

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.03.023

局部耐烧蚀型并联间隙防雷装置的研究

林盛强, 胡 诗, 官强华, 洪青云, 李 磊, 邱 添, 陈宁钊
(福建电力有限公司泉州供电公司, 福建 泉州 362000)

摘要: 针对现有并联间隙易被工频电弧烧蚀的不足, 研究一种局部耐烧蚀型并联间隙防雷装置, 由于电极末端采用耐高温材料, 增大了并联间隙的耐烧蚀能力, 使得装置能有效防止架空配电线路因雷击造成的绝缘子损坏及导线断线等事故的同时, 增大了装置的使用寿命。

关键词: 架空线路; 防雷装置; 并联间隙; 局部耐烧蚀

Parallel Gap Lightning Protection Device with Partial Ablation Resistance

LIN Shengqiang, HU Shi, GUAN Qianghua, HONG Qingyun,
LI Lei, QIU Tian, CHEN Ningzhao

(Quanzhou Power Supply Company of Fujian Electric Power Company Limited, Fujian Quanzhou 362000, China)

Abstract: The parallel gap of a conventional lightning protection device is easy to be ablated by power frequency arc. The authors designed a new parallel gap lightning protection device with partial ablation resistance. In this new device, high-temperature material is used at the electrode ends to enhance ablation resistance of parallel gap. Thus, this lightning protection device can effectively protect the overhead lines from damage of insulators or line break due to lightning, and its service lifetime gets longer.

Key words: overhead line; lightning protection device; parallel gap; partial ablation resistance

0 引言

电力系统运行统计数据表明, 雷害造成的故障是影响架空输配电线路安全运行的主要因素, 特别是 110 kV 及以下的架空输配电线路。10 kV 架空配电线路由于绝缘低及分布广等原因, 受雷害的影响更为严重, 由雷害引起的线路导线断线及绝缘子串损坏等事故时有发生, 影响电力系统的供电可靠性及安全性^[1-3]。

在国外, 如美国、瑞典、芬兰、日本等国, 采用在架空输电线路上安装并联间隙的保护方式来降低导线断线、绝缘子串损坏等故障, 并联间隙能接闪雷电、疏导工频电弧、均匀电场, 可有效防止因雷击造成的导线断线、绝缘子串损坏等故障。

现有的以普通碳素钢为材料的并联间隙, 经过工频电弧烧蚀后, 间隙气隙端部被烧蚀, 导致间隙气隙距离变大, 使得并联间隙与绝缘子的绝缘配合劣化, 减小并联间隙的使用寿命^[4-6]。

对此, 研究一种新型并联间隙防雷装置显得非常有必要, 该装置不仅能有效防止 10 kV 架空配电线路发生导线断线、绝缘子串损坏等故障, 且能克服现有并联间隙的气隙端部易被工频电弧烧蚀的不足, 增大装置的使用寿命。

1 并联间隙的结构

1.1 并联间隙的典型结构

并联间隙的一般结构为安装在线路绝缘子串上、下两端的一对金属电极, 现有的并联间隙结构多样, 典型结构见图 1^[7-8]。

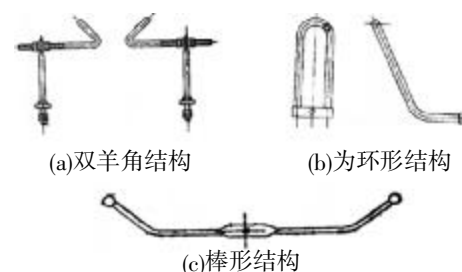


图 1 并联间隙的结构

Fig. 1 The structure of parallel gaps

收稿日期: 2015-10-17; 修回日期: 2015-11-18

图 1(a)为双羊角结构,气隙末端呈羊角状;图 1(b)为环形结构,下电极为环形结构,上电极为棒形结构;图 1(c)为末端为球头形状的棒形结构。

由于并联间隙上、下电极两端的气隙距离要小于绝缘子的气隙距离,架空输配电线路装设并联间隙后,遭受雷击时,并联间隙优先于线路绝缘发生闪络,雷电电弧将定位于并联间隙上、下电极的气隙间,为后续的工频电流提供通道,使得工频电弧远离绝缘子串,在并联间隙上、下电极的气隙间燃烧,从而起到保护绝缘子串和导线的作用。与线路自动重合闸装置相配合,可以防止线路发生永久性故障,减小线路的维护工作量。

