

谐振对阻容式直流分压器电容芯体绝缘性能影响研究

摘要:当阻容式直流分压器发生电容自身谐振或分压器整体谐振时,在高频谐波电压作用下会引起阻电容发热或持续局部放电,造成电容内部过热,导致分压器故障。文章分析了 $\pm 500\text{kV}$ 直流换流站谐振引起电容芯体连接片放电烧蚀破损故障,通过解体检查、残留物电镜分析、断口能谱分析、谐波测量、温升试验、LCR扫频试验等方法深入分析了故障机理和原因,研究了谐振对电容芯体绝缘性能情况,提出了防范和改进措施,对直流换流站谐波机理、新设备研制、材料绝缘等领域具有重要的参考和借鉴意义。

关键词:直流输电;直流分压器;阻容式;谐振;谐波

中图分类号:TM531.6;TM721.1 **文献标志码:**A **文章编号:**xxxx-xxxx(XXXX)XX-0001-17

Study on the Influence of Resonance on the Insulation Performance of the Capacitor Core of Resistive Capacitive DC Divider

Abstract: When a resistive capacitive DC voltage divider experiences capacitor self resonance or overall resonance, high-frequency harmonic voltage can lead to overheating or sustained partial discharge of the resistive capacitors, resulting in internal thermal and malfunction of the voltage divider. The paper analyzes the discharge erosion damage fault of capacitor core connection caused by resonance in $\pm 500\text{kV}$ DC converter station. Through methods such as disassembly inspection, residual electron microscopy analysis, fracture energy spectrum analysis, harmonic measurement, temperature rise test, LCR sweep frequency test, the fault mechanism and causes are thoroughly investigated. The study examines the impact of resonance on the insulation performance of the capacitor core and proposes preventive and improvement measures. It has important reference and the significance for the harmonic mechanism, new equipment development, material insulation and other fields of DC converter station.

Key words: Direct current transmission;DC voltage divider;Resistance capacitance type;Resonance;Harmonic

0 引言

谐振是能量剧烈放大的共振现象^[1],谐振虽然与谐波不同,但在某些特定条件下谐波可能激励系统谐振^[2-3]。在高频谐波电压作用下,谐振会造成阻容式直流分压器内部电容器发热^[4],高温绝缘油会造成电容元件中的聚丙烯薄膜溶蚀,降低电容芯体绝缘材料的沿面绝缘强度,加速电容器绝缘纸和绝缘纸板绝缘老化和劣化,产生的含碳导电附着于物絮状物在低温时凝聚于电容芯边缘,引起场强最为集中的电容元件边缘电场畸变,最终会导致电容器击穿、分压器故障^[5]。因此,开展谐振工况下阻容式直流分压器运行状态,以及谐振对电容芯体绝缘性能影响研究至关重要,也势在必行。

文章分析了某 $\pm 500\text{kV}$ 直流换流站谐振引起电容芯体连接片放电烧蚀破损故障,通过解体检查、残留物电镜分析、断口能谱分析、谐波测量、温升试验、LCR扫频试验等方法深入分析了故障机理和原因,研究了谐振对电容芯体绝缘性能情况,提出了针对性防范和改进措施。文章研究的内容对直流换流站谐波机理、新设备研制、材料绝缘等领域具有重要的参考和借鉴意义,为提升直流设备本质提供技术支撑。

1 故障概况

1.1 故障设备概况

直流整流站和逆变站直流分压器按极配置,每极配置 U_{DL} 和 U_{DN} 两个测点,用来采集极母线和中性线直流电压^[6]。直流电压测点配置示意图如图1所示。

某 $\pm 500\text{kV}$ 换流站(整流站)直流分压器采用阻容式分压设计,一次分压通过高、低压臂分压电阻 R_1 、 R_2 和均压电容 C_1 、 C_2 来实现,并将一次分压的信号传输至二次分压板,经二次分压板进行二次分压后输出 5V 电压信号^[7-8]。测量原理如图2所示,等效电路如图3所示。

该直流分压器设备型号为PCS-9250-EAVD-100H,属国产化设备,出厂日期为2018年9月,投运日期为2020年6月。分压器本体包括高压臂、低压臂,其中电容为一节圆柱形结构,居中布置,采用 SF_6 气体绝缘,电容器内部充油,分压器一次本体结构如图4所示。

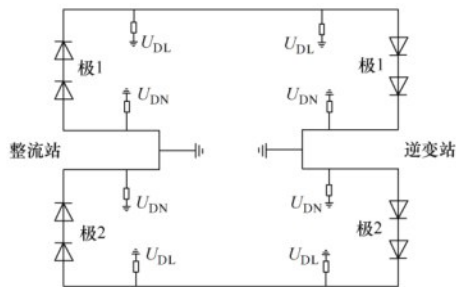


图1 直流电压测点配置示意图

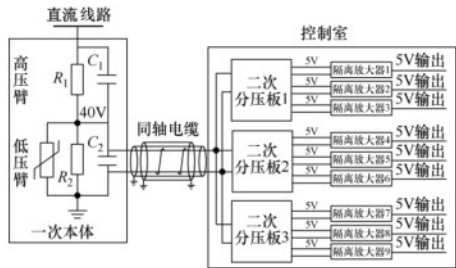


图2 直流分压器测量原理

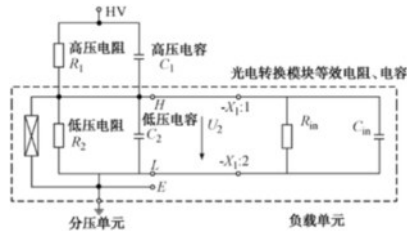


图3 直流分压器等效电路图

电容器内部由2段芯体串联,2段电容芯体之间通过金属连接片和引线连接,如图5(a)所示。2段芯体通过U形纸板固定,U形纸板背靠背连接,每段由75个电容芯体串联,共计150个电容芯体,如图5(b)所示。每个电容芯体包含两层铝箔极板、两层电容器膜-电容器纸-电容器膜组成的复合绝缘材料,如图5(c)所示^[9]。

