

高海拔地区线路调爬对变电站的绝缘配合影响

冯千秀

(西南电力设计院, 四川 成都 610021)

摘要:随着海拔的升高,绝缘子放电电压随之下降,为了弥补绝缘子放电电压下降引起的线路绝缘水平下降,一般采取增大线路绝缘子爬距的措施,但是变电站和输变电设备的绝缘水平无法调整。针对此种情况,以木里 500 kV GIS 变电站及其 500 kV 出线为例,建立了基于 ATP 程序的仿真计算模型,同时根据 DL/T 620—1997 提供的公式对绝缘子放电电压进行海拔校正,研究当输电线路调爬后,雷电侵入波在变电站电气设备上产生的过电压和过电流,并分析对变电站绝缘配合的影响。研究表明,当在 1 号杆塔绝缘子片数增至 31 片,其他各塔绝缘子片数增至 40 片,不会对该变电站绝缘配合构成威胁。

关键词:高海拔;线路调爬;雷电侵入波;绝缘配合

Abstract: As the altitude increases the discharge voltage of insulators declines. Generally, the measures of increasing the creepage distance are adopted to make up the decrease of line insulation level which results from the discharge voltage drop of insulators. However, the insulation level of substation and transmission and distribution equipment cannot be adjusted. So taking 500 kV MuLi GIS Substation and its transmission line for example, the simulation calculation model based on ATP is established, and the altitude correction for discharge voltage of insulators is carried out according to the formula in the DL/T 620—1997. The overvoltage and overcurrent generated in the electrical apparatus of the substation are calculated and the effect of lightning intruding surge on the insulation coordination of the substation is analyzed after adjusting the creepage distance. The research shows that there is no threat to insulation coordination if the number of insulators is added to 31 at No. 1 tower and to 40 at other towers.

Key words: high elevation; creepage distance adjustment; lightning intruding surge; insulation coordination

中图分类号: TM853 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003—6954(2011)02—0060—05

0 前言

高海拔地区空气污染虽然不如平原地区严重,但自然污秽和局部的工业污秽对电气设备外绝缘的影响仍不可忽视。绝缘子在高海拔地区大气参数的作用下,其外绝缘特性将发生显著变化,随着海拔的升高,其放电电压随之下降。

近几年来,由于受低气压和污秽等影响,线路的跳闸率居高不下,考虑到绝缘子放电电压的下降,为了保护线路,必然加强线路的绝缘水平。目前普遍采用的措施是调整线路绝缘子的爬距。通常 500 kV 线路中悬垂绝缘子串的绝缘子片数不少于 25~28 片^[1],而工程中为了提高线路绝缘,往往增加绝缘子片数,有些地区甚至增加到 40 片。

线路绝缘的加强,可以提高线路安全运行的可靠性,但是变电站和输变电设备的绝缘水平无法调整。

当雷电侵入波升高后,可能会对变电站内的绝缘配合造成威胁。因此以木里 500 kV GIS 变电站为例,通过建立基于 ATP 的系统模型,同时考虑高海拔地区大气参数对线路绝缘子放电电压的影响,研究了调整线路爬距后,雷电侵入波在变电站电气设备上产生的过电压和过电流,找出过电压的分布和变化规律以及对变电站绝缘配合的影响,对防护雷电过电压、保护电气设备提供有价值的参考依据。

1 加强线路绝缘对变电站影响

调爬后线路绝缘水平加强,线路反击耐雷水平提高,反击概率随之减小。随着绝缘子片数的增加,串长增大,保护角随之减小,小电流绕击概率可能会下降。这些都有利于系统的安全运行。

变电站进行绝缘配合时,要考虑绝缘类型及其特性、性能指标、过电压幅值及其分布特性、大气条件等

因素。对于雷电冲击耐受电压, K_c 的惯用值为 $K_c \geq 1.4$ 。变压器为变电站内的关键设备, 因此在进行绝缘配合时, 都是以变压器为核心进行的, 即 K_c 是指变电站内变压器内、外绝缘的全波额定雷电流冲击耐压与避雷器标称放电电流下残压的比值^[2]。

