

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2025.05.008

振荡过电压对双极中性线滤波器电抗器绝缘性能 影响分析

张宏伟

(国网甘肃省电力公司金昌供电公司, 甘肃 金昌 737100)

摘要: 超高压直流线路发生雷击时,会引起线路电压和电流陡增,产生的过电压将对中性区域设备及其绝缘造成严重影响。文章分析了某 ± 500 kV换流站雷击直流线路引起中性母线产生振荡过电压的故障现象和发展过程,通过解体检查、耐压试验、理论计算和仿真模拟研究了故障机理,验证了振荡过电压对中性电抗器各项技术参数选取、设备选型的影响,并提出针对性防范措施,对做好中性区域直流设备特别是电抗器设计选型、运行维护等环节工作具有重要的借鉴和参考意义。

关键词: 振荡过电压; 电抗器; 绝缘子; 绝缘特性; 击穿放电

Analysis of Influence of Oscillatory Overvoltage on Insulation Performance of Bipolar Neutral Line Filter Reactors

ZHANG Hongwei

(Jinchang Electric Power Company, State Grid Gansu Electric Power Company,
Gansu Jinchang 737100, China)

Abstract: Lightning strike of extra-high voltage direct current lines can cause a sudden increase of both voltage and current on the line, and the resulting overvoltage will have a serious impact on neutral area equipment and its insulation. In this paper, the fault phenomenon and development process of neutral bus oscillatory overvoltage caused by lightning strikes on DC lines at a ± 500 kV converter station is analyzed. The fault mechanism is studied through disassembly of equipment and inspection, voltage withstand test, theoretical calculation and simulation. The impact of oscillatory overvoltage on the selection of technical parameters and type selection of neutral reactors is verified, and targeted preventive measures are proposed, which have important reference and guidance significance for the design, selection, operation, and maintenance of DC equipment in neutral areas, with reactors in particular.

Keywords: oscillatory overvoltage; reactor; insulator; insulation characteristics; breakdown discharge

0 引言

直流换流站中性区域直流滤波器连接于每一极的极高压母线与极中性母线之间,其主要作用是滤除直流侧谐波^[1]。直流电抗器可以有效调节无功电流大小和质量,对直流无功进行补偿,与调谐滤波器、电力滤波器等调控技术配合,可以控制交、直流系统的功率因数,提高系统运行效率和能量利用率^[2-5]。交、直流设备故障时,会造成直流单双极闭锁,在直流中性母线上产生较高的过电压^[6-7],对中性区域设备及其绝缘耐受水平造成严重影响和严峻考验。当换流站处于双极大地回线全压运行时,

直流滤波器高低端不仅承受着系统的高电压,而且由于其滤波特性将流过大量谐波电流,导致直流滤波器和与之联接的电抗器在高电压和大谐波电流的双重叠加考验下,绝缘水平和耐受能力比其他设备更易劣化^[9-10]。因此,研究振荡过电压对直流电抗器绝缘性能的影响,降低、抑制、消除过电压对直流电抗器电气、物理性能威胁至关重要^[11]。

文章分析了某 ± 500 kV换流站(逆变站)雷击直流线路引起中性母线产生振荡过电压的故障现象和发展过程,通过解体检查、耐压试验、理论计算和仿真模拟研究了故障机理,验证了振荡过电压对中性电抗器各项技术参数选取、设备选型的影响,并

收稿日期:2025-04-27

提出针对性防范措施,对做好中性区域直流设备特别是电抗器设计选型、运行维护等环节工作具有重要的借鉴和参考意义。

1 故障概况

某±500 kV换流站(逆变站)联接我国最大的水电基地与最大的负荷中心城市,是“西电东送”的重要枢纽,也是国家骨干电网的重要组成部分,是国内首个同塔双回直流线路工程,设计输送容量6 000 MW。该换流站的投运,加强了华中电网与华东电网的联络,对华东电网抵御风险、能源安全、电力保供、新型电力系统构建具有重要意义。

2023年7月8日,该换流站直流线路双极大地回线全压运行,双极输送功率2 999 MW。交流场4串正常运行方式运行,8组交流滤波器运行。换流站所处区域正值梅雨季节,连续阴雨天气,空气相对湿度达93%,气温31℃。

1.1 故障过程

7月8日15:32:33:262时,换流站所处区域阵雨,换流站直流线路发生雷击,造成极ⅡHP12/36直流滤波器接地,导致极ⅡHP12/36直流滤波器差动保护、极差动保护、中性母线差动保护动作,极Ⅱ闭锁。极Ⅰ单极大地回线1 650 MW过负荷运行,损失负荷1 349 MW,15:35手动操作将功率降至1 500 MW。16:42时,直流极Ⅰ转为金属回线运行。

故障发生后,现场巡视检查发现,极Ⅱ022LB直流滤波器 L_1 电抗器表面、底部铝制吊架排和支柱绝缘子有明显故障痕迹,底座螺栓可见烧蚀痕迹,如图1所示。



图1 故障电抗器
Fig. 1 Faulty reactor

1.2 故障设备概况

换流站每极分别配置一组HP12/24和一组HP12/36直流滤波器,022LB为HP12/36调谐滤波器,结构如图2所示。 L_1 电抗器型号为LKKT-35-

86.4-12.923,国内某电气设备厂生产,2010年9月生产,2011年5月投运,设备参数如表1所示。

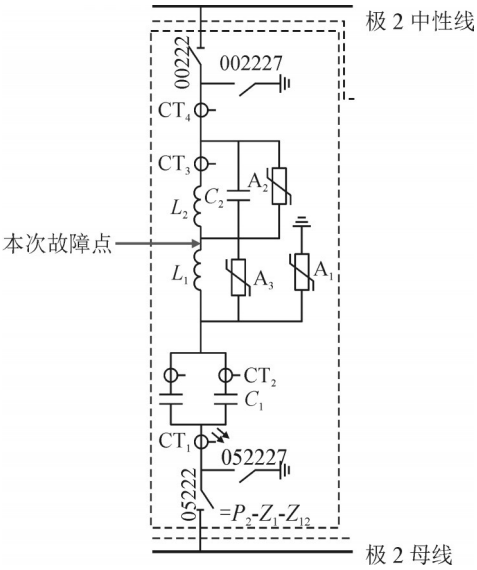


图2 直流滤波器结构图
Fig. 2 Structural diagram of DC filter

表1 L_1 电抗器参数表
Table 1 Parameter list of L_1 reactor

参数	案值
型号	LKKT-35-86.4-12.923
型式	户外/单相/干式/空心/可调
额定电流/A	86.4
额定电感/mH	12.923
额定冲击电流/kA	8.4/1 s
额定雷电冲击耐受电压(峰值)/kV	550
额定截波冲击耐受电压(峰值)/kV	605
额定交流耐压(干/湿)(有效值)/kV	-/230
直流电阻(75℃)/Ω	0.305
电流不均匀度/%	≤5
绝缘等级(级)	F
绝缘子爬距/mm	1 346

