

地线绝缘化对500 kV威甘甲线耐雷性能影响理论分析

王磊¹, 孙鹏¹, 马御棠¹, 黄然¹, 程志万¹, 沈志², 倪海云³

(1. 云南电力试验研究院(集团)有限公司电力研究院, 昆明 650217; 2. 云南电网公司, 昆明 650011;

3. 云南省恒安电力工程有限公司, 昆明 650011)

摘要: 在中重冰区地线覆冰将影响架空输电线路的安全运行,地线除冰尤为重要。直流融冰是解决架空输电线路导线覆冰的有效措施,地线绝缘化是地线能够进行直流融冰的前提条件。地线绝缘化后其电气性能必须满足正常运行、融冰运行及线路防雷等的条件。笔者以500 kV威甘甲线地线绝缘化为例,介绍其地线绝缘化的方式,及地线绝缘化后绝缘子及绝缘子间隙的电气性能;利用EMTP仿真软件对地线间隙击穿与雷电流幅值的相关性进行了分析;理论计算威甘甲线地线绝缘化前后其保护角及雷击跳闸率的变化,得出因融冰需要地线绝缘化后500 kV威甘甲线耐雷性能变化不大的结论。

关键词: 地线绝缘化; 间隙; 耐雷性能; 跳闸率; 直流融冰

中图分类号: TM726

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2014)09-0076-06

Theoretical Analysis on Effect of Ground Wire Insulation on Lightning Protection Performance of 500 kV Weiganjia Transmission Line

WANG Lei¹, SUN Peng¹, MA Yutang¹, HUANG Ran¹,

CHENG Zhiwan¹, SHEN Zhi², NI Haiyun³

(1. Yunnan Electric Power Test Institute (Group) Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Kunming 650217, China;

2. Yunnan Power Grid Corporation, Kunming 650011, China;

3. Yunnan Hengan Electric Power Engineering Co., Ltd., Kunming 650011, China)

Abstract: Ground icing will influence the safe operation of overhead transmission line in medium and heavy icing areas, and ground wire deicing is particularly important. DC ice-melting is one of the effective measures to remove icing of overhead transmission line, and ground wire insulation is the precondition for DC ice-melting. After insulation, ground wire's electric performance must meet the conditions of normal operation, ice-melting operation, and lightning protection of transmission line. This paper takes ground wire of 500 kV Weiganjia transmission line for example to introduce the insulation way, and to discuss the electrical performances of the insulator and insulator gap after ground wire insulation. The simulation software EMTP is adopted to analyze the relativity between breakdown of ground wire insulator gap and lightning current amplitude. The protection angles and the lightning trip rates of the Weiganjia transmission line before and after ground wire insulation are calculated, and conclusion is drawn that the lightning protection performance of the 500 kV Weiganjia transmission line changes little after its ground wire insulation for DC ice-melting.

Key words: ground wire insulation; gap; lightning protection performance; trip rate; direct current ice-melting

0 引言

近年来,极端天气导致高寒地区输电线路覆冰严重,线路覆冰后由于线路荷载过重、不均匀脱冰、

覆冰导线舞动等会造成输电线路倒杆、断线事故^[1]。输电线路架空地线较导线距离地面高度高,同时导线上因带有负荷电流使导线温度高于架空地线,所以架空地线上的覆冰情况往往较输电导线严重。当架空地线上的覆冰达到一定程度后,会造成地线弧垂对导线距离不足而放电,杆塔荷载不够导致地线

支架受损、地线断股断线等情况发生,同时 OPGW 地线断裂将导致电力通信通道中断,危及电力控制系统的正常运行^[2-5]。所以架空地线的覆冰防治显得尤为重要。输电线路融冰是应对电网大面积覆冰的有效措施,包括交流短路融冰、过负荷融冰、直流融冰等,其中直流融冰在南方电网取得了较好的效果,得到了广泛应用^[6-8]。地线因为直接接地,无法直接进行直流融冰,为了能使地线能够进行直流融冰,对架空地线进行绝缘化改造或绝缘化设计以满足直流融冰的需要^[9]。地线绝缘化既要满足直流融冰时,绝缘地线对地不放电,又要满足正常运行时感应电压不击穿,同时还不能对输电线路的耐雷水平产生较大影响^[10-11]。笔者对 500 kV 威甘甲线地线绝缘化改造方式进行介绍,试验求取地线绝缘化后的地线绝缘子间隙的绝缘性能,通过仿真分析了间隙击穿与雷电流的相关性,最后比较地线绝缘化前后线路耐雷水平及雷击跳闸率的变化,得出地线绝缘化后,500 kV 威甘甲线耐雷性能变化不大的结论。