雷电过电压下避雷器的配合电流都是考虑当变电站遭受雷电侵入波时流过避雷器的电流, 而侵入波的幅值又由线路绝缘子串的冲击强度决定。在线路爬距增大后, 侵入变电站的雷电波幅值将会有所增大, 流过避雷器的雷电流增加。若流过避雷器的电流未超过其原来的配合电流, 绝缘配合系数就仍保持着原有的水平, 一旦流过避雷器的雷电流大于其标称放电电流时, 将会使原有的绝缘配合系数降低, 甚至因为避雷器的通流容量不够而导致避雷器损坏, 危及站内设备。

2 海拔校正系数

高海拔地区大气参数对电气设备外绝缘的影响是一个极其复杂的问题, 多年来, 世界上许多国家对此一直进行试验研究。

IEC 的标准校正方法和国标 GB 311.2-83 校正方法中, 湿度参数均选择了绝对湿度, 但在处理湿度对放电电压的影响上, 又与空气密度分开。GB 311.1-83 的方法校正是以海拔高度 1 000 m 为基准, 是通过相对空气密度、绝对空气湿度和温度随海拔高度的变化规律所做的初步统计分析得到, 其变量为海拔高度, 但是不同地区同一海拔高度的大气参数差异较大, 对其电气设备外绝缘放电电压的影响也不相同^[3]。而 DL/T 620-1997 是以大气参数为变量进行校正, 更符合高海拔地区放电过程的变化规律。因此选择了 DL/T 620-1997 推荐的海拔校正公式。

根据 DL/T 620-1997 中规定, 外绝缘所在地区气象条件异于标准气象条件时, 放电电压可按式 (1) 校正^[1]。

$$U = \frac{\sigma^n U_0}{H^n} \quad (1)$$

式中, U_0 为标准气象条件下绝缘放电电压, kV; U 为实际放电电压, kV; δ 为相对空气密度, 标准气象条件下为 1; H 为空气湿度校正系数; n 为指数, 与绝缘长度有关。

通过计算, 木里变电站进线段平均高度约为

2 700 m, 海拔校正系数约为 1.382。

3 仿真模型的建立

3.1 电气概况

木里 500 kV GIS 变电站采用 3/2 接线方式, 本期工程有 2 台主变压器, 2 回出线, 总共 4 个非完整串。主变压器采用敞开式氧化锌避雷器 $Y_{20}W_5 420/1006$, 出线采用敞开式氧化锌避雷器 $Y_{20}W_5 444/1063$ 。

变电站投运的进线越多, 主变压器、断路器越多, 即投入电容越大, 则雷电过电压越低。考虑最严重的情况, 这里仅考虑单线单变压器运行方式。

3.2 雷电侵入波模型

由于雷电侵入波的幅值受线路绝缘水平的限制, 其幅值不会超过绝缘子串的 50% 冲击放电电压。国内外实测表明: 75% ~ 90% 的雷电流是负极性的, 并且负极性的冲击过电压沿线路传播的衰减小, 因此电气设备的防雷保护中一般均按负极性分析研究^[4]。绝缘子串湿闪电压小于干闪电压, 从严考虑, 雷电侵入波幅值取绝缘子串的负极性雷电冲击干闪电压 $U_{50\%}$ 。

本次计算选取的绝缘子型号为 XWP2-160, 其单片长度为 155 mm, 两端的连接金具长度按 335 mm 考虑。绝缘子串负极性雷电冲击干闪电压 $U_{50\%}$ 与绝缘子串长的关系, 基本上呈线性增长的关系^[5], 如式 (2) 所示。

