

35kV 架空送电线路防雷用并联间隙研究

陈维江¹, 孙昭英¹, 王献丽¹, 李庆余¹, 颜湘莲¹,
王风雷², 李 红², 王松虞², 王增志², 张文军²

(1. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100085; 2. 北京电力公司, 北京市 西城区 100023)

Study on Shunt Gap Lightning Protection for 35 kV Overhead Transmission Lines

CHEN Wei-jiang¹, SUN Zhao-ying¹, WANG Xian-li¹, LI Qing-yu¹, YAN Xiang-lian¹,
WANG Feng-lei², LI Hong², WANG Song-yu², WANG Zeng-zhi², ZHANG Wen-jun²

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100085, China;
2. Beijing Electric Power Corporation, Xicheng District, Beijing 100023, China)

ABSTRACT: To solve the faults caused by lightning stroke in 35kV overhead transmission lines, it is proposed to use shunt gap as the lightning protection. The protective principle of shunt gap is analyzed and the structure and structural sizes of shunt gaps for 35kV overhead transmission lines are designed. A lot of lightning impulse and power frequency arcing tests are performed with shunt gap test specimen, and test results show that shunt gap can effectively make insulator strings and wires exclusive from ablation of power frequency arc incurred by lightning stroke. The lightning trip-out rate of 35 kV overhead lines with shunt gap is calculated, on this basis the authors recommend that when shunt gaps are equipped in 35 kV transmission lines, in order to restrict the increase of the lightning trip-out rate the number of insulator pieces in a single string should be changed from original three pieces into four pieces.

KEY WORDS: 35 kV overhead transmission lines; lightning protection; shunt gap; lightning trip-out rate

摘要: 为解决 35 kV 架空送电线路的雷击问题, 提出采用并联间隙防雷保护方案, 分析了其保护原理, 设计了 35 kV 线路防雷用并联间隙的结构尺寸; 对并联间隙试品进行了大量的雷电冲击和工频电弧试验, 结果表明并联间隙能有效保护绝缘子串和导线免于雷击引起的工频续流电弧的烧蚀; 计算了带并联间隙线路的雷击跳闸率, 建议将 3 片绝缘子增加为 4 片, 加装并联间隙不会引起线路跳闸率增加。

关键词: 35 kV 架空送电线路; 防雷保护; 并联间隙; 雷击跳闸率

0 引言

架空送电线路采用的“堵塞式”防雷措施^[1-5](如架设避雷线、降低杆塔接地电阻、加强绝缘、加装

耦合地线、安装线路避雷器等)可提高线路的耐雷水平, 减小雷击跳闸率。随着电网架构的加强、继电保护和重合闸装置的普遍应用, “疏导式”防雷保护^[6-10]已成为“堵塞式”防雷措施的有力补充, 可用较少的投入解决线路的小概率雷击问题。北京电力公司管辖的 35 kV 线路近年来屡遭雷击, 导致绝缘子釉面损坏等事故; 中国电力科学研究院受其委托, 开展了 35 kV 线路防雷综合治理项目的研究, 提出线路加装并联间隙的防雷保护方案^[11]。

本文对线路加装并联间隙的保护原理进行分析, 设计 35 kV 线路绝缘子串并联间隙的结构, 对间隙试品进行雷电冲击和工频电弧试验, 并计算并联间隙对线路雷击跳闸率的影响, 所研制的并联间隙防雷保护装置已在工程中得到了应用, 运行效果良好。

1 并联间隙的保护原理

“疏导式”防雷保护的工作原理为: 允许线路有一定的雷击跳闸率, 雷击引起线路绝缘闪络后, 采取措施引导工频续流电弧飘离绝缘子串燃烧; 虽有雷击闪络, 但无永久性故障, 提高了重合闸成功的概率。

并联间隙的工作原理为: 在绝缘子串旁边并联 1 对金属电极, 构成保护间隙, 间隙距离小于绝缘子串的串长^[12]。正常运行时, 并联间隙具有均匀工频电场的作用。架空线路遭受雷击时, 在绝缘子串上产生较高的雷电冲击过电压, 由于并联间隙的雷电放电电压低于绝缘子串的放电电压, 间隙先放

电; 接续的工频电弧在电动力和热应力作用下^[13], 离开绝缘子串在间隙电极之间燃烧并向外发展, 保护绝缘子串免于损坏; 由于是瞬时性故障, 空气绝缘可自恢复, 保障了重合闸的可靠性。

