

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2025.03.008

暂态过电压对双极中性线冲击电容器绝缘性能影响分析

张宏伟¹, 杨晓静², 姬凯², 李宇²

(1. 国网甘肃省电力公司金昌供电公司, 甘肃 金昌 737100; 2. 西安西电电力电容器有限责任公司, 西安 710082)

摘要: 中性线冲击电容器的主要作用是降低低次谐波和抑制雷电冲击, 但是当冲击电压达到一定值时, 能量会在短时间内大量积聚, 导致电容器内部绝缘击穿并爆炸。本文分析了某 ± 500 kV 直流换流站双极中性母线暂态过电压对双极冲击电容器组绝缘性能的影响, 通过放电故障现象、特征分析和解体试验, 论证了双极中性母线过电压及绝缘配合设计、暂态过电压对中性母线冲击电容器绝缘劣化影响等问题, 并提出了防范措施, 对直流换流站安全运行具有重要借鉴意义。

关键词: 直流换流站; 冲击电容器; 放电; 暂态过电压; 绝缘配合

Analysis on Influence of Transient Overvoltage on Insulation Performance of Bipolar Neutral Line Surge Capacitor

ZHANG Hongwei¹, YANG Xiaojing², JI Kai², LI Yu²

(1. Jinchang Electric Power Company, State Grid Gansu Electric Power Company, Gansu Jinchang 737100, China; 2. Xi'an XD Power Capacitor Co., Ltd., Xi'an 710082, China)

Abstract: The main function of neutral line surge capacitor is to reduce low order harmonics and suppress lightning surge. However, when the surge voltage reaches a certain value, the energy will accumulate in a large amount in a short period of time, causing insulation breakdown and explosion inside the capacitor. In this paper, the influence of transient overvoltage on the insulation performance of bipolar surge capacitor at a ± 500 kV DC converter station is analyzed. Through the analysis of discharge fault phenomena and characteristics analysis as well as disassembly tests, such issues as the design of bipolar neutral bus overvoltage and insulation coordination, as well as the influence of transient overvoltage on the insulation degradation of neutral bus surge capacitor are demonstrated. Moreover, the preventive measures are proposed, which have important reference significance for safe operation of DC converter station.

Keywords: DC converter station; surge capacitors; discharge; transient overvoltage; insulation coordination

0 引言

直流换流站中性线冲击电容器的主要作用是滤除换流器产生的低次谐波和释放接地极线路遭受雷击时的雷电冲击电流^[1-7]。当其遭受过电压或过电流冲击时, 内部能量大量聚集。由于中性线冲击电容器本身具有释放电流的功能, 因此过电流冲击对其影响相对较小^[8-10]。但过电压冲击会在短时间内积聚大量能量, 导致内部绝缘击穿并造成电容器着火爆炸^[11-14]。

本文分析了某 ± 500 kV 直流换流站双极中性母线暂态过电压对双极冲击电容器组绝缘性能的影响,

通过放电故障现象、特征分析和解体试验, 论证了双极中性母线过电压及绝缘配合设计、暂态过电压对中性母线冲击电容器绝缘劣化影响等问题, 并提出了防范策略, 对直流换流站安全运行具有重要借鉴意义。

1 事故概况

某 ± 500 kV 换流站是“西电东送”三峡水电送入“三华”地区主干道的受端换流站, 是长江三峡输变电工程的重要组成部分, 也是实现全国能源资源配置战略目标的重要环节, 也是实现“双碳”目标的有力支撑。输电线路全长 860 km, 设计单极输送容

量 150 万 kW,双极输送容量 300 万 kW,平均每年向华东地区输送水电 100 多亿 kW·h^[15]。

2021 年 7 月 30 日 15 时 37 分,该换流站极 I 线路故障造成中性母线电压升至 67 kV,导致极 II 中性母线冲击电容器击穿爆炸,中性线差动保护动作,极 II 闭锁。直流双极相继发生闭锁,中断送华东电力 270 万 kW,联切三峡发电机组 200 万 kW,致使华东电网频率下跌到 49.85 Hz。

1.1 故障设备概况

发生故障的极 II 中性母线冲击电容器组由 4 只电容器组成,该电容器组由国外某工业能源生产集团生产,出厂日期为 2011 年 6 月,投运日期为 2013 年 6 月。参数见表 1。

极 II 中性线冲击电容器共 4 只,6 号、8 号和 5 号、7 号分别并联后再串联起来,布置位置见图 1,结构示意图见图 2。

表 1 故障电容器参数表
Table 1 Parameters of faulty capacitor

参数	数值	参数	数值
设备型号	Cddb-141	操作冲击耐压水平/kV	92(电容器组两端) 92(高压端)
额定电压(DC)/V	17 700.0	最小爬距/mm	750(电容器组两端) 750(高压端)
额定容量/ μ F	16	主要谐波电压/kV	8.6(2次谐波) 4.1(3次谐波) 0.4(6次谐波)
额定电流/A	180	主要谐波最大连续电流/A	85.7(2次谐波) 61.2(3次谐波) 11.0(6次谐波)
温度等级/ $^{\circ}$ C	-20		
最大连续直流电压/kV	3		
内部放电电阻/M Ω	6		
熔丝	无内熔丝		
出厂日期	2011 年		
投产日期	2013 年 6 月		