1.2 局部耐烧蚀型并联间隙防雷装置

针对现有并联间隙电极端部易被工频续流电弧烧蚀的不足,设计出一种适用于 10 kV 架空配电线路的局部耐烧蚀型并联间隙防雷装置,结构见图 2。

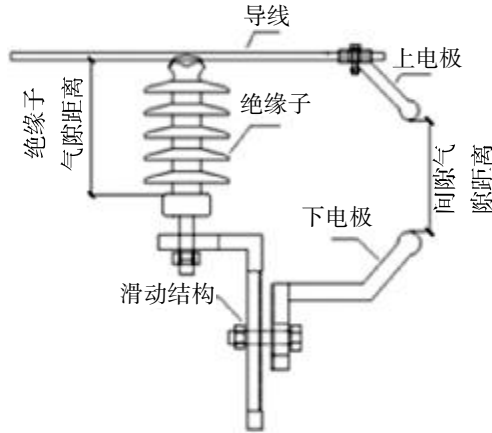


图 2 局部耐烧蚀型并联间隙防雷装置结构

Fig. 2 The structure of parallel gap lightning protection device which has partial ablative resistance end portions

图 2 中,上电极直接装设在导线上,下电极装设在柱式绝缘子的底座螺栓。下电极具有滑动结构,可以调节上、下电极之间的间隙距离。电极端部为球头状,为球头的耐烧蚀能力,球头采用高熔点的铜钨合金材料制成。

2 试验研究

针对局部耐烧蚀型并联间隙防雷装置应用要求,研究局部耐烧蚀型并联间隙防雷装置的雷电放电、工频耐受电压及耐烧蚀能力等特性,开展雷电电压放电试验、工频耐压试验及工频大电流燃弧试验,为局部耐烧蚀型并联间隙防雷装置的实际应用提供科学依据。

2.1 雷电电压放电试验

对局部耐烧蚀型并联间隙防雷装置施加雷电过电压,研究并联间隙和绝缘子的绝缘配合对雷电放

电路径的影响,以确定并联间隙和绝缘子的最优绝缘配合。

局部耐烧蚀型并联间隙的气隙距离 L_1 分别取绝缘子气隙距离 L_2 的 80%、85%、90%,研究不同气隙距离比对雷电放电路径的影响,见表 1。

表 1 气隙距离比

Table 1 The ratio of gas gaps

绝缘子气隙距离	$L_1/L_2=80\%$	$L_1/L_2=85\%$	$L_1/L_2=90\%$
210 mm	168 mm	179 mm	189 mm

对局部耐烧蚀型并联间隙防雷装置施加标准雷电电压,雷电压取 100 kV,试验重复 5 次,观察雷电放电路径。试验结果表明,局部耐烧蚀型并联间隙的气隙距离分别取绝缘子气隙距离的 80%、85%、90%,雷电电弧都定位于并联间隙两端,证明局部耐烧蚀型并联间隙防雷装置具有接闪雷电的功能。试验图见图 3。

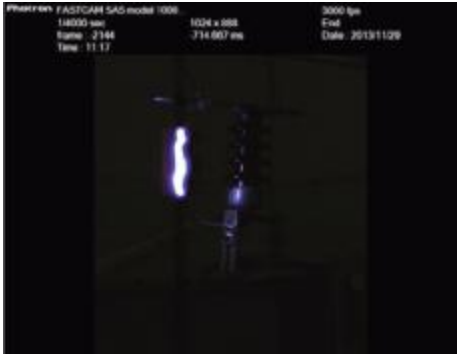
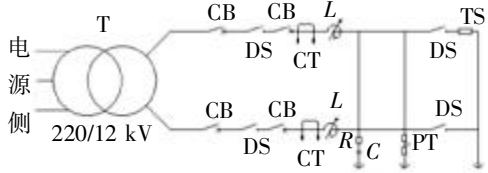


