

文章编号:1671-251X(2019)04-0095-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2018120008

某矿区电网进线段雷击事故 分析及改造措施

潘欢¹, 沈璟², 陈锦麟²

(1. 福建省电力有限公司 经济技术研究院, 福建 福州 350300;
2. 福建省电力有限公司 福州供电公司, 福建 福州 350300)



扫码移动阅读

摘要:针对屯兰变电站进线段杆塔遭受雷击导致主变压器被打坏的事故,着重对事故中进线段防雷保护措施所暴露出的问题进行剖析研究。研究结果显示,进线段防雷保护存在杆塔接地电阻超标、线路绝缘水平过高、避雷器的动作值与线路绝缘水平不匹配等问题。针对所存在的问题及隐患,提出了以下改造措施:利用树枝状放射接地体优化进线段杆塔冲击接地;采用可调式过电压保护间隙配合终端杆塔线路避雷器,形成进线段精细化综合保护;在进线段终端杆塔上装设无间隙的氧化锌避雷器。ATP-EMTP 仿真结果表明,3种改造措施的综合作用能够有效降低雷电侵入波的幅值和陡度,保证矿区电网安全运行。

关键词:煤矿变电站;雷击事故;进线段防雷保护;精细化保护;接地电阻;绝缘水平;避雷器
中图分类号:TD61 **文献标志码:**A

Lightning strike accident analysis and modification measures for
incoming lines of power grid in a mining area

PAN Huan¹, SHEN Jing², CHEN Jinlin²

(1. Economic Institute of Technology, Fujian Electric Power Company, Fuzhou 350300, China;
2. Fuzhou Power Supply Company, Fujian Electric Power Company, Fuzhou 350300, China)

Abstract:In view of the accident of main transformer being broken due to tower at incoming lines of Tunlan substation caused by lightning strike, the problems of lightning protection measures of the incoming lines were analyzed and researched. The research results show that the lightning protection of the incoming lines has problems such as excessive grounding resistance of the tower, too high lines insulation level, and mismatching between action value of arrester and lines insulation level. In view of the existing problems and hidden dangers, the following modification measures were proposed: optimize impulse grounding of the tower at incoming lines by using dendritic radioactive grounding body; use adjustable overvoltage protection gap to match lines arresters on the terminal tower, so as to form refined comprehensive protection of the incoming lines; install gap-free zinc oxide arrester on the terminal tower at incoming lines. The ATP-EMTP simulation results show that the combined effects of the three modification measures can effectively reduce amplitude and steepness of lightning intruding wave and ensure safe operation of the mine power grid.

Key words: coal mine substation; lightning strike accident; lightning protection for incoming line; refined protection; grounding resistance; insulation level; lightning arrester

收稿日期:2018-12-05;修回日期:2019-03-15;责任编辑:胡娴。

作者简介:潘欢(1988—),女,湖南娄底人,工程师,研究方向为电力系统运行与控制,E-mail:935305153@qq.com。

引用格式:潘欢,沈璟,陈锦麟.某矿区电网进线段雷击事故分析及改造措施[J].工矿自动化,2019,45(4):95-100.

PAN Huan, SHEN Jing, CHEN Jinlin. Lightning strike accident analysis and modification measures for incoming lines of power grid in a mining area[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(4): 95-100.

0 引言

进线段保护是指在靠近变电站 1~2 km 的一段线路上加强防雷保护措施,降低该范围内雷害事故发生的概率,避免雷电侵入波未经衰减从很近的地方入侵站内设备。然而,目前一些大型煤炭企业拥有属于自己的电力供区,在进线段防雷保护上存在许多漏洞^[1]。文献[2]对西山煤电集团有限责任公司下属的 110 kV 屯兰变电站主变压器被打坏的原因进行分析并提出了改造措施。然而,由于线路的绝缘水平远高于变电站内设备,来自线路的雷电侵入波幅值大、陡度大,如果不经进线段防雷保护的有效衰减直接入侵变电站,即便接地系统良好也会对主设备安全构成很大的威胁。本文在文献[2]的基础上,着重对事故中进线段防雷保护措施所暴露出的问题进行剖析,针对性地提出改造措施,并通过仿真分析验证了改造后的效果。

