

# 500 kV 敞开式变电站雷电侵入波分析

刘守豹, 许安, 刘强, 崔涛, 濮峻嵩, 刘小江

(国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

**摘要:** 变电站雷电侵入波防治是电力系统防雷的重要内容, 为了对 500 kV 敞开式变电站雷电侵入波特性进行分析, 根据典型设计规程在电磁暂态计算软件 ATP - EMTP 中建立了计算模型, 通过计算说明了出线间隔避雷器安装的必要性, 分析了不同运行方式对雷电侵入波过电压幅值的影响, 重点研究了单母线单变压器单出线运行方式下绕击和反击雷电侵入波过电压幅值与雷电流大小的关系。分析表明 500 kV 敞开式变电站耐受雷电侵入波的能力薄弱, 在变电站近区出线段应该严格执行相关防雷设计标准, 确保变电站安全。

**关键词:** 侵入波; 避雷器; 电磁暂态; ATP - EMTP

**Abstract:** Protection of lightning intruding surge in substation is an important part in lightning protection of power system. The performance of lightning intruding surge in 500 kV AIS substation is analyzed. The simulation models are established in ATP - EMTP according to the typical design specification, and the necessity of installing lightning arresters in line lateral is described through the calculation of lightning intruding surge with or without lightning arresters. The influence of lightning intruding surge on overvoltage amplitude in different operating modes is analyzed. The relationship between overvoltage amplitude of back - flashover and shield failure lightning intruding surge and lightning current is the emphasis of the study in the operating mode of single - bus single transformer single outlet. The analysis shows that the lightning performance of 500 kV AIS substation is weak, and the lightning protection design standards of incoming lines should be executed seriously in order to protect the safety of substation.

**Key words:** lightning intruding surge; lightning arrester; electromagnetic transient; ATP - EMTP

中图分类号: TM863 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2015)02 - 0022 - 04

DOI: 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.02.006

## 0 引言

变电站是电力系统中变换电压、接受和分配电能、控制电力流向和调整电压的电力设施, 它通过其变压器将各电压等级的电网联系起来。变电站包括了大部分种类的电力系统一次设备, 做好变电站设备抗击外界干扰的能力对于电力系统安全运行具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。

电力系统设备多处于开阔的户外, 在雷电活动频繁的区域由于雷击引起的电力系统故障时有发生。为了防止雷击导致的设备损坏, 变电站采用了相当严苛的防雷标准: 变电站地表下有遍布全站的主接地地网, 即便在土壤电阻率较大的地区下, 也要求将全站主接地网电阻降低到可接受的范围内; 另外, 在变电站内设置了高大的避雷针, 可以对相对较低的其他设备形成有效雷电屏蔽, 因此变电站内设

备受到直击雷危害的可能性极低。但是变电站进线为雷电入侵变电站提供了通道, 尤其是近区(输电线路出变电站 2 km 范围内)雷击形成的雷电侵入波对变电站设备的影响不容忽视<sup>[4-6]</sup>。

下面选取典型 500 kV 敞开式变电站为研究对象, 分析不同情况下变电站近区雷电侵入波对变电站设备的影响, 为变电站雷击故障分析和处理提供了参考。

## 1 仿真模型建立

选取 500 kV 敞开式变电站为分析对象, 变电站为两母线两变压器三出线结构, 变电站接线方式如图 1 所示。

其中出线间隔避雷器型号为 Y10W - 444/1015, 主变压器避雷器型号为 Y10W - 420/960, 母线采用  $\Phi 150/\Phi 136$  mm 铝锰合金管, 一次设备二分裂连接线型号为  $2 \times \text{LGJQT} - 1400/35$ 。架空线杆