2 并联间隙的设计

并联间隙的技术性能要求为: ①能定位雷电冲击闪络路径, 具有足够高的放电电压水平; ②能够疏导工频电弧离开绝缘子串, 固定在间隙高、低压电极上燃烧, 电极能耐受数次工频电弧的灼烧。

35 kV 绝缘子串并联间隙设计与安装结构如图 1 所示, 图中: Z_0 为绝缘子串的串长; Z 为并联间隙电极之间的最短距离; X_c 、 Y_c 和 X_p 、 Y_p 分别为上、下电极的形状参数, 各变量的单位为 mm。电极材料采用碳素结构钢。分析可知, 间隙的 50% 雷电放电电压需小于绝缘子串的放电电压, 且其不能引起线路频繁跳闸, 选取 Z/Z_0 在 50%~100% 之间。表 1 为研制的 35 kV 架空线路用典型绝缘子串并联间隙的电极几何尺寸和间隙距离。

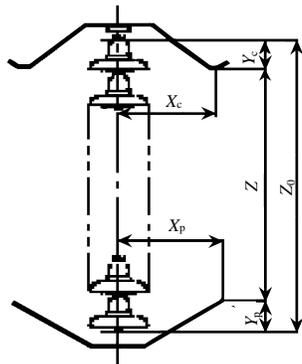


图 1 并联间隙结构

Fig. 1 The structure of shunt gap

表 1 并联间隙试样参数

Tab. 1 The parameters of shunt gap samples

参数	悬垂串			耐张串	
	I 型	II 型	III 型	IV 型	
上电极	Y_c /mm	100	73	0	100
($X_c=330$ mm)	编号	ZXS3310	ZXS3307	ZXS3300	ZNS3310
下电极	Y_p /mm	46	0	0	46
($X_p=350$ mm)	编号	ZXX3504	ZXX3500	ZXX3500	ZXX3504
间隙距离	Z_0 /mm	438	438	438	584
	Z /mm	292	365	438	438

3 并联间隙的试验

3.1 雷电冲击试验

(1) 50% 雷电冲击放电试验。

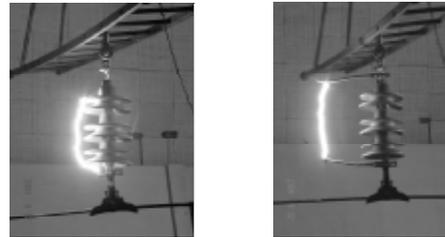
对绝缘子串加装并联间隙进行 50% 雷电冲击放电试验, 以验证雷电冲击闪络是否发生在间隙

高、低压电极之间。试验采用 XWP-7 型绝缘子, 结果如表 2 所示, 并以绝缘子串不带并联间隙时的 50% 放电电压 $U_{50\%}$ 为基础计算绝缘子串带并联间隙时的 50% 雷电放电电压的降低水平 $d_{U50\%}$ 。在所有绝缘子串并联间隙的雷电冲击放电试验中, 可观察到雷击闪络都发生在并联间隙的金属电极之间, 图 2 为绝缘子串不带和带并联间隙的典型放电路径照片。

表 2 雷电冲击试验结果

Tab. 2 Results of lightning impulse test

并联间隙型号	距离 Z /mm	$U_{50\%}$ /kV	$d_{U50\%}/\%$
无并联间隙	438	366	—
I 型(ZXS3310-ZXX3504)	292	210	42.6
II 型(ZXS3307-ZXX3500)	365	270	26.2
III 型(ZXS3300-ZXX3500)	438	290	20.8



(a) 无并联间隙

(b) 有并联间隙

图 2 雷电冲击放电路径

Fig. 2 Flashover paths of lightning impulse test

由表 2 可以看出, 对于 III 型并联间隙, 即间隙距离等于绝缘子串长 438 mm 时, 其 50% 雷电冲击放电电压较绝缘子串的放电电压下降 20.8%; 试验中所有被试的并联间隙都能形成放电通道, 可知并联间隙能定位雷击闪络路径。

(2) 伏秒特性试验。

对绝缘子串无并联间隙和绝缘子串并联 III 型间隙进行了伏秒特性试验, 目的是检验雷电放电路径是否随雷电冲击波头时间的变化而改变, 表 3 为伏秒特性曲线中 5 个点的试验结果。

