

考虑电晕损耗的特高压直流输电线路雷击特性分析

刘守豹, 张星海, 雷 潇, 廖文龙, 刘 强

(国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 某特高压直流线路冲击电晕是雷击导线时产生的一种现场, 对特高压直流线路的雷击电晕问题还未见报道。以雷击故障为契机, 开展了考虑电晕损耗的特高压直流线路雷击特性分析。基于导线伏库特性计算得到了冲击电晕作用下特高压直流线路的动态电容; 同时基于电磁暂态分析软件 ATP-EMTP 建立了考虑冲击电晕损耗的线路模型, 对考虑电晕损耗前后特高压直流线路雷电波传播特性进行了对比, 且对特高压直流线路雷击电晕损耗的影响因素进行了分析。所得结论对开展特高压直流线路防雷工作具有重要参考意义。

关键词: 雷击; 伏库特性; 特高压直流; 电晕损耗; 电磁暂态; ATP-EMTP

Abstract: The impulse corona happens when lightning strikes a conductor, but the corona caused by lightning strikes of UHVDC transmission lines has not been reported. Taking a lightning failure of one UHVDC line as the opportunity, the analysis on lightning performance of UHVDC transmission line considering corona loss is carried out. The dynamic capacity of UHVDC transmission line obtained under impulse corona is calculated based on the V-Q characteristics, and the line model considering impulse corona losses is established by the electromagnetic transient analysis software ATP-EMTP. The lightning wave propagation characteristics of UHVDC transmission line are compared by the line models with and without corona losses. The influencing factors of corona losses caused by lightning strikes in UHVDC transmission line are analyzed. The conclusion is of an important significance for UHVDC line protection against lightning.

Key words: lightning strike; impulse corona characteristics; UHVDC; corona loss; electromagnetic transient; ATP-EMTP

中图分类号: TM863 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)01-0055-03

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.01.012

0 引言

架空输电线路由于运行在空旷的野外, 常常受到雷电直击, 线路雷击严重威胁电力系统的安全稳定运行^[1-3]。高压导线在遭受雷击后将会出现瞬时高电位, 导线表面场强将远超过起晕场强, 造成雷电冲击电压的电晕损耗, 加速雷电波沿线路传播时的衰减^[4-6]。

当前, 研究线路雷击电磁暂态过程通常使用如 ATP-EMTP、EMTP-RV 等计算软件, 这些软件或者没有电晕模型, 或者电晕模型较为简单, 均不能很好地模拟导线电压对雷电波传播特性的影响^[7]。在不考虑导线雷击电晕的情况下, 导线过电压幅值较真实情况严重^[8]。对于特高压直流线路, 其导线分裂数、分裂导线间距、导线空间几何位置与交流输电线路有较大不同, 研究者还未对其开展雷电冲击电晕损耗的研究。

2016年8月2日, 某特高压直流线路发生雷击故障, 导致单极闭锁。故障发生之后, 对导致故障的各种因素进行分析, 其中90号杆塔导线遭受雷击后引起30号杆塔间隙击穿这一可能性引起了关注(90号杆塔与30号杆塔相距37 km)。为了对雷击特高压直流线路的电磁暂态特性进行分析, 开展了考虑电晕损耗的特高压直流输电线路雷击特性分析工作。

1 导线冲击电晕的伏库特性

研究冲击电晕的基本理论为导线伏库特性^[9-10], 典型的电晕伏库特性曲线如图1所示, 曲线呈现回环形, 回环面积的大小与电晕产生空间电荷引起的能量耗散成比例。

