

地线绝缘化对超高压线路耐雷性能研究

直流融冰是解决架空输电线路导线覆冰的有效措施,地线绝缘化是地线能够进行直流融冰的前提条件。以500 kV超高压线路地线绝缘化为例,利用EMTP仿真软件对地线间隙击穿与雷电流幅值的相关性进行了分析,得出绝缘化地线对超高压输电线路耐雷性能影响不大的结论。这对于运行全线绝缘化地线,防止输电线路雷击闪络、杆塔分流系数、故障塔电位上升及电力网络经济和合理设计等研究具有一定的参考价值。

马御棠^{1,2} 陈奎³ 马仪¹ 王磊¹ 曹晓斌³/1.云南电力试验研究院(集团)有限公司电力研究院 2.云南电网公司技术分公司 3.西南交通大学电气工程学院

0 引言

近年来,极端天气导致高寒地区输电线路覆冰严重,线路覆冰后由于线路荷载过重、不均匀脱冰和覆冰导线舞动等会造成输电线路倒杆、断线事故^[1-2]。当架空地线上的覆冰达到一定程度后,会造成弧垂不足对线路放电、杆塔荷载不够导致地线支架受损、地线断股断线等情况发生,危及电力系统的正常运行^[3-4]。输电线路融冰是应对电网大面积覆冰的有效措施。直流融冰在南方电网取得了较好的效果,得到了广泛应用^[5-6]。地线因为直接接地,无法直接进行直流融冰。为了能使地线能够进行直流融冰,对架空地线进行绝缘化改造或绝缘化设计以满足直流融冰的需要^[7]。绝缘地线既要满足直流融冰时对地不放电,又要满足正常运行时感应过电压不击穿,同时还不能对输电线路的耐雷水平产生较大影响。为了探讨绝缘地线架设对输电线路耐雷影响,需要深入研究绝缘地线间隙击穿特性^[8]。

国内学者对绝缘化输电线路地线问题进行了大量的研究。早期的研究主要集中在超高压输电线路绝缘地线间隙取值大小的问题^[9],近年来主要集中在输电线路正常和短路故障时地线的损耗^[10]及感应电压^[11]的研究。针对绝缘地线架设对输电线路耐雷水平的研究较少。

高压架空输电线路一般都长达几十至几百千米,所用杆塔数目较多,杆塔和绝缘地线构成的网孔结构复杂。本方案选用基于相分量原理的电磁暂态分析程序ATP-EMTP进行仿真计算,利用其图形预处理程序ATPDraw建立实际线路计算模型,进行融冰绝缘地线间隙击穿与雷电流幅值相关性的研究。相关结论可为工程设计和相关技术规范提供参考。

1 绝缘地线模型

1.1 地线绝缘子结构

地线绝缘子结构示意图如图1所示,型号为FXBZW $\pm$ 2S/120B。额定电压为 ± 25 kV,结构高度为580 mm,绝缘距离为339 mm,空气间隙为120 mm,最小公称爬电距离1 100 mm。

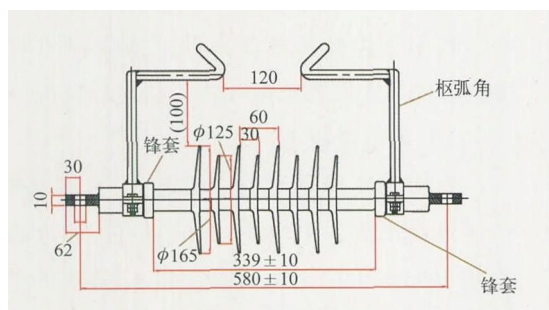


图1 直流耐张地线复合绝缘子

关键词/Keywords

直流融冰·
绝缘地线·
间隙击穿·
雷电流·
耐雷性能·
EMTP·

1.2 雷击绝缘地线模型

南方电网为了利用直流对架空地线融冰,对输电线路地线进行了全线绝缘化架设,绝缘间隙达到了120 mm。输电线路正常和短路时,地线感应电压较小,不能使绝缘间隙击穿。当发生雷击故障时,雷电流将击穿绝缘地线间隙,并经杆塔和绝缘地线流回大地。雷击绝缘地线模型如图2所示。

