

「仿真模拟」

基于ATP/EMTP的变电站35 kV进线段可调保护间隙组合防雷措施仿真研究分析

文/湖南省电力公司检修公司 刘源 王鹏 毛志平

利用ATP/EMTP仿真程序针对某35 kV变电站进线段加装多级间隙防雷装置并逐级降低其闪络电压值,以减小雷电入侵波幅值的改进措施建立相关电气模型,并对进线段遭雷击的暂态过程仿真和分析;通过对数据结果进行研究分析,结果表明该措施能够有效地抑制变电站雷电入侵波的峰值,并能减小流经避雷器的雷电流,对变电站内主变压器进行有效保护;另外通过对雷电入侵波进行频谱分析后可得多级间隙防雷措施对抑制雷电入侵波中高频分量的幅值具有一定作用。

我国35 kV变电站一般采用架设1~2 km的避雷线、耦合地线等方法进行防雷保护,并通过采用加强绝缘的方法(增加绝缘子片数)来提高配电网的耐雷水平,但雷击架空线路或避雷线时,在变电站进线段上所产生的雷电过电压分量仍然能传入变电站。虽然通过加强绝缘的方法在提高了耐雷水平的同时也减少了线路上雷电流的泄放途径,使得线路雷电流的幅值也有所提高,这样将危害到进线段的防雷保护设备以及变电站内部电气设备以及整个电网的安全运行。近年来国内外的专家学者对110 kV及以上电压等级的变电站雷电入侵波进行了大量的仿真和研究,但对35 kV变电站进线段的雷电防护措施的仿真及研究仍然比较少。

因此,针对某35 kV变电站其进线段经常发生雷击而易导致其进线段避雷器受损、炸裂的事故而提出了加装多级间隙防雷装置并逐级降低其闪络电压值,以减小雷电入侵波幅值的改进措施,并利用ATP/EMTP仿真程序建立相应电气模型并对该措施对于抑制变电站雷电入侵波的效果及作用进行仿真和分析。

配网可调保护间隙结构及原理

1. 可调保护间隙基本结构

绝缘子串加装可调保护间隙图如图1所示。

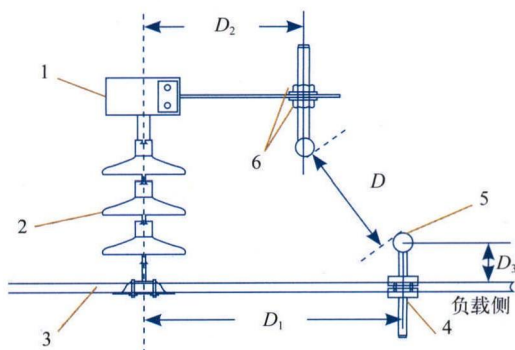


图1 绝缘子串加装可调保护间隙图

- 1—横担 2—绝缘子串 3—裸导线或绝缘导线
4—接地极的固定金具 5—间隙的球形电极
6—间隙可调设计

2. 可调间隙防雷装置的保护原理

图1中所示6部分的间隙可调装置可以根据装置投入使用之后的实际情况调整球形电极之间的距离 D ,使其能够灵活调整间隙距离从而达到实现对线路、绝缘子的有效保护;可调设计还可以通

过逐级调整间隙距离降低其 $U_{50\%}$ 放电电压,组成多组不同 $U_{50\%}$ 放电电压的保护间隙并配合站内及线路其他防雷装置构成变电站进线段的综合保护,减小雷电入侵波对变电站主变压器、开关及断路器的危害,对其实现有效地防雷保护。

在雷电冲击电压作用下,空气介质下50%闪络电压的概率大体上仍服从正态分布,为

$$p = \int_{-\infty}^u \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{u-u_{50\%}}{\delta\sqrt{2}}\right] du \quad (1)$$

式中, u 为放电两端电压峰值; $u_{50\%}$ 为50%闪络电压值; δ 为标准差(取3%)。

现定义间隙的50%闪络电压为 $U_{g50\%}$;绝缘子的50%闪络电压为 $U_{i50\%}$ 。通过计算可得,当间隙的50%闪络电压 $U_{g50\%}$ 为绝缘子的50%闪络电压 $U_{i50\%}$ 的0.85倍时,间隙能够对绝缘子进行有效保护,即优先于绝缘子闪络放电的概率为99.993%。因此可通过50%冲击电压试验确定当 $U_{g50\%} = 0.85 U_{i50\%}$ 时间隙的距离 D ,从而使得间隙能够对绝缘子进行有效保护。

