入吸引半径和侧面吸引距离两个

参数,这两个参数都是雷电流幅值和结构物高度的函数。 R_{izk} 的先导发展模型比较细致地考虑了上下行先导的发展相遇过程,并对该过程进行了初步定量描述,这是输电线路雷电绕击研究方面一个很大的进步。但是,国际上至今尚无先导传播模型计算方法的统一规定,也几乎没有哪个国家把先导传播模型用于工程设计。因此,先导发展模型还不成熟,还需继续研究,目前尚不能直接用于工程计算,其计算结果只能做为参考。而且,它没有考虑当雷电下行先导已经下降到低于输电线路高度时发生的雷击线路现象,因此,它不适用于高杆塔线路的雷电绕击性能估算。

下面对涪江大跨越的绕击闪络率进行计算时主要采用电气几何模型 (EGM) 算法,并与规程法、先导发展模型算法计算结果进行对比分析。

1 电气几何模型 (EGM) 的原理和计算方法

电气几何模型是将雷电的放电特性与线路的结构尺寸联系起来而建立的一种几何分析计算模型。

图 1 显示了雷电绕击线路的电气几何模型。S 点是避雷线, C 点是导线, AA' 为杆塔中心线, θ 是一档线路避雷线对导线的保护角。若雷电先导头部落入 AB 弧面, 放电将击向避雷线, 使导线得到保护, 称 AB 为保护弧。若先导头部落入 BD 弧面, 则击中导线, 即避雷线的屏蔽保护失效而发生绕击, 称 BD 为暴露弧。若先导头部落入 DE 平面, 则击中大地, 故称 DE 平面为大地捕雷面。随着雷电流幅值增大, 暴露弧 BD 逐渐缩小, 当雷电流幅值增大到 I_{max} 时 BD 缩小为 0, 即不再发生绕击, I_{max} 称为最大绕击电流, 相应的击距称为最大击距。

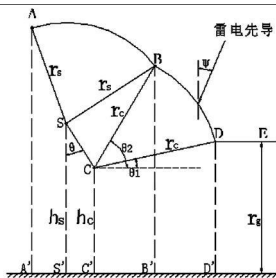


图 1 输电线路绕击的 EGM 示意图

绕击闪络率 P_r 可由下式计算。

$$P_r = \int_{I_{min}}^{I_{max}} X(I) \cdot F(I) dI \quad (1)$$

式中, $X(I)$ 为雷电流 I 下的绕击概率, 可由下式计算。

$$X(I) = \frac{\overline{B'D'}}{A'D'} = \frac{r_c (\cos\theta_1 - \cos\theta_2)}{r_c \cos\theta_1 + A'C'}$$

$F(I)$ 为雷电流概率密度。

$$F(I) = \frac{d(1-P)}{dI} = \frac{d(1-10^{-1/88})}{dI} = 0.026166 \times 10^{-1/88}$$

目前, 各国采用的击距公式不完全相同, 这里采用了 IEEE 标准所推荐的击距公式。

$$r_s = 10 I^{0.65} \quad (2)$$

$$r_g = \beta \cdot 10 I^{0.65} \quad (3)$$

$$\beta = \begin{cases} 0.36 + 0.17 \cdot \ln(43 - y_c) & (y_c < 40 \text{ m}) \\ 0.55 & (y_c \geq 40 \text{ m}) \end{cases}$$

考虑导线工作电压后雷电对导线的击距见式 (4)。

$$r_c = 1.63 \times (5.015 \times I^{0.578} - U_{dc})^{1.125} \quad (4)$$

2 反击闪络率计算

采用行波法对涪江大跨越的反击闪络率进行计算。运行经验表明, 雷击避雷线的档距中间且与导线发生闪络引起跳闸的情况是极罕见的, 可不予考虑, 因此在反击计算中仅考虑雷击杆塔的情况。

雷击塔顶时, 导线上的电压 u_c 为

$$u_c = u_R (1 - k_0) + U_1 k_0 + U_{DC} \quad (5)$$

式中, u_R 为雷击塔顶在导线上形成的感应过电压分量; U_1 为雷击点 (塔顶) 的电压; U_{DC} 为导线上的工作电压; k_0 为避雷线与导线间的几何耦合系数; k_0 为避雷线与导线间考虑避雷线上冲击电晕影响后的耦合系数。

雷击杆塔时, 导线上感应过电压的磁分量比电分量要小得多, 在计算时仅考虑电分量。若忽略导线至地面间场强的变化, 且视为与地面处相同, 则斜角雷电流波作用下杆塔处导线上的感应过电压的电分量为

$$u_R = \frac{60 \alpha H_c}{\beta \cdot c} \ln \frac{H_T + d_R + \beta \cdot ct}{(1 + \beta)(H_T + d_R)} \quad (6)$$

式中, β 为反放电速度与光速 c 的比值, 取为 0.3; H_T 为杆塔高度, m; H_c 为导线的平均高度, m; d_R 为雷击杆塔时迎面先导长度, $d_R = 5 I^{0.65}$ m; α 为雷电流陡度, $kA/\mu s$ 。

