

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.014

避雷器安装方案对线路耐雷性能的影响研究

林方新, 朱映洁

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 雷击跳闸是输电线路总故障跳闸的主要原因, 安装线路避雷器是防止线路雷击跳闸的有效措施。为降低线路雷击跳闸率, 提高线路安全性, 利用电磁暂态计算程序(ATP-EMTP), 采用绝缘子串和空气间隙先导法、修正电气几何法对一条 500 kV 单回线路未加装线路避雷器时的反击性能和绕击性能进行了仿真建模计算, 对影响因素进行了分析, 提出了避雷器的安装原则, 对不同安装方案进行了对比研究。研究表明, 线路避雷器可以有效提升线路的防雷性能, 对水平布置的单回线路, 防止反击时避雷器应重点安装在较高呼高、冲击接地电阻较大的杆塔两边相导线上, 防止绕击时应重点安装在较高呼高、较大地面倾角时的下坡侧边相导线上。研究成果有助于指导线路避雷器安装的选点和设计工作。

关键词: 线路避雷器; 电磁暂态计算程序; 耐雷性能; 安装方案

中图分类号: TM862

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)01-0075-06

Influence of Arrester Installation Scheme on Line Lightning Protection Performance

LIN Fangxin, ZHU Yingjie

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Use of surge arrester is an effective measure to prevent the transmission line from lightning trip which is mostly caused by lightning strike. In order to reduce the lightning trip rate and improve the operation safety, the performance against shielding failure and back striking of a 500 kV single circuit line without a line surge arrester are simulated by ATP-EMTP In this paper. The influencing factors of the performance are analyzed, the installation principle of lightning arrester is put forward, and thus a comparative study of different installation schemes is carried out. The research shows that the surge arrester can effectively improve the lightning protection performance of the line. For the horizontal wire arrangement of single circuit, arrester should install at higher towers of more impulse grounding resistance on both sides of the phase conductors to prevent back striking, while of large ground obliquity on downhill side phase conductors to prevent the shielding failure. The research results are helpful to guide the line arrester installation location and design work.

Key words: surge arrester; ATP-EMTP; lightning protection performance; installation scheme

对多年来输电线路故障的分类统计表明, 由雷击引起的输电线路跳闸次数占输电线路总故障跳闸

次数的 40% ~ 70%^[1], 在雷电活动强烈、土壤电阻率较高的山区, 输电线路雷电跳闸率更高。广东地区的年平均雷电日达到 70 天, 在珠三角等局部地区甚至达到 90 个雷电日以上。广东电网近年输电线路雷击跳闸次数和跳闸率统计如表 1 所示^[2~3]。2009—2012 年, 500 kV 线路因雷击跳闸占线路总跳闸的比例均在 60% 以上, 雷击跳闸是导致线路跳闸最主要原因之一。

收稿日期: 2016-08-04

基金项目: 中国能建广东院科技项目“1 000 kV 变电站雷电侵入波计算分析及避雷器配置方案”(EX02581W)

作者简介: 林方新(1973), 男, 广东阳江人, 高级工程师, 学士, 主要从事超高压送电线路设计和评审工作(e-mail) linfangxin@gedi.com.cn。

表1 广东地区 110 kV 及以上输电线路雷击跳闸率统计

Tab. 1 Lightning trip rate of 110 kV A. C. and above transmission line in guangdong area

统计指标	电压等级	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年
雷击跳闸次数/次	500 kV	17.00	31.0	21.0	15.0	27.0
	220 kV	131.0	113	185	104	129
	110 kV	502.0	390	604	316	432
跳闸率/(次·百公里 ⁻¹ ·年 ⁻¹ ·40 雷电日 ⁻¹)	500 kV	0.060	0.10	0.05	0.11	0.12
	220 kV	0.130	0.12	0.16	0.31	0.25
	110 kV	0.370	0.32	0.40	0.66	0.56

