

±800 kV 直流分压器低能量放电故障分析

张耀月

(澳大利亚国立大学商业与经济学院, 澳大利亚 堪培拉 2601)

摘要: 低能量放电是一种间歇性火花放电。特高压直流分压器低能量放电将造成电压突然跌落或者跳变,严重影响电网安全稳定运行。本文分析了±800 kV 直流分压器低能量放电现象,利用RTDS 仿真试验模拟内部对地短路,通过解体、试验、检测等工作,分析了故障原因,并提出预防措施,为防范和杜绝特高压直流分压器故障和异常提供借鉴,为特高压直流设备和电网安全、稳定运行积累宝贵经验。

关键词: 特高压电网; 直流输电; 直流设备; 直流分压器; 低能量放电

Analysis on Low Energy Discharge Fault Analysis of ±800 kV DC Voltage Divider

ZHANG Yaoyue

(ANU College of Business and Economics, Canberra 2601, Australia)

Abstract: Low energy discharge is an intermittent spark discharge. Low energy discharge of ultra-high voltage DC voltage divider will cause sudden voltage sag or jumps, seriously affecting safe and stable operation of power grid. In this paper, the low-energy discharge phenomenon of ±800kV DC voltage dividers is analyzed, the internal short circuits to ground is simulated by using RTDS simulation test. The cause of the fault is analyzed through such works as disassembly, testing, and detection and preventive measures are proposed, which provide reference for preventing and eliminating faults and abnormalities of ultra-high voltage DC voltage divider and accumulating valuable experience for safe and stable operation of ultra-high voltage DC equipment and power grid.

Keywords: ultra high voltage power grid; direct current transmission; DC equipment; DC voltage divider; low energy discharge

0 引言

某 ±800 kV 直流输电工程是长江上游流域重要的输电通道,连接中国最大的能源消费城市和最大的水电基地,承担着长江上游水电送出和华东地区送电任务,在迎峰度夏(冬)和国家能源安全等方面具有举足轻重的地位。该工程输送容量 640 万 kW^[1],其送、受端直流换流站共安装 4 台极母线直流分压器、4 台中性母线直流分压器(每站每极各 1 台),分别用于测量极母线电压(U_{DL})和中性线电压(U_{DN}),该直流工程投运以来,送、受端直流换流站直流分压器发生多次直流电压测量异常^[2]。为彻底解决该问题、消除隐患,将其中 1 台故障直流分压器返回德国厂家解体检查,发现内部存在 10 个放电点,放电点位于均压电阻环氧树脂桶表面。

本文对故障现象进行了全面分析论证,通过耐压试验、局部放电试验、干式雷电和操作冲击试验、暂态响应测试、电阻和电容测量等试验,对故障原因和存在问题进行详实阐释,提出了整改建议和措施,为防范和杜绝特高压直流分压器故障和异常提供借鉴,为特高压直流设备和电网安全、稳定运行积累宝贵经验。

1 故障概况

1.1 故障设备概况

极母线直流分压器电压等级为 800 kV,为国内首台套产品,首次采用内部充氮气(N_2)绝缘(国内其它工程为 SF_6 气体绝缘)。中性母线直流分压器电压等级为 60 kV,干式绝缘。直流分压器安装位置示意图 1,直流分压器外观和内部结构见图 2^[3-4]。

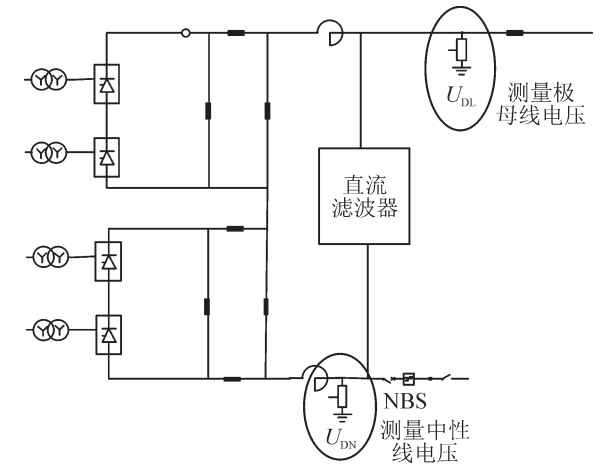


图1 直流分压器安装位置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of installation position of DC divider

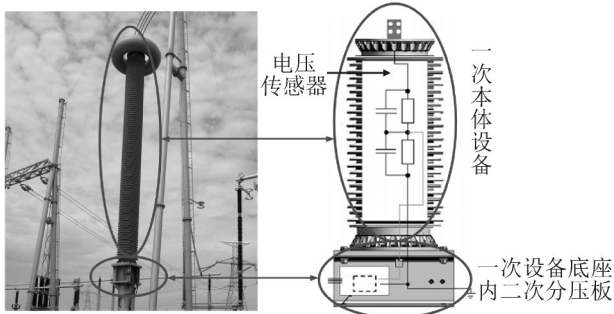


图2 直流分压器外观和内部结构示意图
Fig. 2 Appearance and internal structural schematic diagram of DC divider

