

直流输电线路雷害现状与分析

吴焯军¹, 赵 淳², 张伟忠¹, 王俊波¹, 范柱升¹, 阮江军³,
谷山强², 黄道春³

(1. 广东电网公司佛山供电局试验研究所, 广东 佛山 528000;

2. 国网电科院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430072; 3. 武汉大学电气工程学院, 武汉 430072)

摘要: 目前, 中国已建成相当规模的直流输电网。直流输电线路的快速建设和大规模运营带来的是一系列的直流线路管理和运行问题, 而直流输电线路雷害防治工作正是管理运行工作中的一个重点和难点。由于中国直流输电线路雷害防治起步较晚, 且有单一线路雷击数据量偏少、计算模型存在局限性等问题, 传统的计算和评估方法较难真实地反映直流输电线路的实际雷害情况。笔者正是以上述问题为出发点, 搜集了大量的雷击闪络数据, 整体上把握了国内直流输电线路的雷害现状, 并利用数据挖掘和敏感性因素分析等手段得到了一定的直流线路雷害特征, 为运行管理部门开展防雷工作提供一定的参考和依据。

关键词: 直流输电线路; 雷害特征; 雷击闪络率; 敏感性因素分析

中图分类号: TM726

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2014)05-0134-06

Analysis on Lightning Damage of DC Transmission Lines in China

WU Zhuojun¹, ZHAO Chun², ZHANG Weizhong¹, WANG Junbo¹, FAN Zhusheng¹,
RUAN Jiangjun³, GU Shanqiang², HUANG Daochun³

(1. Foshan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation, Guangdong Foshan 528000, China;

2. Wuhan NARI Limited Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430072, China;

3. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In China, a considerable scale of DC transmission networks have been built. However, the rapid development and large-scale operation of the DC transmission lines have brought a number of issues in management, of which the lightning prevention is a important but difficult issue. The existing calculation and assessment model cannot effectively reflect real lightning risk of the DC transmission lines owing to its limitation in calculation and lack of lightning data record of single DC transmission line. Therefore, the authors collected a large amount of lightning flashover data to describe the entire lightning damage status of DC transmission lines in China. Further, the data mining technology and sensitive factor analysis are employed for discovering the lightning damage characteristics of DC transmission lines in order to provide a reference for lightning prevention.

Key words: DC transmission line; lightning damage characteristics; lightning flashover rate; sensitive factor analysis

0 引言

中国的直流输电事业起步较晚, 但经过近十多年的飞速发展, 已进入直流输电强国行列^[1]。到2011年底为止, 中国已成功建成并投运了14个直流输电工程, 包括国家电网公司的10条直流输电线路和

南方电网公司的4条直流输电线路, 线路总长达12 458 km, 输送总功率达39 010 MW, 详细可见表1。

随着直流输电系统容量逐年增大, 由雷击引起的输电线路闪络故障也日益增多。据国家电网公司2005—2010年运行数据统计, 雷击引起的闪络次数占国家电网公司±500 kV直流输电线路总闪络次数的31.64%, 详细见图1。

表1 中国已建成投运的高压直流输电工程详细情况表

Tab. 1 HVDC transmission projects completed in China

线路名称	所属单位	电压等级/kV	投运时间/年	线路长度/km	输送功率/MW	起点	终点
葛南直流	国家电网	±500	1989	1 046	1 200	葛洲坝	上海南桥
龙政直流	国家电网	±500	2003	860	3 000	龙泉	政平
江城直流	国家电网	±500	2004	940	3 000	荆州	惠州
灵宝背靠背	国家电网	±120	2005	0	360	灵宝	灵宝
宜华直流	国家电网	±500	2006	1 049	3 000	宜都	上海
高岭背靠背	国家电网	±125	2008	0	1 500	高岭	高岭
黑河背靠背	国家电网	±125	2008	0	750	黑河	黑河
德宝直流	国家电网	±500	2010	574	3 000	德阳	宝鸡
向上直流	国家电网	±800	2010	2 071	6 400	复龙	奉贤
宁东直流	国家电网	±660	2010	1 335	4 000	银川	胶州
天广直流	南方电网	±500	2001	960	1 800	天生桥	广州北郊
贵广直流 I 回	南方电网	±500	2004	980	3 000	安顺	肇庆
贵广直流 II 回	南方电网	±500	2007	1 225	3 000	兴仁	深圳
云广直流	南方电网	±800	2010	1 418	5 000	楚雄	穗东

