

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.013

±800 kV极导线与接地极线共塔线路耐雷性能及双极闭锁反事故措施分析

李倩¹, 王学军¹, 汪晶毅¹, 潘春平¹, 刘俊翔²

(1. 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; 2. 广州供电局有限公司电力试验研究院, 广州 510002)

摘要: [目的]为了节约输电线路走廊,在广州、深圳等高度城市化地区需将±800 kV极导线和接地极线共塔架设。共塔架设线路存在发生由雷击引起双极闭锁事故的风险,但是国内对此却鲜有研究。[方法]首先分析了雷击共塔线路引起双极闭锁的物理过程,然后以某工程为例,采用ATP-EMTP电磁暂态仿真程序和电气几何模型计算了共塔线路的反击和绕击雷击闪络率,最后讨论了几种降低双极闭锁概率的措施。[结果]研究表明:极导线和接地极线共塔架设后,极导线的反击和绕击闪络率均低于独立架设线路;在接地极线上加装线路避雷器,将接地极线铁塔横担更换为复合横担,增加接地极线绝缘配置等措施均能有效降低共塔线路的双极闭锁概率。通过技术经济比较,案例工程推荐采用提高接地极线绝缘配置的反事故措施,建议配置15片170 mm结构高度绝缘子。[结论]研究结果对于处于拥挤地带的特高压直流线路设计提供一定的技术支持。

关键词: 共塔架设; 直流闭锁; 闪络率; 感应过电压

中图分类号: TM854

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)04-0086-06

Analysis on the Lightning Performance and Anti-accident Measures of ±800 kV Bipolar Blocking of Polar Wires and Electrode Wires on the Same Tower

LI Qian¹, WANG Xuejun¹, WANG Jingyi¹, PAN Chunping¹, LIU Junxiang²

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

2. Electric Power Test & Research Institute, Guangzhou Power Supply Bureau Co. Ltd., Guangzhou 510002, China)

Abstract: [Introduction] In order to saving the transmission line corridor, the ±800 kV polar wires and electrode wires have been erected on the same tower in the highly urbanized areas such as Guangzhou and Shenzhen. There is an potential risk of bipolar blocking to HVDC system due to configuration of the same tower for both ±800 kV polar wires and electrode wires, but there is little research on it in China. [Method] In this paper, the process of bipolar blocking caused by the lightning stroke in hybrid transmission lines was analyzed. Taking a project as an example, this paper calculated the lightning flashover rate of hybrid transmission line which erecting polar wires and electrode wires on the same tower by using the ATP-EMTP electromagnetic transient simulation program and the electrical geometric model. Based on this, several measures to reduce the risk of bipolar blocking were discussed. [Results] The results show that the lightning flashover rate of hybrid transmission line is lower than the independent erecting DC lines. Measures of adding line lightning arrester in the electrode wires, replacing the electrode wires of tower cross-arm for the composite cross-arm, adding the electrode wires insulation level can effectively reduce the risk of bipolar blocking. By comparison of technology and economy, this paper recommended the case project is adopted to improve the electrode wires insulation level as the anti-accident measures. It is suggested that case project should be equipped with 15 pieces of 170 mm structure height insulator. [Conclusion] This results provide certain technical support for the design of HVDC lines in congested areas.

Key words: on the same tower; bipolar blocking; lightning shielding; induced overvoltage

收稿日期: 2018-03-28 修回日期: 2018-06-19

基金项目: 中国能建广东院科技项目“±800 kV级特高压直流输变电设计关键技术研究”(ER04121W)