图 3 雷电过电压放电试验

Fig. 3 The lightning voltage discharge test

2.2 工频大电流燃弧试验

工频大电流燃弧试验接线见图 4。绝缘子上端接至工频试验装置,绝缘子下端接地,局部耐烧蚀型并联间隙防雷装置的两端用金属线短接,模拟架空线路发生相间短路,研究局部耐烧蚀型并联间隙防雷装置的耐烧蚀能力。工频大电流燃弧试验现场见图 5。



T—试验变压器;CB—断路器;DS—隔离开关;CT—电流互感器;TS—试品;L—可调电抗器;R、C—高频电阻、电容;PT—测量用电压互感器。

图 4 工频大电流燃弧试验接线图

Fig. 4 The wiring diagram of large power frequency current ablation test

试验后,局部耐烧蚀型并联间隙的烧蚀见图 6。试验电压为 10 kV,短路电流为 2 kA,燃弧时间为



图5 工频大电流燃弧试验现场

Fig. 5 The scene of large power frequency current ablation test

0.5 s, 燃弧两次后, 并联间隙的气隙距离由 110 mm 增大为 112 mm, 烧蚀长度为 2 mm, 平均每次烧蚀长度为 1 mm。

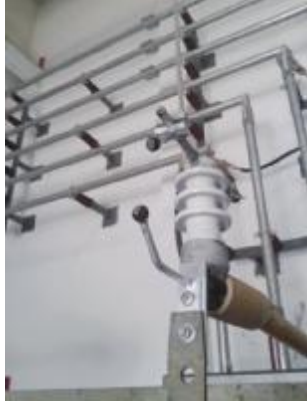


图6 试验后的局部耐烧蚀型并联间隙

Fig. 6 The scene of parallel gap when the test is finished

局部耐烧蚀型并联间隙的气隙距离为绝缘子气隙距离的 80%~90% 时, 并联间隙均能可靠接闪雷电电弧, 即并联间隙的气隙距离在 168~189 mm 之间均属于有效范围, 并联间隙被烧掉 21 mm 后, 仍可起到保护作用。

10 kV 线路的速断保护动作时间约为 0.06~0.08 s, 限时电流速断动作时间约为 0.5 s, 因此, 假定燃弧时间不大于 0.5 s, 短路电流不大于 2 kA, 按照每次烧掉 1 mm 计算, 局部耐烧蚀型并联间隙至少能经受 21 次短路电流的烧蚀, 而现有的并联间隙一般只能经受 3~5 次工频大电流的烧蚀, 采用局部耐烧蚀结构后, 并联间隙的耐烧蚀能力得到了大幅提升, 提高装置的使用寿命。

3 并联间隙对线路电气性能的影响

3.1 感应耐雷水平

当线路附近落雷时, 导线上的感应过电压计算公式为^[9-10]

$$u_{d1} = \frac{I h_{d1} \times 25}{s} \quad (1)$$

当雷电流幅值超过线路的绝缘水平时, 一相导线绝缘发生闪络, 由于耦合作用, 未短路相导线上的感应过电压下降为

$$u_{d2} = u_{d2}' - k u_{d1} = \frac{I \times 25}{s} (h_{d2} - k h_{d1}) \quad (2)$$

由此, 两相短路时的感应雷耐雷水平为

$$I = \frac{u_{50\%} s}{25(h_{d2} - k h_{d1})} \quad (3)$$

式(3)中: h_{d1} 、 h_{d2} 分别为第 1、2 根闪络导线的平均高度; I 为雷电流幅值, kA; s 为雷击点到线路的距离; k 为耦合系数, $u_{50\%}$ 为线路绝缘的 50% 雷电闪络电压。