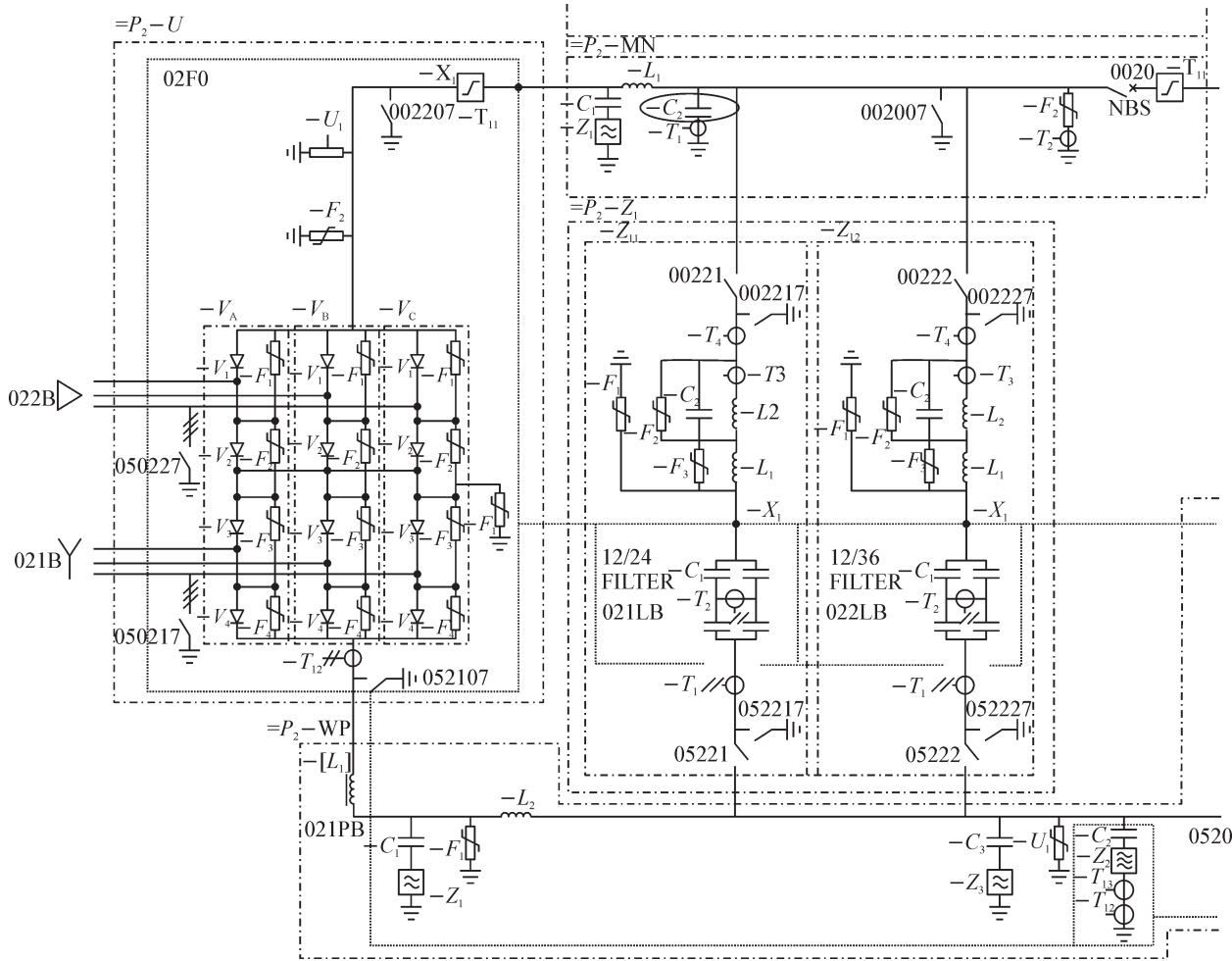


图 1 冲击电容器电气位置
Fig. 1 Electrical position of surge capacitor

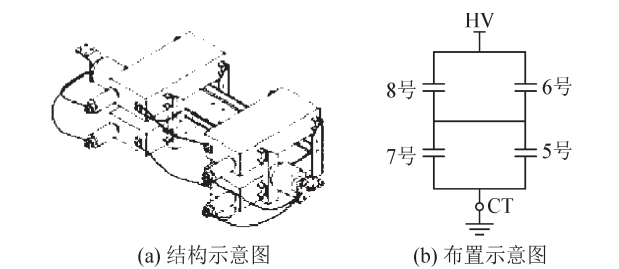


图2 电容器组结构示意图
Fig. 2 Structural schematic diagram of capacitor bank

电容器内部由电容元件并联后再串联组成,串联电容元件间连接有放电电阻,每个电容元件电容量为 13.7 μF 。内部结构和电路见图 3。电容元件数量为

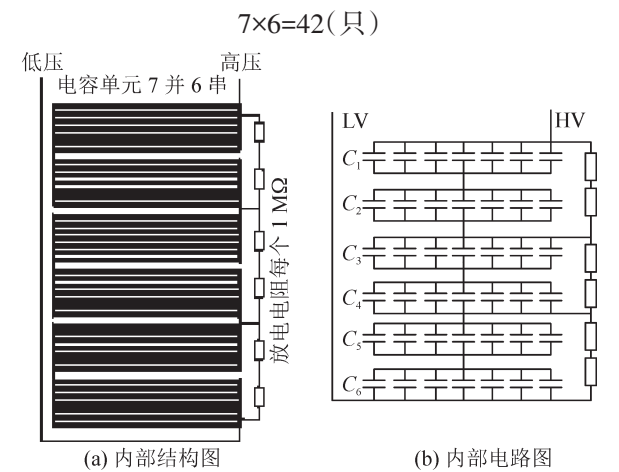


图3 电容器内部结构和电路图
Fig. 3 Internal structure and circuit diagram of capacitor

1.2 故障概况

故障当日,站内天气晴。直流系统双极 270 万 kW 运行正常,交流系统运行正常。

15 时 37 分,直流极 I 线路出口处(距换流站 64.2 km)故障,导致中性母线暂态电压升至 67 kV,流过电容器的电流最高达 7 030 A,过电压造成 5 号、6 号和 8 号 3 只电容器绝缘相继击穿,过电流引发内部导电排熔断并造成各元件严重碳化。

现场检查发现,极 II 中性线冲击电容器炸裂着火。故障电容器组下方右侧套管与外壳分离,内部绝缘油喷出,喷溅到对面管母和过零振荡装置电抗器(PLC)上,灼伤下方地面。电容器组下部左侧严重鼓包,并伴随着液体流出。电容元件绝缘闪络、本体鼓包,一支套管崩出并着火爆炸,引燃的烟气喷射到对侧的 PLC 电抗器上。3 组电容器中,5 号本体固定把手下部烧出一个孔洞,面积约为 4 cm×2 cm,且器身鼓肚严重;6 号高压套管炸出、器身鼓肚;8 号虽外观无异常,但本体有轻微鼓包。电容器现场位置和着火情况见图 4 和图 5。