$$U = 550z + 80 \quad (2)$$

雷电波采用 ATP 中的 Heidler type IEC 1312-1 中推荐采用此雷电解析表达式, 波形为 $2.6/50 \mu s$ 模拟表达式为

$$\mu = \text{Amp} / \eta (t/T_f)^n / (1 + (t/T_f)^n) \exp(t/\tau) \quad (3)$$

在 ATP 仿真时, 可直接输入波头时间、波尾时间和峰值。

3.3 输电线路模型

在高压输电线上单相雷击占大多数, 故仅考虑单相负极性雷击。

站外的架空线采用 ATP 中的 LCC 模型, 站内母线和连线较短, 可忽略其相互之间的耦合, 采用单相 Clarke 模型。

3.4 避雷器模型

金属氧化物或氧化锌避雷器是一种高度非线性的电阻, 在陡波电流下, 其阀片相当于一个极高阻值

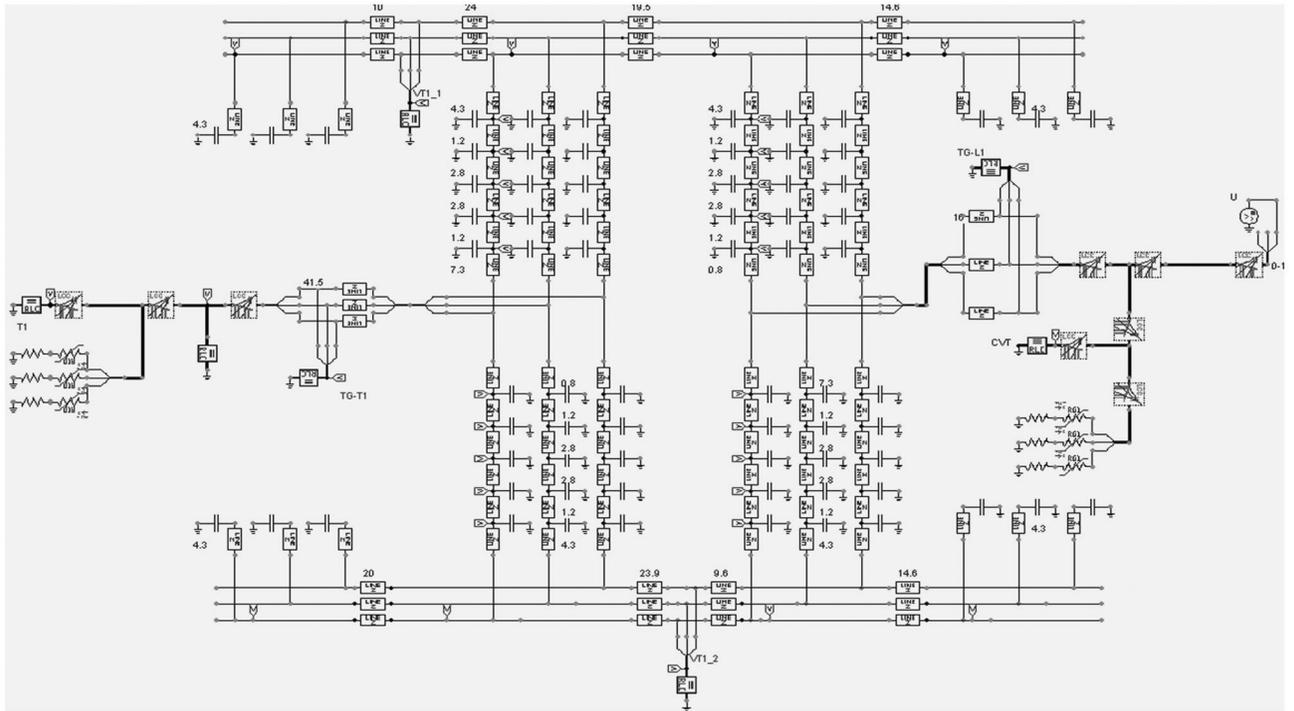


图 1 系统仿真模型图

表 1 各种运行方式下,各设备上的过电压和避雷器上的电压、电流及吸收能量

运行方式	电气设备上最大过电压 /MV					避雷器		
	T	PT	CVT	BG	M	U /MV	I/kA	W /kJ
T1+L1	1.205 5	1.127 3	1.106 5	1.130 3	1.132 4	0.998	18.261	1 034.1
T1+L2	1.204 1	1.124 2	1.110 3	1.125 9	1.129 2	0.99 776	18.208	1 032.9
T2+L1	1.208 2	1.134 4	1.083 1	1.130 3	1.135 7	0.99 837	18.34	1 034.8
T2+L2	1.209 8	1.129 7	1.122 9	1.135 7	1.138 2	1.008	18.383	1 036