1 威甘甲线地线绝缘化方式及绝缘电气性能

地线绝缘化方式及其电气性能是影响线路耐雷水平的关键因素。掌握地线绝缘化后地线绝缘子、间隙的基本电气性能是开展线路防雷分析的基础。500 kV 威甘甲线位于云南省昭通市,地处重覆冰区域,线路起于威信电厂,止于 500 kV 甘顶变,线路全长 116.849 km,使用杆塔 238 基,塔脚海拔最高为 1 512 m,架空地线全线绝缘化设计。为降低架空地线上感应电压及满足线路防雷需要,架空线路每隔 30 km 设置一个接地点,线路终端塔均设置接地点,非覆冰季节接地点进行可靠接地,融冰季节来临前将线路接地点接地装置打开。地线绝缘子采用复合绝缘子,直线塔采用“下跳”方式,使用直流悬垂复合绝缘子,结构高度 590 mm,绝缘距离 339 mm,配置棒—棒型间隙,间隙间最小空气距离 120 mm;耐张塔根据塔形、转角不同采用“上跳”、“下跳”的方式,使用直流耐张复合绝缘子和直流支柱复合绝缘子,结构高度分别为 580 mm 和 450 mm,绝缘距离为 339 mm,耐张复合绝缘子串间隙间最小空气距离 120 mm。

为得到地线绝缘子及间隙的电气性能,在云南电网呼马山超高压试验基地对加装间隙的复合绝缘子进行了电气性能试验,呼马山超高压试验基地海拔 1 980 m,试验时温度 20~22 ℃,湿度 32~40%。直流试验设备采用直流高压发生器 ZGS 250 kV/3 mA;雷电冲击试验采用冲击电压发生器 SGS300/7.5。雷

电冲击全波的时间参数为波前时间 $t_1=1.5\ \mu\text{s}$,半峰值时间 $t_2=58.6\ \mu\text{s}$,雷电波在 GB/T 16927.1—2011 和 IEC 60060.1—1989 标准规定的误差范围内。试验依据 GB/T 16927.1—2011 的规定进行,试验方法采用升降法,电压升降的幅度约为预期电压峰值的 (3~5)%,试验次数为 30 次^[12-16]。试验结果见表 1,试验得出的结果可直接用于间隙对耐雷性能影响的仿真分析。

表1 复合绝缘子及间隙试验数据

Tab. 1 Composite insulator and gap test data

被试设备名称	直流耐压 /kV	直流击穿电 压/kV	雷电冲击 $U_{50\%}$ /kV
绝缘子	135	152(闪络)	183.0
绝缘子装招弧间隙	50	66(击穿)	83.4

2 间隙对耐雷性能的影响

2.1 仿真模型的建立

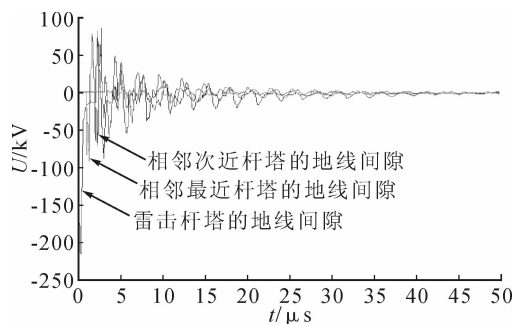
利用 EMTP-ATP 电磁暂态仿真平台,搭建 500 kV 威甘甲线仿真模型,通过仿真的方法得到间隙与雷电流之间的关系,明确间隙对线路耐雷性能的影响。线路采用 JMarti 频变的 LCC 模型,档距取线路平均使用档距 300 m,仿真线路长度 30 km;杆塔采用单一波阻抗模型等效,波阻抗取 150 Ω ,杆塔接地电阻取 15 Ω ;雷电流采用 1.2/50 μs 的负极性双指数波;仿真步长取 5 ns^[17-19]。对于间隙击穿建模时作了理想化的假设,当间隙两端电压达到间隙 $U_{50\%}$ 即试验数值 83.4 kV 时,间隙击穿。仿真时雷电流施加在线路架空地线两接地点中间的杆塔、绝缘地线或导线上。利用已建模型,对雷击塔顶或绝缘地线及雷击导线两种情况地线间隙的击穿情况进行了仿真。