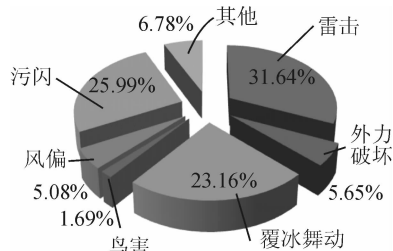


图1 国家电网公司 2005—2010 年±500 kV 直流输电线路闪络原因统计

Fig. 1 The flashover statistics of ±500 kV DC transmission lines of State Grid Corporation of China in 2005-2010

日益增多的雷击闪络故障为直流输电线路的运行管理部门带来了一系列迫切需要解决的问题^[2-3]。目前,在直流输电线路防雷工作方面,科研单位和运行部门均存在一定的局限。

首先,科研单位对某一条或某地区的直流输电线路进行雷害风险评估时,较难全面掌握该一条直流线路或该地区直流线路的运行经验。同时,由于目前的雷害评估工作中较难将所有的风险因子考虑进计算模型当中,故单纯以经典的雷击跳闸率计算模型来评估直流输电线路的雷害风险,评估结果必然会与线路的实际运行情况产生一定的差距^[4-7]。

其次,运行部门对某一条直流输电线路或某地区的直流输电线路进行防雷改造时,一般是根据该直流线路或该地区直流线路的运行经验安排防雷改造。同理,由于直流输电线路投运时间短或雷击闪络故障数据稀少等原因,较难从数据中提炼出一定的雷害特征,从而使运行管理部门在进行防雷改造时存在一定的盲目性^[8-13]。

笔者正是基于上述出发点,搜集了大量的雷击闪络故障数据,整体上把握了国内直流输电线路的雷害情况,并通过数据挖掘和敏感性因素分析等手段从中得出了一定的直流线路雷害特征^[14-22],为运行管理部门开展防雷工作提供一定的参考和依据。

1 直流输电线路雷害情况统计

该节统计了 2002—2011 近十年来国家电网公司 10 条直流输电线路所有的雷击闪络故障,总体上把握了直流输电线路雷击闪络的情况 (其中只有 6 条线路曾经发生雷击闪络故障)。

1.1 直流输电线路雷害整体情况

从国家电网公司 2002—2011 年公司直流线路运行情况来看,雷击闪络总共发生 88 次,平均雷击闪络率为 0.26 次/(100 km·a)。其中,84 次认定为绕击故障,4 次认定为反击故障,具体比例见图 2。同时,88 次故障中有 73 次发生在极 I (正极),占故障总数的 83%;15 次发生在极 II (负极),占故障总数的 17%,有明显的极性效应,具体比例见图 3。

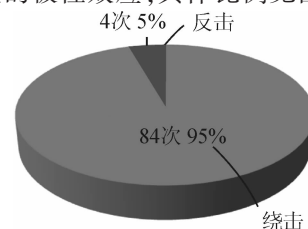


图2 直流线路雷击闪络绕反击分布图

Fig. 2 The distribution map of shielding failure and back flashover of DC transmission lines

1.2 直流输电线路雷击闪络线路分布情况

从雷击闪络故障线路分布上看,88 次直流线路

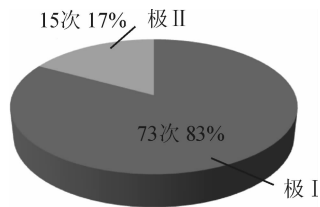


图3 直流线路雷击闪络极性分布图

Fig. 3 The distribution map of lightning strike polarity of DC transmission lines

雷击闪络故障分布在6条线路,分别为 ± 500 kV 葛南、龙政、江城、宜华、德宝直流,以及 ± 800 kV 向上直流。其中,直流线路发生雷击闪络故障最多的依次是葛南、江城和宜华直流,这3条直流线路共发生雷击闪络故障68次,占故障总数的77.3%,详细线路分布情况见图4。