直流分压器一次本体设备内由 12 组 RC 并联元件串接并包裹在环氧树脂内,一次设备底座内的二次分压板与控制室内二次接口设备通过电缆连接,并将测量的电压信号传输给直流控制保护系统,整体信号传输回路见图 3。

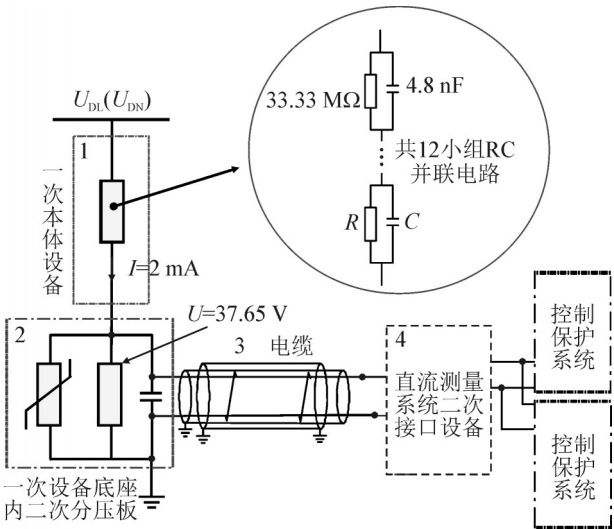


图3 分压器整体信号传输回路图
Fig. 3 Overall signal transmission circuit diagram of voltage divider

该直流工程送、受端换流站直流分压器由瑞士某工业能源生产集团供货,一次设备由德国某高压电气有限公司供应,二次系统由该瑞士公司自产。分压器参数见表 1。

表1 直流分压器参数表 Table 1 Parameters of DC divider			
参数	数值	参数	数值
标称直流电压/kV	±800	高压电阻/MΩ	400
最大连续直流电压/kV	±816	低压电阻/kΩ	50
测量范围/kV	±1 200	绝缘水平/kV	1 950 (冲击电压)

1.2 故障简述

该工程自投运以来,送、受端换流站直流分压器在 7 个时间段内累计发生 26 次直流电压测量异常。具体数据见表 2。

表2 直流分压器电压异常统计表
Table 2 Voltage anomaly statistical table of DC divider

序号	时间	天气	换流站	故障现象
1	某年10月23日12:34~15:04	中雨	受端站	极Ⅱ直流电压先后11次从-780 kV跳变至-1 500 kV,每次均保持4 ms后开始恢复,100 ms后恢复至正常值。
2	某年10月24日5:24~7:43	雾	受端站	极Ⅰ直流电压先后5次从800 kV跌落至15 kV,每次均保持3 ms后开始恢复,100 ms后恢复至正常值。
3	某年3月13日0:57	雾	受端站	极Ⅰ直流电压从800 kV跳变至1 500 kV,保持4 ms后开始恢复,100 ms后恢复至正常值。
4	某年3月13日5:39~8:45	雾	受端站	极Ⅱ直流电压先后6次从-780 kV跳变至-1 500 kV,每次均保持6 ms后开始恢复,100 ms后恢复至正常值。
5	某年3月15日7:46	阴	送端站	极Ⅰ直流电压从800 kV跳变至1 500 kV,约450 ms后恢复至正常值。
6	某年5月14日9:51	小雨	送端站	极Ⅰ直流电压从800 kV跳变至1 400 kV,约500 ms后恢复至正常值。
7	某年5月23日11:34	小雨	受端站	极Ⅰ直流电压从800 kV跳变至1 518 kV,持续500 ms后恢复至正常值。

由表 2,可以看出:

- 1)除受端站极 I 发生 5 次直流电压从 800 kV 跌落至 15 kV 的情况外,其余 21 次均为直流电压由额定运行电压跳变至 1 500 kV 左右。最大跳变至 1 500 kV 并且均出现削峰现象^[5],削峰的原因主要是二次回路对最大测量电压进行了限幅;
- 2)比较表 2 中 3 月 13 日(序号 3)和 5 月 23 日(序号 7)受端站极 I 相同电压突变的波形,发现放电持续时间由 6 ms 增加至 101 ms,恶化趋势明显。如图 4 所示;

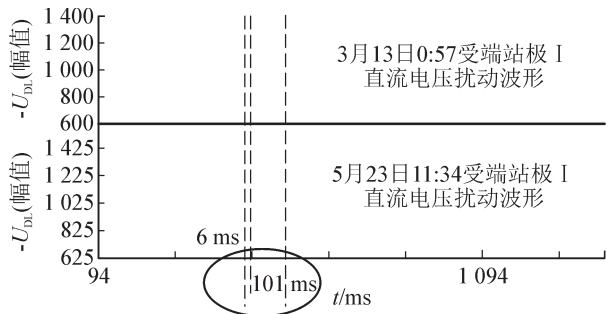


图4 3月13日与5月23日扰动波形对比
Fig. 4 Comparison of disturbed waveform between March 13th and May 23rd