2.2 间隙动作分析

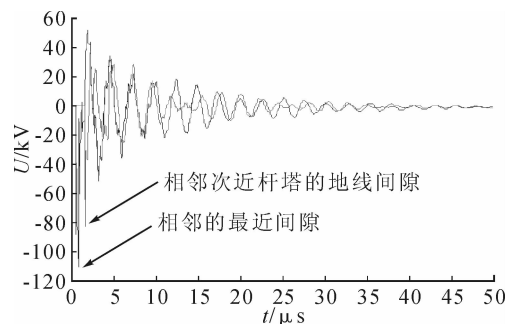
2.2.1 雷击塔顶及地线

雷击塔顶时,当雷电流为 -673 A 时,雷击点所在的杆塔的绝缘地线间隙发生击穿,而相邻基杆塔绝缘地线间隙由于电压较低,未发生击穿。继续增加雷电流,当雷电流达到 -1 400 A 时,雷击点所在杆塔及雷击点相邻的 2 基杆塔绝缘地线间隙均击穿。当电流达到 -3 198 A 时,雷击点所在杆塔及雷击点杆塔前后相邻的 4 基杆塔绝缘地线间隙均击穿,见图 1。由于输电新路杆塔采用波阻抗模型,波阻抗取值为 150 Ω ,雷击杆塔后,雷电流形成的电压大部分压降在杆塔上,所以接地电阻的变化对间隙击穿的最小雷电流影响不大。

当雷击架空地线档距中央时,雷电流为 -304 A

图1 雷击杆塔, $I=-3\ 198\text{ A}$ 间隙击穿电压Fig. 1 Gap breakdown voltage when lightning strike on tower whose amplitude is $-3\ 198\text{ A}$

时,距雷击点最近的2基杆塔遭受雷击的绝缘地线的间隙击穿,而另一条未遭受雷击的绝缘地线间隙均未击穿。当雷电流达到 $-1\ 019\text{ A}$ 时,与雷击点相邻4基杆塔遭受雷击的绝缘地线的间隙击穿,同样另一条未遭受雷击的绝缘地线间隙均未击穿。当雷电流达到 $-1\ 380\text{ A}$ 时,与雷击点相邻4基杆塔遭受雷击的绝缘地线的间隙击穿,另一条未遭受雷击的绝缘地线距雷击点最近的2基杆塔间隙击穿。当雷电流达到 $-1\ 427\text{ A}$ 时,与雷击点相邻4基杆塔2条绝缘地线的间隙均击穿,见图2。

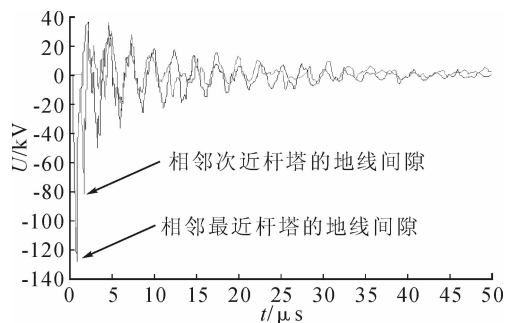
图2 雷击地线档距中央, $I=-1\ 427\text{ A}$ 间隙击穿电压Fig. 2 Gap breakdown voltage when lightning strike on ground wire span central whose amplitude is $-1\ 427\text{ A}$

如不考虑绝缘地线间隙击穿后弧道阻抗的影响,雷击塔顶或雷击地线时,在雷电流较小的情况下,与雷击点相邻的两架空地线间隙均能可靠击穿。当地线绝缘间隙可靠击穿后,绝缘架空地线接地,发挥避雷线在防雷时的分流及耦合作用。而 500 kV 线路发生反击的实际雷电流远大于雷击塔顶或档距中央时地线绝缘间隙的击穿电流,所以绝缘地线间隙对威甘甲线反击耐雷性能基本无影响。

2.2.2 雷击导线

取导线档距 300 m ,雷电绕击档距中央导线边相时,仿真间隙动作情况,当雷电流达到 $-1\ 165\text{ A}$ 时,与雷击点最近的2基杆塔上两条绝缘地线间隙均击穿。当雷电流达到 $-3\ 233\text{ A}$ 时,与雷击点最近

的4基杆塔上两条绝缘地线间隙均击穿。最近杆塔及相邻杆塔间隙击穿时的电压见图3。

图3 雷击导线, $I=-3\ 233\text{ A}$ 间隙击穿的电压波形Fig. 3 Gap breakdown voltage when lightning strike on conductor line whose amplitude is $-3\ 233\text{ A}$