支柱绝缘子型号为TR214W,国内某瓷厂生产,水泥胶合剂表面用硅胶涂层密封,金具螺孔用塑料塞密封保护,技术参数见表2,结构见图3。

表2 低压端支柱绝缘子参数表
Table 2 Paramter list of support insulators of low voltage termianl

参数	数值
型号	TR214W
雷电冲击耐受电压/kV	250
操作冲击耐受电压/kV	190
1 min工频耐受电压(干/湿)/kV	120/100
工频闪络电压(干/湿)/kV	170/125
爬电距离/mm	1 346
干弧距离/mm	430

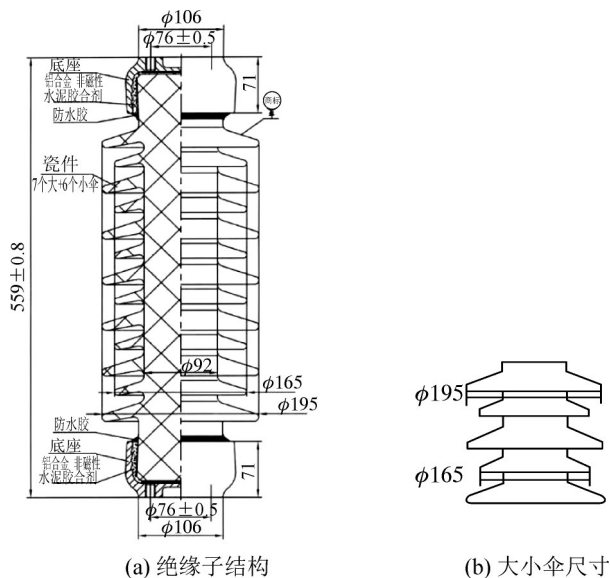


图3 低压端支柱绝缘子结构图

Fig. 3 Structural diagram of support insulator of low voltage terminal

雷击后,整个直流回路 LC 振荡,极 II 直流线路电压存在波动,电压最高幅值达 -628 kV,中性母线电压波动最高为 62.5 kV,且电压幅值存在周期振荡特点,主要包括 2 次和 4 次电压波动分量。本文以直流滤波器保护、极差动保护和中性母线差动保护动作和录波情况为依据,结合盐密测量、憎水性试验、常规电气试验和雷电冲击、耐压试验等试验结果,分 3 个阶段对故障过程进行分析,借鉴该站历次故障和其他换流站设备情况,在理论计算和仿真模拟基础上,详细阐释了震荡过电压对中性线滤波器电抗器绝缘性能的影响。

2 检查试验

2.1 现场检测

测量极 II 直流场设备绝缘子(表面涂 RTV 防污闪涂料)表面的等值附盐密度^[12],结果为 0.020 ~ 0.022 mg/cm²,小于直流场设备设计盐密值 0.070 mg/cm²,盐密值满足要求。

检查极 II 直流场设备绝缘子 RTV 涂层表面,无色裂、粉化、起皮和脱落现象。采用喷雾法对绝缘子进行憎水性试验^[13-17],憎水性级别为 HC2 ~ HC3 级,其中电抗器 L₁旁瓷绝缘子为 HC3 级,其余设备为 HC2 级,表现为憎水性,表明绝缘子绝缘性能满足防污闪要求。绝缘子憎水性表面如图 4 所示。

对 022LB 直流滤波器其他设备检查试验,结果正常。

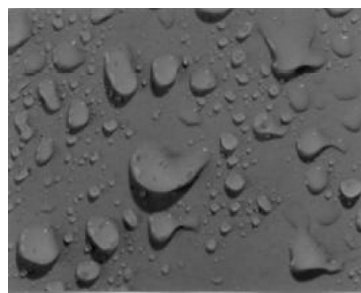


图4 绝缘子憎水性表面

Fig. 4 Hydrophobic surface of insulator

2.2 解体检查

组织运维单位、生产厂家、第三方检测机构对电抗器进行解体检查试验,发现电抗器主线圈整体涂层良好,无明显异常;电抗器直流电阻、电感、品质因数、谐波损耗等常规试验以及半压雷电冲击试验结果均合格^[18-19],排除电抗器本体内部发生故障闪络的可能性。电抗器底部铝制吊架排上有一处明显放电点,相应部位存在 RTV 涂层起皮现象,为底部支柱绝缘子放电电弧飘弧、弧根移动等痕迹,如图 5 和图 6 所示。

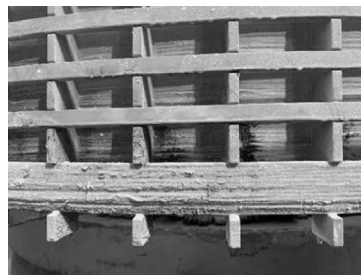


图5 辅助线圈环氧桶外表面起皮

Fig. 5 External surface peeling of epoxy container of auxiliary coil



图6 铝吊架底部放电痕迹

Fig. 6 Discharge marks at bottom of aluminum hanger

2.3 故障绝缘子耐压试验

查阅电抗器和绝缘子技术规范和设计图纸,绝缘子雷电冲击耐受电压为 250 kV,操作冲击耐受电压为 190 kV,工频闪络电压为干态 170 kV、湿态 125 kV,1 min 工频耐受电压为干态 120 kV、湿态 100 kV。对故障绝缘子进行了雷电冲击、操作冲击和工频闪络电压试验^[19-20],试验结果为潮湿状态工

频闪络电压值 120 kV、小于其耐受值 125 kV,其他试验数据均合格。具体试验结果如表 3 所示(试验条件为温度 29.5℃、相对湿度 66%)。

表3 故障绝缘子试验数据
Table 3 Test data of faulty insulators

试验项目	雷电冲击试验 (最低击穿电压)/kV	操作冲击试验 (最低击穿电压)/kV	工频闪络试验 (闪络电压)/kV
干燥状态	266.73	225.59	183
潮湿状态	241.48	211.75	120

3 故障分析与仿真试验

换流站中性区域电气接线如图 7 所示。为模拟故障时刻直流滤波器电抗器 L_1 低压端过电压水平和对中性区域设备的影响,构建直流滤波器等值仿真模型,模拟操作过电压和工频过电压工况下低压端对地电压情况,并与操作耐受电压和工频耐受电压进行比对,验证其绝缘设计和绝缘配合。