1 进线段防雷措施存在的问题

屯兰 110 kV 变电站共有 8 回 35 kV 进线,均采用双避雷线保护;进线段杆塔上装设有带间隙的氧化锌避雷器。雷击发生时,装设在屯镇 I 回线进线段杆塔上的 3 组避雷器均未动作。下面对进线段防雷措施存在的问题进行分析。

1.1 进线段杆塔接地电阻超标问题

根据现场第 3 级杆塔上的明显落雷痕迹推断,这是一起近端杆塔反击雷过电压入侵变电站的事故。为分析反击发生的原因,测得 35 kV 屯镇 I 回进线第 1—6 级杆塔的工频接地电阻分别为 17, 10, 27, 36, 30, 25 Ω 。其中第 3—6 级杆塔的接地电阻连续偏高^[3]。此外,部分杆塔的接地引下线存在不同程度的锈蚀甚至断裂。

根据式(1)计算第 1—6 级杆塔的耐雷水平:

$$I_L = \frac{U_{50\%}}{(1-K)\left(\beta R_{ch} + \beta \frac{L_{gt}}{2.6} + \frac{h_d}{2.6}\right)} \quad (1)$$

式中: $U_{50\%}$ 为线路绝缘子的 50%放电电压,取线路的平均绝缘水平 460 kV; K 为耦合系数,取 0.143; β 为分流系数,取 0.86; R_{ch} 为冲击接地电阻, $R_{ch} = \alpha R$, α 为冲击接地系数,取 0.8, R 为工频接地电阻; L_{gt} 为杆塔电感,取 16.40 μH ; h_d 为导线的平均高度,取 9.2 m。

将各参数值代入式(1)计算可得 1—6 级杆塔的耐雷水平分别为 26.0, 33.9, 19.5, 15.9, 18.1, 20.5 kA。按照 DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》规定,在有避雷线保护的

况下,35 kV 线路变电站进线保护段的最低耐雷水平为 30 kA。该线路中除了第 2 级杆塔的反击耐雷水平大于 30 kA 外,其余均低于 30 kA^[4-5],不满足要求。

此外,部分杆塔虽然接地电阻不高,但是缺少冲击接地优化措施,导致冲击系数过大,不能有效降低杆塔的冲击接地电阻,在雷电流入地时仍可能造成极高的冲击塔顶电位。因此,对进线段杆塔进行降阻时应重点降低冲击接地电阻^[6-7]。

1.2 线路绝缘水平过高问题

出于降低线路雷击跳闸率和防污闪的需要,该矿区人为地增加了绝缘子的片数,以提高线路的绝缘水平。事故线路采用的是 5 片型号为 XWP2-100 的瓷式双伞绝缘子和 5 片型号为 XWP-100 的普通瓷式单伞绝缘子。用冲击电压发生器对上述绝缘子分别进行冲击放电电压试验,测得其 $U_{50\%}$ 冲击放电电压分别为 528 kV 和 480 kV。而 35 kV 变压器绕组最大全波冲击耐压值仅为 200 kV。

增加线路绝缘水平虽然能在一定程度上解决山区电网雷击跳闸率过高及煤矿电网绝缘子污闪严重的问题,但同时也加剧了线路绝缘与变电站设备绝缘配合上的矛盾,使得侵入变电站的雷电过电压过高。即使避雷器可靠动作,也会产生很高的残压,此时若避雷器、计数器、接地线、接地装置等任何一个环节出现问题,都极易对主设备构成威胁。

1.3 避雷器动作值与线路绝缘水平配合不当问题

根据现场调查结果,当雷击发生时,35 kV 屯镇 I 回进线第 3 级杆塔上装设有一组型号为 YH5CX-51-134 的带间隙线路避雷器,而当反击事故发生时,该避雷器未及时动作,这也是导致反击雷过电压侵入变电站,造成主变压器损坏的关键因素。为探究该避雷器未动作的原因,验证其保护动作值与线路绝缘水平是否可靠配合,对事故线路的避雷器和绝缘子进行了绝缘配合试验,并依据避雷器的间隙特性要求进行分析。

1.3.1 串联间隙避雷器的间隙特性要求

带间隙的氧化锌避雷器的基本结构是通过一个复合式绝缘子将 2 个间隙固定在两端,并与避雷器本体串联。在正常运行情况下,串联间隙隔离工频电压,避雷器本体不承受电压,雷击发生时,空气间隙被击穿,避雷器本体动作,瞬间将雷电流泄放入地。