- 3)从各次扰动与当时天气情况来看,每次发生电压扰动时,现场均为阴雨、雾霾等天气,但并不是每次阴雨和雾霾天气时均会发生电压扰动。因此,电压扰动是否与阴雨、雾霾等天气有关,仍需进一步论证^[6]。

2 试验分析

2.1 RTDS 仿真试验

1)N₂气体绝缘条件下试验

在某网联公司 RTDS 实验室进行了模拟直流分压器内部放电的 RTDS 仿真试验(real time digital simulation system)。仿真试验中直流系统采用详细的主回路模型,直流分压器采用实际的阻容分压电路模型,如图 5 所示。
在分压器内部模拟对地短路,重现了电压跌落至 15 kV 的故障现象;模拟电容瞬时(1 ms)放电故障,重现了电压跳变至 1 500 kV 的故障现象。

以 3 月 13 日受端站极 I 直流电压从 780 kV 跳变至 1 500 kV 为例(表 2 中序号 3),仿真与实际波形对比如图 6 所示。

2)SF₆气体绝缘条件下试验

将受端站直流分压器内部绝缘介质全部更换为 SF₆气体后重新加入运行。但在此后的 5 月 5 日,受端站极 II 直流电压连续 5 次从-500 kV 跌落至 -12 kV,先后发生 2 次直流线路电压突变量保护动作,直流线路再启动成功。

利用 RTDS 仿真分析模拟分压器内部对地短路,重现了与现场一致的故障现象,仿真与实际波形对比见图 7。同时,对该站极 I 和极 II 直流分压器内 SF₆气体检测,极 I 气体检测正常,极 II 中发现四氟化碳气体(CF₄)^[7-8],含量为 0.016 6%。初步判断为直流分压器内部存在低能量放电。

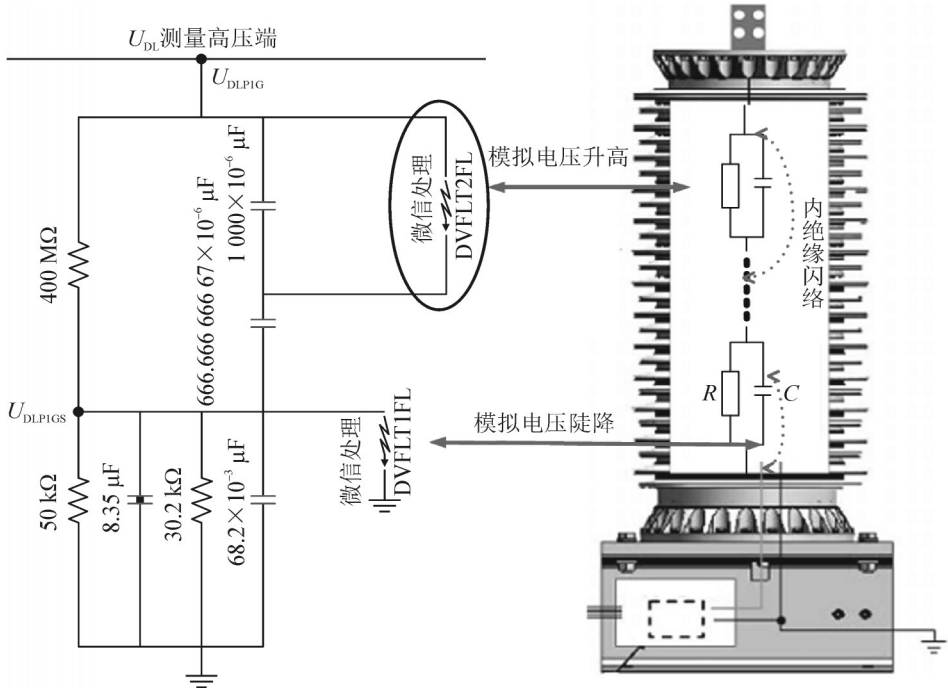


图5 分压器内部放电仿真试验示意图
Fig. 5 Schematic diagram of internal discharge simulation test of voltage divider