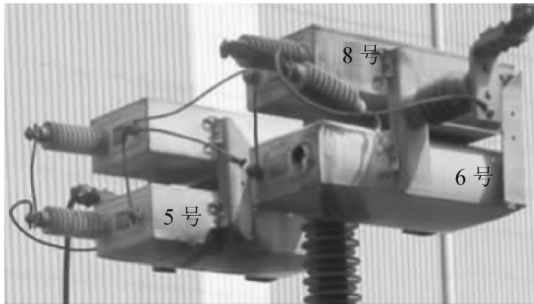


图4 电容器现场位置图
Fig. 4 Site location diagram of capacitor

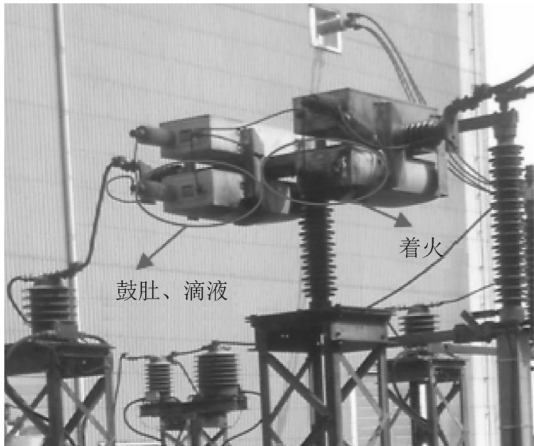


图5 电容器着火现场图
Fig. 5 Site firing diagram of capacitor

2 试验分析

2.1 检查试验

解体检查前,用电容测试仪和兆欧表测量故障电容器的电容量和绝缘电阻值^[16-18],结果见表 2。

表2 电容量和绝缘电阻值测量表
Table 2 Measurement meter of capacitance and insulation resistance

电容器	电容量/ μF	绝缘电阻/ $\text{M}\Omega$
5号	17.8	6
6号	无法测试	两极短路
8号	无法测试	两极短路

从测试数据来看,6 号和 8 号电容器呈短路状态,疑似被烧毁击穿;5 号电容器电容量和绝缘电阻在正常值范围,貌似设备正常。

2.2 解体检查

1)排放电容器浸渍液

5 号电容器外壳可见明显烧穿孔洞;6 号电容器高压瓷端子炸飞,密封失效,电容器内部浸渍液已经全部泄漏,无需再排放;8 号电容器密封完好,需要在电容器外壳上开孔将内部浸渍液排出。浸渍液排放过程中,用两个针筒采集了 8 号电容器的浸渍液样品,该样品呈现蓝紫色,而正常浸渍液应该为无色液体,表明浸渍液已被严重污染,见图 6。