注: 2011—2012 年数据未含广州、深圳。

对直流落点密集的珠三角地区, 当近区 500 kV 线路雷击跳闸后电压跌落, 有可能导致单回或多回直流换相失败, 对电网的安全运行带来负面影响。500 kV 线路的防雷保护一般采取两根地线负保护角、降低接地电阻、随着塔高升高增加绝缘配置等措施。但对已建成并投运多年的旧线路, 对杆塔进行结构改造以减小保护角会带来长时间停电和施工安装隐患, 难以实施; 降阻并不能改善线路的防绕击性能; 而增加绝缘子片数虽然提高了绝缘子串的耐雷水平, 但会减小绝缘子串风偏后对塔身的间隙, 甚至有可能降低线路整体的耐雷性能。因此, 线路避雷器作为旧线路防雷保护的重要措施, 得到了运行部门的高度重视^[1,4-7]。

本文采用电磁暂态计算程序(ATP-EMTP), 对 1 条 500 kV 单回线路未加装线路避雷器时的反击性能和绕击性能进行了仿真建模计算, 对影响因素进行了分析, 提出了避雷器的安装原则, 对不同安装方案进行了对比研究。研究成果有助于指导线路避雷器安装的选点和设计工作。

1 计算方法和参数选取

1.1 计算方法

传统的架空线路防雷计算方法采用《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》(DL/T 620—1997)^[8]介绍的方法(以下简称规程法), 该方法沿自前苏联的经验, 未考虑工作电压的影响, 不能反映雷电流在杆塔上的传播过程, 同时对高塔和山区的绕击计算存在较大误差, 因此已较少采用。目前国内的防雷计算主要采用电磁暂态程序进行建模仿真的方法以求得线路的耐雷水平。本文在计算时采

用 ATP-EMTP 进行建模仿真计算反击耐雷水平和绕击耐雷水平, 其中杆塔模型采用多波阻抗模型, 闪络判据采用美国电科院(EPRI)推荐的绝缘子串和空气间隙先导法^[9], 反击跳闸率采用 DL/T 620—1997 的方法, 绕击跳闸率采用修正电气几何模型计算。

1.2 线路参数

拟加装避雷器的线路为 500 kV 单回路, 山地地形, 导线型号为 4×LGJ-400/50 型钢芯铝绞线, 分裂间距 0.45 m, 地线型号为 LGJ-95/55 型钢芯铝绞线, 导地线弧垂分别为 15 m、13 m。主力直线塔为边相 I 串、中相 V 串的酒杯塔, 杆塔平均呼高取 36 m, 平均档距为 450 m。绝缘子 I 型串长 6 m, V 型串单肢长 5 m, 夹角一般取 105°绝缘子干弧距离均为 4 m。地线金具串长 0.5 m。雷电闪络通道考虑沿绝缘子串均压环闪络, 及导线风偏后对塔身闪络, 雷电工况下 I 串风偏后对塔材的间隙值为 4 m, V 串对塔材的间隙值为 3.7 m。塔头上的导地线位置如图 1 所示, 同时图 1 还示意了沿空气间隙闪络的路径和长度。

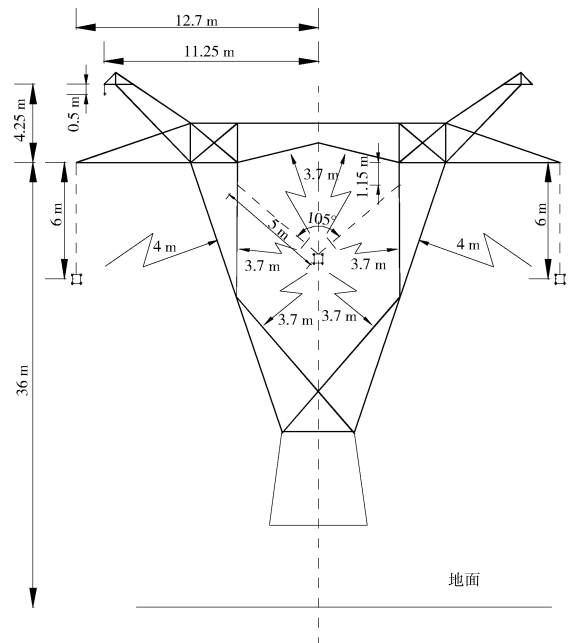


图1 塔头尺寸和闪络路径示意图

Fig. 1 Tower head size and flashover path

1.3 杆塔模型

日本学者 Yamada T, 西班牙学者 Martinez J. A. 等使用多波阻抗来模拟输电线路的杆塔^[10], 能够反映塔身、横担等不同部位波阻抗的差异及雷

