

特高压直流线路限制操作过电压用无间隙避雷器的安装方式

杨 博, 孙成贤, 王宁宁, 孙传政, 赵庆周

(山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250100)

摘 要:当前架空输电线路主要安装限制雷电过电压避雷器, 限制操作过电压无间隙避雷器的安装及应用仍是空白, 这种避雷器在 ± 1100 kV 昌吉—古泉特高压直流输电线路首次安装, 可将全线操作过电压限制在1.5 p. u. 以下, 从而缩减间隙值、减少杆塔尺寸及交叉跨越距离, 大大节省工程投资。该文提出在线路直线塔和耐张塔上安装避雷器的多种方案; 通过对比分析, 选用外挑支架悬挂式安装避雷器方案为最佳方案; 并在此基础上分析避雷器静、动态荷载, 创新设计塔头布置型式、选型引流线及设计连接金具。通过实际工程中的安装和运行, 首次验证特高压直流线路安装无间隙避雷器的可行性, 为线路安装避雷器提供范例。

关 键 词:无间隙; 避雷器; 限制操作过电压; 特高压直流; 直线塔; 耐张塔

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.04.024 中图分类号:TM753 文章编号:1673-9140(2021)04-0188-08

Installation mode of gapless arrester for limiting operating overvoltage on UHV DC line

YANG Bo, SUN Chengxian, WANG Ningning, SUN Chuangzheng, ZHAO Qingzhou

(Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250100, China)

Abstract: Most of arresters are external gap arresters for limiting the lightning overvoltage on overhead transmission lines. Arresters for limiting operating overvoltage are not applied on power transmission lines. After the first installation of gapless arresters for limiting operating overvoltage on ± 1100 kV Changji-Guquan UHV DC transmission line, the operating overvoltage for the whole line can be limited below 1.5 p. u., thus the clearance value is reduced, tower size and cross-over distance are reduced, engineering investment is significantly saved. The installation schemes of arrester for line tangent and tension tower are proposed in this paper. Through comparative analysis, the hanging mounting scheme on the outer pick bracket is selected as the best scheme. The static and dynamic loads of arresters, innovative tower head layout design, drainage line selection and connection hardware design are analyzed on the basis of the best scheme. Through installation and operation on real lines, the feasibility of installing gapless arresters on UHV DC lines is verified for the first time, and provides an example for the installation of gapless arresters.

Key words: gapless; arrester; limiting operating overvoltage; UHV DC; tangent tower; tension tower

特高压直流输电已成为中国大电网的重要组成部分^[1-2],在中国能源西电东送形势下,能源产地与东部消费地之间距离越来越大,一般为 1 000~3 000 km^[3]。另一方面,目前已建多条特高压直流输电线路占据了多省份的线路走廊,如:±800 kV 哈郑线途经新疆、甘肃、宁夏、陕西、山西、河南六省区,±800 kV 酒湖线途经甘肃、陕西、重庆、湖北、湖南 5 省(市),±1 100 kV 吉泉线途经新疆、甘肃、宁夏、陕西、河南、安徽六省区。线路走廊日趋紧张,后期西电东送的特高压线路将进入高海拔的天山、祁连山脉及黄土高原,而高海拔地区引起空气放电间隙值增大,绝缘长度增加,进而引起杆塔尺寸及交叉跨越距离取值增加,工程造价显著提高。另外,对于特高压直流线路,沿线各点接地后,在健全极线路产生的操作过电压分布特点为伞形,如图 1 所示,在线路过电压较高的中部采用分布式安装避雷器是限制操作过电压的主要措施。限制操作过电压后便可有效减小空气放电间隙,建立基于泄漏电流的输电线路状态监测系统^[4-5],从而减小杆塔尺寸和高度,提高电子式电流互感器运行稳定性和可靠性^[6-7],降低工程造价。因此,急需开展限制操作过电压避雷器在特高压直流线路安装的研究工作。