图6 8号电容器放浸渍液
Fig. 6 Drainage of impregnating solution of 8# capacitor

2)切割电容器端盖拔出电容器心子

拔出电容器心子发现,5号心子对外壳烧熔处有明显放电通道,6号心子碳化油泥非常严重,8号故障点不明显。

3)分解电容器心子

①5号电容器心子

5号电容器心子器身有贯穿性放电通道,处于放电通道内的个别电容元件被烧毁,有母线碳化污泥迹象。检查测量单体电容发现,自上往下第3串有4个电容元件烧毁并断路(测量其电容值为 $40\text{ }\mu\text{F}$,约 $13.7\times 3\text{ }\mu\text{F}$),第4串有3个电容元件烧毁并击穿,第6串有5个电容元件烧毁并击穿。电容器总电容值为 $17\text{ }\mu\text{F}$ 左右,单从测量结果来看,与解体前基本一致。但从检查情况来看,5号电容器已有部分电容元件击穿失效,电容量和绝缘电阻测量均未能反映出来,故障示意图见图7。

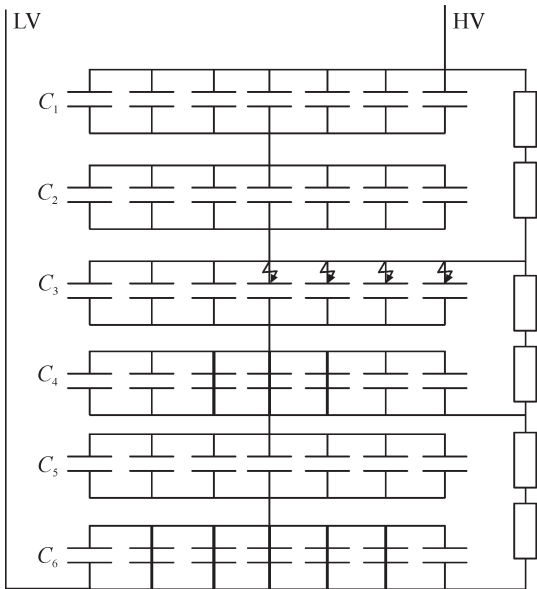


图7 5号电容器故障示意图
Fig. 7 Fault schematic diagram of 5# capacitor

②6号电容器心子

去除外包纸,可以看到碳化油泥非常严重。6号电容器心子内部低压侧接线排烧毁,从高压数第3串第1电容元件烧断鼓包,电容器心子外表布满碳化污泥,故障示意图见图8。

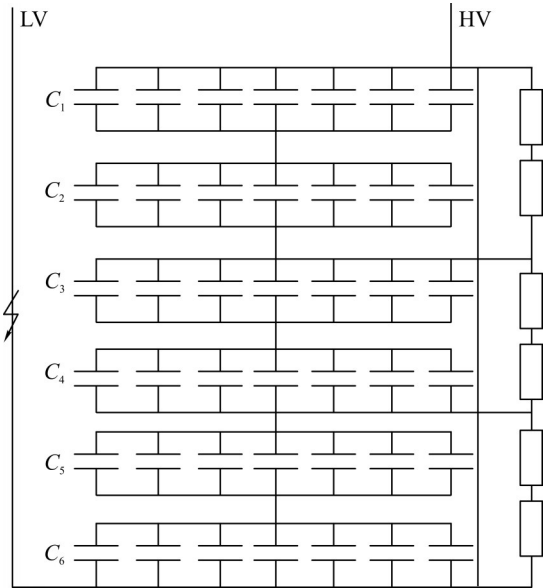


图8 6号电容器故障示意图
Fig. 8 Fault schematic diagram of 6# capacitor

③8号电容器心子

8号电容器心子碳化污泥略少,但第2串2个电容元件间有明显的放电痕迹,第6串有3个电容元件烧毁。对单个电容元件逐一检查、测量,发现6串电容单元均存在单体击穿现象,因此造成整体呈现短路状态,与解体前的测量结果基本一致,故障示意图见图9。

