第 18 卷　第 34 期　2018 年 12 月
1671—1815(2018)034-0183-08

科　学　技　术　与　工　程
Science Technology and Engineering

Vol. 18　No. 34　Dec. 2018
ⓒ　2018　Sci. Tech. Engrg.

引用格式:段　昊, 要静武, 刘贺龙, 等. ±800 kV 特高压换流站直流场雷电过电压仿真研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(34): 183—190
Duan Hao, Yao Jingwu, Liu Helong, et al. Simulation study of lightning overvoltage in direct current field of ±800 kV ultra high voltage converter station[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(34): 183—190

±800 kV 特高压换流站直流场雷电过电压仿真研究

段　昊[1]　要静武[2]　刘贺龙[3]　孙森浩[3]

(国家电网公司[1],北京 100031;国家电网公司运行分公司郑州管理处[2],郑州 450000;
华北电力大学河北省输变电设备安全防御重点实验室[3],保定 071003)

摘　要　针对某 ±800 kV 特高压换流站直流分压器在雷电天气下发生空气间隙或沿面闪络故障,为分析其故障原因,采用电磁暂态仿真程序计算了换流场避雷线布置方案下雷电绕过避雷线直击直流分压器的直击雷过电压和换流站雷电侵入波过电压,验证分析了其绝缘配合,提出了进一步需要研究的问题和防治措施建议。

关键词　特高压换流站　　直流场　　雷电过电压　　仿真

中图法分类号　TM863;　　**文献标志码**　A

为解决中国电力负荷与电源分布极不均衡的问题和助力构建全球能源互联网,中国大力发展特高压输电工程[1—3]。截至 2017 年底,国家电网公司“八交十直”特高压交直流工程全面建成,在建“三交一直”特高压工程。目前,国家电网公司“特高压第 23 条”蒙西-晋中特高压交流工程也已获国家发改委正式核准,标志着华北特高压交流主网架构建形成[4]。特高压直流输电在大容量、远距离方面的优势是交流输电不可替代的,在特高压输电工程中的地位举足轻重[5—7]。换流站是直流输电的核心枢纽,交直流在这里完成变换。若换流站内重要设备遭受雷击损坏,特高压直流输电系统的安全运行将直接受到影响,雷电过电压对换流站设备的绝缘水平影响较大,因此仿真研究换流站雷电过电压有重要意义[8—11]。

2016 年 6 月 14 日某 ±800 kV 特高压换流站直流分压器在雷电天气下发生空气间隙或沿面闪络故障,为分析其故障原因,本文采用 ATP-EMTP 程序进行直流场的雷电侵入波和直击雷过电压的仿真计算研究,计算换流站雷电侵入波过电压和换流场避雷线布置方案下雷电绕过避雷线直击直流分压器的直击雷过电压,分析直流极线进线段雷电性能和换流站避雷线防雷布置的防雷效果,以期提出进一步需要研究的问题和防治措施建议。

2018 年 6 月 18 日收到　　中央高校科研业务费(2017MS92)和国家重点研发计划(2016YFB0900802)资助

第一作者简介:段　昊(1983—),高级工程师。研究方向:特高压直流输电技术。E-mail:qln201030@163.com。

1　仿真模型和基本参数

在 ATP-EMTP 程序上详细模拟了直流场各设备及其连线的雷电高频特性模型。计算中根据具体的雷击条件,将雷电流直接作用于雷击点,将输电线路,包括铁塔,避雷线在内,连同变电站内部的线路、母线、连接线和电气设备作为一个网络整体来考虑,更符合现场的实际情况。

1.1　雷电计算模型

1.1.1　换流站直流场避雷器配置及参数

该换流站为受端换流站,直流场部分主要包括直流场 ±800 kV 极线、中性母线、阀厅和直流滤波器四部分。直流场部分各安装点避雷器配置如图 1 所示。

各种类型避雷器的参数和保护水平如表 1 所示,表 1 中 CCOV 和 U_{ref} 分别为避雷器的峰值持续运行电压和额定电压,LIPL 和 SIPL 分别为避雷器的雷电冲击保护水平和操作冲击保护水平。

表 1　避雷器参数和保护水平

Table 1　Parameters and protective levels for arresters

避雷器	CCOV/kV	U_{ref}/kV	LIPL/(kV·kA^{-1})	SIPL/(kV·kA^{-1})	柱数
DB1	814	929	1 621/20	1 371/1	3
DB2	814	929	1 621/20	1 371/1	3
E	20	209	325/5	–	2
EL	20	192	301/10	274/2.5	4
EM	20	209	346/20	321/5	2
DR	34	383	800/0.5	–	1