电波折、反射的影响, 在高大杆塔或多回路杆塔的防雷计算中得到了较为广泛的应用。本工程为单回路杆塔, 塔高较矮, 结构较为简单, 结合多波阻抗模型的分析结果, 仿真中对杆塔波阻抗简化如图 2 所示, 图 2 中“/”前的数值为波阻抗值, “/”后的数值为波阻抗长度。对塔身部位除了主材波阻抗还考虑了斜材波阻抗, 波阻抗长度取主材波阻抗长度的 9 倍。偏严格考虑, 杆塔波速比取 0.85, 即杆塔波阻抗上雷电波传播速度为 $300 \text{ m}/\mu\text{s} \times 0.85 = 255 \text{ m}/\mu\text{s}$ 。

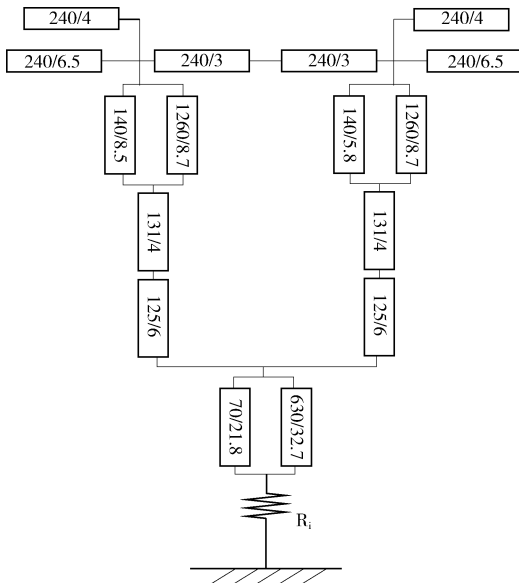


图 2 杆塔波阻抗分段

Fig. 2 Surge impedance section of tower

1.4 雷电流参数与击距系数

计算波形采用 $2.6/50 \mu\text{s}$ 的双指数波作为雷电注入波。雷电流通道波阻抗和雷电流幅值的关系密切, 采用文献[11]的关系曲线, 结合反击和绕击的线路耐雷水平, 仿真时雷电通道波阻抗取 300Ω ; 绕击时取 800Ω 。为了便于与运行数据和运行要求对比, 跳闸率均折算至 40 个雷电日。

本文采用文献[11]推荐的击距公式, 考虑了工作电压对击距的影响。有研究表明, 对于超高压线路, 先导对大地、导线击距是不相等的, 且击距系数 β 随杆塔高度的变化而变化。因此 IEEE 雷电工作组给出了击距系数 β 与导线高度 h_c 相关的推荐公式如下:

$$\beta = \begin{cases} 0.36 + 0.17 \times \ln(43 - h_c) & h_c < 40 \text{ m} \\ 0.55 & h_c \geq 40 \text{ m} \end{cases} \quad (1)$$

2 未加装避雷器的线路耐雷性能

2.1 反击性能及影响因素分析

当线路未加装避雷器时, 线路的反击性能计算见表 2, 计算中考虑山区土壤电阻率较高, 杆塔冲击接地电阻取 15Ω 。考虑对 500 kV 线路, 工作电压占闪络电压的比重大, 同时交流线路的工作电压为正弦变化的, 故每隔 30° 相角计算一次耐雷水平和跳闸率, 最终取算术平均值作为线路的反击耐雷水平和反击跳闸率。

从计算结果来看, 雷击地线时, 三相导线均有可能发生反击闪络, 取决于雷击时刻的导线工作电压。本线路为单回路杆塔, 全高仅 40 m 左右, 因此反击时来自大地的负反射波可以较快的返回横担, 有效抑制雷电位升, 因此线路平均反击耐雷水平达 227.5 kA, 平均反击跳闸率仅为 0.028 次/(百公里·年·40 雷电日)。根据 DL/T 620—1997, 500 kV 线路的耐雷水平一般为 125 ~ 175 kA, 因此本线路的反击耐雷性能要优于规程要求。