表 2 增加绝缘子片数后,各设备上的过电压和避雷器上的电压、电流及吸收能量

雷击杆塔	电气设备上最大过电压 /MV					避雷器		
	T	PT	CVT	BG	M	U /MV	I/kA	W /kJ
T2+L2 绝缘子 30片,雷电侵入波幅值 2.042 MV								
1	1.2098	1.1297	1.1229	1.1357	1.1382	1.008	18.383	1036
2	1.0605	1.0265	1.0228	1.0148	1.0275	0.9623	10.491	589.16
3	0.96121	0.92737	0.9143	0.91665	0.92803	0.8736	7.812	444.39
6	0.85639	0.84182	0.84635	0.84778	0.8424	0.8163	6.3624	304.48
T2+L2 绝缘子 31片,雷电侵入波幅值 2.104 MV								
1	1.2293	1.1366	1.115	1.1487	1.1388	1.0032	19.394	1141.2
2	1.0676	1.0441	1.0416	1.0319	1.0451	0.96563	11.224	635.47
3	0.97326	0.94204	0.92914	0.93149	0.94264	0.88581	8.1217	444.39
6	0.86768	0.85164	0.85633	0.85835	0.85225	0.82496	6.581	325.49
T2+L2 绝缘子 32片,雷电侵入波幅值 2.165 MV								
1	1.2448	1.1477	1.1242	1.1583	1.149	1.0087	20.598	1250.6
2	1.0698	1.0645	1.0576	1.053	1.0655	0.96855	11.858	683.77
3	0.98482	0.95647	0.94373	0.94615	0.95712	0.89787	8.4269	511.31
6	0.87907	0.86152	0.86592	0.86854	0.8621	0.83339	6.7946	346.45

的非线性电阻与电容器的并联,当加于阀片的电压低于某一临界值时,阀片相当于极高阻值的电阻,即在正常电压范围内它的斜率几乎为无限大。而在较高

电压时,阀片在过电压保护范围内的斜率几乎是零。避雷器的这种非线性特性可以用指数函数描述,其电流电压之间的关系服从下述规律。

表 3 增加绝缘子片数后,各设备上的过电压和避雷器上的电压、电流及吸收能量

雷击杆塔	电气设备上最大过电压 /MV					避雷器		
	T	PT	CVT	BG	M	U /MV	I/kA	W /kJ
T2+L2 绝缘子 39片,雷电侵入波幅值 2.597 MV								
2	1.1123	1.1895	1.0993	1.1831	1.1908	0.99339	17.26	1140.3
3	1.0741	1.0532	1.0395	1.0376	1.0539	0.96507	11.101	789.98
6	0.95322	0.93318	0.93316	0.93823	0.93402	0.8931	8.3063	518.49
T2+L2 绝缘子 40片,雷电侵入波幅值 2.659 MV								
2	1.1303	1.2058	1.1092	1.1922	1.207	0.99702	18.048	1223.4
3	1.0919	1.0595	1.0467	1.0441	1.0604	0.96749	11.628	835.62
6	0.96695	0.9427	0.93899	0.94692	0.94362	0.9123	8.5121	545.42

$$i = p(u/u_{ref})^q \quad (4)$$

式中的 p 、 q 和 u_{ref} 是常数; u_{ref} 为参考电压,通常取额定电压的两倍或接近于二倍的值; q 的典型值为 $20 \sim 30^{[6]}$ 。一般难以用一个指数函数来描述整个范围内的特性,因此,ATP 中将电压范围分成几段,每一段有其自己的指数函数,即采用分段指数模型来模拟。

