

# 500 kV 交直流线路雷击特性比较研究

刘守豹<sup>1</sup> 李江陵<sup>2</sup> 王红梅<sup>3</sup> 许安<sup>1</sup> 崔涛<sup>1</sup> 刘强<sup>1</sup> 刘小江<sup>1</sup> 马小敏<sup>1</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072;

2. 国网乐山供电公司 四川 乐山 614000; 3. 国网四川省电力公司 四川 成都 610041)

**摘要:** 500 kV 交直流线路是当前电力输送的主要通道,雷击跳闸是500 kV 线路跳闸的主要原因。使用电磁暂态软件 ATP-EMTP 对500 kV 交直流线路的雷击机理进行仿真,通过对500 kV 线路反击和绕击特性的比较和研究,表明500 kV 交直流线路的雷击机理并无本质区别,500 kV 线路雷击跳闸以绕击为主的特征是由架空输电线路电气结构决定的。研究结论为500 kV 交流线路的防雷经验借鉴至±500 kV 直流线路提供了思路。

**关键词:** 反击; 绕击; 电磁暂态; ATP-EMTP

**Abstract:** 500 kV AC and DC transmission lines are the primary channel for power transmission, and the tripping fault caused by lightning stroke on 500 kV transmission line is the major reason for line tripping. The electromagnetic transient software ATP-EMTP is used for the mechanism analysis of lightning stroke. By comparing the characteristics of back flashover and shielding failure in 500 kV AC and DC transmission lines, it is shown that there is no essential difference in electrical characteristics of AC and DC lines and the electrical structure of overhead transmission line leads to the frequent shielding failures. The result provides the theoretical basis for applying the experiences of protection against lightning in 500 kV AC transmission line to 500 kV DC transmission line.

**Key words:** back flashover; shielding failure; electromagnetic transient; ATP-EMTP

中图分类号: TM863 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)05-0013-04

## 0 引言

随着国民经济的发展和电网规模的不断扩大,500 kV 交流或±500 kV 直流超高压成为长距离输电的主体,其运行状态决定了电网总体运行水平<sup>[1]</sup>。从运维情况看,±500 kV 直流线路的平均雷击跳闸率高于0.4次/(100 km·a),500 kV 交流线路的雷击跳闸率高于0.3次/(100 km·a),远超过设计值。雷击跳闸是中国超高压输电线路安全稳定运行面临的主要问题<sup>[2,3]</sup>。

相对而言,超高压交流线路的防雷技术研究较多,早期研究电力系统外过电压多正对交流线路<sup>[4]</sup>;超高压直流线路的防雷研究相对较少,防雷技术多处于探索中。通过比较两类超高压输电线路在雷击特性上的异同,可以将交流线路防雷的成功经验借鉴到直流线路的防雷中,丰富直流线路的防雷手段。

在电磁暂态软件 ATP-EMTP 中建交直流超高压

线路的雷击过电压仿真模型,获取反击和绕击时交直流线路的雷击特性。通过对超高压交直流线路雷击特性进行比较,分析两类输电技术在雷击特性上的异同,对直流线路防雷进行合理建议。

## 1 基于 ATP-EMTP 的仿真模型

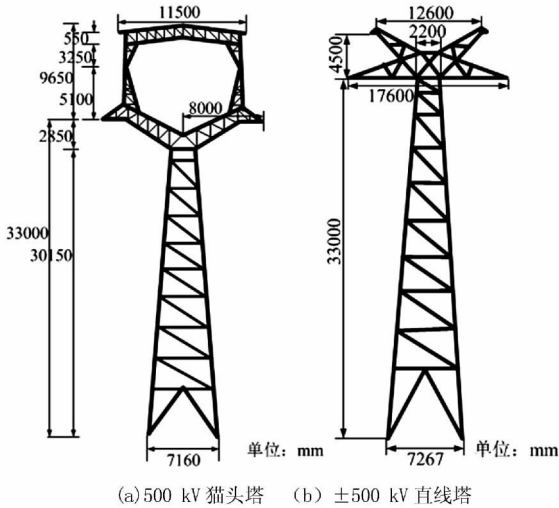
典型的超高压交直流线路杆塔模型如图1所示,由于所选两类杆塔的尺寸较为接近,使得对交直流线路雷击特性的研究具有较好可比性。