3.2 直击雷耐雷水平

雷直击杆塔时, 导线横担处电位为^[9-10]

$$u_{a1} = I r + L_1 \frac{di}{dt} \quad (4)$$

式(4)中: r 为杆塔冲击接地电阻; L_1 为耐雷水平最低的一相导线所在杆塔横担到杆塔底部的电感。

当雷电流通过塔身时, 在导线上产生的感应电压为

$$u_{d1} = a h_{d1} \quad (5)$$

式(5)中, a 为雷电流的陡度。线路绝缘子串两端电压为

$$u_{j1} = I r + L_1 \frac{di}{dt} + a h_{d1} \quad (6)$$

按照中国规程规定, 雷电流波头取 2.6 μ s 时, 由式(6)得

$$u_{j1} = I \left(r + \frac{L_1}{2.6} + \frac{h_{d1}}{2.6} \right) \quad (7)$$

第 1 根导线绝缘闪络的耐雷水平为

$$I_2 = \frac{u_{50\%}}{r + \frac{L_1}{2.6} + \frac{h_{d1}}{2.6}} \quad (8)$$

一相导线绝缘闪络接地后, 相当于 1 根接地的避雷线, 此时该导线电位为横担电位, 在其他未闪络导线上产生耦合电压, 在第 1 根接地导线作用下, 未闪络导线电位为

$$u_{d2} = k_2 u_{a1} - (1 - k_2) a h_{d2} \quad (9)$$

式(9)中, k_2 为考虑电晕系数的导线间耦合系数。

第二相导线绝缘两端的过电压为

$$u_{j2} = u_{d2} - u_{d20} \quad (10)$$

由此可得, 雷击杆塔时, 两相短路的耐雷水平

$$I_3 = \frac{u_{50\%}}{r(1 - k_2) + \frac{1}{2.6} (L_2 - k_2 L_1) + \frac{h_{d2}}{2.6} (1 - k_2)} \quad (11)$$

3.3 架空线路跳闸率

设架空线路每年的直击雷次数为 N , 雷直

击杆塔时,线路发生相间绝缘闪络的概率为 p ;建弧率为 η ;击杆率 g ,则直击雷跳闸率为^[9-13]

$$n_1 = N g p \eta. \quad (12)$$

设线路长度为 L ,离线路 s 落雷时发生相间短路的耐雷水平为 i_2 ,雷电流超过 i_2 的概率分别为 p_1 ,落雷密度为 γ ,取引雷宽度 Δd , Δd 足够小时, Δd 内的感应耐雷水平可认为是定值, Δd 内每年的落雷次数为 ΔN ,引起的雷击跳闸率 Δn 为

$$\Delta n = \Delta N p_1 \eta; \quad (13)$$

$$\Delta N = 2 \Delta d L \gamma. \quad (14)$$

应用全概率公式,由感应雷引起的架空输电线路跳闸率为

$$n_2 = \sum \Delta n_{i_0}. \quad (15)$$

线路总的雷击跳闸率为

$$n = n_1 + n_2. \quad (16)$$

式(16)中: n_1 为直击雷引起的线路跳闸率; n_2 为感应雷引起的线路跳闸率。

3.4 计算结果

为计算架空线路的耐雷水平及跳闸率,设定的计算条件如下^[14-20]:

1)绝缘子片选用 PS15-5, 50%雷电放电电压 75 kV。

2)导线弧垂按 1 m 算,导线型号取截面取 150 mm²。

3)设定 10 kV 架空线路引雷宽度为 $4h$, h 为架空配电线路导线平均高度,距离线路 $4h$ 以外的落雷为感应雷。

4)雷电流概率公式用 $\log p = -\frac{I}{88}$ 。

5)直击雷引起的绝缘闪络的建弧率为 $\eta = \frac{4.5(\frac{U}{L})^{0.75} - 14}{100}$, L 为绝缘子链长度,感应雷引起的绝缘闪络的建弧率为 0.1。

6)杆塔接地电阻取 30 Ω 。

计算的结果见表 2-4。

表 2 10 kV 架空配电线路的感应耐雷水平

Table 2 The withstand level of inductive lightning of 10 kV overhead distribution lines

落雷点 距离/m	未装设并 联间隙/kA	气隙比= 80%/kA	气隙比= 85%/kA	气隙比= 90%/kA
48	14.2	10.8	11.6	12.4
300	88.0	82.0	83.5	85.0

由表 2-4 中可知,10 kV 架空配电线路在装设局部耐烧蚀型并联间隙防雷装置后,并联间隙气隙长度分别为线路绝缘子气隙长度的 80%、85%及 90%时(短接气隙距离的百分比分别为 20%、15%及