当线路正常运行时,可调保护间隙处于工频电场之中,由于工频电场强度无法使得空气间隙被击穿,此时间隙对线路的运行并无影响,有别于MOA避雷器会因为长时承受工频电压而老化,甚至出现故障等情况;而当线路受到雷电过电压的影响时,绝缘子串两端将承受较高的雷电过电压,此时间隙将优先于绝缘子闪络使得雷电流泄入大地,对于配电网中性点电容电流较小的线路,

间隙间电弧将在电磁力以及风力等外力的作用下被拉长后迅速熄灭。

模型的建立和参数选择

采用ATP/EMTP电磁暂态计算程序对某变电站35 kV的雷害严重的F2线进线段进行仿真,由于变电站的防雷保护也主要是对变压器的保护,因此仅对于变电站内变压器上的雷电过电压波进行研究分析,并未考虑其他设备上所受的雷电过电压值。该变电站对靠近变电站的2 km长的35 kV进线段全线架设单避雷线,为简化模型,本模型仅从F2线进线段遭雷击后,雷电入侵波对主变压器的影响进行仿真并针对该两种情况下保护间隙的作用效果进行分析研究,仿真模型如图2所示。

1. 架空线路及杆塔模型

由于该变电站进线段采用单避雷线对35 kV进线段进行保护,根据线路实际参数选取ATP中的LCC模型对架空线路及避雷线进行模拟,实际导线型号为LGJ-120/20,地线型号为LGJ-35,档距50 m,另取导线弧垂1.5 m,地线弧垂1 m,波阻抗取 200Ω ,波速 $200 \text{ m}/\mu\text{s}$;线路杆塔取[]形塔,杆塔高取21 m,双杆间距为3.8 m,杆塔半径为0.15 m,冲击电阻 R_g 取 10Ω ,进行模拟计算。

2. 绝缘子及保护间隙模型

对绝缘子串以及保护间隙的闪络采用ATP中的Flash Mode模型进行模拟,该变电站进线段绝缘子采用4片LXY1-70玻璃绝缘子,取其 $U_{50\%}$ 冲击放电