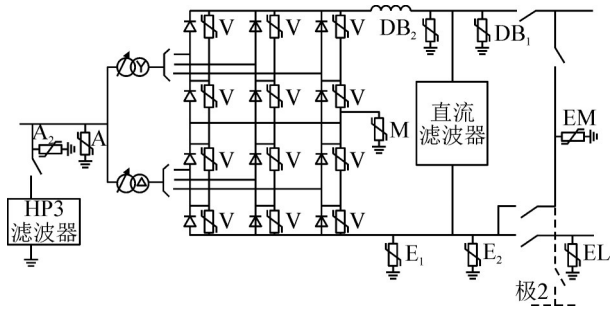


图7 中性区域电气接线图
Fig. 7 Electrical wiring diagram of neutral area

3.1 直流线路避雷器动作分析

极 II 直流线路和中性母线电压波形如图 8 所示,可以看出,雷击后极 II 直流线路电压存在波动,电压最高幅值为-628 kV,小于极母线避雷器额定电压 673 kV,极母线避雷器未动作。极 II 中性母线电压波动最高为 62.5 kV 且电压幅值存在周期振荡特点,由于电压幅值小于中性母线避雷器额定电压 64 kV,因此中性母线避雷器未动作。

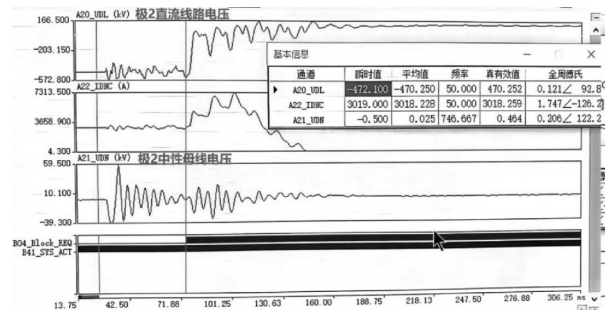


图8 极 II 直流线路及中性母线电压录波图
Fig. 8 Voltage recording waveform of DC line and neutral bus of pole II

3.2 直流滤波器避雷器动作分析

极 II 022LB 直流滤波器避雷器动作情况如表 4 所示。根据理论计算,022LB 直流滤波器 A_1 避雷器承受电压为 L_1 电抗器首端对地电压值 304.44 kV > 194.5 kV,避雷器动作 1 次。 A_2 避雷器承受电压为 L_1 电抗器尾端对地电压值 231 kV > 48 kV,避雷器动作 1 次。 A_3 避雷器承受电压为 L_1 电抗器首端对尾端的电压值 73.609 kV < 243.5 kV,避雷器未动作。避雷器实际动作情况再次印证了故障时, L_1 电抗器低压侧承受了较高的过电压^[21],动作示意如图 9 所示。

表4 022LB 直流滤波器避雷器动作统计表
Table 4 Operation statistical list of 022LB DC filter arrester

名称	直流 1 mA 参考电压/kV	动作次数/次	故障前次数/次	故障后次数/次
A_1 避雷器	194.5	1	46	47
A_2 避雷器	48(4 mA)	1	22	23
A_3 避雷器	243.5	0	17	17

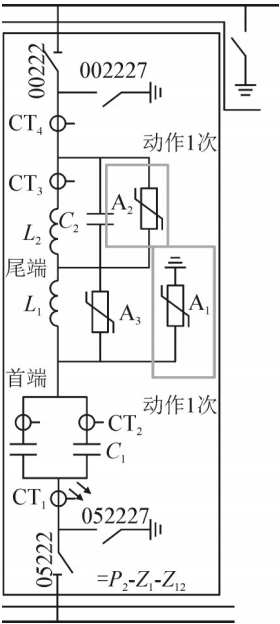


图9 直流滤波器避雷器动作示意图
Fig. 9 Operation schematic diagram of DC filter arrester

3.3 直流滤波器保护动作分析

直流滤波器差动保护设置差动 I 段和 II 段保护。

1) 差动 I 段动作逻辑如下:

$$|I_{T1} - I_{T4}| > 40\text{ A} + 50\% \times I_{T1} \quad (1)$$

在直流滤波器高压侧电流小于 100 A 时,延时 200 ms,跳直流滤波器;直流滤波器高压侧电流大于 100 A 时移相闭锁、极隔离。

2) 差动Ⅱ段动作逻辑如下:

$$|I_{T1} - I_{T4}| > 100 \text{ A} + 5\% \times I_{T1} \quad (2)$$

延时 25 ms, 移相闭锁、极隔离。

故障录波如图 10 所示, 可以看出, 15:32:33:277 时刻 022LB 直流滤波器差动电流计算值达 417 A, 达到定值后延时 25 ms, 15:32:33:302 保护出口, 闭锁换流阀, 两套直流滤波器 A、B 保护均发出“HP12/36 直流滤波器差动保护Ⅱ段动作”告警信息, 保护动作正确。

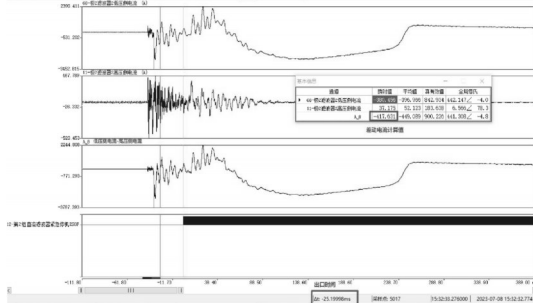


图 10 022LB 直流滤波器保护动作录波图

Fig. 10 Protection recording waveform of 022LB DC filter

3.4 直流极差动保护动作分析

直流极差动保护动作判据如下:

$$\Delta \leq |I_{DL} - I_{DNE} + I_{CN}| \quad (3)$$

具体动作值如下:

- 1) 当 $\Delta=0.05 \text{ p.u.}$, 延时 5 s, 报警。
- 2) 当 $\Delta=0.2 \text{ p.u.} + 0.2I_{DNE}$ 时, 延时 300 ms, 紧急停运。
- 3) 当 $\Delta=0.4 \text{ p.u.} + 0.2I_{DNE}$ 时, 延时 30 ms, 紧急停运。

极隔离时, 电流波形如图 11 所示。当极Ⅱ换流阀执行移相闭锁后, 进行极隔离时极Ⅱ $I_{DNE} = 2625 \text{ A}$, 大于中性线开关(NBS)断流能力 2550 A。由于此时不满足极Ⅱ 0020 开关分闸联锁条件, 0020 开关未分闸, 极Ⅰ直流电流由 0020 开关、极Ⅱ直流滤波器故障点构成电流回路, 故障电流回路如图 12 所示。因此, 极Ⅱ I_{DNE} 电流一直存在, 而极Ⅱ I_{DL} 已降为 0, 导致极Ⅱ极差保护存在差流, 极差保护动作。直至 I_{DNE} 电流降低到 2450 A (迟滞值为 50 A) 以下, 0020 开关分闸, 随后极Ⅱ I_{DNE} 逐渐跌为 0, 故障电流持续时间为 2609 ms。



