

# 变电站跳通段雷电过电压特性仿真

冯瑞发<sup>1</sup>, 蔡汉生<sup>1</sup>, 廖民传<sup>1</sup>, 马御棠<sup>2</sup>, 屈路<sup>1</sup>, 刘刚<sup>1</sup>, 贾磊<sup>1</sup>

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663; 2. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217)

**摘要:**为合理确定变电站跳通段设备雷电冲击绝缘耐受水平,在电磁暂态计算程序 EMTP 中建立计及工频电压和感应电压的仿真计算模型,仿真计算跳通段绕击、反击侵入波大小,研究雷电流模型、感应电压和绝缘子串闪络模型对跳通段设备雷电过电压的影响。仿真结果表明,校核跳通段设备绝缘耐受能力时应考虑最大绕击雷电流下的侵入波过电压,适当提升设备绝缘设计水平;建模时考虑一定的线路波阻抗电阻可消除电气回路中不合理高频振荡引入的侵入波幅值偏差;雷电流模型、感应电压和绝缘子串闪络模型对跳通段雷电过电压仿真结果有较大影响,校核跳通段设备的绝缘耐受水平时,宜偏严格选取合适的仿真模型,研究结果可供相关人员参考。

**关键词:**雷电侵入波;过电压;EMTP;绝缘水平;雷电流

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.03.020 中图分类号:TM86 文章编号:1673-9140(2021)03-01148-09

## Simulation study on lightning overvoltage characteristics of equipment in the substation connection section

FENG Ruifa<sup>1</sup>, CAI Hansheng<sup>1</sup>, LIAO Minchuan<sup>1</sup>, MA Yutang<sup>2</sup>, QU Lu<sup>1</sup>, LIU Gang<sup>1</sup>, JIA Lei<sup>1</sup>

(1. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China; 2. Yunnan Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China)

**Abstract:** In order to determine the lightning impulse withstand level of substation connection section equipment reasonably, a transmission line-substation connection section model considering the power frequency voltage and induced voltage is established in EMTP. Then the characteristics of shielding failure invasion wave and back striking invasion wave are calculated, and the influence of lightning current model, induced voltage and insulator string flashover model on substation connection section are studied. The simulation results show that the severe overvoltage under maximum shielding failure lightning current should be taken into consideration when checking the insulation withstand level of equipment, and the equipment withstand voltage level should be improved. Considering the resistance at typical frequency of lightning current, the amplitude deviation of invasion wave, which is caused by some unreasonable oscillations while modelling, can be effectively eliminated. The lightning current mode, induced voltage and insulator strings flashover model have significant influence on overvoltage simulation results. Reasonable simulation models should be selected strictly when checking the insulator withstand level of equipment. The research results can provide reference to the substation engineering.

**Key words:** lightning invasion wave; overvoltage; EMTP; insulation level; lightning current

收稿日期:2020-04-13;修回日期:2020-06-18

基金项目:南方电网公司重点科技项目(YNKJXM20191243)

通信作者:冯瑞发(1989-),男,硕士,工程师,主要从事电力系统防雷技术研究;E-mail:guoqianganf2009@163.com

变电站在电力系统中承担着传输、转换电能的重要任务,为大电网的安全稳定运行提供保障。运行经验表明,变电站的威胁主要来自雷电侵入波<sup>[1]</sup>,准确计算变电站设备的雷电侵入波过电压大小对合理确定站内设备雷电冲击绝缘耐受水平、确保设备安全运行具有重要意义<sup>[1-2]</sup>,它既保证设备在雷电冲击下具有足够的安全裕度,又避免了因盲目提高设备绝缘水平而使设备造价过大的问题<sup>[3-4]</sup>。

不少学者在变电站及架空线路<sup>[5]</sup>雷电侵入波计算方面开展了较多研究<sup>[6-9]</sup>,文献<sup>[6]</sup>对特高压气体绝缘变电站(gas insulated substation, GIS)在不同避雷器配置方案、不同运行方式下的雷电过电压进行了研究;文献<sup>[7]</sup>基于统计法,通过改变雷电流幅值及雷击点位置,确定站内设备雷电侵入波过电压幅值达到设备基本冲击绝缘水平(basic impulse insulation level, BIL)时的临界雷电流值;文献<sup>[8-9]</sup>研究直流换流站的雷电侵入波特性,分析雷击点位置、雷击形式、换流站运行方式、进线段杆塔保护角等因素对设备雷电过电压的影响。上述研究主要集中在有多回出线、运行方式可变的变电站,当线路在变电站内跳通时,雷电波经变电站入口处的避雷器侵入,然后经过站内跳通段的隔离开关、电流互感器、断路器等设备后直接传到变电站出线上,由于没有其它出线支路的分流作用,入口处的避雷器距离跳通段设备较远,导致跳通段设备需耐受幅值较高的雷电侵入波的冲击,其产生的过电压一般更严重,若校核设计时预留的绝缘裕度较小,可能无法保证设备的安全运行。目前关于跳通段设备雷电侵入波的报道较少,有必要进一步研究。此外,传统方法研究变电站设备雷电侵入波的特性时,一般从进线段杆塔高度、杆塔接地电阻、雷击点位置、避雷器配置方案及变电站运行方式等物理性影响因素角度进行分析讨论,而针对计算用的仿真模型对设备雷电过电压的影响也研究较少,如果仿真模型不合适将无法反映设备上的实际雷电过电压,不利于校核确定设备的绝缘水平。