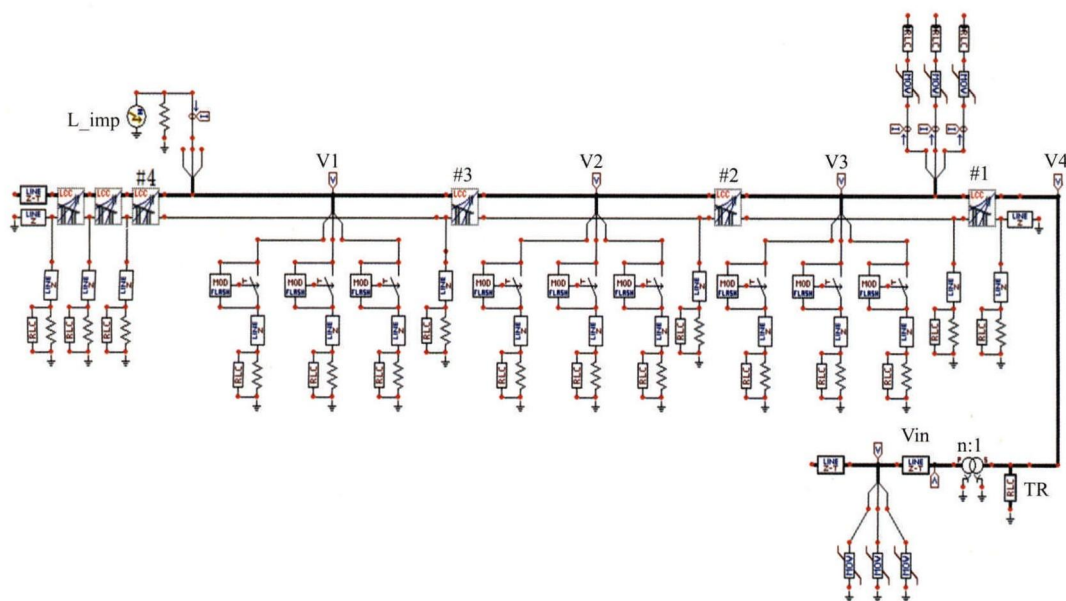


图2 35 kV进线段简化等效电路图

电压为400 kV，另对变电站进线段的近3基杆塔加装3组可调式保护间隙，其动作电压由远及近分别取 $0.85U_{50\%}$ 、 $0.80U_{50\%}$ 、 $0.75U_{50\%}$ ，研究加装前后其对站内主变的保护作用。

3. MOA避雷器模型

该进线段在最后一基杆塔处加装一组MOA避雷器，其型号为YH5WZ-51/134，其接地引下线取长度 $l=8\text{ m}$ ， $L=12.1\text{ }\mu\text{H}$ ，冲击接地电阻取 $R_g=10\text{ }\Omega$ ，在ATP中利用压敏电阻MOV模拟其动作特性，而其接地引下线电感及冲击电阻采用RLC元件进行模拟，避雷器伏安特性参数性选取如表1所示。

表1 YH5WZ-51/134避雷器的伏安特性

电流/A	10^{-5}	10^{-3}	10^{-2}	1	10^2	10^3	10^4
电压/kV	56.3	77.0	79.7	82.1	85.6	92.5	112.6

4. 变压器模型

站内主变压器容量为 $10\text{ MV}\cdot\text{A}$ ，其仿真模型可用其入口电容来模拟，根据计算变压器入口电容 C_i 的经验公式，得

$$C_i = K\sqrt{S} \quad (\text{pF}) \quad (2)$$

式中， S 为变压器容量，单位为 $\text{MV}\cdot\text{A}$ ； n 为220 kV及以下电压等级，取3； K 为35 kV电压等级，取350。

由于该35 kV变电站地处强雷电区，对35 kV变电站2 km进线段加设了避雷线，雷击杆塔时雷电流会通过避雷线入地，而入侵波在线路上传播时会在一定程度上有所衰减，使得侵入站内的过电压入侵波较小。因此为验证3组可调保护间隙组合防雷措施对站内主变压器等电气设备的保护效果及作用，为从严考虑分别选取5 kA以及10 kA的雷电流幅值，波形为 $2.6/50\text{ }\mu\text{s}$ 、负极性的线路直击雷电流作为仿真研究的主要波形，对雷击进线段3~4号杆塔档距中央时加装保护间隙前后的变压器入口端过电压波形进行仿真分析。

仿真结果及分析

1. 加装多级保护间隙前后对雷电入侵波的影响

(1) 过电压峰值的影响

取3号与4号塔档距中央作为雷击点，选取了B相遭受雷击以及三相同步遭受雷击的情况进行仿真，对比三组保护间隙对限制雷电入侵波的幅值进行分析。表2、表3分别为加装保护间隙前后变电站进线段遭雷击后各点电压幅值。

表2 MOA避雷器保护时各点电压峰值

雷电流 I_f/kA	B相遭受雷击		三相遭受雷击	
	5	10	5	10
V_{1A}/kV	93.17	115.55	391.86	398.12
V_{1B}/kV	391.14	415.92	392.51	400.30
V_{1C}/kV	96.31	116.37	392.04	399.84
V_{2A}/kV	79.97	92.08	273.55	308.79
V_{2B}/kV	256.73	312.92	275.36	307.32
V_{2C}/kV	80.49	96.41	275.75	307.12
V_{3A}/kV	74.11	80.41	182.51	197.39
V_{3B}/kV	170.16	187.78	185.35	202.55
V_{3C}/kV	77.42	81.11	183.05	198.12
V_{4A}/kV	63.12	65.04	142.21	177.78
V_{4B}/kV	155.74	181.2	145.84	179.84
V_{4C}/kV	66.36	68.20	143.60	176.32

根据表2可得，当B相遭受雷击（ $I_f=10\text{ kA}$ ）时，未加装组合间隙时变压器高压侧雷电过电压约为181.2 kV，根据DL/T620—1997中所述35 kV等级变压器的高压侧全波冲击耐受电压为180 kV，此时变压器高压侧雷电过电压已超过180 kV，有可能造成变压器高压侧受雷击损坏。

