

一起雷击 220 kV 线路引起开关设备故障的计算分析

陶荣明¹, 陈梁金², 高媛³, 施围³(1. 上海华东电网有限公司, 上海 200002; 2. 浙江省电力试验研究院, 浙江 杭州 310014;
3. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 近几年华东地区 220 kV 及以下电压等级的变电站和电厂发生了多起与雷击相关的开关闪络和爆炸事件, 2007 年 7 月发生了一起某 220 kV 线路遭雷击造成一侧变电所开关闪络和另一侧变电所 CT 击穿故障。笔者结合实际运行情况, 利用电磁暂态程序 EMTP 对此故障进行了雷电侵入波过电压模拟计算, 根据计算结果对故障发生原因进行了分析和研究, 提出了在 220 kV 线路进线保护段末端装设避雷器来限制雷电侵入波过电压的防范措施。

关键词: 开关; 闪络; 击穿; 雷电侵入波; 过电压

中图分类号: TM86

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)05-0428-04

Calculation and Analysis of a Switchgear Fault Caused by Lightning Strike on 220 kV Transmission Lines

TAO Rong-ming¹, CHEN Liang-jin², GAO Yuan³, SHI Wei³

(1. East China Electric Power Dispatch Center, Shanghai 200002, China; 2. Zhejiang Electric Power Test and Research Institute, Hangzhou 310014, China; 3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Flashovers or even explosions of switchgears fixed on substations and power plant at the voltage rank of 220 kV or below, which were caused by lightning intrusive waves, have taken place frequently in east China in recent years. In July 2007, this kind of event occurred because of lightning strike on the 220 kV transmission line, which generated the circuit breaker flashover and current transformer dielectric breakdown. This paper simulates the accident considering the running condition, and obtains the lightning over-voltages by the software EMTP. According to the over-voltage values, the reasons of the accident are analysed, and some protection methods from over-voltage due to lightning intrusive wave are presented by installing MOAs at both ends of the 220 kV transmission lines.

Key words: circuit breaker; flashover; breakdown; lightning intrusive wave; over-voltage

0 引言

据统计^[1],在我国高压输电线路运行的总跳闸事故中,由雷击引起的跳闸事故占 40%~70%,尤其是在多雷、土壤电阻率高、地形复杂的地区,雷击输电线路引起的跳闸率更高。从国外的实际运行来看^[2-4],雷击仍然是输电线路安全可靠运行的主要危害。目前世界范围内由于雷电波侵入变电站而引起开关设备闪络甚至爆炸的事件接连发生,我国华南和华东地区的变电站及电厂也发生了数次由于雷击引起的开关闪络和爆炸事件。笔者研究的由雷击某 220 kV 线路造成一侧变电所开关闪络和另一侧变电所 CT 击穿故障事件便是其中一个典型事例。

此次雷击事件的简要经过如下:某 220 kV 线路连接变电所甲和变电所乙,全线长约 23 km,示意图见图 1。线路遭受雷击造成 A 相接地故障,线路两侧双高频保护快速动作切除故障,两侧 A 相开关跳开。由图 2 的故障录波图可知,线路在 A 相开关跳开 160 ms 后再次受雷击,变电所甲 A 相开关在断开状态下发生外绝缘闪络而使雷电侵入波传到变电站内,但站内 220 kV 母线避雷器和 1 号主变压器、2 号主变压器避雷器未有动作记录。变电所甲侧后加速保护再次动作,300 ms 时刻开关三跳,但由于 A 相故障电流继续存在,保护启动母差失灵保护,经 240 ms 延时母联开关跳闸(460 ms 时刻);线路的另一侧变电所乙遭受第 2 次雷击时,A 相 CT 发生爆炸。整个雷击故障持续约 530 ms。

收稿日期:2008-01-31; 修回日期:2008-07-19

作者简介:陶荣明(1966-),男,高级工程师,从事电网调度运行工作。

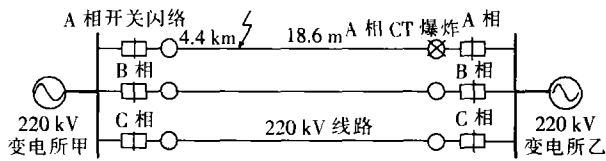


图1 雷击线路故障示意图

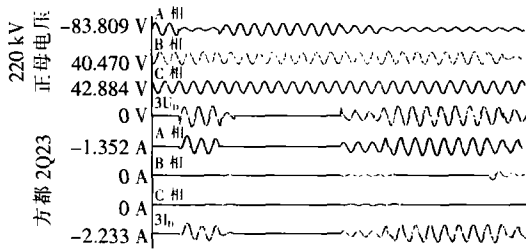


图2 雷击故障故障录波图

该次故障中第1次雷击线路时，线路两侧开关跳开。在自动重合闸(重合闸投入时间为1100 ms)没有投入之前，线路遭受第2次雷击。由于线路两侧末端开路，雷电波传到线路的末端产生反射而使雷电过电压变为原来的两倍。笔者根据实际运行情况进行了雷电侵入波过电压计算，根据计算结果，对故障发生原因进行了分析。