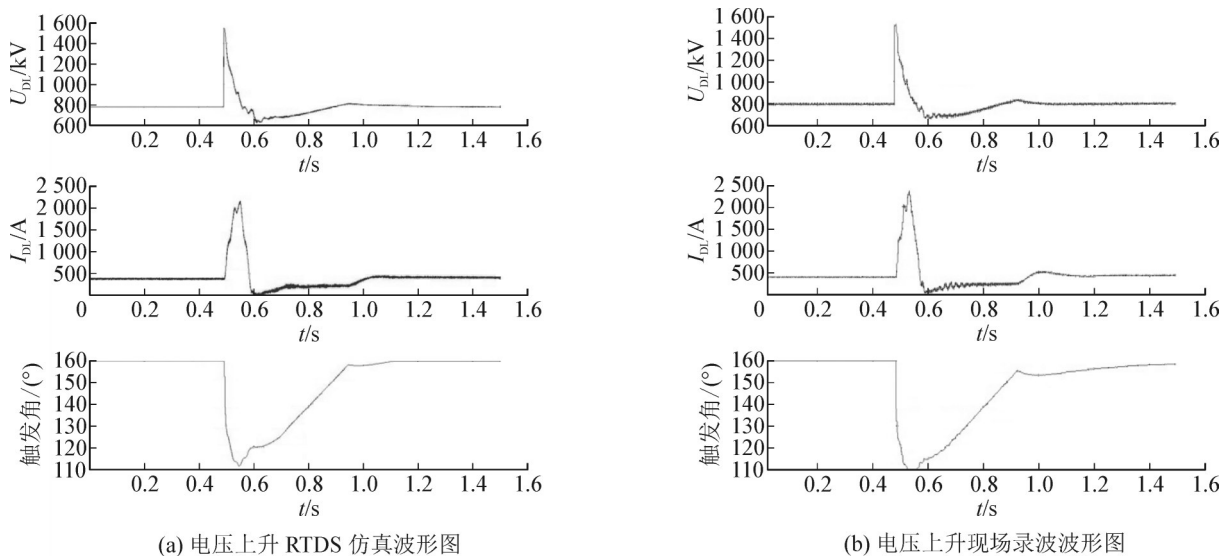


图6 RTDS仿真试验与现场实际波形对比图

Fig. 6 Comparison diagram between RTDS simulation test waveform and actual waveform at site

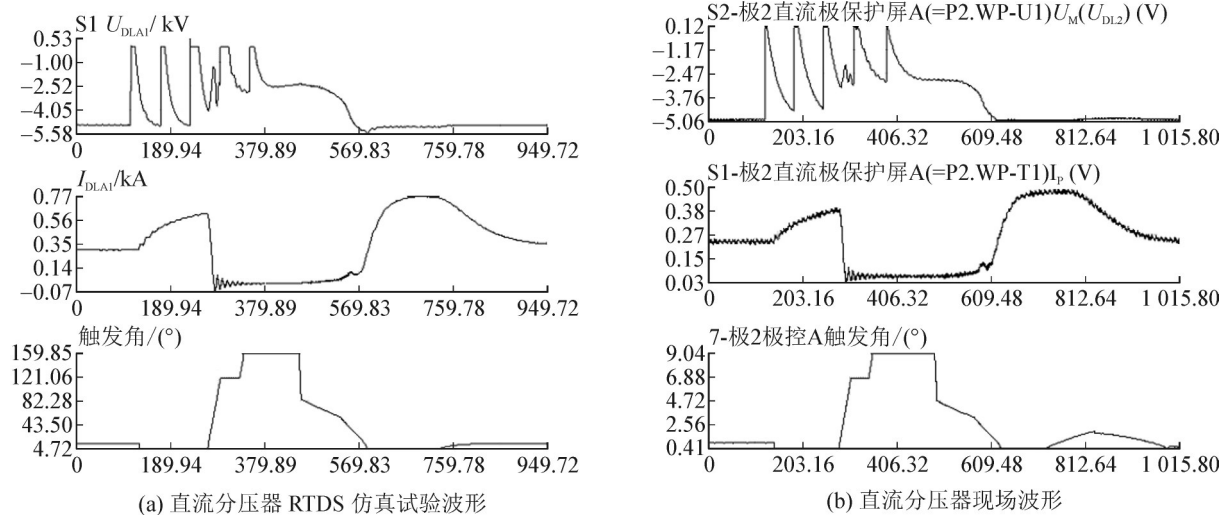


图7 电压扰动仿真与现场实际波形对比图

Fig. 7 Comparison diagram between voltage disturbance simulation waveform and actual waveform at site

2.2 解体检查试验

1) 绝缘子表面检查

与新绝缘子相比,运行绝缘子表面重度污染痕迹非常明显。硅橡胶的湿表面表明在 20 cm 的距离绝缘电阻只有 5.3 k Ω ,绝缘电阻明显降低。

在德国 Karlsruhe 大学高压实验室,对绝缘子湿表面进行绝缘电阻测量,测量值仅有 1 k Ω 。返厂分压器两片伞裙之间的绝缘电阻值降至 127.2 M Ω ,而安装于实验室中的正常分压器两伞裙间阻值均大于 32 k Ω 。

2) 分压器电阻部件检查

拆下分压器并检查所有部件,可见复合绝缘子内表面有大量 GFK 垫片(glass fiber reinforced plastics, GFK)的磨损颗粒,冠环内表面和内部电极表面也有相同的 GFK 粉尘颗粒。由传输振动造成的 GFK 垫