OA段对应于电压 U 小于电晕起始电压 u_0 时的波头部分, 伏库特性呈直线, 其斜率等于导线的几何电容 C_0 , 即 $C_0 = q/u_0$ 。

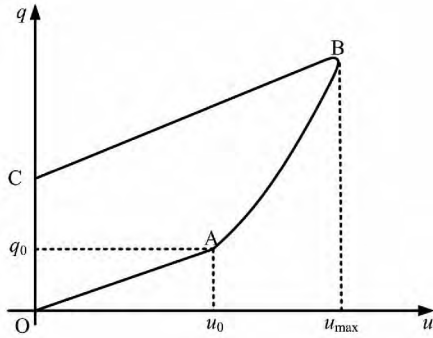


图1 冲击电晕的伏库特性曲线

AB段对应于 $u \geq u_0$ 时的波头部分电晕发展阶段。强烈的游离随着电压增长,使导线周围聚集越来越多的同极性的空间电荷,因而伏库特性呈非线性上翘。空间电荷的存在形成径向导电性良好的电晕套。对电场来说,相当于导线半径增大,对地电容增加。此时,导线的电容是变化的,其动态电容 $C_d = dq/du > C_0$ 。但电晕套的轴向电导极小,电流几乎完全集中在导线里,因此可不考虑电晕对导线电感的影响。

BC段对应于冲击电晕过峰值后 $U < U_m$ (冲击波幅值) 时的波尾部分。由于冲击波的变化过程非常快,空间电荷还来不及复合和消散,只有导线上那一部分电荷随着电压下降而减少,因而波尾部分的伏库特性几乎和OA段平行,导线的对地电容等于或略大于几何电容,计算时通常假定仍等于 C_0 。

动态电容值计算公式为

$$C_d = \frac{dq}{du} = C_0 M (u/u_0)^{1/3} \quad (1)$$

式中: u 为导线瞬时电压; u_0 为线路电晕起始电压; M 为常数,正、负极性时分别取值 1.36 和 1.13。

2 基于 ATP - EMTP 的仿真模型

特高压直流线路导线及地线的空间排列对应的杆塔类型为 ZC27101,导线类型为 $6 \times \text{ACSR} - 720/50$,导线分裂间距为 450 mm,导线等效外径为 36.24 mm,导线直流电阻为 $0.03984 \Omega/\text{km}$ 。地线类型为 LBGJ - 180 - 20AC,地线等效外径为 17.5 mm,直流电阻为 $0.7098 \Omega/\text{km}$ 。

导线的电晕起始场强可由皮克公式计算得

$$E_0 = 30m\delta \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{r\delta}} \right) \quad (2)$$

式中: r 为导线半径; δ 为空间密度系数 $\delta = 1$; m 为

导线表面粗糙系数,对于绞线 $m = 0.82$ 。通过计算得到所研究导线起晕场强为 26.9076 kV/cm 。

分裂导线的电晕起始电压为

$$U_0 = E_0 n r \ln \left(\frac{2h}{r_{eq}} \right) \left[1 + \frac{(n-1)r}{A} \right]^{-1} \quad (3)$$

式中: n 为分裂导线数; E_0 为起晕场强; A 为分裂间距 $A = d / (2 \sin \pi/n)$; d 为相邻两根分裂导线的距离; 分裂导线等效半径 $r_{eq} = \sqrt[n]{nrA^{n-1}}$ 。计算得到特高压直流线路的电晕起始电压为 1319.2 kV 。

通过在有限元电磁场计算软件 ANSYS MAXWELL 中建立特高压直流线路的计算模型,如图 2 所示,得到特高压直流线路单侧导线的几何电容 $C_0 = 11.68 \text{ pF/m}$ 。