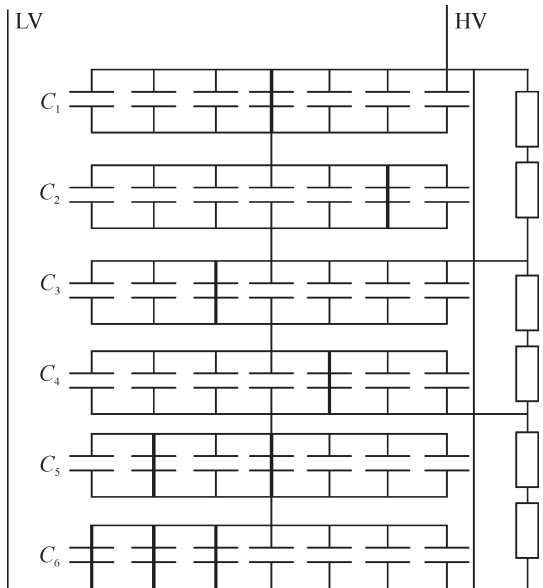


图9 8号电容器故障示意图
Fig. 9 Fault schematic diagram of 8# capacitor

2.3 异常分析

从解体检查来看,发生故障的3台电容器均存在短路通道和绝缘闪络痕迹,其中5号和6号电容器内部电容元件击穿明显,存在碳化现象,电容器心子严重烧毁;8号放电能量相对较低,可见个别电容元件烧毁,放电点较少。因此,表明主要的放电通道是5号、6号电容器,与故障现象基本一致。

结合上述试验分析,判断放电过程如下:

1)极 I 线路出口处故障,直流系统由双极平衡转换为单极运行,极 I 线路接地电流陡增,中性线电压为

$$U_{DN} = L \frac{d_i}{d_t}$$

式中: U_{DN} 表示中性线电压; L 表示等效电感; d_i/d_t 表示单位时间内电流的变化率。

由于 d_i 陡增,造成中性线电压 U_{DN} 突然上升,导致系统出现暂态过电压^[19]。

2)6号电容器心子端面沿面击穿放电。

3)5号电容器遭受的过电压值陡增,造成高压极沿着电容心子的第1串至第3串(C_1 、 C_2 、 C_3)沿面放电外部绝缘纸和器身外表构成短路通道。

4)当5号、6号电容器短路通道贯通后,极大的放电电流导致电容心子严重碳化,短时间内能量大量积聚引发本体鼓胀。

5)6号电容器鼓胀,造成高压瓷套爆炸,其放电通道被阻断。

6)6号电容器放电通道阻断后,剩余电压全部施加在8号电容器上,极大的过电压值导致8号电容器各电容元件放电击穿。

7)8号电容器放电过程中,过电流值逐步减小,主要原因是避雷器导流,以及5号、6号电容器击穿引流,因此8号电容器碳化痕迹较少,属于电压性放电。

3 电容器绝缘性能影响分析

3.1 接地时电容器的响应

对照极 I 线路故障录波图发现,直流线路经过一次全压重启和一次降压重启均失败后发生闭锁。从设备巡视结果来看,池鹭群在极 I 线路附近活动频繁,1857号极 I 导线、绝缘子、横担上及绝缘子下方地面10 m范围内有不同程度散落的鸟粪,现场见图10。鸟粪造成悬垂绝缘放电间隙不足,引发闪络,线路再启动失败后导致极 I 直流闭锁。故障录波见图11。



图10 极 I 直流线路故障点导线和绝缘子
Fig. 10 Conductor and insulator at the fault point of pole I DC line

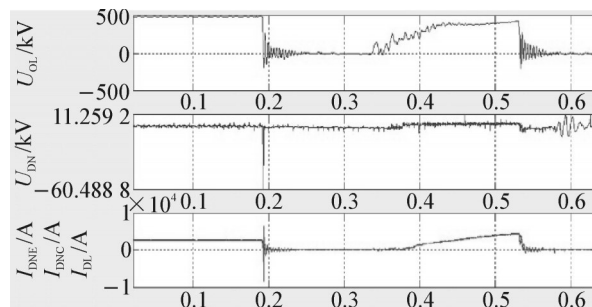


图11 极 I 线路故障录波图
Fig. 11 Fault recording diagram of pole I line

1)直流极 I 线路故障,造成中性母线暂态过电压升至67 kV,造成极 II 中性母线冲击电容器击穿爆炸。从故障原理分析,电容器烧毁后,电流经故障电容器流入大地,极 II 阀厅低压母线电流和中性线母线电流间产生差流,保护设计中,将电容器电流也计算在中性线保护差动保护区内,因此故障初期差流较小并未造成保护动作。随着故障电流持续时间增加,电容器开始发热,直至发生绝缘油膨胀及爆炸,电容器、支架以及大地间形成电流通道,此时差流较大达到中性线母线差动保护动作值,差动保护动作。

故障录波信息显示,中性线差动保护动作电流为3 030 A,故障31 ms后保护动作跳闸,与上述直流保护设计基本一致,故障录波见图12。因此判断,电容器闪络放电是造成差动保护动作的主要原因。

2)本次故障中,极 I 和极 II 中性线电压最高达到67 kV,且极 II 中性线避雷器动作3次(雷电冲击耐受值62 kV),极 I 中性线避雷器动作6次(雷电冲击耐受值62 kV),双极中性线避雷器动作6次(雷电冲击耐受值54 kV),实际测量的中性线电压