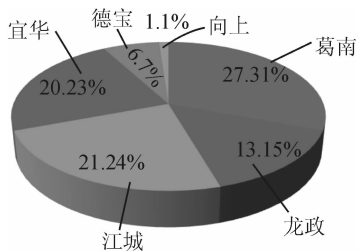


图4 雷击闪络故障线路分布情况

Fig. 4 The lines distribution map of lightning flashover

1.3 雷击闪络时间分布情况

从年份分布上看,2002—2011这10年中,2007年直流输电线路雷击闪络次数最多,达19次,占10年来雷击闪络总数的21.6%,各年具体分布情况见图5。近年来,国家电网公司直流输电线路雷击闪络次数有整体下降的趋势,特别是2009年以来逐年下降,这与近些年来针对直流线路开展了一系列防雷综合治理工作有一定关系。

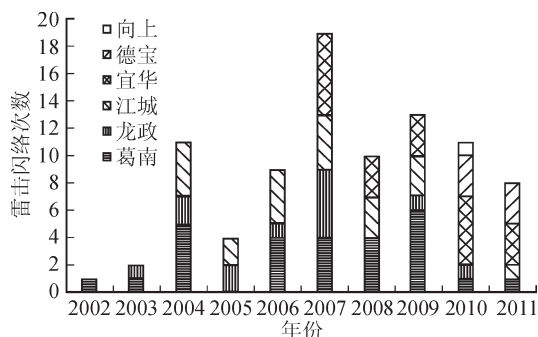


图5 直流线路雷击闪络年分布情况

Fig. 5 The year distribution map of lightning flashover of DC transmission lines

从月份分布上看,6、7、8这3个月是雷击闪络故障最为集中的月份,这与这3个月是雷电活动最频繁的月份有直接关系;特别是7、8月,雷击闪络次数共有54次,占雷击闪络总数的61.4%,各月具

体分布情况见图6。

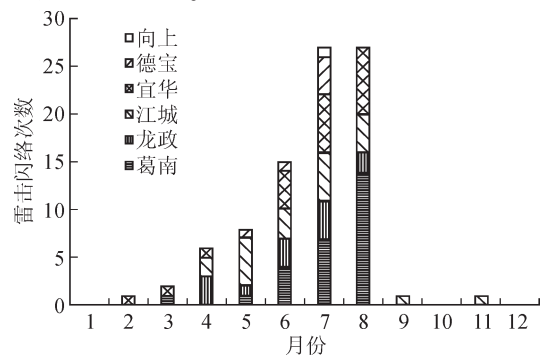


图6 直流线路雷击闪络月分布情况

Fig. 6 The month distribution map of lightning flashover of DC transmission lines

1.4 雷击闪络的区域分布情况

国家电网公司近10年直流线路雷击闪络区域分布情况见图7,由图7可见,雷击闪络主要集中在安徽、湖北、湖南3省,以上3省共发生雷击闪络77次,占总闪络次数的88.5%;而陕西、四川、江苏、浙江4省共有11次雷击闪络,占总数的11.5%。可见雷击闪络主要分布在华中地区,这主要是因为华中地区直流输电线路杆塔密集,且多沿山区架设,途经区域雷电活动频发,这些原因增大了以上地区直流输电线路发生雷击闪络的概率。

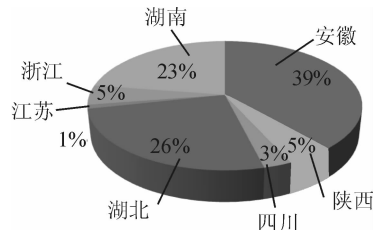


图7 雷击闪络区域分布图

Fig. 7 The regional distribution map of lightning flashover

1.5 雷击再启动情况

国家电网公司近10年发生的88次直流线路雷击闪络故障中,有76次故障全压再启动成功,占总数的86%;有4次故障降压再启动成功,占总数的5%;有8次故障再启动失败造成直流线路闭锁,占总数的9%,并且这8次闭锁均为单极闭锁,见图8。国家电网公司2003—2010年共发生122次直流输电线路闭锁事故,其中雷击引起的直流闭锁事故共8次,占闭锁总数的4.9%。

