

文章编号:1671-6833(2019)02-0006-06

基于 ATP-EMTP 的某变电站雷击事故仿真研究

李景丽¹, 栗超超^{1,2}, 冯 鹏^{1,2}

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 产业技术研究院, 河南 郑州 450001)

摘要: 由于输电线路地处旷野, 落雷频繁, 雷电波沿线路侵入变电站从而损坏站内电气设备的事故频发. 本文以某变电站的雷击事故为例, 使用 ATP-EMTP 电磁暂态软件建立包含进线段和变电站的整体模型, 仿真计算出主变及其他电气设备的雷电过电压及波形, 分析该站遭受雷击事故的主要原因, 并研究雷击点、杆塔接地电阻对站内设备过电压的影响, 最后提出相应的防护措施. 结果表明, 事故的发生与雷电流侵入波幅值过大、避雷器的安装位置距变压器较远有关, 在变压器前加装避雷器可有效避免此类事故.

关键词: 雷电侵入波; 事故分析; 变电站; 避雷器安装位置; ATP-EMTP

中图分类号: TM 863

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2019.02.002

0 引言

我国某些地理位置特殊的地方雷电活动频繁, 处于此区域的变电站易发生雷击事故. 变电站作为输电网络的枢纽, 有汇集和分配电能的重要作用, 若其发生雷击事故将造成大面积停电, 不利于电网稳定运行. 经研究分析, 有两个原因引起变电站雷击事故: 一是雷电直击变电站的主要设备引起绝缘击穿; 二是雷击避雷线或杆塔塔顶, 雷电流沿输电线路侵入变电站, 其中后者是造成变电站雷击事故的主要方式^[1], 因此需对雷电侵入波引起的变电站雷击事故进行仿真研究, 并根据结果提出相应的防范措施.

目前关于变电站雷电过电压的研究方法集中在现场试验、补偿法和数字仿真软件计算这三方面. 文献[2]研制出防雷分析仪进行现场模拟试验, 在距离变电站 2 km 处施加直角波, 幅值为绝缘子 50% 的闪络电压, 再用相关仪器测量站内设备的过电压波形. 由于雷电流作用时间短至数十微秒, 所以对仪器的精度要求极高, 且成本高难以重复试验. 文献[3]应用戴维南定理把除避雷器的其他电气设备等效为有源二段网络, 构成一个有电压源和阻抗的等值电路, 之后避雷器的放电电流用迭代法求解出具体数值, 最后在叠加原理

的基础上, 计算避雷器支路网络的真解. 文献[4-8]应用电磁暂态计算程序 EMTP, 建立含有输电线路、杆塔、绝缘子、避雷器、等效站内设备电容的整体模型, 通过仿真计算得出作用在设备上的过电压波形, 该方法求解速度快、可满足工程上对精度的要求.

笔者结合变电站电气主接线图及现场设备的实际情况, 通过 ATP-EMTP 仿真软件构建包含进线段及站内设备的模型, 观察变压器上的过电压峰值及波形, 得出事故与雷电流侵入波的幅值过大、避雷器的安装位置距变压器较远有关, 再详细分析雷击点、杆塔接地电阻等因素对主要电气设备上过电压的影响, 最后提出防护措施.

1 变电站电气主接线

图 1 是变电站电气主接线简图. 发电机组经过一、二号主变向 66 kV 母线供电, 母线上有两路出线, 分别为甲、乙两线, 母线上安装有无间隙氧化锌避雷器, 与发生事故的变压器电气距离为 40 m. 主变与母线之间及每回出线都装有断路器 (DB) 和隔离开关 (DS). 事故发生时, 乙线处于热备用状态, 此时的运行方式为雷击情况下最危险的单相单母线式.

收稿日期:2018-04-26; 修订日期:2018-09-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51307152)

作者简介:李景丽(1983—), 女, 河南周口人, 郑州大学副教授, 博士, 研究领域为电磁场数值计算方法、电力系统过电压及接地技术、高电压及绝缘技术, E-mail: lijingli1022@zzu.edu.cn.

