

±1100 kV 换流站直流场防雷设计研究

王 强 包维瀚 余 波 苏 林 丁晓飞 邹家勇

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021)

摘 要: ±1100 kV 是特高压直流输电工程中的全新电压等级,±1100 kV 换流站设计尤其是换流站中直流场的设计面临许多全新的挑战。这里对防雷设计的方法进行了对比研究,确定使用滚球法进行防雷设计,同时提出了击距系数的取值,确定了直流场各个区域的击距。提出了±1100 kV 换流站直流场防雷具有4个方面的特殊性:较大的空气净距要求与相对较小的雷电击距的矛盾;小雷电流保护区域范围扩大;直流场空间受限;难以确定“危险剖面”。通过上述研究提出了适用于±1100 kV 换流站直流场,利用空间上多根相交或不相交的避雷线及耐受雷击较强的导体联合保护,构建一种具有空间层次结构的防雷方案。并提出了采用三维建模进行工程校验。

关键词: ±1100 kV 直流场; 击距系数; 防雷; 层次结构

中图分类号: TM721.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)04-0044-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.04.010

Research on Protection Design against Lightning for DC Yard of ±1100 kV Converter Station

Wang Qiang, Bao Weihuan, Yu Bo, Su Lin, Ding Xiaofei, Zou Jiayong

(Southwest Electric Power Design Institute, Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: ±1100 kV is a brand new voltage level for HVDC transmission project, the design for ±1100 kV converter station, especially for its DC yard, is full of new challenges. Different calculation methods for protection against lightning are compared, and the rolling sphere method is confirmed as the design tool, meanwhile, the strike distance factor is also proposed and then the strike distance is figured out. The particularity of the protection design against lightning for ±1100 kV DC yard is considered as below: a) the contradiction between the large air clearance requirement and the small strike distance; b) the area with small lightning protection current is enlarged; c) the space of DC yard is limited; d) it is quite difficult to figure out a "risky section". According to the above-mentioned design principles and the features of ±1100 kV DC yard, a protection plan against lightning is proposed which utilizes multiple shielding lines or conductor that can withstand large lightning current (intersected or not) to form a joint protection, and establishes a protection plan against lightning with layered structure. The proposed plan is evaluated with 3D modeling.

Key words: ±1100 kV DC yard; strike distance factor; protection against lightning; layered structure

0 引 言

±1100 kV 是直流输电工程中的全新电压等级,其过电压的抑制与绝缘配合的优化国内已经做过很多研究^[1-5],得益于这些研究确定了设备的绝缘水平,使工程进入实质阶段。然而已有的±1100 kV 工程有关过电压的研究大多针对内过电压或雷电侵入波,对于换流站本身的直击雷防护研究较少。

雷击是造成电力系统故障的主要原因之一。直

流换流站不同于交流变电站,主回路中很多设备都是电子设备,对雷电的耐受能力比交流系统的一次设备明显更弱^[6]。对于直击雷的防护主要目的是防止雷电流通过直击或绕击直接流过电气设备造成绝缘损坏,或者雷电流经防雷装置流入接地网带来地电位抬升对电气设备造成反击。换流站的防雷保护若采用避雷针,则小的雷电流绕开避雷针的拦截进入换流站的概率仍较大,因此对于换流站的直流开关场,必须采用密集的避雷线才能起到有效拦截小电流雷电直击的作用^[7]。对于±1100 kV 换流站

的雷电防护,尤其是其直流场的雷电防护而言,有很多问题亟待解决。下面首先通过对比分析目前国内外常用的防雷设计方法,确定适用于±1100 kV换流站直流场的设计方法,然后分析研究±1100 kV换流站直流场防雷设计的特殊问题;随后提出一种具有分层结构,利用避雷线的空间位置关系实现雷电防护的方案;最后采用三维建模在工程设计中进行了实际校验。