一般来说,对线路避雷器的串联间隙有如下要求:

(1) 在雷电冲击下,间隙应及时可靠动作,保护绝缘子串。串联间隙的 50%放电电压 $U_{a50\%}$ 必须低于并联绝缘子串的 50%放电电压 $U_{i50\%}$,二者的配

合系数需大于 1.18,且 $U_{a50\%}$ 包络线必须低于 $U_{i50\%}$ 包络线的 10% 以上。因此,间隙的距离不能太大,并要保证避雷器和绝缘子在雷电冲击下具有一定的配合裕度^[8-9]。

(2) 间隙应能够承受暂时过电压,在 2.5 倍操作过电压下必须保证不发生误动作。为满足这一要求,串联间隙的距离不能太小,既要保证在暂时过电压和操作过电压下不误动作,又要保证避雷器本体出现故障时间隙能够可靠地隔离。

可见,避雷器的间隙距离存在上限和下限,必须通过相关试验验证避雷器的间隙距离是否安全可靠^[10-12]。

1.3.2 避雷器与绝缘子绝缘配合试验分析

取线路上运行的 5 片 XWP2-100 瓷式绝缘子和 YH5CX-51/134 线路避雷器进行冲击放电试验,结果见表 1。

表 1 50%冲击放电试验结果

Table 1 Results of 50% impulse discharge test

试品	正极性	负极性	正负极性间的偏差/%
	$U_{50\%}/\text{kV}$	$U_{50\%}/\text{kV}$	
5 片 XWP2-100 瓷式绝缘子	515	528	2
YH5CX-51/134 避雷器	492	496	1

从试验数据可以看出,虽然避雷器的正负极 50%放电电压均低于 5 片 XWP2-100 瓷式绝缘子,但未保证有一定的配合裕度。其正极性 $U_{50\%}$ 的配合系数为 1.05,负极性 $U_{50\%}$ 的配合系数为 1.06,均低于 1.18,不满足绝缘配合要求。

由于雷电冲击持续时间很短,放电时延在放电过程中起重要作用, $U_{50\%}$ 并不能完全反映冲击放电特性,所以,还必须考虑避雷器与绝缘子伏秒特性的配合。伏秒特性试验方法步骤:保持绝缘子和避雷器间隙的距离、冲击电压波形不变,逐级升高电压;当绝缘子和间隙放电时,记录电压波形,并读取电压 U 与击穿时间 t 。伏秒特性试验数据见表 2,伏秒特性曲线如图 1 所示。

表 2 伏秒特性试验数据

Table 2 Volt-second characteristic test data

5 片 XWP2-100 瓷式绝缘子		YH5CX-51/134 线路避雷器	
冲击电压/kV	击穿时间/ μs	冲击电压/kV	击穿时间/ μs
345	9.57	305	9.20
372	6.40	342	4.21
418	3.87	410	2.90
515	2.62	527	1.94
605	1.98	613	1.74
746	1.23	732	1.03

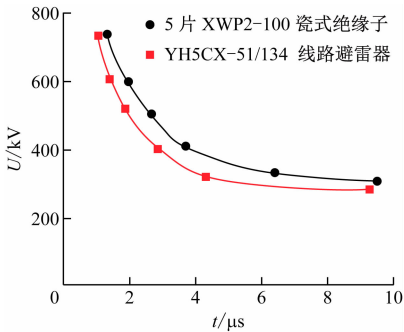


图 1 避雷器与绝缘子的伏秒特性曲线
Fig. 1 Volt-second characteristic curves of arrester and insulator

从图 1 可以看出,虽然线路避雷器的雷电冲击放电伏秒特性曲线的包络线均位于绝缘子下方,但是电压之间的最大差距不到 10%,不满足线路绝缘配合要求,导致雷击时保护失效,雷电过电压未经过线路避雷器的有效削弱就侵入变电站。

造成绝缘不配合的主要原因:

(1) 目前一些生产线路避雷器的厂家本身并不具备相关的生产试验条件,在生产过程中未能对间隙的放电特性和伏秒特性进行严格试验,导致生产出的避雷器与线路绝缘水平不配合。