塔类型为 ZM3 直线猫头塔, 500 kV 导线型号为  $4 \times \text{LGJ}-400/50$ , 地线型号为  $\text{GJ}-70$ , 绝缘子串为 28 片  $\text{XP}-160$  型绝缘子, 线路档距为 500 m, 杆塔接地电阻为  $10 \Omega$ , 雷电流波形采用  $2.6/50 \mu\text{s}$  单极脉冲波。500 kV 一次设备雷电冲击绝缘水平 1 550 kV, 将绝缘裕度取为 1.15, 则允许的最大侵入波过电压为 1 348 kV。

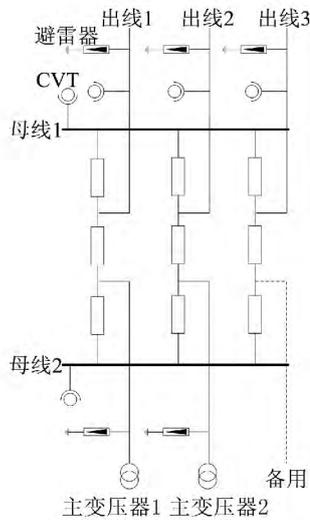


图1 计算模型主接线图

在变电站雷击暂态计算中, 主要设备均等效为电容<sup>[7-9]</sup>, 电容量大小按照 IEEE 标准取值如表 1 所示。

表1 主要设备的等值电容 (pF)

变压器	CVT	TA	套管
5 000	5 000	100	200

在电磁暂态分析中, 对于雷电过电压分析, 变压器通常只需要知道一次侧端子过电压, 不需要考虑过电压在绕组间的传递, 因此只需要将 500 kV 变压器的高压绕组等效为入口电容<sup>[10]</sup>。基于 ATP-EMTP 建立如图 2 所示的仿真模型。

绕击 3 号杆塔的 A 相导线, 在不同的 A 相电压初始相角时最小绕击击穿雷电流幅值如表 2 所示。

表2 3号杆塔的A相导线不同初始相角时最小绕击击穿雷电流幅值

相角/(°)	0	30	60	90	120	150	180
电流/kA	17.6	18.1	19.4	21.2	23.1	24.4	24.9

备注: 由于 1 号杆塔靠近变电站, 其最小绕击击穿雷电流幅值比其他杆塔高(初始相角为  $180^\circ$  时, 最小绕击击穿电流为 31.4 kA)。

为了更严苛反映变电站耐受绕击侵入波的能力, 将 A 相初始相角设置为  $180^\circ$ 。反击雷电流幅值设置为 200 kA(绝缘子串未击穿)和 250 kA(绝缘子