片粉尘颗粒见图 8,为环形标记。可以检测到内部绝缘体表面局部放电造成的小污点,但不会对绝缘材料的高压特性造成影响^[9-10]。

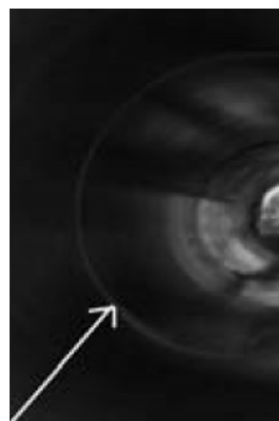


图8 复合绝缘子内表面 GFK 垫片的磨损颗粒
Fig. 8 Wear particles of GFK gasket of inner surface of composite insulator

分压器电阻柱外部可见多处放电痕迹,各个位于不同高度的放电痕迹见图9,放电至绝缘子内壁。

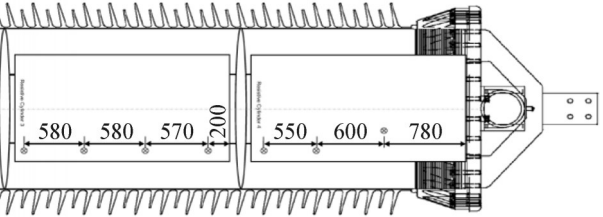


图9 电阻柱不同高度放电痕迹图
Fig. 9 Discharge pattern of resistance column at different heights

电阻部件和绝缘子内壁之间的气体距离为120 mm。电阻圆柱体上的放电痕迹见图10。

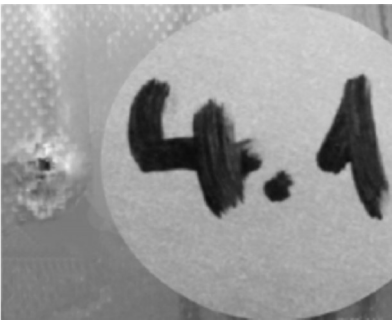


图10 电阻柱体上的放电痕迹图
Fig. 10 Discharge pattern on the resistance column proper

分压器内部电阻部件检查后,对电阻部件和绝缘子内部表面进行了清洁,GFK垫片颗粒很容易清洁,表明这种颗粒对设备内部的高压活动没有影响^[11]。同时,对电阻部件电阻值测量没有变化,表明该电阻器部件没有发生放电^[12]。

3)气体检测

对返厂分压器内的气体成分进行检测^[12],发现扰动的分压器内部均存在乙炔气体(C₂H₂),且乙炔含量与扰动次数成正比例关系,具体见表3。

表3 乙炔含量与分压器扰动次数关系表
Table 3 Relationship table between acetylene content and voltage divider disturbance number

换流站	极	乙炔含量/ppm	累计发生扰动次数/次
送端站	极 I	0.07	1
	极 II	0	0
受端站	极 I	0.27	6
	极 II	0.36	17

从表3可以看出,发生电压扰动次数最多的乙炔含量为0.36 ppm,扰动次数次之的乙炔含量为0.27 ppm,扰动次数仅1次的乙炔含量为0.07 ppm,没有发生电压扰动的送端站极II没有发现乙炔气体,进一步证明电压扰动与分压器内部放电程度密

切相关。

4)干式交流耐压试验和局部放电测量

N₂气体的绝缘特性服从巴申定律^[13],即击穿电压与间隙距离和气体压力密切相关。在不同气压和干湿环境下,模拟各种不同运行条件,测量分压器局放值。

①最高允许交流电压750 kV时,0.32 MPa和0.2 MPa N₂气体条件下,都没有观察到局放。

②再将N₂气体压力降低到0.03 MPa时,施加737 kV交流耐压,测量到>1 000 pC的局放值。原因是分压器内部N₂气体压力仅有0.03 MPa,其绝缘性能不足^[14]。

③最后,将N₂气体更换为SF₆气体,重新在各个压力下进行局放测量,发现即使绝缘气体压力为0.03 MPa,亦无局放现象。具体见表4。

综上,直流分压器的局部放电量<10 pC,满足规程规定^[15-18]。

表4 分压器局放测试表
Table 4 Partial discharge test table of voltage divider

试验电压(有效值)/kV	对地标准/pC	测量局放水平/pC
438	4	<4
737	4	>1 000
620	4	15

5)电容和高压介质损耗测量

在交流50 Hz条件下,测量分压器的电容和介质损耗,具体见表5。

表5 电容和高压介质损耗测试表
Table 5 Test table of capacitance and high voltage dielectric loss

试验电压 (有效值)/kV	高压电容/pF	高压介质 损耗角tanδ
146	414.6	0.023 1
292	414.7	0.023 0
438	414.9	0.022 9
292	414.7	0.022 9
146	414.7	0.023 1

低压支路电容为

$$C_{total} = C_{22} + C_c + C_{in} + C_{add} \text{ (nF)}$$

与之前常规测试期间的测量值相比,高压电容值没有变化。

6)干式雷电冲击试验

按照规程规定^[12],对整个分压器单元进行介电脉冲试验,同时使用正极性和负极性进行测试,试验波形为1.2(±30%)/50(±20%)μs,试验电压:1 950 kV(最大值),测试结果见表6。