当输电线路在广州、惠州、东莞和深圳等地区走线时,沿线建筑物密集,加之高度城市化,土地资源稀缺,架空输电线路走廊与土地资源的矛盾非

常突出。在这些地区, 将直流线路与接地极线路共塔架设为最佳选择, 可以节约一个输电走廊, 降低拆迁赔偿费用, 降低工程建设难度。

一般地, 接地极线路的绝缘配置远低于特/超高压直流线路, 将二者共塔架设在雷击情况下存在发生直流线路双极闭锁的潜在风险。目前国内外学者对直线路径的耐雷性能和直流线路双极闭锁事故研究较多^[1-6], 但却鲜有关于极导线与接地极线共塔架设线路的研究。文献^[3]虽然对 ± 500 kV 直流极线与接地极线同塔架设时引起的双极闭锁事故进行了分析, 但尚未给出有效的反事故措施。

本文正式基于上述背景, 首先分析了南方电网范围内雷击共塔线路引起双极闭锁的物理过程, 在此基础上, 以 ± 800 kV 滇西北至广东特高压直流输电线路工程为例, 研究了共塔线路的反击和绕击耐雷性能, 并与独立架设直流线路进行对比, 最后讨论了几种降低共塔线路双极闭锁风险的措施, 为滇西北至广东特高压直流输电线路工程共塔线路建设提供参考。

1 雷击共塔线路引起双极闭锁的物理过程

在南方电网范围内, 根据现有的线路保护策略, 雷击共塔线路引起双极闭锁的物理过程如下: 雷电流绕击极导线时, 靠近受雷击侧的接地极线上将产生很高的感应过电压, 受其影响接地极线可能发生绝缘闪络。若此时直流极导线绝缘不闪络, 则仍然维持双极运行, 即使接地极线绝缘闪络, 电弧也无法维持流, 会自动熄灭, 基本不造成后果。若受雷击的极导线发生绝缘闪络, 此极移相并重启一次, 在去游离的时间内, 直流系统转为单极运行, 若重启成功, 将转回双极运行, 基本不造成后果。若故障极重启失败, 直流系统一直为单极运行, 接地极线电弧得以维持流, 将导致接地极电流不平衡保护动作, 则正常极移相并发生闭锁, 造成双极闭锁事故^[3]。

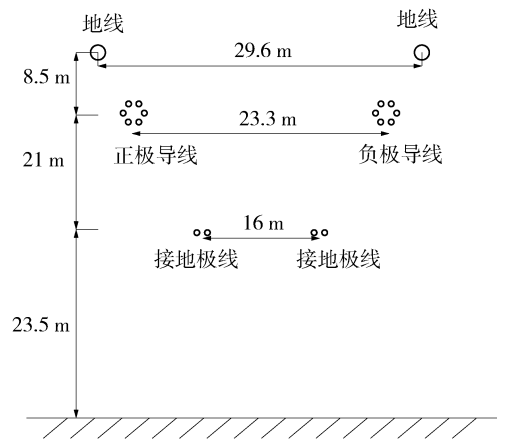
对于直流系统, 一旦发生双极闭锁, 直流线路停运, 对送端和受端的电网冲击很大, 严重影响电网安全运行, 因而应尽力将双极闭锁的概率降到最低。