表 3 伏秒特性试验结果

Tab. 3 Results of volt-second characteristics test

试验序号	1	2	3	4	5	
无并联 间隙	电压/kV	491	441	417	386	364
	波头时间/ μ s	1.43	1.92	2.47	3.57	4.77
	放电路径	沿绝缘子串				
III 型间隙 (ZXS3300- ZXX3500)	电压/kV	438	411	385	351	323
	波头时间/ μ s	1.33	1.96	2.57	3.50	4.73
	放电路径	沿间隙				

表 3 试验结果表明, 在雷电冲击伏秒特性试验的波头陡度范围内, 放电都发生在间隙的高、低压电极之间, 可见并联间隙定位雷电冲击闪络路径的保护特性不受雷电波头时间改变的影响。

3.2 工频电弧试验

(1) 概述。

线路遭受雷击后,由工频短路电流产生的续流电弧能否被引导至并联间隙燃烧,使绝缘子串免于烧损,可通过工频电弧试验进行验证。由于 35 kV 系统中性点不直接接地,雷击导致单相接地故障的短路电流不易起弧,需通过试验研究两相或三相遭雷击闪络并出现相间短路电弧的情形。

本文用单相绝缘子串并联间隙试验模拟相间短路出现的大电流燃弧现象,用三相绝缘子串试验研究并联间隙实际运行中的保护效果。试验采用 2 基 35 kV 上字形塔的塔头,悬挂三相绝缘子串和导线,绝缘子片数、塔头尺寸及导线线径都符合现场要求;用数字示波器记录试验波形,用高速摄像机拍摄试验中的电弧发展过程。

(2) 单相绝缘子串。

将并联间隙安装在双伞绝缘子串的一侧,与导线方向平行,间隙距离约 438 mm;试验采用了极为苛刻的条件,将熔丝紧贴绝缘子串;试验的短路电流分别为 0.8kA、10kA,相应的短路时间为 1.0~1.5 s 和 0.166~0.261 s,试验结果如表 4 所示。

表 4 单相绝缘子串试验结果

序号	短路电流/kA	短路时间/s	试验结果
1	0.8	1.0	电弧被引到电极之间,保护跳。
2	0.8	1.4	电弧被引到电极之间,电弧自熄。
3	0.8	1.5	电弧被引到电极之间,电弧自熄。
4	10	0.166	电弧被引到电极之间,保护跳。
5	10	0.21	电弧被引到电极之间,保护跳。
6	10	0.22	电弧被引到电极之间,保护跳。
7	10	0.25	电弧被引到电极之间,保护跳。
8	10	0.261	电弧被引到电极之间,保护跳。

分析表 4 可知,即使雷电冲击闪络发生在绝缘子串表面,并联间隙也有良好的引弧作用,能将电弧迅速从绝缘子串转移到并联间隙电极之间并向外发展,保护绝缘子串免于灼烧。

(3) 三相绝缘子串(水平安装并联间隙)。

试验现场安装了一段 35 kV 三相模拟线路,并联间隙与导线方向平行,间隙距离为 438 mm,熔丝位置紧贴绝缘子串,并联间隙试品的布置如图 3 所示。在 0.8kA、10kA 三相短路电流下各进行了 5 次试验,结果如表 5 所示。

经过 10 次大电流试验后,并联间隙的电极都有烧损,如图 4 所示,上电极烧蚀缩短 20mm,下电极球头烧蚀缩短 8 mm。表明并联间隙有良好的引弧效果,使绝缘子串及导线都未受损伤。



图 3 水平安装的并联间隙布置

Fig. 3 Test configuration of horizontal shunt gap

表 5 三相绝缘子串试验结果

Tab. 5 Results of three-phase insulator test

序号	短路电流/kA	短路时间/s	试验结果
1~5	0.8	0.22	电弧被引到间隙电极之间,保护定时跳。
6~10	10	1.0	电弧被引到间隙电极之间,保护定时跳。