图 11 极隔离时极Ⅱ I_{DNE} 波形图

Fig. 11 I_{DNE} waveform of pole II in pole isolation

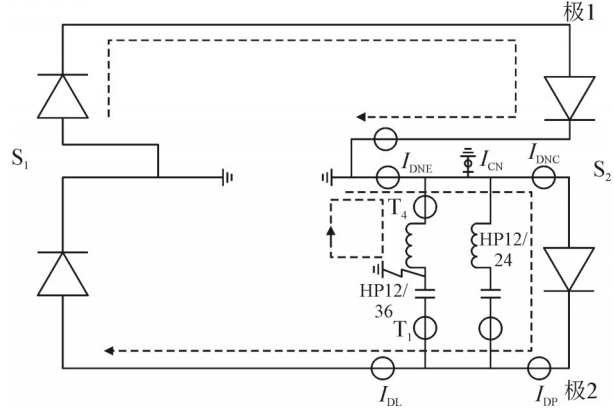


图 12 极Ⅱ故障电流回路图

Fig. 12 Fault current circuit diagram of pole II

极Ⅱ直流极差动保护录波如图 13 所示, 可以看出, 15:32:33:383 时刻极差动电流值达到 1973 A 且持续增大, 此时直流极差动保护Ⅱ段动作判据如下:

$$\Delta = 0.4 \text{ p.u.} + 0.2I_{DNE} = 0.4 \times 3000 + 0.2 \times 1974 = 1595 \text{ A} < 1973 \text{ A} \quad (4)$$

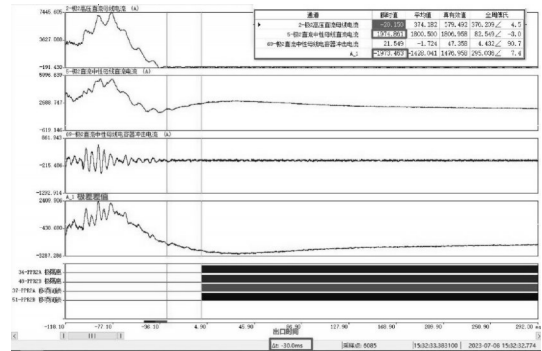


图 13 极Ⅱ直流极差动保护动作录波图

Fig. 13 DC pole differential protection recording waveform of pole II

从式(4)可以看出, 差值 $1973 \text{ A} >$ 判据 Δ , 延时 30 ms, 15:32:33:413 时, 极差保护出口, 3 套直流极保护 A、B、C 均发出“直流极差保护跳闸”告警信息, 保护动作正确。

3.5 中性母线差动保护动作分析

中性母线差动保护动作判据如下:

$$\Delta < |I_{DNC} - I_{DNE} - I_{Z11-T4} - I_{Z12-T4} + I_{CN}| \quad (5)$$

具体动作值如下:

- 1) 当 $\Delta=0.05 \text{ p.u.}$ 时, 延时 2 s, 告警。
- 2) 当 $\Delta=0.2 \text{ p.u.} + 0.2I_{DNC}$, 延时 25 ms, 紧急停运。

极Ⅱ 022LB 直流滤波器尾端 CT (I_{Z12-T4}) 为电磁式 CT, 故障时刻, 流过尾端 CT 电流约为 2200 A, 且以直流分量为主, 直流分量导致电磁式 CT 饱和, CT 传变特性变差, 引起中性母线差动保护出现差动电流值 622 A, 且持续增大, 此时中性母线差动电流动

作判据如下:

$$\Delta = 0.2 \text{ p.u.} + 0.2 I_{\text{DNC}} = 0.2 \times 3\,000 + 0.2 \times 24 = 605 \text{ A} < 622 \text{ A} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,差值 $622 \text{ A} >$ 判据 Δ ,延时 25 ms 保护出口,3套保护 A、B、C 均发出“直流中性母线差动保护跳闸”告警信息,保护动作正确,如图 14 所示。

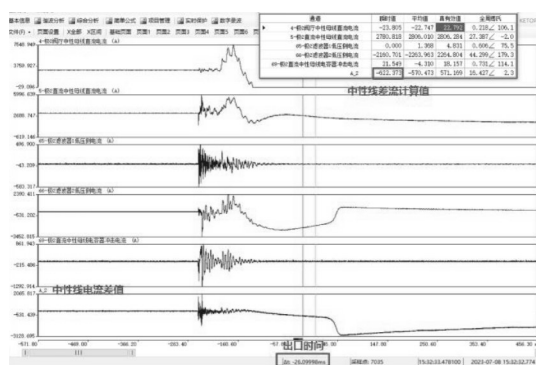


图 14 极 II 中性母线差动保护动作录波图
Fig. 14 Differential protection recording waveform of Pole II neutral bus

3.6 故障过程复现

综合上述检查试验和动作分析,梳理出故障过程和保护动作情况。

1) 第 1 阶段(雷击后 40 ms),过电压放电阶段

直流线路发生雷击,造成线路电压和电流异常、极 II 中性母线电压突升并引发周期振荡,造成 022LB 直流滤波器 L_1 电抗器高端产生过电压,引起 L_1 电抗器高端 A_1 、 A_2 避雷器动作,导致 L_1 电抗器支柱绝缘子对地闪络放电。由于飘弧、弧根移动等原因,电弧在电抗器铝制吊架底部、辅助线圈环氧桶外表面产生放电灼烧痕迹,放电路径为电抗器低压侧—铝制吊架—绝缘子上部区域—绝缘子外表面—地,放电路径如图 15 所示。 L_1 电抗器低端绝缘子故障短路电流引起极 II 022LB 直流滤波器差动保护 II 段动作,极 II 换流阀闭锁(雷击后 40 ms),并执行极隔离指令,022LB 直流滤波器 A_1 、 A_2 避雷器各动作 1 次。

2) 第 2 阶段(雷击后 151 ms),极差动保护动作

极 II 换流阀闭锁后,执行极隔离操作时,由于极 II I_{DNE} 大于 NBS 断流能力,0020 开关无法分闸,极 I 直流电流通过 0020 开关、极 II 直流滤波器故障点形成电流回路,极 II I_{DNE} 一直存在, I_{DL} 已降为 0,极 II 极差保护动作(雷击后 151 ms)。

3) 第 3 阶段(雷击后 179 ms),中性母线差动保护动作

极 II 022LB 直流滤波器尾端电磁式 CT(Z_{12} 、 T_4)故障时流过直流分量电流较大,导致 CT 饱和,中性母线差动保护出现差流动作出口(雷击后 179 ms)。