1 ±1100 kV 换流站直流场防雷计算方法的确

目前国内外常见的防雷设计方法主要有:经验法^[8-9]、电气几何模型法^[8,10]、先导发展模型法^[11]以及分形分析模型法^[11]等。

1) 经验法。该方法是长期存在于防雷设计历史中并且直到现在还在使用的一种方法。经验法最初可分为固定角度法和经验曲线法,后来总结发展成为普通变电站常用的折线法。该方法的建立来自于对于比例缩微模型的直接试验经验总结^[12],其计算结果与雷电流大小无关,无法反应雷电流的影响。

2) 电气几何模型法(electrical geometry model, EGM)。该方法的原理是当下行先导逼近大地或地面物体,只要到达某一击距范围内,雷击点就确定了。基于这一理论可以方便地通过几何作图确定防雷设施的位置。滚球法就是该理论的一种具体应用。击距是电气几何模型法中的重要概念,它决定了导线、避雷线、大地之间的受雷范围。击距与雷电的回击电流(return stroke current)紧密相关,目前主要有以下经验公式:

$$S = 2I + 30(1 - e^{-\frac{1}{6.8}}) \quad (\text{Darveniza}) \quad (1)$$

$$S = 10I^{0.65} \quad (\text{Love}) \quad (2)$$

$$S = 9.4I^{\frac{2}{3}} \quad (\text{Whitehead}) \quad (3)$$

$$S = 8I^{0.65} \quad (\text{IEEE}) \quad (4)$$

$$S = 3.3I^{0.78} \quad (\text{Suzuki}) \quad (5)$$

式中: I 为回击电流, A; S 为击距, m。

结合换流站常见的最大允许雷电流。不同的公式所确定的击距差异较大^[13]。

根据国内换流站设计工程经验,一般按照文献[8]计算击距:

$$S = 8kI^{0.65}, \quad (6)$$

式中 k 为击距系数。IEEE 中规定对于避雷线 k 取

1;对于避雷针 k 取 1.2。但是对于系数 k 的选取并不是一成不变的,它还将受到导体高度等多种因素的影响^[13]。

3) 先导发展模型法(leader progression model, LPM)。该方法是基于雷电观察和长间隙放电试验的成果^[14],基本思想是在雷电先导向下发展的过程中,当地面物体的场强超过一定值时,会在地面物体产生迎面先导。随着上、下行先导的发展,当两者间的场强超过空气间隙的临界击穿场强时,即发生雷击。该方法物理意义清晰,具有优势。但是由于缺少试验和运行数据的验证,对于先导发展模型的判据存在不同观点^[15-16],许多计算参数也不尽相同,计算结果相差很大,工程实际中不宜使用。

4) 分形模型法。分形理论是20世纪70年代发展起来的一门新兴科学。分形模型的关键参数是雷电通道的分形维数,主要通过分析世纪雷电放电图片来得到^[17]。

以上方法应用于直流场的防雷设计,最直接的体现便是确定避雷线的间距。来自清华大学的团队曾经依托±800 kV 奉贤换流站工程对4种方法进行了比较^[18]。表1为文献[18]中根据不同方法计算出的避雷线间距(此间距约等于击距的2倍)。

表1 不同方法计算的避雷线间距比较

耐雷水平	折线法	滚球法	先导发展模型	分形模型
	/m	/m	/m	/m
0.5	46	9.2	12.0	11.6
1	46	14.4	17.0	16.1
1.5	46	18.7	20.8	20.3
5	46	41.0	36.4	33.4
10	46	64.3	62.0	55.9

表1中,滚球法计算的击距系数都按0.9考虑。由表1可以看出,对于小雷电流,滚球法计算出的结果较为保守,而对于较大雷电流则其计算结果与其他方法趋于一致。

经过对不同防雷计算方法的分析,认为滚球法的防雷计算可靠性较高,且工程设计易于施行,推荐应用滚球法进行±1100 kV直流场的防雷设计。推荐滚球法的击距计算引入系数 k_s , 将式(6)修正为

$$S = 8kk_sI^{0.65} \quad (7)$$

系数 k_s 取值如下:

$$k_s = \begin{cases} 1 & I < 5 \text{ kA} \\ 0.9 & I \geq 5 \text{ kA} \end{cases}$$