$U_{DN}=67\text{ kV}$,证明避雷器动作正确,符合过电压及绝缘配合设计要求^[20-24],不存在系统设计问题。

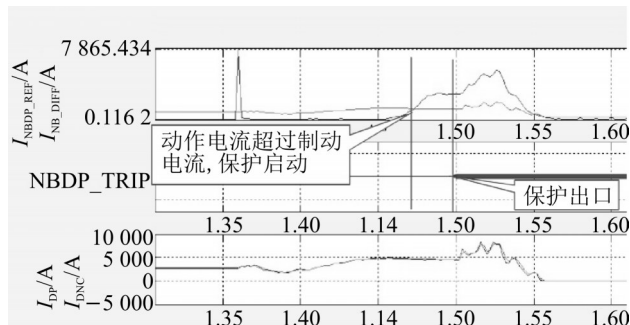


图12 极Ⅱ线路故障录波图

Fig. 12 Fault recording diagram of pole II

3)本次故障实测中性线暂态过电压值为67 kV,而故障中性母线冲击电容器设计冲击电压耐受值为92 kV,过电压值在其耐受范围内,不应造成电容器击穿爆炸。

4)通过故障波形查看,故障时极Ⅱ直流电流最高达到了7 030 A,中性线暂态过电压最高达到67 kV。由于冲击电容器本身具有释放电流的功能,冲击电流对其影响不大,并且经电磁暂态仿真验证,7 000 A的电流对电容器的影响在其耐受范围内^[25]。因此,可以排除过电流造成电容器故障的可能性,而造成电容器故障的原因应该是暂态过电压,过电压冲击造成内部电容元件击穿放电,能量大量聚集,最终导致爆炸^[26]。

5)PSCAD/EMTDC 仿真验证,模拟故障点距离换流站64.2 km处金属性永久接地,故障时刻为 $t=1.0\text{ s}$,持续时间为0.5 ms。仿真波形见图13。

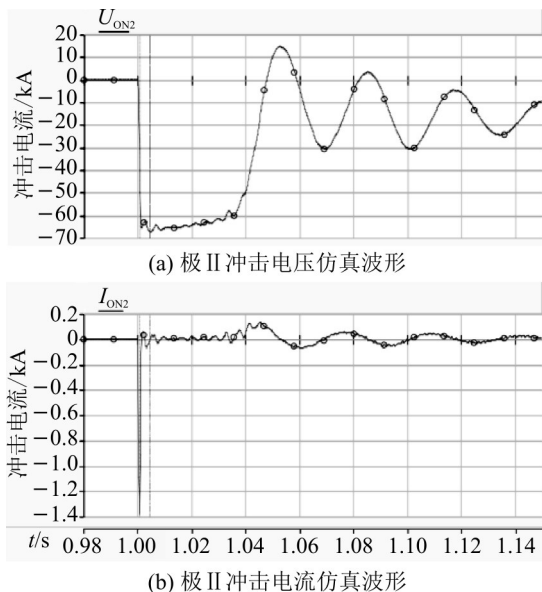


图13 极Ⅱ冲击电容器仿真波形

Fig. 13 Simulation waveform of pole II surge capacitor

由图13可以看出,当直流单极永久性接地故障时,中性线过电压最高值可以达到68 kV,振荡3~4次,每次10 ms,与现场故障录波数据基本吻合。

3.2 过电压时电容器的响应

综合来看,导致电容器最终击穿爆炸的主要原因是暂态过电压,对其影响分析如下:

1)极Ⅱ中性线冲击电容器长期运行造成绝缘老化^[17],其耐压水平已显著降低。每年例行电容值测试虽然正常,但已不能正确表征其耐压能力,由于本次故障过电压水平高于以往故障电压,电容器无法承受其耐受值范围内的过电压,导致其放电击穿;

2)由于电容器制造存在均一性较差的问题,历年线路故障引起的暂态过电压(均在50 kV左右)对电容器部分元件已经造成一定损伤,本次极Ⅰ线路故障后的暂态过电压高达67 kV,导致电容器绝缘性能由量变转化为质变,最终导致击穿爆炸;

3)从暂态过电压产生和抑制角度分析,线路故障点距离逆变侧越近,在中性母线上产生的暂态过电压越高^[25, 28-31]。而本次极Ⅰ线路故障后双极中性母线暂态过电压高于以往线路故障时的过电压水平,主要原因是本次线路故障点距离换流站比之前历次故障更近(距离仅为输电线路全长的7.47%)。

4 防范策略

1)极Ⅰ线路故障降压重启时直流电压超调至503 kV,远高于降压重启的电压指令值350 kV(标么值为0.7),因此不利于重启的成功率。极Ⅱ闭锁时直流电压由-500 kV反向至+500 kV,应制定控制保护系统的优化措施,控制直流电压稳定在350 kV不再上升,有效降低直流电压,以利于闪络点的绝缘恢复,提高再启动的成功率,也不会发生双极闭锁,将故障造成的影响降到最小。