表 3 百公里 10 kV 架空配电线路的跳闸次数

Table 3 The trip-out count of per one-hundred km 10 kV overhead distribution lines

绝缘型式	未装设并 联间隙	气隙 比=80%	气隙 比=85%	气隙 比=90%
跳闸次数	17.1	20.4	19.5	18.6
跳闸次数变化率/%	—	19.3	14.0	8.8

表 4 雷击杆塔时的两相闪络耐雷水平

Table 4 The withstand level of phase fault When lightning strike towers

绝缘型式	未装设并 联间隙	气隙比= 80%	气隙比= 85%	气隙比= 90%
耐雷水平/kA	5.7	4.5	4.8	5.1

10%), 10 kV 架空配电线路的跳闸率分别增大 19.3%、14.0%及 8.8%。可见,架空线路跳闸率增大的百分比与短接气隙距离的百分比近似相等。

4 结语

综上所述,局部耐烧蚀型并联间隙防雷装置能安全、可靠地接闪雷电电弧,疏导工频续流电弧,有效防止因雷击造成的线路绝缘子损坏和导线断线等事故,与现有并联间隙相比,气隙端部采用耐高温材料后,能增大装置的使用寿命,提高供电可靠性,建议在雷害频繁地区的 10 kV 架空配电线路上推广使用。

参考文献:

- [1] 胡建川,刘渝根,冷 迪,等. 南川地区 10 kV 配网线路防雷分析[J]. 高压电器,2013,49(3):53-58.
HU Jianchuan,LIU Yugen,LENG Di,et al. Lightning protection analysis of the 10 kV transmission lines in Nanchuan region based on lightning parameters[J]. High Voltage Apparatus,2013,49(3): 53-58.
- [2] 王巨丰,陆俊杰,陈宙平. 一种新型防雷保护间隙的探讨和研究[J]. 广西电力,2009,32(2):11-13.
WANG Jufeng,LU Junjie,CHEN Zhouping. Study and discussion on a new parallel gap lightning protection device[J]. Guangxi Electric Power,2009,32(2):11-13.
- [3] 周志强,张丹丹,陈卫忠,等. 输电线路杆塔避雷器优化配置研究[J]. 高压电器,2013,49(2):61-66.
ZHOU Zhiqiang,ZHANG Dandan,CHEN Weizhong,et al. Optimal configuration of surge arresters on transmission line tower[J]. High Voltage Apparatus,2013,49(2):61-66.
- [4] 徐 鹏,梁少华. 可调间隙防雷装置在 35 kV 变电站防雷中的应用研究[J]. 高压电器,2012,48(9):7-15.
XU Peng,LIANG Shaohua. Application of gap-adjustable lightning protection device to lightning protection of 35 kV Substation[J]. High Voltage Apparatus,2012,48(9): 7-15.