串击穿, 在雷暴日超过 20 天的地区雷电流幅值超过该值的概率是 0.14%)。初始相角设置为  $0^\circ$ 。

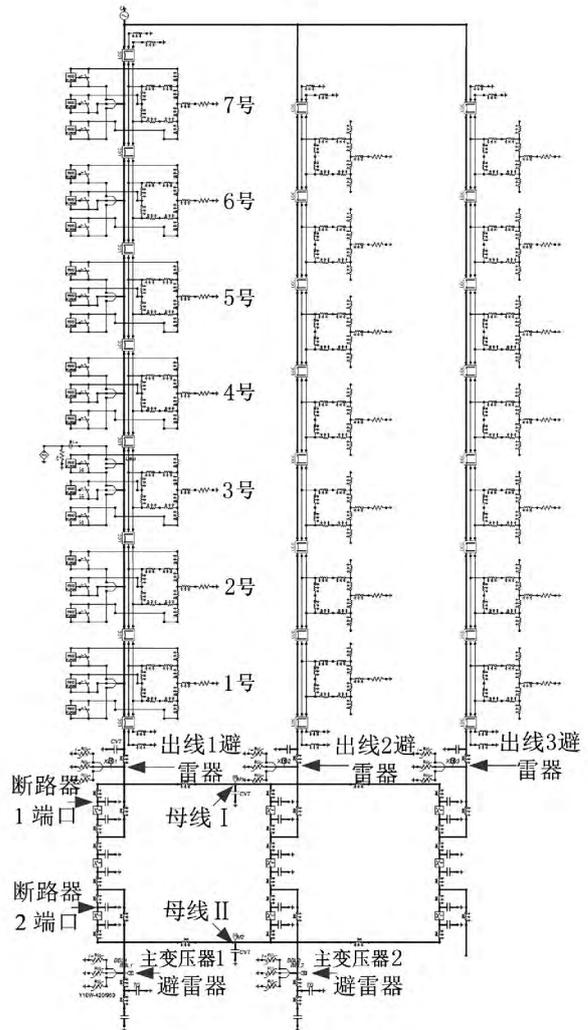


图2 仿真模型及相关电压观测点

## 2 变电站雷电侵入波影响因素分析

对雷电侵入波过电压及避雷器保护动作情况进行分析, 首先对没有出线间隔避雷器情况下线路绕击和反击侵入波过电压幅值进行计算, 其次对不同运行方式下同幅值雷电侵入波造成的过电压进行比较。

### 2.1 无出线间隔避雷器时的侵入波过电压

为了对线路侧安装出线避雷器的必要性进行说明, 取消图 2 中的所有出线避雷器, 使用不同幅值雷电流绕击出线 1 的 3 号杆塔 A 相导线, 得到双母线双变压器三出线运行方式下的侵入波过电压幅值如表 3 所示。

对于雷电反击, 如果要形成大的雷电侵入波过电压, 需要将绝缘子串击穿, 使雷电流通过绝缘子串

表3 双母线双变压器三出线运行方式下无出线避雷器时的绕击侵入波过电压幅值 (kV)

雷电流幅值 /kA	出线2 A相 CVT	出线2 A相 CVT	出线3 A相 CVT	母线1 A相	母线2 A相	主变压器1 A相避雷器	主变压器2 A相避雷器
15	925	781	771	800	763	875	830
20	1 370	945	933	961	917	920	917
24	1 725	1 052	1 009	1 073	1 089	932	934
30	2 259	884	890	931	977	939	943

表4 双母线双变压器三出线运行方式下无出线避雷器时的反击侵入波过电压幅值 (kV)

雷电流幅值 /kA	出线1 C相 CVT	出线2 C相 CVT	出线3 C相 CVT	母线1 C相	母线2 C相	主变压器1 A相避雷器	主变压器2 A相避雷器
250	2 309	955	1 005	993	1 085	935	921

表5 不同运行方式下3号杆塔绕击在不同一次设备上产生的侵入波幅值 (kV)

运行方式	出线1 A相避雷器	出线2 A相避雷器	出线3 A相避雷器	母线1 A相	母线2 A相	主变压器1 A相避雷器	主变压器2 A相避雷器
双母线双变压器三出线	1 125	735	743	762	757	903	909
单母线双变压器三出线	1 125	658	705	813	—	904	766
单母线单变压器三出线	1 125	680	687	834	—	914	—
双母线双变压器两出线	1 125	838	—	765	848	886	913
单母线双变压器两出线	1 125	775	—	802	—	901	758
单母线单变压器两出线	1 125	821	—	911	—	917	—
双母线双变压器单出线	1 125	—	—	1 038	974	936	913
单母线双变压器单出线	1 125	—	—	973	—	931	922
单母线单变压器单出线	1 125	—	—	1 222	—	937	—

进入导线进而侵入变电站。250 kA 雷电流反击3号杆塔时,出现的过电压幅值如表4所示。

从表3和4可以看出,在没有安装出线间隔避雷器的情况下,即使幅值一般的雷电绕击也能在出线侧产生很高的过电压,使一次设备受损;大幅值雷电流反击造成绝缘子串击穿产生的侵入波过电压也将导致出线侧出线高幅值侵入波过电压。因此在变电站出线处安装出线避雷器对于保护变电站内一次设备非常必要。