8次直流线路雷击闭锁事故情况见表2。从极性分布上看,8次雷击闪络闭锁故障中有5次发生在极II,3次发生在极I,极II故障比例为62.5%,这一比例远高于全部88次雷击闪络故障的极II故障比例(17%)。但是,由于雷击闭锁事故次数较少,随机性较大,该情况需要继续跟踪和观察。

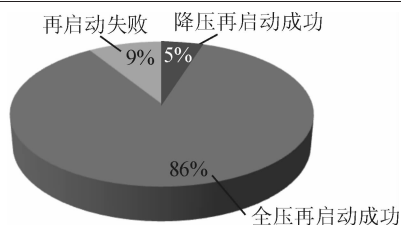


图 8 直流线路雷击闪络故障再启动情况

Fig. 8 The lightning flashover restart situation of DC transmission lines

表 2 直流线路雷击闭锁事故统计表

Tab. 2 Blocking of DC transmission lines due to lightning

线路名称	电压等级/kV	日期	时刻	极性
葛南线	±500	2004-06-28	19:17	极 I
葛南线	±500	2004-07-09	18:36	极 II
葛南线	±500	2006-08-23	17:57	极 I
葛南线	±500	2007-07-24	16:24	极 II
龙政线	±500	2004-07-20	20:32	极 II
龙政线	±500	2006-06-08	19:00	极 I
江城线	±500	2011-07-26	21:51	极 II
德宝线	±500	2011-07-21	00:47	极 II

2 直流输电线路雷击闪络敏感性因素分析

该节进一步分析了直流输电线路雷击闪络的主要特征。同时通过数据统计和分析, 挖掘出雷击闪络与保护角、呼高、极性敏感性因素的一定关系^[23-27]。

2.1 雷击闪络与保护角和地形的关系

88 次直流线路雷击闪络故障中, 有 49 基故障杆塔有保护角数据。其中, 约 85% 的杆塔保护角大于 8°, 约 70% 的杆塔保护角大于 9°, 约 55% 的杆塔保护角大于 10°, 约 40% 的杆塔保护角大于 13.5°, 约 25% 的杆塔保护角大于 15°, 具体见表 3。

表 3 直流线路雷击故障杆塔保护角比例分布表

Tab. 3 The protection angle distribution table of lightning failure tower

参数	数值				
保护角范围/(°)	>15.0	>13.5	>10.0	>9.0	>8.0
所占比例/%	25	40	55	70	85

负保护角的 2 基故障杆塔中, 位于山区和平原的各 1 基; 保护角为 6°~10° 的 24 基故障杆塔中, 位于山区的有 18 基, 位于平原的有 6 基; 保护角为 10°~15° 的 23 基故障杆塔中, 位于山区的有 5 基, 位于平原的有 16 基; 剩下的 2 基杆塔没有地形信息, 具体见表 4 和图 9。由表 4 和图 9 可见, 保护角超过 10° 时, 平原线路故障比例明显提高; 而在 10° 以内时, 雷击故障主要集中在山区线路。

表 4 直流线路故障杆塔保护角和地形分布

Tab. 4 The protection angle and terrain distribution table of lightning failure tower

参数	数值		
保护角范围/(°)	<0	6~10	10~15
山区	1	18	5
平原	1	6	16

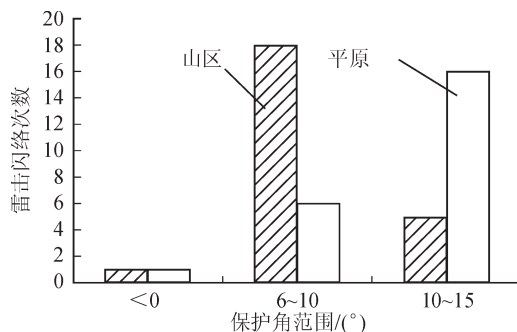


图 9 直流线路故障杆塔保护角和地形分布

Fig. 9 The protection angle and terrain distribution map of lightning failure tower