2 工程案例耐雷性能分析

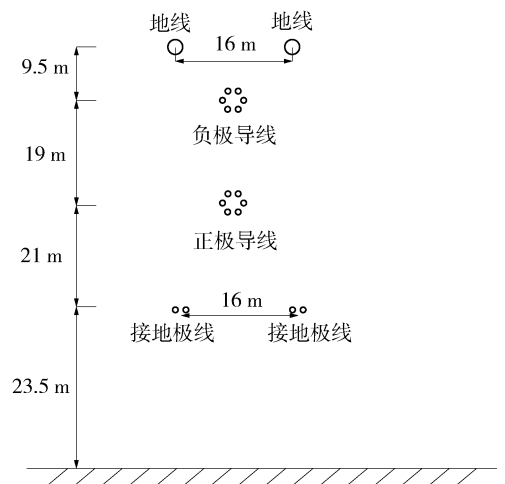
± 800 kV 直流线路和接地极线共塔架设时, 通

常接将接地极线布置于极导线下方。滇西北至广东特高压直流输电线路工程的共塔架设线路根据极导线布置方式的不同又分为水平排列和垂直排列两种。

± 800 kV 直流线路每极导线采用 $6 \times \text{JL/LB1A-720/50}$ 钢芯铝绞线; 极导线分裂间距推荐采用 450 mm; 复合绝缘子串干弧距离取 10.6 m。接地极线路导线采用两组 $2 \times \text{JNRLH60/G3A-300/40}$ 钢芯耐热铝绞线; 分裂间距为 500 mm; 按照满足操作过电压耐受水平要求^[7-9], 接地极线配置 9 片盘型绝缘子取, 招呼角间隙暂取 1.1 m。地线采用 JLB20A-150 型铝包钢绞线和 OPGW-150 光缆。在居民区, 极导线水平排列和垂直排列的线路空间几何尺寸分别如图 1 所示。



(a) 水平排列布置方式



(b) 垂直排列布置方式

图 1 各种塔型布置方案线路几何尺寸

Fig. 1 Line geometry dimension of various tower layout programs

文章反击耐雷性能计算采用 ATP-EMTP 仿真建模法^[10-11], 绕击耐雷性能计算采用修正的电气几何模型^[12]。

共塔线路极导线的闪络包含反击和绕击两种情况。共塔线路接地极线的闪络包含反击、雷电直接绕击和雷电绕击极导线引起接地极线感应闪络三种情况。由上文分析可知, 仅在单极运行时, 接地极线闪络才可能引起双极闭锁, 故对接地极线路仅研究单极运行时的雷击闪络。共塔架设线路和独立架设线路的雷击闪络率如表 1 所示。

表 1 共塔线路与独立架设线路雷击闪络率对比

Tab. 1 Lightning flashover rate comparison of hybrid line and DC line

线路类型	运行方式	闪络极/线	雷击闪络率/(次·100 km ⁻¹ ·40 日 ⁻¹ ·年 ⁻¹)	
			水平排列	垂直排列
共塔架设线路	双极运行	正极	0.173 4	0.000 2
		负极	0.009 6	0.000 2
	正极运行	左侧接地极线	0.904 5	2.436 3
		右侧接地极线	0.901 9	2.436 3
	负极运行	左侧接地极线	0.752 1	2.388 4
		右侧接地极线	0.750 9	2.388 4
独立架设线路	双极运行	正极	0.205 2	0.133 9
		负极	0.017 6	0.000 3

由表 1 数据可知, 接地极线与极导线共塔架设后, 极导线的反击和绕击闪络率均低于独立架设线路, 正极每百公里降低 0.031 8 次(水平排列)和 0.133 7 次(垂直排列), 负极每百公里降低 0.008 次(水平排列)和 0.000 1 次(垂直排列), 这主要是由于共塔线路的极导线受到接地极线的屏蔽保护作用。

对于共塔线路, 其接地极线路易发生感应闪络, 即极导线雷击闪络时接地极线随之闪络。从这个角度看, 接地极线与极导线共塔一定程度上会增加雷击引起双极闭锁风险, 但发生此类事件前提是直流线路单极雷击闭锁。对于 ±800 kV 线路, 其极导线的绝缘水平很高, 发生单极雷击闭锁的概率极低, 因此可以推断接地极线与直流线路共塔后双极闭锁的风险也是相当低。考虑到双极闭锁对直流系统的影响甚大, 应尽力将双极闭锁的概率降到最低。

3 降低双极闭锁概率措施

如上文所述, 极导线与接地极线共塔架设线路

存在由雷击引起双极闭锁的潜在风险。主要有两种情况: 一种是很大的雷电流击中杆塔或地线, 极导线闪络跳闸的同时, 接地极线路也出现了闪络, 此时若故障极重启失败而接地极线路又无法熄弧, 则将出现双极闭锁; 另一种是较大的雷电流绕击极导线, 极导线发生闪络跳闸的同时, 共塔接地极线路由于感应过电压也发生闪络, 此时若故障极重启失败而接地极线路仍无法熄弧, 则将出现双极闭锁。针对这两种情况, 本节对降低双极闭锁概率的措施进行探讨。