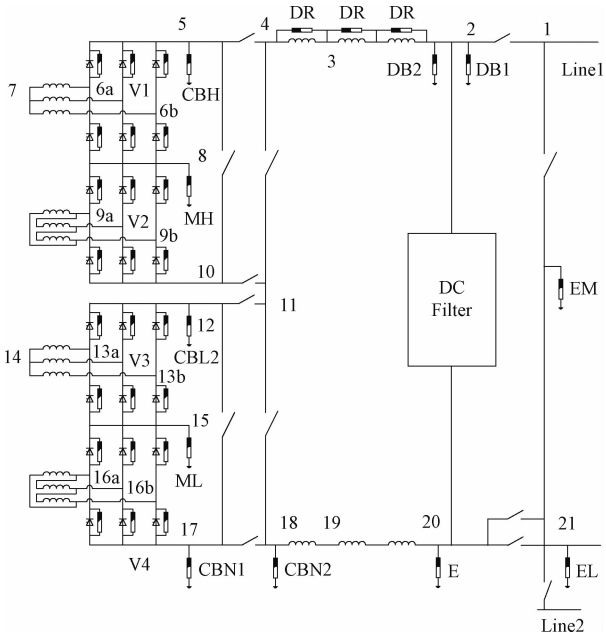

图 1 换流站直流场部分避雷器配置图

Fig. 1 Arrester scheme of the direct current field in converter station

1.1.2 *直流场和阀厅设备入口电容*

计算中,换流站直流场和阀厅设备如换流变、隔离刀闸、电流互感器等均采用该设备的入口电容,平波电抗器和直流滤波器采用雷电等值模型,各设备的符号意义见表 2。其中,平波电抗器雷电模型考虑了平波电抗器两端等值电容和绝缘支柱对地电容。该换流站直流滤波器分为两组,一组为 HP12/24,用于 12 次和 24 次谐波滤波,另一组为 HP2/39,用于抑制直流线路二次谐波谐振。直流滤波器模型中考虑了 HP12/24 两座电容器塔中各串联电容之间的连线电感和滤波器低压设备连线电感和对地电容。

1.1.3 *直流系统运行方式*

根据故障分析报告,雷电故障时,故障极 I 运行在直流 +800 kV 双阀组、极 Ⅱ 高端阀组大地回线运行,双极输送功率 3 200 M,极 Ⅱ 低端阀组在检修状态。

表 2 设备代号和其入口电容

Table 2 The equipments' code name and its entrance capacitance

设备名称	电容值/pF
换流变 T	3 000
电阻电容分压器 CVT	5 000
穿墙套管 BG	120
故障测距 LG	200
平波电抗器 PK	500
支柱绝缘 PS	120
隔离刀闸 DS	120
避雷器 LA	–
平波电抗器 SR	雷电模型
直流滤波器 FL	雷电模型
换流阀 Valve	雷电模型

1.2 雷电参数的模拟

根据标准《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》(GB/T 50064—2014),该换流站所在地区雷电流幅值概率曲线可表示为[12]

$$\lg P = -\frac{I}{88} \tag{1}$$

式(1)中,P 表示幅值超过电流 I(单位为 kA)的雷电流概率。

对于绕击计算,可根据电气几何模型求出最大的绕击电流 I_m。按照电气几何模型,当雷电流幅值大于 I_m,雷或击于避雷线,或击于地面而不会击中导线,亦即不会发生绕击。因此绕击计算时雷电流幅值取 I_m。

根据《1 000 kV 特高压交流输变电工程过电压和绝缘配合》(GB/Z 24842—2009)附录 B 中,雷电流的波形取 2.6/50 μs 的双斜角波,且雷电通道等值波抗 Z_0 随雷电流幅值增大而变小[13]。考虑换流站直击雷时,由于直击雷电流幅值较小,所以当计算较小的雷电幅值时,雷电通道波阻抗较大,不同雷电流幅值下计算的 Z_0 具体取值见表 3。

表 3 雷电通道等值波阻抗的计算取值

Table 3 The calculation value of equivalent wave impedance of lightning channel

I/kA	1 以下	1	2	3
Z_0/Ω	5 000	4 500	4 000	3 500
I/kA	4	5	10	10 以上
Z_0/Ω	3 500	2 500	2 000	2 000

1.3 进线段模拟

进线段的模拟对换流站雷电侵入波过电压的分析计算影响较大。雷击塔顶或绕击导线时,雷电侵入波通过进线段传入换流站而引起换流站内雷电过电压。影响雷电过电压幅值大小的因素很多,其与雷击点离换流站距离、杆塔高度和杆塔接地电阻、变电站内的连结线、电气参数,特别是雷电侵入波折反射的具体情况有关。为了正确地计算波过程,模拟了直流极 6 基杆塔和导线,杆塔参数如表 4 所示。

1.4 雷电过电压下空气间隙闪络特性模拟

故障直流分压器采用了空气间隙闪络模型,模型的空气间隙闪络特性基于以下 6 种空气间隙放电理论,可以选择其中任一种进行计算和比较:①伏秒特性曲线相交法;②积分法;③Shindo & Suzuki 先导发展模型;④CIGRE 先导发展模型;⑤Pigini 等先导发展模型;⑥Motoyama 等先导发展模型。

