

# 1 000 kV 变电站雷电侵入波防护分析

张榆,刘念,秦斌,徐诚

(四川大学电气信息学院,四川成都 610065)

**摘要:**在特高压防雷保护研究中,除了对雷击特高压输电线路的绝缘子闪络短路停运故障的研究,雷击特高压输电线路进线段时,传入变电站的雷电过电压波对变电站电气设备(特别是变压器)的危害研究也很有必要。这里将考虑绝缘子串参数、杆塔铁架雷电瞬态参数、杆塔冲击接地电阻、线路工频电压、雷击点位置等诸多因素影响,利用 ATP-EMTP 对 1 000 kV 变电站的雷电侵入波过电压在变电站电气设备(主要是变压器)上产生的过电压进行精确的计算分析,找出过电压的分布及变化规律,提出相应的雷电过电压保护措施,对电气设备的保护提供有价值的参考依据。该研究思路兼顾安全和经济两方面,可为工程提供新的参考。

**关键词:**雷电侵入波;冲击接地电阻;雷击点;ATP-EMTP

**Abstract:** In the research of protection against lightning for UHV power system, except for the research on insulator flashover short-circuit fault of transmission line caused by lightning stroke, it is necessary to analyze the harm of lightning overvoltage wave flooding from the overhead line to the electric apparatus (especially the transformer) in the substation. Combining incoming lines with a 1000 kV HGIS substation, the lightning invasion wave of 1000 kV substation is investigated via ATP-EMTP simulation program with respect to the influences of the parameters of insulator strings, the lightning instantaneous characteristics of tower, impulse grounding resistance of tower, power-frequency voltage and position of lightning stroke. Overvoltage generated by lightning invasion wave in the electric apparatus (mainly transformers) is calculated and analyzed accurately so that the overvoltage distribution and variation can be obtained, and the corresponding overvoltage protection measures against lightning are proposed, which can provide a valuable reference to the protection of electric apparatus. This research takes both safety and economy into account to provide a reference for the lightning overvoltage protection of HGIS substations.

**Key words:** lightning invasion wave; impulse grounding resistance; position of lightning stroke; ATP-EMTP

中图分类号: TM866 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)03-0064-04

## 0 引言

在中国的特高压电网建设规划中,将以 1 000 kV 交流特高压输电为主形成国家特高压电压等级骨干的网架,以实现各大区域电网的同步强联网,各级电网协调发展的坚强国家电网的战略举措,这也是今后大电网发展建设的主要趋势<sup>[1]</sup>。2006 年 8 月,国家电网公司晋东南—南阳—荆门 1 000 kV 特高压交流试验示范工程开工建设,在 2020 年前后,将建成覆盖华北—华中—华东的坚强的交流特高压同步电网。

尽管特高压线路由于塔高及走廊面积的因素,遭受雷击的概率较低电压线路增大,由于其绝缘等级高,雷击跳闸率并不高,尤其绝缘子闪络造成线路短路停运故障的概率很小。但对于特高压进线段遭

受雷击反击或绕击后,未造成短路停运故障,雷电过电压波传入特高压变电站会对电站二次设备,特别是特高压变压器造成严重的损害。

特高压变电站的设备雷电过电压绝缘水平和避雷器的布置方案,主要取决于雷电侵入波过电压的计算结果。由于特高压变电站在电网中位置重要,投资巨大,如果计算结果过低,则易造成变电站故障过多,对系统运行产生不利影响;而如果计算结果偏于保守,则会在经济上会造成巨大浪费。因此,准确详细地计算雷电侵入波过电压对电力系统合理的绝缘配合及安全运行很有意义<sup>[2]</sup>。

## 1 模型参数选择

这里以中国某特高压 HGIS 变电站为工程背景,雷电模型、杆塔模型、进线段线路模型、绝缘子闪络模

型、避雷器模型均根据参数特点自己定义,变电站内的设备,如变压器、隔离开关、断路器、互感器、电抗器等,在雷电波作用下,均用等值冲击入口电容表示。

### 1.1 1 000 kV HGIS 变电站等效电路图

图1是该特高压 HGIS 变电站的等效电路图,其采用双断路器双母线接线方式,仅考虑一回出线(L1)和一台主变压器(T)运行,出线接至双断路器串,主变压器经临时接线连接两条母线。