采用无损线路计算式对杆塔波阻抗<sup>[5]</sup>进行计算,在 ATP-EMTP<sup>[6]</sup>中建立杆塔模型如图2所示。

两种线路档距均为550 m,大地电阻率为100 Ω/m。交流导线型号为4×LGJ-300,分裂间距为45 cm,避雷线型号为GJ-80,绝缘子串构成为28片XP-160绝缘子;直流线路导线型号为4×ACSR-720/50,地线型号为GJX-100,绝缘子类型为6.8m FXBZ-±500/210复合绝缘子。采用 Darveniza 等人<sup>[7]</sup>提出的绝缘子串伏秒特

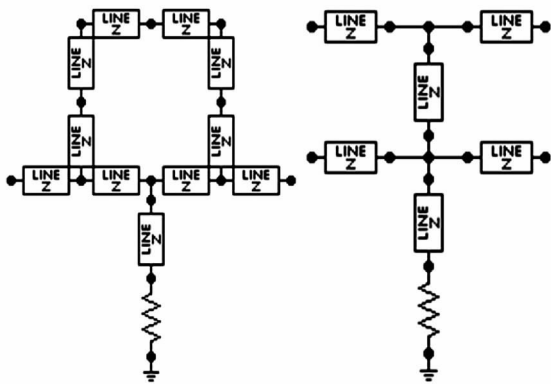
性描述式(1)作为交直流绝缘子闪络判断依据。

$$U_{s-t} = 400 \cdot l + 710 \cdot \frac{1}{l^{0.75}} \quad (1)$$



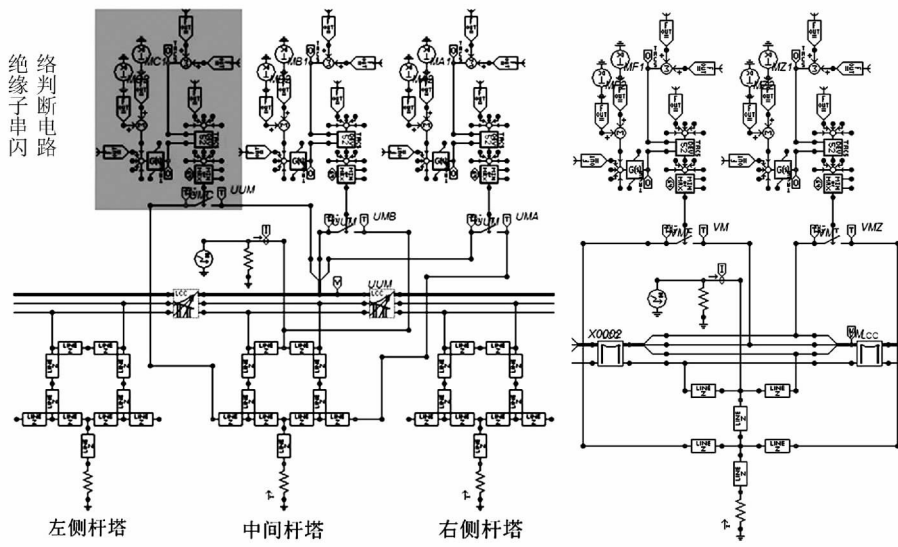
(a) 500 kV 猫头塔 (b) ±500 kV 直线塔

图1 典型超高压杆塔尺寸



(a) 猫头塔波阻抗模型 (b) 直线塔波阻抗模型

图2 典型超高压杆塔波阻抗模型



(a) 交流线路仿真模型

(b) 直流线路仿真模型

图3 超高压交直流线路仿真模型(局部)