表 4　换流站进线段杆塔参数

Table 4　Parameters of the towers of the incoming line in converter station

杆塔序号	塔型	档距/m
1	JDF3310A	117
2	J27102A	191
3	J27102A	292
4	Z27102A1	403
5	J27103A	584
6	Z27104A1	622

根据故障分析报告,故障直流分压器的空气间隙尺寸为 10.49 m。

2　故障雷电流、故障录波和设备检查结果

设备现场检查结果显示,直流分压器放电通道为沿绝缘子表面,但上下均压环均有灼伤孔洞,而检测结果不能表明是否为上下均压环之间的空气间隙在雷电过电压下击穿,随后的直流电流产生的较粗电弧在绝缘子表面的损伤;或雷电过电压导致上均压环-绝缘子表面-根部法兰-下均压环的通道放电,随后直流电流产生的电弧也跟随该通道放电。

根据故障分析报告,雷电定位系统在 2016 年 6 月14 日 2 时 59 分 47 秒 138 毫秒(02:59:47:138 s)时测到的雷电流幅值约为 -19 kA。而故障录波仪在同日 03:00:53:861 s 时记录的故障波形如图 2 所示,UDL 和 IDL 分别表示直流电压和直流电流,横坐标 t 为时间,由图 2 可知,故障发生时刻分压器有 200 μs 的上升过程,最大 901 kV,由于故障录波仪的采样间隔为 100 μs,可能错失雷电波形的最高电压。闪络发生时间为 3:00:3:795 s,保护动作时间约 3:00:53:810 s,与雷电定位系统在 02:59:47:138 s 时测到的雷电流幅值约 -19 kA,有 6.657 s 的时差。而根据雷电定位系统测得的结果,2:58:26:471 s 为 -9.1 kA,3:03:36:273 s 为 -9.5 kA。均有较大的时差。在不清楚两者 GPS 时钟是否对标和是否会漏掉 3 kA 小雷电流的情况下,不能判断正极极线分压器闪络是否仅由雷电侵入波过电压引起,因此需对雷电侵入波和直击雷过电压均进行仿真计算,以判断故障的起因。

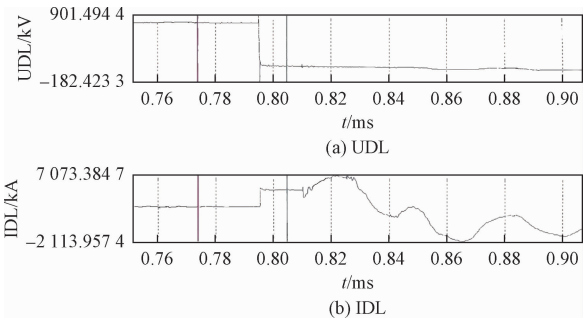

图 2　直流分压器故障录波图

Fig. 2　The fault recorder diagram of DC voltage divider

3　直流分压器的直击雷过电压

3.1　确定直击雷电流大小的方法

广泛应用于换流站的直击雷防护设计方法主要有两种:滚球法和折线法[14, 15]。滚球法根据击距的概念,考虑雷电发展最后的击穿过程,利用几何的方法来确定避雷线或避雷针的保护范围。根据不同的耐雷水平要求来确定滚球半径,以滚球圆弧不能触及的空间作为被保护的范围。与折线法所得的保护半径相比,二者对于地面保护半径相差不大。但对于离地 $h/2$ 处的保护半径,滚球法计算的结果小得多。可以说滚球法比折线法更严格。本报告采用 IEC 61024—1 推荐的滚球法计算直击雷过电压[16]。IEC 标准未明确推荐哪一个击距公式最适合于滚球法,因此采用 IEEE Std1243—2007 推荐的击距公式[17]。

3.2　分压器处避雷线布置方案

事故分压器处避雷线布置方案如图 3 所示。

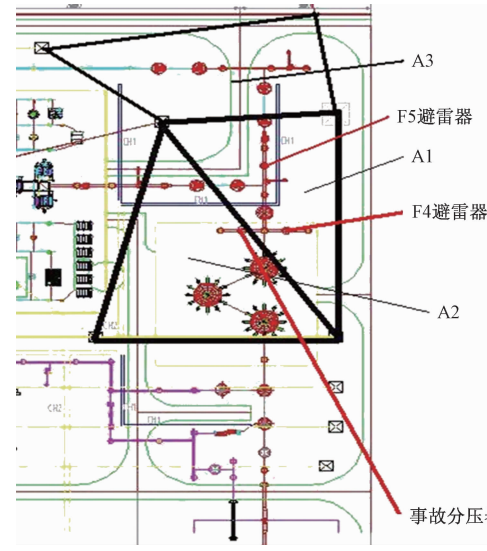

图 3　事故直流分压器处避雷线布置方案

Fig. 3　The lightning line layout scheme at the accident direct current voltage divider