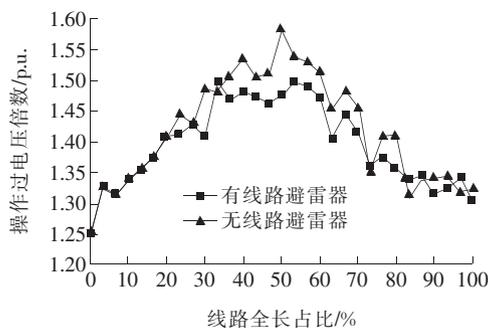


图 1 有、无线路避雷器操作过电压倍数分布

Figure 1 Distribution curve for operating-overvoltage multiples with and without arrester

避雷器按功能分为限制雷电过电压和限制操作过电压避雷器;按结构分为无间隙和有间隙避雷器,有间隙又分为绝缘和空气间隙 2 种类型^[8-9]。避雷器已大量地安装在各种电压等级的架空输电线路,如:对±800 kV 特高压直流线路,设计了复合绝缘子斜拉式悬挂安装方法^[10-11];对±500 kV 直流线路,采用悬挂和地面支柱式安装方法^[12-13];对±400 kV 直流线路则采用塔身支撑式安装方法^[14]。以上直流线路安装避雷器均利用空气间隙。又如:对

500 kV 电压等级以下交流线路,主要采用悬挂安装方法^[15-18]。包括低压配网线路^[19-20],安装避雷器时主要利用绝缘间隙,较少采用空气间隙。但以上均为限制雷电过电压有间隙避雷器。

该文涉及限制操作过电压无间隙避雷器不同于前者,其配有引流线起到放电泄流作用,引流线设在避雷器高压端,与线路导线直接连接,由于脆弱易断,需安装铰链金具保护引流线;而铰链金具又会使避雷器和线路导线在各自受荷载后而相互影响,安装方案须保证各工况下两者同时安全稳定运行。另外,与普通线路避雷器相比,±1 100 kV 特高压线路避雷器长度约为其 4.5 倍,质量和体积约为其 5.5 倍,安装条件苛刻,且目前国内外在线路上安装限制操作过电压无间隙避雷器无先例可循。展望电子式电流互感器在线校验技术发展方向,可知将会朝着高精度传感头设计、高精度校验算法研究、测量绝缘子表面泄漏电流可实现污秽程度的在线监测与预警、保障操作人员的安全等方向进行^[21-23]。

依托±1 100 kV 昌吉—古泉(准东—华东)特高压直流输电线路工程,该文选用外挑支架悬挂式安装避雷器为最佳方案,创新设计塔头布置型式、选型引流线以及设计连接金具,提出例行试验和检测无间隙避雷器的特殊拆卸方案,首次验证特高压直流线路上安装无间隙避雷器的可行性,对后续线路安装避雷器具有重要实践和借鉴意义。

1 避雷器安装位置及设计参数

1.1 避雷器安装位置

根据中国电力科学研究院报告,在线路中部的 4 处安装线路避雷器,可将全线操作过电压倍数从 1.6 p. u. 限制至 1.5 p. u. 以下(图 1),这样不同海拔下空气放电间隙值可减小 9%^[24]。避雷器安装位置如表 1 所示,全线选取直线塔和耐张塔的各 2 处安装避雷器。

表 1 全线避雷器安装位置

Table 1 Installation sites of arresters

序号	长度占比/%	塔型	气象条件	
			风速/(m/s)	冰厚/mm
1	40.5	J33101B2L-53	31	10
2	45.3	Z30102B2L-71	30	10
3	50.0	Z30102B2-75	29	10
4	56.0	J27102B-54	27	10

1.2 避雷器设计参数

该工程采用的限制操作过电压无间隙避雷器产品由平高东芝和西安西电避雷器有限公司生产,型号为YH20WDL1-1308/2200,厂家提供避雷器产品的尺寸、质量、受风面积等机械参数如表2所示。避雷器分为7节,每节长度为2.76 m。

表2 避雷器机械参数

Table 2 Mechanical parameters of arrester

避雷器型号	长度/m	质量/kg	受风面积/m ²
YH20WDL1-1308/2200	19.98	2 600	10.6

2 直线塔避雷器安装方案分析

对于避雷器的安装可分为悬挂式和支撑式。其中,悬挂式是指避雷器上端(低压端)悬挂于杆塔横担处,下端与直线塔线路导线或耐张塔跳线连接;支撑式是指避雷器上端与直线塔线路导线或耐张塔跳线连接,下端(高压端)通过支撑横担固定。