3.5 变压器、断路器、互感器、隔离开关等电气设备的模型

因为雷电侵入波等值频率较高,维持时间很短,通常 $10 \mu s$ 左右即可算出最大过电压幅值。变压器绕组的入口电容 C_r 等于绕组每单位长度的对地自电容 C_0 和每单位长度的纵向互电容 K_0 的几何平均值。 C_r 一般随变压器容量增大而增大,约在 $500 \sim 5000 \mu F$ 的范围内。

其他电气设备,例如断路器、隔离开关、电磁式和电容式互感器等,在雷电波作用下,均可等值成冲击入口电容^[6],它们之间采用 Clarke 模型的分布参数线段相连。

根据以上模型建立的系统仿真图如图 1 所示。

4 仿真计算及分析

实际工程中若在变电站 2 km 外线路上落雷,由于进线段的作用,雷电波侵入到变电站后幅值和陡度都会大大减小,一般不会对变电站内绝缘配合构成威胁。因此,计算雷电过电压时,一般仅考虑距变电站 2 km 以内进线段的落雷情况。本站 500 kV 出线进线段有 6 基杆塔,故仅考虑 1~6 号杆塔的落雷情况。

因为本期有两变压器两线,故分别计算了 4 种单线单变压器运行方式,此时 1~6 号杆塔绝缘子片数为 30 片,雷击在 1 号杆塔,计算结果如表 1 所示。

由表 1 中数据可以看出,2 号主变压器和出线 II 投运时,流过避雷器上的过电流最大,各设备上过电

压最严重。因此,以下计算均以此种运行方式为例。

表 2 为当 1~6 号杆塔绝缘子片数调整为 30、31、32 片时电气设备上的过电压避雷器上电压、电流及吸收能量,从表 2 可知:

(1) 雷击点越靠近变电站,雷电过电压、过电流幅值越大。这是由于雷电侵入波在沿输电线路入侵的过程中,幅值和陡度都会不断衰减,雷击点越远衰减越大。

(2) 随着绝缘子片数的增加,变电站内各设备的过电压和流过避雷器的过电流也随之增大。

(3) 主变压器采用氧化锌避雷器 $Y_{20}W_5 420/1006$,额定电压为 420 kV ,标称放电电流为 20 kA ,其 2 ms 方波电流为 2000 A ,通流实验单次吸收能量为 3718.3 kJ 。出线采用氧化锌避雷器 $Y_{20}W_5 444/1063$,额定电压为 444 kV ,标称放电电流为 20 kA ,其 2 ms 方波电流为 2000 A ,通流实验单次实验吸收的能量约为 3928.8 kJ 。

雷击 1 号杆塔时,当绝缘子片数为 31 片,避雷器吸收的最大能量为 1141.2 kJ 小于避雷器 2 ms 方波的极限通流能力,避雷器上的过电流未超过 20 kA 的标称放电电流;当绝缘子片数增至 32 片,避雷器吸收的最大能量为 1250.6 kJ 小于避雷器 2 ms 方波的极限通流能力,但是避雷器上的过电流超过了 20 kA 的标称放电电流。

雷击 2~6 号杆塔时,当绝缘子增至 32 片,避雷器吸收的最大能量为 683.77 kJ 小于避雷器 2 ms 方波的极限通流能力,避雷器上的最大过电流为 11.858 kA ,未超过 20 kA 的标称放电电流。

综合考虑,当 1 号杆塔上的绝缘子超过 31 片时,原有绝缘配合系数降低,变电站内设备安全受到威胁,但 2~6 号杆塔增加绝缘子后,产生的过电压和过电流还比较低,可适当再增加绝缘子,因此后面的计算仅考虑增加 2~6 号杆塔上的绝缘子。

从表 3 可以看出,雷击 2~6 号杆塔时,当 2~6 号杆塔上绝缘子增至 40 片,避雷器吸收的最大能量为 1 223.4 kJ 小于避雷器 2 ms 方波的极限通流能力,避雷器上的最大过电流为 18.048 kA,未超过 20 kA 的标称放电电流,不会威胁变电站内设备的绝缘。