避雷线采用双分裂,图 3 中黑色避雷线所围成的两个三角形实线区域 A1 和 A2 区域为事故分压器、F4 避雷器、F5 避雷器、C1 电容器所在区域。

3.3　A1、A2、A3 区域的最大直击雷过电压

采用 IEEE Std1243—2007 的击距公式[17]

$$r = AI^b \tag{2}$$

式(2)中,r 为击距,I 为雷击电流,A 和 b 为常数。

计算中取 $A = 10$、$b = 0.65$,应用滚球法,针对

图 3 不同避雷线的间距可以计算出各个区域的最大绕击电流分别为：①A1 区域计算最大绕击电流 I_{MAX} = 2.29 kA；②A2 区域计算最大绕击电流 I_{MAX} = 2.36 kA；③A3 区域计算最大绕击电流 I_{MAX} = 3.1 kA。

3.3.1 负极性雷电流

实测结果表明：75% ~90% 的雷电流是负极性，加之本次闪络故障也是 +800 kV 极线遭雷击，但雷电定位仪测得的是离分压器十多千米的高于 12 kA 的雷电流，可能未记录到 3 kA 左右的小雷电流。直流场在闪络时出现很大的闪光，也可能出现小雷直击分压器母线的情况，因此采用负极性雷电流计算直击雷过电压。由计算结果可知，直流场中，A1、A2、A3 区域的最大绕击电流不超过 3.1 kA，偏严考虑最大绕击电流为负极性 3.1 kA，直接将雷电流作用于直流分压器处的母线，代入模型中计算，结果如表 5 所示。

表 5 负极性雷电流直击分压器的过电压计算结果

Table 5 Calculation results of overvoltage when the negative polarity lightning current stroke the direct current voltage divider directly

闪络模型	直流分压器最大过电压/kV	是否闪络	F4 中电流/kA	F5 中电流/kA
伏秒特性曲线相交法	984	否	0.24	0.24
积分法	984	否	0.24	0.24
Shindo & Suzuki 先导发展模型	984	否	0.24	0.24
CIGRE 先导发展模型	984	否	0.24	0.24
Pigini 等先导发展模型	984	否	0.24	0.24
Motoyama 先导发展模型	984	否	0.24	0.24

雷电流作用于 A3 处管母线时，直流分压器的负直击雷过电压波形如图 4 所示。

对表 5 和图 4 的负直击雷过电压计算结果和波形分析，可得出以下结果。

（1）采用 A1、A2、A3 区域计算出的最大绕击电流 3.1 kA 雷电流分别作用于 A1、A2、A3 处的管母线，直流分压器上的直击雷过电压最高为 984 kV，

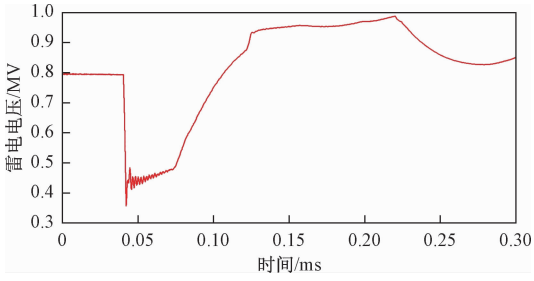

图 4 直流分压器的负直击雷过电压波形

Fig. 4 The negative direct lightning stroke overvoltage waveform of direct current voltage divider

大于故障录波仪所测到的分压器顶部 901 kV 过电压。6 种闪络模型下分压器间隙均未闪络，因此不可能是因空气间隙净距闪络，可能的原因是中、小雨下沿伞沿形成的一串雨水污水柱-空气间隙导致空气净距减小，而发生雷电下的污闪，该推论需要进一步进行试验验证。

（2）对图 4 中波形分析：雷电直击 A3 区域时，由于负极性雷电直击分压器处的管母线，极线处电压会先下降，然后和平抗处雷电全反射波叠加，然后缓慢上升至最大值，其过电压的上升宽度为 200 μs 左右，与故障录波图的上升时间相似，由于故障录波仪采样频率较低约 100 μs 取一个点，可能没有捕捉到电压下降的部分。分析对比波形，可见雷电在 A3 区域直击，波形和故障波形相似。

（3）F4、F5 避雷器均动作，流过电流为 240 A 左右。

3.3.2 不同雷电波头时间的计算结果对比

据实测数据统计世界各国负极性雷波形基本一致，波头时间大多在 1 ~5 μs 范围内，平均为 2 ~2.5 μs。中国防雷设计建议采用负极性 2.6 μs 波头时间。至于雷电流的波长，实测表明在 20 ~100 μs 范围内，平均约为 50 μs，仅有 18% ~30% 的大于 50 μs，所以一般计算均采用 2.6 ~50 μs 的雷电波，但不同雷电波头时间会对闪络间隙产生不同影响，由于故障雷电的波头时间无法测量，所以针对不同波头时间的雷电波计算侵入波，分析故障原因。