2.1 横担悬挂式安装方案

避雷器上端通过铰链金具与塔横担相连,下端通过铰链金具与V串联板相连,避雷器悬挂于V串正上方,如图2所示。

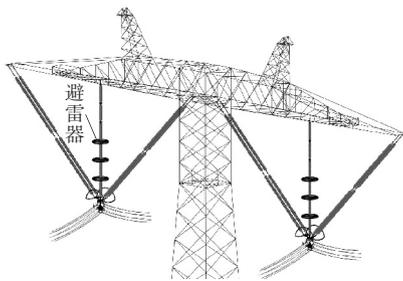


图2 悬挂于横担方案

Figure 2 Hanging on cross arm

该方案中避雷器与V串联板相连,结构相对稳定。但避雷器比V串投影串长4.8 m,V串需采用分段绝缘来增加V串肢长至23 m,导致加长横担和增加杆塔高度,给施工和运行带来不便。另外,需要拆除避雷器下端的大屏蔽环,避免与V串绝缘子均压环相碰,重新设计V串带弧度大均压屏蔽环。但避雷器下端、引流线、绝缘子高压端的电晕问题需待试验验证,因此不予推荐。

2.2 塔身支撑式安装方案

塔身支撑式方案是在导线横担下方增加支撑横担,避雷器底部采用弹簧和活动关节配合的结构,横担支撑力约为避雷器自重的2/3;上端通过金具固定在导线连接板上,承担拉力约为避雷器自重的1/3,如图3所示。

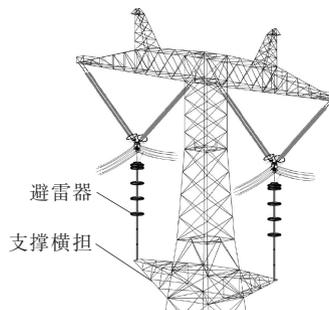


图3 塔身支撑式方案

Figure 3 Tower body support

该方案优点是安装位置低、拆装方便。由于铰链金具将导线与避雷器连接,为使避雷器与导线同步摆动,避雷器底端采用了压缩弹簧加活动关节的装置,避雷器可在各方向偏移10°,避雷器下端底座安装压缩弹簧,满足了避雷器受弯要求。

缺点是导线与避雷器相互关联,需考虑各种工况下静态和动态力双重影响,厂家设计避雷器时需满足受力和受弯的要求,避雷器需加重加粗设计,厂家需对弹簧加伸缩节的伸缩量进行设计,以满足避雷器风摆时长度变化要求。该方案复杂,缺乏经验,按比例承担支撑力和拉力不易控制,因此不予推荐。

2.3 外挑支架悬挂式安装方案

避雷器上端通过铰链金具与外挑避雷器支架相连,下端通过铰链金具、新设计联板与线路导线相连;采用外挑支架设计提高避雷器悬挂位置,避雷器加金具长度与V串投影串长相当,如图4所示。

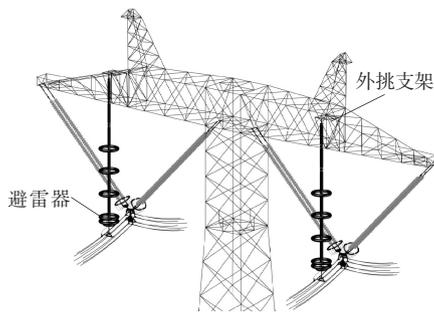


图4 悬挂于外挑支架方案

Figure 4 Hanging on overhanging bracket

常态下避雷器受风荷载而摆动,可实现避雷器与线路导线同步风摆;避雷器下端铰链金具长度需留有裕度,减少避雷器风荷载对导线的拉力影响;同时,当线路导线在各种工况下发生弧垂变化,发生舞动、次档距振荡、振动,发生覆冰脱冰及断线等极端工况时,可避免影响和破坏避雷器。