3 直流线路雷击闪络率的计算方法

直流输电线路上的工作电压为直流电压, 雷电冲

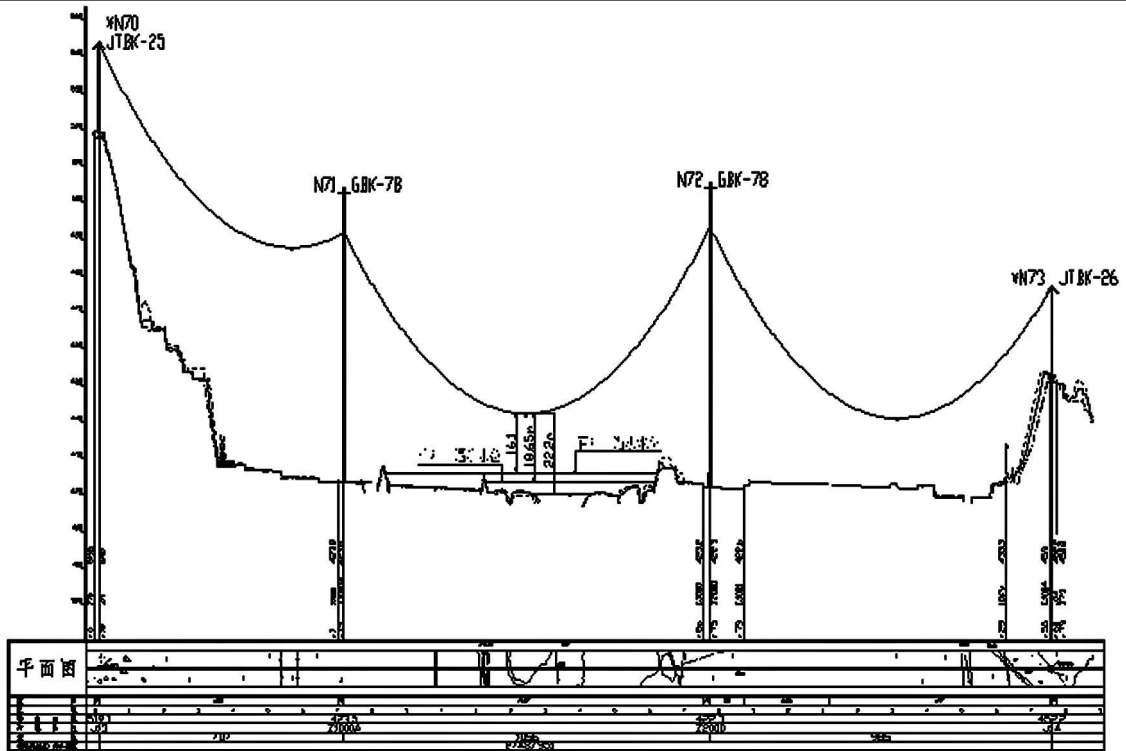


图 2 涪江大跨越平面断面图

击闪络转变为稳定的电弧情况与交流是不同的,没有建弧率的问题。除此之外,线路雷击闪络率的计算方法与交流相同。

大地每平方公里每年的落雷次数 N_g 和年雷电日 T_d 的关系可由式 (7) 确定。

$$N_g = 0.023 T_d^{1.3} \quad (7)$$

年平均雷电日为 40 天时,则大地每平方公里的落雷次数 N_g 为 2.78 次。

线路每百公里每年落雷次数 N_s 可由式 (8) 确定。

$$N_s = N_g \cdot \left(\frac{28 \cdot h^{0.6} + b}{10} \right) \quad (8)$$

式中, h 为杆塔的高度, m ; b 为避雷线间距, m 。

线路每百公里每年因雷击引起的闪络次数 N 可按式 (9) 计算。

$$N = N_s (P_r + g P_1) \quad (9)$$

式中, P_r 为线路的绕击闪络概率; P_1 为超过雷击杆塔顶部时耐雷水平的雷电流概率, g 为击杆率,对于双避雷线线路,平原击杆率为 $1/6$,山丘击杆率为 $1/4$ 。

4 涪江大跨越计算结果分析

涪江大跨越采用的是耐一直一直一耐跨越方式。

跨越断面和铁塔基本参数如下。

导线: $4 \times \text{AACSR} / \text{EST} - 450 / 200$, 计算外径 33.3 mm , 分裂间距 500 mm ;

避雷线: $\text{LBGJ} - 210 - 14 \text{ AC}$, 计算外径 17.5 mm ;

直线塔: 采用 $\text{U}300\text{BP} / 195\text{T}$ 绝缘子, 每串 4×41 片, 铁塔处保护角 -10° ;

锚塔: 采用 $\text{U}400\text{P} / 205$ 绝缘子, 每串 6×54 片;

地形: 丘陵;