表6 干式雷电冲击试验表
Table 6 Table of lightning impulse test (dry)

序号	测试电压正极性 (kV,冲击绝缘水平)	测试电压负极性 (kV,冲击绝缘水平)
波形	1.30/47.8 μs	1.27/7.6 μs
减少	1 360	-1 359
1	1 930	-1 932
2	1 940	-1 951
3	1 940	-1 946

注:气温 21.9℃,相对湿度 63.3%,气压 100.9 kPa。

试验过程中未发生闪络或击穿,干式雷电冲击试验合格。

7) 干式操作冲击试验

操作脉冲是在干燥条件下进行的,施加脉冲为 1 个降低波形和 5 个全波形。用正极性脉冲进行测试,操作脉冲波形符合规程要求^[19]。测试结果见表 7(试验电压 1 350 kV(操作冲击绝缘水平))。

表7 干式操作冲击试验表
Table 7 Table of switching impulse test (dry)

序号	测试电压正极性(kV,峰值)
波形	264/2 300 μs
减少	997
1	1 356
2	1 354
3	1 350
4	1 352
5	1 354

注:气温 25.5℃,相对湿度 52.1%,气压 100 kPa。

试验过程中未发生闪络或击穿,干式操作冲击试验合格。

8) 瞬态响应试验

分压器单元已被正极性的测试电压充电,并通过平行的球体间隙放电。

试验电压为直流 30 kV,在分压器的输出信号电压抽头处测量响应时间,连接模拟隔离放大器额定负载的虚拟负载。

低压支路电容为

$$C_{\text{total}} = C_{22} + C_c + C_{\text{in}} + C_{\text{add}}$$

隔离放大器的标称负载: $C_{\text{in}}=68.2 \text{ nF}$ 。

规定的最大信号电缆电容: $C_c=80 \text{ nF}$ 。

测量的虚拟负载电容: $C_c+C_{\text{in}}=167 \text{ nF}$ 。

测得的响应时间: $73 \mu\text{s} < 250 \mu\text{s}$, 满足规程要求。

测得的 $C_{\text{add}}=220 \text{ nF}$ 。

在初始步骤之后的迹线的平坦部分上的斜率

在至少 500 ms 的时间内小于 2%。

瞬态响应测试证明,分压器的 R/C 比值依然完好,没有失调。

3 故障原因分析

通过模拟试验和现场检查验证,初步分析判断,分压器电压测量异常的主要原因是内部低能量放电,但引起内部放电的原因仍需进一步验证。综合上述检查和试验数据,可以明确排除的是外绝缘闪络,低压臂、电缆及测量板卡放电或接触不良,户外端子箱受潮凝露等原因。

1) 一种观点认为,分压器硅橡胶表面的重度污秽造成绝缘子在雾、雨、雪、霾等天气情况下外表面电压非均匀分布,而内部电阻器件电压分布均匀,分压器内部间隙在径向电场的作用下,发生径向放电。也可能是内部凝露、阻容分压元件设计选型不当、 N_2 气体绝缘能力不足、内部存在毛刺等因素,改变了电容分压比,造成分压器内部放电,导致直流电压测量值出现突变。

2) 另一种观点认为,设计选型时已考虑到换流站的污秽等级,厂家在设计和制造时也充分考虑了设备的运行环境^[20-21],且 2 月份设备年检时已经对分压器外表面进行了清洗,但随后在 3 月份即发生分压器放电。因此,内部放电与分压器外绝缘性能没有直接关系。

故障的根本原因是对于 ±800 kV 分压器绝缘机理研究不透彻,特别是将绝缘介质由 SF_6 气体更换为 N_2 气体后,内部绝缘设计与 N_2 气体绝缘性能配合存在瑕疵,阻容分压元件与环氧树脂外筒的径向尺寸小,裕度不够。另外,放电点位于内部分压电阻丝元件的接头部位,证明接头工艺存在瑕疵引起电场分布不均匀也是导致故障的重要原因。

4 改进措施

4.1 提升绝缘子表面外绝缘性能

严格按照规程规定,认真做好绝缘子外表面清洁工作,建议每 6 个月清洁一次。可以采取绝缘子外表面涂抹硅油脂等措施^[22],全面提升绝缘子表面外绝缘性能。

4.2 增强绝缘子内壁绝缘强度

为增强分压器内部从电阻圆柱到绝缘子内壁的绝缘强度,建议将分压器绝缘介质由 N_2 气体换至 SF_6 气体。但需进行以下相关验证:

1) SF_6 气体绝缘强度验证

SF_6 气体具有很强的负电性,正常场强下,其绝

缘性能是 N_2 气体的 2.5 倍以上^[23]。但在不均匀场强的作用下, SF_6 气体的绝缘性能将大幅度下降^[24-28]。所以, 更换绝缘介质前, 应进行不均匀电场计算, 据此判断更换为 SF_6 气体后在最恶劣工况下是否仍会再次放电或者导致更严重的故障发生, 并且应进行相关试验模拟验证。