针对上述研究存在的不足,该文通过 EMTP 仿真的方式,建立考虑感应电压和工频电压影响的实际 500 kV 线路进线段杆塔—跳通段雷电侵入波仿真模型,分析跳通段设备的绕击和反击雷电侵入波

特性,研究典型雷电频率下的波阻抗对过电压的影响情况,讨论雷电流模型、感应电压和绝缘子串闪络模型等不同仿真模型对设备侵入波过电压的影响,其研究结果具有一定的实际参考意义。

## 1 电气接线图

500 kV 变电站进线段同塔双回线全长约 30 km,导线型号为 4×JL/LB 20 A-400/35 铝包钢芯铝绞线,分裂间距为 450 mm,直流电阻为 0.071 77 Ω/km;普通地线型号为 LBGJ-80-33 AC 铝包钢绞线,直流电阻为 0.672 4 Ω/km;OPGW 型号为 OPGW-130,直流电阻为 0.343 Ω/km。按规程推荐,进行雷电侵入波分析时考虑 2 km 范围内的近区雷击即可。该变电站附近 2 km 进线段及站内跳通段接线如图 1 所示, #1~#8 塔为进线段杆塔,总长度为 2.12 km,计算时重点分析 #1~#5 塔,其中  $R_g$  为杆塔接地电阻,取 15 Ω,MOA 为 Y 20 W 1-444/1063 型金属氧化物避雷器,CVT 为电容式电压互感器,DS 为隔离开关,CT 为电流互感器,CB 为断路器,数字为线路档距和设备间的电气连接距离。

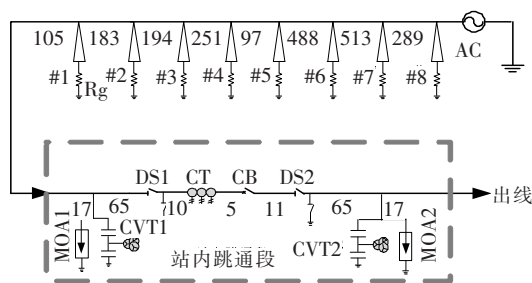


图1 变电站电气接线

Figure 1 Electrical wiring of the substation

## 2 仿真计算模型

### 2.1 杆塔模型

常见的杆塔模型包括集中电感模型、单波阻抗模型和多波阻抗模型<sup>[9-10]</sup>,考虑到多波阻抗模型更符合波在实际线路上的传播特性,且各部分波阻抗值无需通过试验即可获取,选取多波阻抗模型<sup>[10]</sup>进行计算:

$$Z_{T_k} = 60 \ln \frac{2\sqrt{2}H_k}{r_{ek}}, k = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

$$r_{ek} = \begin{cases} 2^{\frac{1}{8}} (r_{T_k}^{1/3} r_B'^{2/3})^{\frac{1}{4}} (R_{T_k}^{1/3} R_B'^{2/3})^{\frac{3}{4}}, k = 1, 2, 3 \\ 2^{\frac{1}{8}} (r_{T_k}^{1/3} r_B'^{2/3})^{\frac{1}{4}} (R_{T_k}^{1/3} R_B'^{2/3})^{\frac{3}{4}}, k = 4 \end{cases} \quad (2)$$