通过上述比较分析,考虑安装和运行安全性,选用外挑支架悬挂式安装避雷器方案为最佳方案,该方案可以解决另外 2 种方案的缺点和存在的问题。

3 耐张塔避雷器安装方案分析

3.1 横担悬挂式安装方案

通过增加跳线 V 串肢长的方式,将避雷器挂于导线横担上,使避雷器下端与鼠笼式硬跳线处于同一水平面,可以考虑 2 种方式,如图 5 所示。

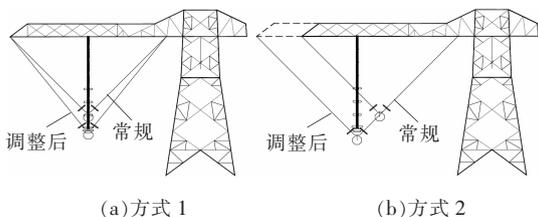


图 5 悬挂于横担方案

Figure 5 Hanging on cross arm

方式 1 横担长度不变,增加跳线 V 串肢长,调整后 V 串夹角约为 68° ,跳线绝缘子易受力卸载。

方式 2 保持跳线 V 串夹角不变,增加跳线 V 串肢长,避雷器安装后 V 串不会卸载,但需采用分段绝缘来增加 V 串肢长,给施工和运行带来不便;另需拆除避雷器下端大屏蔽环,避免与跳线 V 串绝缘子均压环相碰,重新设计 V 串带弧度大均压屏蔽环,避雷器下端、引流线、绝缘子高压端的电晕问题需待试验验证,因此,2 种方式均不予推荐。

3.2 塔身支撑式安装方案

塔身支撑式方案是在横担下方增加一支撑横担,避雷器上端通过金具悬挂在鼠笼硬跳线上,下端采用弹簧连接在支撑横担上,如图 6 所示,该方案跳线 V 串不会卸载。不同于导线摆动振荡,鼠笼硬跳线相对稳定,避雷器受力和受弯可满足要求,但鼠笼箍架需承受避雷器全部重量,箍架强度大幅增加,对材料和连接的要求高,从安全性考虑不予推荐。

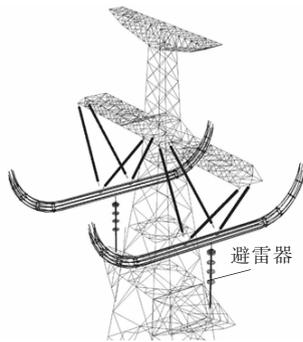


图 6 塔身支撑式方案

Figure 6 Tower body support

3.3 外挑支架悬挂式安装方案

在横担上增加外挑支架,提高避雷器悬挂位置,避雷器上端通过金具悬挂至外挑支架,下端通过金具与鼠笼硬跳的间隔棒相连,V 串投影串长与避雷器加金具长度相当,如图 7 所示。

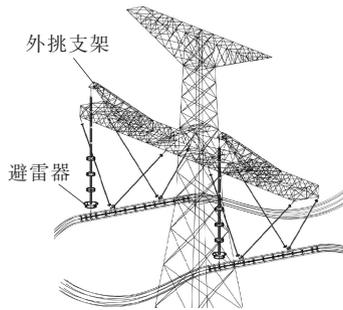


图 7 悬挂于外挑支架方案

Figure 7 Hanging on overhanging bracket

避雷器和鼠笼硬跳线受风同步摆动,但跳线不同于线路导线摆动振荡,很少出现极端工况,相对安全稳定。跳线 V 串不会卸载,受风摆动时避雷器不会与耐张绝缘串相碰。

通过上述比较分析,考虑安装和运行的安全性,选用外挑支架悬挂式安装方案为最佳方案,该方案可以解决另外 2 种方案的缺点和存在的问题。

4 外挑支架悬挂式安装方案的荷载计算和相关设计

4.1 避雷器荷载分析

选定外挑支架悬挂式安装避雷器方案后,根据设计规范^[7,25],静态荷载如表 3 所示。安装工况垂直荷载考虑 2 倍避雷器重量起吊和 1.1 倍的动力系数。

表3 悬挂避雷器静态荷载

Table 3 Static load of suspension arrester

杆塔型式	基准风速/ (m/s)	冰厚/ mm	安装高 度/m	安装垂直 荷载/kN
Z30102B2-71	30	10	79.0	54.2
J33101B2L-53	31	10	60.2	54.2
杆塔型式	大风风荷 载/kN	大风垂直 荷载/kN	覆冰风荷 载/kN	覆冰垂直 荷载/kN
Z30102B2-71	11.60	27.1	0.90	34.30
J33101B2L-53	12.75	27.1	0.86	34.98