表3 间隙-MOA组合保护时各点电压峰值

雷电流 I_f/kA	B相遭受雷击		三相遭受雷击	
	5	10	5	10
V_{1A}/kV	62.57	70.64	247.20	258.30
V_{1B}/kV	250.22	263.81	250.07	261.30
V_{1C}/kV	69.68	73.54	249.22	258.27
V_{2A}/kV	56.38	55.71	197.36	201.38
V_{2B}/kV	202.18	206.74	202.04	203.11
V_{2C}/kV	59.94	61.88	198.69	202.05
V_{3A}/kV	39.58	41.87	97.28	117.92
V_{3B}/kV	89.48	98.51	100.21	120.78
V_{3C}/kV	44.27	45.81	97.55	119.10
V_{4A}/kV	20.37	23.06	88.28	103.52
V_{4B}/kV	70.05	78.19	94.83	118.01
V_{4C}/kV	22.16	27.84	89.75	106.8

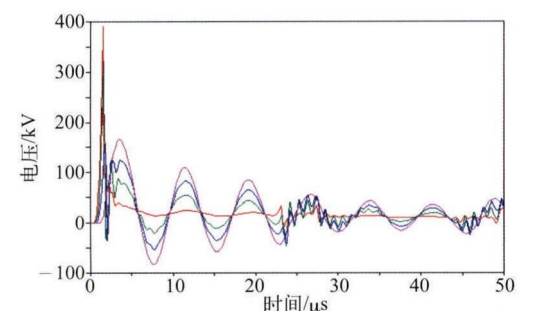
加装间隙后，当B相遭受雷击（ $I_f=10\text{ kA}$ ）时，由于雷电流的分流发生了变化，增加了雷电流的分流途径，一部分雷电流传入相邻杆塔，一部分经间隙闪络形成的电弧通道入地，而多级逐渐降低的间隙闪络电压配合使得线路上雷电流幅值在传播到变电站变压器高压侧前得到大幅减小，此时变压器高压侧雷电过电压为78.19 kV，较181.2 kV的过电压下降了56.8%，由表2、表3中数据可得，在B相遭受雷击（ $I_f=5\text{ kA}$ ）、三相遭受雷击（ $I_f=5\text{ kA}$ ）及三相遭受雷击（ $I_f=10\text{ kA}$ ）

3种情况下,在变电站进线段加装保护间隙后其变压器高压侧过电压相对未加装时的分别下降了54.7%、34.9%及34.3%。流经MOA避雷器的雷电流峰值如表4所示。

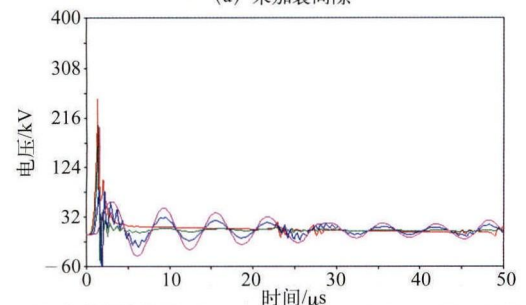
表4 流经MOA避雷器的雷电流峰值

雷电流 I_0 /kA	电流/kA	B相遭受雷击		三相遭受雷击	
		5	10	5	10
未加装间隙	I_A	0.07	0.08	2.63	6.65
	I_B	2.70	6.58	2.68	6.70
	I_C	0.08	0.10	2.62	6.68
加装间隙	I_A	0.01	0.64	0.27	0.57
	I_B	0.30	0.69	0.30	0.66
	I_C	0.01	0.65	0.27	0.58

由表4可知,加间隙装后使得经MOA避雷器入地的雷电流得到有效减小,B相遭受雷击($I_1=5\text{ kA}$)、B相遭受雷击($I_1=10\text{ kA}$)、三相遭受雷击($I_1=5\text{ kA}$)及三相遭受雷击($I_1=10\text{ kA}$)4种情况下,加装保护间隙后经MOA入地的雷电流分别下降至为加装保护间隙时的11.1%,10.5%,11.2%及9.8%。由于经MOA避雷器入地的雷电流降低使得其接地引下线及冲击接地电阻上的压降相应降低,这样既减小变压器35 kV侧的雷电过电压幅值,也减小了MOA避雷器因雷击损坏、爆炸等事故的发生概率。B相遭受雷击($I_1=10\text{ kA}$)时各点电压波形如图3所示。