通过以上分析,可以看出地线绝缘化后,当线路遭受雷击时,如果为反击,雷电流幅值超过 $3\ 198\text{ A}$ 时,雷击点临近的杆塔上绝缘地线的间隙均内可靠击穿,随着反击电压的升高,雷击点附近的间隙击穿的个数越多。同样,绕击雷电流幅值超过 $3\ 233\text{ A}$ 时即可使绝缘架空地线的间隙击穿,随着绕击电压的升高,雷击点附近的间隙击穿的个数越多。小于 5 kA 的雷电不足以使 500 kV 线路闪络,而大于 5 kA 的雷电流,与雷击点相邻的地线间隙能可靠击穿,如忽略弧道阻抗影响击穿后绝缘地线等同与接地。通过前述分析,绝缘地线间隙在线路遭受可能引起闪络的雷电流时,绝缘间隙均能可靠击穿,对威甘甲线遭遇雷击后的分流基本无影响。

由于架空地线绝缘化主要通过架空地线在杆塔处的跳接方式不同来实现,一般情况下直线塔采用“下跳”即架空地线通过悬垂绝缘子与杆塔进行连接的方式实现,所以直线段保护角、地线对导线的耦合系数相应发生变化。而耐张塔由于耐张悬挂点的位置不变,绝缘地线在塔头通过“上跳”、“下跳”、“侧跳”的方式实现地线在耐张塔上的绝缘,所以对于耐张段侧线路其保护角变化不大。因此对地线绝缘化前后的耐雷性能的分析主要集中在直线塔保护角变化带来的耐雷性能变化;以及由于地线悬垂挂点位置不同,导致地线对导线耦合系数的变化,带来的耐雷性能变化。

3 地线绝缘化前后耐雷性能比较

3.1 绕击耐雷性能变化分析

在计算输电线路绕击性能的研究方法主要有以中国行业标准为代表的经验模型(简称规程法),电气几何模型法,先导发展模型以及基于试验的绕击概率模型。电气几何模型是指将雷电的放电特性

与线路的结构尺寸联系起来而建立的一种几何分析与计算模型。电气几何模型是当今世界上通用的分析绕击的方法,广泛运用于线路的绕击特性分析和屏蔽失效现象的解释,美国、西欧、日本等许多国家均以电气几何模型来确定线路绕击率^[20-24]。文中选择电气几何模型对威甘甲线进行绕击性能的计算分析。

根据电气几何模型的基本原理,雷电绕击导线不一定会引起闪络,只有在发生绕击的雷电流幅值大于绝缘子绕击闪络的最小雷电流时才会发生闪络,同时随着雷电流的增加,地线及地的击距不断增大,达到某一临界击距后,线路不再发生绕击。在计算最大绕击雷电流时,击距及击距系数采用 IEEE 导则推荐公式^[25](1),式(1)中: r_c 为击距; I 为雷电流幅值。

表 2 地线绝缘化前后保护角的变化

Tab. 2 Protection angle changes before and after ground insulation (°)										
杆塔类型编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
绝缘前	8.60	8.60	8.60	12.60	13.70	11.70	11.70	7.87	8.10	12.70
绝缘后	9.20	9.20	9.20	13.50	14.60	12.50	12.50	8.56	8.80	13.80

根据计算假设条件对上述类型的杆塔进行耐雷水平计算,地面倾角取 0° ,呼称高为 42 m,雷电日取 40 天,地闪密度取 0.07 次/($\text{km}^2 \cdot \text{雷电日}$)^[26-27]。通过计算可以得出,不同类型杆塔在地线绝缘化后耐雷水平及雷击跳闸率的变化见图 4。

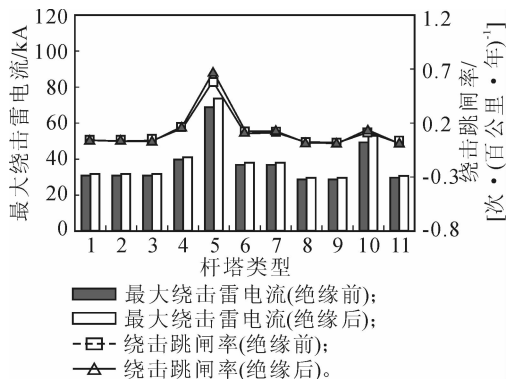


图 4 地线绝缘化后威甘甲线绕击跳闸率变化

Fig. 4 Shielding failure trip-out rate change of Weiganjia transmission line after its ground wire insulation