2)极Ⅰ、极Ⅱ中性母线和双极区域的避雷器在本次故障中多次动作,且投运多年后避雷器阀片出现绝缘劣化现象,应结合例行检修进行全面检查和试验。

本次极Ⅰ线路故障产生的暂态过电压对极Ⅰ冲击电容器组绝缘性能的影响也应进行验证和研究,并结合本文提出的防范策略加以防范。

3)电容器组运行多年后会出现绝缘劣化,停电检修时应按照规程规定^[32],对投运时间较长的双极区域电容器进行全面检测和试验。

4)从5号电容器的测试结果来看,仅通过测量电容量和绝缘电阻不能判断电容器是否正常,也无法及时发现绝缘劣化,电容器失效的可能性仍然较

大,应通过介质损耗、局部放电和耐压试验等试验综合判断其绝缘劣化情况^[13]。

5)每年定期对中性线电容器组和双极区域电容器组进行状态检测和评估,及时发现绝缘性能较差的设备,并更换绝缘劣化的电容器。

6)应增加单极和双极中性区域电容器组的现场备品配置数量,建议按照可以更换一个完整单极和双极中性区域电容器的原则配置^[33],进一步降低故障对电网的影响。

5 结语

直流换流站中性母线引起的暂态过电压对中性母线冲击电容器电容、电阻等电气分元件造成的损伤是持续性的,这种损伤是潜在的、隐性的,正常运行中未必呈现出来。当其遭受过电压或过电流冲击时,会导致电容器的绝缘水平显著降低,发生质变,从而绝缘击穿、能量释放并造成电容器炸裂。同时,例行的电容量和绝缘电阻测量等试验,虽然检测电容值和绝缘电阻值在正常范围内,但测量结果并不能真实反映电容器的绝缘性能,电容器失效的可能性仍然较大。当故障过电压水平超过一定值时,电容器无法承受其耐受值范围内的电压,造成其绝缘击穿放电。因此,对运行多年的双极区域电容器,应结合停电检修进行全面检测和试验,并通过介损、局放和耐压等各类试验综合判断其性能劣化情况,及时制定优化措施,确保设备可靠运行。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压直流输电系统过电压及绝缘配合[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 孔志达, 孙仕达, 卢毓欣. 高压直流换流站电气设计标准化及优化研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(11): 20-27.
KONG Zhida, SUN Shida, LU Yuxin. Research on standardization and optimization of electrical design of HVDC converter stations[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(11): 20-27.
- [3] 周晨, 张翔, 刘磊, 等. 换流阀阻尼电容器等效温升试验及寿命评估[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 149-155.
ZHOU Chen, ZHANG Xiang, LIU Lei, et al. Equivalent temperature rise test and life evaluation of converter valve damping capacitor[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 149-155.
- [4] 刘天宇, 车传强, 赵磊, 等. 35 kV 真空断路器开断并联电容器过电压分析[J]. 东北电力技术, 2024, 45(5): 34-36.
LIU Tianyu, CHE Chuanqiang, ZHAO Lei, et al. Analysis of overvoltage of 35 kV vacuum circuit breaker breaking parallel capacitors[J]. Northeast Electric Power Technology, 2024, 45(5): 34-36.
- [5] 王辉, 王勇, 张晓滨, 等. 构网型分布式电源渗透率高的微电网潮流计算及优化控制[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(4): 35-43.
WANG Hui, WANG Yong, ZHANG Xiaobin, et al. Power flow calculation and optimization control of the microgrid with high penetration of grid-forming distributed generators[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(4): 35-43.
- [6] 李维维, 高琪, 刘水平. 小型脉冲功率装置用特种脉冲电容器研发及应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4): 86-91.
LI Weiwei, GAO Qi, LIU Shuiping. Research and application of special pulse capacitor for small pulse power device[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 86-91.
- [7] 刘振亚. 特高压直流输电线路维护与检测[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [8] 谭思文. 基于极化去极化电流法的冲击电容器油膜绝缘状态研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [9] 纪明嵩, 李涛, 王磊, 等. 基于冲击发电机系统的中压断路器背对背电容器组开合试验技术[J]. 高压电器, 2024, 60(8): 252-258.
JI Mingsong, LI Tao, WANG Lei, et al. Back-to-back capacitor bank switching test technology for medium voltage circuit breakers based on impulse generator system[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 252-258.
- [10] 王雪松, 岳永刚, 吕鑫, 等. 基于串联电阻开关的电容器组投切重燃过电压仿真研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(4): 124-132.
WANG Xuesong, YUE Yonggang, LYU Xin, et al. Research on simulation of switching reignition over-voltage of capacitor bank based on series resistance switch[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(4): 124-132.
- [11] 毛逸铭, 阴春晓, 刘志龙, 等. 高压直流输电系统中性线过电压分析[J]. 电力电子技术, 2015, 49(12): 4-7.
MAO Yiming, YIN Chunxiao, LIU Zhilong, et al. Cause analysis of neutral line overvoltage in high-voltage direct current transmission system[J]. Power Electronics, 2015, 49(12): 4-7.
- [12] 刘斌, 岳永刚, 张庆如, 等. 基于串联非线性电阻组合开关的补偿电容器组投切重燃过电压研究[J]. 高压电器, 2024, 60(8): 183-192.
LIU Bin, YUE Yonggang, ZHANG Qingru, et al. Research on switching reignition over-voltage of compensation capacitor bank based on series nonlinear resistor combination switch[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 183-192.
- [13] 张晨萌, 谢施君, 夏亚龙, 等. 温度对PDC法测试冲击电容器结果的影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023,