雷击 1 号杆塔和雷击 2~6 号杆塔的雷电侵入波过电压和过电流相差很大,主要原因是本站 500 kV 出线门型架距离 1 号杆塔 60 m,而 1 号杆塔距离 2 号杆塔 750 m,雷击点的距离是影响过电压、过电流幅值的一个重要因素。因此,在加强输电线路绝缘的同时,应进一步加强进线段线路的防雷保护,尤其是从 1 号杆塔到门型架之间的线路。

5 结 语

(1) 本站进线段海拔 2 700 m,在进行绝缘配合计算时,采用 DL/T 620-1997 推荐的公式进行海拔校正。

(2) 调爬后输电线路的防污特性得到提高,但是站内主要设备上的过电压和流过避雷器的电流均较之前有所增加,线路绝缘水平的提高将导致避雷器承受能量的增加和站内主要设备绝缘配合系数降低。

(3) 从仿真计算的结果看出,2~6 号杆塔上的绝缘子片数增至 40 片,雷击 2~6 号杆塔时,避雷器吸收的最大能量小于避雷器 2 ms 方波的极限通流能

力,流过避雷器的电流未超过标称放电电流,不会对变电站内设备的绝缘造成威胁。但是,当 1 号杆塔上绝缘子片数超过 31 片时,雷击在 1 号杆塔上,虽然避雷器吸收的最大能量小于避雷器 2 ms 方波的极限通流能力,但是流过避雷器的电流超过了标称放电电流,站内主要设备原有的绝缘配合系数降低,对设备的安全运行不利。因此,建议 1 号杆塔绝缘子可增至 31 片,其他杆塔绝缘子可增至 40 片。

参考文献

- [1] DL/T 620-1997, 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合 [S].
- [2] GB/T 311.2-2002, 绝缘配合 第 2 部分: 高压输变电设备的绝缘配合使用导则 [S].
- [3] 范立军. 高海拔地区大气参数对电气设备外绝缘影响的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2002.
- [4] 文远芳. 高电压技术 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
- [5] 周卫华, 蒋毅. 加强线路绝缘对变电站绝缘配合的影响 [J]. 湖南电力, 2005, 25(5): 7-11.
- [6] 江日洪, 张兵, 罗小宇. 发、变电站防雷保护及应用实例 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 134, 94, 95.

作者简介:

冯千秀 (1982), 女, 工程师, 硕士, 主要从事变电工程设计工作和交直流输电工程技术研究。

(收稿日期: 2010-11-30)

(上接第 22 页)

术手段的限制,未能对直流回路的直流断路器进行现场保护级差配合的验证测试,同时也未对绝缘检测仪绝缘电阻报警值进行标定测试,所以有必要进一步开展上述测试方法的研究。另外,应对直流电源(包括一体化电源)设备的交接试验进行明确,规范其现场调试、验收项目。

自主研发的 DPS-II 型直流电源特性参数测试系统,拥有两项专利技术授权 (ZL20082006182.5、ZL200820061825.4),并荣获四川省人民政府和四川省电力公司的科技进步奖。在北川 110 kV 智能变电站调试中得到了成功地应用,仅 40 min 就顺利完成了充电装置的特性参数测试,而通常在实验室常规测试手段需要 1~2 d 才能完成,大大提高了调试的效

率和质量,也为要使用直流电源系统的保护、监控等后续调试工作赢得了更多时间。

参考文献

- [1] DL/T 1074-2007, 电力用直流和交流一体化不间断电源设备 [S].
- [2] DL/T 459-2000, 电力系统直流电源柜订货技术条件 [S].
- [3] 同金, 马煜峰. 直流电源输出的纹波和噪声的测量 [J]. 电子测试, 2010(2): 88-91.
- [4] 徐焕蓉. 直流稳压电源的纹波测量问题 [J]. 计测技术, 2008, 28(5): 67-69.

(收稿日期: 2011-01-04)