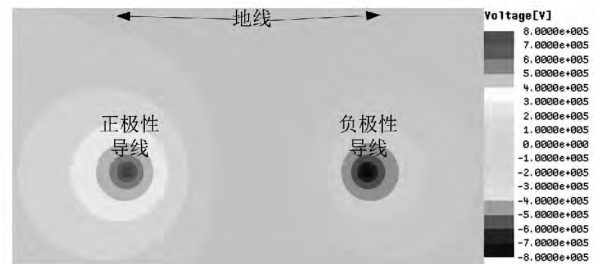


图2 特高压直流线路的有限元计算模型

由于实际发生的雷电地闪中 90% 以上为负极性雷电,因此仅对导线负极性电晕雷电进行分析,计算得到导线在不同电压下的动态电容值如表 1 所示。

表1 不同电压下特高压直流线路动态电容值

导线电压/kV	动态电容 C_d	动态电容/($\text{pF} \cdot \text{m}^{-1}$)
2 000	$1.29C_0$	15.16
3 000	$1.48C_0$	17.35
4 000	$1.63C_0$	19.10
5 000	$1.76C_0$	20.57

在电磁暂态分析软件 ATP - EMTP 中建立特高压直流线路的雷击电晕分析模型(一个子模块,长度 100 m)如图 3 所示,其中逻辑控制开关在探测到导线瞬时电位后决定是否投入动态电容,4 个开关分别在不同电压下投入电容,近似模拟伏库特性曲线中的动态电容。

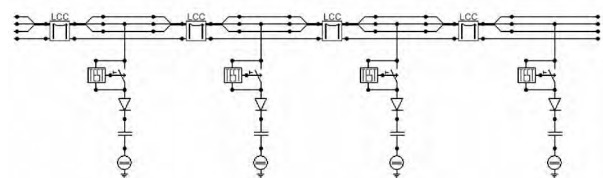


图3 考虑伏库特性的导线模型

3 考虑电晕损耗的特高压直流线路雷击特性

3.1 标准雷电波作用下的特性分析

使用 40 kA 的标准雷电电流波(2.6/50 μs) 绕击导线,分析普通导线模型和考虑电晕损耗模型下线路电磁暂态特征的区别。导线雷击点过电压波形比较如图 4 所示。

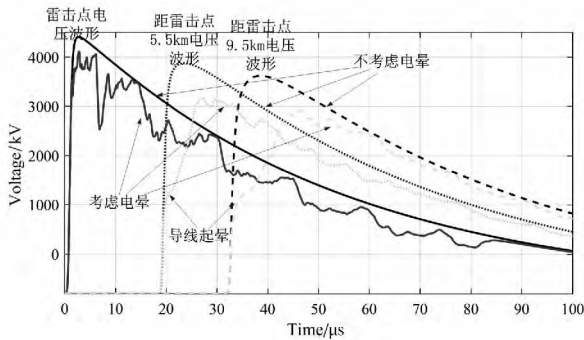


图 4 特高压直流线路雷击过电压波形

从图 4 可知,在未考虑冲击电晕损耗的情况下,雷击过电压在沿导线传播的过程中,波形陡度衰减较为缓慢;而在考虑电晕后,波形陡度衰减明显提高,陡度明显衰减发生在导线电压达到起晕电压后。不同观测点的过电压从出现到达到最大值所用时间如表 2 所示。从表 2 可知,在考虑冲击电晕的情况下,雷击导线过电压在传播过程中波头陡度呈现加速衰减的趋势。

表 2 考虑与不考虑冲击电晕情况下不同观测点过电压上升时间/μs

模型类别	雷击点	距雷击点 5.5 km	距雷击点 9.5 km
不考虑电晕	2.76	5.02	6.67
考虑电晕	2.81	8.66	14.77

从图 4 中还可以得知,考虑冲击电晕后导线上雷击过电压的幅值比未考虑冲击电压时衰减也更为显著。表 3 给出了不同模型不同观测点过电压幅值。从表 3 可知,当不考虑电晕损耗时,雷击过电压在传播 9.5 km 后的衰减为 17.9%,而考虑电晕损耗后的衰减为 28.7%。