- 44(5):43-49.
ZHANG Chenmeng, XIE Shijun, XIA Yalong, et al. Study on influence of temperature on result of PDC test of impulse capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(5): 43-49.
- [14] 杨智, 詹江杨, 徐星, 等. 变压器中性点过电压分析与绝缘配合[J]. 电测与仪表, 2023, 60(10): 30-35.
YANG Zhi, ZHAN Jiangyang, XU Xing, et al. Overvoltage analysis and insulation coordination of transformer neutral point[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(10): 30-35.
- [15] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑—2010年[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [16] 输变电设备状态检修试验规程: DL/T 393—2021[S]. 2022.
Code of condition—based maintenance & test for electric equipment: DL/T 393—2021[S]. 2022.
- [17] 国家电网公司. 输变电设备状态检修试验规程: Q/GDW 1168—2013[M]. 北京: 中国电力出版社, 2020.
- [18] 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.
- [19] 裴岳. 特高压直流输电系统接地故障过电压特性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- [20] 绝缘配合: GB 311—2013[S]. 2013.
Insulation co-ordination: GB 311—2013[S]. 2013.
- [21] 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[S]. 2017.
Insulation coordination—Part 3: Procedures for high-voltage direct current (HVDC) converter stations: GB/T 311.3—2017[S]. 2017.
- [22] 绝缘配合 第12部分: 高压直流换流站(LCC)绝缘配合应用导则: GB/T 311.12—2024[S]. 2024.
Insulation coordination—Part 12: Application guidelines for LCC HVDC converter stations: GB/T 311.12—2024[S]. 2024.
- [23] 绝缘配合 第13部分: 高压直流换流站(VSC)绝缘配合应用导则: GB/T 311.13—2024[S]. 2024.
Insulation coordination—Part 13: Application guidelines for VSC HVDC converter stations: GB/T 311.13—2024[S]. 2024.
- [24] Insulation coordination: IEC 60071—2—2018[S]. 2018.
- [25] 倪汝冰. 高压直流输电系统中性线冲击电容器过电压分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [26] 毛宇翔. 基于直流局部放电的冲击电容器典型缺陷检测技术研究[D]. 成都: 西华大学, 2018.
- [27] 司马文霞, 华杰方, 孙魄韬, 等. 冲击电压作用下冲击电容器用聚丙烯薄膜累积失效特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 358-365.
- SIMA Wenxia, HUA Jiefang, SUN Botao, et al. Accumulative failure characteristic of polypropylene film in surge capacitor under repeated impulse voltage[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 358-365.
- [28] 马志英. 西北某直流外送系统送端换流站暂态过电压及抑制措施研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2024.
- [29] 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.
- [30] 宋家乐, 张添胤, 朱光宇, 等. 热—应力老化作用对电容器用BOPP薄膜绝缘性能的影响[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1): 83-87.
SONG Jiale, ZHANG Tianyin, ZHU Guangyu, et al. Influence of thermal-stress aging on insulation performance of BOPP film for capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 83-87.
- [31] 郭磊, 张卓, 张劲光, 等. 一起并联电容器装置损毁故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(5): 23-28.
GUO Lei, ZHANG Zhuo, ZHANG Jinguang, et al. Damage fault analysis on high voltage shunt capacitor[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020, 41(5): 23-28.
- [32] 高压直流输电系统用直流滤波电容器及中性母线冲击电容器: GB/T 20993—2012[S]. 2012.
DC filter capacitors and neutral bus surge capacitors for HVDC transmission system: GB/T 20993—2012[S]. 2012.
- [33] 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.

作者简介:

张宏伟(1976—),男,正高级工程师,研究方向为超特高压设备电磁特性及新能源并网特性研究。E-mail: gs-zhanghw@163.com。

杨晓静(1986—),女,工程师,主要从事电容式电压互感器及耦合电容器技术工作。

姬凯(1987—),男,工程师,主要从事互感器及电力电容器工艺工作。

李宇(1991—),男,工程师,主要从事互感器及电力电容器的工艺及生产制造工作。