## 2.2 不同运行方式下的侵入波过电压

安装出线间隔避雷器情况下,使用50 kA雷电流绕击出线1的3号杆塔A相导线,在不同运行方式下不同位置的侵入波幅值情况如表5所示。

从表5可以看出,由于出线1入口处的侵入波过电压取决于线路侧传递的雷电能量,而运行方式对该能量基本没有影响,使得出线1避雷器处侵入波过电压在不同运行方式下保持不变。但侵入波引起站内其他一次设备的过电压与变电站运行方式有较大关系,一般来说运行一次设备越少,侵入波引起的过电压越高。

单母线单变压器单出线情况下,母线过电压幅值

达1 222 kV,主变压器侧过电压幅值达937 kV,是9种运行方式下过电压最严重的,在下面的分析中将着重对这种运行方式下的雷电侵入波过电压进行分析。

## 3 单母线单变压器单出线运行方式下侵入波分析

### 3.1 绕击侵入波过电压

为了对不同绕击点和绕击雷电流情况下侵入波的幅值进行分析,绕击杆塔选取1号和4号杆塔的A相导线为绕击点,得到绕击侵入波幅值如表6和表7所示。

从表6和表7可知:同样绕击电流下,绕击点越远离变电站则其造成的侵入波过电压幅值越小;同一绕击位置,不同绕击雷电流下,并非雷电流幅值越大,侵入波造成的过电压越大,大雷电流如果引起绝缘子串击穿,则其并不一定比小幅值未造成绝缘子串击穿的雷电流造成更大的侵入波过电压。

由于出线避雷器和主变压器避雷器的动作,其所在区域的侵入波过电压得到了较好的限制,但母线和断路器所在支路未安装避雷器,故其过电压幅

值超标。这种敞开式变电站在带电运行设备较少的情况下,一旦发生近区落雷绕击杆塔,即便是小幅值雷电流也可能造成一次设备击穿。

表6 单母线单变压器单出线运行方式下绕击1号杆塔侵入波过电压幅值 (kV)

雷电流幅值/kA	位置			
	母线 I CVT A 相	断路器 1 A 相端口	断路器 2 A 相端口	主变压器 1 A 相
10(未击穿)	1 231	1 183	1 132	1 005
15(未击穿)	1 472	1 333	1 306	1 110
20(未击穿)	1 575	1 394	1 318	1 158
30(未击穿)	1 647	1 532	1 476	1 220
40(击穿)	1 305	1 591	1 543	1 029
50(击穿)	1 411	2 107	1 809	1 109

表7 单母线单变压器单出线运行方式下绕击4号杆塔侵入波过电压幅值 (kV)

雷电流幅值/kA	位置			
	母线 I CVT A 相	断路器 1 A 相端口	断路器 2 A 相端口	主变压器 1 A 相
10(未击穿)	1 211	1 160	1 104	977
15(未击穿)	1 395	1 280	1 249	1 102
20(未击穿)	1 487	1 354	1 276	1 151
30(击穿)	1 462	1 305	1 290	1 214
40(击穿)	962	1 202	1 097	1 077
50(击穿)	1 157	1 445	1 560	1 049

### 3.2 反击侵入波过电压

雷电流反击时如果未造成绝缘子串击穿,则雷电流通过杆塔和地线入地,不会形成侵入波过电压。

使用 250 kA 雷电流分别对 1 号和 4 号杆塔进行反击,产生的侵入波过电压如表 8 所示。

表8 250 kA 雷电流反击产生的侵入波过电压 (kV)

反击杆塔	位置			
	母线 I CVT C 相	断路器 1 C 相端口	断路器 2 C 相端口	主变压器 1 C 相
1 号	1 407	1 749	1 592	1 125
4 号	1 233	1 506	1 306	1 160