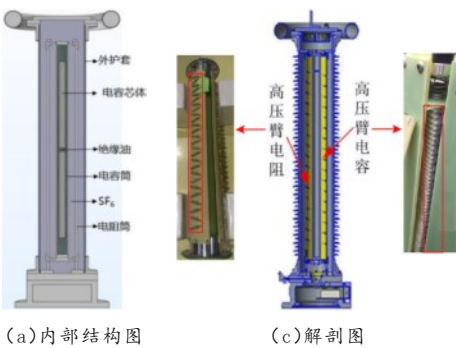
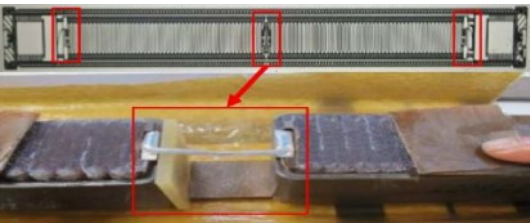


图4 分压器一次本体结构

膜纸复合绝缘材料与铝箔极板卷绕多圈,组成一个电容芯体,如图6(a)所示。多个电容芯体串联的电容器等效结构如图6(b)所示,其中,蓝线代表单个电容芯体中的高压铝箔,黑线代表单个电容芯体中的低压铝箔,前一个电容芯体的低压铝箔与后一个电容芯体的高压铝箔采用压接方式连接,蓝线和黑线之间的空白部分为电容器膜-电容器纸-电容器膜组成的复合绝缘材料。

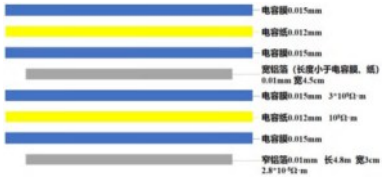
- 直流分压器技术参数见表1。
- 1.2 故障概况
- (1)第一次故障情况



(a)电容器内部结构示意图

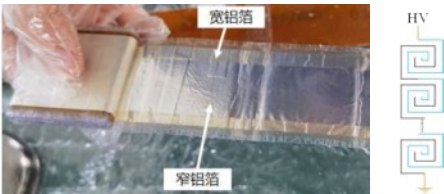


(b)多个电容芯体串联



(c)单个电容芯体结构

图5 电容芯体结构



(a)卷绕结构



(b)等效结构

图6 电容芯体等效结构

表1 直流分压器参数

参数	数值
测量范围	$0.1U_{pr} \sim 1.5U_{pr}$
测量准确度	$\pm 0.2\%(0.1 \sim 1.1U_{pr})$ $\pm 0.5\%(1.1 \sim 1.5U_{pr})$
阶跃响应	最大过冲量:20% 最大上升时间 $125\mu s(0.9U_{pr})$
截止频率/kHz	4

2023年7月1日,换流站预试检修期间,在开展正极中性线 U_{DN} 直流分压器预试时发现高压臂阻值及容值异常,进一步测试分压器 SF_6 气体微水时发现油从取气口喷出,初步分析故障原因为高压臂电容损坏,导致电容器充油泄漏。

(1)故障位置

现场对故障直流分压器检查发现,低压分压板有烧蚀放电痕迹。

(2)参数测量

直流分压器等效电路如图7所示, R_1 和 C_1 为高压臂电阻和电容, R_2 和 C_2 为低压臂电阻和电容。其中,高压臂电阻 $R_1=100M\Omega$,高压臂电容 $C_1=1430pF$,低压臂电阻 $R_2=100k\Omega$,低压臂电容 $C_2=2.86\mu F$ 。

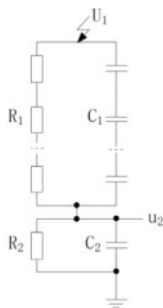


图7 直流分压器等效电路

用数字电桥分别测量高、低压臂电阻值和电容量,初值差不应超过 $\pm 3\%$ 。同时,进行电压比较核。从测试结果来看,高压臂电阻值和电容值异常^[10],测试结果如表2所示。

表2 测试结果

名 称	标准值	测试值
高压臂电阻/ $M\Omega$	100	10.6
高压臂电容/ pF	1430	8.524
低压臂电阻/ $k\Omega$	100	95
低压臂电容/ μF	2.86	0.194

(3)分解物检测

在 SF_6 气体密度继电器取气口进行分解物测试,发现流出黄褐色不明液体,故气体分解物测试未进行,初步判断黄色液体为分压器内部电容器油。

(4)故障录波分析

从理论角度分析,正负极 U_{DN} 与金属母线 U_{DNB} 测量值应相同^[11]。 U_{DN} 故障后将会造成两者测量出现明显偏差,因此,可通过查看历史录波定位故障发生时间。

通过查看历史录波,发现2023年4月24日16:00~16:16正极 U_{DN} 的电压开始出现异常。16:00时,电压波动值为3kV;16:11时,电压波动值为8kV;16:14时,电压波动值为30kV;16:16时,电压突增至500kV;16:30时,电压波动值为为0.2kV。综合上述故障现象,初步判断分压器故障时段为16:00~16:16。故障波形如图8所示。