式中  $U_{s-t}$  为绝缘子闪络电压, kV;  $l$  为绝缘子串长度, m;  $t$  为从雷击开始到闪络所经历的时间, s。

在 ATP-EMTP 中建立交直流线路的仿真模型如图3所示,其中所有杆塔的接地电阻设为  $8 \Omega$ 。

雷电流波形采用 IEC 1312-1 中推荐的  $2.6/50 \mu s$  波形,由于实际地闪中负极性雷电流占总地闪雷电流数的95%以上,这里只对负极性雷电流进行分析。

## 2 交直流线路雷电反击特性比较

改变中间杆塔接地电阻,比较交直流线路耐受反击雷电流的能力。交流线路的跳闸相受雷击时刻导线瞬时电压的影响,A相初始相角为  $0^\circ$  的情况下其先与其他两相反击闪络;由于直流线路导线电压恒定,正极线路绝缘子优先闪络。不同杆塔接地电阻时,交直流线路的最小反击雷电流变化情况如图4所示。

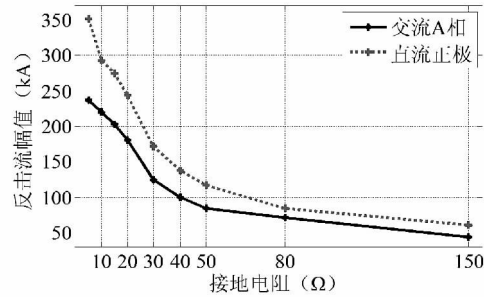


图4 中间杆塔接地电阻改变时线路反击耐雷水平

从图4可知,随着中间杆塔接地电阻不断升高,交直流线路的反击耐雷水平不断下降。由于直流线路的外绝缘水平比交流线路高,超高压直流线路能

够承受更大幅值的雷电流反击。

在交直流线路被击杆塔接地为电阻  $30\ \Omega$  ,直流线路被击杆塔接地电阻为  $50\ \Omega$  ,雷电流幅值为  $130\ \text{kA}$  的情况下 ,交直流线路均发生反击跳闸 ,通过中间杆塔、右侧杆塔和闪络绝缘子串电流波形如图 5 所示。

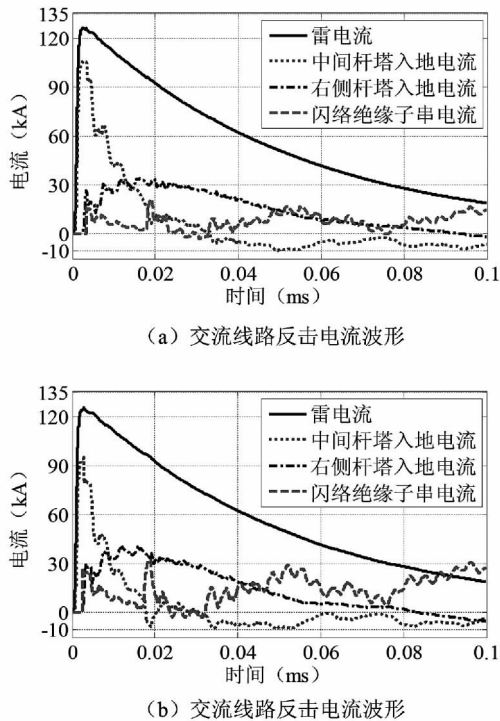
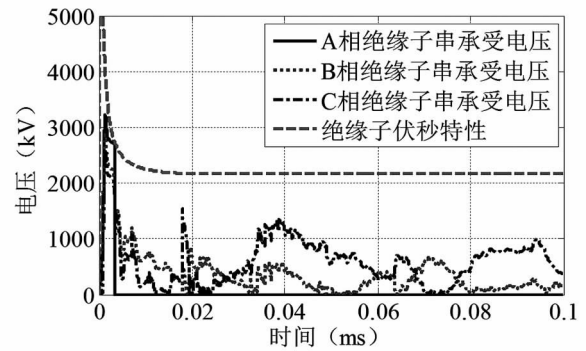