2) 分压器型式验证

该分压器原设计为内部充 N_2 气体, 但更换为 SF_6 气体后, 其制造工艺、密封性、表计等是否满足充 SF_6 气体的要求, 需进一步验证。

4.3 加强分压器设备状态监测

运用红外、紫外、便携局放检测仪等手段开展设备状态监测^[12], 特别是加强阴雨、冰雪、雾霾等恶劣天气时运行工况的监测, 提升设备的运维、检修质量。

运用大数据分析, 加强对设备运行环境、电压、电流、介损等数据的分析、比对, 判断设备运行状态有无恶化趋势, 加强设备运行状态跟踪。

4.4 深入研究分压器一次部分放电机理

依据分压器结构和设计参数, 深入研究分压器内部放电机理。模拟分压器内部不同段阻容分压元件放电时直流电压异常变化情况的 RTDS 仿真试验, 对分压器结构、内部材料、设计参数、生产工艺等进行全面验证。

4.5 全面核查分压器二次系统稳定性

核查同型号、同批次分压器二次系统设计, 校核二次回路和负载差异, 参照运行正常换流站直流电压二次测量系统设计方案, 全面修订该型分压器二次系统设计, 并对其稳定性全面校核。

5 结语

经过各类试验和论证认为, 直流分压器内部低能量放电是造成电压测量异常的主要原因, 而造成分压器内部径向放电(从电阻部件到绝缘子内壁)的原因是复合绝缘子外部重度污染。

1) 干燥环境下, 复合绝缘子外表面电阻值相对较高。但雷电、暴雨、大雾和冰雪等潮湿环境下, 复合绝缘子外表面的绝缘阻值将大幅降低。同时, 潮湿环境会导致复合绝缘子外表面电场畸变, 变成不均匀电场。

2) 但是, 各种潮湿环境下, 绝缘子内部电阻部件的电场分布仍然是均匀的。于是, 这种环境运行的分压器, 其某些内部间隙将暴露在径向电场中。当径向电场强度超过绝缘气体绝缘性能时, 从分压器内部电阻圆柱到复合绝缘子内壁就会发生径向

局部放电。

3) 发生在电阻圆柱和绝缘子内壁间的放电不仅使相应的电阻单元短路, 也造成相应电容单元短路。电容单元的放电和之后的再充电使分压器平衡单元的电流增加。因此, 信号输出处将会测量到更高的信号电压。

4) N_2 气体具有良好的绝缘性能, 但不均匀的电场中, 其介电强度只有 SF_6 气体的 30%~40%^[29]。因此, 当特高压直流分压器绝缘介质更换为 N_2 气体后, 分压器内部结构、设计参数、工艺流程等会发生明显变化, 应进一步开展分压器内部放电机理研究, 并模拟内部不同段阻容分压元件放电时电压异常时的 RTDS 仿真试验, 确保内部绝缘设计与 N_2 气体绝缘性能配合可靠, 阻容分压元件与环氧树脂外筒的径向尺寸、绝缘裕度满足要求。

参考文献

- [1] 张宏伟. 特高压对转变经济发展方式的影响[J]. 中国电业, 2011(5): 1-4.
ZHANG Hongwei. Influence of extra-high voltage on transforming the economic development pattern[J]. China Electric Power, 2011(5): 1-4.
- [2] ± 800 kV 高压直流设备交接试验: DL/T 274—2012[S]. 2012.
Hand-over test of ± 800 kV HVDC electric equipments: DL/T 274—2012[S]. 2012.
- [3] LI Fengqi, SHE Zhengqiu, LOU Dianqiang. Fault analysis of DC voltage divider in Xiangjiaba-Shanghai ± 800 kV UHVDC project[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(12): 3244-3248.
- [4] 刘振亚, 秦晓辉, 赵良, 等. 特高压直流分层接入方式在多馈入直流电网的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 1-7.
LIU Zhenya, QIN Xiaohui, ZHAO Liang, et al. Study on the application of UHVDC hierarchical connection mode to multi-infeed HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 1-7.
- [5] 程建伟, 杨家辉, 张曦, 等. ± 800 kV 直流分压器典型绝缘故障的仿真分析与应对措施[J]. 南方电网技术, 2017, 11(1): 1-7.
CHENG Jianwei, YANG Jiahui, ZHANG Xi, et al. Simulation analysis and countermeasures of typical insulation faults for ± 800 kV DC voltage divider[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(1): 1-7.
- [6] 杨金洪. 雾霾对特高压直流输电线路电晕离子流场影响的研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [7] Specification of technical grade sulfur hexafluoride (SF_6) and complementary gases to be used in its mixtures for use in electrical equipment: IEC 60376—2018[S]. 2018.