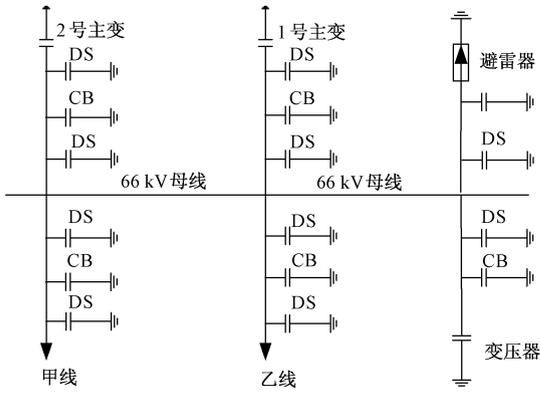


图 1 电气主接线图

Fig.1 Electrical main wiring diagram

2 建立模型与选择参数

笔者针对该站雷击事故,采用 ATP-EMTP 软件建立雷电波侵入变电站的仿真模型.此模型分为进线段模块和站内设备模块,进线段模块含有雷电流模型、杆塔及绝缘子模型、输电线路模型;站内设备模块包含变压器及主要电气设备模型、导线模型、避雷器模型.

2.1 雷电流模型

在防雷计算中,常用的模拟雷电流波形有双指数波、斜角波和半余弦波.笔者选用能较精确模拟实际雷电流的双指数波,其数学表达式为:

$$i_L(t) = AI_L(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}), \quad (1)$$

式中: I_L 为雷电流幅值; A 为常数; α 和 β 分别为波头、波尾衰减系数.

雷电流波形取为 $2.6/50 \mu s$,雷电通道的波阻抗取 300Ω .雷电流模型、参数设置如图 2 所示.



图 2 雷电流仿真模型

Fig.2 Lightning current simulation module

2.2 杆塔模型

杆塔的仿真模型分为以下 3 种:集中电感模型、单波阻抗模型及多波阻抗模型.其中多波阻抗模型综合考虑杆塔几何结构、海拔高度等因素,能更准确地模拟雷电波在杆塔上的传播特性,因此笔者采用多波阻抗模型^[9].此杆塔模型用无损线路来模拟雷电波的衰减过程;用 $R-L$ 并联电路来实现不同频域时衰减能力迥异的特性,具体推导公式如下:

$$R_i = \frac{-2Z_{i1} \ln \sqrt{\gamma}}{h_1 + h_2 + h_3} h_i, \quad i = 1, 2, 3; \quad (2)$$

$$R_4 = -2Z_{i4} \ln \sqrt{\gamma}; \quad (3)$$

$$L_i = \frac{2(h_1 + h_2 + h_3 + h_4) \alpha R_i}{v_i}, \quad i = 1, 2, 3, 4; \quad (4)$$

$$Z_{Tk} = 60 \left(\ln \frac{2\sqrt{2}h_k}{r_{ek}} - 2 \right), \quad k = 1, 2, 3, 4, \quad (5)$$

式中: h_1, h_2, h_3, h_4 分别为塔顶到上横担、上横担到中横担、中横担到下横担和下横担到地面的距离; R_1, R_2, R_3, R_4 为对应的阻尼电阻; γ 为衰减系数; α 为阻尼系数; v 为传播速度; r_{ek} 为每一部分的等效半径,可由下式计算,

$$r_{ek} = 2^{1/3} (r_{Tk}^{1/3} r_B^{2/3})^{1/4} (R_{Tk}^{1/3} R_B^{2/3})^{3/4}. \quad (6)$$

该站进线段杆塔为单根避雷线同塔双回铁塔.该电压等级的杆塔呼称高为 12 m ;绝缘子串的闪络电压 $U_{50\%}$ 为 520 kV ;杆塔的冲击接地电阻一般为 $7 \sim 15 \Omega$ ^[10-14].根据杆塔各部分海拔高度,将杆塔分成 4 部分并计算各部分的等效值,如表 1 所示.

表 1 杆塔模型等效计算参数

Tab.1 Tower model equivalent calculation parameters

项目	1	2	3	4
波阻抗 Z_{ei}/Ω	220	220	220	110
阻尼电阻 R_i/Ω	26.2	26.2	26.2	53.5
阻尼电感 $L_i/(\times 10^{-8} \text{ H})$	157.2	157.2	157.2	321

2.3 输电线路模型

ATP-EMTP 软件中输电线路的模型含有连续换位、不换位线路、贝杰龙等值电路模型及随频率变化的 JMarit、NODA 线路模型,其中 JMarit 模型应用于求解频变参数线路,且考虑地线与导线间的耦合系数,提高了计算精度,因此选择 JMarit 模型来模拟输电线路.输电导线及避雷线的具体参数如表 2 所示.土壤电阻率为 $100 \Omega \cdot \text{m}$,系统频率 50 Hz ,进线段 2#~5#号杆塔档距为 400 m ,1#杆塔到变电站距离为 100 m .