通过计算可看出,地线绝缘后 11 种悬垂串塔最大绕击雷电流的最大变化为 3.5 kA,变化率为 6.12%,地线绝缘化后最大绕击雷电流的平均变化率为 3.14%,可见地线绝缘化后最大绕击雷电流变化并不大。地线绝缘化后绕击跳闸率变化最大为第 1、2、3 种类型的杆塔,较地线绝缘化前增大 35%,其地线绝缘化前后绕击跳闸率分别为 0.0274 、 0.0372 次/(百公里·年),绕击跳闸率变化了 0.0098 次/(百公里·年),

$$r_c = 10I^{0.65} \quad (1)$$

绕击跳闸率计算如式(2)所示。式(2)中: N_g 为地闪密度; $I_{\max}$ 为可发生绕击的最大雷电流; Z_s 为导线的暴露距离; I_c 为可发生绕击的临界雷电流; $f(I)$ 为雷电流幅值的概率密度函数。对于导线与地线的相对位置,以塔头处的位置为参考,计算时选用杆塔明细表中的直线塔进行计算。

$$SF\text{FOR} = \frac{2N_g}{10} \int_{I_c}^{I_{\max}} Z_s f(I) dI \quad (2)$$

由于耐张塔地线挂点不变,对威甘甲线 11 种悬垂串塔对地线绝缘化前后的保护角进行计算,见表 2,地线绝缘化前后保护角最大变化 1.1° ,全线保护角不超过 15° ,满足《重覆冰架空输电线路设计技术规程》(DL/T 5440—2009)对重冰区防雷的要求。

实际绕击跳闸率变化很小。地线绝缘化后绕击跳闸率最大的为第 5 种类型杆塔,其地线绝缘化前后绕击跳闸率分别为 0.6006 、 0.6827 次/(百公里·年),绕击跳闸率变化了 0.0821 次/(百公里·年),可见绕击跳闸率原有基础上也并未有显著增大。耐张串由于其挂点不变,耐张塔到相邻直线塔的地线保护角变化较直线悬垂串塔间的地线保护角变化小,同样其绕击跳闸率也较直线悬垂串塔的变化率小。

3.2 反击耐雷性能变化分析

反击的分析方法主要为规程法及波阻抗法,为了便于分析文中采用规程推荐的方法对威甘甲线进行反击耐雷性能的计算。规程法中绝缘子的耐雷水平用式(3)表达。

$$I_1 = \frac{u_{50\%}}{(1-k)\beta R_i + \left(\frac{h_a}{h_i} - k\right)\beta \frac{L_i}{2.6} + \left(1 - \frac{h_g}{h_c} k_0\right) \frac{h_c}{2.6}} \quad (3)$$

式(3)中: $u_{50\%}$ 为绝缘子串的雷电冲击 50%放电电压; I_1 为反击耐雷水平; k_0 为避雷线与导线耦合系数; β 为杆塔和避雷线间的分流系数; L_i 为杆塔等效电感; h_g 、 h_c 为杆塔处避雷线、导线悬挂高度; R_i 为杆塔冲击接地电阻。根据地线绝缘化后复合绝缘子及金具的高度,避雷线悬挂点的高度较原来高度低 1 m。仍以威甘甲线的 11 类直线塔悬垂串为例,经计算地线绝缘化前后耐雷水平及反击跳闸率的变化见表 3,计算时雷电活动情况与绕击相同,由表 3 可以看出,地线绝缘化后,11 种直线悬垂串杆塔反

击耐雷水平有不到 1 kA 的增加,反击跳闸率最大降低了 0.004 次/(百公里·年),可见地线绝缘化后直线悬垂串地线耦合系数变化不大,反击耐雷水平基本无变化。同样的由于耐张串地线挂点不变,地线绝缘化前后,耐张塔到临近悬垂串的反击耐雷水平及反击跳闸率变化要比悬垂串塔间变化更小。

表 3 地线绝缘化前反击耐雷水平及反击跳闸率的变化

Tab. 3 Against lightning resistant level and counterattack trip rate changes before and after ground wire insulation

杆塔类型	反击耐雷水平/kA		反击跳闸率/[次(百公里·年) ⁻¹]	
	地线绝缘前	地线绝缘后	地线绝缘前	地线绝缘后
1	146.1	146.5	0.270	0.268
2	145.8	146.2	0.274	0.272
3	145.6	146.0	0.277	0.276
4	144.6	145.0	0.293	0.292
5	144.3	144.6	0.298	0.296
6	144.9	145.2	0.288	0.285
7	144.9	145.3	0.288	0.284
8	134.4	134.8	0.362	0.358
9	134.1	134.5	0.365	0.361
10	133.7	134.0	0.369	0.366
11	133.4	133.7	0.371	0.368

通过以上分析,500 kV 威甘甲线地线绝缘化对耐雷性能的影响中,对绕击耐雷性能的影响比反击耐雷性能的影响大。地线绝缘化后,绕击跳闸率增大,但在原有基础上增大并不多,绕击耐雷性能未出现显著下降;反击耐雷水平、反击跳闸率变化微小,反击耐雷性能基本无变化。以上的分析建立在不考虑地线间隙的燃弧过程及带来的影响,同时忽略雷击发生前,由于地线绝缘化造成的对雷电场强分布及雷电先导发展带来的影响。由于目前尚无手段监测雷击输电线路发展的详细过程,要全面、准确地认识地线绝缘化后对线路的耐雷性能带来的影响,需加强对雷电发生、发展过程的观测,不断开展地线绝缘化后线路雷击规律、耐雷水平、雷击跳闸率等多方位全面的研究。

