

基于 ATP-EMTP 的变电站雷电过电压研究分析

赵 帅¹ 裴亚伟¹ 张韦轩¹ 仵 涛²

(1. 新乡学院物理与电子工程学院 2. 国网河南省电力公司郑州供电公司)

摘要: 在现有的防雷措施下,雷电依旧是威胁我国电网稳定性的重要原因之一。同时,由雷电引起的过电压波能够侵入变电站,进而威胁到变电站设备的安全运行。500kV 变电站是我国电网的重要枢纽,如果雷击主要的电气设备,将对设备造成不同程度的损坏。因此,有必要对变电站的雷电侵入波过电压进行研究。本文以一个 500kV 的变电站为例,将变电站和进线段作为整体,利用 ATP-EMTP 软件对变电站进行雷电模拟仿真。通过模拟不同运行方式下雷电过电压的情况,并对影响雷电过电压的因素进行分析,结果表明,雷电反击产生的过电压水平远高于设备绝缘水平,当变电站运行方式为单变单母单线时,变电站设备上过电压最为严重。杆塔的接地电阻值对雷电过电压影响最为敏感。

关键词: 雷电侵入波; 500kV 变电站; 过电压; EMTP

2024.08.DQGY 23

0 引言

随着全球形势的日益复杂和我国生产制造业的快速发展,当前社会环境对电网供电的安全可靠性提出了越来越高的要求,因此保障电力网络供电安全稳定的目标比以往任何时候都重要^[1]。在电力系统事故中,雷害事故所占比例通常超过 50%,我国 500kV 的变电站则拥有众多电气设备,这些设备之间存在着相当大的距离。因此,为确保 500kV 变电站的安全运行,必须采取有效的防雷措施,以保障设备的稳定性和可靠性^[2-3]。本文首先对雷电过电压的形成及放电过程、雷电过电压产生机理进行分析阐述。然后基于 ATP-EMTP 软件把 500kV 线路和变电站进行整体建模,并系统地分析和模拟了影响变电站雷电侵入波计算的因素。

1 雷电的形成及放电过程

雷云的形成和放电机理很复杂,具有随机的统计特性^[4]。雷电过电压(约 90%)对电力系统影响最为普遍,它是由于带有负电雷云地面放电而产生的,即负下行雷电压,一般包括多次重复放电,每一次雷电的形成主要包括先导放电、主放电及余辉放电三个阶段^[5],如图 1 所示。

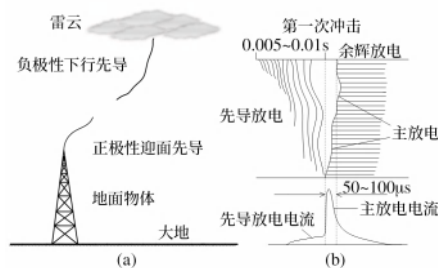


图 1 雷击过程示意图

雷云内部的电荷分布不均，当雷云电荷与大地感应出的异性电荷所形成的电场达到空气击穿电场的强度后，空气就会开始被电离，并伴随产生一段电离弱导电通道指向地面，这就是先导放电。先导放电总时间在 0.005~0.01s 左右，雷电流很小，大约在数百安培。先导放电发展到地面后，即与地面物体构成主放电通道，进入主放电阶段^[6]，主放电持续时间在 50~100 μ s 左右，多数雷击峰值电流可达数十乃至数百千安。一旦主放电阶段完成，雷云中的电荷将沿着主放电通道进行中和放电，于是一定数量的余辉就会持续不断地保持在该通道内，这就是余辉放电阶段。余辉放电电流只有几百安培，但其持续时间可达到 0.03~0.05s。

变电站雷电来源一种是雷电直击于变电站，另一种是通过输电线路侵入到变电站的雷电过电压。与雷电直接击中变电站相比，由于线路分散较广且绝缘薄弱，当线路发生雷击时，通过架空线路传播的雷电侵入波能够快速到达变电站，进而威胁变电站电气设备的安全可靠运行，导致雷击线路事故概率上升。雷击输电线路主要分为绕击和反击^[7]。在雷电绕过避雷线的情况下避雷线将会失效，并直接击中正在运行中的导线，称为绕击^[8]。在雷电击中接地电阻较高的杆塔顶部时，由于无法建立良好的接地通道，杆塔顶部的电位将远高于线路电位，此情况下绝缘子串可能会出现闪络，这种现象即为反击，本文着重研究雷电反击现象。