大雷电流反击造成绝缘子串击穿,部分雷电流将进入导线并侵入变电站,其原理与雷电流直接绕击导线类似,进而产生较大的侵入波过电压。

## 4 采用母线安装避雷器的改进措施

通过第 3 节的分析可知,在单母线单变压器单出线运行方式下由于母线未配置避雷器,在小幅值雷电流绕击和大幅值雷电流反击下,侵入波在站内产生的过电压超过允许值。为此,采用在母线安装避雷器方式进行限制,在母线 I 安装 Y10W - 420/

960 型站用避雷器,对该改进情况下变电站的侵入波耐受能力进行分析。

### 4.1 雷电流绕击侵入波耐受能力分析

采用不同幅值雷电流对 1 号和 4 号杆塔 A 相导线进行绕击,得到不同一次设备处过电压幅值如表 9 和表 10 所示。

表9 不同幅值雷电流绕击1号杆塔A相产生的侵入波过电压 (kV)

雷电流幅值/kA	位置			
	母线 I CVT A 相	断路器 1 A 相端口	断路器 2 A 相端口	主变压器 1 A 相
20(未击穿)	943	1 061	1 073	1 157
31(未击穿)	951	1 205	1 240	1 224
32(击穿)	945	1 389	1 370	1 229
40(击穿)	931	1 468	1 515	1 027
50(击穿)	941	1 895	1 721	1 115

表10 不同幅值雷电流绕击4号杆塔A相产生的侵入波过电压 (kV)

雷电流幅值/kA	位置			
	母线 I CVT A 相	断路器 1 A 相端口	断路器 2 A 相端口	主变压器 1 A 相
20(未击穿)	941	1 045	1 052	1 150
24(未击穿)	945	1 099	1 084	1 178
25(击穿)	942	1 215	1 289	1 184
30(击穿)	931	1 058	1 113	1 212
40(击穿)	896	1 227	1 059	1 074
50(击穿)	921	1 360	1 472	1 026

通过表 9 和表 10 可知,对于绕击侵入波而言,大幅值雷电流导致的过电压在避雷器保护范围以外的区域仍然超出了允许范围,实际工程中也不可能通过不断增加站内避雷器的方式进行侵入波限制。

### 4.2 雷电流反击侵入波耐受能力分析

在 1 号和 4 号杆塔分别受 250 kA 雷电流反击情况下,侵入波过电压幅值如表 11 和 12 所示。

表11 不同幅值雷电流反击1号杆塔产生的侵入波过电压 (kV)

雷电流幅值/kA	母线 I CVT C 相	断路器 1 C 相端口	断路器 2 C 相端口	主变压器 1 C 相
200(未击穿)	467	544	525	476
250(击穿)	942	1 571	1 437	1 125

表12 不同幅值雷电流反击4号杆塔产生的侵入波过电压 (kV)

雷电流幅值/kA	母线 I CVT C 相	断路器 1 C 相端口	断路器 2 C 相端口	主变压器 1 C 相
200(未击穿)	470	548	498	467
250(击穿)	929	1 334	1 223	1 160

(下转第 62 页)

测报警终端对安装位置最低的端子箱进行实时水位监测。同时 在监控终端增加一个激光测距模块解决了不同端子箱中排线最低位置不同造成的报警水位不同的问题。采用 ZigBee 技术将水位信息实时传输到远方监控中心,有效保护灾害期电网安全。

参考文献

[1] 任秀丽. ZigBee 无线通信协议实现技术的研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(6): 143-145.

[2] 丁国兴,高琴. ZigBee 无线传感器网络的端子箱环境监测系统[J]. 现代建筑电气, 2013, 4(9): 45-51.

[3] 安全,范瑞琪. 常用水位传感器的比较和选择[J]. 水利信息化, 2014(3): 52-54 60.

[4] 刘亮,邓世建,胡媛媛. 给排水系统中水位检测技术的研究[J]. 工矿自动化, 2011, 37(12): 21-24.

[5] 张光昭,洪添胜,刘志壮,等. 一种压力式液位仪的设计[J]. 微计算机信息, 2007, 23(10): 207-208 41.