另一方面，使用性能优越的氧化锌避雷器来限制雷电过电压是比较有效的措施之一^[5,6]。而目前国内220 kV线路两侧一般不安装避雷器，文中的故障线路也是如此。假设在线路末端安装有MOA，笔者对开关设备能否得到有效保护、此类由雷击引起的开关故障是否可以避免发生进行了计算分析和研究。

1 雷电侵入波的模拟及系统模型的建立

由于雷击线路概率较大，因此雷电侵入波是造成变电所雷害事故的主要原因。要较准确地计算出变电站内设备如变压器、断路器等上的雷电过电压值，使其更加接近实际值，雷电侵入波的模拟是关键。由于实际雷击故障主要发生在A相，因而雷电侵入波过电压计算中，仅模拟了A相。在线路遭受

第2次雷击时，变电所甲侧开关因雨量较大和污秽度较高等因素造成外绝缘湿闪，使得雷电波侵入站内。因开关的外绝缘闪络过程较为复杂，不确定因素较多，并且其对侵入变电站内雷电波的陡度和幅值影响不大，因此在雷电过电压计算中，不模拟开关的外绝缘闪络过程，即认为线路在遭受第2次雷击时开关是合闸状态。

1.1 雷电侵入波的模拟及计算条件

输电线路发生雷击有两种方式：反击和绕击。但不管哪种雷击类型，最终雷电侵入波要沿导线才能够传到变电所内，其最大幅值不超过线路绝缘子串闪络电压 $U_{50\%}$ 。考虑到该次雷击故障中雷击类型不明，同时为了偏严考虑，仅计算绕击这种雷击方式。

雷电流的波形取2.6/50 μ s的斜角平顶波。雷电通道波阻抗是个很不确定的量，不同文献给出了不同的计算值。文[7]认为，绕击时雷电通道波阻抗在300~400 Ω ，因而取绕击时的雷电通道波阻抗值为300 Ω 。

按照文[7]，220 kV电压等级杆塔绝缘50%冲击放电电压(正极性)取为1200 kV。对地的雷电放电中，90%概率是由对地负极性云团发生，并且根据雷电定位系统查询结果来看，与变电所甲雷击事件相关的线路落雷均为负极性，于是计算中取雷电流幅值为负极性。由此，需要对正极性下的绝缘子串闪络电压 $U_{50\%}$ 进行修正，通常220 kV电压等级修正系数在1.05左右，笔者取其值为1.05。取220 kV输电线路波阻抗为360 Ω ，计算可得绕击耐雷水平为11.2 kA。

根据巡线、保护故障测距以及雷电定位系统查询结果，该次故障雷击点距离变电所甲约4.4 km处。为了模拟真实故障，在雷电侵入波过电压计算中，取此处为雷击点位置。

1.2 系统模型的建立

为了尽可能模拟真实雷击故障，在雷击侵入波计算中，采用实际运行方式进行计算，系统模型见图3。

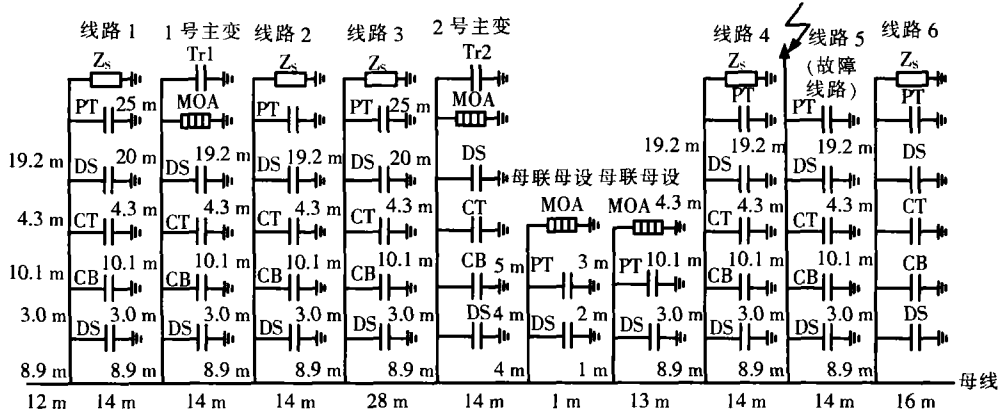


图3 220 kV变电站甲雷电侵入波计算模型

1.3 雷电侵入波计算中设备参数的选取

在计算雷电侵入波过电压时,管道母线用分布参数来模拟,其波阻抗取为 300Ω ,波速为 $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。而变压器、断路器、隔离开关等设备均采用该设备的入口电容(对地等值电容)来模拟,其数值见表 1。