2 闪络模型及电气设备的计算参数

2.1 绝缘子串闪络模型

我国较多采用相交法对线路防雷进行计算分析^[9]，即比较线路绝缘子串两端的过电压波形与其伏秒特性波形。如图 2a 所示，当两曲线有交点时，根据 U_{s-t} 特性曲线判据判定为闪络，闪络电压为 U_f ，如图 2b

所示，当两条曲线没有交点时，则判定绝缘子串无闪络现象^[10-11]。

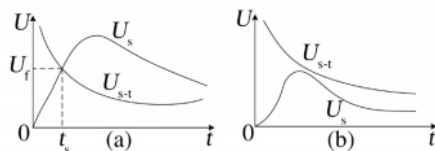


图 2 绝缘子串闪络判据

图中， U_f 为闪络时刻的电压值； U_{s-t} 为绝缘子串的伏秒特性曲线； U_s 为绝缘子串两端的电压值； t_s 为发生闪络时间。

如图 3 所示，将模型运用 ATP-Draw 中的 MODELS 语言编程实现。

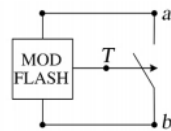


图 3 ATP-EMTP 中的绝缘子串闪络模型

其中， a 和 b 为以绝缘子串两端的电压为输入信号的输入节点， T 为输出节点，当 U_s 小于其伏秒特性值时，在 a 、 b 两点间的开关为常开状态，绝缘子串不出现闪络现象。当 U_s 大于其伏秒特性电压时，节点 T 即会输出开关闭合指令，绝缘子串出现闪络现象^[12]。

2.2 电气设备的计算参数

在雷电侵入波过电压的计算中，必须考虑设备的冲击绝缘水平这一重要参数^[11]，本文安全裕度取 1.15，得到电气设备的保护裕度计算公式：

$$\begin{cases} K_p(\%) = \frac{U_p - U_m}{U_p} \times 100\% \\ U_p = \frac{U_B}{1.15} \end{cases} \quad (1)$$

式中， K_p 为设备的保护裕度，其值应不低于 15%； U_p 为避雷器的雷电冲击保护水平； U_m 为设备所承受的最大冲击电压； U_B 为设备的雷电冲击绝缘水平。

对于站内其他电气设备如隔离开关、断路器、互

感器等，也可用冲击入口电容标准值来代替。根据国家标准规定，站内主要设备的计算参数如表 1 所示。

表 1 站内电气设备的相关计算参数

设备名称	电容值 /pF	冲击绝缘水平/kV	冲击保护水平/kV
变压器	5000	1550	1348
高压电抗器	5000	1550	1348
电压互感器	5000	1675	1456
断路器	300	1675	1456
隔离开关	80	1675	1456

3 雷电过电压仿真分析

输电线路发生雷击后，雷电流产生的过电压波幅值较高，通过输电线路侵入变电站过程中，存在着电压波的衰减现象^[12]。本文将输电线路进线段和变电站作为一个整体建立模型，对变电站内部各电气设备过电压进行模拟仿真。

3.1 变电站主接线图

本文建模采用的电气主接线图如图 4 所示，考虑 2 回 500kV 出线，站内两条母线分别带有 #1 和 #2 主变压器。

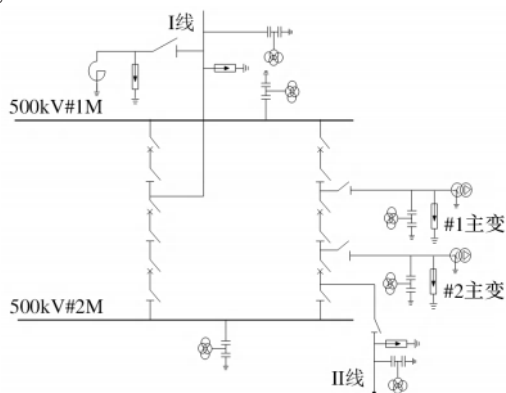


图 4 某 500kV 变电站电气主接线图

3.2 运行方式

当变电站遭受雷击时，与多个变压器多条母线的情况相比，单变单母单出线运行方式下雷电流经过的线路较少，穿过的电容也较小，因此变电站的设备受雷电过电压的影响最为严重^[11]。根据图 4 可知，该变