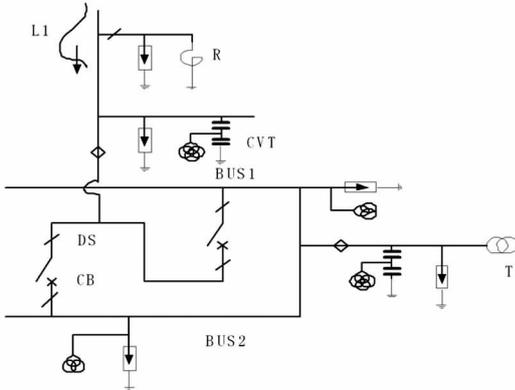


图1 某特高压 HGIS 变电站电气主接线简图

### 1.2 雷电模型

雷电流属于单极性脉冲波<sup>[3]</sup>。对中国现行标准推荐雷电流幅值分布的概率P为

$$\lg P = -\frac{I}{88} \quad (1)$$

式(1)中I为雷电流值kA;P为幅值大于I的雷电流概率,选取1.44‰概率的雷电流幅值为250kA,波形为2.6/50 μs,式(2)是该条件下双指数波形的表达式。

$$i(t) = 1.058I(e^{-1500t} - e^{-18600t}) \quad (2)$$

### 1.3 进线段模拟

杆塔模型:实际上,雷电波沿杆塔传播时,不同高度杆塔部分的单位长度的电感和电容都不相同,这就使得沿杆塔分布的波阻抗是变化的,在实际的工程计算中,杆塔的计算时采用多波阻抗模型,将杆塔分成几部分模拟,计算结果比集中电感更符合实际<sup>[4]</sup>。这里计算的 HGIS 变电站2 km 进线段内采用的是酒杯杆塔,且是单回输电线路,其多波阻抗模型如图2所示。

线路进线段参数:这里进线段架空线路采用 ATP-EMTP 中的频率分析模块“JMarti”模拟,忽略导线电晕。

### 1.4 绝缘子串模拟

绝缘子串模型见图3,图中F(OUT)是输出函数;

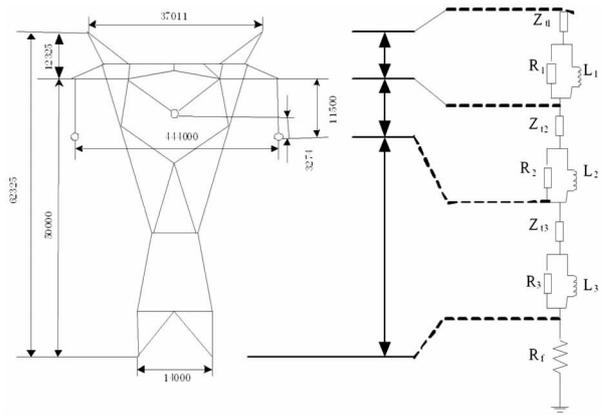


图2 进线段酒杯塔的多波阻抗模型

数;DEV 52 是一个比较器,将绝缘子串两侧过电压与其闪络伏秒特性进行比较;MIN or MAX 是控制开关的输出量,当绝缘子串过电压曲线与其伏秒特性曲线相交时,此时判据部分给定一个输出并传给控制开关部分,控制开关部分将这一输出保持,即绝缘子串发生闪络<sup>[5]</sup>。

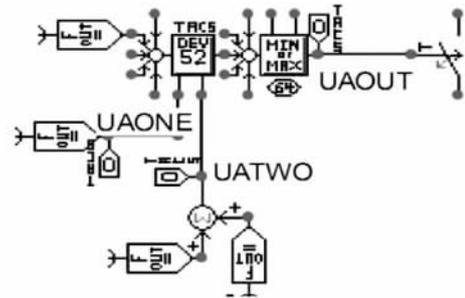


图3 绝缘子串模型

### 1.5 设备参数

站内设备参数如表1所示。

表1 站内设备等值入口电容及冲击绝缘水平

设备	等值入口电容 /pF	冲击绝缘水平 /kV
主变压器(T)	5 000	2 250
高压电抗器(R)	5 000	2 250
断路器(CB)	800	2 400
电压互感器(CVT)	5 000	2 400
隔离开关(DS)	300	2 400