研究中取值为 3.1 kA，波头时间分别为 2.6、5、10、15、20 μs 负极性雷电流直击 A3 区域，可得直流分压器的雷击计算结果如表 6 所示。

表 6 不同雷电波头时间下雷电直击计算结果

Table 6 Calculation results of lightning stroke with different wave-head time

雷电流波头时间/μs	最大过电压/kV	是否闪络
2.6	984	否
5	998	否
10	1 045	否
15	1 089	否
20	1 143	否

对表 6 和图 5 不同雷电波头时间下雷电直击计算结果和波形分析，可得结果：当雷电流幅值为 3.1 kA 时，波头时间变长，则变电站内直流分压器雷电侵入波波头时间也会变长，计算出的过电压值会变大。6 种方法的计算模型和实测表明绝大多数情况下雷电过电压下的间隙闪络都发生在波尾，但是由于分压器空气净距很大，而雷电过电压又太低，不会发生闪络，所以波头时间对闪络没有影响。

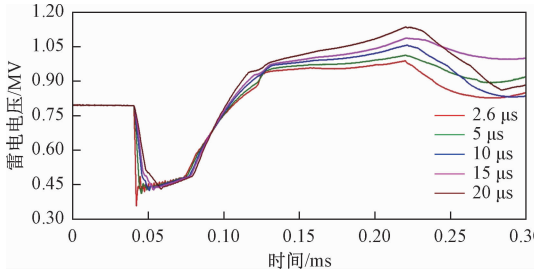

图 5　直流分压器的不同波头时间雷电直击波形

Fig. 5　The direct lightning stroke overvoltage waveform of direct current voltage divider with different wave-head time

3.3.3　正极性雷电流

虽然中国正极性雷出现的机会较少,但正极性雷一般有很长的达到几百微秒的波头时间和长达上千微秒的波尾时间,因而所传递的电荷比负极性雷大得多,从而更容易导致设备绝缘的破坏[18],因此也不能排除发生一个小幅值正极性长波头雷电直击分压器母线的情况。计算中采用波头时间 200 μs,幅值 3.1 kA 的正极性雷电流直击分压器母线,计算得到雷过电压波形如图 6 所示。

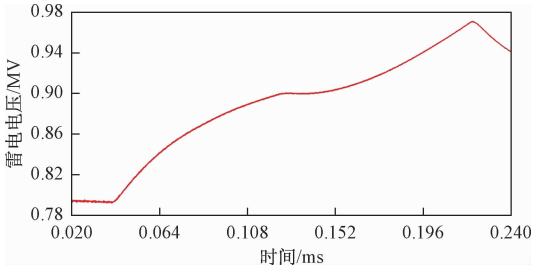

图 6　直流分压器的正直击雷过电压波形

Fig. 6　The positive direct lightning stroke overvoltage waveform of direct current voltage divider

由图 6 可知,波形和故障录波波形比较相似,经 200 μs 时间缓慢上升至 950 kV 左右,但 6 种闪络模型下直流分压器空气间隙依然没有击穿,可见即使发生小概率的小幅值正极性雷电直击正极线,直流分压器空气间隙不会因为雷电过电压而闪络。

4　直流分压器的绕击侵入波过电压

根据电气几何模型,进线段#1 ~ #6 杆塔的最大绕击电流 I_m 和地面倾斜角 θ 有关。表 7 列出了 +800 kV 直流极线采用电气几何模型计算出的各杆塔最大绕击电流和计算选取的最大绕击电流。表 7 中 +800 kV 直流电压吸引负极性雷的引雷作用的计算是在统计 ±800 kV 和 ±500 kV 线路绕击闪络率的基础上形成的电气几何模型计算公式,由于 ±800 kV 的统计数据较少,计算的绕击电流准确性有一定的误差,另一方面雷电定位系统在该时间

表 7　换流站进线最大绕击电流

Table 7　The maximum winding current of the inlet line in converter station

杆塔编号	#1	#2	#3
最大绕击电流/kA	13.8	13.8	11.9
计算用绕击电流/kA	14	14	12
杆塔编号	#4	#5	#6
最大绕击电流/kA	15.8	11.7	14.8
计算用绕击电流/kA	16	12	15

段离换流站 15 km 范围内雷电流范围为 -9.1 ~ -19 kA,雷电定位仪所测的电流也有较大的误差,因此计算选用表 7 中计算得到的电流。

偏严考虑采用 -16 kA 的绕击雷电流,按以上 6 种闪络模型计算出的直流分压器上最高绕击过电压峰值、避雷器最大电流峰值列于表 8。由表 8 和图 7 绕击侵入波过电压的计算结果和波形分析,可得出以下结果。