海拔高度: $423 \sim 519 \text{ m}$;

接地电阻: 5Ω ;

年平均雷电日: 40 d 。

$N70$ 和 $N73$ 塔为两侧的锚塔, $N71$ 和 $N72$ 塔为大跨越段的直线塔, 有关参数如表 1 所示。

表 1 涪江大跨越杆塔和档距有关参数

塔号	N70	N71	N72	N73
呼称高 /m	25	78	78	26
全高 /m	36	88	88	37
档距 /m	707	1 056	985	

由图 2 可以看出, 大跨越锚塔在两侧山坡上, 跨越塔在涪江两岸的平地上, 以地面倾角 0° 计算, 分析地线保护角与绕击闪络率的关系。

由图 4 可知, 当保护角降到 0° 以下时绕击次数已趋于零。由此可见降低保护角有明显改善线路防止绕击的作用。

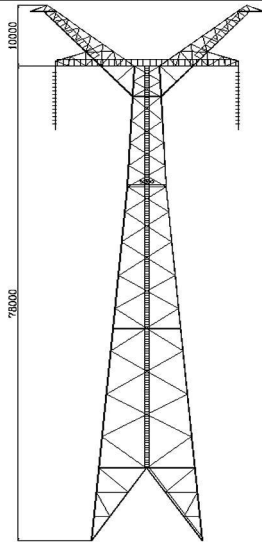


图 3 涪江大跨越直线塔 GBK-78

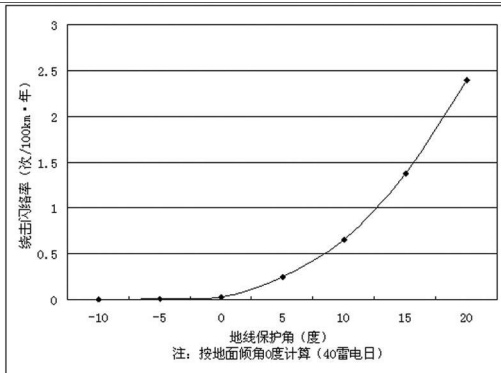


图 4 地线保护角与绕击跳闸率的关系

涪江大跨越塔从铁塔布材、导地线偏移、地线保护角等方面综合考虑,最终按保护角 -10° 设计。

分别按规程法(见《中华人民共和国电力行业标准 DL/T 620-1997》)、电气几何模型(EGM)和先导发展塔型对涪江大跨越的绕击闪络率进行了计算,综合考虑绕击闪络率和反击闪络率后其雷击闪络其计算结果见表 2。

表 2 各种方法计算涪江大跨越雷击闪络率结果
(闪络率 /100 km·a)

改进电气 几何模型 (IEEE 推荐)	改进电气 几何模型 (Ericsson)	先导发 展模型 (Rizk)	规程法
0.005	0	0	0.143

5 结 论

大跨越线路的防雷保护措施主要是减少发生雷击线路的绕击闪络率和反击闪络率。降低绕击闪络率主要措施是减小避雷线的保护角;降低反击闪络率的主要措施是增加线路绝缘子和减小杆塔接地电阻。

计算结果表明,涪江大跨越段的雷击闪络率满足要求。对涪江大跨越的雷电性能的分析计算方法可以做为国内同类大跨越线路防雷设计的借鉴。

参考文献

- [1] 李晓岚,尹小根,余仁山,等.基于改进电气几何模型的绕击跳闸率的计算[J].高电压技术,2006,32(3):42-44.
- [2] 郑江,林苗.110~500 kV 输电线路的绕击雷害分析[J].电力建设,2006,27(11):35-36,50.
- [3] 李晓岚.击距系数及基于电气几何模型的输电线路绕击跳闸率计算的研究[D].武汉:华中科技大学,2005.
- [4] DL/T 620-1997,交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].北京:中国电力出版社,1997.
- [5] 司马文霞,陈宁,许高峰,等.高杆塔大跨越输电线路防雷保护[J].重庆大学学报,2002,25(9):25-28.
- [6] IEEE Std 1243-1997, IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines[S].1997.

作者简介:

佟继春(1978),男,硕士,工程师,从事高压输电线路设计。

(收稿日期:2011-01-13)

(上接第 41 页)

力系统的运行状况,指导电力系统规划设计、设备制造、安装调试和生产管理等各个环节的工作,均较输变电设施可靠性评价规程都有不小的提升。

参考文献

- [1] 邱仕义.电力设备可靠性维修[M].北京:中国电力出版社,2004.

- [2] 谢亮.输变电设备状态检修与可靠性管理的关联研究[C].2009年全国输变电设备状态检修技术交流研讨会论文集,2009:11-12.
- [3] 国家电网公司.输变电设施可靠性管理工作手册(第二版)[M].北京:中国电力出版社,2009.
- [4] 国家电网公司.输变电系统可靠性评价实施细则[M].北京:中国电力出版社,2009.

(收稿日期:2011-02-20)