4) 第 4 阶段(雷击后 2 624 ms),故障隔离

极 II I_{DNE} 电流降低到 2 450 A 以下,0020 开关分闸(雷击后 2 624 ms),故障点隔离后极 II I_{DNE} 逐渐降至 0。

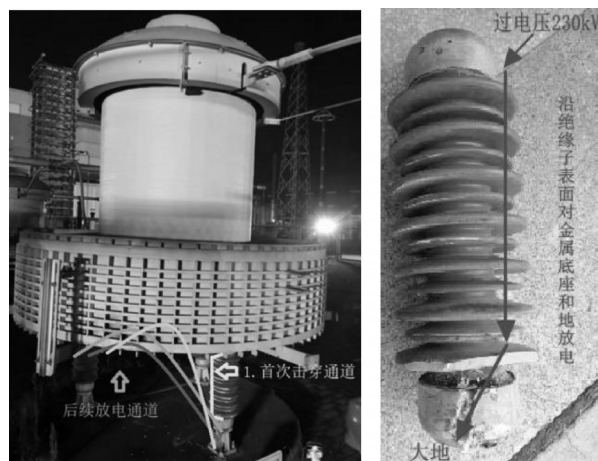


图 15 L_1 电抗器支柱绝缘子放电路径
Fig. 15 Discharge path of L_1 reactor support insulator

故障时序图如图 16 所示。

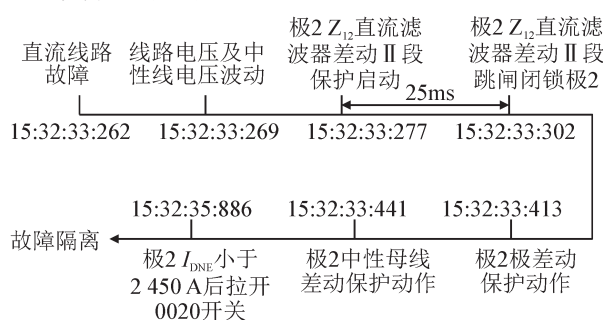


图 16 故障时序图
Fig. 16 Time sequence diagram of fault

4 故障原因论证

4.1 历次线路故障影响分析

统计换流站历年来直流线路再启动时引起中性母线电压升高的情况,如表 5 所示。可以看出,本次直流线路雷击引起的中性母线电压值最大、幅度最高,且正值梅雨季节连续阴雨,空气相对湿度达 93%,绝缘子闪络耐受电压水平降低,更易引发闪络放电^[22]。

综合该站历次故障,并借鉴其他换流站中性区域电压升高故障,中性区域设备的绝缘裕度选择、配合、校核,对预控、抑制中性母线过电压至关重要。

表5 历次中性母线电压升高统计表
Table 5 Statistics table of increased neutral bus voltage rising in each instance

时刻	故障原因	极Ⅱ U_{DN} 范围/kV		极Ⅱ U_{DL} (极Ⅱ U_{DN} 最高波峰时)/kV	电压波动区间内 M_{ax} (极Ⅱ U_{DN} -极Ⅱ U_{DL})/kV
2013.6.24 19:02:38	极Ⅰ线路再启动	-40.171	24.367	-461.384	556.132
2014.1.24 12:16:07	极Ⅰ线路再启动	-35.712	21.085	-493.166	532.996
2014.1.24 12:41:16	极Ⅰ、极Ⅱ线路再启动	-39.386	54.139	-90.923	377.845
2016.6.30 16:41:34	极Ⅰ线路再启动	-47.856	33.375	-438.032	544.337
2016.7.19 2:53:30	极Ⅰ线路再启动	-53.354	33.304	-405.007	559.014
2023.7.8 15:32:33	直流线路雷击	-40.368	62.451	-517.968	644.926

1)2014年5月25日,某换流站直流极Ⅱ线路保护动作再启动,极Ⅰ中性线冲击电容器承受过电压发生故障,导致极Ⅰ闭锁。故障原因为直流线路接地时,中性母线电压均有抬高现象^[23],过电压幅值大于电容器耐受冲击水平。通过仿真模拟分析,发现直流线路接地时存在中性母线电压振荡现象。

2)2021年7月30日,某换流站极Ⅰ线路发生故障导致极Ⅰ闭锁,过程中极Ⅱ中性线冲击电容器承受过电压发生故障,导致极Ⅱ闭锁。故障原因为

极Ⅰ线路故障时,站内中性母线暂态电压升至67 kV,过电压造成电容器故障^[24]。通过暂态过电压仿真计算,极Ⅰ线路故障后双极中性母线暂态过电压高于以往类似故障时的过电压水平。

4.2 不同直流站L₁电抗器绝缘子选型对比分析

选取同一时期、不同区域、具有一定代表性的4座换流站,与本次故障的换流站A配置的L₁电抗器绝缘子选型进行比对,发现绝缘子选型存在明显不同,如表6所示。

表6 不同站L₁电抗器支柱绝缘子对比
Table 6 Comparison of L₁ reactor support insulators of different substations

022LB L ₁ 电抗器	故障A 逆变站	B 逆变站	C 逆变站	D 逆变站	E 整流站
型号	LKKT-35-86.4-12.923	LKKT-20-111-5.1	LKGL-330-43.43-7	FHR550/86/6.46	TDL21.3-1.876-W
额定电压/kV	35	20	330	11.1	21.3
支持瓷柱总高度/mm	559	1 057	3 000	790	1 702
绝缘子爬距/mm	1 346	1 460	—	—	3 353
雷电冲击耐受电压/kV	250	250	1 300	—	—
操作冲击耐受电压/kV	190	—	950	—	—
工频耐受电压/kV	120	135	570	—	—

1)本次故障的A逆变站。L₁电抗器型号为LKKT-35-86.4-12.923,额定电压35 kV,支持瓷柱总高度为559 mm,绝缘子爬距为1 346 mm。

2)华东B逆变站。每极包括两组直流滤波器,其中24/36直流滤波器的L₁电抗器型号为LKKT-20-111-5.1,额定电压20 kV,支持瓷柱总高度为1 057 mm,绝缘子爬距为1 460 mm。

3)华东C逆变站。L₁电抗器型号为LKGL-330-43.43-7,额定电压330 kV,支持瓷柱总高度3 000 mm。

4)华东D逆变站。L₁电抗器型号为FHR550/86/6.46,额定电压11.1 kV,支持瓷柱总高度为790 mm。

5)华中E整流站。12/36直流滤波器的L₁电抗器型号为TDL21.3-1.876-W,支持瓷柱总高度为1 702 mm。相比其他逆变站,该整流站绝缘设计水平相对较高^[25]。

通过对比,综合分析各站设备选型可以看出:

1)所有022LB直流滤波器的L₁电抗器中,本次故障的A逆变站的支持瓷柱高度最小,为559 mm。

2)B逆变站电抗器额定电压为20 kV,比A逆变站电抗器额定电压35 kV低,但绝缘子爬距远大

于A逆变站,支持瓷柱总高度是A逆变站的1.89倍。雷电冲击耐受电压与工频耐受电压比值为1.85,小于A逆变站比值2.08。

3)D逆变站电抗器额定电压为11.1 kV,比A逆变站电抗器额定电压35 kV更低,支持瓷柱总高度是A逆变站的1.41倍。

4.3 理论计算与仿真试验

因本次故障换流站直流滤波器L₁电抗器高低压端均无故障录波采样,故采用理论计算和仿真模拟对其过电压进行分析。

1)理论计算

为确定直流线路雷击引起中性线电压升高后022LB直流滤波器L₁电抗器高低压端过电压情况,根据直流滤波器等效模型,取直流中性母线电压峰值62.5 kV时刻开展理论计算^[24,26],对该时刻的极Ⅰ、极Ⅱ直流中性母线电压和极Ⅰ、极Ⅱ高压直流母线电压进行谐波和相位分解,通过计算非周期分量、基波和2至13次谐波周期分量的电压瞬时值,进而计算出全分量电压瞬时值,模型和等效电路如图17所示。