根据以上原则,±1100 kV换流站直流场的最大允许雷电流与对应的击距如表2。

表2 直流场雷击电流与击距

序号	保护区域	最大允许雷击电流/kA	雷电流击距/m
1	直流极母线(包括平波电抗器、直流滤波器电容器构架)	10	32.20
2	金属回路转换母线,从中性母线隔离刀闸起	10	32.20
3	中性母线,包括平波电抗器、从平波电抗器到中性母线隔离刀闸,包括 DCF 低压设备	5	20.50
4	中性母线隔离刀闸到第1基接地极线路杆塔	5	20.50
5	换流器旁通开关和隔离刀闸	2	12.55
6	中性母线,从穿墙套管到平波电抗器	2	12.55
7	极母线,从穿墙套管到平波电抗器	2	12.55

2 ±1100 kV 换流站直流场防雷设计的特殊问题分析

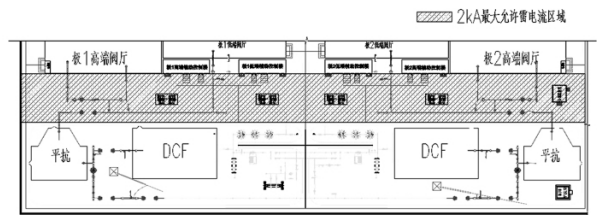
由于电压等级的提升,设备的外绝缘成为了限制设备制造的瓶颈,即使制造出了±1100 kV的户外设备,其巨大的外形尺寸也会更加容易受到环境条件的影响,增加了运行的不可靠性。因此±1100 kV宜采用户内直流场,将高电压设备布置于户内,从而通过优化电极形状有效地降低设备制造难度。目前建设中的±1100 kV 昌吉—古泉特高压直流工程的直流场均采用户内直流场,在直流场的设计过程中,综合考虑了空气净距、运行方式、检修需求、资源友好、经济适用等需求后,直流场的防雷设计可能面临以下新问题。

1) 空气净距与击距的矛盾

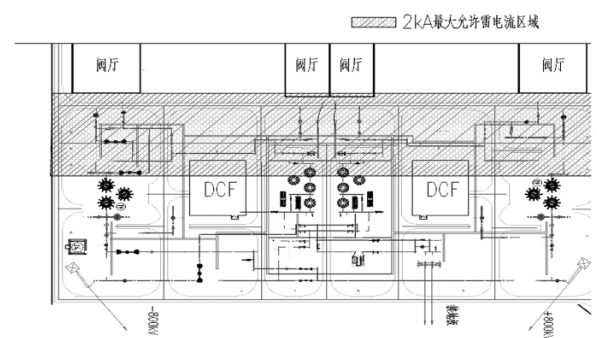
根据±1100 kV 直流场绝缘配合与空气净距计算的结论,±1100 kV 导体对地的空气净距取值应为16~18 m。若±1100 kV 等级导体附近存在最大允许雷击电流为2 kA的区域,则根据表2该区域的雷电流击距为12.55 m,即两根平行避雷线间的最大距离不得超过25.1 m。由于直流场不同电压等级导体交错,两根避雷线间可能存在高压导体,空气净距的要求不允许两根避雷线相互靠近;而为了保护下方的小雷电流区域,雷电击距的要求又不允许两根避雷线互相远离。

2) 小雷击电流(≤2 kA) 范围扩大

直流场防雷设计的难点主要在小雷击电流(≤2 kA) 保护区域,该区域雷电流击距小,避雷线要求密集,而又往往受限于场地或带电距离等。图1示意了常规±800 kV 换流站小雷电流保护区域。