3.1 改变直流系统保护策略

直流线路单极运行时, 若运行极导线重启, 接地极线故障电流迅速减小, 续流可由招弧角灭弧使接地极线故障消失。

对于 ±500 kV 直流极导线与接地极线共塔架设线路, 可通过在直流线路单极闭锁后增加一次正常极重启的方式来降低直流双极闭锁概率。以 ±500 kV 兴安直流线路为例, 在 2009 年 5 月改变保护策略后, 双极闭锁概率大幅降低^[13]。但是对于 ±800 kV 直流线路, 考虑到系统稳定性等因素, 根据南方电网目前的保护策略, 应用于 ±500 kV 兴安直流线路的保护策略无法适用于 ±800 kV 直流输电线路。因此有必要研究其他降低 ±800 kV 直流共塔线路双极闭锁风险的措施。

3.2 接地极线加装线路避雷器

根据雷电的随机性, 如果需要保护全线路接地极线绝缘不被击穿, 必须在每基杆塔接地极线都装设避雷器^[14-15]。装设避雷器不仅限值雷击闪络, 同时还需兼顾限值操作过电压水平。根据雷电流幅值的统计概率, 自然界中超过 500 kA 的雷电流极少, 约为 2.0×10^{-6} 。对于 ±800 kV 滇西北至广东特高压直流输电线路工程的共塔段线路, 雷电绕击极导线时, 最大的绕击雷电流为 150 kA。以 500 kA 的反击雷电流和 150 kA 的绕击雷电流以为例, 经过核算, 装设避雷器后, 接地极线的雷击闪络率趋近为零。

经济性方面, 考虑 124 km 范围内(含共塔段 114 km 和独立架设段 10 km)装设避雷器, 共 254 基杆塔, 需装设 508 支避雷器。按照每支避雷器约 1.4 万元(含安装费)估算, 需要增加投资约 712 万元。

工程应用方面, 目前尚无在与 ±800 kV 极导线

共塔架设的接地极线路上装设避雷器的工程应用案例。目前国内各主要厂家亦无现成产品,需要厂家对新型直流线路避雷器开展相应研制和型式试验。

3.3 接地极线铁塔横担更换为复合横担

利用复合材料的电气绝缘性,当复合横担足够长时,可以用较短的悬挂金具替代悬式绝缘子,一方面塔身高度能得到一定程度降低,另一方面绝缘水平也能达到预期要求^[16-17]。

对于±800 kV滇西北至广东特高压直流输电线路工程共塔段线路,若将接地极线的铁塔横担更换为复合横担,复合横担长度暂取4.2 m(暂取该工程各塔型铁塔横担长度中的最小值),雷击闪络率如表2所示。

表2 接地极线更换复合横担后的雷击闪络率

Tab. 2 Lightning flashover rate when replacing the electrode wires of tower cross-arm for the composite cross-arm

线路类型	运行方式	闪络极/线	雷击闪络率/(次· 100 km ⁻¹ ·40日 ⁻¹ ·年 ⁻¹)	
			水平排列	垂直排列
共塔架设线路	双极运行	正极	0.193 9	0.000 3
		负极	0.010 0	0.000 3
	正极运行	左侧接地极线	0.000 0	0.041 4
		右侧接地极线	0.000 1	0.041 4
	负极运行	左侧接地极线	0.000 1	0.045 0
		右侧接地极线	0.001 0	0.045 0

对比表1和表2,接地极线铁塔横担更换为复合横担后,极导线雷击闪络率略有增加,正极每百公里增加0.020 5次(水平排列)和0.000 1次(垂直排列),负极每百公里增加0.000 4次(水平排列)和0.000 1次(垂直排列)。但接地极线雷击闪络率大幅降低,水平排列线路每百公里降低0.749 9~0.904 5次,垂直排列线路每百公里降低2.343 4~2.394 9次,接地极线的耐雷性能大大提高可大幅降低雷击引起直流线路双极闭锁的概率。