[6] 常凤筠,崔旭东. 基于激光测距传感器的铁轨测距系统[J]. 应用激光, 2005, 25(6): 374-376.

[7] 章伟聪,俞新武,李忠诚. 基于 CC2530 和 ZigBee 协议栈设计无线网络传感器节点[J]. 计算机系统应用, 2011, 20(7): 184-187.

[8] 李俊斌,胡永忠. 基于 CC2530 的 ZigBee 通信网络的应用设计[J]. 电子设计工程, 2011, 19(16): 108-111.

作者简介:

林天佑(1984) 主要研究方向为电力系统自动化等;  
 叶旭灿(1986) 主要研究方向为电力系统检修及运行等;  
 黄建波(1982) 主要研究方向为电力系统检修及运行等;  
 章伟伟(1991) 硕士研究生,主要研究方向为微网通信等。  
 (收稿日期:2014-11-14)



(上接第25页)

从表 11 和表 12 可知,在雷电流反击近区杆塔时,一旦发生反击击穿,就会产生较高的雷电侵入波过电压,即使装配了母线避雷器,也会对一次设备主绝缘造成破坏。

5 结 论

基于上述 500 kV 敞开式变电站雷电侵入波过电压分析,得出结论如下:①出线避雷器是防治雷电侵入波的第一道屏障,对于保障站内设备具有重要作用,必须按规程配置并保证其正常运行;②变电站运行方式对雷电侵入过电压幅值有较大影响,一般而言,运行一次设备越少侵入波过电压幅值越大;③在单母线单变压器单出线运行方式下,敞开式变电站承受雷电侵入过电压的能力较弱,尤其是在 1 号杆塔遭受雷电绕击和反击并造成绝缘子串击穿的情况下;④为防止变电站近区落雷造成的雷电侵入波过电压,变电站近区线路在设计和施工上应该严格执行设计和施工标准,尽量采用地线负保护角设计,不宜使用高塔和大跨越,避免近区杆塔位于大坡度山腰和山顶,切实降低杆塔接地电阻;⑤对于因实际条件限制无法将最大绕击侵入电流和反击击穿电流限制在合理范围内的变电站,或者结构简单运行设备较少的变电站,应该在母线配置站用避雷器进行雷击侵入波防治。

参考文献

[1] 袁兆祥,周洪伟. 500 kV HGIS 变电站雷电侵入波的计算分析[J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 71-76.

[2] 朱传华,刘念,田冰冰,等. 基于 Bergeron 模型的 500 kV 变电站雷击过电压计算[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(12): 66-69.

[3] 孔繁钦,徐鹏. 雷电侵入波对变电站设备的影响及防范措施[J]. 华中电力, 2011, 24(6): 64-68.

[4] 万磊,宋倩,徐晓娜,等. 特高压 GIS 变电站母线不装避雷器可行性研究[J]. 高电压技术, 2012, 38(12): 3331-3337.

[5] 赵晨惠,褚炳上. 变电站快速暂态过电压的分析[J]. 广东电力, 2011, 24(4): 1-5.

[6] 李东坡,张明理. 氧化锌避雷器在 500 kV GIS 变电站中的防雷作用[J]. 东北电力技术, 2013, (2): 19-22.

[7] 高飞,陈维江,刘之方,等. 1 000 kV 交流输电系统串补站的雷电侵入波保护[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2199-2205.

[8] 陈水明,王威,于化鹏,等. 计及工频电压的特高压变电站雷电侵入波过电压分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(8): 1852-1857.

[9] 韩永霞,卢毓欣,陈辉祥,等. ±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.

[10] 吴文辉,曹祥麟. 电力系统电磁暂态计算与 EMTP 应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.

作者简介:

刘守豹(1983),博士,工程师,从事过电压及工程电磁场计算方面的工作。  
 (收稿日期:2014-10-14)