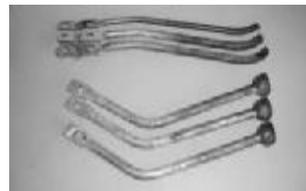


图 4 并联间隙上、下电极试验后状态

Fig. 4 The condition of up and down electrodes in shunt gap after test

短路电流为 10 kV 的工频电弧试验波形如图 5 所示,包括三相电压 U_a 、 U_b 、 U_c 和三相电流 I_a 、 I_b 、 I_c 的波形。

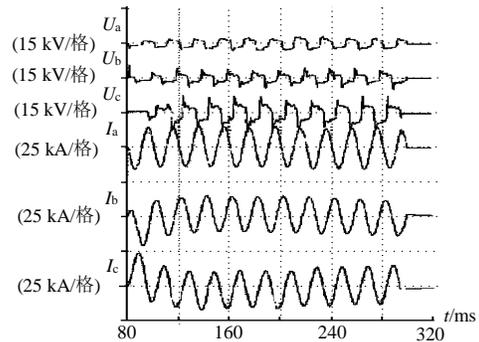


图 5 工频电弧试验波形

Fig. 5 Waveforms of voltage and current in power frequency arc test

图 6 为高速摄像机拍摄的电弧发展过程,闪络后三相电弧各自对地形成短路,随后距离较近的两相(垂直两相)电弧相连,电弧的弧根沿导线向远离电源侧方向移动,保护绝缘子串和导线不被烧损。

(4) 三相绝缘子串(垂直安装并联间隙)。

对于 35 kV 上字形杆塔,并联间隙还可以采用垂直导线方向的安装方式,如图 7 所示,进行了 2 次短路电流 10kA 的燃弧试验,间隙距离为 438mm。



图 6 三相电弧发展过程

Fig. 6 Development of three-phase arcs



图 7 垂直安装的并联间隙试验后状态

Fig. 7 The condition of vertical shunt gap after test

试验中观察到电弧迅速转移到并联间隙上并继续向远离绝缘子串的方向飘移,表明并联间隙有良好的引弧作用,使导线和绝缘子无损伤。

4 线路跳闸率的计算

绝缘子串加装并联间隙装置后,由于间隙距离短于串长,送电线路的雷击跳闸率会有所上升,有必要按照试验结果的 $U_{50\%}$ 进行验证计算,计算依据电力行业标准 DL/T 620-1997^[12]。

计算线路跳闸率的条件为:①无避雷线;②绝缘子型式 XWP-7;③导线型式 LGJ-240/30;④上导线悬挂高度 20.5 m,中导线悬挂高度 18 m;⑤冲击接地电阻暂按 20 Ω ;⑥导线弧垂暂按 3 m;⑦绝缘子串 50% 放电电压 $U_{50\%}=100+84.5 N(N$ 为绝缘子片数);⑧雷电流 I 超出概率的计算公式 $\lg P=-I/88$,⑨雷电流波头长度 2.6 μs ;⑩电晕效应校正系数 $k_1=1.15$ 。分别计算了线路无并联间隙的理论跳闸率,及由试验获得的 $U_{50\%}$ 对应的线路跳闸率,结果列于表 6。其中, n 为雷击跳闸率, Δn 为雷击跳闸率增加的水平。

表 6 35 kV 线路的雷击跳闸率

Tab. 6 Lightning trip-out rate of 35 kV lines

参数	无并联间隙	I 型间隙	II 型间隙	III 型间隙
Z/mm	438	292	365	438
$U_{50\%}/\text{kV}$	366(354)	210	270	290
I/kA	18.54 (17.93)	10.63	15.75	14.69
$P/\%$	61.6 (62.6)	75.7	66.2	68.1
$n/(\text{次}/(100\text{km}\cdot\text{a}))$	3.96 (4.03)	4.89	4.5	4.38
$\Delta n/\%$	—	23.5	13.6	10.6

注:建弧率为 58%,括号中的数据是公式计算的数据,其余数据为试验数据。

表 6 中,对于 III 型并联间隙,线路跳闸率增加至 4.38 次/(100 km·a),比绝缘子串无并联间隙的 3.96 次/(100 km·a)提高了 10.6%,但跳闸次数几乎一样,可见并联间隙的加装对线路跳闸率的影响是可以接受的。建议将 3 片绝缘子增加为 4 片,间隙短接 1 片或 0.5 片,既保证了间隙的保护效果,也不会增加线路的雷击跳闸率。

5 结论

(1) 并联间隙的保护原理为,允许线路有一定的雷击跳闸率,采用间隙装置与绝缘子串并联,定位雷电冲击闪络路径发生在间隙之间,疏导工频电弧离开绝缘子串至间隙电极上燃烧,保护绝缘子和导线免于烧损,提高了重合闸成功的概率。