经济性方面,考虑124 km范围内(含共塔段114 km和独立架设段10 km),共254基杆塔更换复合横担。按各种塔型更换复合横担每基2.75万元~3.77万元(含安装费)估算,需增加投资约817万元。另一方面,考虑到采用复合横担后,接地极线路串长可缩短约1.5 m,即共塔段直线塔呼高可降低约1.5 m,同时绝缘子片数可以节约部分的成本,初步估算可节省约350万元。因此本体成本约

增加467万元。

工程应用方面,复合材料横担运行经验和运行年限较少。

3.4 提高接地极线路绝缘配置

根据上文分析的直流线路与接地极线路出现双极闭锁的两种情况可知,其本质原因仍是接地极线路相比极导线绝缘配置较低。因此可以考虑适当提高接地极线路绝缘水平以将双极闭锁的概率降低到一个较低的水平。

通过仿真对提高接地极线路绝缘水平后的反击耐雷性能进行计算,如表3所示。

表3 反击时接地极线路不闪络的最小绝缘子片数

Tab. 3 The minimum numbers of insulator on the electrode wires without back flashover

杆塔型式	闪络极	雷击正极侧地线极导线 闪络、接地极线不闪络		雷击负极侧地线极导线 闪络、接地极线不闪络	
		极导线耐 雷水平/kA	接地极线绝缘 子片数/片	极导线耐 雷水平/kA	接地极线绝 缘子片数/片
水平排列	正极	290	22	370	25
	负极	660	47	385	26
垂直排列	正极	440	30	440	30
	负极	450	31	450	31

由表3可知,对于反击闪络,接地极线路配置22片170 mm结构高度绝缘子,在反击雷电流290 kA时,极导线闪络接地极线路不闪络;接地极线路配置25片170 mm结构高度绝缘子,在反击雷电流370 kA时,极导线闪络接地极线路不闪络,其它大雷电流反击情况类似。该绝缘配置已接近甚至高于目前500 kV交流线路的绝缘配置水平,若要在接地极线路上实施经济代价相当大。根据已有±800 kV线路运行经验,由雷电反击引起单极闭锁事件极少,因此提高接地极线路绝缘配置以避免其反击闪络意义不大。

由仿真计算可知,对于呈“θ”型布置的垂直排列线路,极导线遭受绕击的概率趋近于0,因此只需考虑水平排列方式。当绕击雷电流大于150 kA时,正极导线遭受雷电绕击的概率趋近为零,当绕击雷电流大于60 kA时,负极导线遭受雷电绕击的概率趋近为零。所以本文分别取正极绕击雷电流150 kA和负极绕击雷电流60 kA,绕击耐雷性能计算如表4所示。

表4 绕击时接地极线路不感应闪络的最小绝缘子片数

Tab. 4 The minimum numbers of insulator on the electrode wires without induced shielding failure flashover

杆塔型式	闪络极	绕击雷电流/kA	接地极线路绝缘子片数/片	接地极线感应过电压闪络率/(次·100 km ⁻¹ ·40日 ⁻¹ ·年 ⁻¹)
水平	正极	150	15	0
排列	负极	60	12	0

由表4可知,对于绕击闪络,当接地极线路配置15片170 mm结构高度绝缘子,在正极绕击雷电流大于150 kA时,接地极线的闪络概率趋近为零;当接地极线路配置12片170 mm结构高度绝缘子,当负极绕击雷电流大于60 kA时,接地极线的闪络概率趋近为零。当接地极线路绝缘配置提高到15片170 mm结构高度绝缘子时,可基本避免极导线遭受雷电绕击时接地极线因感应过电压偏高造成的同时闪络,进而也基本避免了绕击引起的双极闭锁。根据已有±800 kV线路运行经验,雷击闪络绝大部分是由于绕击造成,因此提高接地极线路绝缘配置避免雷电绕击闪络是比较有意义的。