(file 未加装保护间隙.pl4; x-var t) v:V1B v:V2B v:V3B v:V4B
(a) 未加装间隙



(file 加装保护间隙.pl4; x-var t) v:V1B v:V2B v:V3B v:V4B
(b) 加装间隙后

图3 B相遭受雷击($I_1=10\text{ kA}$)时各点电压波形

(2) 截波分量的影响

由于间隙以及绝缘子的击穿时间很短其伏秒特性极为陡峭,会产生不可忽略的截波分量,而较高的截波分量对变压器的纵绝缘存在一定的威胁。因此分别取B相遭受雷击($I_1=5\text{ kA}$)情况下,加装保护间隙前后通过对变压器高压侧B相即 V_{4B} 点电压波形进行快速傅里叶变换(FFT)后得到该处电压波形的频谱图,即谐波分量图,如图4所示,图4中横坐标为基波频率倍数(基波频率为50 Hz)。对其进行分析比较。

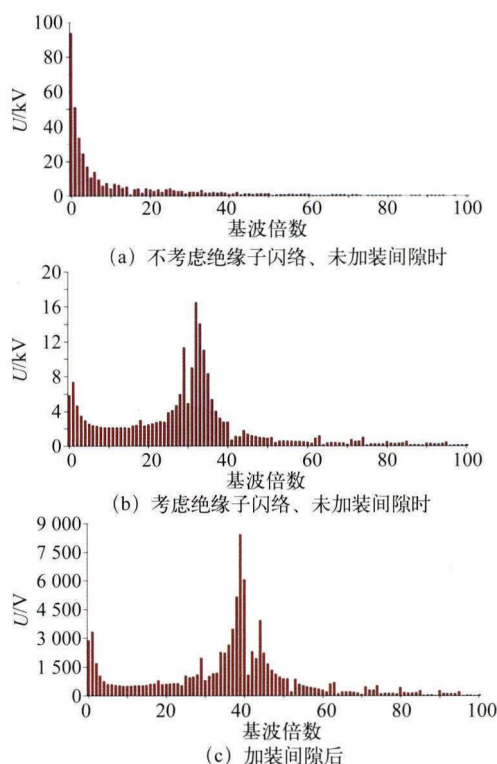


图4 变压器高压侧谐波分量图

当未加装保护间隙(不考虑绝缘子闪络)时,由变压器高压侧电压的频谱分布图可知其过电压分量中以零序及1、3、5、7次谐波分量为主,其中零序分量达到了94.52 kV;当考虑绝缘子闪络时,由于绝缘子闪络使得过电压中存在大量的高次截波分量,频率范围大概为1~2 kHz(图4b中频率分布集中在20~40倍基波频率间),最高幅值为18.53 kV;当加装保护间隙后,由于多组保护间隙的动作使得过电压中的截波有所增加,其主要集中在1.5~2.5 kHz(图4c中频率分布集中在30~50倍基波频率间),但是其依次降低闪络电压的配合方式使得雷电过电压中截波的幅值均被限制在9 kV以下。

由此可见,该防护措施不仅可以有效抑制变

电站入侵雷电电压的幅值,也可以减小雷击线路后绝缘子闪络所带来的截波分量幅值,可以有效地对主变压器进行保护。

(3) 对线路跳闸率的影响

为考虑组合间隙对线路的影响,利用DL/T 620—1997中的线路雷击跳闸率的计算方法对该变电站进线段并联间隙前后的雷击跳闸率进行计算比较,计算条件为:冲击接地电阻为 $10\ \Omega$,避雷线高 18.5 m ,下导线高为 12.5 m ,导线弧垂 3 m ,雷电流波头长度 $2.6\ \mu\text{s}$,绝缘子型号为LXY1—70,绝缘子串50%冲击放电电压及计算结果如表5所示。

表5 线路跳闸率计算

参数	4片绝缘子		5片绝缘子	
	未装间隙	加装间隙	未装间隙	加装间隙
$U_{50\%}/\text{kV}$	400	300	500	375
I/kA	27.7	20.78	34.6	25.95
$n/[\text{次}/(100\text{ km}\cdot\text{a})]$	3.58	3.94	3.32	3.69