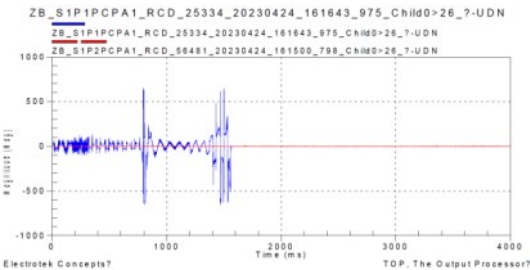


图8 分压器第一次故障波形

从监控信息来看,故障时段各项数据均无任何异常。且故障后至年检前,该分压器设备本体外观无异常,在线监测各项数据正常。因此,仅从设备监控信息和在线监测数据不能完整、准确反映设备健康状况,应结合录波信息综合判断。

分压器故障后,对其进行了更换,更换后的直流分压器高、低压臂电阻、电容和微水等参数测量均合格。

(2)第二次故障情况

2023年7月20日17:09:00,换流站双极运行期间,正极PCPA/B系统显示直流电压监测异常,同时 U_{DN} 电压越限,引起PCP系统切换。送端耗能投入,双极直流未闭锁继续运行。故障波形如图9所示,与第一次故障波形类似。

通过查看故障录波,直流电压偏差斜率控制策略为功率控制站直流电压出现扰动时,通过调节输出功

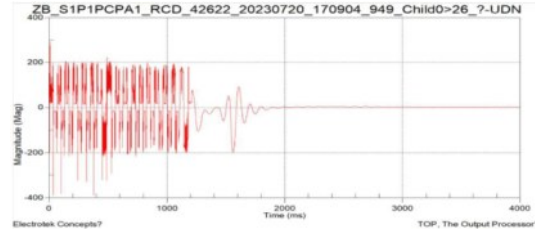


图9 分压器第二次故障波形

率协助稳定直流电压。T0时刻(17:08:59:525)前,正极 U_{DN} 测量值在-130kV~130kV间波动;T0时刻后,正极 U_{DN} 测量值幅值在-400kV~400kV间波动,300ms后(即T1时刻,17:08:59:825)直流电压 U_{DC} 降低到250kV左右,触发换流站直流电压斜率偏差控制。为提升直流电压 U_{DC} ,降低功率至100MW左右,当直流电压 U_{DC} 波动至600kV时,为降低直流电压 U_{DC} ,直流电压斜率偏差控制又开始提升功率至1500MW,因此输送功率在5s内出现较大波动。与此同时,负极 U_{DN} 电压测量值波动范围是10kV。在直流功率稳定后,正极 U_{DN} 稳定在3kV左右波动,负极 U_{DN} 稳定后在2kV左右波动。

“PCP检测到直流电压测量异常”告警原理为:检测端间电压 U_{DC} 与根据子模块平均电压计算得到的直流电压之间的偏差,若偏差大于50kV且超过50ms即发告警^[12]。 U_{DC} 可用下式表示:

$$U_{DC} = U_{DP} - U_{DN} \quad (1)$$

式(1)中, U_{DP} 表示端电压, U_{DN} 表示中性线电压。

从故障录波来看,子模块平均电压计算得到的直流电压为500kV,T2时刻 U_{DC} 为322kV左右,且波动时间超过50ms,满足告警条件。

结合录波信息和年检前故障分压器的情况判断,该正极中性线 U_{DN} 直流分压器内部存在故障。检查监控后台合并单元数据激光器驱动电流无异常,年检结束至故障前,设备在线监测数据正常、无异常变化,现场设备运行正常。通过分析、比较第二次故障与第一次故障录波,认为两次故障均为直流分压器内部故障所致。结合设备运行正常的实际情况,判断该直流分压器可暂时继续运行,待改进型电阻分压器到现场后再更换,但在此之前必须加强设备运行状态监控。

但运行至2023年8月2日,直流分压器再次发生测量异常。14时09分06秒,换流站发出两系统参考波信号不一致报警信号;14时23分08秒,发出PCP检测到直流电压异常,故障工况和现象如下:

□ 8月2日14时23分08秒,换流站正极处于有功控制模式,单极功率指令值-1345MW。PCP两套系统均检测到 U_{DN} 测点在-626kV~626kV范围内大幅波动,正极端间电压 U_{DC} 测量值在-135kV~1192kV间波动。直流电压变化到484kV左右后,触发直流电压斜率偏差控制,开始降低功率至-640MW左右,直流电压提高到604kV左右后,继续触发直流电压斜率偏差控制开始升高功率,之后直流电压和有功出现较大波动。直流电压和有功率波动如图10所示。

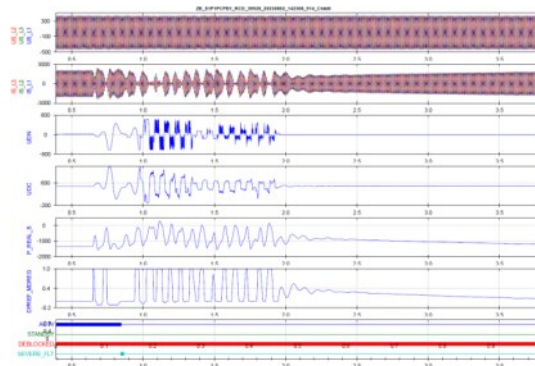


图10 第1次直流电压和有功波动波形

□ 8月2日14时23分13秒,PCP两套系统再次检测到 U_{DN} 测点出现波动,波动范围为-626kV~626kV,正极端间电压 U_{DC} 测量值在-121kV~1162kV间波动。直流电压变化到313kV左右后,触发直流电压斜率偏