表 1 220 kV 变电所甲站内设备符号及入口电容值(等值电容)

设备名称	符号	电容值/pF
变压器	Tr	2 500
断路器(合/分)	CB	210/105
隔离开关(合/分)	DS	100/50
线路压变	PT	5 000
电流互感器	CT	930

变电所甲母线避雷器以及 1、2 主变压器避雷器型号均为 Y10W1-200/500,取其伏安特性见表 2。

表 2 MOA 的伏安特性

I	$U_n/\text{kV}(200)$	I	$U_n/\text{kV}(200)$
1 mA	290	1 kA	455
125 A	435	5 kA	485
250 A	438	10 kA	520
500 A	442	20 kA	558

2 雷电侵入波过电压计算及雷击故障原因分析

选取不同的绕击雷电流幅值,计算得到变电所甲和变电所乙设备上雷电过电压计算结果见表 3。

表 3 220 kV 变电所甲和变电所乙站内设备上的最大雷电过电压 kV

雷电流/kA	变电所甲 1 号主变压器	变电所甲 2 号主变压器	变电所甲线 路首端开关	变电所甲线 路首端 PT	变电所乙 侧线路 CT
4.72	226.7	226.7	225.1	229.0	1 050.0
6.48	312.5	312.7	312.6	315.8	1 455.0
6.95	335.2	335.4	333.0	338.7	1 563.7
7.40	356.9	357.0	354.5	360.6	1 665.0
7.83	377.4	377.4	374.8	381.2	1 761.3
8.31	399.7	399.1	396.9	403.7	1 869.7
8.81	420.2	417.3	416.7	423.7	1 982.2

根据故障 CT 的出厂数据及相关标准^[8],其相对地额定雷电冲击耐受电压(峰值)为 1 050 kV。根据表 3,当 CT 上雷电过电压最大值为 1 050 kV 时,对应雷电流幅值为 4.72 kA。可见,如果雷电流幅值大于 4.72 kA,变电所乙侧 CT 上的雷电过电压值已超过额定雷电冲击耐受电压(峰值)1 050 kV,在正常情况下 CT 也有可能发生故障甚至爆炸。如果雷电

流幅值小于 4.72 kA,正常情况下变电所乙线路 CT 不应该发生故障,此时 CT 发生爆炸是由其自身的绝缘问题引起。

220 kV 断路器在现场一般为垂直安装,其接线方式有两种:一种是断路器下出线端接电源侧(母线侧)、上出线端接线路;另一种是断路器下出线端接线路、上出线端接电源侧(母线侧)。变电所甲和变电所乙的出线断路器的接线方式属于前一种。因而在方式二下,当线路上有雷电波侵入时,断路器断口绝缘相对上出线端对地绝缘要弱。

根据断路器的出厂数据,其断口间额定雷电冲击耐受电压(峰值)为 1 250 kV。因而开关在断开状态下,随着断口另一侧系统电压的变化,断路器上出线端能够承受的额定雷电冲击耐受电压最大和最小值分别为 $(1\ 250+252 \times \sqrt{2}/\sqrt{3}) \text{ kV}$ 和 $(1\ 250-252 \times \sqrt{2}/\sqrt{3}) \text{ kV}$,即断路器上出线端额定雷电冲击耐受电压值在 1 045~1 455 kV。可见,在断路器断开状态下,断路器上出线端额定雷电冲击耐受绝缘水平要比 CT 高,这可能是该次雷击故障中变电所甲侧 CT 发生击穿而与其相邻的断路器却正常的原因之一。另一方面,当变电所甲侧断路器上出线端电压为 1 455 kV 时,雷电流幅值为 6.48 kA。结合上述分析可以得出,如果不计断路器绝缘水平的安全裕度,该次故障中雷电流幅值要小于 6.48 kA,否则变电所甲侧断路器断口将被击穿。

3 避雷防护效果研究

目前国内大部分 220 kV 输电线路进线段末端并没有安装避雷器,文中的故障线路也是如此。在这种情况下,当线路上遭受雷击时,雷电过电压直接作用于处于断开状态的开关上,从而使开关发生闪络甚至爆炸。如果在进线段末端安装有避雷器,避雷器能否有效地保护开关,笔者对此进行了研究。