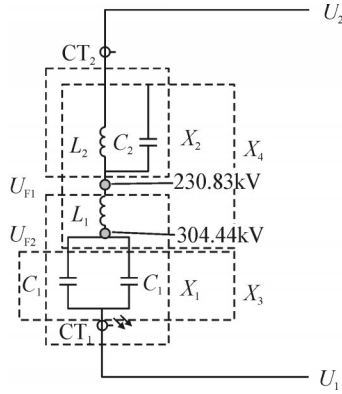


图 17 过电压理论计算模型图

Fig. 17 Overtoltage theoretical calculation model diagram

由图 17 可得,对于各次周期分量, U_F 可计算为

$$U_{F_{1,x}} = U_2 \cos \alpha - \frac{(U_2 \cos \alpha - U_1 \cos \alpha)X_2}{X_1 + X_2} = \frac{U_1 \cos \alpha X_2 + U_2 \cos \alpha X_1}{X_1 + X_2} \quad (7)$$

$$U_{F_{1,y}} = U_2 \sin \alpha - \frac{(U_2 \sin \alpha - U_1 \sin \alpha)X_2}{X_1 + X_2} = \frac{U_1 \sin \alpha X_2 + U_2 \sin \alpha X_1}{X_1 + X_2} \quad (8)$$

$$U_{F_{2,x}} = U_2 \cos \alpha - \frac{(U_2 \cos \alpha - U_1 \cos \alpha)X_4}{X_3 + X_4} = \frac{U_1 \cos \alpha X_4 + U_2 \cos \alpha X_3}{X_3 + X_4} \quad (9)$$

$$U_{F_{2,y}} = U_2 \sin \alpha - \frac{(U_2 \sin \alpha - U_1 \sin \alpha)X_4}{X_3 + X_4} = \frac{U_1 \sin \alpha X_4 + U_2 \sin \alpha X_3}{X_3 + X_4} \quad (10)$$

此处计算的为 U_{F1} 和 U_{F2} 点的各次周期分量瞬时值,对于 U_{F1} 和 U_{F2} 点的全分量瞬时值计算为

$$U_{F_{1sum}} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{13} U_{F_{10,x}}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{13} U_{F_{10,y}}\right)^2} + U_{2dc} \quad (11)$$

$$U_{F_{2sum}} = \pm \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{13} U_{F_{20,x}}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{13} U_{F_{20,y}}\right)^2} + U_{2dc} \quad (12)$$

理论计算结果如下:

①极 I、极 II 中性母线电压的 4 次谐波分量最大,极 I 高压直流母线电压的非周期分量和 2 次谐波分量最大,极 II 高压直流母线电压的非周期分量和 4 次谐波分量最大。

②极 II 022LB 直流滤波器 L_1 电抗器尾端对地电压为 -230.831 kV, L_1 电抗器首端对地电压为 -304.44kV。

③极 I 011LB、012LB 直流滤波器和极 II 021LB 直流滤波器 L_1 电抗器首、尾端电压在 18.2 kV 至 83.1 kV 之间,远小于 022LB 直流滤波器 L_1 电抗器首、尾端电压。

2) 仿真模拟

采用 EMTP/ATP 程序(electro-magnetic transient program, the alternative transients program)对过电压过程进行仿真模拟^[27-29],雷电流参数按照直流线路侵入换流站的实际电流跌落 2 521 A 模拟,仿真结果如下:

①在保守假定雷电流=2 521 A 情况下,在极 II 022LB 直流滤波器内 L_1 电抗器与 L_2 电抗器连接处 (U_{F2})预期雷电侵入过电压幅值为 223.1 kV,若考虑直流滤波器避雷器,则该处过电压幅值将超过 188 kV。

②在雷电流作用下,极 II 022LB 直流滤波器高压避雷器 A_1 和低压避雷器 A_2 均会动作, L_1 并联避雷器 A_3 不动作。

③雷击极 I 线路时,对比极 I、极 II 直流滤波器过电压,极 II 过电压幅值更高^[30]。

4.4 极 II 中性线周期性振荡

极 II 中性线电压振荡波形如图 18 所示,从线路雷击时刻 T_1 至极 II 直流滤波器保护 ESOF(emergency shutdown of flow)命令时刻 T_2 之间的时间差约为 40 ms,期间中性线电压振荡了约 7 个周波,每个周波的频率在 125 Hz ~ 227 Hz 不等,为 2 倍波和 4 倍波,中性线振荡电压类似于工频过电压。

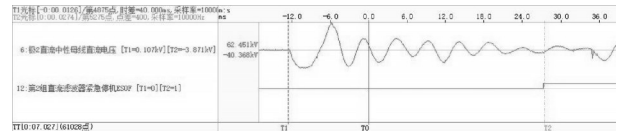


图 18 中性线电压振荡波形

Fig. 18 Voltage oscillation waveform of neutral line

本次雷击后极 II 中性母线电压呈现长周期过电压振荡特点。对比图 19 极 I 和图 20 极 II 故障录波显示,雷击后极 I 直流电流 I_{DL1} 在 479 A ~ 3 978 A 间波动,极 II 极线路电流 I_{DL2} 基本稳定在 2 950 A 左右。由此,在中性线产生了波动差流,因接地电阻是固定的,中性母线电压 U_{DN} 的变化取决于中性线流过的直流电流^[31-33]。因此,可以认为中性线出现波动的差流,是引起中性线电压振荡的原因。

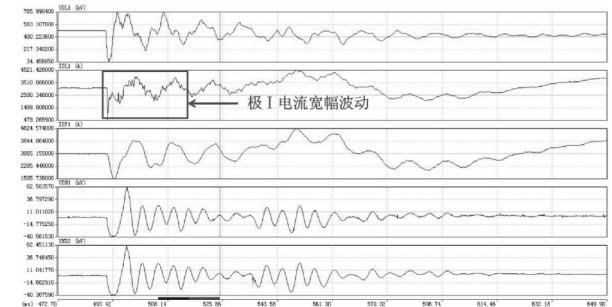


图 19 极 I 直流故障录波图

Fig. 19 Poel I fault recording waveform

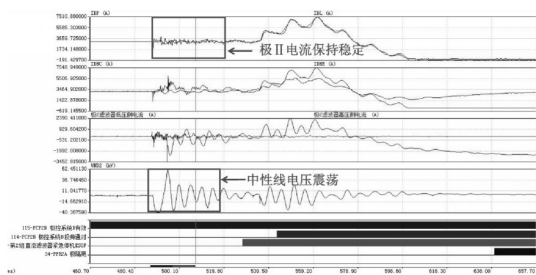


图 20 极 II 直流故障录波图
Fig. 20 Pole II fault recording waveform

4.5 故障原因

通过上述检查、试验、分析、计算和仿真,本次换流站极 II 闭锁故障原因是雷击直流线路事件引起极 II 直流母线和中性线母线电流波动,导致中性母线产生振荡过电压(电压幅值最高达 62.5 kV,振荡频率为接近工频的 2 次和 4 次谐波),与历次故障影响对比分析,本次中性线电压波动较以往最为剧烈,在此振荡过电压作用下,022LB 直流滤波器 L_1 电抗器低压端计算和仿真过电压分别为 231 kV、188 kV。