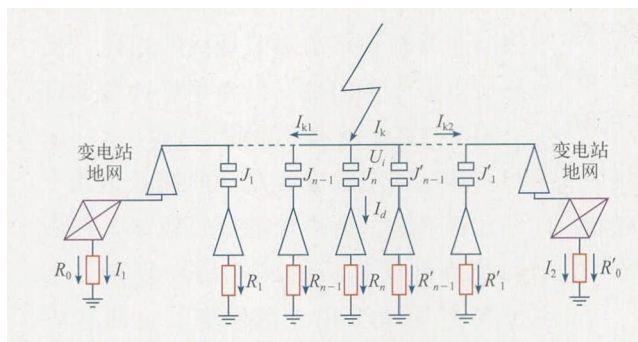


图2 雷击绝缘地线模型

图2中 J_i 、 J'_i 为对应杆塔的绝缘地线间隙; R_0 、 R'_0 为变电站地网电阻; R_i 、 R'_i 为杆塔接地电阻; U_i 为对应间隙感应电压(其中 $i=1,2,3,\dots,n$); I_k 为雷击点的全部雷击电流; I_{k1} 、 I_{k2} 为两边绝缘地线分配的雷电流; I_d 为流经击穿绝缘地线间隙杆塔的雷击电流; I_1 、 I_2 为流经地线返回变电站地网的雷电流。

2 输电线路建模

(1) 绝缘子闪络模型

雷击杆塔或避雷线时,当绝缘地线间隙两端电压超过雷电冲击耐受电压,绝缘地线间隙就发生击穿。绝缘地线经过杆塔接地。在ATP-EMTP中,利用压控开关模型来模拟绝缘间隙的闪络过程。仿真中选取的雷电冲击闪络电压为83.4 kV。

(2) 雷电流模型

雷电流波形呈现脉冲形式,其波头时间 t 在1~4 μs 范围内,平均在2.6 μs 左右,半峰值时间 t_2 在20~50 μs 范围内,一般取50 μs 。本文的雷电流波形为斜角波,雷电流的波头为2.6 μs 。波尾为50 μs ,雷电通道波阻抗为400 Ω 。

(3) 杆塔模型

雷电冲击波作用下的线路杆塔呈现的冲击阻抗直接影响到塔顶电位的计算。仿真计算中常使用的杆塔模型主要有电感模型和传输线波阻抗模型两种。在电感模型中,将塔身视为集中参数的电感。波阻抗模型将塔身视为分布参数,考虑了雷电波在塔身的波过程,波阻抗模型是比较合理的杆塔模型。文献[12]建议杆塔波阻抗取为150 Ω 。

(4) 线路模型

输电线路采用双绝缘地线。由于雷电流波形中含有大量谐波,而线路的参数随频率变化而变化。不同频率的谐波分量在线路中传播时的衰减和畸变各不相同,因此本方案输电线路模型中的传输线采用频率相关模型。ATP-EMTP软件提供LCC(LINE CONSTANTS, CABLE CONSTANTS or CABLEPARAMETERS)模型来模拟架空线路、单芯电缆和包围管道的参数。在ATP-EMTP中选择了J.marti频率相关分布参数线路模型来搭建输电线路。

3 实际线路绝缘地线击穿电压的分析

3.1 线路计算条件

南方电网某超高压输电线路为了利用直流直接融冰,架空地线进行了全线绝缘化设计。为降低架空地线上感应过电压及满足线路防雷需要,架空线路每隔30 km设置一个接地点,线路终端塔均设置接地点。线路仿真计算条件为:土壤电阻率200 $\Omega\cdot\text{m}$,变电站接地网等效电阻0.5 Ω ,每档线路档距为300 m,线路铁塔等效接地电阻15 Ω ,杆塔高度取值为45 m,仿真步长取为5 ns。本文进行了雷击绝缘地线档距中央和塔顶时融冰绝缘地线间隙击穿与雷电流幅值的相关性的研究。