图5 交直流线路反击跳闸电流波形

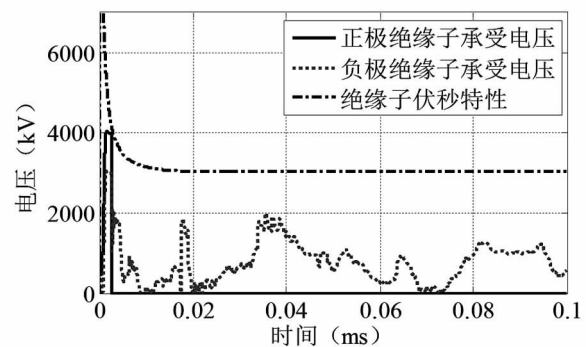
通过图 5 可知反击雷电流主要通过被击杆塔入地 ,尤其在反击发生的初始阶段 ,尽管相邻杆塔的电抗远小于被击杆塔 ,但由于地线波阻抗的存在 ,雷击发生时刻通过相邻杆塔入地的雷电流所占比重并不大 ,通过闪络相导线释放的雷电流最少<sup>[8]</sup>。由此可以认为 ,治理雷电流反击应该着重降低易受雷击杆塔的接地电阻。

交直流线路雷击点相关电压波形如图 6 所示。从图中可以看出 ,雷电流对直流末闪络线路的扰动较交流显著 ,但是两者在短时间内的波动趋势基本相同。

从上面的分析可以得出 :由于超高压线路采用了较为严格的外绝缘配置 ,在保证杆塔接地电阻较低的前提下 ,超高压线路可以达到很高的反击耐雷水平。实际运行中未见超高压直流线路反击故障的报道 ,但四川出现过  $500\ \text{kV}$  交流线路遭受  $276\ \text{kA}$  大幅值雷电流反击而发生跳闸的情况。



(a) 交流线路电压波形



(b) 直流线路电压波形

图6 交直流线路反击跳闸电压波形

### 3 交直流线路雷电绕击特性比较

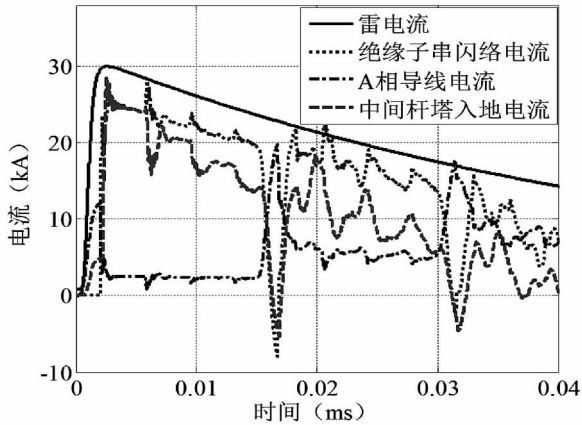
输电线路走廊如处于大地面倾角或大跨越条件 ,地线和地面对导线的屏蔽效果减弱 ,大幅值雷电流会绕击导线<sup>[9]</sup>。在考虑雷电流绕击时 ,不同时刻导线电压瞬时值不同 ,最小绕击跳闸电流也不一样 , $500\ \text{kV}$  交流 A 相不同相角时最小绕击闪络雷电流幅值如表 1 所示。

表1 交流线路 A 相不同相角时  
最小绕击闪络雷电流幅值

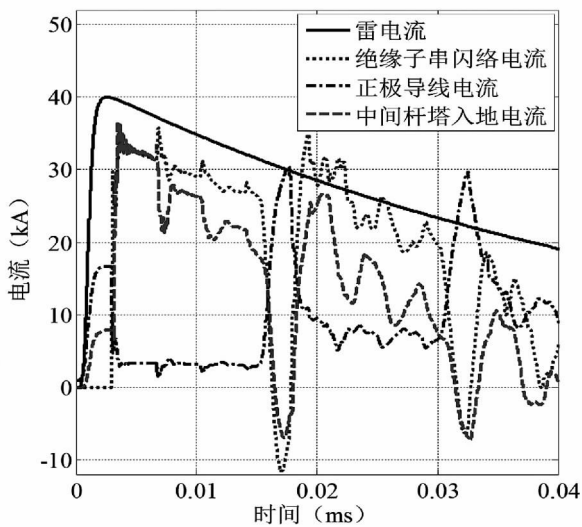
角度/ $^{\circ}$	0	90	180	270
最小绕击闪络雷电流/ $\text{kA}$	17	20	24	20