表 2 输电线路及避雷线的具体参数

Tab.2 Specific parameters of transmission lines and lightning conductors

物理参数	输电导线	避雷线
型号	LGJ-240/30	GJ-50
分裂数	1	1
20 °C 直流电阻/ $(\Omega \cdot \text{m})$	0.118 1	0.578 6
弧垂/ m	5.3	2.8

2.4 避雷器模型

该变电站内与母线相连的避雷器型号为Y10W1-90/232.表3是该无间隙金属氧化锌避雷器的伏安特性.从表3可知避雷器动作电压为104 kV,5 000 kA雷电流下避雷器的残压为232 kV.

表3 避雷器的伏安特性

Tab.3 Arrester volt-ampere characteristics

电流/A	0.001	1 000	5 000	10 000
电压/kV	104	180	232	235

2.5 站内电气设备模型

雷电冲击波具有传播速度快且频率高的特性,变压器绕组的振荡过程在数微秒的雷电侵入波下未及时发展,因此仿真计算中变压器及其他电气设备通常采取入口电容等效.各类设备等效入口电容^[10]如表4所示.站内母线和设备间的连接线采用单相无损分布参数线路来模拟,波阻抗值均取为300 Ω,波速取300 m/μs.

表4 各类电气设备的入口电容及绝缘水平

Tab.4 Ingress capacitance and insulation level of various types of electrical equipment

电气设备	等效入口电容/pF	雷电冲击耐受电压/kV
变压器	2 000	350
CVT	400	
电磁式TV	100	
断路器	300	
隔离开关	100	
电流互感器	50	

3 仿真结果及分析

依据该站的实际情况建立模型后,进而研究雷击杆塔塔顶反击形成的雷电侵入波对变电站内设备过电压的影响.

3.1 雷击事故原因分析

根据现场工况搭建模型,设定雷击点在1#杆塔,杆塔冲击接地电阻为10 Ω.计算幅值为58~200 kA的雷电流作用下变压器过电压情况,如表5所示.

由表5可知,幅值低于60 kA的雷电流未引起杆塔绝缘子串闪络,故不会有反击后的雷电流侵入站内变压器,但变压器的过电压峰值仍有116 kV.原因是雷电流在避雷线上传播时,对未闪络线路引起的感应过电压.雷电流幅值增至60 kA时,杆塔绝缘子串被击穿以致雷电流侵入

表5 雷电流幅值对变压器过电压的影响

Tab.5 Influence of lightning current amplitude on transformer overvoltage

雷电流幅值/kA	大于等于雷电流概率/%	变压器过电压峰值/kV	额定冲击耐受电压峰值/kV	绝缘裕度/%
58	21.92	116	350	未闪络
59	21.36	116		未闪络
60	20.81	279		8.33
62	19.74	280		8.00
64	18.74	282		7.34
66	17.78	286		6.03
68	16.88	290		4.71
70	16.02	295	3.07	
75	14.05	306	-0.55	
80	12.33	317	-4.16	
100	7.31	352	-15.66	
200	0.53	476	-56.40	

注:绝缘裕度 $K_p(\%) = (U_p - U_M)/U_p \times 100\%$; $U_p = U_{\text{BL}}/K; K = 1.15$.

到变电站内,变压器上过电压峰值达到279 kV,设备绝缘裕度仅为8.33%.雷电流幅值为75 kA时,设备绝缘裕度为-0.55%,已不符合设备绝缘保护要求.随着雷电流幅值增大,绝缘裕度负值最大为56.40%.

图3为变压器过电压在不同雷电流幅值下的波形.图3(a)中由于雷电流未侵入到变电站内,变压器上过电压峰值较小、衰减快,未对变压器的绝缘造成影响.图3(b)~(c)中随着雷电流幅值的增大,变压器上过电压峰值持续增加,过电压波形振荡加剧、衰减速度慢,易造成变压器绝缘击穿.说明幅值较大的雷电流侵入到变电站时,母线避雷器虽然正常动作,但仍易引起雷击事故.

动作后的避雷器仍不能保护变压器,笔者继续对避雷器的保护距离做仿真分析,由DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压绝缘配合》规程知,该站进线路为两路时,避雷器的最大电气保护距离为65 m,进线路数只有一路时,避雷器最大电气保护距离为45 m.但避雷器最大保护距离与侵入波陡度及波速、避雷器残压、设备电容等参数有关,且需考虑避雷器已运行较长时间、设备老化等因素.由于避雷器保护距离并不一定适用于一个通用的规定,所以需要借助仿真软件,确定准确的防护距离.