差控制,开始降低功率至-590MW左右,直流电压提高到1092kV左右后,继续触发直流电压斜率偏差控制开始升高功率,之后直流电压和有功出现较大波动。直流电压和有功功率波动如图11所示。

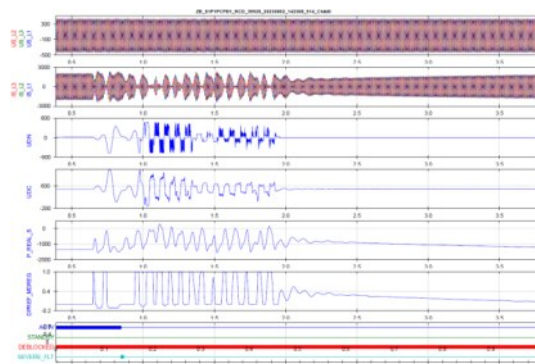


图11 第2次直流电压和有功波动波形

主备系统参考波信号不一致告警逻辑为:主用和备用系统之间的参考波d轴幅值(U_{dref})或参考波q轴幅值(U_{qref})相差15kV,延时1s报主备系统参考波信号不一致告警。故障时刻前,正极极控A系统处于备用系统,正极极控B系统处于主用系统。极控主备系统在 U_{DN} 波动前参考波差值较大,导致主备系统参考波信号不一致告警,其中极控B系统(主用)参考波正常,极控A系统(备用)系统参考波过小^[13]。主备系统参考波差值较大的原因:极A系统(备用)的DPREF_MDREG为0.786,备用系统的斜率偏差控制策略动作,导致其参与有功调整引起参考波变化;极控B系统(主用)的DPREF_MDREG为0,备用系统的斜率偏差控制策略未动作,参考波正常。但阀控系统只跟随主用系统,备用系统的参考波无法发挥作用,因此直流电压和有功功率在触发录波前未发生变化。

两套系统直流电压斜率偏差控制策略动作不一致,主要原因是由于斜率偏差控制策略动作条件只与直流电压大小相关,初步判断两套系统测量存在偏差,故障前备用系统直流电压大于动作定值,备用系统直流电压斜率偏差控制策略满足动作条件,而主用系统未满足。

2 检查试验

2.1 解体检查

(1)第一次解体

2023年7月17日,在原生产厂家对第一次故障直流分压器进行解体检查,解体过程和具体情况如下:

□先拆下分压器高压侧法兰,发现高压端吸附剂安装罩严重变形,说明内部电容已经爆裂并造成较大的冲击,内部的连接线已被顶断,吸附剂袋已破裂,有黑色碳化物质和电容器的绝缘油流出。高压端状态如图12所示。

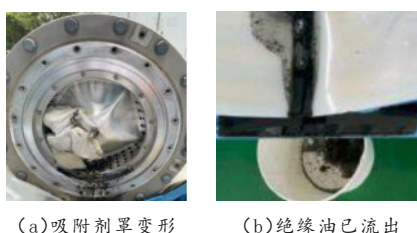


图12 高压端吸附剂罩和绝缘油状态示意图

□拆除套管两端的连接法兰后,可以看到电容器两端的铝法兰、膨胀器与电容器的绝缘筒已分离,已发生漏油及严重损毁,高压端有少许电容器内部的电容芯子已被挤压到绝缘筒外部,如图13所示。低压端有大量电容器内部的电容芯子已被挤压到绝缘筒外部,如图14所示。电容器的绝缘筒状态较好,未破裂。说明电容器故障时内部高温高压,产生了较大的冲击。

□电容器两端的膨胀器有较大的变形,低压端的膨胀器波纹管还有伸缩性,但已扭曲变形,高压端的膨



(a)高压端

(b)低压端

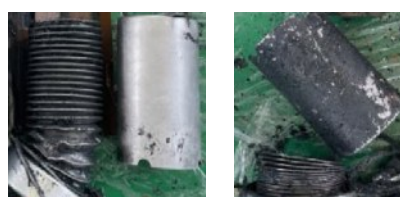
图 13 高低压端损坏示意图



注:(左侧为低压端,右侧为高压端)

图 14 绝缘筒示意图

胀器波纹管已被顶死无法回弹。应为电容器内部爆裂时挤压变形导致,如图 15 所示。



(a)高压端

(b)低压端

图 15 膨胀器变形示意图

□ 电容器解剖后,电容筒内部中间位置至顶部有熏黑痕迹,内部约 60cm 区域空间已形成空腔,如图 16 所示。电容中间区域放电形成高压冲击后顶开了两端的法兰和膨胀器,将内部电容芯子顶出电容器绝缘筒,形成了中间的空腔,内部严重碳化。



图 16 电容器解剖后内部情况

□ 剖开电容芯体发现,顶部电容芯体绝缘膜老化并硬化,底部电容芯体绝缘膜内部正常,大部分芯体边缘融化变黑,随机剥开电容芯体内部基本正常,如图 17 所示。实测电容芯子为 146 个,比正常少 4 个。



图 17 电容芯子展开示意图

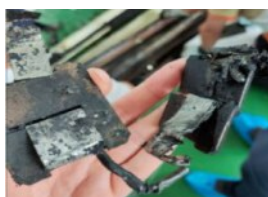
□ 拆解后两段电容芯体之间的连接件如图 18,展开后发现金属连接片上有放电灼烧造成的破损缺口。