结合故障实际情况,研究中选择落雷点在离变电所甲 4.4 km 处,雷电侵入波幅值偏严取绕击耐雷水平 11.2 kA。假设变电所甲和变电所乙线路开关均处于断开状态(热备用状态),考虑到雷击点离变电所甲较近,由于雷电波在长线路上的幅值衰减及波头陡度变缓等原因,使得变电所乙开关侧过电压情况要比变电所甲侧开关好很多,因而仅研究变电所甲侧开关的雷电过电压情况。考虑进线保护段末端不装设避雷器和装设避雷器两种情形,分别计算处于断开状态的开关在线路遭受雷击时的最大雷电过电压值。另有研究结果表明,此方式下电晕对开关侧雷电过电

压幅值影响不大^[9],计算时不考虑电晕影响。

3.1 进线段末端不装设避雷器方式

进线保护段末端不装设避雷器时的系统等效图见图4。

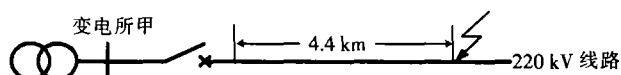


图4 进线保护段末端不装设避雷器的等效计算模型

计算得到变电所甲出线开关侧的最大雷电过电压值见表4。

表4 变电所甲出线开关上的最大雷电过电压

取值名称	最大雷电过电压值/kV
出线开关侧最大过电压(相对地)	2 667.0
出线开关侧最大过电压(断口间)	2 872.5

由表4可以看出,若开关不加避雷器保护,线路遭受雷击时,开关相对地雷电过电压值将高于2 600 kV,如果考虑开关侧瞬时系统电压为反相最大峰值205.7 kV,那开关断口间电压将超过2 800 kV。参考文[10, 11]的标准,可见开关将被击穿。

3.2 进线段末端装设避雷器方式

进线保护段末端装设避雷器的系统等效图见图5。

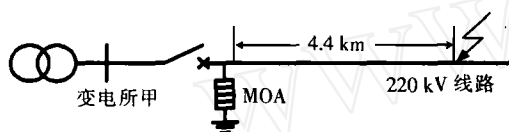


图5 进线保护段末端装设避雷器等效计算模型

计算得到变电所甲出线开关侧最大雷电过电压值见表5。

表5 出线开关上的最大雷电过电压

取值名称	最大雷电过电压值/kV
出线开关侧最大过电压(相对地)	583.3
出线开关侧最大过电压(断口间)	789.0

计算得到流过MOA的最大电流及其比能量见表6。

表6 进线段末端MOA流过的最大电流及比能量

取值名称	计算结果
流过MOA的最大电流/kA	8.1
MOA吸收的能量W/kJ	223.7
比能量W'/(kJ·kV ⁻¹)	1.1

由表5可见,在进线保护段末端装设MOA后,

开关上的最大雷电过电压明显降低,过电压最大值由原来的2 667.0 kV降低到583.3 kV,这个电压值对220 kV开关绝缘来说完全可以耐受,从而使装在进线段末端的MOA有效保护了处于断开状态下的开关不被雷电侵入波击穿损坏。

另一方面,由表6可知,流过MOA的最大雷电流为8.1 kA,吸收的最大能量为223.7 kJ,此时比能量值为1.1 kJ/kV。根据厂家提供的参数,220 kV避雷器比能量值在7.0 kJ/kV左右,并且避雷器可以承受10 kA的电流。因而MOA既有效地保护了开关,并且自身可以正常运行。

4 结语

结合实际情况,并考虑其它运行方式,对某220 kV线路遭雷击造成变电所甲开关闪络和变电所乙CT击穿的故障进行了模拟计算,得到了不同雷电流幅值下设备上的最大雷电过电压值。根据计算结果,对该次故障发生的原因进行了深入的分析。

为了避免连续雷击对开关设备的损坏,提出了在进线段末端装设避雷器的防护措施,并将此措施应用到该次雷击故障中,验证了避雷器对开关设备的保护效果。

参考文献:

- [1] 陈继东, 吴伯华. 线路型500 kV避雷器保护范围的研究[J]. 电磁避雷器, 2002(5): 33-38.
- [2] IEEE Working Group on Estimating Performance of Transmission Lines. A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines [J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and System. 1985, 104(4): 919-932.
- [3] 维列厦金, 吴维韩. 俄罗斯超高压和特高压输电线路防雷运行经验分析[J]. 高电压技术, 1998(2): 76-79.
- [4] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 武汉水利电力出版社, 1997.
- [5] 关根志. 高电压工程基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [6] 邱毓昌, 施围, 张文元. 高电压工程[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.
- [7] DL/T 620. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S]. 1997.
- [8] GB 1208. 电流互感器[S]. 1997.
- [9] 陈梁金, 杜斌, 施围, 等. 计及雷击电晕时750 kV进线开关触头间暂态过电压的研究[J]. 高压电器, 2004, 40(3): 167-169.
- [10] DL/T 593. 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求[S]. 2006.
- [11] GB/T 11022. 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求[S]. 1999.

欢迎浏览中国高压电器网(www.chinahva.com)