(a) 与一字型阀厅适应的直流场



(b) 与面对面阀厅相适应的直流场

图1 ±800 kV 直流场小雷电流保护区域

由图1可以看出,以往±800 kV 直流场2 kA 及以下雷击电流保护区域大都位于阀厅与直流场衔接的矩形区域。这是因为2 kA 雷电流保护区域主要位于平波电抗器到阀厅直流穿墙套管之间的区域。如此布置使得防雷设计较为简单,因为其一,该区域远离极线出线,不受高压直流出线及引下线的电气距离限制;其二,小雷电流保护区域较为集中,易于避雷线的集中布置。

对于±1100 kV 直流场,其小雷电流保护区域分布大不相同。以与一字型阀厅布置相适应的±1100 kV 直流场为例,由于设备制造的限制采用了户内直流场方案,为了让极线出线远离控制楼便将极线朝外侧布置,这样将直流滤波器高压侧布置到了户内直流场靠近控制楼的一侧。又由于户内直流滤波器半压检修的需要,不得不将高低端阀厅间的联络母线(±550 kV 等级)朝外侧布置,造成2 kA 防雷保护区域贯穿整个直流场。图2示意了±1100 kV 直流场2 kA 雷击电流的保护区域。

如图2所示,±1100 kV 直流场的小雷电流保护区域(表2中2 kA 区域) 扩大为深色区域。无论横向还是纵向,该区域都有很大程度的延展,且部分

区域距离 ±1100 kV 极线出线很近,该区域防雷面临空气净距与击距互相制约的困难局面。

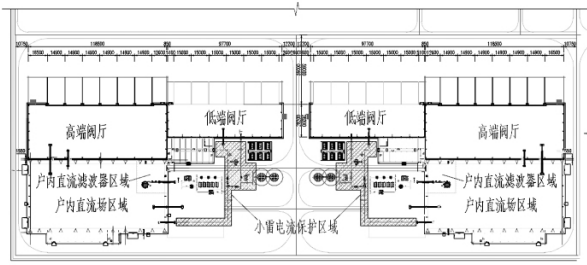


图2 ±1100 kV 直流场小雷电流保护区

3) 直流场空间受限

±1100 kV 直流场的空气净距(户内 13 ~ 15 m, 户外 18 m) 明显较 ±800 kV 直流场(9 m) 增大,且采用了户内方案也会带来建筑物增加,因此似乎 ±1100 kV 直流场的占地理所当然地比 ±800 kV 直流场大很多。但是由于 ±1100 kV 工程投资浩大,在科研与设计过程中节省投资、节约用地是优化重点。±1100 kV 直流场占地与近期 ±800 kV 换流站对比见表 3。

表3 直流场占地对比表

换流站名称	尺寸	占地/hm ²
±1100 kV 古泉站	480 m × 86 m	4.12
±800 kV 泰州站	399.5 m × 100 m	3.99
±800 kV 临沂站	311.75 m × 122 m	3.80

可以看出 ±1100 kV 古泉换流站直流场的占地面积仅比 ±800 kV 直流场增加约 1000 m²,足以见得 ±1100 kV 直流场布置的紧凑程度。直流场空间的限制使得避雷线塔难以设置。

4) “危险剖面”难以确定

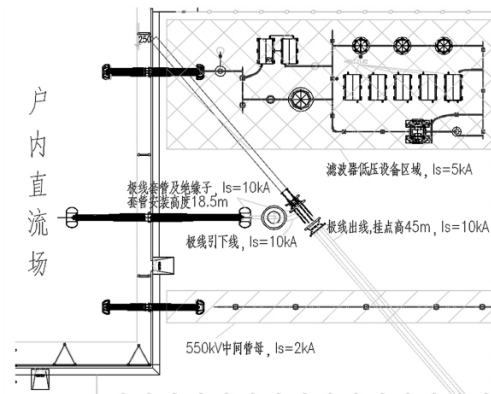
通常多根避雷线会被用来保护同一个区域,若这些避雷线组成一个平面上的规则图形(例如矩形、三角形)则可以方便地找到一个“危险剖面”从而快速完成滚球法防雷计算。但是在 ±1100 kV 直流场的防雷设计中,为了克服所提的种种困难,在多根避雷线的协同保护设计过程中,可能会考虑将多根避雷线设置成空间上彼此不相交的形式,对于这类避雷线用滚球法校验,是难以通过解析或是作图的方式确定“危险剖面”的,防雷设计的校验需要寻找新的方法。