$$Z_{L_k} = 9Z_{T_k}, k = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

$$Z_{A_k} = 60 \ln \frac{2H_k}{r_{A_k}}, k = 1, 2, 3, 4 \quad (4)$$

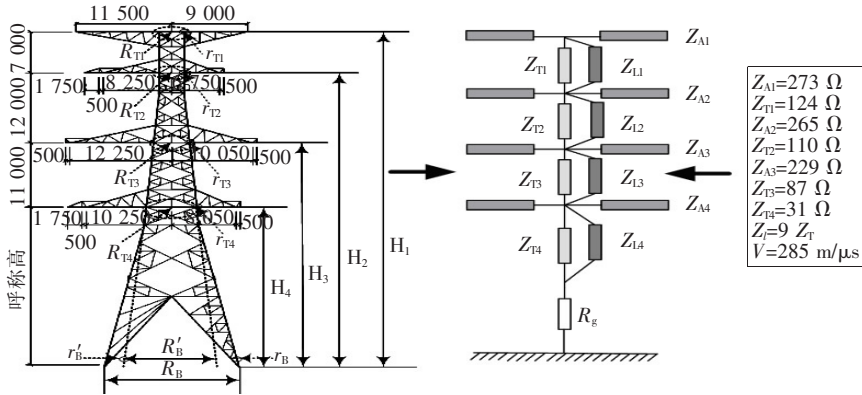


图 2 杆塔多波阻抗模型

Figure 2 Multi-wave impedance model of tower

式(1)~(4)中  $Z_{T_k}$ 、 $Z_{L_k}$ 、 $Z_{A_k}$  分别为杆塔主材、斜材和横担波阻抗;  $H_k$  为横担高度;  $r_{ek}$  为杆塔的等效半径;  $r_{T_k}$  为斜材等效半径;  $R_{T_k}$  为主材等效半径;  $r_B$  为塔基处斜材等效半径;  $R_B$  为主材根开;  $r_{A_k}$  为横担等效半径, 取横担与塔身连接断面上下边之和的 1/4, 斜材波阻抗  $Z_{L_k}$  的长度取主材波阻抗  $Z_{T_k}$  对应长度的 1.5 倍。进线段典型杆塔及对应的多波阻抗模型如图 2 所示。

2.2 雷电流模型

目前线路防雷计算常用的雷电流波形有双指数波<sup>[9]</sup>、斜角波<sup>[10]</sup>和 Heidler 波<sup>[11]</sup>, 仿真选用国标 GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》<sup>[12]</sup>推荐的斜角波, 波头/波尾时间为 2.6/50  $\mu\text{s}$ 。计算雷电侵入波时, 绕击雷电流选取最大绕击电流, 由电气几何模型 (electrical geometrical model, EGM)<sup>[8]</sup> 计算得出, 反击雷电流按国标 GB/T 311.2—2013《绝缘配合 第 2 部分: 使用导则》<sup>[13]</sup>推荐的 216 kA 计算, 雷电通道波阻抗绕击时取 800  $\Omega$ , 反击时取 300  $\Omega$ <sup>[12]</sup>。

2.3 绝缘子串闪络模型

研究表明, 雷击下绝缘子串两端电压波形为非标准波形, 对于 500 kV 线路, 绝缘子串较长, 采用先导发展模型<sup>[8,14]</sup>作为绝缘子串闪络判据, 其闪络模型为

$$v(t) = ku(t) \left[ \frac{u(t)}{l-g} - E_0 \right] \quad (5)$$

式中  $v(t)$  为先导发展速度,  $\text{m}/\mu\text{s}$ ;  $u(t)$  为绝缘子串两端电压,  $\text{kV}$ ;  $g$  为先导发展长度,  $\text{m}$ ;  $l$  为绝缘距离,  $\text{m}$ ;  $E_0$  为起始平均场强,  $\text{kV}/\text{m}$ 。当  $u(t)/(l -$

$g) - E_0 > 0$  时, 先导开始产生; 当  $g = l$  时绝缘间隙击穿, 绝缘子串闪络。

2.4 感应电压模型

雷电流反击杆塔时, 导线会产生感应电压, 感应电压极性与雷电流极性相反, 感应电压峰值分量采用文献<sup>[6]</sup>方法计算:

$$u = 2.2i^{0.4} h_c \left( 1 - \frac{h_g}{h_c} k \right) \quad (6)$$

式中  $i$  为雷电流;  $h_c$  为导线平均高度;  $h_g$  为地线平均高度;  $k$  为导地线耦合系数。仿真中采用 EMTP 中的 MODELS 语言<sup>[3]</sup>编程和 TACS 模块模拟感应电压, EMTP 中计算反击过电压用的 A 相感应电压模块如图 3 所示, 其中  $I_{LH}$  为雷电流,  $U_{IAY}$  为感应电压分量,  $U_{SAY}$  为雷击时的运行电压和耦合电压分量, 直接从线路中获取,  $U_{TAY}$  为  $U_{IAY}$  和  $U_{SAY}$  的合计值, 该值用来模拟雷击时的线路感应电压分量、运行电压和耦合电压。