表 2 线路反击耐雷性能

Tab. 2 Protection performance from back flashover of line

A 相 相角/ $(^\circ)$	闪络 相	闪络 路径	耐雷水 平/kA	反击 跳闸率/ $*$	反击跳闸 率均值/ $*$
0.00	A	沿串	234	0.023	
30.0	A	沿串	241	0.019	
60.0	B	对上横担空气间隙	237	0.021	
90.0	B	对上横担空气间隙	220	0.033	
120	B	对上横担空气间隙	213	0.039	
150	B	对上横担空气间隙	220	0.033	0.028
180	C	沿串	235	0.022	
210	C	沿串	220	0.033	
240	C	沿串	214	0.038	
270	C	沿串	220	0.033	
300	C	沿串	235	0.022	
330	A	沿串	241	0.019	

注: * 为反击跳闸率的单位, 次/(百公里·年·40 雷电日)。

随着线路杆塔呼高的增加和冲击接地电阻的变化, 反击跳闸率如图 3 ~ 图 4 所示:

本线路导线水平布置, 因此三相导线均有可能发生反击跳闸, 雷击时的跳闸相与各相导线的相位有关。由于线路是 500 kV 单回路, 杆塔高度较低, 在雷电反击时, 来自地面的负反射波可以较快的返回雷击点, 从而抑制雷电位升, 因此在杆塔冲击接

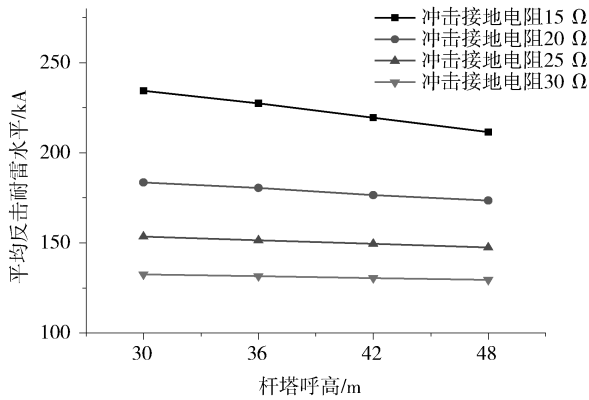


图3 杆塔呼高、冲击接地电阻对反击耐雷水平的影响
Fig. 3 Effect of tower height and Impulse grounding resistance on withstand level of lightning back-striking

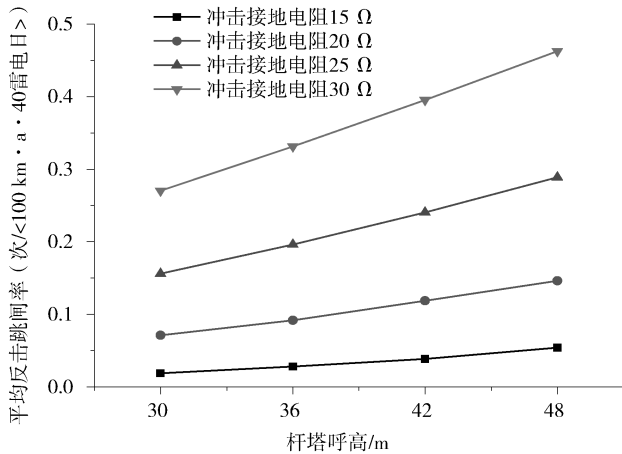


图4 杆塔呼高、冲击接地电阻对反击跳闸率的影响
Fig. 4 Effect of tower height and Impulse grounding resistance on lightning back-striking trip rate

地电阻较小时,线路的反击耐雷水平很高,只有当杆塔较高、冲击接地电阻较大时耐雷性能下降显著。如杆塔呼高48 m、冲击接地电阻30 Ω时,反击跳闸率达0.462次/(百公里·年·40雷电日),因此在较高呼高、较大冲击接地电阻时反击跳闸率也偏高,应予以重视。杆塔呼高对线路的反击耐雷水平影响较小,但是高塔线路落雷次数增加,因此反击跳闸率也相应较高。冲击接地电阻对线路的反击耐雷水平和反击跳闸率影响显著。