在负极性雷电流绕击下直流线路正负极可以承受的最小绕击电流分别为  $28\ \text{kA}$  和  $25\ \text{kA}$ 。由于正极性导线更易遭受负极性雷电流绕击 ,所以直流线路较多绕击故障发生在正极导线。

交流线路 A 相相角为  $180^{\circ}$  ,绕击雷电流幅值为  $30\ \text{kA}$  以及直流正极绕击电流为  $40\ \text{kA}$  时 ,绕击点相关电流波形如图 7 所示。



(a) 交流线路绕击电流波形



(b) 直流线路绕击电流波形

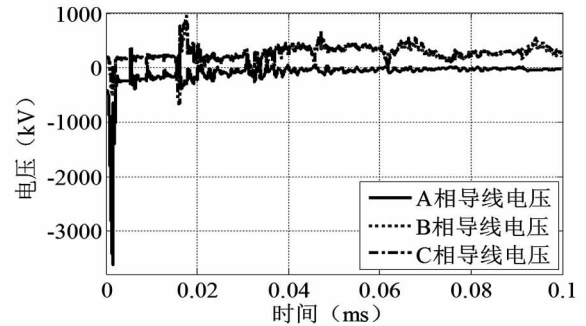
图7 交直流输电线路绕击闪络波形

从图7中可以看出,由于线路波阻抗的影响,瞬时出现的大幅雷电流无法大量通过导线得到释放,导致了绕击导线处产生局部瞬时高电位,引发绝缘子串闪络,闪络发生后大部分雷电流通过杆塔释放到大地<sup>[10]</sup>,在随后较短的时间内闪络电流幅值将增加并形成续流。

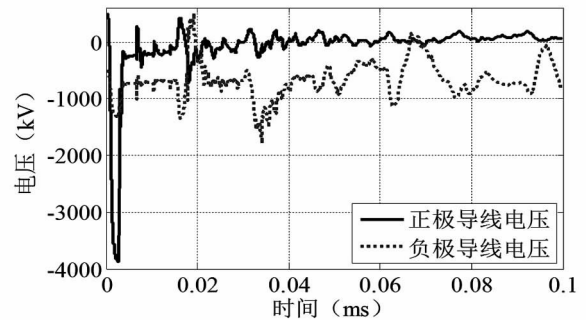
交直流线路雷电流绕击点相关电压波形如图8所示,从中可以看出直流线路未被绕击相出现的电压波动较交流显著。

从上面的分析可以得出:交直流线路绕击跳闸的机理相同,由于导线波阻抗的作用,瞬时出现的大幅雷电流难以通过线路得到释放,在绕击点出现了大幅值的雷电过电压,因此尽管超高压交直流线路采用了较高的外绝缘配置,其耐受绕击雷电的能力并不强。从运行经验来看,500 kV 交流线路绕击

跳闸占其雷击跳闸的90%以上;±500 kV 直流线路雷击跳闸也大多为绕击引起,例如±500 kV 德宝直流线路已确认的4次雷击跳闸均为绕击引起。



(a) 交流线路电压波形



(b) 直流线路电压波形

图8 交直流线路绕击跳闸电压波形

## 4 结 语

(1) 超高压交直流线路的雷击跳闸机理并没有太大差别,直流线路防雷可以借鉴交流线路的防雷经验;

(2) 由于采取了较为严格的外绝缘配置,在保证杆塔接地电阻较小的情况下,雷电反击引起500 kV 线路跳闸的概率不大;

(3) 500 kV 线路的绕击耐雷水平并不乐观,尤其在复杂地形条件下其难免受到大幅值雷电流的绕击,防止超高压线路绕击跳闸采用增加外绝缘的方式并不能达到理想的效果。

### 参考文献

- [1] 丁广鑫. 500 kV 超高压长距离输电线路故障计算数学模型的建立[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2005.
- [2] 杜颖. 超(特)高压输电线路耐雷性能计算方法综述[J]. 广东电力, 2010, 23(9): 15-20.