由表5可知,加装间隙后跳闸率相比未加装时增加了10.1%,若增加1片绝缘子后跳闸率相比未加装间隙(绝缘子为4片)时仅增加了3.1%,对线路跳闸率影响较小。因此可以考虑在进线段加装组合间隙的前3基杆塔上增加一片绝缘子,这样既不影响线路跳闸次数也保证了组合间隙与避雷器共同保护的效果。

2. 不同雷击点对加装保护间隙前后雷电入侵波的影响

随着雷击点的不同,由于雷电入侵波在线路上的衰减和避雷线的分流效果,从而影响到变电站的雷电入侵波。

图5为单相遭雷击, $I_1=5\text{ kA}$ 时,不同雷击点对加装保护间隙前后雷击相雷电入侵波的影响。由图5可知,当雷击点越靠近进线段第一基杆塔,变压器端雷电入侵波幅值越高;在未加装间隙的情况下,当雷击点在第1基与第2基、第2基与第3基杆塔档距中央时,变压器高压侧雷电入侵波

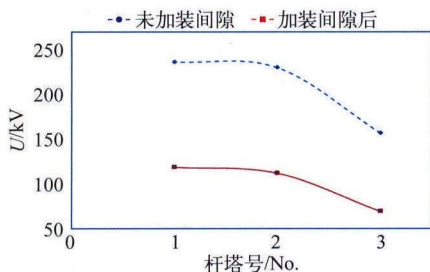


图5 不同雷击点下的变压器高压侧电压

峰值均大于变压器高压侧 180 kV 全波冲击耐受电压,而加装间隙后,改变雷击点虽然变压器端电压也将随之改变,但均小于其全波冲击耐受电压值,因此,改变落雷点时加装多级间隙仍然能对变压器等站内电气设备进行有效防雷保护。

3. 不同冲击接地电阻对加装保护间隙前后雷电入侵波的影响

不同冲击电阻对雷电入侵波的影响如图6所示。

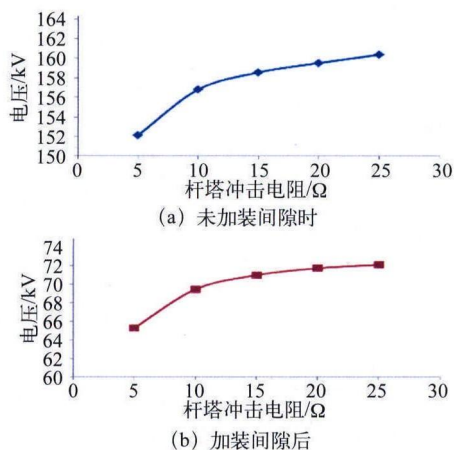


图6 不同冲击电阻对雷电入侵波的影响

图6为改变进线段的杆塔冲击电阻 R_g 时,变压器高压侧雷电入侵波图。由图6可知,加装保护间隙前后,当 $5\ \Omega \leq R_g \leq 15\ \Omega$ 时,随着杆塔冲击电阻的升高,雷电入侵波幅值均明显升高;但当 $15\ \Omega \leq R_g \leq 25\ \Omega$,随着杆塔冲击电阻的升高,雷电入侵波幅值升高较为平缓。在 $5 \sim 25\ \Omega$ 各种不同的杆塔冲击电阻条件下,加装多级间隙的改进措施始终能够对主变进行有效保护,其对雷电入侵波的限制作用受杆塔冲击电阻影响较小。

结束语

1) 采用加装多级可调保护间隙装置可以有效地降低 35 kV 变电站雷电入侵波的幅值,还可以考虑增加进线段前3基杆塔绝缘子的片数,这样既不影响线路跳闸次数也保证了组合间隙与避雷器共同保护的效果。

2) 该措施可以明显减小氧化锌避雷器入地雷电流幅值,降低避雷器因雷击损坏事故的发生概率。

3) 该措施虽然会增加雷电入侵波中的截波分量,但相比于未加装间隙时,其截波分量幅值得到有效降低。EA

(收稿日期: 2016.06.09)

(编辑: 刘群奎)