将接地极线路绝缘配置由9片提高到15片170 mm结构高度绝缘子后,共塔段线路发生极导线和接地极线同时闪络的情况只可能发生在很大的雷电流反击时。经计算,此时不发生极导线和接地极线同时闪络的安全运行年限为87年。目前特高压直流线路规程规范中尚无对此安全运行年限的具体要求。对照《1 000 kV特高压交流输变电工程过电压和绝缘配合》^[18]中规定“大跨越档在雷电过电压下安全运行年数不宜低于50年”,可见将接地极线路绝缘水平提高到15片170 mm结构高度绝缘子(并配合相应招呼角间隙)已能够满足特高压线路安全运行要求。即使雷电反击造成极导线和接地极线同时闪络,故障极重启失败引起双极强迫停运,停运率为0.011 5次/年,该指标也远高于系统要求的双极强迫停运率不大0.1次/年指标。

经济性方面,接地极线绝缘增强后,绝缘子串长增加1.02 m,杆塔呼高增加约1 m,横担长度增加约1.6 m,考虑124 km范围内(含共塔段114 km和独立架设段10 km)提高绝缘水平,本体投资增加约269万元。

综上,通过技术经济比较,对于±800 kV滇西北至广东特高压直流输电工程共塔架设段线路,推

荐采用提高接地极线绝缘配置的反事故措施,将由操作过电压水平确定的9片170 mm结构高度绝缘子提高到由雷电过电压水平确定的15片170 mm结构高度绝缘子。

4 结论

1)接地极线与直流线路共塔后,受接地极线的屏蔽保护作用,极导线的反击和绕击闪络率均低于独立架设直流线路。

2)接地极线与直流线路共塔后,由雷击引起的双极闭锁风险会有所增加,其本质原因为接地极线的绝缘水平较低,雷击引起极导线闪络时易引起接地极线一同闪络。

3)在接地极线上加装线路避雷器、将接地极线铁塔横担更换为复合横担、提高接地极线绝缘配置等措施均能有效降低共塔线路双极闭锁概率。

4)对于共塔架设线路,为了尽量降低双极闭锁概率,建议接地极线进行配置绝缘时,除了考虑操作过电压水平,还应进行雷电过电压校核。通过技术经济比较,对于±800 kV滇西北至广东特高压直流输电工程共塔架设段线路,推荐采用提高接地极线绝缘配置的反事故措施,建议将由操作过电压水平确定的9片170 mm结构高度绝缘子提高到由雷电过电压水平确定的15片170 mm结构高度绝缘子。

参考文献:

- [1] 赵婉君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 李倩, 廖民传, 陈云云, 等. ±800 kV特高压直流线路与接地极线路共塔专题研究 [R]. 广州: 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 2015.
- [3] 陈水明, 谢海滨, 屠幼萍, 等. ±500 kV直流极线与接地极线同塔架设时的感应过电压 [J]. 高电压技术, 2012, 38(5): 1186-1191.
CHEN S M, XIE H B, TU Y P, et al. Induced overvoltage while ±500 kV pole line and neutral line using common-tower [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(5): 1186-1191.
- [4] 任达勇. 天广直流工程历年双极闭锁事故分析 [J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 173-175.
REN D Y. Analysis of bipole block events over the years of Tian-Guang HVDC project [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 173-175.
- [5] 张建设, 韩伟强, 黄立滨. 兴安直流双极闭锁反事故措施实