(2) 一些线路避雷器在刚刚安装时与绝缘子配合良好,但是由于各种外界因素(如风吹、导线舞动等)的影响,导致间隙距离改变,造成了不配合。

2 进线段防雷改造措施分析

2.1 进线段杆塔接地装置改造

降低进线段杆塔的冲击接地电阻,能够有效提高其反击耐雷水平,从而降低进线段内反击和绕击事故发生的概率,是进线段防雷中的关键。使用树枝状放射性接地装置对进线段杆塔进行改造,重点降低杆塔的冲击接地电阻。

根据杆塔电阻的测量情况,对进线段前 6 级杆塔的接地装置进行如下改造:

(1) 根据杆塔周围地形情况,沿土壤电阻率低的方向做水平接地体放射线,每基杆塔沿 4 个塔基处放射出 4 根线,长度为 30~50 m(视地形情况而定)。在放射线末端,结合地形土质情况做放射分支线,即树枝状放射线,接地体埋深约 1 m。

(2) 在水平接地体放射线与放射分支线的连接点处打入垂直接地体。

(3) 在水平接地体和放射接地体周围施加吸水性、保水性好、胶质价高、黏度大的 GPF-94 膨润土降阻剂。

杆塔树枝状放射式接地方式如图 2 所示。结合杆塔地形实际情况,若杆塔地处人烟稀少地区,则采

用第 1 种接地改造方式;若周围经常有人经过,则采用第 2 种接地方式,用圆弧地网连接水平接地体,改善接地装置的均压,保证周围行人的的人身安全。

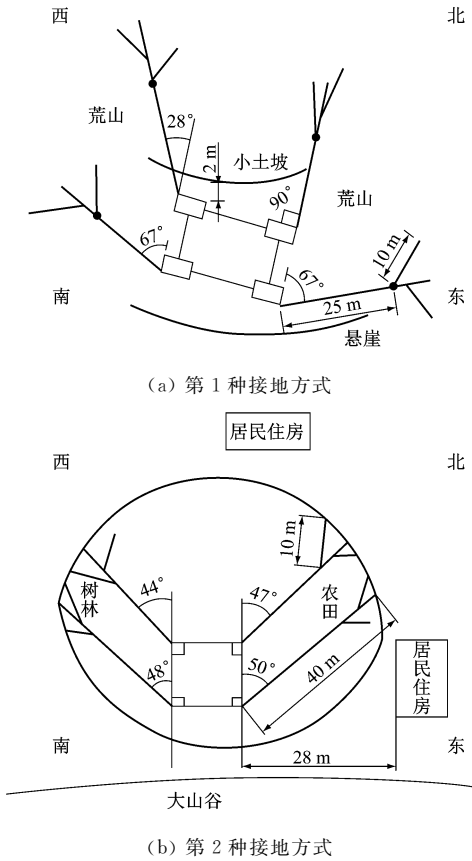


图 2 杆塔树枝状放射式接地方式

Fig. 2 Dendritic radioactive grounding method of tower

较之于传统的水平放射状接地体,树枝状接地装置能够更好地降低杆塔的冲击接地电阻。因为当雷击发生时,雷电流通过接地装置流入大地,树枝状接地装置的末端存在多个水平和垂直分支线,会发生很明显的端部效应,使放射分支线周围的土壤发生局部火花放电并被击穿,改变接地装置附近的局部场强,大大增加了接地装置的有效长度和散流性能。同时由于施加了性能良好的 GPF-94 膨润土降阻剂,相当于扩大了接地体的径向尺寸和等效截面积,能够有效减小接地极上的冲击波陡度,使接地体的冲击特性得到很大改善,从而达到降低杆塔的冲击接地电阻的目的^[13-15]。

2.2 进线段精细化保护

变电站电气设备遭损坏的一个重要原因是线路绝缘与变电站设备的绝缘配合存在矛盾,造成沿线路侵入变电站的雷电波幅值陡度过大,从而危及站内设备安全。因此,本文提出一种进线段精细化保护方法,通过装设可调式过电压保护间隙来保证绝缘配合。将该方法与传统防雷技术配合使用,可达到良好的防雷效果。

可调式过电压保护间隙结构如图 3 所示。将一对镀铜可调的球间隙并联在绝缘子两端,间隙距离根据绝缘子 50%冲击放电试验结果设定,一般略低于绝缘子的 $U_{50\%}$ 。当线路遭受雷击时,绝缘子两端电压瞬间升高,由于保护间隙的雷电冲击放电电压低于绝缘子的 $U_{50\%}$,间隙先于绝缘子放电,因此能够使绝缘子串免于闪络,且间隙击穿后是纯空气击穿,所形成的瞬时电弧极易受风力和电动力的作用而快速熄灭,从而大大降低电网单相接地故障的概率。与线路避雷器相比,可调式过电压保护间隙的保护动作值是可调的,能够保证与线路的绝缘水平有着良好的精细化配合。