电站所有的运行方式，如表 2 所示。本文采用 #1 主变经 #1 母线至 I 线的运行方式为例，对其进行仿真分析。

表 2 变电站单变单母单线运行方式

序号	运行方式
1	# I 主变经 # I 母线至 I 线
2	# I 主变经 # II 母线至 I 线
3	# I 主变经 # I 母线至 II 线
4	# I 主变经 # II 母线至 II 线
5	# I 主变经 # I 母线至 I 线
6	# II 主变经 # II 母线至 I 线
7	# II 主变经 # I 母线至 II 线
8	# II 主变经 # II 母线至 II 线

3.3 雷电反击仿真分析

雷击点选择 #2 杆塔，考虑到线路工频电源电压叠加作用，在进线段首段进行叠加，选取 A 相为仿真对象，电流波形参数取 2.6/50 μ s，仿真程序步长取 0.005 μ s，门型塔接地电阻值取 5 Ω ，其他杆塔的接地电阻值均取 10 Ω 。用 ATP-EMTP 软件进行建模仿真，在仿真模型各等效元件节点处设置电压探针^[12]，执行 ATP 程序，得到各设备过电压仿真数据，得到如下仿真结果。

由图 5 可知，当输电线路遭受雷击后，线路侧引起的雷电侵入波过电压最高可达 6020.3kV，远大于设备的绝缘水平。变压器的过电压最高可达 1259kV，其保护裕度为 6.6%，比设备应有的 15% 保护裕度低。因此，在实际工程中，应该加大变电站进线段的防雷措施，保障站内设备安全。

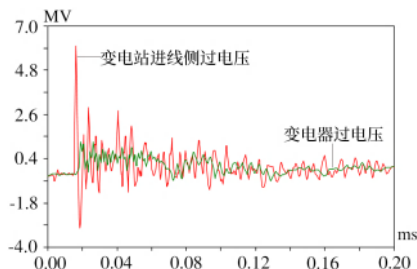


图 5 变电站进线侧、变压器过电压波形

图6为线路侧和主变侧电压互感器的过电压波形图，线路侧电压互感器的过电压最高为736.14kV，保护裕度为49.4%。主变侧幅值达到1278.9kV，其保护裕度为17.6%。

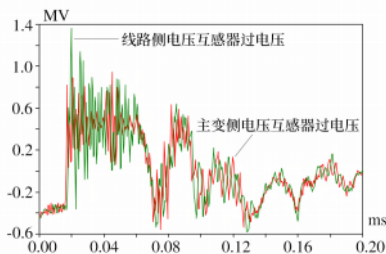


图6 线路侧、主变侧电压互感器过电压波形

3.4 变电站运行方式对过电压的影响

正常情况下，变电站有多个变压器、多条母线和多条出线，在设备检修过程中，站内的运行方式可能发生改变，这将影响站内电气设备的过电压。在本文中，以#2杆塔的雷击为例，考虑了四种运行方式：单变单母单线、单变单母双线、单变双母单线和双变单母单线，得到不同运行方式下的设备过电压数据如表3所示。

表3 设备在不同运行方式下的设备过电压情况

运行方式	过电压最大值		
	变压器	电压互感器	高压电抗器
单变单母单线	1259.1	1278.9	870.1
单变单母双线	1251.7	1263.8	857.3
单变双母单线	1239.5	1224.3	814.2
双变单母单线	1143.8	1197.6	796.7

由表3可知，当变电站运行方式为单变单母单线时，设备上过电压最为严重。在研究防雷保护方案时，应选择影响结果最为严重的运行方式，即单变单母单线的运行方式，在此运行方式下得到的结果最可靠。

3.5 雷击点对过电压的影响

雷击变电站进线段，即近区雷击产生的危害更为严重，本节在其他条件不变时，分别以反击#1~#5塔为研究对象进行仿真分析，结果如表4所示。

表4 不同雷击位置对应的设备过电压情况

雷击位置	过电压最大值		
	变压器	电压互感器	高压电抗器
#1	1194.7	1272.3	729.3
#2	1259.0	1278.9	870.1
#3	1256.8	1197.4	791.6
#4	1255.4	1113.8	718.2
#5	1254.2	1086.2	695.8