事故发生时,变压器处于单线单母线的运行方式,母线避雷器与变压器相距40 m.设定雷击

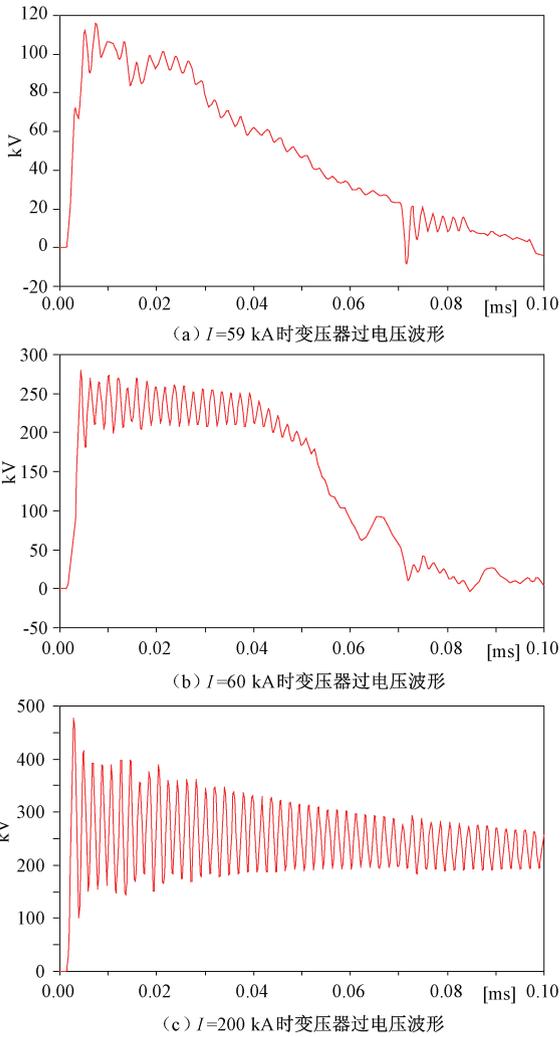


图 3 雷电流幅值对变压器过电压波形的影响

Fig. 3 Influence of lightning current amplitude on overvoltage waveform of transformer

1#杆塔, 杆塔的冲击接地电阻取 $10\ \Omega$, 为确保绝缘子串闪络, 反击雷电流幅值取 75 kA . 避雷器安装位置对变压器保护性能的影响如表 6 所示.

表 6 母线避雷安装位置对变压器过电压的影响

Tab. 6 Influence of installation position of busbar lightning on overvoltage of transformer

避雷器及与变压器的 相对位置/m	变压器	绝缘裕度/%
10	258	15.23
20	276	9.31
30	287	5.70
40	306	击穿
50	321	击穿
60	340	击穿

由表 6 所知, 当雷电流为 75 kA 时, 变压器与避雷器相距 40 m 便会被击穿, 引起雷电入侵波损坏变压器的事故. 当避雷器与变压器相距 30 m 时, 变压器上的绝缘裕度也仅为 5.7% , 随着避雷

器与变压器距离增大, 变压器上的过电压逐渐增大, 保护裕度逐渐减小, 避雷器的保护性能亦越弱. 表明当避雷器安装位置距变压器较远时, 避雷器对变压器的保护性能较低, 因此安装避雷器时要尽量靠近变压器侧, 以增强避雷器对变压器的保护性能.

综上所述, 雷电流侵入变电站内使变压器发生击穿, 与雷电流侵入波的幅值过大, 超出母线避雷器的保护能力有关, 另一方面, 该站母线避雷器保护距离小于 40 m (避雷器与变压器的实际距离), 使得避雷器不能对变压器进行有效的过电压保护, 导致事故发生.

3.2 雷击点对站内设备过电压的影响

雷击点选为进线段的 1#~5#杆塔, 通过对不同雷击点的仿真计算得到变电站内主要设备的侵入波过电压幅值. 该变电站进线段耐雷水平为 60 kA , 为确保绝缘子闪络, 反击雷电流幅值取 75 kA , 杆塔冲击接地电阻取 $10\ \Omega$, 避雷器与变压器相距 40 m . 雷击点对变电站内设备的过电压影响如表 7 所示.