3 ±1100 kV 换流站直流场防雷设计方案的提出

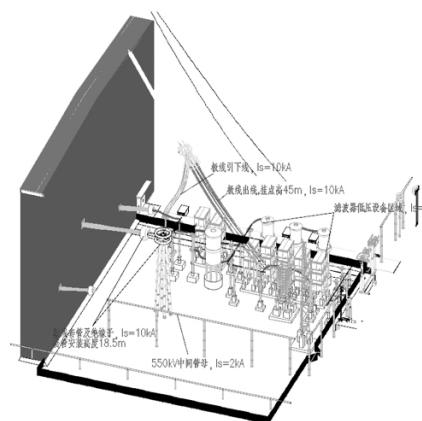
针对 ±1100 kV 换流站直流场防雷设计的特殊

性,下面提出一种利用多根避雷线的空间分布以及耐雷能力高的导体联合防雷的方案。

图3示意了 ±1100 kV 换流站直流场极线出线附近的布置,这是一处重点防雷区域。



(a) ±1100 kV 极线出线区域平面布置



(b) ±1100 kV 极线出线区域轴测

图3 ±1100 kV 极线出线区域布置

如图3可知,上面所提的几个问题在此区域都很突出。首先,从空间上分析,该区域布置设备较多,且电压等级跨度较大,从 ±1100 kV、±550 kV 到中性线电压等级,再加上较为复杂的滤波器低压部分均在此区域交织,使得该区域难以设置避雷线塔。其次,从空气净距分析,±550 kV 母线(最大允许雷电流为 2 kA) 位于 ±1100 kV 绝缘子下方,这样布置是可行的。因为 ±1100 kV 对 ±550 kV 只有 5.2 m 的空气净距需求,而避雷线却不能从二者之间穿过,而且 ±1100 kV 对避雷线的空气净距需求达 16 m,因此避雷线只能从被保护区域外侧绕。

如图4所示,在 $h = 23$ m 层增设避雷线 DCY - W9、DCY - W12、DCY - W14,这些避雷线满足了空气净距的要求,但是却无法防护 2 kA 的雷击(对应击距 12.55 m)。由于避雷线无法再进一步靠近被保护设备(550 kV 管母线),因此将耐受雷电雷击水平更高

的导体(极线出线、极线引下线)考虑成保护导体。

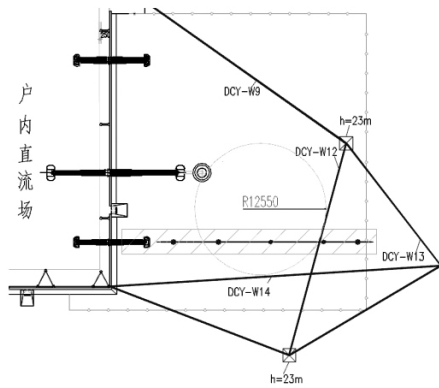


图4 ±1100 kV极线出线区域的避雷线设置

如图5所示,将极线及其引下线也纳入防雷保护导体。

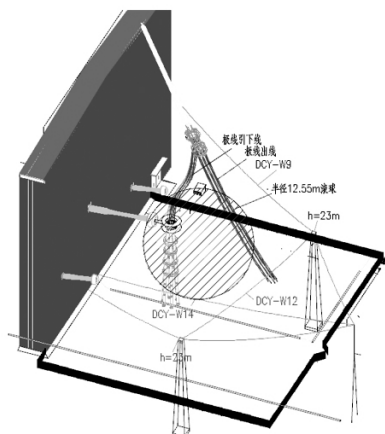


图5 引入极线及其引下线的防雷方案

图5中,极线出线、极线引下线与避雷线DCY-W9、DCY-W12、DCY-W14几根空间上不相交的保护线共同保护了下方2kA的防雷区域。对于滤波器等低压设备(最大允许雷电流为5kA)同样可以利用极线出线进行保护。而极线出线本身由其上方65m高的避雷线保护。

