

特高压交流输电线路中相绕击模拟试验研究

王羽, 文习山, 胡京, 黄瑞平, 陈虎, 段玉祥

(武汉大学电气工程学院, 湖北省武汉市 430072)

Simulation Test of Shielding Failure of UHVAC Transmission Line's Intermediate Phase

WANG Yu, WEN Xi-shan, HU Jing, HUANG Rui-ping, CHEN Hu, DUAN Yu-xiang

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China)

ABSTRACT: The spacing between the two ground wires of ZBS2 cup-tower used in UHVAC transmission line is large, so it is significant to research the thunder and lightning shielding properties of the intermediate phase. A lot of impulse discharge experiments are conducted by operation wave that can be more close to natural lightning, in these experiments the proportion of the size of experimental model to that of actual ZBS2 tower is 1:63, and the maximum height of the shielding failure of intermediate phase is obtained. It is known from the test results that after the post-conversion critical shielding failure current of the intermediate phase is lower than lightning withstand level, thus the correctness of calculation results from electrical geometrical model and leader propagation model respectively is validated. Test results also show that in transmission line using ZBS2 type of tower the shielding failure may happen in the intermediate phase, but it will not cause flashover.

KEY WORDS: UHVAC; ZBS2 type of tower; shielding failure of intermediate phase; simulation test; electrical geometrical model (EGM); leader propagation model (LPM)

摘要: 特高压交流输电线路 ZBS2 型酒杯塔的两地线间距大, 因此研究其中相雷电屏蔽性能十分必要。文章采用按 63 : 1 的比例缩小的线路模型, 考虑导线电压, 使用更能逼近自然雷电的操作波进行了大量的冲击放电试验, 得出了中相绕击的最大高度。根据文中的试验结果可知, 换算出的中相临界绕击电流小于耐雷水平, 验证了分别采用电气几何模型方法和先导模型方法得到的计算结果的正确性。试验结果还表明, ZBS2 型杆塔线路中相有绕击的可能性, 但不会导致闪络。

关键词: 特高压交流; ZBS2 型杆塔; 中相绕击; 模拟试验; 电气几何模型(EGM); 先导模型(LPM)

0 引言

国外特高压交流输电线路的运行情况表明, 雷直击导线是特高压输电线路跳闸的主要原因^[1]。我国 1000kV 输电线路 ZBS2 型酒杯塔塔高 68m, 对

边相采取负保护角的保护方式, 2 条避雷线的距离较大, 因此必须考虑中相导线屏蔽失效的可能性。

中相导线防直击雷的设计方法主要有电力行业规程方法、电气几何模型(electro geometrical model, EGM)方法、先导传播模型(leader propagation model, LPM)方法 3 种。我国电力行业相关规程认为绕击与雷电流大小无关, 与杆塔结构和地形地貌有关^[2]。基于击距概念建立的 EGM 基本属于几何模型, 但这种模型没有考虑雷电放电的随机性和分散性^[3]。Rizk 基于临界电晕半径概念对上行先导起始判据进行修正, 建立了适于分析复杂间隙结构的 LPM^[4-5]。文献[4-5]认为雷电最终的定位与被击物上产生的迎面先导密切相关, 首先产生迎面先导的物体即为雷击点, 并认为绕击与雷电流大小有明确的函数关系。

上述设计方法从某些方面反映了输电线路的实际运行情况, 但随着电网容量日益增大, 输电线路的电压等级日益提高, 各行各业对供电可靠性的要求越来越苛刻, 在原有历史条件下得出的相关理论是否适用新的情况仍需用试验验证。