- [5] JEC 207—1979 架空送电用架线金具[S].1979.
JEC 207—1979 Hardware of overhead transmission lines[S].1979.
- [6] 陈维江,孙昭英,王献丽. 35 kV 架空送电线路防雷用并联间隙研究[J]. 电网技术,2007,31(2):61-65.
CHEN Weijiang,SUN Zhaoying,WANG Xianli. Study on shunt gap lightning protection for 35 kV overhead transmission lines [J]. Power System Technology,2007,31(2): 61-65.
- [7] 孙渭清,陈龙元. 招弧角设计介绍[J]. 电力金具,1991(1):1-5.
SUN Weiqing,CHEN Longyuan. Introduction of the design of the arcing horn [J]. Journal of electric power fittings, 1991(1):1-5.
- [8] 程应镗. 招弧角的尺寸和间隙[J]. 电力金具,1993(1):2-5.
CHENG Yingtang. Size and gap of the arcing horn [J]. Journal of Electric Power Fittings,1993(1):2-5.
- [9] 谢广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [10] 宋云东,苑 舜,赵春芳. 配电网同杆并架线路接地故障中性点电压计算分析[J]. 高压电器,2009,45(3):40-43.
SONG Yundong,YUAN Shun,ZHAO Chunfang. Calculation and analysis on ground-fault neutral point voltage of distribution lines on same pole in distribution network[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(3):40-43.
- [11] 高新智,仇 炜,韩爱芝,等. 针对某 35 kV 配电线路防雷问题的探讨[J]. 高压电器,2010,46(4):69-73.
GAO Xinzhi,QIU Wei,HAN Aizhi,et al. Study on the Lightning Protection Problem of 35 kV Transmission and Distribution Line[J]. High Voltage Apparatus,2010,46(4): 69-73.
- [12] 李庆玲,程济兵,王晓燕,等. 输电线路氧化锌避雷器应用研究[J]. 高压电器,2010,46(4):77-80.
LI Qingling,CHENG Jibin,WANG Xiaoyan,et al. The research of MOA application in transmission line [J]. High Voltage Apparatus,2010,46(4):77-80.
- [13] 耿翠英,陈守聚,刘莘昱,等. 降雨对空气间隙工频闪络电压影响的试验研究[J]. 高压电器 2009,45(1): 36-39.
GENG Cuiying,CHEN Shouju,LIU Xinyu,et al. Experimental study of the raining effect on frequency breakdown voltage of air-gap[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(1):36-39.
- [14] 陈维贤. 电网过电压教程[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [15] 潘如政,孙广生,严 萍,等. 沿面闪络开关研究进展[J]. 高压电器,2009,45(4):111-114.
PAN Ruzheng,SUN Guangsheng,YAN Ping,et al. Progress in the research of surface flashover switch [J]. High Voltage Apparatus,2009,45(4):111-114.
- [16] 黄清社,徐 奔,彭利强,等. 10 kV 架空绝缘导线防雷保护的措施研究[J]. 高压电器,2010,46(12): 32-35.
HUANG Qingshe,XU Ben,PENG Liqiang,et al. Research on lightning protection of 10 kV overhead insulated distribution lines[J]. High Voltage Apparatus,2010,46(12):32-35.
- [17] 白 庆,王大兴,祝嘉喜. 35 kV 线路避雷器在电网中的防雷应用[J]. 电瓷避雷器,2012(1):82-85.
BAI Qing,WANG Daxing,ZHU Jiaxi. Lightning protection applications of the 35 kV line surge arrester in the power system[J]. Insulators and Surge Arresters,2012(1):82-85.
- [18] 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.
- [19] 赵紫辉,吴广宁,曹晓斌. 计及冲击电晕的输电线路雷电过电压影响因素研究[J]. 电瓷避雷器,2013(2):109-118.
ZHAO Zihui,WU Guangning,CAO Xiaobin. Influence factors research on lightning overvoltage of transmission lines considering the effect of impulse corona[J]. Insulators and Surge Arresters,2013(2):109-118.
- [20] 曹 斌,韩 磊,白全新. 一种新型防雷配电变压器的研究[J]. 变压器,2013,50(2):10-12.
CAO Bin,HAN Lei,BAI Quanxin. Research on new lightning protection distribution transformer [J]. Transformer, 2013,50(2):10-12.
- 林盛强(1985—),男,硕士研究生,工程师,主要从事电力系统过电压保护及电气设备试验工作。

(上接第 141 页)

- [18] 张启民,张良县,陈模生.特高压换流变压器阀侧出线装置直流电场计算与分析[J]. 高压电器,2014,50(9): 66-70.
ZHANG Qimin,ZHANG Liangxian,CHEN Mosheng.The DC electric field analysis and analysis of valve side outlet device in UHV converter transformer [J]. High Voltage Apparatus,2014,50(9):66-70.
- [19] 王仲奕,童军心,赵彦珍.高压交直流电容式套管内部电场的分析比较及改进[J]. 高压电器,2003,39(3):9-12.
WANG Zhongyi,TONG Junxin,ZHAO Yanzhen. The internal electric field comparison analysis and improvement of AC/DC high voltage condenser bushing[J]. High Voltage Apparatus,2003,39(3):9-12.
- 赵勇进(1978—),男,工程师,主要从事变压器设计研发工作。