2.2 绕击性能及影响因素分析

当雷电流绕击边相A时,各相角下的绕击耐雷水平和闪络路径如表3所示。可见,线路的平均绕击耐雷水平为20.6 kA,绕击闪络时基本沿着对塔身的空气间隙闪络。采用修正电气几何法

计算,各呼高和各种地面坡度下的绕击闪络率见图5。

表3 线路绕击耐雷性能

A相相角/(°)	闪络相	闪络路径	耐雷水平/kA	平均耐雷水平/kA
0.00	A	对塔身间隙	23	20.6
30.0	A	对塔身间隙	23	
60.0	A	对塔身间隙	22	
90.0	A	沿串,对塔身间隙	21	
120	A	沿串,对塔身间隙	19	
150	A	对塔身间隙	18	
180	A	沿串,对塔身间隙	18	
210	A	对塔身间隙	18	
240	A	沿串,对塔身间隙	19	
270	A	沿串,对塔身间隙	21	
300	A	对塔身间隙	22	
330	A	对塔身间隙	23	

可以看出,随着杆塔呼高和地面坡度增加,线路的绕击跳闸率迅速上升。当杆塔呼高30 m、地面坡度为0°时,绕击跳闸率基本为0;而当杆塔呼高48 m、地面坡度为25°时,绕击跳闸率高达约0.9次/(百公里·年·40雷电日)。因此当杆塔较高且地面坡度较大时,线路的绕击跳闸应予以充分重视。在绕击闪络时的跳闸相为下坡侧边相导线,上坡侧边相导线受到地线和大地的良好保护,不易绕击跳闸;同样线路中相导线受到地线和两边相的有效保护,也不会发生绕击跳闸。

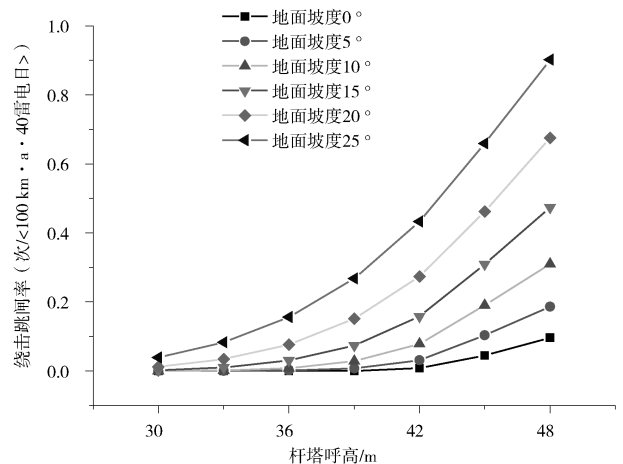


图5 杆塔呼高、地面坡度对绕击跳闸率的影响
Fig. 5 Effect of tower height and Impulse grounding resistance on lightning shielding failure trip rate

3 加装避雷器后的防雷性能

3.1 安装位置的选择

根据线路未加装避雷器时的反击、绕击性能及影响因素分析, 本线路避雷器安装和防雷保护加强措施应重点针对如下区段和杆塔:

1) 当杆塔冲击接地电阻较大($\geq 25 \Omega$)、呼高较高时, 应重点防止三相导线的反击跳闸。

2) 当地面坡度较大($\geq 20^\circ$)、呼高较高时, 应重点防止下坡侧边相导线的绕击跳闸。

对情况一, 将在 3.3 节中通过防雷仿真确定三相导线都安装还是仅需装在一相导线上; 对情况二, 安装避雷器时仅需加装在下坡侧的边相导线上。

3.2 避雷器伏安特性

避雷器厂家提供的某 500 kV 间隙型避雷器伏安曲线如图 6 所示。

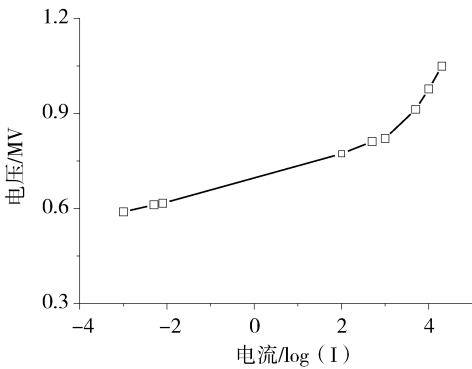


图 6 500 kV 间隙型线路避雷器伏安特性曲线
Fig. 6 Volt-ampere characteristic curve of 500 kV A.C. surge arrester with gap