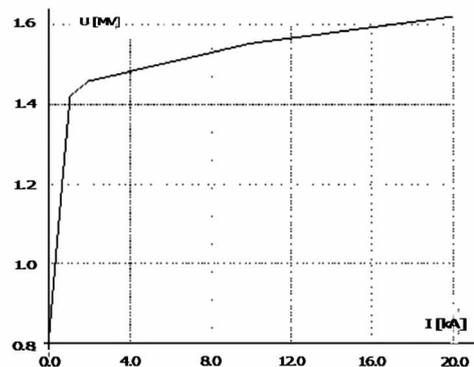


图4 避雷器的伏安特性曲线

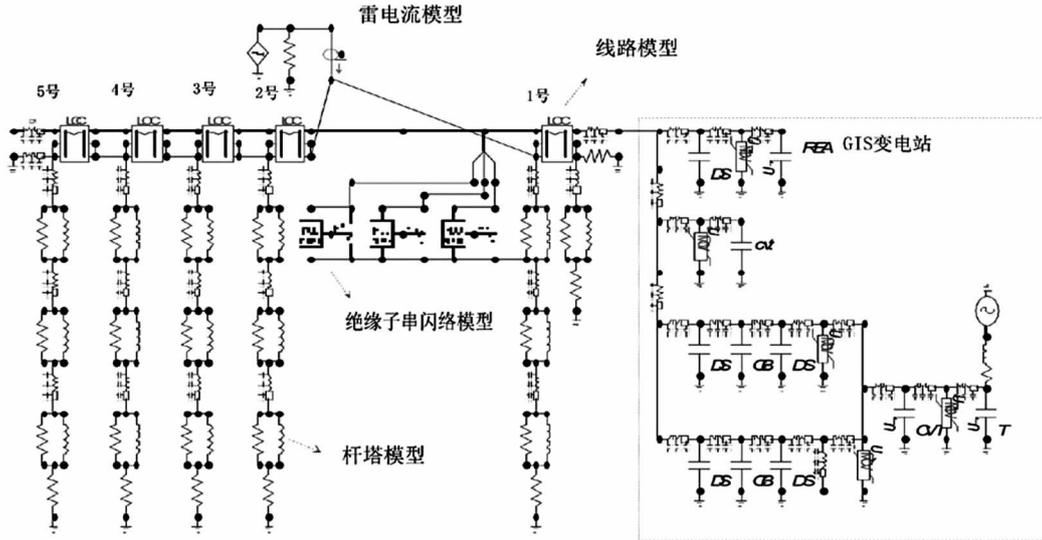


图5 某特高压GIS变电站电气主接线简图

### 1.6 避雷器模型

1 000 kV 特高压系统采用的金属氧化物避雷器 额定电压为 828 kV 标称放电电流为 20 kA , 雷电流保护水平为 1 620 kV。ATP - EMTP 中避雷器生成的非线性伏安特性曲线如图 4。

## 2 仿真研究

### 2.1 模型建立

当所有条件给定 运用 ATPDraw 可以画出变电站雷电侵入波的仿真电路图 , 并且填入各个模型的计算数据 , 调试运行程序即可得到计算结果。单线路单变压器双断路器运行的仿真模型图如图 5。

### 2.2 仿真结果

对于雷电流幅值 250 kA 雷击杆塔 1 号 , 图 6 为主变压器 T 上的过电压曲线图 , 变电站内高抗 R、出线 CVT - L、主变压器 CVT - T 和主变压器 T 上最大过电压幅值和出现时刻如表 2。

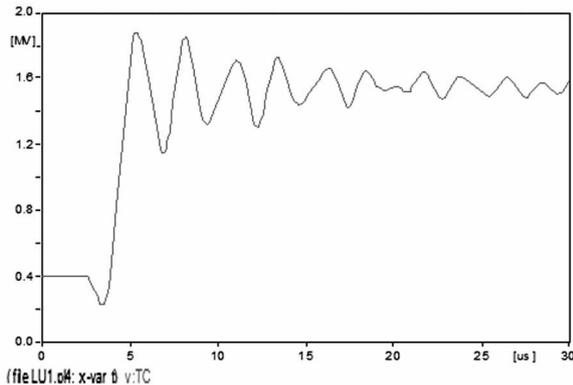


图6 主变压器上过电压波形

表2 各设备上的电压最大值及出现时间

设备名称	R	CVT - L	CVT - T	T
出现时刻 $t/\mu\text{s}$	3.09	3.72	4.88	6.01
过电压幅值 $U/\text{kV}$	1 887.7	1 730.5	1 735.2	1 779.3
保护裕度 $\%$	16.1	23.1	22.9	20.9

由表 2 计算结果可知 , 避雷器初始配置方案在单线单变双母线运行方式下基本满足要求 , 采用引起绝缘子闪络的最大绕击电流 30 kA , 绕击杆塔 1 号与杆塔 2 号档距时 , 主要电气设备也均有一定的保护裕度。

## 3 不同因素对侵入波过电压的影响

### 3.1 雷击点的影响

雷击点距变电站距离的不同 , 使得在变电站设备上产生的过电压会有差异<sup>[6]</sup>。一般来说 , 雷击点距变电站越远 , 产生过电压越小 , 因为雷电波在线路传播的过程中产生了衰减和畸变。这里对该变电站不同的落雷点进行了仿真 , 雷击 1 号塔和 2 号塔时变压器上过电压结果如图 7 所示。

根据图 7 变压器上的过电压波形比较可得出 , 雷击 1 号塔过电压幅值小于雷击 2 号塔 , 这是由于线路波阻抗远小于站内外架空线路 , 而 1 号塔距 HGIS 变电站距离短 , 雷电波迅速在 HGIS 入口处产生负反射 , 与入侵波又进行叠加 , 降低了过电压<sup>[7]</sup>。