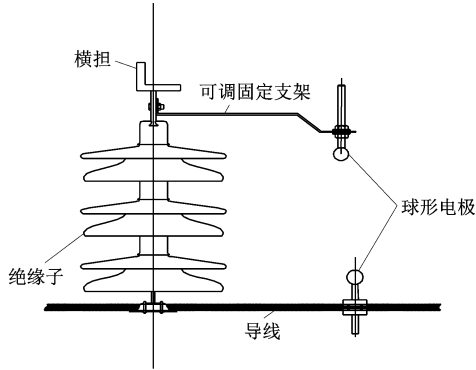


图 3 可调式过电压保护间隙结构

Fig. 3 Structure of adjustable overvoltage protection gap

具体装设的杆塔级数结合线路的具体情况而定,一般取第 4—10 级杆塔。以 6 级为例做具体说明,第 1 级杆塔上保护间隙动作值参照母线侧避雷器的雷电冲击残压来设定,高于其 20%~30%;靠近线路侧的第 6 级杆塔的保护间隙动作值设置为线路绝缘子 $U_{50\%}$ 的 80%;从第 6 级始逐级降低保护间隙动作值,直至第 1 级终端杆塔。其中第 4—6 级杆塔的保护间隙动作值与线路的绝缘水平相配合,第 1—3 级杆塔的间隙保护动作值与变电站避雷器的冲击残压相配合。每级间隙相互配合,逐级动作,对沿线路侵入变电站的雷电波进行逐级拦截泄放,充分限制雷电侵入波的幅值和陡度,从而保护站内重要设备。

2.3 进线段终端杆塔上线路避雷器的安装

在进线段终端杆塔上装设一组线路避雷器,能够进一步泄放雷电能量,限制流过母线避雷器的雷电流,与进线段内的过电压保护间隙和站内避雷器形成联合保护,进一步加强进线段对雷电波的衰减。鉴于带间隙线路氧化锌避雷器的局限性,建议使用无间隙的氧化锌避雷器,它主要利用氧化锌电阻良好的非线性来达到保护目的,相比于带间隙的线路避雷器,具有动作可靠性高、无放电延时和无分散性等优点。

无间隙的氧化锌避雷器的一大缺点是没有串联间隙隔离工频电压,其氧化锌阀片需长期承受工频电压的作用,容易发生电热老化,因此,需要对其进行必要的维护。进线段杆塔距离变电站较近,维护方便,且考虑到进线段防雷保护的重要性,故建议在进线段终端杆塔上加装一组无间隙的线路避雷器,并定期进行绝缘电阻试验、泄漏电流试验等,以监测其运行状态,保证其可靠性。

3 仿真研究

为定量分析上述 3 种改造措施的防雷效果,使用 ATP-EMTP 电磁暂态软件模拟 35 kV 配电线路进线段遭受雷击的情况,分析采取改造措施后对雷电侵入波的衰减情况。

选用 ATP-EMTP 中的 Flash Mode 模型来模拟保护间隙,终端塔安装的保护间隙动作值参考母线侧避雷器雷电冲击残压(高于其 20%~30%)设定,取 170~175 kV。前 4 级杆塔的间隙动作值分别取 175,219,274,332 kV。选用无间隙的氧化锌线路避雷器,型号为 HY5WX-54/134,额定电压为 54 kV,雷电冲击残压为 134 kV。选用 ATP-EMTP 中的 MOA 模型仿真,接地引下线的长度为 5 m,电感为 4 μ H/m,接地电阻为标准值 10 Ω 。考虑到 35 kV 线路的杆塔高度一般不超过 40 m,故杆塔接地模型采用集中参数模型,用等效电阻和等效电感来模拟,取铁塔的等值电感为 0.42 μ H/m,波阻抗为 130 Ω ,波速为 230 m/ μ s。仿真模型如图 4 所示。