3.3 反击防雷性能

分别考察如下五种避雷器安装方案对反击防雷水平的影响: (1) 仅安装一相导线且为边相; (2) 仅安装一相导线且为中相; (3) 安装两相导线且为两边相; (4) 安装两相导线且为一中相一边相; (5) 三相导线均安装。

对如上安装方案分别仿真计算得到线路的反击防雷水平如表 4 所示, 由于避雷器安装点和雷击点相对位置的不同, 对安装方案(1)和(4)同时考虑雷击左侧地线和右侧地线的差异。

作为对比, 杆塔呼高 48 m、冲击接地电阻 30 Ω 时平均反击防雷水平为 130 A(如图 3 所示)。从表 4 计算结果看, 无论是安装一相、两相还是三

相, 线路避雷器安装均可明显提升杆塔的反击防雷水平。总的来说, 安装避雷器的相越多, 防雷保护性能改善更显著。相对来说, 仅安装一相导线时, 安装在边相和中相相差不大; 当安装两相导线时, 两边相安装(方案 <3>)比安装一边相和中相(方案 <4>)对防雷水平提升更大; 三相导线均安装线路避雷器时, 反击防雷水平 >400 kA, 可以不用考虑杆塔的反击。另需注意, 当避雷器仅安装一相时, 虽然平均反击防雷水平得到改善, 但是部分相角下的反击防雷水平与未安装线路避雷器时相差不大, 若雷击时导线处于该相位, 则仍然存在反击跳闸的风险。

因此, 从技术经济性考虑, 推荐在两边相上安装避雷器的安装方案, 同时也可以兼顾防线路绕击闪络的需要。

3.4 绕击防雷性能

当线路安装避雷器后, 通过仿真计算绕击雷电流达到 300 kA 时均不会出现绕击跳闸。当杆塔呼高 48 m、地面坡度取 25 $^\circ$ 时塔头处最大绕击雷电流小于 300 kA, 小于线路的绕击防雷水平, 因此避雷器

表 4 线路避雷器安装方案对反击防雷水平的影响
Tab. 4 Influence of installation scheme of line arrester on withstand level of lightning back-striking

安装方案	反击防雷水平/kA		平均反击防雷水平/kA
	雷击左侧地线	雷击右侧地线	
方案(1)	168.0	174.5	171.3
方案(2)	176.3	同雷击左侧地线	176.3
方案(3)	248.5	同雷击左侧地线	248.5
方案(4)	211.0	221.8	216.4
方案(5)	>400	同雷击左侧地线	>400

注: 计算中取杆塔呼高 48 m, 冲击接地电阻 30 Ω 。

可以有效保护线路避免绕击跳闸。实际上, 根据电气几何理论, 由于地线和大地的屏蔽保护作用, 这样大的雷电流对导线形成绕击的概率是极低的。对位于山顶立塔的情况, 两边相导线均为下坡侧导线, 安装避雷器时必须两边相导线分别安装, 仅在一侧边相导线上加装避雷器并不能避免另一侧边相导线绕击跳闸。

3.5 对邻塔防雷性能的影响

当杆塔安装线路避雷器后, 由于避雷器的保护, 本塔上发生雷电反击和绕击的可能性大大下

降,但当雷电流较大时,有可能会导导致未安装线路避雷器的相邻杆塔发生反击或绕击跳闸。

当避雷器安装方案采用方案(1)~方案(4)时,因为三相导线未全部安装避雷器,在大雷电流击中杆塔的情况下均是未安装避雷器的导线会率先闪络,此时计算表明相邻杆塔即使三相导线均未安装避雷器时,也不会先于本塔未安装避雷器相发生闪络。当避雷器按照方案(5)进行安装时,由于本塔三相导线均不会发生闪络,故邻塔的反击耐雷水平会有所下降,典型相角下的邻塔的反击耐雷水平和闪络通道如表5所示。