3.2 雷击绝缘地线档距中央

将图2雷击绝缘地线模型进行阻抗等效后的雷击绝缘地线中央等效电路如图3所示。 U_1 、 U_2 分别为最先击穿、随后击穿两基杆塔间隙的击穿电压。

当雷击绝缘地线档距中央且雷电流为384 A时,距雷击点相邻的2基杆塔绝缘地线间隙击穿。雷击

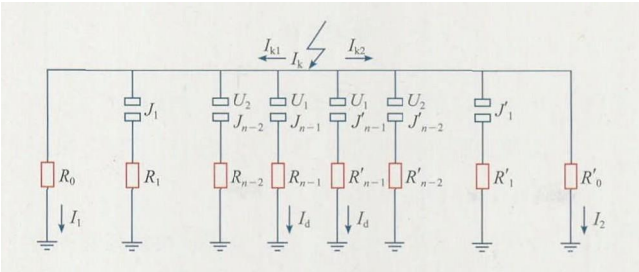


图3 雷击绝缘地线中央等效电路

点相邻基杆塔绝缘地线间隙由于电压较低，未发生击穿。雷击点相邻侧2基杆塔绝缘间隙在384 A时击穿电压如图4所示。

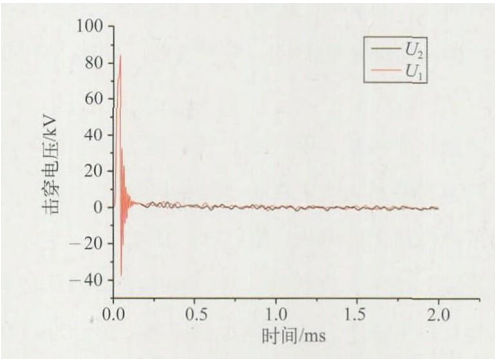


图4 $I_k=384\text{ A}$ 间隙击穿电压

继续增加雷电流，当雷电流达到4 668 A时，距雷击点相邻的4基杆塔绝缘地线间隙击穿。雷击点左侧2基杆塔绝缘间隙在4 668 A时击穿电压如图5所示。

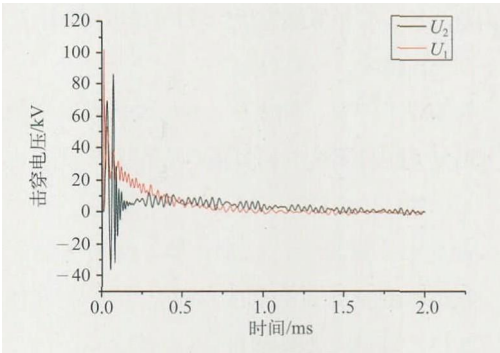


图5 $I_k=4\,668\text{ A}$ 间隙击穿电压

当雷电流达到8 000 A时，距雷击点相邻的8基杆塔绝缘地线间隙击穿。雷击点左侧4基杆塔绝缘间隙在8 000 A时击穿电压如图6所示。

绝缘地线间隙击穿后，雷击点两侧对应杆塔间隙击穿电压波形相同。发生杆塔绝缘间隙击穿的电压波形都有大于击穿电压83.4 kV的值。统计绝缘间隙击穿个数随雷电流幅值变化情况如表1所示。

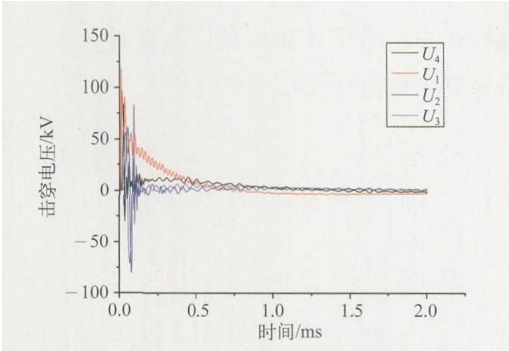


图6 $I_k=8\,000\text{ A}$ 间隙击穿电压

表1 绝缘间隙击穿个数

雷电流幅值/kA	1	2	3	4	5	6	7	8
间隙击穿塔个数	2	2	2	2	4	4	4	8

3.3 雷击塔顶

将图1雷击输电线路模型进行阻抗等效后的雷击塔顶等效电路如图7所示。 U_i 为杆塔间隙的击穿电压。

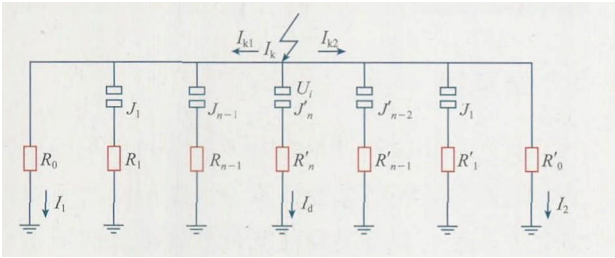


图7 雷击塔顶等效电路

雷击塔顶时，当雷电流441 A时，雷击点所在杆塔的绝缘地线间隙发生击穿，而相邻基杆塔绝缘地线间隙由于电压较低，未发生击穿。雷击点杆塔绝缘间隙在441 A时击穿电压如图8所示。