表 8　换流站雷电侵入波计算结果

Table 8　Calculation results of lightning invasion wave in converter station

闪络模型	直流分压器最大过电压/kV	是否闪络	F4 中电流/kA	F5 中电流/kA
伏秒特性曲线相交法	1 192	否	0.35	0.35
积分法	1 192	否	0.35	0.35
Shindo & Suzuki 先导发展模型	1 192	否	0.35	0.35
CIGRE 先导发展模型	1 192	否	0.35	0.35
Pigini 等先导发展模型	1 192	否	0.35	0.35
Motoyama 先导发展模型	1 192	否	0.35	0.35

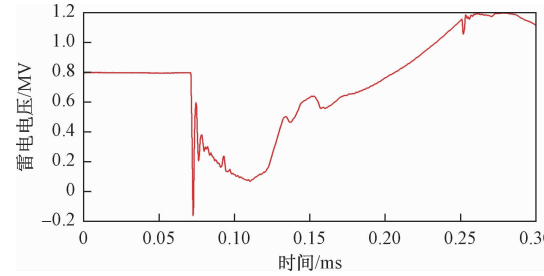

图 7　直流分压器的最大雷电侵入波波形

Fig. 7　The maximum lighting invasion wave overvoltage waveform of direct current voltage divider

(1)按照最大绕击电流 16 kA 雷击 2 km 范围内进线段杆塔正极性导线,得到分压器最大雷电过电压为 1 192 kV,6 种闪络模型下直流分压器间隙没有发生闪络故障。一般来说,更大的雷电流只能击于地线或者大地。由于分压器靠近避雷器,距离不超过 10 m,相当于由紧靠避雷器直接保护。所以分压器净空气间隙不会闪络。分压器闪络如同直击雷分析一样,是由中、小雨下沿伞裙边沿形成的一串雨水污水柱-空气间隙导致空气净距减小,而发生雷电

下的污闪。

(2)对图 7 中波形分析:雷电绕击 2 km 范围内进线段杆塔正极性导线,由于平波电抗器的电流不能突变,所以在起始阶段将雷电波反射回去导致分压器出现雷电过电压。分析对比波形可知波形与录波仪记录故障波形也基本相似。

(3)F4、F5 避雷器均动作,流过电流为 350 A 左右。

5 绝缘配合

紧靠分压器的 F4 避雷器的雷电冲击保护水平 LIPL 为 1 621 kV/20 kA,操作冲击保护水平 SIPL 为 1 371 kV/1 kA。分压器要求的雷电冲击耐受电压(LIWV)为 1 950 kV,操作冲击耐受电压(SIWV)为1 600 kV,雷电裕度系数为 1.20,操作裕度系数为 1.17。

GB 311.3—2017 指出:确定空气间隙大小的因素中,操作比雷电重要[19]。对于一个标准的空气间隙,正的雷电冲击击穿电压至少要比正的操作冲击击穿电压高 30%。选择合适的电极形状可提高操作冲击的耐受电压,减小要求的最小空气间隙。

直流系统的空气间隙选择是基于设备规定的冲击耐受电压,该电压为避雷器保护水平乘以合适的裕度系数得到,而无须向上靠一个标准绝缘水平。

计算临界(50%)耐受电压 U_{50} 选择户外空气净距,并至少考虑 2σ:

$$U_{50} = U_w/(1 - 2\sigma) \tag{3}$$

式(3)中,U_{50} 为相应冲击电压波形下的 50% 的闪络电压,kV;U_w 为规定的冲击耐受电压,kV;σ 为标准偏差。

然后,可根据不同电极形状特性对应的间隙系数由 U_{50} 选择户外空气净距。推荐采用设备的真型或仿真间隙放电试验数据选择户外空气净距。

当 U_w 为内绝缘规定的耐受电压时,根据式(3)包含了外绝缘海拔 1 000 m 的修正,因此选择的设备的空气间隙适合于海拔 1 000 m 以下地区。而计算海拔 1 000 m 以上的 U_w 时,可按 GB 311.1—2012 的海拔修正公式减去 1 000 m 后进行修正[20]。当 U_w 为外绝缘规定的耐受电压时(即避雷器保护水平乘以 1.05),应从 0 m 按 GB 311.1—2012 的海拔修正公式进行修正。推荐采用外绝缘规定的耐受电压。

偏严考虑,取操作湿闪耐受电压 U_w = 1 600 kV,σ = 0.06 按式(3)计算出 U_{50} = 1 818 kV(包括 1 000 m 海拔修正),查放电电压较低的正极性环对构架的标准波操作冲击电压曲线,要求的最小空气间隙为 8.2 m,而分压器的干弧距离为 10.49 m,远大于要求值。

取雷电耐受电压 U_w = 1 950 kV、σ = 0.03,按式(3)计算出 U_{50} = 2 074 kV(包括 1 000 m 海拔修正),查放电电压较低的正极性环对构架的标准雷电冲击波放电电压曲线,要求的最小空气间隙为 4 m,远小于操作冲击要求的最小间隙。