4 结语

笔者在 500 kV 威甘甲线地线绝缘化后绝缘子及间隙的电气性能试验数据的基础上,利用 EMTP 仿真软件对地线的间隙与雷电击穿的相关性进行了分析;理论计算威甘甲线地线绝缘化前后其保护角及雷击跳闸率的变化。经过仿真计算,威甘甲线遭受反击或绕击,在雷电流较小的情况下,地线绝缘间隙均能够可靠击穿。在采用 120 mm 地线间隙的情况下,绕击跳闸率增加,但在原有基础上增加

不多,绕击耐雷性能未出现显著下降;反击跳闸率变化微小,反击耐雷性能基本不变。由于现有理论及计算假设限制,计算结果并不完全代表实际情况,地线绝缘化对线路耐雷性能的影响需结合实际运行数据,同时加强地线绝缘化所造成的雷电场强分布及雷电先导发展的影响研究,更加全面科学地分析地线绝缘化后对线路耐雷性能的影响。

参考文献:

- [1] 李再华,白晓民,周子冠,等. 电网覆冰防治方法和研究进展[J]. 电网技术,2008,32(4):7-13.
LI Zaihua,BAI Xiaomin,ZHOU Ziguan,et al. Prevention and treatment methods of ice coating in power networks and its recent study[J]. Power System Technology,2008,32(4):7-13.
- [2] 黄强,王家红,欧名勇. 2005 年湖南电网冰灾事故分析及其应对措施[J]. 电网技术,2005,29(24):16-19.
HUANG Qiang,WANG Jiahong,OU Mingyong. Analysis on accidents caused by icing damage in Hunan power grid in 2005 and its countermeasures[J]. Power System Technology,2005,29(24):16-19.
- [3] 蒋兴良,易辉. 输电线路覆冰及防护[M]. 北京:中国电力出版社,2002:15-38.
- [4] 李妍红,王奇. 500 kV 独山变电站直流融冰兼 SVC 装置经济运行研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2012,33(6):9-16.
LI Yanhong,WANG Qi. Research on economic operation of DC de-icer and SVC device in 500 kV dushan substation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2012,33(6):9-16.
- [5] 黄国强,李良书,李为,等. 绕组低频加热技术在变压器现场绝缘受潮处理中的应用[J]. 陕西电力,2014,42(4):49-52.
HUANG Guoqiang,LI Liangshu,LI Wei,et al. Application of winding low frequency heating technology in the treatment of damped transformer insulation at site[J]. Shaanxi Electric Power,2014,42(4):49-52.
- [6] 曹琪,宋平,杨凯全,等. 66 kV 输电线路移动式交流融冰装置研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2012,33(4):34-38.
CAO Qi,SONG Ping,YANG Kaiquan,et al. Research on a portable AC ice-melting device for 66 kV transmission line[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2012,33(4):34-38.
- [7] 傅闯,饶宏,许树楷,等. 输电线路融冰技术研究与应用评述[J]. 南方电网技术,2012,6(3):33-37.
FU Chuang,RAO Hong,XU Shukai,et al. Review on the research & application of transmission lines deicing technology[J]. Southern Power System Technology,2012,6(3):33-37.