国内外学者对雷电屏蔽性能的模拟试验方法进行过有益的尝试和讨论^[6-7], 这些试验方法中的雷电放电虽然不是严格意义上的物理模拟自然雷电, 但它们的放电规律存在一定的相似性, 可大量重复进行, 试验条件和参数的更改也较方便, 因此采用这种模拟试验方法可在较短的时间内得出一些屏蔽失效的规律和特征^[8-9]。国内也有科研人员按 150 : 1 的比例对缩小的双回路铁塔模型进行试验研究^[10], 并按 143 : 1 和 20 : 1 的比例对缩小的单回线路模型进行绕击试验研究^[11], 受条件限制, 试验中通过目测确定绕击概率的做法可能会使试验结果的误差较大。

本文以 ZBS2 型酒杯塔为例，按 63 : 1 的比例对缩小的线路模型进行试验研究，用 10 000 帧/s 的高速摄影仪记录放电现象，客观真实地判断雷击避雷线还是雷击导线，并通过整理试验数据得出中相绕击的最大高度，利用 IEEE 标准的击距经验公式^[1]计算中相临界绕击电流，并对采用规程法、EGM 方法、LPM 方法得到的结论进行验证。

1 试验设备的选取和试验方法

1.1 试验设备的选取

1.1.1 模拟雷电的冲击电压的选取

雷电是一个梯级发展过程，自然界中的雷电下行先导从逼近地面到发生跃变的时间与操作波的波头时间接近，且在地面产生的电场与使用操作波产生的电场相似。试验中选取的操作波更能逼近自然雷电，其放电随机性也更接近自然雷电^[1]，因此选取波头时间为 250 μs 、波尾时间为 2 500 μs 的标准操作波冲击电压，其幅值大约为每次试验的空间间隙的临界击穿电压，并采用 2 种极性进行对比。

1.1.2 上电极的选用

下行先导作用下的空间电场分布与上电极为长棒、下面为接地铁板时的空间电场分布相似^[1]。因此本文用长度为 70 cm、直径为 10 mm、头部圆锥体顶角为 30°的钢棒来模拟雷电的下行先导。

1.1.3 高速摄影仪

高速摄影仪由计算机控制，置于屏蔽室中。为保证冲击放电所产生的强大电磁干扰不会损坏设备，高速摄影仪由不间断电源供电。

1.2 试验对象

本次试验中，试验对象为按照几何尺寸缩小的单档距的输电线路模型，选用的铁塔模型为 ZBS2 型酒杯塔，按 63 : 1 的比例缩小，其缩小的 ZBS2 杆塔试验模型见图 1。

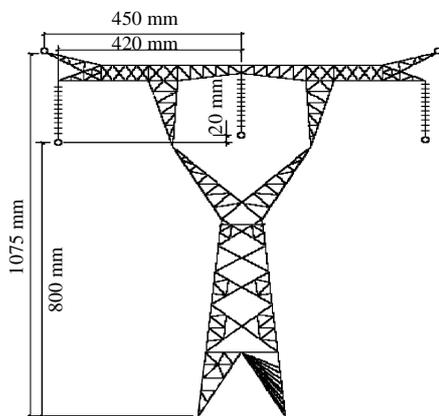


图 1 ZBS2 杆塔试验模型
Fig. 1 ZBS2 tower model for test

试验中的线路用绝缘子是用环氧树脂板模拟的，根据其实际长度(12 m)按照相应比例缩小。考虑到避雷线和导线电阻率、等效半径等之间存在差异，选用直径为 1 mm 的裸铁丝作避雷线，选用直径为 2 mm 的铜丝作导线。

1.3 基本试验方法

1.3.1 试验中某落雷点概率的确定方法

在电极尖端的每个位置都施加此状态下临界冲击击穿放电电压，共放电 50 次，分别记录击中避雷线、输电导线和大地的次数并将其折算成百分数。当击中中相输电导线的概率为 0 时，此位置为绕击最大高度。

1.3.2 试验中电极尖端的空间定位方法

试验中电极尖端位置的定义方法见图 2。图中： x 轴位于地平面上，与输电导线垂直；表示电极尖端落雷高度的 y 轴垂直穿过中相导线(杆塔的中轴线)；电极沿 y 轴上下移动，电极尖端坐标 $x=0$ 。