表 7 雷击点对变电站内主要设备过电压的影响

Tab. 7 Influence of lightning strike point on overvoltage of main equipment in substation

雷击点	主要设备上的过电压/kV		
	断路器	隔离开关	变压器
1#杆塔	303	301	305
2#杆塔	239	234	242
3#杆塔	229	224	232
4#杆塔	225	223	227
5#杆塔	226	225	228

由表 7 知, 雷击点与变电站的距离会对站内设备上的过电压产生影响. 雷击 1#杆塔造成的反击过电压最大, 变压器上过电压能达到 305 kV ; 雷击 2#~5#杆塔产生的过电压逐渐减小, 相比 1#杆塔最大降幅为 25.2% . 断路器、隔离开关等主要设备上的过电压降幅亦有 25.4% 、 25.2% . 其原因是反击产生的雷电波在输电线路传播的过程中发生了衰减和畸变.

3.3 杆塔接地电阻对站内设备过电压的影响

降低输电线路杆塔的冲击接地电阻是提高输电线路耐雷水平、确保输电系统安全运行的一个重要措施. 在确定雷击点为 1#杆塔时雷电入侵波对变电站内设备造成的危害最严重的情况下, 改变 1#杆塔接地电阻的大小, 得到变电站内主要设备的过电压变化情况, 总结分析接地电阻变化对

雷电侵入波的影响. 输电线路的杆塔接地电阻一般要求在 $7 \sim 20 \Omega$ 之间, 反击雷电流幅值取 75 kA , 避雷器与变压器相距 40 m , 仿真结果如表 8 所示.

表 8 杆塔接地电阻对站内设备过电压的影响

Tab. 8 Influence of tower ground resistance on overvoltage of main equipment in substation

接地电阻/ Ω	主要设备上的过电压/kV			变压器上过电压绝缘裕度/%
	断路器	隔离开关	变压器	
7	107	109	110	未闪络
8	274	270	277	9.0
9	287	284	290	4.7
10	303	301	305	击穿
11	317	315	319	击穿
13	342	340	345	击穿
15	363	359	366	击穿
20	404	399	406	击穿

从表 8 知, 当杆塔冲击接地电阻为 7Ω 时, 绝缘子串未闪络, 雷电流未侵入变电站内. 杆塔接地电阻为 8Ω 时, 变压器上产生的过电压幅值 277 kV , 绝缘裕度为 9.0% , 站内设备上的过电压幅值随着杆塔接地电阻的增大而逐渐升高, 变压器上的过电压最高达到 406 kV , 相比未击穿时的过电压增加了约 3 倍. 是因雷击塔顶时, 雷电流沿着杆塔直接注入大地的分量随杆塔冲击接地电阻的减小而增大, 从而流进站内的雷电侵入波幅值逐渐降低. 因此冲击接地电阻是影响雷电侵入波的一个重要因素, 降低杆塔的接地电阻是提高输电线路耐雷水平以及降低雷击跳闸率的有效措施, 能减轻雷电侵入波对变电站的危害.

3.4 防范措施

该变电站是整个区域输配电稳定运行的关键, 需加强其防雷保护建设.

(1) 加强对进线段杆塔的防雷保护, 避免雷击点落在变电站附近杆塔, 亦可向靠近变电站处的杆塔加装避雷器, 以防严重的雷电侵入波事故.

(2) 尽可能降低杆塔的接地电阻, 可通过优化杆塔接地装置、减小杆塔附近土壤电阻率来实现.

(3) 变压器前加装避雷器, 有效降低侵入波的幅值.

综合考虑周围土壤环境、地形地貌特点、经济适用性及操作难度等因素, 宜采取在变压器侧安装避雷器, 防止变压器绝缘击穿.

笔者对该防护措施进行仿真研究, 改变加装

避雷器与变压器的位置, 观察变压器高压侧安装避雷器的保护效果. 设定雷击 1# 杆塔, 杆塔接地电阻取 10Ω , 雷电流取 75 kA .

表 9 是在变压器高压侧安装避雷器后, 变压器过电压的变化情况. 因受避雷器残压的钳位作用, 当避雷器安装位置距变压器较近时, 变压器、断路器、隔离开关的过电压幅值基本没有变化. 对比表 6 和表 9, 变压器高压侧加装避雷器前的过电压为 306 kV , 加装后过电压最大值为 260 kV , 减少约 15.03% . 随着与避雷器距离的增大, 变压器过电压幅值逐渐增大, 但即使相距 70 m 时, 绝缘裕度仍能达到 14.57% , 表明变压器侧安装避雷器可有效提升变压器的防雷保护能力.