□ 低压臂内部有严重放电痕迹,阻值从 100k Ω 变为 95k Ω ,气体放电管和电容器已烧毁。故障时分压比变大,造成低压臂过压导致。而其余绝缘子、内部连接件、高压电阻等零部件外观完好。

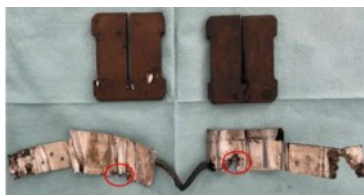
(2)第二次解体

2023 年 8 月 8 日,在某国家重点实验室对第二台故障直流分压器进行解体检查,解体过程和具体情况如下:

□ 先拆下分压器高压侧法兰,发现高压端吸附剂安装罩严重变形,说明内部电容已经爆裂并造成较大的冲击,内部的连接线已被顶断,吸附剂袋已破裂,有黑色碳化物质和电容器的绝缘油流出,如图 19 所示。



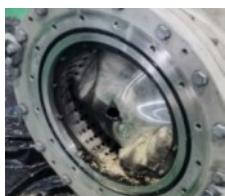
(a)高压端损坏示意图



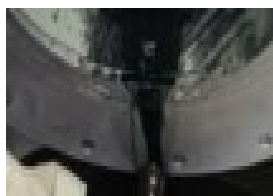
(b)低压端损坏示意图(清洁并展开)

图 18 两端芯体连接的部件

与第一台解体情况相似。



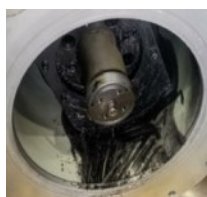
(a)吸附剂罩变形



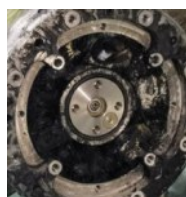
(b)电容器绝缘油流出

图 19 高压端吸附剂罩和绝缘油状态示意图

□ 拆除套管两端的连接法兰后,可以看到电容器低压端的铝法兰、膨胀器与电容器的绝缘筒已分离,已发生漏油及严重损毁,高压端膨胀器法兰与绝缘筒仍相连,如图 20(a)所示;低压端有大量电容器内部的电容芯子已被挤压到绝缘筒外部,如图 20(b)所示。电容器的绝缘筒状态较好,未破裂,如图 21 所示。说明电容器故障时内部高温高压,产生了较大的冲击。



(a)高压端



(b)低压端

图 20 高低压端损坏示意图



图 21 电容器绝缘筒示意图

□ 电容器两端的膨胀器均已变形,低压端的膨胀器波纹管还有伸缩性,但内侧端部已变形,高压端的膨胀器波纹管已被顶死无法回弹。应为电容器内部爆裂时挤压变形导致,如图 22 所示。

□ 电容器解剖后,电容筒内部高压端膨胀器位置至顶部有熏黑痕迹,内部大部分区域空间已形成空腔,如图 23 所示。电容中间区域放电形成高压冲击后顶开了低压端的法兰和膨胀器,将内部电容芯子顶出电容器绝缘筒,形成了中间的空腔,内部严重碳化。

□ 剖开电容芯体发现,电容芯体绝缘膜老化并硬化,绝缘膜内部正常,大部分芯体边缘融化变黑,随机剥开电容芯子内部基本正常,如图 24 所示。实测电容芯子为 148 个,比正常少 2 个,比第 1 台多 2 个。



(a)高压端

(b)低压端

图22 膨胀器变形示意图



图23 电容器解剖后内部情况



图24 电容芯子展开示意图

□ 拆解后,两段电容芯体之间的连接件如图25,展开后发现金属连接片上有放电灼烧造成的破损缺口。



图25 中间芯体连接的部件(清洁并展开)

□ 低压臂内部有严重放电痕迹,阻值从 $100\text{k}\Omega$ 变为 61.5Ω 左右,气体放电管和电容器已损坏。其余绝缘子、内部连接件、高压电阻等零部件外观完好。放电管和电容器损坏的原因应是故障时分压比变大,低压臂过压导致。

2.2 连接片送检

(1)电镜分析

结合两次故障现象,判断此测点分压器电容损坏的主要原因是谐波电压。对第一次故障分压器解体失效的连接片3件残留物进行电镜分析,分别为连接片高压端(7#)、中间部分(9#)、低压端(11#)。送检试样外观如图26所示。

送检失效连接片可闻到明显的烧焦味道,送检试样失效部位断口情况相近。宏观上看,断口均呈现黑

(a)高压
端(7#)(b)中间部分
(9#)

(c)低压端(11#)

图26 低压臂损坏后内部示意图

色,有覆盖物,断口附近可见棕红色金属光泽,应是外层锡熔化后,造成内部铜裸露引起的。断口宏观形貌如图 27 所示。



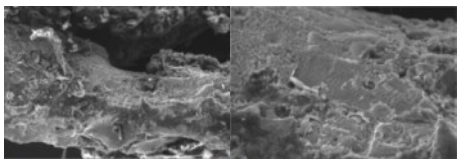
图 27 失效部位宏观形貌

微观上看,断口整体光滑,呈现熔覆状态,未见典型的机械断裂特征,局部区域可见气孔特征^[14]。断口微观形貌如图 28 所示。

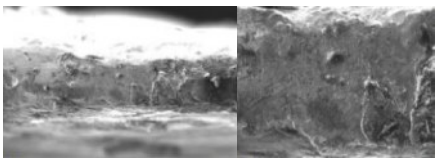
(2)能谱分析

能谱分析(EDS)可以分析断口表面元素化学成分及其分布^[15]。送检失效连接片断口能谱分析如图 29 所示,能谱分析显示断口覆盖物以碳(C)、氧(O)为主,应是断口与周边油、绝缘材料等有机物发生高温熔化或燃烧所致;断面基体以碳(C)、铜(Cu)、氧(O)为主,应是铜材料高温氧化所致。化学成分见表 3。