2.2 雷击闪络与呼高的关系

88 次故障中, 有 71 基故障杆塔有呼高数据。其中, 约 85% 的杆塔呼高大于 27 m, 约 70% 的杆塔呼高大于 30 m, 约 55% 的杆塔呼高大于 36 m, 约 40% 的杆塔档距大于 40 m, 约 25% 的杆塔呼高大于 45 m, 具体见表 5。

表 5 直流线路雷击故障杆塔呼高比例分布表

Tab. 5 The practical height distribution table of lightning failure tower

参数	数值				
呼高/m	>45	>40	>36	>30	>27
所占比例/%	25	40	55	70	85

2.3 雷击闪络与极性的关系

73 次极 I 故障中, 63 次有雷电流数据, 其中 63 次均是负极性雷; 15 次极 II 故障中, 13 次有雷电流数据, 其中 5 次正极性雷, 8 次负极性雷, 具体分布见图 10。由上可知, 直流输电线路极 I (正极) 发生雷击闪络主要是负极性雷引起的, 而正极性雷和负极性雷均有可能引起极 II (负极) 发生雷击闪络。

3 结论

1) 国家电网公司 10 条直流输电线路近 10 年来的平均雷击闪络率为 0.26 次/(100 km·a)。国家电网公司《110 (66) kV~500 kV 架空输电线路管理规范》中的 500 kV 线路雷击跳闸率指标值为 0.14 次/(100 km·a), 对比可知, 直流输电线路的雷击闪络率

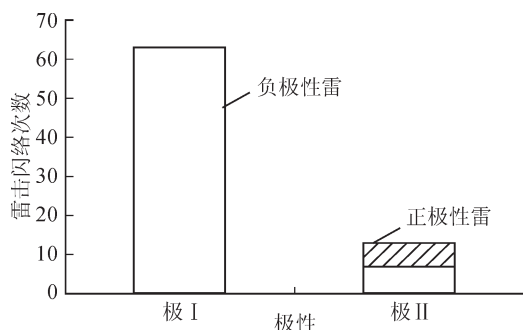


图 10 直流线路雷击故障导线极性与雷电极性关系分布

Fig. 10 The relationship between conductor polarity and lightning polarity

仍处于较高位,十分有必要开展直流输电线路的雷击防治工作^[28-34]。

2)绕击是直流输电线路雷击闪络故障的最主要原因,占国家电网公司直流线路近 10 年的雷击闪络总数的 95.5%。极 I(正极)雷击闪络是直流输电线路雷击故障的主要位置,占国家电网公司直流线路近 10 年的雷击闪络总数的 83.0%。

3)统计数据所得的直流线路雷击闪络再启动成功率为 90.9%,雷击闪络再启动失败造成直流闭锁的概率为 9.1%,而由雷击闪络引起的直流线路闭锁占国家电网公司直流线路闭锁总数的 4.9%。

4)统计数据表明杆塔保护角超过 10° 时,平原线路故障比例明显升高,达到 76.2%;而在 10° 以内时,雷击闪络故障主要集中在山区线路,平原线路故障比例降为 26.9%。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压直流输电理论[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
LIU Zhenya. UHVDC transmission theory[M]. Beijing:China Electric Power Press,2009.
- [2] 温灵长,孙菊海. 750 kV/330 kV 混压同塔四回输电线路耐雷性能研究[J]. 电网与清洁能源,2013,29(12):36-44.
WEN Lingchang,SUN Juhai. Research on characteristics of lightning resistance of the 750 kV/330 kV quadruple-circuit transmission line on the same tower[J]. Power System and Clean Energy,2013,29(12):36-44.
- [3] 洪贞贤,金向朝. 电容器组 CT 保护用避雷器爆裂原因分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2008,29(5):51-53.
HONG Zhenxian,JIN Xiangchao. Analysis of the blowout reasons of the neutral MOA for protection of the neutral CT in capacitor bank[J]. Power Capacitor & Reactive Power,2008,29(5):51-53.
- [4] 马维勇,梁琮,赵彦军,等. 特高压交流试验示范工程 110 kV 并联电容器装置用避雷器的选择[J]. 电力电容器与无功补偿,2011,32(2):13-15.