经查阅工程设计文件和设备招标技术规范,均只提出电抗器的雷电耐受水平和操作耐受水平,未提出工频电压耐受水平,该参数由电抗器厂家自行确定,故障绝缘子雷电和操作耐受电压与工频耐受电压差距较大,为 2.08 倍和 1.58 倍。而该绝缘子工频湿态耐受电压为 125 kV(故障绝缘子试验值为 120 kV),绝缘子工频耐受水平低于本次雷击振荡过电压工况实际耐受电压,从而导致支柱绝缘子闪络击穿。过电压产生时,与 L_1 电抗器低压端并联的避雷器未正确动作且被击穿,较高的过电压值造成 L_1 电抗器闪络放电。

5 防范措施

故障后,对换流站在运同类型电抗器支柱绝缘子设计进行全面排查,结合设备运行环境和污秽等级,将直流滤波器 L_1 支柱绝缘子更换为干弧距离大于 600 mm 的绝缘子,并经绝缘试验考核通过,保证其湿态工频闪络电压 ≥ 125 kV。

1)结合直流滤波器过电压电磁暂态仿真计算,全面开展特殊工况下中性区域设备绝缘耐受能力校核^[34],并对设计选型阶段电抗器等设备雷电耐受水平、操作耐受水平和工频耐受水平等参数提出要求。

2)充分运用理论计算和仿真模拟结果,全面排查中性区域设备绝缘耐受能力^[35],结合不同换流站设备选型配置情况比对,提升直流滤波器电抗器支

柱绝缘子本质安全水平。

3)直流线路扰动工况下,中性线区域设备的运行工况进一步恶化,承受的考验更加严峻,应认真开展直流线路故障引发极中性区域电压升高工况的理论计算和仿真模拟,全面校核设备绝缘裕度和绝缘配合^[36-37],保证故障时避雷器等一次设备和二次保护装置正确、可靠、快速动作,提升设备和电网安全性、可靠性。

6 结语

换流站直流中性母线过电压产生的原因较多、机理复杂,如交流网侧(包括换流变)故障、直流设备故障(如阀控系统故障、换流阀内部故障、投退滤波器、紧急闭锁等)、直流线路侧接地或雷击等。当直流线路发生接地故障时,会引起直流双极过电压,存在接地的直流极区域电抗器会承受过电压的冲击。当直流线路发生雷击时,会引起线路电压和电流陡增,其波形和大小由雷电波的幅值和极性决定,如果产生的过电压将对中性区域设备及其绝缘造成严重影响。在中性区域设备特别是滤波器电抗器设计选型时,不但应考虑雷电耐受水平和操作耐受水平,还应全面校核其工频耐受水平,减小雷电值与操作耐受电压值和工频耐受电压值的差值,切实从源头防范、杜绝、消除设备隐患和故障,提升中性区域设备本质安全水平。

参考文献

- [1] 刘家军,谭雅岚,张年鲲. ± 500 kV 换流站无功补偿运行特性与优化策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(1): 52-58.
LIU Jiajun, TAN Yalan, ZHANG Niankun. Study on reactive power compensation operation characteristics and optimization strategy of ± 500 kv converter station[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020, 41(1): 52-58.
- [2] 张宗扬,康超,王致远,等. 接地故障下特高压直流换流站过电压特性及影响因素研究[J]. 高压电器, 2025, 61(3): 144-151.
ZHANG Zongyang, KANG Chao, WANG Zhiyuan, et al. Study on overvoltage characteristics and influencing factors of UHVDC converter station in grounding fault condition[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(3): 144-151.
- [3] 肖鲲,高岩,雷晓燕,等. ± 800 kV 布拖换流站声环境影响分析[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(9): 47-54.
XIAO Kun, GAO Yan, LEI Xiaoyan, et al. Analysis on acoustic environmental impact of ± 800 kV Butuo converter station [J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(9): 47-54.