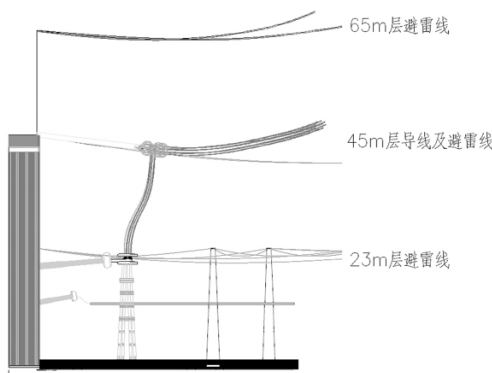


图6 防雷方案的分层结构

如图6所示,±1100 kV直流场的防雷方案充分利用了空间中不相交保护线(导线与避雷线)的特性,彻底地发挥了滚球法的效用,最终提出了一种具有分层结构的防雷方案。

4 ±1100 kV换流站直流场防雷设计方案的校验

对所提方案进行校验计算时,由于无法确定“危险剖面”,无论从理论分析还是从作图分析都难以实现。因此建立了设备与导体的比例三维模型,见图7。

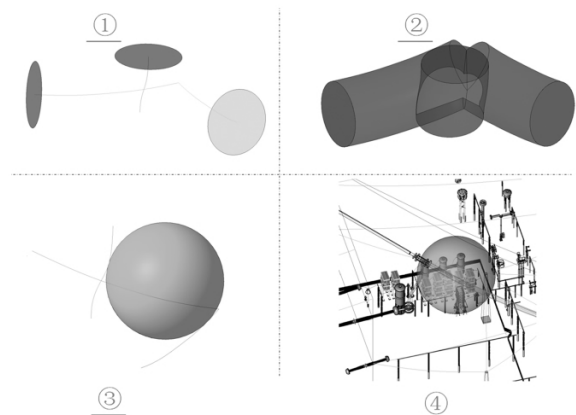


图7 防雷方案的三维校验

如图7所示,在三维模型中,首先确定做出参与联合保护的多根导体为中心,以击距为半径的“管道”,多根管道在空间中的交点即为最终位置的滚球球心。做出此球后便可以在三维模型中求得保护范围。这对工程设计实践有重大帮助。

5 结语

从解决±1100 kV换流站直流场的防雷问题出发,首先对比研究了目前常用的防雷计算方法,确定了采用滚球法进行工程设计,并指出滚球法的击距系数应随着雷击电流的增大而减小,同时提出了击距系数的推荐取值。

分析了±1100 kV换流站直流场的防雷设计特殊性主要体现在以下4个方面:1)较大的空气净距要求与相对较小的雷电击距的矛盾;2)小雷电流保护区域范围扩大;3)场地受限;4)难以确定“危险剖面”。

提出了适用于±1100 kV换流站直流场,利用空

间上多根相交或不相交的避雷线或耐受雷击较强的导体联合保护,构建一种具有层次结构的防雷方案,并在工程设计中推荐采用三维建模进行校验。

所提出的相关方法解决了±1100 kV换流站直流场的防雷设计问题,有利于±1100 kV的顺利推进。

参考文献

[1] 陈锡磊,周浩,王东举,等. ±1100 kV 特高压直流换流站绝缘配合关键问题研究[J]. 高电压技术,2013,39(12):3015-3021.

[2] 聂定珍,马为民,余世峰,等. ±1000 kV/±1100 kV 特高压直流输电系统换流站的绝缘配合(英文)[J]. 高电压技术,2012(12):3156-3160.

[3] 姬大潜,刘泽洪,张进,等. ±1100kV 特高压直流输电换流站内深度限制过电压水平研究[J]. 电网技术,2012,36(10):55-60.

[4] 朱家骥. 对中国1100 kV 电网过电压及绝缘水平的建议[C]. 中国电机工程学会高电压专业委员会过电压及绝缘配合学组2006年学术年会,2006:20-23.