表 3 考虑与不考虑冲击电晕情况下不同观测点过电压幅值/kV

模型类别	雷击点	距雷击点 5.5 km	距雷击点 9.5 km
不考虑电晕	4 407	3 874	3 619
考虑电晕	4 112	3 162	2 931

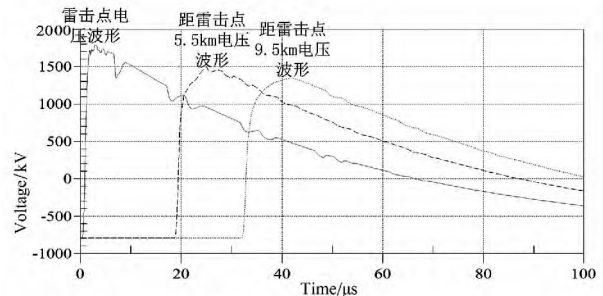
3.2 不同雷电波特征对电晕损耗的影响

对不同雷电电流幅值、不同雷电波头陡度情况

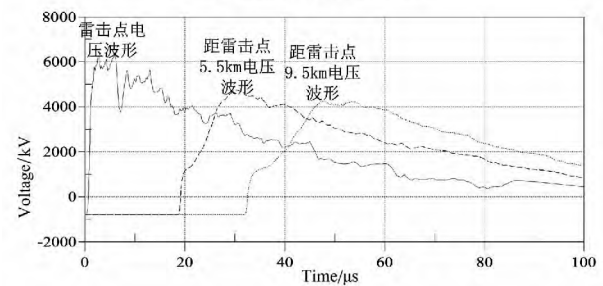
下的导线电晕损耗特性进行分析。

3.2.1 不同雷电电流幅值对电晕损耗的影响

采用标准雷电电流波形(2.6/50 μs),改变雷电电流幅值,不考虑绝缘击穿情况,得到不同雷电电流作用下的不同观测点过电压幅值如图 5 所示。



(a) 绕击雷电电流幅值 20 kA



(b) 绕击雷电电流幅值 60 kA

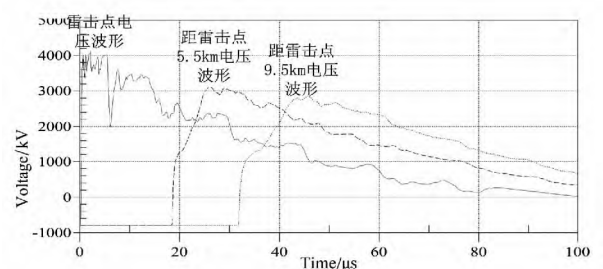
图 5 不同雷电电流绕击导线各观测点电压波形

从图 5 可知,随着绕击雷电电流幅值增加,雷电过电压在沿导线传播过程中的衰减将明显增加,波头陡度将加速变缓,幅值衰减比例也会增加。

3.2.2 雷电波波头时间对电晕损耗的影响

绕击雷电电流幅值为 40 kA 和总的波长时间 50 μs 不变,改变雷电波头时间时间分别为 1、5、10 μs,得到不同观测点的电压波形如图 6 所示。

从图 6 可知,雷电波上升越陡(波头时间越短),雷电过电压在沿导线传播过程中的陡度下降越明显(相比雷电波本身的陡度);雷电波波头时间越大,雷电波幅值在沿导线衰减的幅度将减小,但在 10 μs 波头雷电绕击时,雷电波经过 9.5 km 的传播,



(a) 雷电波波头时间 1 μs

(下转第 88 页)

参考文献

[1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.

[2] 朱韬析, 何方, 何焯勇, 等. 南方电网直流输电系统接地极线路不平衡保护动作后果探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 112-116.

[3] 余江, 周红阳, 黄佳胤. 接地极线路不平衡保护的相关问题研究[J]. 南方电网技术, 2008, 2(3): 26-29.

[4] 欧开健, 韩伟强, 黄立滨. 兴安直流接地极不平衡电流保护定值问题仿真试验研究[J]. 南方电网技术, 2008, 2(4): 98-100.

[5] 滕予非, 汤涌, 周波, 等. 基于高频电压突变量的特高压直流输电系统接地极引线故障监测方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 72-78.