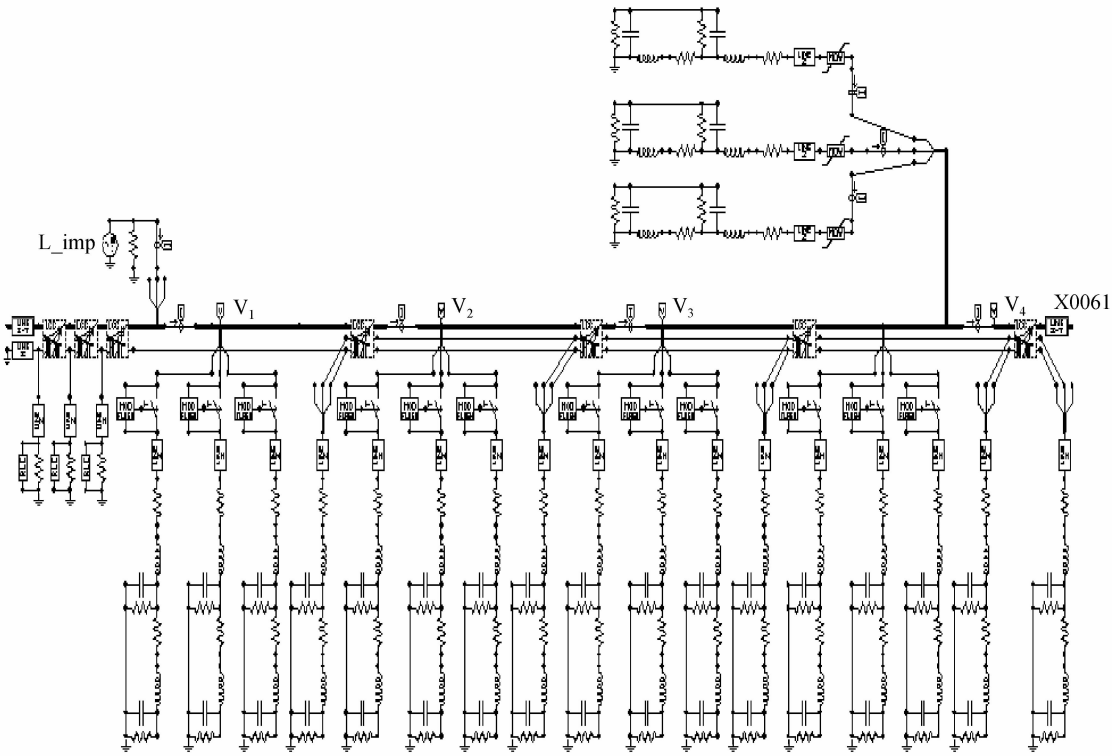


图 4 ATP-EMTP 仿真模型
Fig. 4 ATP-EMTP simulation model

选用 1.2/50 μ s 的指数波和幅值为 400 kV 的负极性雷电波来模拟进线段第 4 级杆塔外侧 B 相遭受雷击的情形,得到 V_1 — V_4 四个观测节点的电压幅值分别为 390,195,164, 103 kV。3 种措施综合作用时各节点的过电压波形如图 5 所示。

从图 5 可以看出,在 3 种措施共同作用下,雷电侵入波幅值显著降低,从 400 kV 开始衰减,至终端杆塔处仅为 103 kV,远低于 35 kV 变压器的全波冲击耐受值 200 kV,且陡度也有了很大的下降,能够充分保证 35 kV 变电站内主设备的安全。

4 结论

- (1) 在进线段杆塔上装设可调式过电压保护间隙能够很大程度上限制终端杆塔处雷电冲击波的幅值和陡度,从而降低雷电波对终端杆塔上线路避雷器造成的冲击,有利于保证避雷器的安全可靠动作。
- (2) 在进线段终端杆塔上装设无间隙的氧化锌避雷器对限制线路末侧雷电冲击波幅值和陡度贡献很大,将其与可调式过电压保护间隙相配合,能够起到很好的防雷效果。在安装时必须保证其保护水平