- [8] 许树楷, 赵杰. 电网冰灾案例及抗冰融冰技术综述[J]. 南方电网技术, 2008, 2(2): 1-6.
XU Shukai, ZHAO Jie. Review of ice storm cases impacted seriously on power systems and de-icing technology[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(2): 1-6.
- [9] 陈义刚, 范松海. 架空地线的绝缘化改造及融冰方法[J]. 四川电力技术, 2012, 35(3): 74-76.
CHEN Yigang, FAN Songhai. Insulation reconstruction of overhead earth wire and ice melting method[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2012, 35(3): 74-76.
- [10] 吴康平. 500 kV 线路绝缘地线的设计[J]. 电力建设, 2001, 22(11): 11-16.
WU Kangping. Design on insulated ground wire of 500 kV transmission line[J]. Electric Power Construction, 2001, 22(11): 11-16.
- [11] 吴伯华, 张孝军, 方瑜. 超高压线路绝缘地线的研究[J]. 中国电力, 1997, 30(3): 11-12.
WU Baihua, ZHANG Xiaojun, FANG Yu. Study on the performance of insulated ground wire on EHV transmission lines[J]. China Electric Power, 1997, 30(3): 11-12.
- [12] 全国带电作业标准化技术委员会. GB/T 16927.1—2011 高电压试验技术, 第一部分: 一般试验要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [13] 李西育, 党镇平. 空心复合绝缘子密封结构研究[J]. 电瓷避雷器, 2013(4): 10-14.
LI Xiyu, DANG Zhenping. Study on sealing structure of hollow composite[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(4): 10-14.
- [14] 陈仓, 张杰, 赵满江, 等. GIS 典型绝缘故障案例及原因分析[J]. 电瓷避雷器, 2013(6): 7-10.
CHEN Cang, ZHANG Jie, ZHAO Manjiang, et al. Analysis of typical insulation fault cases of GIS[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(6): 7-10.
- [15] 司马文霞, 叶轩, 谭威, 等. 高海拔 220 kV 输电线路绝缘子串与并联间隙雷电冲击绝缘配合研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 168-176.
SIMA Wenxia, YE Xuan, TAN Wei, et al. Lightning insulating co-ordination between insulator string and parallel gap device of 220 kV transmission line at high altitude area[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(10): 168-176.
- [16] 王建国, 方春华, 刘洋, 等. 220 kV 复合绝缘子机电性能试验研究[J]. 高压电器, 2008, 44(4): 332-334.
WANG Jianguo, FANG Chunhua, LIU Yang, et al. Experimental study on electrical and mechanical properties of 220 kV composite insulators[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(4): 332-334.
- [17] 匡洪海, 肖伸平. 500 kV 变电站雷击保护的建模分析[J]. 高压电器, 2008, 44(5): 409-412.
KUANG Honghai, XIAO Shenping. Modeling and analysis of lightning protection for 500 kV substation[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(5): 409-412.
- [18] 赵华忠, 袁超, 颜才升, 等. ± 800 kV 特高压直流耐张串复合绝缘子运行性能研究[J]. 电瓷避雷器, 2013(6): 15-19.
ZHAO Huazhong, YUAN Chao, YAN Caisheng, et al. Analysis of operating performance of composite insulators in 800 kV UHV DC tension strings[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(1): 15-19.
- [19] 刘渝根, 苏玉萍, 刘敏. 750 kV 单回和同杆双回输电线路反击耐雷性能[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 96-99.
LIU Yugen, SU Yuping, LIU Min. Lightning protection of back striking for 750 kV single circuit and double circuit transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 96-99.
- [20] 袁兆祥, 李琥, 项玲. 杆塔模型对特高压变电站反击波过电压的影响[J]. 高电压技术, 2008, 34(5): 867-872.
YUAN Zhaoxiang, LI Hu, XIANG Ling. Influence of different tower models on the lightning back-strike intruding wave overvoltage for UHV substation[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 867-872.
- [21] 赵斌财, 周浩, 钟一俊, 等. 输电线路雷电绕击研究方法浅议[J]. 电瓷避雷器, 2008(1): 29-34.
ZHAO Bincai, ZHOU Hao, ZHONG Yijun, et al. Approaching to rotated lightning strike on transmission line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2008(1): 29-34.
- [22] 黄然, 王磊, 赵现平, 等. 基于危险雷电流区间分布的输电线路雷击故障性质判断方法[J]. 电瓷避雷器, 2013(1): 74-78.
HUANG Ran, WANG Lei, ZHAO Xianping, et al. Identification of shielding failure and back striking based on interval distribution of dangerous lightning current[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(1): 74-78.
- [23] 李兴, 易永亮, 余丰, 等. 输电线路雷电屏蔽性能计算分析[J]. 南方电网技术, 2011, 5(6): 36-38.
LI Xing, YI Yongliang, YU Feng, et al. Calculation and analysis on the lightning shielding performance of power transmission lines[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(6): 36-38.
- [24] 朱时阳, 邓雨荣. 基于改进电气几何模型的输电线路雷电屏蔽性能的研究[J]. 高压电器, 2008, 44(1): 56-58.
ZHU Shiyang, DENG Yurong. Research on shielding lightning performance of electric transmission line with the improved EGM[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(1): 56-58.
- [25] Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society. IEEE guide for improving the lightning performance of transmission lines[M]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 1997.
- [26] 陈水明, 何金良, 曾嵘. 输电线路雷电防护技术研究 (下转第 88 页)