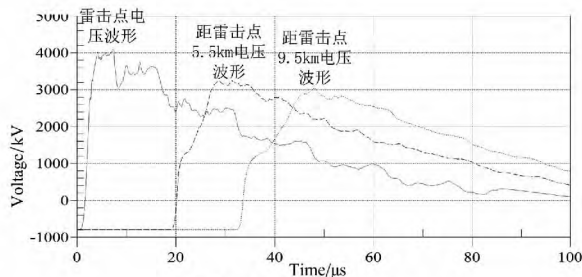
[6] 曾祥君, 张玺, 阳韬, 等. 高压直流输电系统接地极不平衡保护改进措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 132-136.

作者简介:

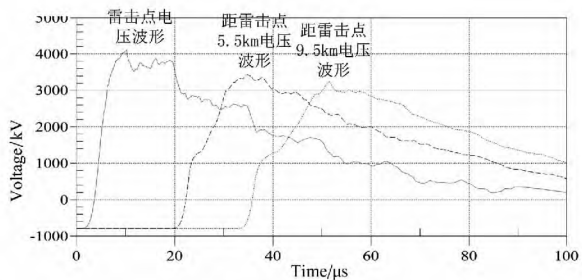
张纯(1985), 工程师, 研究方向为特高压直流输电;
滕予非(1984), 高级工程师, 研究方向为特高压直流输电。

(收稿日期: 2016-10-03)

(上接第57页)



(b) 雷电流波头时间 5 μs



(c) 雷电流波头时间 10 μs

图6 不同波头时间下各观测点电压波形

电压幅值依然衰减了21.6%。

4 结语

1) 仅仅从雷电波沿导线传播过程中的衰减看, 此次90号杆塔遭受雷电绕击导致30号杆塔绝缘击穿的可能性是极低的。

2) 从特高压直流线路雷电电晕损耗分析来看, 雷电流幅值越大、波头越陡其在传播过程中的衰减(上升时间和幅值)越显著。

3) 通过分析, 进一步证明了在输电线路雷电防护中专注易受雷击区段本身, 不过分放大雷电过电压影响范围的策略是正确的。

参考文献

[1] 王峰, 曾玉杰, 曾鹏, 等. 差异化防雷技术在湖南电网的应用[J]. 湖南电力, 2015, 35(1): 34-39.

[2] 赵紫辉, 吴广宁, 曹晓斌. 计及冲击电晕的输电线路雷电过电压影响因素研究[J]. 电瓷避雷器, 2013(2): 109-118.

[3] 赵远强, 吴慧芳. 输电线路“差异化”防雷治理的技术措施综述[J]. 山西电力, 2015(1): 41-45.

[4] 杨海龙, 李荷薇, 文艺, 等. 冲击电晕模型下的1000kV输电线路雷电过电压分析[J]. 电气技术, 2015(5): 6-11.

[5] 杨庆, 王荆, 陈林, 等. 计及冲击电晕的输电线路雷电绕击和反击智能识别方法[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1149-1157.

[6] 陈丛丛, 张小青. 雷电波的衰减与变形问题研究[J]. 中国电力, 2013, 46(12): 12-16.

[7] 敬海兵, 张彼德, 张俊, 等. 冲击电晕对1000kV交流输电线路耐雷水平的影响分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(2): 164-168.

[8] 杨鹏程, 徐涛, 叶奇明, 等. 导线雷电冲击电晕特性试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 164-170.

[9] 杨鹏程, 陈水明, 何金良, 等. 基于电晕笼的导线操作冲击电晕特性试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 165-173.

[10] 杨利彬. 考虑冲击电晕的输电线路耐雷性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.

作者简介:

刘守豹(1983), 博士、高级工程师, 从事电力系统电磁暂态分析及工程电磁场数值计算方面的工作。

(收稿日期: 2016-10-03)