- [4] 李梓玮,许丽娟. 基于概率神经网络的直流滤波器电容器开路故障定位方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(1): 48-56.
LI Ziwei, XU Lijuan. Open-circuit fault location method of DC filter capacitor based on probabilistic neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(1): 48-56.
- [5] 方晓强,刘元庆,张啸天. 基于移动麦克风阵列的换流站异常声源定位方法[J]. 浙江电力, 2024, 43(1): 108-116.
FANG Xiaoqiang, LIU Yuanqing, ZHANG Xiaotian. An approach for localizing abnormal sound sources in converter stations using mobile microphone arrays[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(1): 108-116.
- [6] YANG Ming, SIMA Wenxia, HAN Xue, et al. Failure analysis and maintenance of a surge capacitor on the neutral bus in a ± 500 kV HVDC converter station[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(6): 852-860.
- [7] 雷潇,廖文龙,白欢,等. 一起换流站直流滤波器干式电抗器过电压损坏分析[J]. 电瓷避雷器, 2022(4): 140-145.
LEI Xiao, LIAO Wenlong, BAI Huan, et al. Fault analysis of dry-type air-core reactor of DC filter in HVDC substation caused by overvoltage[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(4): 140-145.
- [8] 毛颖科,张天枫,朱正一,等. ± 500 kV 直流换流阀用饱和电抗器温度场与电场仿真研究[J]. 高压电器, 2024, 60(1): 128-135.
MAO Yingke, ZHANG Tianfeng, ZHU Zhengyi, et al. Simulation study on thermal and electric field of saturable reactor for ± 500 kV converter valve[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1): 128-135.
- [9] 贾跟卯,赵启承,骆福权,等. 直流换流站高通 HP3 型交流滤波器电抗器匝间故障监测及保护[J]. 高压电器, 2024, 60(1): 136-143.
JIA Genmao, ZHAO Qicheng, LUO Fuquan, et al. Monitoring and protection on inter-turn short circuit fault for reactor of high pass 3rd-order AC filter in DC convert station[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1): 136-143.
- [10] 杨国华,王文豪,陈蕾,等. 平波电抗器绝缘校核仿真的高效降阶算法研究[J]. 高压电器, 2023, 59(5): 68-74.
YANG Guohua, WANG Wenhao, CHEN Lei, et al. Efficient algorithm study of reduced order modeling for smoothing reactor insulation verification[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(5): 68-74.
- [11] HAN Y. Influence of modeling methods on the calculated lightning surge overvoltages at a UHVDC converter station due to backflashover[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1090-1095.
- [12] 电力系统污区分级与外绝缘选择标准: Q/GDW 152—2006[S]. 2006.
- [13] 绝缘子表面憎水性测量导则: GB/T 24622—2022[S]. 2022.
Guidance on the measurement of hydrophobicity of insulator surfaces: GB/T 24622—2022[S]. 2022.
- [14] 张耀月. 伞裙结构对超(特)高压电流互感器闪络特性影响的研究[J]. 电力安全技术, 2024, 26(12): 73-78.
ZHANG Yaoyue. Study on influence of umbrella-skirt structure upon the flashover characteristics of UHV current transformer[J]. Electric Safety Technology, 2024, 26(12): 73-78.
- [15] 王生杰,吴对平,李渊,等. 750 kV 高压并联电抗器局放检测异常分析[J]. 高压电器, 2023, 59(8): 78-83.
WANG Shengjie, WU Duiping, LI Yuan, et al. Abnormality analysis of 750 kV high voltage shunt reactor through partial discharge detection[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(8): 78-83.
- [16] 吴伟丽,陈文梅,李磊,等. 电抗器开断过电压影响因素关键性辨识[J]. 高压电器, 2023, 59(6): 172-179.
WU Weili, CHEN Wenmei, LI Lei, et al. Key identification of influencing factors of reactor switching over-voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(6): 172-179.
- [17] 孙勇,刘青松,谷裕,等. ± 800 kV 特高压柔性直流桥臂电抗器设计方法[J]. 高压电器, 2023, 59(11): 217-223.
SUN Yong, LIU Qingsong, GU Yu, et al. Design method of bridge arm reactor for ± 800 kV UHV flexible DC[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 217-223.
- [18] 输变电设备状态检修试验规程: Q/GDW 1168—2013[S]. 2020.
- [19] 电力设备预防性试验规程: DL/T 596—2021[S]. 2021.
Preventive test code for electric power equipment: DL/T 596—2021[S]. 2021.
- [20] High-voltage test techniques — Part 1: General definitions and test requirements: IEC 60060-1—2010[S]. 2010.
- [21] 张择策,王秀丽,侯雨伸. 特高压直流换流站的避雷器经济配置方案[J]. 电力建设, 2015, 36(6): 1-6.
ZHANG Zece, WANG Xiuli, HOU Yushen. Economical arrester protection scheme and arrester parameters selection for ± 800 kV UHV DC converter station[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(6): 1-6.
- [22] 吴超,遇心如,孙金鸽,等. 特高压并联电抗器中性点小电抗的过电压及绝缘水平分析[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(2): 11-22.
WU Chao, YU Xinru, SUN Jing, et al. Analysis of the over-voltage and insulation level of small reactance at neutral point of UHV shunt reactors[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2021, 37(2): 11-22.
- [23] 王运超,余占清,牟亚,等. 特高压直流中性母线过电压特性及抑制措施[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6765-6773.

- WANG Yunchao, YU Zhanqing, MU Ya, et al. Neutral bus overvoltage characteristics and suppression measures for UHVDC converter stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6765-6773.
- [24] 张宏伟, 杨晓静, 姬凯, 等. 暂态过电压对双极中性线冲击电容器绝缘性能影响分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(3): 61-68.
- ZHANG Hongwei, YANG Xiaojing, JI Kai, et al. Analysis on influence of transient overvoltage on insulation performance of bipolar neutral line surge capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(3): 61-68.
- [25] 周沛洪, 何慧雯, 戴敏, 等. ± 1100 kV 直流换流站避雷器布置、参数和设备绝缘水平的选择[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2871-2884.
- ZHOU Peihong, HE Huiwen, DAI Min, et al. Selection of arresters arrangement, parameters and apparatuses insulation levels for ± 1100 kV DC converter station[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2871-2884.
- [26] 邓永坤, 马建军, 朱森, 等. 双极直流配电系统中的单极故障重构: 影响因素与重构方案[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(5): 1860-1873.
- DENG Yongkun, MA Jianjun, ZHU Miao, et al. Monopolar fault reconfiguration in bipolar DC distribution system: influence factors and reconfiguration scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(5): 1860-1873.
- [27] 张宏伟. 750 kV HGIS 站隔离开关操作引起的 VFTO 仿真研究[J]. 电力安全技术, 2025, 27(2): 28-33.
- ZHANG Hongwei. Simulation study on VFTO caused by isolating switchgear operation in 750 kV HGIS station[J]. Electric Safety Technology, 2025, 27(2): 28-33.
- [28] 张宏伟. 内部异物对超高压 HGIS 隔离开关触头放电影响分析[J]. 农村电气化, 2025(6): 48-55.
- ZHANG Hongwei. Analysis of the influence of internal foreign objects on the discharge of ultra-high voltage HGIS disconnector contacts[J]. Rural Electrification, 2025(6): 48-55.
- [29] 张耀月. ± 800 kV 直流分压器低能量放电故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1): 98-105.
- ZHANG Yaoyue. Analysis on low energy discharge fault analysis of ± 800 kV DC voltage divider[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 98-105.
- [30] 刘守豹, 张星海, 曾宏, 等. 特高压直流接地极线路内部过电压机理及特性分析[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2366-2372.
- LIU Shoubao, ZHANG Xinghai, ZENG Hong, et al. Mechanism and characteristics of internal overvoltage in UHVDC grounding electrode line[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2366-2372.
- [31] 谢施君, 苏少春, 何慧雯, 等. 高压直流输电接地极线路内过电压及绝缘配置[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2331-2337.
- XIE Shijun, SU Shaochun, HE Huiwen, et al. Internal overvoltage and insulation coordination of electrode line in HVDC project[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2331-2337.
- [32] 罗新, 邓俊文, 邓京, 等. 换流站交流滤波器用避雷器过电压仿真建模因素[J]. 南方电网技术, 2021, 15(2): 99-106.
- LUO Xin, DENG Junwen, DENG Jing, et al. Modeling factors for overvoltage simulation of lightning arrester for AC filter in converter station[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(2): 99-106.
- [33] 裴岳, 吕思颖, 秦昕, 等. 特高压直流输电系统换流站故障过电压研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 149-154.
- PEI Chan, LYU Siying, QIN Xin, et al. Study on fault overvoltage of converter station of UHVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 149-154.
- [34] 高压直流换流站设计规范: GB/T 51200—2016[S]. 2017.
- Code for design of HVDC converter station: GB/T 51200—2016[S]. 2017.
- [35] 国家电网公司发布. 防止直流换流站单双极强迫停运二十一项反事故措施[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [36] 绝缘配合第 14 部分: 高压直流系统 AC/DC 滤波器绝缘配合: GB/T 311. 14—2024[S]. 2024.
- Insulation coordination—Part 14: Insulation coordination for AC/DC filters of HVDC system: GB/T 311. 14—2024[S]. 2024.
- [37] 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.

作者简介:

张宏伟(1976—),男,正高级工程师、高级技师,研究方向为超特高压电磁特性与新能源并网特性。E-mail:gs_zhanghw@163.com。