- 时仿真研究 [J]. 南方电网技术, 2008, 2(4): 83-87.
- ZHANG J S, HAN W Q, HUANG L B, et al. Real-time simulation study on anti-accident measures of bipolar block in Xing-An HVDC project [J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(4): 83-87.
- [6] 李倩, 刘俊翔. 交直流同走廊输电线路地面电场研究 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(增刊1): 107-111.
- LI Q, LIU J X. Research on the total electric field under HVAC-HVDC adjacent-tower hybrid transmission lines [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(Supp.1): 107-111.
- [7] 吴子怡, 周唯. 滇西北至广东特高压直流送端换流站融冰方案技术经济分析 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(3): 131-135.
- WU Z Y, ZHOU W. Selection analysis of northwest Yunnan to Guangdong EHVDC converter stations ice melting scheme [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(3): 131-135.
- [8] 赵晓斌, 黄莹, 黎小林, 等. 云广直流输电工程接地极线路绝缘水平优化 [J]. 南方电网技术, 2014, 8(6): 23-26.
- ZHAO X B, HUANG Y, LI X L, et al. Optimization of electrode line insulation level of Yunnan-Guangdong DC transmission project [J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(6): 23-26.
- [9] 张冯硕, 吴高波, 李健, 等. 特高压直流感地极线路绝缘配合研究 [J]. 电力建设, 2015, 36(2): 86-90.
- ZHANG F S, WU G B, LI J, et al. Insulation coordination for UHVDC electrode line [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(2): 86-90.
- [10] 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): 1130-1135.
- YANG Q, ZHAO J, SIMA W X, et al. Lightning back-flash-over performance of the Yun-Guang UHV DC transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(7): 1130-1135.
- [11] 单蒙, 刘为雄. 基于 EMTP 的高压输电工程电磁暂态研究 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(1): 57-60.
- SHAN M, LIU W X. Research on electromagnetic transient of HV power transmission project based on EMTP [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(1): 57-60.
- [12] 廖民传, 汪晶毅, 李志泰, 等. 混压同塔多回输电线路绕击建模与评估 [J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2547-2552.
- LIAO M C, WANG J Y, LI Z T, et al. Modeling and evaluation of shielding failure for multi-circuit transmission lines in different voltage levels on the same tower [J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2547-2552.
- [13] 余江, 周红阳, 王斌. 南方电网直流典型故障的反事故措施方案研究 [J]. 南方电网技术, 2009, 3(增刊1): 62-66.
- YU J, ZHOU H Y, WANG B. Study on anti-accident measures of the typical HVDC faults in China Southern Power Grid [J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(Supp.1): 62-66.
- [14] 李振, 余占清, 何金良, 等. 线路避雷器改善同塔多回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.
- [15] 王剑, 万帅, 陈家宏, 等. 三峡—上海 ± 500 kV 同塔双回直流输电线路避雷器的雷电防护效果分析 [J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 450-456.
- WANG J, WAN S, CHEN J H, et al. Analysis of lightning protection with line surge arrester for the Three Gorges-Shanghai ± 500 kV double-circuit DC transmission line on the same tower [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 450-456.
- [16] 朱岸明, 杨大渭, 刘云贺, 等. FRP 复合材料杆塔横担研究应用现状及分析 [J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(10): 76-82+88.
- ZHU A M, YANG D W, LIU Y H, et al. Application and analysis of cross arms made from FRP composite materials in transmission towers [J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(10): 76-82+88.
- [17] 左玉玺, 薛更新, 孙强, 等. 750 kV 输电线路复合横担设计研究 [J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(1): 1-8.
- ZUO Y X, XUE G X, SUN Q, et al. Research on the design of composite cross arm for 750 kV transmission line [J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(1): 1-8.
- [18] 中国国家标准化管理委员会. 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: 中国标准出版社, 2009.

作者简介:



LI Q

李倩(通信作者)

1985-, 女, 陕西宝鸡人, 高级工程师, 高电压与绝缘技术硕士, 主要研究方向为输电线路电磁暂态仿真与分析、线路过电压与绝缘配合 (e-mail) liqian1209@163.com。

(责任编辑 郑文棠)