从计算结果来看,对安装方案(5),当本塔三相均安装避雷器时,虽然400 kA的雷电流也不会导致本塔闪络,但是当雷电流>325 kA时未安装避雷器的邻塔已经发生了反击跳闸,与线路安装避雷器前相比,实际上邻塔的耐雷水平有所下降。

同样,对线路绕击,安装方案(5)时虽本塔不会发生绕击跳闸,但是特别大的绕击雷电流会传递到邻塔导致绕击跳闸。仿真计算表明,由于雷电流传递导致邻塔绕击跳闸的雷电流在180 kA左右。

因此线路避雷器的安装方案除了考虑本塔外,还需考虑对前后相邻杆塔防雷性能的影响。

表5 安装线路避雷器对邻塔反击耐雷水平的影响

Tab. 5 Influence of line arrester installation on withstand level of lightning back-striking of adjacent tower

A相相角/°	闪络相	闪络路径	耐雷水平/kA
0.00	邻塔B相	对塔窗	325
90.0	邻塔A、B相	A相对塔身, B相对塔窗	330
180	邻塔A、B相	A相对塔身, B相对塔窗	330
270	邻塔B相	对塔窗	325

注:避雷器采用安装方案(5);计算中本塔和邻塔均取杆塔呼高48 m,冲击接地电阻30 Ω,档距为450 m。

4 结论

本文利用电磁暂态计算程序(ATP-EMTP),采用绝缘子串和空气间隙先导法、修正电气几何法对一条500 kV单回线路未加装线路避雷器时的反击性能和绕击性能进行了仿真建模计算,对影响因素进行了分析,提出了避雷器的安装原则,对不同安装方案进行了对比研究,结论如下:

1)对本论文中的500 kV单回线路,绕击跳闸是线路雷击跳闸的主要原因。随着杆塔呼高和地面坡度增

加,线路的绕击跳闸率迅速上升。在绕击闪络时的跳闸相为下坡侧边相导线,上坡侧边相导线和中相导线受到地线和大地的良好保护,不易绕击跳闸。

2)雷击地线时,三相导线均有可能发生反击闪络,取决于雷击时刻的导线工作电压。当杆塔呼高较高、冲击接地电阻较大时,反击跳闸率也不应忽视。

3)计算表明,线路避雷器可以有效提高线路的反击和绕击耐雷水平。对水平布置的单回线路,防止反击时避雷器应重点安装在较高呼高、冲击接地电阻较大的杆塔上,防止绕击时应重点安装在较高呼高、较大地面倾角时的下坡侧边相导线上。

4)通过各种避雷器布置方案的对比,综合线路防反击和绕击要求,当需要安装线路避雷器时,对本线路优先推荐两边相安装方案。线路避雷器的安装布点除了考虑本塔外,还需考虑对前后相邻杆塔防雷性能的影响。

5)对较低电压等级的110~220 kV线路,反击和绕击均是导致线路跳闸的主要原因,因此避雷器的安装方案应兼顾线路防止反击和绕击的需要,结合杆塔型式(单回、双回或多回线路)、线路跳闸率预期值进行避雷器安装方案设计。

6)由于线路设计方案有异、沿线情况千差万别,线路避雷器的安装方案应结合运行经验,根据各线路的设计参数开展影响因素分析后,对线路防雷薄弱区段和杆塔进行针对性的安装。

参考文献:

- [1] 肖国斌,虞泽,俸世荣,等. 500 kV线路避雷器的设计与应用[J]. 电瓷避雷器, 2009(3): 26-30.
XIAO G B, YU Z, FENG S R, et al. Design an application of surge arresters for 500 kV A. C. power transmission lines [J]. Insulators and Surge Arresters, 2009(3): 26-30.
- [2] 广东电网公司电力科学研究院. 2011年广东电网公司输电线路工作总结[R]. 广州: 广东电网公司电力科学研究院, 2012.
- [3] 广东电网公司电力科学研究院. 2005—2012年广东雷活动规律及输电线路雷击跳闸分析[R]. 广州: 广东电网公司电力科学研究院, 2012.
- [4] 彭向阳. 广东线路避雷器防雷效果及运行分析[J]. 电瓷避雷器, 2010(2): 21-25, 29.
PENG X Y. Analysis on lightning protection effects and operation of line arresters in Guangdong power grid [J]. Insulators and Surge Arresters, 2010(2): 21-25 +29.