- MA Weiyong,LIANG Cong,ZHAO Yanjun,et al. Selection of arresters for 110 kV shunt capacitors installation of the ultra high voltage demonstration project[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2011,32(2):13-15.
- [5] 刘洪建,和伟,徐八林,等. 导线电压对其雷电绕击耐雷性能的影响[J]. 南方电网技术,2011,5(2):72-75.
LIU Hongjian,HE Wei,XU Balin,et al. Influence of conductor voltage on its lightning protection performance when shielding failure occurred[J]. Southern Power System Technology,2011,5(2):72-75.
- [6] 张晨,佟继春,宋正瀚. 应用大截面导线的特高压直流输电线路极间距优化研究[J]. 陕西电力,2013,41(6):26-30.
ZHANG Chen,TONG Jichun,SONG Zhenghan. Study on polarity distance optimization of UHVDC transmission line with large cross-section wire[J]. Shaanxi Electric Power,2013,41(6):26-30.
- [7] DL/T 620—1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].1997.
DL/T 620—1997 Overvoltage protection and insulation coordination for AC electrical installations[S].1997.
- [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 Chinese Society for Electrical Engineering,1999,19(8):39-44.
- [9] 杜澎春,陈维江. 葛上直流输电线路耐雷性能的研究[R]. 湖北:中国超高压输电变电建设公司,1994.
- [10] 谷山强,陈家宏,陈维江,等. 输电线路防雷性能时空差异化评估方法[J]. 高电压技术,2009,35(2):294-298.
GU Shanqiang,CHEN Jiahong,CHEN Weijiang,et al. Evaluation method of the time-space-difference of lightning protection performance of transmission lines[J]. High Voltage Engineering,2009,35(2):294-298.
- [11] 赵淳,阮江军,李晓岚,等. 输电线路综合防雷措施技术经济性评估[J]. 高电压技术,2011,37(2):290-297.
ZHAO Chun,RUAN Jiangjun,LI Xiaolan,et al. Technology and economy evaluation of comprehensive transmission line lightning protection measures[J]. High Voltage Engineering,2011,37(2):290-297.
- [12] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京:水利电力出版社,1985.
- [13] 叶会生,何俊佳,李化,等. 雷击高压直流线路杆塔时的过电压和闪络仿真研究[J]. 电网技术,2005,29(21):31-35.
SHE Huisheng,HE Junjia,LI Hua,et al. Simulation of overvoltage and flashover caused by lightning stroke at towers of HVDC transmission line[J]. Power System Technology,2005,29(21):31-35.
- [14] 高峰,周利军,曹晓斌,等. 直流输电线路防雷侧针防