直线塔上安装避雷器需考虑覆冰时发生导线断线冲击的动态影响,采用 ANSYS 有限元分析软件建立±110 kV 线路连续档导线 V 串体系模型^[26]。假定4根覆冰子导线同时发生断线,则V串导线挂点处的断线和未断线侧最大偏移量分别为-2995、1510 mm。

4.2 塔头布置设计

对于外挑支架悬挂避雷器在导线正上方的方案,首先,通过计算避雷器悬挂点高度确定外挑支架高度;然后,根据避雷器顺线方向摆动幅度和放电间隙确定外挑支架长度;最后,对于耐张塔,还需要对避雷器与耐张串之间的空气间隙进行分析及校验。

1) 外挑支架高度尺寸设计。

以直线塔为例,避雷器悬挂于外挑支架,避雷器挂点间长度为19.66 m,大于线路导线V串投影串长约12.5 m。因此,外挑支架上避雷器挂点需自横担底面(V串挂点)提高8.2 m,如图8(a)所示。通过调节避雷器下端铰链金具长度补偿长度差值,实现支架避雷器挂点到八分裂上层子导线的距离与避雷器加金具长度相当。

2) 外挑支架长度尺寸设计。

避雷器共7节,自下至上编号为第1节至第7节,节与节之间采用金属法兰固定连接,避雷器下端(高压端)第1至第3节法兰外套有金属均压环,最底端套有大均压屏蔽环。带电法兰及均压环与塔身的安全间隙值:第7、6、5、4节下端法兰分别为1.3、2.6、3.9、5.2 m。避雷器受风向塔身侧摆动将金具拉紧,此时避雷器法兰及均压环与塔身距离应大于放电间隙值,由此确定外挑支架从塔身伸出的长度为8.5 m,如图8(b)所示。

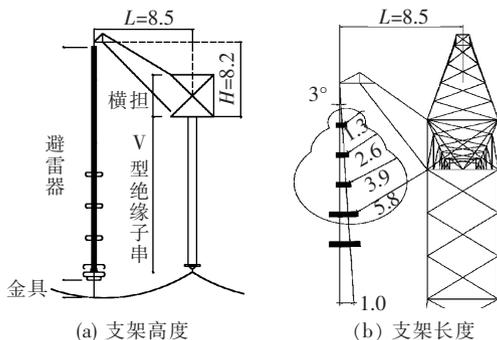


图8 直线塔悬挂避雷器侧视(单位:m)

Figure 8 Lateral view of suspension arrester on tangent tower(Unit:m)

4.3 引流线选型及连接金具设计

根据中国电力科学研究院提资,引流线截面应按动稳定电流(额定短时耐受电流)10~20 kA、放电时间100 ms 计算来选取,实际计算值要求铜、铝、钢等导体的截面值相对较小(铜、铝、钢截面分别为56、70、125 mm²)。通过线型比选,建议选择铝绞线JL-150,其柔性好、单丝直径和外径较大、不易折断,且耐磨等抗疲劳特性好,避免了铜与铝合金线夹接触时的电腐蚀。

为减小电晕影响,并从更加安全的角度考虑,工程中采用2根引流线,其中一根引流线作备用,引流线下端采用螺栓方式与新设计铝合金T型线夹压接,T型线夹又以螺栓方式压接在上层子导线或跳线上。T型线夹内侧缠绕预绞丝护线条保护导线不受集中应力破坏。引流线上端采用新设计铝合金SY螺栓型线夹与避雷器下端挂点连接,SY引流板倾斜角45°,如图9所示。铰链金具长度略短于引流线长度,常态下避雷器摆动被金具拉紧后,引流线呈松弛状态,并不受力。