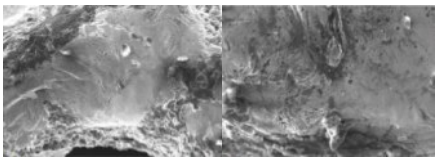
综合上述情况分析,送检失效连接片均出现了高温熔化现象。



(a)高压端(7#)



(b)中间部分(9#)



(c)低压端(11#)

图 28 断口微观形貌

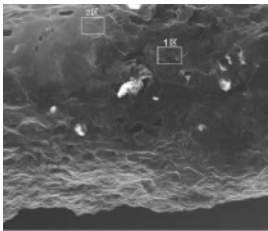


图 29 断口能谱分析图

表 3 断口覆盖物化学成分表

元素	质量分数/%	
	1 区	2 区
C	84.91	53.63
O	2.96	4.49
F	2.09	0.88
Al	2.09	/
S	2.28	7.99
Cu	2.56	30.28
Na	0.60	/
Cl	0.28	0.38
Si	0.24	0.15
K	0.30	/
Sn	1.27	2.20
Fe	0.27	/
Ti	0.15	
合计	100	100

2.3 谐波监测

(1)监测情况

为监测系统谐波,现场增加 50k 故障录波装置监测系统正极、负极谐波^[16]。监测数据表明,正极和负极的极线电压和中性线电压均含有较大的 200 次谐波。随着功率水平增加,200 次谐波电压逐渐增大。相同运

行工况下, U_{DN} 的 200 次谐波电压要高于 U_{DP} , 如图 30 所示。

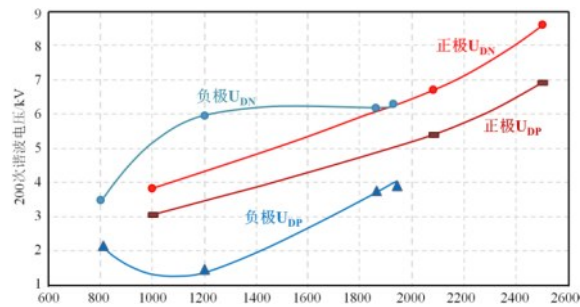


图 30 不同功率水平 200 次谐波电压含量关系

负极谐波监测如图 31 所示, U_{DN} 、 U_{DP} 和 U_{DNB} 的主要谐波见表 4。负极 U_{DN} 200 次谐波峰值达到 8.59kV, 负极 U_{DP} 200 次谐波峰值达到 6.9kV。

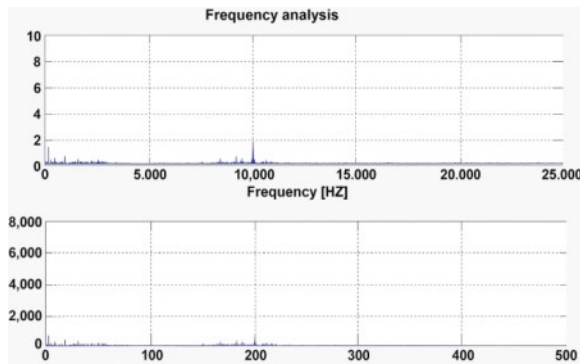


图 31 负极 50k 谐波频谱分析

表 4 负极主要谐波电压含量

测点	谐波次数	电压峰值	电流峰值
U_{DN}	1	0.138	0.062
	2	0.041	0.037
	3	0.253	0.341
	200	8.592	771.987
U_{DP}	1	3.363	0.251
	2	0.516	0.077
	3	1.051	0.236
	200	6.908	103.302
U_{DNB}	1	0.031	0.014
	2	0.001	0.001
	3	0.043	0.058
	200	0.025	2.246

其中, 谐波含量与电流关系如图 32 所示。

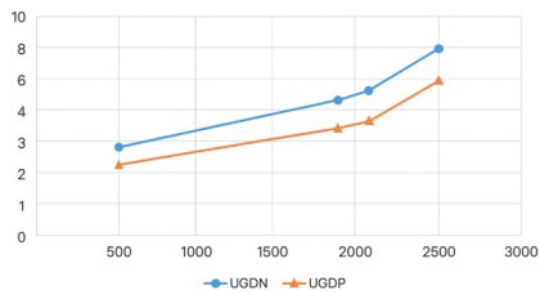


图 32 负极不同功率水平 200 次谐波电压含量关系

正极 U_{DN} (已去除电容) 也含有 200 次谐波, 说明 200 次谐波由系统产生, 而不是分压器本身产生。正极谐波监测如图 33 所示, U_{DN} 、 U_{DP} 和 U_{DNB} 的主要谐波见表 5。