(2) 设计了 35 kV 线路用典型的绝缘子串并联间隙结构和安装尺寸,研制出间隙样品,大量的雷电冲击、工频电弧试验和线路跳闸率的计算都验证了并联间隙防雷保护方案的可行性。

(3) 雷电冲击试验结果表明,3 片绝缘子串加装并联间隙,间隙距离等于绝缘子串长、小于绝缘子串的雷电闪络距离时,其 50% 雷电冲击放电电压较绝缘子串的放电电压下降约 20%,放电都发生在并联间隙的金属电极之间;工频电弧试验中,并联间隙有良好的引弧效果,保护绝缘子串和导线免于烧损。

(4) 3 片绝缘子串加装并联间隙后,短接了部分爬距,导致线路跳闸率增加为 4.38 次/(100 km·a),比未装间隙时的 3.96 次/(100 km·a)提高了 10.6%,跳闸次数几乎一样,可见并联间隙引起雷击跳闸率的增量是可以接受的。建议将 3 片绝缘子增加为 4 片,间隙短接 1 片或 0.5 片,既不会增加线路跳闸率,也可保证间隙的保护效果。

参考文献

- [1] 罗真海. 110 kV、220 kV 架空送电线路复合绝缘子并联间隙防雷保护研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2000.
- [2] 陈维江, 孙昭英, 王晓刚, 等. 10 kV 架空绝缘线路用防弧金具及放电筒位绝缘子的工频电弧试验条件[J]. 电网技术, 2005, 29(17): 5-7,13.
Chen Weijiang, Sun Zhaoying, Wang Xiaogang, et al. Power frequency arc test conditions of power frequency arc-protection hardware and clamping post composite insulators for 10 kV overhead insulation-covered conductors[J]. Power System Technology, 2005, 29(17): 5-7,13(in Chinese).
- [3] 罗真海, 陈勉, 陈维江, 等. 110、220 kV 架空输电线路复合绝缘子并联间隙防雷保护研究[J]. 电网技术, 2002, 26(10): 44-50.

- Luo Zhenhai, Chen Mian, Chen Weijiang, et al. Study on shunt gap lightning protection for 110 kV and 220 kV composite insulators [J]. Power System Technology, 2002, 26(10): 44-50(in Chinese).
- [4] 陈维江, 孙昭英, 李国富, 等. 110 kV 和 220 kV 架空线路并联间隙防雷保护研究[J]. 电网技术, 2006, 30(13): 74-79.
- Chen Weijiang, Sun Zhaoying, Li Guofu, et al. Development of parallel gap lightning protection device for 110 kV and 220 kV overhead lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 74-79(in Chinese).
- [5] 陈维江, 李庆峰, 来小康, 等. 10 kV 架空绝缘导线雷击断线用防弧金具研究[J]. 电网技术, 2002, 26(9): 27-30.
- Chen Weijiang, Li Qingfeng, Lai Xiaokang, et al. Development of arc-protection hardware against lightning-caused breaking of covered conductors in 10 kV distribution networks[J]. Power System Technology, 2002, 26(9): 27-30(in Chinese).
- [6] 陈维江, 孙昭英, 綦海昌, 等. 防止 10 kV 架空绝缘导线雷击断线用放电箝位柱式复合绝缘子的研究[J]. 电网技术, 2005, 29(16): 53-55.
- Chen Weijiang, Sun Zhaoying, Qi Haichang, et al. Development of clamping post composite insulators to prevent breakage of 10 kV overhead insulation-covered conductors caused by lightning stroke [J]. Power System Technology, 2005, 29(16): 53-55(in Chinese).
- [7] 陈维江, 孙昭英, 周小波, 等. 防止 10 kV 架空绝缘导线雷击断线用穿刺型防弧金具的研制[J]. 电网技术, 2005, 29(20): 86-88.
- Chen Weijiang, Sun Zhaoying, Zhou Xiaobo, et al. Development of arc-protection hardware with stabs to prevent breakage of 10 kV overhead insulation-covered conductors caused by lightning stroke [J]. Power System Technology, 2005, 29(20): 86-88(in Chinese).
- [8] 广电集团佛山供电分公司, 中国电力科学研究院. 110 kV 和 220 kV 架空送电线路间隙防雷保护研究[R]. 佛山: 广电集团佛山供电分公司, 2003.
- [9] 李汉明, 陈维江, 陈葛松, 等. 同塔架设不同电压等级多回线路短路故障和防雷保护问题及对策研究[C]. 中国电机工程学会高压专业委员会过电压及绝缘配合学组 2006 年学术年会论文集, 乌鲁木齐, 2006.
- [10] 陈勉, 吴碧华, 罗真海. 探讨高压架空送电线路采用“疏导”型思想的防雷保护[J]. 广东电力, 2001, 14(4): 36-37,58.
- Chen Mian, Wu Bihua, Luo Zhenhai. On “scatter” type lightning protection scheme for HV overhead power transmission lines [J]. Guangdong Electric Power, 2001, 14(4): 36-37,58(in Chinese).
- [11] 中国电力科学研究院, 北京电力公司. 35kV 架空送电线路防雷新技术的研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [12] DL/T620-1997, 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].
- [13] 谷山强, 何金良, 陈维江, 等. 架空输电线路并联间隙防雷装置电弧磁场力计算研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 140-145.
- Gu Shanqiang, He Jinliang, Chen Weijiang, et al. Magnetic force computation for the electric arc of parallel gap lightning protection device on overhead transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7): 140-145(in Chinese).