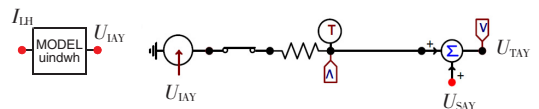


图 3 感应电压计算模块

Figure 3 Multi-wave impedance model of tower

### 2.5 站内设备等值模型

由于雷击时间很短,侵入波频率很高,雷击时站内跳通段设备的电阻电感效应来不及建立,采用入口电容等值模拟<sup>[9]</sup>,如表 1 所示。

表 1 站内主要设备等值电容

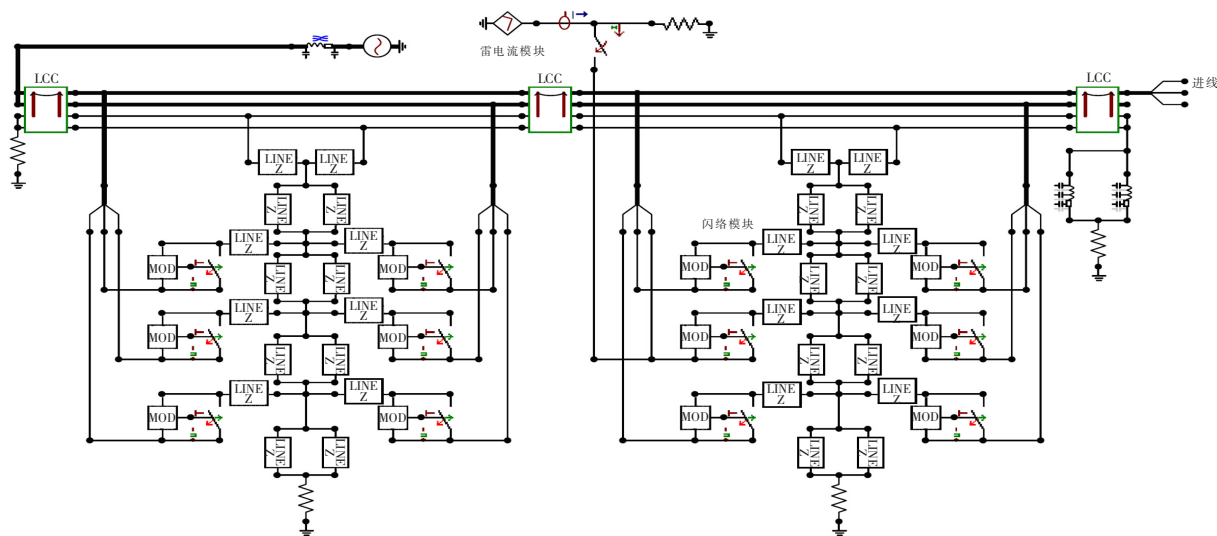
Table 1 Equivalent capacitance of substation equipment

设备名称	入口电容	设备名称	入口电容
CVT	5 000	DS	150
CB	140/830/190	CT	1 000

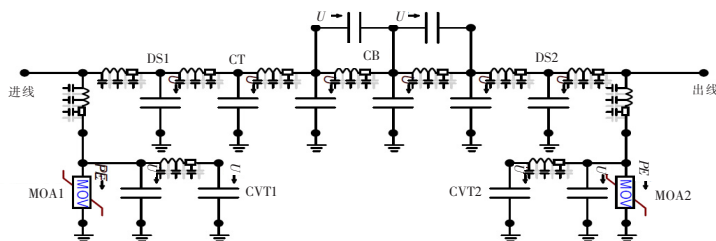
站内连接线采用波阻抗等值模拟,波阻抗值由下式计算得出,其中波速取  $0.95c$  ( $c$  为光速,大小为  $3 \times 10^8$  m/s)<sup>[15]</sup>。

$$Z_c = 60 \ln \frac{2h_c}{r_e} \quad (7)$$

在 EMTP 中建立 8 导体 JMartI 仿真计算模型,绕击时进线段和跳通段的部分仿真模型如图 4 所示,限于图形大小,实际上工频电源和 LCC 之间还有多个 LCC 和杆塔模块未显示出来。



(a) 进线段杆塔部分



(b) 变电站跳通段部分

图 4 雷电过电压计算模型

Figure 4 Lightning overvoltage calculation model

## 3 雷电侵入波过电压计算

### 3.1 绕击侵入波过电压

根据 EMTP 仿真,结合改进的电气几何模型计算得到 #1~#5 塔的绕击耐雷水平  $I_r$  和最大绕击雷电流  $I_m$  (A 相) 结果如表 2 所示,分析可知除 #1 塔外, #2~#5 塔在最大绕击雷电流下会发生闪络。

表 2 进线段 #1~#5 塔绕击耐雷水平和最大绕击雷电流

Table 2 Lightning withstand level and maximum lightning current of shielding failure for Tower #1~#5 kA

杆塔	$I_r$	$I_m$
#1	46	23
#2	24	30
#3	19	36
#4	17	23
#5	16	33

使用 33 kA 的雷电流绕击 #5 塔 A 相,由仿真结果可知,当初始雷电过电压波形成以后,沿着线路传输时受线路电阻、电导、电晕等因素影响,过电压波有一定的衰减,雷击点处的幅值为 5.03 MV,传播 725 m 后衰减为 2.56 MV,衰减的过程中波形逐渐畸变,波头变缓,这进一步表明较远的落雷一般不会威胁到变电站设备的绝缘。绕击 #5 塔 A 相时分别在雷击点 #5 塔、#4 塔、#3 塔、#2 塔和传播 725 m 后的 #1 塔处测得的过电压波形如图 5 所示。

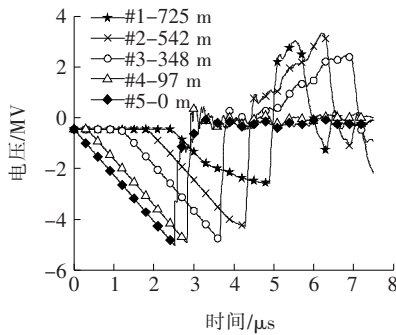


图 5 沿线不同距离处的过电压波形

Figure 5 Overvoltage waveforms at different distance

进一步分析绕击时站内设备过电压波形,以 #1 塔为例,采用 23 kA 雷电流绕击 #1 塔 A 相(未闪络),得到避雷器 MOA1 和断路器 CB 上的过电压波形如图 6 所示。可以看到,侵入波过电压波形也并非标准的 1.2/50 μs 双指数波,计算得到其平均波头时间为 2.85 μs、波尾时间为 98.1 μs,过电压波经避雷器后沿站内传播时电压有上升趋势,过电压与侵入波陡度、设备与避雷器的电气距离及波速等因素有关。