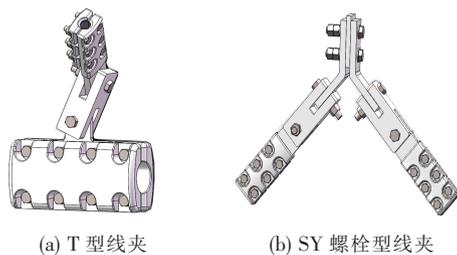


图9 引流线端连接金具

Figure 9 Link fittings for drainage wire

4.4 新型连接铰链金具设计

对于外挑支架式悬挂方案,需对避雷器上、下端

连接金具强度和型式进行选型设计。通过上部铰链金具,避雷器上端悬挂于支架上,如图 10 所示,该上部铰链金具包含:4 个 U 型环、DB 调整板、延长环、EB 挂板。

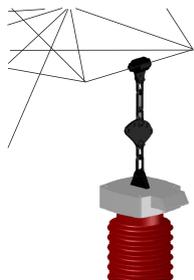
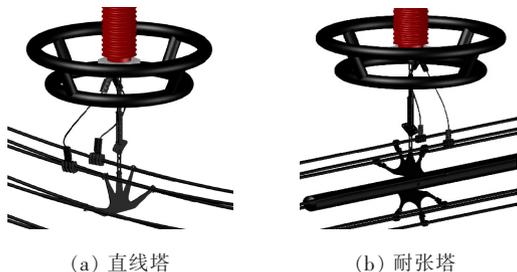


图 10 上部铰链金具

Figure 10 Upper hinge fittings

对于直线塔,避雷器下端采用铰链金具连接于导线上,铰链金具包含:专用四分裂联板、4 个 U 型环、延长环、DB 调整板、PT 调整板。为避免避雷器承受过大的导线垂直荷载而损坏,最下端采用四分裂联板,仅与 4 根子导线相连,不能采用六分裂或八分裂联板,联板裂脚线夹中装有预绞丝护线条,减小集中应力影响而保护导线。

对于耐张塔,下部铰链金具连接于硬跳线上,将四联板改为抱箍式跳线间隔棒,间隔棒上端带有开孔延长板,连接铰链金具最下端 U 型环;间隔棒裂脚连接于跳线。直线塔、耐张塔安装避雷器下部铰链金具如图 11 所示。



(a) 直线塔

(b) 耐张塔

图 11 直线塔、耐张塔安装避雷器下部铰链金具

Figure 11 Lower hinge fittings for tangent and tension tower

5 工程验证

该文推荐的避雷器安装及其拆装方法已在 ± 1100 kV 昌吉—古泉特高压直流输电线路工程中得到验证,并取得良好效果,如图 12、13 所示。



(a) 整体



(b) 局部

图 12 直线塔安装无间隙避雷器实例

Figure 12 Example of gapless arrester on tangent tower



(a) 整体



(b) 局部

图 13 耐张塔安装无间隙避雷器实例

Figure 13 Example of gapless arrester on tension tower

6 结语

该文首次提出在特高压直流线路上安装限制操作过电压无间隙避雷器,不同于外串间隙避雷器,无间隙避雷器存在引流线与线路导线连接问题,两者相互关联而产生影响,安装方案要保证各种工况下线路导线和避雷器同时安全运行。该文系统地介绍了无间隙避雷器在特高压直流线路上的安装方案,主要结论如下。

1) 通过多方案比较分析,选用外挑支架悬挂式安装避雷器的方案。在直线塔上,该方案可实现避雷器与线路导线同步风摆,避免线路导线在极端工况下对避雷器产生破坏作用;在耐张塔上,该方案可实现跳线 V 串不会卸载,当避雷器和耐张绝缘子串受风摆动时,避雷器不会与耐张绝缘子串相碰。因此,考虑安全稳定运行,该方案为最佳方案。

2) 在选用外挑支架悬挂式安装方案后,分析避雷器静态和动态荷载,创新设计塔头布置型式、选型引流线、设计连接金具等。

3) 目前, ± 1100 kV 昌吉—古泉特高压直流输电线路工程已投运一年以上,该文所推荐的避雷器安装方案已得到实践验证,为今后无间隙避雷器在

输电线路上的安装提供了范例。

参考文献:

- [1] 赵东元,胡楠,傅靖,等.提升新能源电力系统灵活性的中国实践及发展路径研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(24):1-8.
ZHAO Dongyuan, HU Nan, FU Jing, et al. Research on the practice and road map of enhancing the flexibility of a new generation power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24):1-8.
- [2] 张化冰.特高压输电助推能源资源远距离、大规模优化配置功炳史册——专访中国电力设备管理协会执行会长刘斯颌[J].电力设备管理,2020(1):20-24.
ZHANG Huabing. UHV transmission boosts long-term, large-scale optimization of energy resources-interview with Liu Sijie, Executive chairman of china power equipment management association[J]. Electric Power Equipment Management, 2020(1):20-24.
- [3] 陈秀娟,张翠霞,张搏宇,等.±1 100 kV特高压直流换流站避雷器在内过电压下的保护特性[J].电网技术,2015,39(2):362-366.
CHEN Xiujuan, ZHANG Cuixia, ZHANG Boyu, et al. Protective characteristics of MOA configured in ±1 100 kV UHVDC converter station[J]. Power System Technology, 2015, 39(2):362-366.
- [4] 洪志湖,彭庆军,钱国超,等.220 kV GIS中VFTO传播特性的影响因素研究[J].高压电器,2020,56(12):43-50.
HONG Zhihu, PENG Qingjun, QIAN Guochao, et al. Research on influence factors of propagation characteristics of the VFTO for 220 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12):43-50.
- [5] 李立,王耀华,高明超,等.4 500 V沟槽栅IGBT芯片的设计与研制[J].中国电力,2020,53(12):30-36.
LI Li, WANG Yaohua, GAO Mingchao, et al. Design and development of 4 500 V trench gate IGBT[J]. Electric Power, 2020, 53(12):30-36.
- [6] 柏晓路,李健,向宇,等.±1 100 kV特高压直流输电线路极间距优化研究[J].陕西电力,2017,45(2):49-60.
BAI Xiaolu, LI Jian, XIANG Yu, et al. Research on polarity distance optimization of ±1 100 kV UHVDC transmission lines[J]. Shanxi Electric Power, 2017, 45(2):49-60.
- [7] Q/GDW 11675—2017. ±1 100 kV直流架空输电线路设计规范[S].
- [8] 王兰义,赵冬一,胡淑慧,等.线路避雷器的研究进展[J].电磁避雷器,2011(1):26-34.
WANG Lanyi, ZHAO Dongyi, HU Shuhui, et al. Development trends of line arresters[J]. Insulators and Surge Arresters, 2011(1):26-34.
- [9] 康鹏,郭伟,黄伟钢,等.区域电网电能质量问题及治理关键技术综述[J].电测与仪表,2020,57(24):1-12.
KANG Peng, GUO Wei, HUANG Weigang, et al. Review of the power quality problem and key treatment technology of regional power grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(24):1-12.
- [10] 曹伟,万帅,谷山强,等.±800 kV直流线路避雷器在锦苏线上的应用[J].高压电器,2020,56(5):210-215.
CAO Wei, WAN Shuai, GU Shanqiang, et al. Application of ±800 kV DC line arrester to Jin-Su transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5):209-215.
- [11] 万帅,张伟,陈家宏,等.特高压±800 kV直流输电线路用避雷器的研制[J].高压电器,2017,53(5):48-55.
WAN Shuai, ZHANG Wei, CHEN Jiahong, et al. Development of the arresters for ±800 kV ultra-high voltage DC transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(5):48-55.
- [12] 王峰,姚建阁,王成,等.±500 kV直流线路避雷器工程应用研究[J].高压电器,2016,52(2):0178-0184.
WANG Feng, YAO Jiange, WANG Cheng, et al. Engineering application research of ±500 kV DC line arrester[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(2):0178-0184.
- [13] 巢亚锋,彭详,聂辉辉,等.±500 kV线路避雷器运行情况及其绝缘底座缺陷分析与建议[J].高压电器,2017,53(7):187-191.
CHAO Yafeng, PENG Xiang, NIE Huihui, et al. Analysis and suggestion on the running condition and insulation base defect of ±500 kV MOA of transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(7):187-191.
- [14] 曹伟,万帅,谷山强,等.高海拔地区±400 kV直流线路型避雷器设计[J].电网技术,2020,44(1):347-353.
CAO WEI, WAN Shuai, GU Shanqiang, et al. Design of ±400 kV DC line arrester in high altitude area[J]. Power System Technology, 2020, 44(1):347-353.
- [15] 周毓颖,高宇博,王建军,等.带电拆除500 kV交流输