收稿日期: 2006-12-16。

作者简介:

陈维江(1958—), 男, 教授级高级工程师, 博士生导师, 研究方向为电力系统过电压保护、绝缘配合及电磁环境, E-mail: chenwj@whvri.com;

孙昭英(1945—), 女, 教授级高级工程师, 研究方向为高电压试验技术和电力系统过电压保护、绝缘配合;

王凤雷(1966—), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事电网运行管理、安全生产管理工作;

李红(1965—), 男, 高级工程师, 长期从事输电线路技术管理和运行管理工作。

(责任编辑 马晓华)

(上接第 60 页 continued from page 60)

- [4] 马志强, 黎小林, 钟定珠. 直流输电大地电流对交流系统影响的网络分析法[J]. 广东电力, 2003, 18(12): 4-8.
- Ma Zhiqiang, Li Xiaolin, Zhong Dingzhu. Network algorithm to analyze effects of DC transmission ground current on AC system [J]. Guangdong Electric Power, 2003, 18(12): 4-8(in Chinese).
- [5] 赵杰, 曾嵘, 黎小林. HVDC 输电系统中直流对交流系统的影响及防范措施研究[J]. 高压电器, 2005, 41(5): 324-329.
- Zhao Jie, Zeng Rong, Li Xiaolin. Study on the impact of HVDC ground Return current on AC system and resolution[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(5): 324-329(in Chinese).
- [6] 曾连生. 直流输电接地极电流对电力变压器的影响[J]. 电力建设, 2004, 25(12): 22-24.
- Zeng Liansheng. Influence of DC transmission ground electrode current on power transformers[J]. Electric Power Construction, 2004, 25(12): 22-24(in Chinese).
- [7] 朱艺颖, 蒋卫平, 曾昭华, 等. 抑制变压器中性点直流电流的措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 23(13): 1-7.
- Zhu Yiyang, Jiang Weiping, Zeng Zhaohua, et al. Studying on measures of restraining DC current through transformer neutrals [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 23(13): 1-7(in Chinese).
- [8] 赵杰, 张波. 输电线路地线对流入变压器中性点直流电流的影响[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 60-64.
- Zhao Jie, Zhang Bo. Impact of ground wire in HVDC transmission line on direct current flowing into neutral point of power transformer [J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 60-64(in Chinese).
- [9] Kovarsky D, Pinto L J, Caroli C E, et al. Soil surface potentials induced by ITAIPU HVDC ground return current part i-theoretical evaluation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(3): 1204-1210.
- [10] 陈水明. 直流输电接地极电流场及其影响的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1992.

收稿日期: 2006-06-16。

作者简介:

刘曲(1978—), 男, 博士研究生, 从事直流接地极相关技术的研究;

李立涅(1941—), 男, 教授级高级工程师, 从事直流输电技术和直流工程建设的研究;

郑健超(1939—), 男, 博士生导师, 中国工程院院士, 从事高电压技术和能源政策的研究。

(责任编辑 宋书芳)