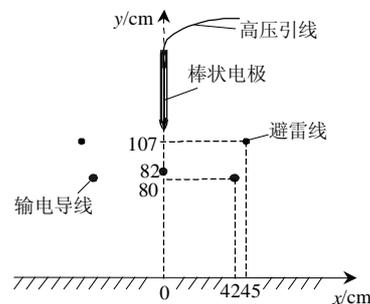


图 2 试验中的空间距离分布及电极尖端定位示意图

Fig. 2 A sketch map of space configuration and the position of electrode tip in the test

1.3.3 试验接线图

实际正常运行中的输电导线上施加有运行电压，为研究输电导线上的电位对其引雷能力的影响，本文采取中相导线加压和不加压 2 种运行方式进行对比分析。

输电导线中相绕击试验接线示意图见图 3。图中 K_1 和 K_2 为控制开关。线路中限流保护电阻为 3 M Ω 左右的水阻，高压滤波电容由 3 个 0.35 μF 的电容并联构成，避雷线和各杆塔直接接地。控制开关 K_1 、 K_2 模拟导线加压和不加压 2 种运行方式。

断开 K_1 并闭合 K_2 ，三相导线通过一个 300 Ω 的电阻接地，以模拟导线不加压的运行方式，上述电阻用于模拟实际输电导线的波阻抗。

断开 K_1 并闭合 K_2 ，在试验侧的输电导线中相叠加与操作波极性相反的幅值为 13 kV 的直流电压，以模拟导线加压的运行方式。需要说明的是，由于试验模型为按照 63 : 1 的比例缩小的交流

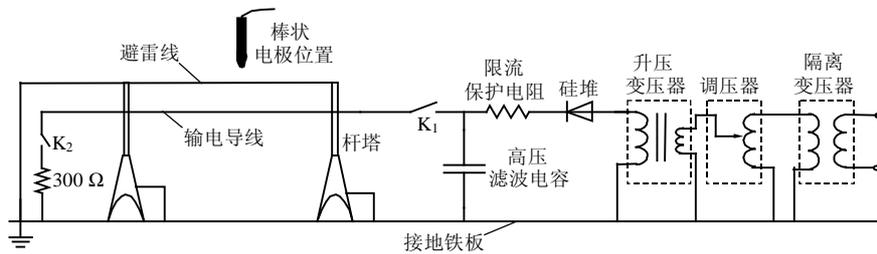


图 3 试验接线示意图

Fig. 3 A sketch map of experimental circuit

1000 kV 输电线路杆塔，为模拟实际运行中最严重的情况，按 63 : 1 的比例对 1000kV 输电线路的相电压幅值进行折算，折算后的电压为 $1000\sqrt{2} / (63\sqrt{3})$ kV，其值约为 13 kV，故在试验侧的输电导线中相施加幅值为 13 kV 的直流电压。

所叠加的直流电压极性与操作波极性相反，以模拟落雷时输电导线表面上行迎面先导最易发展的状态，同时改变硅堆的方向即可改变所叠加直流电压的极性。

2 试验结果与分析

垂直移动电极位置，每个高度均放电 50 次，整理后的试验数据见表 1。表中的最大绕击电流是根据 $r_s = 10I^{0.65}$ [12] 计算出的，其中 r_s 为击距(单位为 m)， I 为雷电流幅值(单位为 kA)。

表 1 试验数据
Tab. 1 Experimental data

冲击电压极性	中相导线加压方式	放电电压峰值/kV	绕击最大高度/cm	计算出的最大绕击电流/kA
正极性	不加压	428	150	9.4
	加-13 kV	419	152	9.8
负极性	不加压	790	140	7.3
	加+13 kV	780	147	8.7