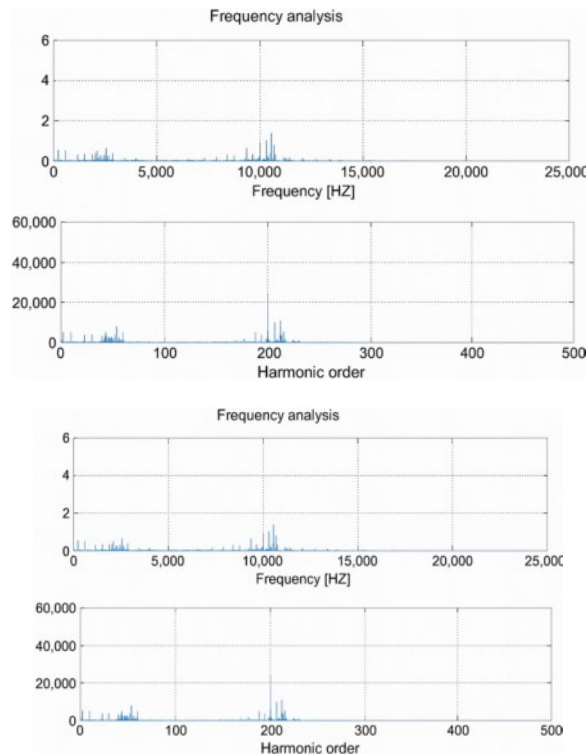


图 33 正极 U_{DN} 谐波频谱分析

表 5 正极主要谐波电压含量

测点	谐波次数	电压峰值	电流峰值
U_{DN}	1	0.0524	0.024
	2	0.0384	0.035
	3	1.0533	1.42
	200	7.3695	662.146
U_{DP}	1	3.2138	1.444
	2	0.6401	0.575
	3	1.0617	1.431
	200	4.5375	407.692
U_{DNB}	1	0.0381	0.017
	2	0.0037	0.003
	3	0.2987	0.403
	200	0.0067	0.602

通过上述监测数据, 判断系统中存在较大的 200 次高次谐波。

同时, 在直流金属回线故障测距 TDR 装置检测到 10kHz、200kHz 左右高频谐波分量干扰^[17]。高频谐波分量如图 34 所示。

(2) 谐波溯源

通过建模, 对高、低次谐波溯源、分析。可以确定直流侧存在 3 次和 6 次等低次谐波通路, 但谐波泄漏量小不会造成直流分压器损坏。低次谐波源有三个: 3 次谐波注入通过该换流站换流变杂散电容与分压器形成谐波通路、6 次谐波通过直流线路和对端换流站形成谐波通路、新能源场站谐波交直流谐波传递^[18-19]。

高次谐波周期(200 次)与阀控周期 100μs 一致, 每个周期阀控进行子模块投切和轮换, 进而在基频基础

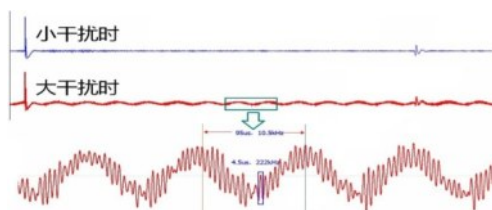


图 34 TDR 装置检测情况

上叠加 10kHz 脉动。高频谐波频率与换流阀调制频率相关^[20],采用最近电平逼近调制策略产生阀控频率 f_s 倍频谐波。影响不同频次谐波电压幅值的主要因素包括调制比(无功功率)、子模块电压波动(桥臂电流)、阀端间电压(子模块个数)、谐波频率,与运行方式关系不大^[21]。调制比越大,整体高频电压谐波幅值越大;直流电压越大,整体高频电压谐波幅值越大;谐波频率越高,对应频率高频电压谐波幅值越低;子模块电容电压波动影响调制波电压阶跃幅度,但影响程度较小^[22]。200 次高次谐波源于阀控投切子模块所致,谐波分量较大^[23]。

2.4 电容试验

(1) 多次谐波下电容芯体温升试验

温升试验前后分别在 10% 和 100% 额定一次电压下测量电容芯体的电容量和介质损耗因数,判断 3000Hz 和 2000Hz 谐波频率下温升试验是否引起试品电容量变化^[24]。现场故障分析显示,流过高压臂电容芯体的谐波电流总有效值为 771.99mA,故本次温升试验使流过试品的电流值为 772mA(1000Hz 谐波峰值电流)。试验过程使用红外热像仪监测并记录每半小时温升值。

从试验结果来看,将电容芯体电流保持为 772mA(1000Hz 谐波峰值电流),在 3000Hz 和 2000Hz 谐波频率下其温升曲线变化趋势相似,温升最终稳定在 14℃ 左右,如图 35 所示。温升试验前后电容量和介质损耗因数基本不变。

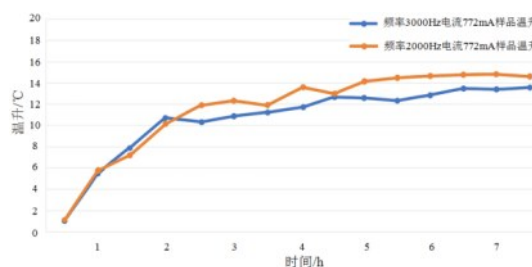


图 35 电容芯体不同谐波频率下温升对比

(2) LCR 扫频试验

为验证电容器自身谐振情况,对电容芯体进行 LCR 扫频试验,扫频频率范围为 5Hz~5MHz,测试不同频率下电容芯体的阻抗和阻抗角。

从试验结果来看,随着频率由 5Hz 上升到 1MHz,电容芯体阻抗从 23.4MΩ 下降到 155.9Ω,其阻抗角也由 -90° 左右变化到 -50° 左右。如图 36 所示。