综上所述,从绝缘配合来评价,分压器的空气间隙已满足雷电和操作冲击要求的最小空气间隙,并有很大裕度。

6 结论

针对某 ±800 kV 特高压换流站直流分压器在雷电天气下发生空气间隙或沿面闪络故障,采用 ATP-EMTP 程序计算了换流站雷电侵入波过电压和换流场避雷线布置方案下雷电绕过避雷线直击直流分压器的直击雷过电压,分析了故障直流分压器的绝缘配合,得到以下结论。

(1)根据现场设备检查结果,不能完全排除上下均压环之间的空气间隙在雷电过电压下击穿的可能。同时,根据故障录波仪和雷电定位系统测得结果不能判断正极极线分压器闪络是否仅由雷电侵入波过电压引起还是由直击雷过电压引起,因此均进行仿真计算,以判断故障的起因。

(2)根据分压器上方避雷线布置,采用滚球法计算得到雷电直击分压器管母的最大绕击电流。计算选用负极性 2.6/50 μs 和正极性 200/2 500 μs 幅值 3.1 kA 直击雷电流,得到分压器最大直击雷过电压为 984 kV,F4 和 F5 避雷器放电电流分别为 240 A 左右且 6 种分压器空气间隙模型下空气间距均不会闪络。

(3)根据电气几何模型计算得到杆塔的最大绕击电流和雷电定位系统在该时间段离换流站 15 km 范围内雷电流范围,选取最大绕击雷电流 16 kA,得到分压器最大雷电侵入波过电压为 1 192 kV,F4 和 F5 避雷器放电电流分别为 350 A 左右且 6 种分压器空气间隙模型下空气间距均不会闪络。

(4)从绝缘配合来评价,分压器的空气间隙已满足雷电和操作冲击要求的最小空气间隙,并有很大裕度。

综上,该故障可能为雷电过电压击穿,但仿真计算进线段绕击侵入波过电压和直流场直击雷过电压都不应导致分压器的空气间隙闪络,否则分压器的绝缘配合就存在严重问题。可初步判断较低的雷电过电压下分压器绝缘子是沿表面闪络的,而闪络的主要原因可能是中、小雨下沿伞沿形成的一串雨水

污水柱-空气间隙,而导致表面耐受过电压性能下降,发生污闪。因此需要进一步进行污秽条件下的冲击试验予以核实。

参 考 文 献

1 舒印彪, 刘泽洪, 袁　骏, 等. 2005 年国家电网公司特高压输电论证工作综述. 电网技术, 2006; 30(5): 1—12
Shu Yinbiao, Liu Zehong, Yuan Jun, *et al*. A survey on demonstraiton of UHV power transmission by Sate Gird Corporaition of China in the year of 2005. Power System Technology, 2006; 30(5): 1—12

2 梁旭明, 张国威, 徐玲玲, 等. 1 000 kV 交流特高压试验示范工程的生产准备工作与实施. 电网技术, 2008; 32(5): 12—16
Liang Xuming, Zhang Guowei, Xu Lingling, *et al*. Investigation and implementation of production preparation for 1 000 kV AC test and pilot project. Power System Technology, 2008; 32(5): 12—16

3 孙　昕, 刘泽洪, 高理迎, 等. ±800 kV 特高压直流工程创新实践. 中国电机工程学报, 2009; 29(22): 35—45
Sun Xin, Liu Zehong, Gao Liying, *et al*. Practice and innovation in the ± 800 kV UHVDC demonstration project. Proceedings of the CSEE, 2009; 29(22): 35—45

4 王莉. 蒙西-晋中特高压交流工程获得国家核准. 变压器, 2018; (4): 49
Wang Li. Mengxi-Jinzhong UHV AC project was approved by the state. Transformer, 2018; (4): 49

5 梁旭明, 张　平, 常　勇. 高压直流输电技术现状及发展前景. 电网技术, 2012; 36(4): 1—9
Liang Xuming, Zhang Ping, Chang Yong. Recent advances in high-voltage direct-current power transmission and its developing potential. Power System Technology, 2012; 36(4): 1—9

6 罗健斌, 郝艳捧, 韩永霞, 等. 计及设备运行电压的特高压换流站直击雷防护设计方法. 电网技术, 2013; 37(5): 1407—1413
Luo Jianbin, Hao Yanpeng, Han Yongxia, *et al*. A new design method of direct lightning protection for ±800 kV UHVDC converter station considering equipment operating voltage. Power System Technology, 2013; 37(5): 1407—1413

7 邓　旭. 特高压直流及柔性直流输电系统换流站绝缘配合研究. 杭州: 浙江大学, 2014
Deng Xu. Insulation coordination for converter stations of UHVDC and VSC-HVDC transmission system. Hangzhou: Zhejiang University, 2014

8 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. 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 ±800 kV converter station. High Voltage Engineering, 2010; 36(1): 218—223