### 3.2 冲击接地电阻的影响

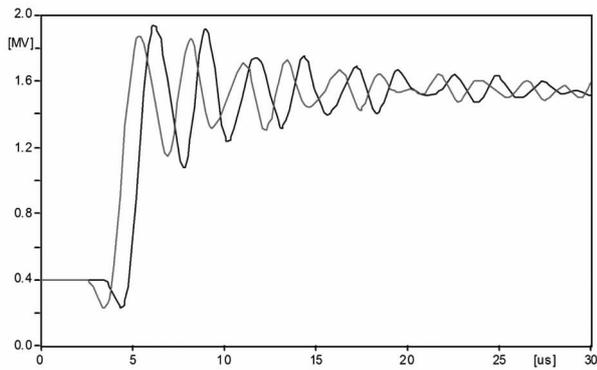


图7 不同雷击点过电压波形

这里通过对线路杆塔冲击接地电阻的不同取值,计算变电站正常运行,雷击1号杆塔在主变压器上产生的雷电过电压水平,计算结果如表3所示。

表3 接地电阻不同时的计算结果

冲击接地电阻值 /Ω	主变压器上过电压幅值 /kV		
	A相	B相	C相
7	1 769.5	1 752.1	1 779.3
9	1 791.1	1 765.3	1 792.3
10	1 797.2	1 776.2	1 799.4
15	1 823.1	1 805.4	1 824.3
20	1 843.1	1 831.2	1 847.3

从表3中数据可以看出,杆塔接地电阻大小的改变对于计算结果的变化有非常显著的影响。随着杆塔冲击接地电阻值的降低,主变压器上过电压值逐渐减小。

### 3.3 工频电压的影响

因为雷电为负极性,与工频电压叠加,因而工频电压处于负半周时落雷更容易形成高的过电压。表4为不同工频相角在主变压器上产生的过电压及流过避雷器的最大电流。

表4 工频相角对过电压幅值的影响

C相初相角 /°	主变压器过电压 /kV	流过避雷器最大电流 /kA
0	1 779.3	19.134
30	1 790.3	19.235
60	1 810.4	19.420
90	1 837.3	19.782

### 3.4 避雷器对雷电过电压的影响

计算发现,变电站内如果没有任何保护措施,主变压器上的过电压可达3 830 kV,远远超过变压器的正常工作电压,因此必须对站内设备尤其是主变

压器进行有效的防雷保护措施<sup>[8]</sup>。

## 4 结 语

(1) 由于雷电波的波头时间虽然很短,但通常大于雷电波在变电站进线段一个档距的传播时间。在HGIS入口处雷电电压波的负发射会降低雷电过电压的幅值。因此在变电站设备最大雷电过电压的计算上,根据杆塔档距的不同,有必要对变电站进线端的几个杆塔进行综合计算。

(2) 考虑到雷电流在杆塔接地体上的火花效应及高频特性,相对杆塔的工频接地电阻,在线路绝缘子闪络时,利用杆塔的冲击接地电阻计算传入变电站的雷电过电压水平会更准确。

(3) 不能以一个固定的雷电流作为变电站设备反绕击雷电过电压防雷水平,因为特高压线路在雷击时段工频运行电压在不同相位时幅值差异较大,变电站设备的防雷水平还是一个工频运行电压相位角的函数。

### 参考文献

- [1] 甘凌霄,李雷. 550 kV GIS变电站雷电过电压保护研究[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 110-114.
- [2] 彭鹏,粟时平. 变电站雷电侵入波保护的仿真分析[J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24(3): 49-53.
- [3] 曾嵘,耿屹楠. 高压输电线路先导发展绕击分析模型研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(10): 2041-2046.
- [4] 杨庆,赵杰. 云广特高压直流输电线路反击耐雷性能[J]. 高电压技术, 2008, 34(7): 1330-1335.
- [5] 莫付江,陈允平. 输电线路杆塔模型与防雷性能计算研究[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 80-84.
- [6] 张永记,司马文霞. 防雷分析中杆塔模型的研究现状[J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 93-97.
- [7] 陈敏,文远芳. 超高压变电站雷电过电压现场实测与仿真计算[J]. 电瓷避雷器, 2008, 226(6): 41-46.
- [8] 张颖,高亚栋. 输电线路防雷计算中的新杆塔模型[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(4): 365-369.

### 作者简介:

张 榆(1986),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统过电压分析;

刘 念(1956),男,教授,硕士生导师,主要从事高电压绝缘和电力设备故障监测方面的研究工作。

(收稿日期:2013-02-09)