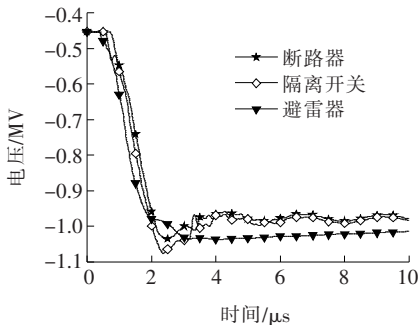


图 6 绕击 #1 塔时设备侵入波过电压波形

Figure 6 Lightning invasion overvoltage waveforms of substation equipment while striking the Tower #1

仿真发现,波阻抗的取值对侵入波有一定影响,特别是在闪络工况下,侵入波波尾处会产生较明显的低频振荡,振荡时也会造成侵入波幅值偏大,之前鲜有文献报道过这方面的研究。分析发现高频振荡是由于仿真中将导线完全视为无损传输线导致,实际上不存在完全无损的线路,因此在设置波阻抗参数时需考虑线路电阻带来的损耗。考虑到雷电冲击下线路参数随频率变化,可通过计算得到某个频率下的线路电阻参数,典型频率选取 400 kHz<sup>[15]</sup>,计算得到电阻  $R=0.219 \Omega/m$ 。绕击 #2 塔时断路器在无损模型和高频模型下的过电压波形如图 7 所示。可知,考虑线路实际损耗的高频模型<sup>[16]</sup>更符合侵入波的衰减振荡特性,幅值也较无损模型小。

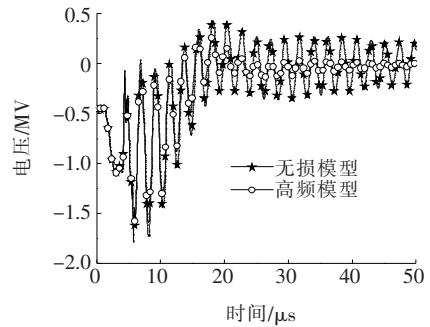


图 7 考虑线路实际电阻损耗的过电压波形

Figure 7 Overvoltage waveform considering resistance loss of actual lines

分别用 #1~#5 塔最大绕击雷电流绕击各塔 A 相,得到过电压幅值如表 3 所示,表中避雷器仅记录最大电流值。

由表 3 可知,当雷电流绕击 #2 塔时,断路器最大对地电压值为 1 720 kV,即使不考虑配合系数也超出现行标准<sup>[11]</sup>推荐的设备额定雷电冲击耐受值 1 675 kV,断路器存在雷击损坏的风险。经计算,此时在 #2 塔 A 相安装线路避雷器可将断路器的最大电压由 1 720 kV 降至 1 138 kV 的安全水平。

表 3 不同绕击塔下站内设备侵入波幅值  
Table 3 Amplitude of lightning invasion wave under different shielding failure towers kV

杆塔	避雷器	隔离开关	电流互感器	断路器
#1	15.7	1 087	1 060	1 046
#2	18.8	1 730	1 646	1 720
#3	19.6	1 196	1 175	1 180
#4	13.1	1 070	1 028	1 019
#5	18.6	1 161	1 134	1 112



仿真发现绕击时大部分雷电流经站内出线侧避雷器泄放,线路另一侧分流和经杆塔入地(绝缘子串闪络时)的电流较小,仅占 30%左右,特别是雷击点在 #1 塔时,其它分流仅占 12%,绝大部分雷电流流入变电站,这也解释了 #1 塔绕击耐雷水平显著高于其它杆塔的原因。

### 3.2 反击侵入波过电压

不论是绕击还是反击侵入波,其波形变化特征基本类似,限于篇幅,在讨论反击侵入波时仅计算 216 kA 雷电流反击 #1~#5 塔时站内侵入波过电压水平。计算时,考虑感应电压和工频电压影响,仿真得到站内设备过电压幅值计算结果如表 4 所示。

表 4 不同反击塔下站内设备过电压幅值

Table 4 Amplitude of overvoltage wave under different back striking towers kV

杆塔	隔离开关	电流互感器	断路器
#1	1 038	1 011	1 031
#2	1 047	1 049	1 052
#3	1 042	976	974
#4	986	962	961
#5	1 001	956	952

可以看到,反击时站内侵入波过电压水平都在设备耐受范围内,反击 #2 塔时过电压值最大。该工程跳通段设备反击侵入波过电压低于绕击侵入波过电压,应重点关注绕击的情况,这点与一般多回进出线变电站反击侵入波过电压较大的特性有差异。