- 护效果研究[J]. 电瓷避雷器, 2012(6):56-61.
- GAO Feng, ZHOU Lijun, CAO Xiaobin, et al. Study on the protection efficiency of lightning rod in DC transmission line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(6):56-61.
- [15] 陈云林, 葛维标, 闫文奕. 配电线路防雷措施研究及新型线路避雷器的运用[J]. 电瓷避雷器, 2012(6):76-80.
- CHEN Yunlin, GE Weibiao, YAN Wenyi. The research of distribution line lightning protection measures and the application of new line arrester[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(6):76-80.
- [16] 伏 进. 特高压直流输电线路耐雷性能分析方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2009.
- [17] 莫付江, 陈允平, 阮江军. 输电线路杆塔模型与防雷性能计算研究[J]. 电网技术, 2004, 28(21):80-84.
- MO Fujiang, CHEN Yunping, RUAN Jiangjun. Study on transmission tower models and their lightning performance calculation[J]. Power System Technology, 2004, 28(21):80-84.
- [18] 甘 斌, 张双平, 余 平. 超高压输电线路雷电绕击及防雷[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(12):57-62.
- GAN Bin, ZHAGN Shuangping, YU Ping. Shielding failure and lightning protection for extra-high voltage transmission line[J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(12):57-62.
- [19] 阮 玲, 谷山强, 赵 淳, 等. 鄂西三峡地区 220 kV 线路差异化防雷技术与策略[J]. 高电压技术, 2012, 38(1):157-166.
- RUAN Ling, GU Shanqiang, ZHAO Chun, et al. Technology and strategy of differentiated lightning protection for 220 kV transmission line in three gorges area of western Hubei[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(1):157-166.
- [20] IEEE Working Group on Estimating Lightning Performance of Transmission Lines. Estimating lightning performance of transmission lines II-Updates to analytical models[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3):1254-1267.
- [21] IEEE Working Group on Estimating Lightning Performance of Transmission Lines. A simplified method for estimating lightning performance of transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1985, PAS-104(4):919-932.
- [22] WHITEHEAD E R. CIGRE survey of lightning performance of extra-high-voltage transmission lines[J]. Electra, 1974 (33):63-89.
- [23] 张 伟, 何金良. 过电压防护及绝缘配合[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
- ZHANG Wei, HE Jinliang. Overvoltage protection and insulation coordination[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2002.
- [24] 丁京玲, 党镇平, 姚喜年, 等. ± 800 kV 直流棒形悬式复合绝缘子的研究[J]. 电瓷避雷器, 2011(2):1-6.
- DING Jingling, DANG Zhenping, YAO Xinian, et al. Research on ± 800 kV DC rod composite suspension insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2011(2):1-6.
- [25] 何 健, 张弓达, 徐陈华, 等. 雷电定位系统在输电线路雷击故障分析中的应用[J]. 电瓷避雷器, 2012(4):74-78.
- HE Jian, ZHANG Gongda, XU Chenhua, et al. Application of lightning location system in lightning failure analysis of transmission lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(4):74-78.
- [26] 维列夏金, 吴维韩. 俄罗斯超高压和特高压输电线路防雷运行经验分析[J]. 高电压技术, 1998, 24(2):76-79.
- WEILIE Xiajin, WU Weihuan. The analysis of lightning protection for EHV and UHV transmission lines in Russia[J]. High Voltage Engineering, 1998, 24(2):76-79.
- [27] 张志劲, 司马文霞, 廖瑞金. 风速对 500 kV 同杆双回路线路绕击耐雷的影响[J]. 高电压技术, 2002, 28(11):19-20.
- ZHANG Zhijin, SIMA Wenxia, LIAO Ruijin. Study on the effect of wind speed to the lightning protection performance of shielding failure for 500 kV double-circuit transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(11):19-20.
- [28] 赵晚君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2004.
- ZHAO Wanjun. HVDC transmission technology[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2004.
- [29] 白 庆. 浅析 6 kV~35 kV 电网防雷保护现状和改进措施[J]. 电瓷避雷器, 2012(5):90-93.
- BAI Qing. Analysis on current situation and improvement measures of 6 kV~35 kV power grid lightning protection[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(5):90-93.
- [30] 陈谓民. 雷电学原理[M]. 北京:气象出版社, 2003.
- CHEN Weimin. Principles of lightning[M]. Beijing:China Meteorological, 2003.
- [31] YAMADA T, MOCHIZUKI A, SAWADA J, et al. Experimental evaluation of a UHV tower model for lightning surge analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(1):393-402.
- [32] IEEE Working Group. Fast front transients task force of IEEE modeling and analysis of system transients WG[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(1):493-506.
- [33] GORDON W B. Lightning performance-shielding failure simplified[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1978, 97(1):39-52.
- [34] 杨 洋, 孙才新, 李 剑, 等. 一种绝缘子超疏水防覆冰涂层的制备及研究[J]. 电瓷避雷器, 2012(2):25-30.
- YANG Yang, SUN Caixin, LI Jian, et al. The preparation and study of a superhydrophobic icing preventing coating[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(2):25-30.
- 吴焯军(1985—), 男, 硕士, 从事输电线路防雷技术及电力设备预防性试验等方面的研究。
- 赵 淳(1985—), 男, 博士, 从事电网雷害风险评估技术、输电线路差异化防雷技术等方面的研究。
- 张伟忠(1969—), 男, 本科, 高级技师, 从事输电线路防雷技术及电力设备预防性试验方面的研究。