由表4可知，最严重的过电压发生在雷击#2杆塔时，离变电站越远，对雷电侵入波过电压的衰减越大，其幅值越小，雷击#1杆塔比雷击#2塔产生的过电压小，这是因为#1塔距离#0塔较近，仅为百米左右，由#0塔发射的相反的极性波发生折反射，并与#1塔上的电压波叠加在一起，降低了其塔顶的电位，使侵入波过电压的幅值降低，导致过电压水平较低。对于500kV输电线路，#2塔位于与#0塔约500m的距离，由于返回的负反射波对塔顶的电位影响较低，导致#2杆塔的侵入波过电压较高。

3.6 接地电阻对过电压的影响

杆塔接地电阻大小的改变能够引起设备过电压的变化。本文在单变单母单线运行方式下，雷击#2杆塔，接地电阻取值为5~25Ω，门型塔接地电阻相对较小，本文取5Ω，仿真数据如表5所示。

表5 不同接地电阻值对应的设备过电压情况

接地电阻	过电压最大值		
	变压器	电压互感器	高压电抗器
6	1187.3	1192.7	783.6
8	1224.8	1237.5	829.4
10	1259.0	1278.9	870.1
12	1297.6	1319.2	917.2
15	1337.9	1352.8	968.7
18	1364.2	1387.6	984.5

根据表5可知，随着接地电阻值的减小，各设备上的最大过电压值随之减小，由此可知降低杆塔接地电阻可有效减小设备遭受的过电压。当接地电阻值大

于 10Ω 时，主变侧避雷器流过的电流超过了避雷器标称放电电流，会导致避雷器损坏，所以该变电站选择接地电阻应不超过 10Ω 。

4 结束语

本文以某 500kV 的变电站为例，将变电站和进线段看作一个整体，以反击为研究重点，利用 ATP-EMTP 建立模型，并进行模拟仿真，得到结论如下。

1) 在进行变电站雷电侵入波模拟仿真时，近区雷击的危害远远大于远区雷击的危害，以变电站进线段雷电反击为研究重点，将变电站及其进线段作为整体进行模拟仿真，这样得到的结果更接近于实际情况。根据仿真模型的建立及分析，变电站在单变单母单线的运行方式下，雷击 #2 杆塔时站内各电气设备遭受的雷电侵入波过电压最为严重。

2) 杆塔的接地电阻值是对设备遭受的过电压影响最大的因素，接地电阻值越大，设备遭受的雷电过电压越高，此变电站的接地电阻值不应超过 10Ω ，在实际变电防护设计中，应尽可能降低杆塔接地电阻值。

参考文献

- [1] 朱明明. 高压电缆舱输电关键参数与通风运营策略研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
- [2] 罗楚楠, 张胜, 黄一威. 考虑后续雷击的高压

架空输电线路雷电过电压研究 [J]. 电瓷避雷器, 2022 (5): 25-30.

- [3] 刘锦峰, 李建明, 马林, 等. 高压线路雷击过电压实例分析 [J]. 电气应用, 2022, 41 (12): 9-13.
- [4] 亓超. 基于 ATP-Draw 的 220kV 户外变电站雷电侵入波计算分析 [D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [5] 陈寰. 基于极性鉴别与暂态特征分布特性的电网过电压识别研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [6] 罗力之. 复杂工况下杆塔接地装置冲击散流特性研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2021.
- [7] 李景丽, 栗超超, 冯鹏. 基于 ATP-EMTP 的某变电站雷击事故仿真研究 [J]. 郑州大学学报 (工学版), 2019, 40 (2): 6-11.
- [8] 刘可真, 束洪春, 于继来, 等. $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电线路雷击暂态识别 [J]. 电网技术, 2013, 37 (11): 3007-3014.
- [9] 陈雅芳. 基于 EMTP 的 35kV 线路架设避雷线提高耐雷水平的研究 [J]. 电工技术, 2023 (1): 155-158.
- [10] 苏明. 某 500kV 变电站雷电侵入波特性及防护研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2011.
- [11] 张豹. 500kV 变电站雷电侵入波过电压的仿真研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- [12] 赵帅. 基于 MCM 和 EMTP 同塔双回输电线路雷电过电压的研究 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2020.

(收稿日期: 2024-05-03)