## 4 仿真模型的影响

影响设备雷电侵入波过电压水平的因素有很多,如变电站进出线回路数、站内避雷器的保护配置方式、系统运行方式、雷电流强度、落雷点位置、进线段杆塔高度、线路绝缘水平及杆塔接地电阻大小等,该文重点仿真分析雷电流模型、感应电压及绝缘子串闪络模型等不同仿真模型对跳通段侵入波过电压的影响。

### 4.1 雷电流模型的影响

采用波头/波尾时间为 2.6/50  $\mu\text{s}$  的双指数波、斜角波和 Heidler 波 3 种雷电流波形分析<sup>[17]</sup>。以绕击为例,分别用 23 kA 雷电流绕击 #1 塔 A 相,记

录 3 种不同工况下绕击相断路器的过电压,如图 8 所示。

由图 8 可知,斜角波过电压波头最平缓,幅值最小,绕击时断路器上过电压为 1 045 kV,Heidler 波过电压最严重,绕击时断路器上过电压为 1 272 kV,为斜角波的 1.22 倍,其次是双指数波,绕击时断路器上过电压为 1 226 kV。实际上,雷击时断路器上的过电压水平与雷电流波形的陡度有关,陡度越大,设备侵入波过电压越严重。根据文献[11]的研究结果可知,双指数波、斜角波及 Heidler 波 3 种波形中,Heidler 波上升沿平均陡度最大,其次是双指数波,斜角波最小,这与不同波形对应的设备过电压变化趋势是一致的。此时若按斜角波校核,配合系数取国标推荐的 1.15<sup>[13]</sup>,断路器额定雷电冲击耐受电压需达到 1 202 kV,但此绝缘水平就无法满足双指数波和 Heidler 波的冲击;若按较严重的 Heidler 波校核,此时断路器额定雷电冲击耐受电压需达到 1 463 kV,为斜角波绕击下过电压水平(1 045 kV)的 1.4 倍。特别是对于雷电活动较强烈的地区,雷雨季节断路器处于分闸热备用状态时,若再次遭受雷击,断口间过电压水平将更严重,设备雷击损坏的风险较大。因此,偏严格考虑,按现行标准推荐的斜角波进行变电站跳通段断路器等设备绝缘水平设计校核时,配合系数宜取 1.4。

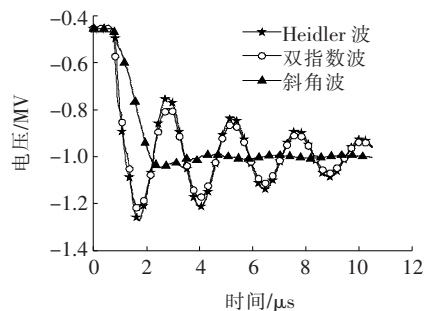


图 8 不同雷电流模型下断路器过电压波形

Figure 8 Overvoltage waveform of breaker under different lightning current models

### 4.2 感应电压的影响

以反击 #1 塔为例,图 9 为考虑感应电压后绝缘子串两端电压波形,表 5 为感应电压对站内侵入波过电压的影响。该工程考虑感应电压后设备侵入波过电压较不考虑时大 498 kV,这主要是由于雷电

流反击塔顶时,会在导线上感应出一个与雷电流反极性的电压分量,该电压分量与塔顶电压极性相反,导致绝缘子串两端电压增大,侵入到站内的过电压也随之增大,特别是当雷电流越大时,考虑感应电压后的设备过电压也越严重。一般对于 220 kV 及以下电压等级的线路,杆塔较低,按式(6)计算时感应电压较小,建模时可不考虑,但 500 kV 线路电压等级高,杆塔较高,感应电压分量较大,建模时考虑感应电压后能更真实地反应站内侵入波水平,有助于发现绝缘薄弱的设备。

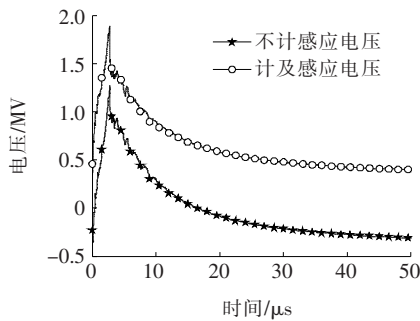


图9 感应电压对绝缘子串两端电压的影响

Figure 9 Influence of induced overvoltage on the voltage of insulator strings

表5 感应电压对站内设备过电压的影响

Table 5 Influence of induced overvoltage on the overvoltage of substation equipment kV

杆塔	隔离开关	电流互感器	断路器
计及	1 038	1 011	1 031
不计	548	513	526

### 4.3 绝缘子串闪络模型的影响

目前防雷计算常用的绝缘子串闪络模型有  $U_{50\%}$  法、相交法和先导法<sup>[8-10]</sup>,由于绕击#1塔时,绝缘子串不会发生闪络,闪络模型对过电压的影响极小,因此分析时以绕击#2塔A相为例,3种不同闪络模型下断路器过电压波形如图10所示。