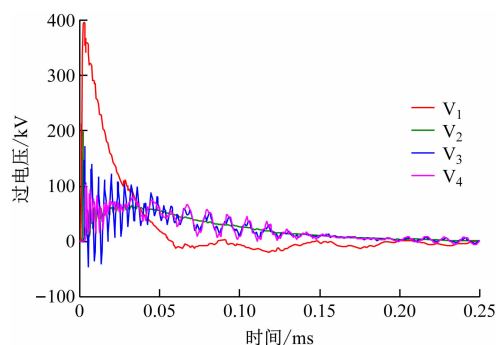


图5 3种措施综合作用时各节点的过电压波形

Fig. 5 Overvoltage waveforms of each node when the three measures are combined

与线路绝缘水平有着良好配合,力图以最少的避雷器数量达到最佳的防雷效果。

(3) 优化进线段杆塔冲击接地,降低冲击接地电阻是降低进线段雷害事故发生率的关键,能保证线路避雷器动作时迅速释放雷电能量,从而有效降低塔顶电位。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 陈锦麟,林少山,程凤鸣,等. 一起矿区电网雷击打坏主变事故分析及改造措施[J]. 电瓷避雷器,2015(2):56-61.
CHEN Jinlin, LIN Shaoshan, CHENG Fengming, et al. Analysis and modification measures of a lightning damage accident of main transformer in mining area power grid[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(2): 56-61.
- [3] GB/T 775.2—2003 绝缘子试验方法 第2部分:电气试验方法[S].
- [4] 邓杰文,任文斌,张东,等. 某矿区瓦斯电厂 35 kV 进线遭受雷击事故分析与防雷措施研究[J]. 电瓷避雷器,2012(6):81-85.
DENG Jiewen, REN Wenbin, ZHANG Dong, et al. Analysis and study on lightning accident and lightning protection measures of 35 kV inlet wire of gas power plant in mining area [J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(6): 81-85.
- [5] 董爱华,王玉梅,朱登惠,等. 郑州煤业集团矿山线雷击断线事故的分析与对策[J]. 工矿自动化,2009,35(9):116-119.
DONG Aihua, WANG Yumei, ZHU Denghui, et al. Analysis of wire breakage accident by lightning stroke

of mine line of Zhengzhou Mining Group and its countermeasures[J]. Industry and Mine Automation, 2009, 35(9): 116-119.

- [6] 刘源,彭利强,王伟平,等. 配电网架空线路并联可调间隙保护装置研究[J]. 高压电器,2011,47(4):47-51.
LIU Yuan, PENG Liqiang, WANG Weiping, et al. Research on adjustable gap lightning protection device for distribution network overhead lines [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(4): 47-51.
- [7] 童年,周易龙,周利兵,等. 某矿区变电站进线段防雷改造措施及仿真分析[J]. 工矿自动化,2014,40(4):105-110.
TONG Nian, ZHOU Yilong, ZHOU Libing, et al. Lightning protection measures of inlet line of a mining area substation and its simulation analysis [J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(4): 105-110.
- [8] 何计谋,洪波,李亚东,等. 输电线路保护用有串联间隙避雷器间隙特性的研究[J]. 电瓷避雷器,2006(4):25-29.
HE Jimou, HONG Bo, LI Yadong, et al. Study on gap performance of line surge arrester with series gap[J]. Insulators and Surge Arresters, 2006(4): 25-29.
- [9] 胡大明,弥臻. 线路避雷器应用情况分析和新型线路避雷器的设想[J]. 高压电器,2005(1):59-61.
HU Daming, MI Pu. Present situation of application of line type surge arrester and its further improvement[J]. High Voltage Apparatus, 2005(1): 59-61.
- [10] 甘鹏,周锋,徐鹏,等. 山区配电变压器防雷措施探讨[J]. 变压器,2011,48(2):24-26.
GAN Peng, ZHOU Feng, XU Peng, et al. Discussion on measures of lightning protection of distribution transformer in mountain area[J]. Transformer, 2011, 48(2): 24-26.
- [11] 甘鹏,李景禄. 广西钦州配电变压器的防雷保护[J]. 电力建设,2011,32(8):49-53.
GAN Peng, LI Jinglu. Lightning protection of distribution transformer in Qinzhou of Guangxi[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(8): 49-53.
- [12] 李景禄,吴维宁,杨廷方,等. 配电网防雷保护的分析和研究[J]. 高电压技术,2004,30(4):58-59.
LI Jinglu, WU Weining, YANG Tingfang, et al. Analysis of lightning protection of distribution networks [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(4): 58-59.
- [13] 李景禄. 实用配电网技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- [14] 李景禄. 高电压技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.
- [15] 李景禄. 接地装置的运行与改造技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.