- [8] 付永长,陈涛,张文斌,等. 地下电缆光纤光栅测温试验[J]. 电网技术,2010,34(5):212-215.
FU Yongchang, CHEN Tao, ZHANG Wenbin, et al. Experimental study on temperature measurement of underground cable by fiber bragg grating[J]. Power System Technology, 2010, 34(5):212-215.
- [9] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京:中国电力出版社, 2003.
- [10] SOUZA J A, ORDONEZ J C, HOVSAPIAN R, et al. Thermal modeling of helium cooled high-temperature superconducting DC transmission cable[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(3):947-952.
- [11] 鲁志伟,于建立,郑良华,等. 交联电缆集群敷设载流量的数值计算[J]. 高电压技术,2010,36(2):481-487.
LU Zhiwei, YU Jianli, ZHENG Lianghua, et al. Numerical calculation of ampacity for XLPE cables in cluster laying [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2):481-487.
- [12] 赵艳粉. 长距离跨桥高压电缆的关键技术设计[J]. 电网与清洁能源,2013,29(11):25-28.
ZHAO Yanfen. Key technologies in laying high-voltage cables under long-distance bridges[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(11):25-28.
- [13] 张洪麟,唐军,陈伟根,等. 基于有限元法的地下电缆群温度场及载流量的仿真计算[J]. 高压电器,2010,46(2):42-45.
ZHANG Honglin, TANG Jun, CHEN Weigen, et al. Simulation of temperature field and ampacity of underground cable system based on finite element method[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(2):42-45.
- [14] 刘刚,雷鸣,阮班义,等. 考虑轴向传热的单芯电缆线芯温度实时计算模型研究[J]. 高电压技术,2012,38(8):1877-1883.
LIU Gang, LEI Ming, RUAN Banyi, et al. Model research of real-time calculation for single-core cable temperature considering axial heat transfer[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8):1877-1883.
- [15] 李小峰,冯宾,陈中豪,等. 500 kV 交流超高压电缆选型分析[J]. 电网与清洁能源,2013,29(11):29-32.
LI Xiaofeng, FENG Bin, CHEN Zhonghao, et al. Analysis of the type selection of the 500 kV AC extra high voltage cables[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(11):29-32.
- [16] 杨永明,程鹏,陈俊,等. 考虑空气流场影响的电缆散热研究及其影响因素与经济性分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(1):50-54.
YANG Yongming, CHENG Peng, CHEN Jun, et al. Cable heat dissipation considering air flow field, its influencing factors and economical efficiency[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1):50-54.
- [17] SAKIS M P, MARTIN J M A. Calculation of secondary cable losses and ampacity in the presence of harmonics[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(2):451-459.
- [18] HIRANANDANI A. Calculation of cable ampacities including the effects of harmonics[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 1998, 4(2):42-51.
- [19] PATIL K D, GANDHARE W Z. Threat of harmonics to underground cables[C]//Students Conference on Engineering and Systems. Aurangabad, India: [s.n.], 2012:16-18.
- [20] 王巧玲,杨玉平,梁永春. 基于热电耦合的10 kV XLPE 地下电缆群温度场数值计算[J]. 电工电能新技术,2012,31(2):27-30.
WANG Qiaoling, YANG Yuping, LIANG Yongchun. Electro-thermal coupling computation of 10 kV XLPE underground power cables[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2012, 31(2):27-30.
- [21] 王有元,陈仁刚,陈伟根,等. 电缆沟敷设方式下电缆载流量计算及其影响因素分析[J]. 电力自动化设备,2010,30(11):24-29.
WANG Youyuan, CHEN Rengang, CHEN Weigen, et al. Calculation of trench laying cable ampacity and its influencing factors[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(11):24-29.
- [22] 党沙沙,许洋,张红松,等. ANSYS 12.0 多物理耦合场有限元分析从入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- 李海英(1975—),女,博士,副教授,研究方向为电力系统供电安全。
- 刘毅超(1988—),男,在读硕士研究生,研究方向为电力系统供电安全。
- 宋建成(1957—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为矿用智能电器开发、矿井供电安全与矿山设备安全预警。

(上接第81页)

- (一):雷电参数[J]. 高电压技术,2009,35(12):2903-2909.
CHEN Shuiming, HE Jinliang, ZENG Rong. Lightning protection study of transmission line, Part I: Lightning parameters[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12):2903-2909.
- [27] 郑家松,李广福,季征南,等. 山区500 kV 输电线路雷电屏蔽性能模型试验研究[J]. 高压电器,2009,45(5):119-122.
ZHENG Jiasong, LI Guangfu, JI Zhengnan, et al. Small-scale model experimental study on lightning shielding performance of 500 kV transmission lines in mountain area[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5):119-122.
- 王磊(1978—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为过电压与绝缘配合、输电线路防雷技术研究。