(下转第63页)

各参量的重要度,从而在此基础上对其加强管理以实现降低电力变压器 LCC 的目标。

对建立的电力变压器全寿命周期成本模型通过蒙特卡洛模拟与斯皮尔曼相关系数法进行了不确定与敏感性分析,确定对全寿命成本影响较大的关键参量;按重要性大小对各参量进行排序,确定了导致成本风险的关键因素;同时通过实例可知基于蒙特卡洛模拟的斯皮尔曼相关系数法可以满足高强度的计算需求及空间复杂度,因此更适于处理多变量功能函数复杂的问题,物理意义明确,方法具有普遍的适用性。

参考文献

[1] 王佳明,刘文颖,魏帆,等. 基于寿命周期成本管理的输变电设备状态检修策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 77-79.

[2] 史京楠,韩红丽,徐涛. 全寿命周期成本分析在变电工程规划设计中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 63-66.

[3] Weekes T., Molinski T., Li X., et al. Risk Assessment Using Transformer Loss of Life Data [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2004, 20(2): 27-31.

[4] 黄金泉. LCC 在上海地区的应用与发展[J]. 上海电力, 2003(3): 269-270.

[5] Khaled S., Tarek Z.. Simulation as a Tool for Life Cycle

(上接第16页)

[3] 杨庆,赵杰,司马文霞,等. 云广特高压直流输电线路反击耐雷性能[J]. 高电压技术, 2008, 34(7): 1330-1335.

[4] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.

[5] 吴文辉,曹祥麟. 电力系统电磁暂态计算与 EMTP 应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.

[6] Canadian - American EMTP Users Group. ATP - EMTP Rule Book [M]. [S.l.]: Preliminar Release, 1997.

[7] 谭进,张焕青,刘玉君,等. ±500 kV 三沪 II 回同塔双回直流输电线路防雷分析[J]. 高电压技术, 2010, 36

Cost Analysis [C]. Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, 2008: 2497-2503.

[6] 夏成军,邱桂华,黄冬燕,等. 电力变压器全寿命周期成本模型及灵敏度分析[J]. 华东电力, 2012, 40(1): 26-30.

[7] 江修波,吴文宣,陈祥伟. 区间分析法在电力变压器全寿命周期成本模型中的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(9): 50-53.

[8] Emblemsv J. Life - cycle Costing: Using Activity - based Costing and Monte Carlo Methods to Manage Future Costs and Risks [M]. Wiley, 2003.

[9] 王静龙,梁小筠. 非参数统计分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 60-62.

[10] Khan F N, Lau A P T, Zhaohui Li. Statistical Analysis of Optical Signal - to - noise Ratio Monitoring Using Delay - tap Sampling [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(3): 149-151.

[11] 刘妍. 桥梁全寿命周期成本风险分析研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009.

[12] 2008 年全国输变电设施可靠性分析. 来源: <http://www.chinacir.com.cn/freereport/201022171332.shtml>.

作者简介:

舒萍(1977),男,主要从事变压器运行管理研究。

(收稿日期:2013-06-26)

(9): 2173-2179.

[8] 黄瑞梅. 输电线路防雷接地技术研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(5): 207-210.

[9] 陈锡磊,王东举,赵斌财,等. 定海—甬东特大跨越线路段的耐雷性能[J]. 电力建设, 2010, 31(6): 6-10.

[10] 司马文霞,谢博,杨庆,等. 特高压输电线路雷电过电压的分类识别方法[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 306-312.

作者简介:

刘守豹(1983),男,博士,工程师,从事过电压及工程电磁场计算方面的工作。

(收稿日期:2013-06-28)