采用不同闪络模型时,闪络时间上  $U_{50\%}$  法在绝缘子串两端电压达到其  $U_{50\%}$  雷电冲击放电电压后即闪络,未体现间隙放电的物理变化过程。相交法由绝缘子串两端电压波形与标准雷电波下的伏秒特性曲线交点确定,它考虑了放电时绝缘子串两端的电压变化,闪络时间比  $U_{50\%}$  法大。先导法在先导发展长度达到间隙长度后才闪络,考虑了一定的放电时延,物理意义较明确,与实际绝缘子串的放电击穿

过程相似,其闪络时间最晚。在断路器过电压上,采用  $U_{50\%}$  法作为闪络判据时,幅值最小,仅为 1 005 kV;其次是相交法,幅值为 1 396 kV;先导法最大,幅值达 1 707 kV,不同模型的过电压与其间隙闪络击穿时间有一定关系,闪络时间越长,过电压波发展得越充分,幅值也相应较大。目前,国内外关于绝缘子串闪络模型方面仍有不同的看法,一般偏向相交法和先导法<sup>[18-20]</sup>。结合仿真结果,对于 500 kV 线路,设备重要度高,采用先导法作为绝缘子串闪络判据进行设备绝缘设计校核时,断路器等设备上的过电压严重些,更有利于提升设备绝缘安全裕度。

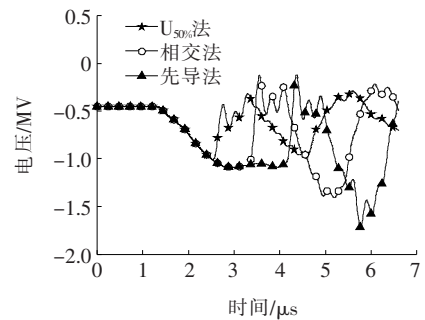


图10 不同闪络模型下断路器过电压波形

Figure 10 Overvoltage waveform of breaker under different flashover models

按该文的仿真计算模型及参数开展了多起实际变电站设备在雷电侵入波下的绝缘耐受水平校核计算,并基于仿真计算结果提出相应的防护措施,目前经校核防护的设备在雷雨季节均安全可靠运行,未发生过雷击故障事件,进一步证明了所采用的仿真计算模型的合理性。

## 5 结语

该文对变电站跳通段的雷电侵入波特性和进行了分析计算,仿真研究了雷电流模型、感应电压及绝缘子串闪络模型对设备雷电过电压的影响规律。

1)对于 500 kV 线路,雷击时单一进出线的变电站跳通段设备过电压较严重,跳通段设备绕击侵入波过电压水平比反击严重,甚至可能威胁设备的绝缘安全,校核时不应忽略绕击的影响;

2)计算雷电侵入波时,完全将导线视为无损线

路可能会由于电气回路的耦合引入振荡,此时利用某一合理雷电频率下的线路参数进行建模,可有效消除波形振荡导致的过电压局部过大的问题;

3)仿真表明,雷电流模型、感应电压和绝缘子串闪络模型对雷电侵入波有较大影响,按照 GB/T 50064—2014 推荐的斜角波雷电流校核计算时,绝缘配合系数宜取 1.4,特别是对于断路器等开关类设备有必要取比国标推荐值大的配合系数以确保安全。计算校核 500 kV 变电站设备雷电冲击耐受水平时,宜偏严格建模,建议考虑感应电压的影响,并采用先导发展模型作为绝缘子串的闪络模型。