- 电线路避雷器方法[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4):194-200.
- ZHOU Yuying, GAO Yubo, WANG Jianjun, et al. Study on the live removing method of surge arrester at 500 kV AC transmission line[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4):194-200.
- [16] 陈秀娟, 夏潮, 张亚迪, 等. 川藏联网工程 500 kV 高海拔线路避雷器配置方法与结构参数[J]. 高电压技术, 2016, 42(11):3442-3446.
- CHEN Xiujuan, XIA Chao, ZHANG Yadi, et al. Configuration method and structure parameters of 500 kV high altitude line arrester for the tibet power grid and sichuan power grid interconnection project[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11):3442-3446.
- [17] 杨海涛, 王川, 杨建俊, 等. 一起 110 kV 线路避雷器爆炸事故分析[J]. 电磁避雷器, 2019(4):151-160.
- YANG Haitao, WANG Chuan, YANG Jianjun, et al. Analysis of the 110 kV line arrester explosion accident [J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(4):151-160.
- [18] 严玉婷, 王亚舟, 倪学锋, 等. 复合绝缘线路避雷器运行情况的分析研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(3):124-128.
- YAN Yuting, WANG Yazhou, NI Xuefeng, et al. Analyses and research about operating situation of line arrester with composite insulation[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(3):124-128.
- [19] 王志刚, 阮观强. 基于 ATP-EMTP 的配电线路避雷器防雷效果及保护范围仿真分析[J]. 电瓷避雷器, 2020(1):66-70.
- WANG Zhigang, RUAN Guanqiang. Simulation and analysis of lightning protection effect and protection range of distribution line arrester based on ATP-EMTP[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(1):26-30.
- [20] 张森, 汤心韵, 周力行, 等. 电站 10 kV 连续倾斜架空线防雷配置改造[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2):170-174.
- ZHANG Miao, TANG Xinyun, ZHOU Lixing, et al. Power station 10 kV continuous tilt overhead line lightning protection reformation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2):170-174.
- [21] 黄远洋. 基于矩阵分块递归求逆的电力系统机电暂态并行算法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24):8-14.
- HUANG Yuanyang. A parallel algorithm for electromechanical transient simulation by recursive block matrix inversion[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24):8-14.
- [22] 李振华, 沈聚慧, 李红斌, 等. 电子式电流互感器测试技术研究现状分析[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(2):23-30.
- LI Zhenhua, SHEN Juhui, LI Hongbin, et al. Review of research situation of testing technology for electronic current transformers[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(2):23-30.
- [23] 孙玉玮, 陈辉, 陈立贤, 等. 基于历史数据分析的输电线路状态研判技术研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(1):83-87+104.
- SUN Yuwei, CHEN Hui, CHEN Lixian, et al. Technology for determining transmission line insulation state based on historical data analysis[J]. Smart Power, 2019, 47(1):83-87+104.
- [24] 唐巍, 孟鑫, 梁明, 等. ± 1100 kV 特高压直流输电线路空气间隙选择研究[J]. 新型工业化, 2017, 17(7):34-39.
- TANG Wei, MENG Xin, LIANG Ming, et al. The air gap selection research of ± 1100 kV UHVDC transmission line[J]. The Journal of New Industrialization, 2017, 17(7):34-39.
- [25] DL/T 5440—2009. 重覆冰架空输电线路设计技术规范[S].
- [26] 杨风利, 李正. ± 1100 kV 导线覆冰断线时 V 串偏移及不平衡张力分析[J]. 中国电力, 2017, 50(9):59-65.
- YANG Fengli, LI Zheng. Analysis on V-string offset and unbalanced tension forces under broken iced conductor of ± 1100 kV transmission lines[J]. Electric Power, 2017, 50(9):59-65.