9 钱　锋, 周志超, 沈志恒, 等. ±800 kV 浙西换流站直流场雷电侵入波过电压研究. 华东电力, 2012; 40(4): 621—625
Qian Feng, Zhou Zhichao, Shen Zhiheng, *et al*. Lightning intruding overvoltage for DC field of ±800 kV Zhexi converter ctation. East China Electric Power, 2012; 40(4): 621—625

10 万　磊, 范　冕, 何慧雯. ±1 100 kV 特高压直流换流站直流场雷电侵入波过电压研究. 电瓷避雷器, 2016; (1): 69—77,83
Wang Lei, Fan Mian, He Huiwen. Study on lighting intruding wave overvoltage of UHV DC ±1 100 kV convertor station. Insulators and Surge Arresters, 2016; (1): 69—77,83

11 陈锡磊, 周　浩, 王东举, 等. 溪洛渡-浙西 ±800 kV 特高压直流输电工程浙西换流站绝缘配合. 电网技术, 2012; 36(2) 7—12
Chen Xilei, Zhou Hao, Wang Dongju, *et al*. Insulation coordination for zhexi converter station of ±800 kV DC power transmission project from Xiluodu to Zhexi. Power System Technology, 2012; 36(2): 7—12

12 中国电力企业联合会. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范: GB/T 50064—2014. 北京: 中国计划出版社, 2014
China Electric Power Enterprise Federation. Code for design of overvoltage protection and insulation coordination for AC electrical installations: GB/T 50064—2014. Beijing: China Planning Publishing House, 2014

13 中国电力企业联合会. 1 000 kV 特高压交流输变电工程过电压和绝缘配合: GB/Z 24842—2009. 北京: 中国标准出版社, 2009
China Electric Power Enterprise Federation. Overvoltage and insulation coordination of 1 000 kV UHV AC transmission project: GB/Z 24842—2009. Beijing: Standards Press of China, 2009

14 吴　桐, 杨金根. 滚球法和折线法在特高压直流换流站防雷保护中应用比较分析. 输变电年会 2012 论文集. 上海: 中国电工技术学会输变电设备专业委员会, 2012: 284—288
Wu Tong, Yang Jingen. Study on application of rolling ball method and broken line method in lightning protection of UHVDC converter station. 2012 Papers on the Annual Meeting of Transmission and Distribution. Shanhai: China Electrotechnical Society Transmission and Transformation Equipment Specialized Committee, 2012: 284—288

15 IEEE. Guide for direct lightning strokeshielding of substations: Std 998—1996. New York: IEEE Std, 1996

16 IEC. Protection of structures against lightning. Part 1: General principles. Section 1: Guide A—Selection of protection levels for lightning protection systems: IEC 1024-1-1. New York: IEC Std, 1993

17 IEEE. IEEE guide for fault locating techniques on shielded power cable systems: IEEE Std 1234—2007. New York: IEEE Std, 2007

18 刘欣生, 郄秀书, 张义军, 等. 中国内陆高原正极性雷电的观测实验研究. 高原气象, 1998; 17(1): 4—12
Liu Xinsheng, Xi Xiushu, Zhang Yijun, *et al*. Observational experimental study of positive lightning in inland plateau of China. Plateau Meteorology, 1998; 17(1): 4—12

19 中国电器工业协会. 绝缘配合 第 3 部分: 高压直流换流站绝缘配合程序: GB/T 311.3—2017. 北京:中国标准出版社, 2017
China Electrical Equipment Industrial Association. Insulation co-ordination part 3: Procedures for high-voltage direct current (HVDC) converter stations: GB/T 311.3—2017. Beijing: Standards Press of China, 2017

20 中国电器工业协会. 绝缘配合 第 1 部分: 定义、原则和规则: GB 311.1—2012. 北京: 中国标准出版社, 2012
China Electrical Equipment Industrial Association. Insulation co-ordination part 1: Definitions, principles and rules: GB 311.1—2012. Beijing: Standards Press of China, 2012

Simulation Study of Lightning Overvoltage in Direct Current Field of ±800 kV Ultra High Voltage Converter Station

DUAN Hao[1], YAO Jing-wu[2], LIU He-long[3], SUN Sen-hao[3]

(State Grid Corporation of China[1], Beijing 100031, China; Management Office of State Grid Corporation Run Branch in Zhengzhou[2], Zhengzhou 450000, China; Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense, North China Electric Power University[3], Baoding 071003, China)

[**Abstract**] A direct current (DC) voltage divider fault in a ± 800 kV ultra high voltage (UHV) converter station under thunderstorms is centered. The fault may be caused by air gap breakdown or surface flashover. In order to analyze the cause of the fault, the alternative transients program-the electromagnetic transients program (ATP-EMTP) was used. In the layout scheme of lightning shield line in the converter station, the direct thunder overvoltage with the DC voltage divider had struck by thunder directly and the lightning invaded overvoltage were simulated by ATP-EMTP. The insulation coordination was verified with simulated results. Lastly, the further research and control measures were proposed.

[**Key words**] ultra high voltage converter station direct current field lightning overvoltage simulation