#### 参考文献:

- [1] 夏亮,杨江平,邓斌,等. 雷达站电源综合防雷系统研究与设计[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(16):143-150.  
XIA Liang, YANG Jiangping, DENG Bin, et al. Study and design of comprehensive lightning protection system for power supply of radar station[J]. Power System Protection and Control,2019,47(16):143-150.
- [2] 陈昕,潘文霞,陈剑. 变电站雷电侵入过电压计算图形软件开发应用[J]. 高压电器,2019,55(3):96-102.  
CHEN Xin, PAN Wenxia, CHEN Jian. Development and application of graphics software for calculating lightning intruded overvoltage in substation[J]. High Voltage Apparatus,2019,55(3):96-102.
- [3] 谢施君,曾嵘,李建明,等. 变电站雷电侵入过电压波形特征及其影响因素的仿真[J]. 高电压技术,2016,42(5):1556-1564.  
XIE Shijun, ZENG Rong, LI Jianming, et al. Simulation on the characteristics and its influence factors of lightning intruding wave in substation[J]. High Voltage Engineering,2016,42(5):1556-1564.
- [4] 吕哲,王增平. 基于暂态波形特征的输电线路雷击干扰与故障识别方法[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(6):18-26.  
LV Zhe, WANG Zengping. Identification of lightning strike disturbance and faults for transmission line based on transient waveform characteristics[J]. Power System Protection and Control,2020,48(6):18-26.
- [5] 李帆,李阳林,张宇,等. 架空输电线路涉鸟故障分析与防范[J]. 中国电力,2019,52(10):92-99.  
LI Fan, LI Yanglin, ZHANG Yu, et al. Analysis and prevention of bird fault overhead transmission line[J]. Electric Power,2019,52(10):92-99.
- [6] 李雍,周悦,李建明,等. 特高压 GIS 变电站雷电过电压防护研究[J]. 高压电器,2016,52(7):37-44.  
LI Yong, ZHOU Yue, LI Jianming, et al. Research on protection of UHV GIS substation against lightning intruding overvoltage[J]. High Voltage Apparatus,2016,52(7):37-44.
- [7] 王彤,曾彦珺,李怡,等. 基于统计法的变电站雷击故障率计算方法[J]. 南方电网技术,2016,10(9):17-23.  
WANG Tong, ZENG Yanjun, LI Yi, et al. Calculation method of lightning failure rate of substation based on statistical method[J]. Southern Power System Technology,2016,10(9):17-23.
- [8] 韩永霞,卢毓欣,陈辉祥,等.  $\pm 800$  kV 换流站的雷电侵入波过电压仿真分析[J]. 高电压技术,2010,36(1):218-223.  
HAN Yongxia, LU Yuxin, CHEN Huixiang, et al. Simulation analysis on lightning intruding overvoltage of the  $\pm 800$  kV converter station[J]. High Voltage Engineering,2010,36(1):218-223.
- [9] 赵贤根,董曼玲,吕金壮,等. 同塔双回直流换流站雷电侵入波特性的[J]. 南方电网技术,2013,7(2):40-44.  
ZHAO Xianguan, DONG Manling, LU Jinzhuang, et al. The characteristics of lightning intruding overvoltage in the HVDC double circuit system of converter stations[J]. Southern Power System Technology,2013,7(2):40-44.
- [10] 蔡汉生,徐建铁,郭洁,等. 雷电侵入波波形对避雷器放电电流的影响[J]. 电瓷避雷器,2018(3):50-53+59.  
CAI Hansheng, XU Jiantie, GUO Jie, et al. Influence of lightning intrusion waveform on arrester discharge current[J]. Insulators and Surge Arresters,2018(3):50-53+59.
- [11] 陈炜炜,周懋坤,詹跃东,等. 雷电流数学模型仿真及对比分析[J]. 电瓷避雷器,2019(6):7-12.  
CHEN Weiwei, ZHOU Maokun, ZHAN Yuedong, et al. Lightning current mathematical model simulation and comparison analysis[J]. Electric Power Surge Protection Technology,2019(6):7-12.



- tion and comparative analysis[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2019(6):7-12.
- [12] GB/T 50064—2014. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范[S].
- [13] GB/T 311.2—2013. 绝缘配合第2部分:使用导则[S].
- [14] 陈梁金,李思南,谢鹏,等. 750 kV 变电站雷电侵入波过电压的研究[J]. *高电压技术*, 2006, 32(8):18-22.  
CHEN Liangjin, LI Sinan, XIE Peng, et al. Study on the lightning intruding over-voltage in 750 kV GIS Substation[J]. *High Voltage Engineering*, 2006, 32(8):18-22.
- [15] Dommel H W. 电力系统电磁暂态计算理论[M]. 北京:水利电力出版社,1991:72.
- [16] 李坤,邵方冰,张瑞曦,等. 基于 SPSS Modeler 的高损耗线路模式识别体系的研究[J]. *智慧电力*, 2019, 47(11):92-96+103.  
LI Kun, SHAO Fangbing, ZHANG Ruixi, et al. SPSS modeler based pattern recognition system for high-loss line[J]. *Smart Power*, 2019, 47(11):92-96+103.
- [17] 李德斌,文凯,赵雪琳,等. 输电线路多脉冲雷电响应探讨[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(2): 88-94.  
LI Debin, WEN Kai, ZHAO Xuelin, et al. Discussion on multi-impulse lightning response of transmission lines [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(1): 88-94.
- [18] 杨哲,樊平,王庆丰,汪适文,等. 高压输电线路用复合绝缘子内部间隙电场分析[J]. *电网与清洁能源*, 2019, 35(6):1-8.  
YANG Zhe, FAN Ping, WANG Qingfeng, et al. Analysis of the electric field through internal gap of composite insulator used in HV transmission lines [J]. *Power System and Clean Energy*, 2019, 35(6):1-8.
- [19] 张禄琦,郝阳,李喜来,等. 特高压直流杆塔新型复合横担布置研究[J]. *电网与清洁能源*, 2019, 35(2):58-62+68.  
ZHANG Luqi, HAO Yang, LI Xilai, et al. Study on the layout of new composite cross arms for the UHV DC tower[J]. *Power System and Clean Energy*, 2019, 35(2):58-62+68.
- [20] 殷峰,仲昭峰,高旭,等. 基于风沙区域绝缘子故障数据的配电线路风险评估方法[J]. *供用电*, 2020, 37(11): 28-33+41.  
YIN Feng, ZHONG Zhaofeng, GAO Xu, et al. Risk assessment method of distribution lines based on historical fault data of pin insulator in sandstorm area [J]. *Distribution & Utilization*, 2020, 37(11):28-33+41.