表 9 变压器侧安装避雷器对变电站内设备过电压的影响

Tab. 9 Influence of the effect of transformer-side arresters on overvoltage in substation equipment

加装避雷器与变压器的相对位置/m	主要设备上的过电压/kV			变压器上过电压绝缘裕度/%
	断路器	隔离开关	变压器	
5	232	232	232	23.77
10	232	232	233	23.44
20	234	235	235	22.79
30	234	234	235	22.79
40	240	241	240	21.14
50	245	244	246	19.17
60	253	253	253	16.87
70	258	260	260	14.57

4 结论

根据该站电气主接线图及现场实际情况, 使用 ATP-EMTP 建立包括进线段及站内设备的整体模型, 通过分析站内主要设备上过电压的变化情况得出以下结论.

(1) 此次雷电侵入波事故与侵入波的幅值过大, 超出母线避雷器的保护能力有关, 另一方面是由于母线避雷器的最大保护距离小于现场实际距离 40 m , 使得避雷器不能对变压器进行有效的过电压保护, 导致事故发生.

(2) 雷击点和杆塔接地电阻对站内设备过电压有明显影响, 当雷击点越近和杆塔接地电阻越小时, 设备的过电压越小.

(3) 变压器侧加装避雷器可有效加强变压器的防雷保护能力. 即使两者相距 70 m 时, 变压器上过电压绝缘裕度为 14.57% , 达到保护要求.

参考文献:

[1] 周泽存. 高电压技术. [M]. 3 版. 北京: 中国电力

- 出版社,2007.
- [2] 解广润. 防雷分析仪的设计与制造[J]. 中国电力, 1956(8):34-42.
- [3] 王静. 基于 PSCAD/EMTDC 的泸州 500 kV 变电站雷击过电压分析[D]. 成都:四川大学电气工程学院,2006.
- [4] 舒海莲,杨秀,臧海洋. 基于 EMTP 的同塔并架多回线路防雷计算[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(12):12-16.
- [5] 林韶文,黄群古,曾益民. 多雷区输电线路及变电站防雷保护[J]. 高电压技术, 2003, 29(5):17-18.
- [6] 常文平,齐山成,曹丽璐,等. 110 kV 变电站防雷保护故障及分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17):113-115.
- [7] 徐鹏,梁少华. 可调间隙防雷装置在 35 kV 变电站防雷中的应用研究[J]. 高压电器, 2012, 48(9):7-15.
- [8] 徐刚,周栋,王磊,等. 乌溪江梯级水电站水库调度自动化系统研究与应用[J]. 水利水电技术,2018, 49(2):124-131.
- [9] RIZK F A M. Modeling of transmission line exposure to direct lightning strokes[J]. IEEE transactions on power delivery, 1990, 5(4):1983-1997.
- [10] 江日红. 发、变电站防雷保护及应用实例[M]. 北京:中国电力出版社,2005.
- [11] 电力工业部电力科学研究院高压研究所. 交流电气装置的过电压绝缘配合:DL/T 620—1997[S]. 北京:中国电力出版社,1997.
- [12] 陈智,万军彪. 特高压直流架空输电线路雷击仿真研究[J]. 江西电力, 2008, 32(1):1-4.
- [13] 向军,周羽生,郑剑武,等. 1000kV 交流紧凑型输电变电站雷击侵入波分析[J]. 电瓷避雷器, 2012(3):67-70.
- [14] 刘源,王鹏,毛志平. 基于 ATP/EMTP 的变电站 35kV 进线段可调保护间隙组合防雷措施仿真研究分析[J]. 电气时代, 2016(12):78-82.

Simulation Study on Lightning Accident of a Substation Based on ATP-EMTP

LI Jingli¹, LI Chaochao^{1,2}, FENG Peng^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Institute of Industrial Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: As the transmission lines are located in the wilderness where the thunder is continual, lightning waves intrude into substations along the lines, causing frequent damage to the electrical equipment inside the station. In this paper, taking the lightning accident of a substation as an example, the ATP-EMTP electromagnetic transient software builds the whole model containing the line section and the substation. Then it calculates the lightning overvoltage and waveform of the main transformer and other electrical equipment. We analyze the main causes of the lightning accident and study how the lightning strike point and the grounding resistance of the pole and tower influence the station. Finally, we propose some corresponding protective measures. The results show that the accidents are related to the overshoot of lightning current invading wave and the long distance between lightning arrester and transformer, and installing lightning arrester in front of the transformer may avoid such accidents.

Key words: lightning invasion wave; accident analysis; substation; installation position of arrester; ATP-EMTP