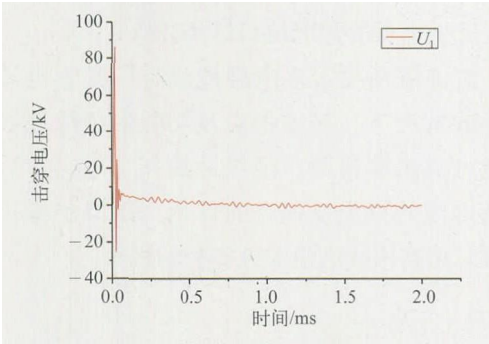


图8 $I_k=441\text{ A}$ 间隙击穿电压

继续增加雷电流，当雷电流达到4 300 A时，雷击点所在杆塔及雷击点相邻的2基杆塔绝缘地线

间隙均击穿。雷击点和相邻侧绝缘间隙在4 300 A时击穿电压如图9所示。

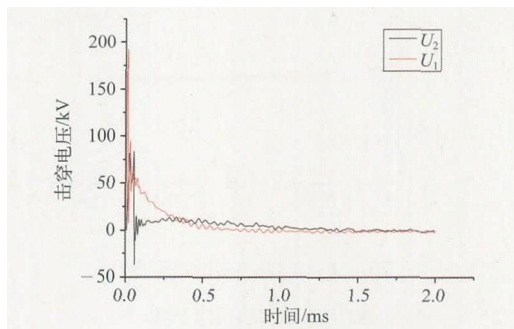


图9 雷电流幅值为4 300 A击穿电压

雷击塔顶时，绝缘间隙击穿后，雷击点两侧对应杆塔间隙击穿电压波形相同。统计绝缘间隙击穿个数随雷电流幅值变化情况如表2所示。

表2 绝缘间隙击穿个数

雷电流幅值/kA	1	2	3	4	5	6	7	8
间隙击穿塔个数	1	1	1	1	3	3	3	3

4 结束语

本文采用ATP-EMTP仿真软件可以准确、简单地根据实际线路参数计算出绝缘地线的间隙击穿个数，进一步可得到任意位置处绝缘间隙击穿的电压波形，由仿真结果可以得出以下结论：

1) 随着雷电流幅值增大，击穿绝缘间隙杆塔数目增加，杆塔分流增大。

2) 地线绝缘化的超高压线路雷击塔顶时杆塔的绝缘地线间隙发生击穿的雷电流幅值为441 A，雷击绝缘地线档距中央时，杆塔的绝缘地线间隙开始发生击穿的雷电流幅值为384 A。

雷击塔顶或雷击绝缘地线时，在雷电流幅值较小的情况下，与雷击点及相邻的绝缘地线间隙均能可靠击穿接地。绝缘地线在雷电击穿后能起到避雷线的分流及耦合的作用，所以绝缘化架设地线对超高压线路防雷性能影响较小。

参考文献

- [1] 孙才新, 蒋兴良, 熊启新, 等. 导线覆冰及其干湿增长临界条件分析 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (3): 141-145.
- [2] 李庆峰, 范峰, 吴穹, 等. 全国输电线路覆冰情况调研及事故分析 [J]. 电网技术, 2008, 32 (9): 33-36.
- [3] 蒋兴良, 易辉. 输电线路覆冰及防护 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [4] 黄新波, 刘家兵, 蔡伟, 等. 电力架空线路覆冰雪的国内外研究现状 [J]. 电网技术, 2008, 32 (4): 23-28.
- [5] 侯慧, 尹项根, 陈庆前, 等. 南方部分500 kV主网架2008年冰雪灾害中受损分析与思考 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (11): 12-15.
- [6] 傅闯, 饶宏, 许树楷, 等. 输电线路融冰技术研究与应用评述 [J]. 南方电网技术, 2012, 6 (3): 33-37.
- [7] 陈义刚, 范松海. 架空地线的绝缘化改造及融冰方法 [J]. 四川电力技术, 2012, 35 (3): 74-76.
- [8] 吴伯华, 张孝军, 方瑜. 超高压线路绝缘地线的研究 [J]. 中国电力, 1997, 30 (3): 11-12.
- [9] 赵仁栋. 对绝缘避雷线空气间隙大小的看法 [J]. 高电压技术, 1982 (3).
- [10] 蒋陶宁, 李军, 孙成秋, 等. 交流特高压输电线路复杂地线系统单相短路电流的计算 [J]. 电网技术, 2011, 35 (10): 16-21.
- [11] 宋立军, 蒋陶宁, 邹军, 等. 特高压交流输电线路地线绝缘间隙电压的研究 [J]. 电网技术, 2013, 37 (3): 686-691.
- [12] 匡洪海, 肖伸平. 500 kV变电站雷击保护的建模分析 [J]. 高压电器, 2008, 44 (5): 409-412.

(收稿日期: 2015-12-08) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告