- [8] 六氟化硫气体中空气、四氟化碳、六氟乙烷和八氟丙烷的测定 气相色谱法:DL/T 920—2019[S]. 2019.
Determination of air, carbon tetrafluoride, hexafluoroethane and perfluoropropane content in sulphur hexafluoride by gas chromatography method:DL/T 920—2019[S]. 2019.
- [9] 冯昌辉. 玻璃纤维增强环氧树脂绝缘材料老化特性及影响因素研究[D]. 北京:华北电力大学, 2021.
- [10] PREETHA P, THOMAS M J, RANJAN R. Electrothermal ageing of epoxy nanocomposites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(6): 2081-2089.
- [11] 杜伯学, 徐航, 李云鹏, 等. 特高压直流用高导热纳米复合绝缘子耐电痕特性研究[J]. 高电压技术, 2013, 39(12): 2910-2915.
DU Boxue, XU Hang, LI Yunpeng, et al. Study on characteristics of tracking resistance of silicon rubber composite insulators with high thermal conductivity for UHVDC transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12): 2910-2915.
- [12] ± 800 kV 特高压直流设备预防性试验规程:DL/T 273—2012[S]. 2012.
Preventive test code for ± 800 kV HVDC electric equipments: DL/T 273—2012[S]. 2012.
- [13] 曹建. 氮气放电特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2019.
- [14] 高长伟, 韩刚, 姚颖. 高电压技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2018.
- [15] 高压直流设备验收试验:DL/T 377—2010[S]. 2010.
The acceptance tests of high voltage direct current equipment:DL/T 377—2010[S]. 2010.
- [16] High-voltage test techniques—Partial discharge measurements: IEC 60270—2015[S]. 2015.
- [17] 局部放电测量:GB/T 7354—2018[S]. 2018.
High-voltage test techniques—Partial discharge measurements:GB/T 7354—2018[S]. 2018.
- [18] 电力设备局部放电现场测量导则:DL/T 417—2019[S]. 2019.
Guide for field measurement of partial discharge of power equipment:DL/T 417—2019[S]. 2019.
- [19] High-voltage test techniques — Part 1: General definitions and test requirements: IEC 60060-1—2010[S]. 2010.
- [20] ± 800 kV 直流换流站设计规范:GB/T 50789—2022[S]. 2022.
Code for design of ± 800 kV DC converter station: GB/T 50789—2022[S]. 2022.
- [21] ± 800 kV 高压直流输电系统成套设计规程:DL/T 5426—2020[S]. 2020.
System design standard for ± 800 kV HVDC system: DL/T 5426—2020[S]. 2020.
- [22] 绝缘子用常温固化硅橡胶防污闪涂料:DL/T 627—2018[S]. 2019.
Room temperature vulcanized silicon rubber ant-pollution coating for insulators:DL/T 627—2018[S]. 2019.
- [23] W·MOSCH, W·HAUSCHILD 著, 李建基 译. 高压绝缘用六氟化硫[M]. 北京:机械工业出版社, 1984.
- [24] 张宏伟. 屏蔽球对500kV SF₆电流互感器内部电场分布影响研究[J]. 农村电气化, 2024(3):55-59.
ZHANG Hongwei. Study on the influence of shielding ball on the internal electric field distribution of 500 kV SF₆ current transformer[J]. Rural Electrification, 2024(3):55-59.
- [25] 陈磊, 吴诚威, 李澳, 等. 基于电流监测和动态电阻分析的电容器组SF₆断路器电寿命评估系统[J]. 高压电器, 2024, 60(1):55-62.
CHEN Lei, WU Chengwei, LI Ao, et al. Electrical endurance assessment system of SF₆ circuit breaker for switching capacitor bank based on current monitoring and dynamic resistance analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1): 55-62.
- [26] 孔凡珺, 马径坦, 谌珉灏, 等. SF₆压力对GIS典型缺陷局部放电检测灵敏度的影响[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3):233-241.
KONG Fanjun, MA Jingtan, CHEN Minhao, et al. Effect of SF₆ pressure on the sensitivity of partial discharge detection of typical defects in GIS[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3):233-241.
- [27] 何金, 张弛, 陈荣, 等. SF₆气体中典型缺陷的光电脉冲光谱极性效应分析[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(1): 20-28.
HE Jin, ZHANG Chi, CHEN Rong, et al. Analysis of the photoelectric pulse spectra polarity effect of typical defects in SF₆ gas[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1): 20-28.
- [28] 孙庆峰, 屠晔炜, 付军, 等. 1 100 kV GIS断路器合闸电阻紧固螺栓断裂分析[J]. 浙江电力, 2023, 42(8):68-74.
SUN Qingfeng, TU Yewei, FU Jun, et al. Fracture analysis of fastening bolt of closing resistance for 1 100 kV GIS circuit breaker[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(8): 68-74.
- [29] 吴振跃. 低压力N₂的绝缘特性研究[D]. 上海:上海交通大学, 2016.

作者简介:

张耀月(2001—),女,工学学士、管理学学士,研究方向为电力系统安全生产及应用经济学。E-mail:467711318@qq.com。