由表 1 可知，用正极性先导尖放电得到的最大绕击电流大于负极性先导尖放电得到的最大绕击电流。为使结果更严格，选取正极性放电条件下的最大绕击电流(9.8kA)。由于本文的试验模型是按相应比例缩小得到的且试验是在空气中完成的，空气介质参数无法按比例缩小，所以试验所得的最大绕击电流将比实际运行线路的最大绕击电流偏大。因此，实际特高压 ZBS2 型杆塔线路的最大绕击电流将小于 9.8kA。

雷绕击导线时，耐雷水平 I_0 (单位为 kA) 的计算公式为

$$I_0 = 2U_{50\%} / Z \quad (1)$$

式中： $U_{50\%}$ 为绝缘子串 50% 正极性冲击放电电压，取值为 4847kV； Z 为导线波阻抗，取值为 250Ω。根据式(1)计算出的上述试验条件下的耐雷水平为

38.8kA。

由上述计算结果还可知：耐雷水平高于绕击最大电流(9.8kA)，这说明中相有绕击的可能性，但不会导致闪络；在中相导线加压和不加压 2 种运行方式下，雷击瞬间输电导线上所处的电压对引雷影响很大，与雷电相反极性的电压会加强中相导线引雷的能力。

3 理论计算与分析

下文根据中相导线防直击雷的设计方法对 ZBS2 型杆塔屏蔽效果进行理论计算。

(1) 采用规程法进行理论计算。

目前文献[2]对 2 条避雷线之间的保护范围作了规定。2 根等高平行避雷线间保护范围上部边缘最低点的高度 h_0 的计算公式为

$$h_0 = h - D / 4P \quad (2)$$

式中： h_0 为 2 根避雷线间保护范围上部边缘最低点的高度，m； D 为 2 根避雷线间的距离，m； h 为避雷线的高度，m； P 为高度影响系数， $h \leq 30$ m 时 $P=1$ ， $30\text{m} < h \leq 120\text{m}$ 时 $P = 5.5/\sqrt{h}$ 。

采用该方法对 ZBS2 型酒杯塔进行雷直击中相的可能性进行计算，结果见表 2。由表 2 可知，中相导线实际高度超过了避雷线的保护范围，这说明 ZBS2 酒杯塔屏蔽效果不良，但该方法没有雷电流的信息，故屏蔽失效是否能引起线路绝缘闪络跳闸还不确定。

表 2 采用规程法得到的计算结果

Tab. 2 Calculated results by regular method

塔型	中相导线实际高度/m	h_0 /m	屏蔽效果
ZBS2	55	46.4	不良

(2) 采用 EGM 方法进行理论计算。

在 EGM 方法中，线路和地面有各自相应的击距，雷电先导先到达哪一物体的击距范围即向该物体放电。击距大小与先导头部电位有关，而先导头部电位又和主放电电流有关，因此认为击距是雷电流幅值的函数。本文根据击距 r_s 和雷电流幅值 I 的

关系^[12]进行计算, 即

$$r_s = 10I^{0.65} \quad (3)$$

同时, 雷电流对地面击距与对导线击距的比例系数 b 取 0.67。

(3) 采用先导法进行理论计算。

计算中设定先导为圆锥状, 底部为半球型, 雷云高度为 2.5km, 先导示意图如图 4 所示, 其中 r 为先导半径。

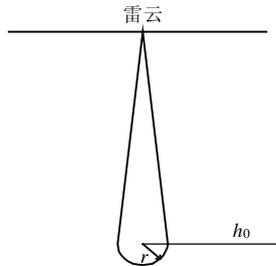


图 4 先导示意图

Fig. 4 A sketch map of leader

整个先导通道中的电荷总量 Q (单位为 C)与雷电流幅值 I (单位为 kA)的关系为

$$Q = 76 I^{0.68} / 1000 \quad (4)$$

设先导头部电荷为总电荷的 2%。在雷电流幅值为 5~31kA、高度为 10~50 m 的范围内, 吸引半径 D_a (单位为 m)和雷电流幅值 I (单位为 kA)、高度 h (单位为 m)的关系为

$$D_a(I, h) = 1.57I^{0.69}h^{0.45} \quad (5)$$

仿真中, 将雷电先导发展过程分为 3 个阶段:

①先导从雷云中生成, 垂直地面向下发展。②在下行先导发展过程中, 避雷线或导线上会感应出异性电荷, 当避雷线或导线表面电场强度大于临界电场强度时, 避雷线或导线上会产生上行先导, 下行先导不再垂直于地面, 而是转向产生上行先导的导体。③当先导与某一导体(某相输电线路或者避雷线)之间的平均场强大于 500 kV/m 时, 认为雷击发生; 当先导与地面之间的平均场强大于 750 kV/m 时, 认为雷电击中大地。

分别采用本文试验方法、EGM 方法和 LPM 方法对 ZBS2 型酒杯塔雷直击中相的可能性进行计算, 结果见表 3。

表 3 采用本文方法、EGM 法和 LPM 法得到的计算结果
Tab. 3 Calculated results by EGM, LPM and the proposed method

方法	最大绕击电流/kA	绕击可能性	闪络概率
EGM	9.9	有	0
LPM	18	有	0
本文	32.3	有	0

另外, 规程法的工程运行结果也表明 ZBS2 酒杯塔的屏蔽效果不良^[13], 采用 EGM 方法和先导法得到的计算结果均表明 ZBS2 型杆塔线路中相有绕击的可能性, 但不会导致闪络。因此可以得出, 本文的试验结论和采用中相导线防直击雷设计方法得到的计算结果一致。

4 结论

(1) ZBS2 塔型 1000kV 输电线路中相有绕击的可能性, 但不会导致闪络。

(2) 用正极性先导尖放电得到的最大绕击电流大于负极性先导尖放电得到的最大绕击电流。

(3) 导线上与雷电极性相反的电压会使导线引雷能力明显增强。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [2] DL/T 620-1997, 交流电气装置的过电压保护和绝缘配[S].
- [3] 钱冠军, 王晓瑜, 徐先芝, 等. 输电线路绕击分散性的试验研究[J]. 高电压技术, 1998, 24(3): 17-20.
Qian Guanjun, Wang Xiaoyu, Xu Xianzhi, et al. Study of scatter of shielding failure on transmission line[J]. High Voltage Engineering, 1998, 24(3): 17-20(in Chinese).
- [4] Rizk F A M. A model for switching impulse leader inception and breakdown of long air gap[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 596-603.
- [5] Rizk F A M. Modeling of transmission line exposure to direct lightning stroke[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(4): 1983-1997.
- [6] 马宏达. 避雷针保护范围的模拟试验理论与争议[J]. 工物物理, 1998, (副刊): 16-23.
Ma Hongda. The modeling experimental theory and contention about the protection zone of lightning rod[J]. Engineering and Physics, 1998, (S1): 16-23(in Chinese).
- [7] 詹花茂, 林福昌, 王晓瑜, 等. 输电线路雷电屏蔽若干问题及雷击仿真模型[J]. 华中理工大学学报, 2000, 28(6): 53-55.
Zhan Huamao, Lin Fuchang, Wang Xiaoyu, et al. Lightning shielding of transmission line and lightning stroke simulation[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2000, 28(6): 53-55(in Chinese).
- [8] 钱冠军, 王晓瑜, 汪雁, 等. 输电线路雷击仿真模型[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(8): 39-44.
Qian Guanjun, Wang Xiaoyu, Wang Yan, et al. Lightning simulation model of transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(8): 39-44(in Chinese).
- [9] 张志劲, 司马文霞, 蒋兴良. 超/特高压输电线路雷击绕击性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 1-6.
Zhang Zhijin, Sima Wenxia, Jiang Xingliang. Study the lightning protection performance of shielding failure for UHV&EHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 1-6(in Chinese).

(下转第 8 页 continued on page 8)