[5] 周沛洪,何慧雯,戴敏,等. ±1100 kV 直流换流站避雷器布置、参数和设备绝缘水平的选择[J]. 高电压技术,2014,40(9):2871-2884.

[6] 胡军,李伟,何金良,等. ±800 kV 特高压直流开关场内避雷线的参数选择[J]. 高电压技术,2010,36(1):136-143.

[7] 张翠霞,葛栋,殷禹. 直流输电系统的防雷保护[J]. 高电压技术,2008,34(10):2070-2074.

[8] IEEE Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations: IEEE Standard 998-2012[S] 2012.

[9] 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范:

GB/T 50064-2014[S] 2014.

[10] 建筑物防雷设计规范:GB 50057-2010[S] 2010.

[11] 曾嵘,何金良,陈水明. 输电线路雷电防护技术研究(二):分析方法[J]. 高电压技术,2009,35(12):2910-2916.

[12] C. F. Wagner,G. D. McCann,G. L. MacLane,Jr. Shielding of Transmission Lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1991,60(4):318-328.

[13] 张桦,陈涛. 电气几何模型雷电击距分析研究[C]. 中国电机工程学会高电压专委会学术年会,2007.

[14] 万启发,霍锋,谢梁,等. 长空气间隙放电特性研究综述[J]. 高电压技术,2012,38(10):2499-2505.

[15] 钱冠军. 下行雷闪屏蔽问题的研究及其在输电线路中的应用[D]. 武汉:华中理工大学,1998.

[16] 曾嵘,周旋,王泽众,等. 国际防雷研究进展及前沿述评[J]. 高电压技术,2015,41(1):1-13.

[17] H E Jinliang,Zhang Xuwei,Dong Lin,et al. Fractal Model of Lightning Channel for Simulating Lightning Strikes to Transmission Lines[J]. Science in China, Series E,Technological Sciences,2009,52(11):3135-3141.

[18] 何金良,董林,曾嵘,等. ±800 kV 特高压直流开关场内避雷线间距分析[J]. 高电压技术,2010,36(1):19-25.

作者简介:

王强(1965),硕士、教授级高级工程师,从事输电线路技术研究及设计工作;

包维瀚(1989),工学硕士、工程师,从事换流站绝缘配合与防雷接地设计工作。

(收稿日期:2018-05-14)

(上接第43页)

[50] 魏巍,王渝红,李兴源,等. 交直流电力系统PSS和直流附加控制的协调[J]. 电力自动化设备,2010,30(1):53-57.

[51] 孙凌,李兴源,李宽,等. 交直流并联电力系统PSS和直流附加控制器协调优化设计[J]. 华东电力,2013,41(9):1835-1839.

[52] 唐峰,赵登福,沈赞坝. 交直流电力系统中附加控制器与稳定器的协调设计[J]. 西安交通大学学报,1993,27(1):41-48.

[53] 毛晓明,张尧,管霖,等. 南方交直流混合电网区域振荡的协调控制策略[J]. 电力系统自动化,2005,29(20):55-59.

[54] Li Yong,Rehtanz C,Rüberg S,et al. Wide-area Robust Coordination Approach of HVDC and FACTS Controllers for Damping Multiple Inter-area Oscillations

[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2012,27(3):1096-1105.

[55] 杨波. HVDC与SVC非线性协调控制的研究[D]. 成都:四川大学,2006.

[56] 温苾芳. SVC与HVDC的非线性变结构协调控制的研究[D]. 成都:西南交通大学,2010.

[57] 郭小江,马世英,卜广全,等. 直流系统参与电网稳定控制应用现状及在安全防御体系中的功能定位探讨[J]. 电网技术,2012,36(8):116-123.

作者简介:

王磊(1989) 硕士研究生,研究方向为高压直流输电;
胡永银(1989) 硕士研究生,研究方向为电力系统高压直流输电;

张珂(1990) 硕士研究生,研究方向为配电网自动化。

(收稿日期:2018-01-15)