- operation management [J]. China Electric Power Education, 2005(4): 122-125.
- [4] 刘海涛, 赵江河, 苏剑. 基于 ESB 的配电网自动化及管理系统信息集成 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(16): 47-51.
LIU H T, ZHAO J H, SU J. ESB based information integration of distribution automation and management system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(16): 47-51.
- [5] 姚建国, 周大平, 沈兵兵, 等. 新一代配电网自动化及管理系统的设计和实现 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 89-93.
YAO J G, ZHOU D P, SHEN B B, et al. Design and implementation of a new generation distribution automation and management system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 89-93.
- [6] 孙宏斌, 张伯明, 吴文传, 等. 面向地区电网的调度员培训仿真系统 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(2): 49-52.
SUN H B, ZHANG B M, WU W C, et al. A new dispatcher training simulator developed for sub-transmission power network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(2): 49-52.
- [7] 吴俊华, 温彦军, 赵月, 等. 配电网自动化在线仿真系统技术论述 [J]. 电力自动化设备, 2006, 26(4): 50-53.
WU J H, WEN Y J, ZHAO Y, et al. Technology of online simulation system for distribution automation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(4): 50-53.
- [8] 刘强, 李双虎. 配电网自动化仿真系统的设计与实现 [J]. 计算机仿真, 2006(11): 215-217.
LIU Q, LI S H. Design and realization of distribution automation simulation system [J]. Computer Simulation, 2006(11): 215-217.
- [9] 刘建. 配电网自动化系统 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [10] 陈堂. 配电系统及其自动化技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [11] 陈健. 配网自动化主站系统研究 [D]. 济南: 山东大学, 2006.

(责任编辑 郑文棠)

(上接第 80 页 Continued from Page 80)

- [5] 李谦, 彭向阳, 钟定珠. 线路避雷器在广东电网输电线路异常运行情况的分析 [J]. 广东电力, 2006, 19(6): 43-47.
LI Qian, PENG X Y, ZHONG D Z. Abnormal operation analysis of transmission line arresters in Guangdong power grid [J]. Guangdong Electric Power, 2006, 19(6): 43-47.
- [6] 万帅, 陈家宏, 谭进, 等. ± 500 kV 直流输电线路用复合外套带串联间隙金属氧化物避雷器的研制 [J]. 高电压技术, 2012, 38(10): 2714-2720.
WAN S, CHEN J H, TAN J, et al. Development of polymeric MOA with no-supporting series gap for ± 500 kV DC transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2714-2720.
- [7] 李振, 余占清, 何金良, 等. 线路避雷器改善同塔多回路线路防雷性能的分析 [J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 3120-3128.
LI Z, YU Z Q, HE J L, et al. Line surge arrester improving lightning protection performance of transmission lines with multi-circuits in a tower [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12): 3120-3128.
- [8] 电力工业部. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合: DL/T 620—1997 [S]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
Ministry of Power Industry. Overvoltage protection and insulation coordination for AC electrical installations: DL/T 620—1997 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 1997.
- [9] Electric Power Research Institute. Transmission line reference book—200 kV and above. [M]. 3rd ed. California: EPRI, 2005.
- [10] YAMADA T. 雷电过电压计算用的铁塔模型 [J]. 日本电气学会论文月刊, 1994, 144(6): 595-600.
- [11] 中国电力企业联合会. 1 000 kV 特高压交流输电工程过电压和绝缘配合: GB/Z 24842—2009. [S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
China Electricity Council. Overvoltage and insulation coordination of 1 000 kV UHV AC transmission project: GB/Z 24842—2009 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.

(责任编辑 高春萌)