综合 LCR 扫频试验和宽频高压电容测量试验结果,高频条件下电容性质会发生变化。在 1kHz~10kHz 频段,电容器自身未发生谐振。

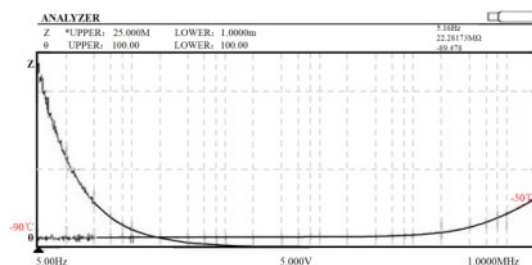


图 36 在不同频率下的阻抗和相角

4 影响因素分析

4.1 故障原因排除

两次解体检查发现,电容芯子内部均正常,且均发现金属连接片上有放电高温熔化形成的破损缺口。通过解体情况分析,第一次解体电容器绝缘油色谱乙炔和总烃超标,电容芯体中间区域均形成空腔,判断中间存在持续放电形成高压冲击后顶开了两端的法兰和膨胀器。

(1)综合解体检查、连接片送检结果、谐波测量和电容芯体试验,可判断两次故障原因相同,导致直流分压器故障始发的原因可能是谐波电流、谐波电压或谐振电流、谐振电压。

(2)考虑到两次故障电容芯体的芯子基本正常,以及多次谐波下电容芯体温升试验结果,始发故障原因为谐波电流或谐振电流导致电容芯体热损坏可能性基本可以排除。

(3)系统谐波分析表明 10kHz 谐波分量较大,电容芯体长期流过 10kHz 高频电压,不能排除电容芯体采用连接片特殊结构,谐波电压在薄弱点处产生持续放电的可能。

(4)TDR 检测结果表明,回路可能存在 200kHz 更高频次谐波,引起电容容性发生变化,并与回路杂散电感形成谐振,谐振电压在电容芯体连接片产生持续放电。

4.2 故障原因分析

电力系统中,谐振与谐波是常见的现象^[25],谐波是周期性波形中特定频率的干扰信号^[26],而谐振是电路在特定频率下产生的共振现象^[27]。谐振是由于系统参数不匹配,特定频率下电感和电容相互抵消方向相反,从而激发谐振,造成谐振的主要原因是系统电气参数变化,其表现形式是电流和电压的周期性大幅波动^[28]。谐波是由于非线性负荷导致电流与电压间的关系也变成非线性,引发波形畸变形成谐波,不同的谐波分量以不同正弦波的畸变形态,以各自不同的频率、幅度和相角作用于电力系统^[29]。

虽然谐振和谐波的产生机理、物理现象和影响截然不同^[30],但在某些特定条件下谐波可能激励系统谐振^[31]。从 TDR 检测结果来看,分压器故障回路存在 $\geq 200\text{kHz}$ 的高频次谐波。回路参数受高频次谐波影响,当电容和杂散电感符合谐振条件时,从而诱发谐振,这个结论与电容芯体连接片持续放电的故障现象基本吻合。

5 防范和改进措施

□ 改进直流分压器结构,将阻容式直流分压器更换为电阻型分压器。结合本次故障分析研究,新型分压器选型设计、工艺流程重新校核,合理确定电阻值和电容值。

□ 加强直流分压器运行监视,从本文分析来看,直流分压器运行中监控信息和在线监测数据均无任何异常,在一次设备外观正常情况下,设备监控信息和在线监测数据均未能及时、准确分析设备已经出现的故障。应在设备定期巡检时查看录波信息,并结合红外热像检测,综合判断分压器存在故障和潜在隐患。

□ 对运行中的直流分压器,开展整体分压器的 LCR 扫频试验、电容芯体高频冲击电压试验,检查连接片是否存在放电隐患。

□ 探索开展高频谐波源试验设备研发,深入研究柔直站谐波产生机理和监测预警,讨论直流侧增加高频电容器的必要性。

□ 主备系统直流电压斜率偏差控制策略不同步会引起极控主备系统参考波差值较大,针对主备系统直流电压斜率偏差控制策略不同步问题建议改进控制策略,稳态时精准控制直流功率,动态时针对不同电压波动,分级投入电压辅助控制,快速平抑直流过电压、欠电压和长时振荡问题。

6 结论

□ 通过监测发现,换流站正负极中线电压测点均含有较大的 200 次谐波(10kHz),其中正极中性线谐波电压最大值达到 8.59kV,引起直流分压器电容发热或持续局部放电造成电容内部过热,导致电容器绝缘油分解、电容芯子边缘融化、内部压力增大以及端部密封损坏,两段电容芯体连接处产生了较强的放电电弧造成连接片的烧蚀损坏。

□ 经分析论证,直流侧存在 3、6 次等低次谐波,但谐波分量较小不会造成直流分压器损坏,高频谐波来自阀控子模块投切所致,谐波分量较大。从高次谐波下电容芯体温升试验结果来看,3kHz 同谐波电流对电容芯体温升影响不显著,试验前后电容容量和介质损耗因素不变。

□ 通过电容试验,高频条件下电容性质会发生变化,1kHz~10kHz 条件下电容器自身未发生谐振。

□ 从 TDR 检测结果来看,分压器故障回路含有 $\geq 200\text{kHz}$ 的高频次谐波。受高频次谐波影响,当电容和杂散电感符合谐振条件时,将会诱发谐振,该结论与电容芯体连接片放电烧蚀破损的故障现象基本吻合。

参考文献:

- [1] Read J. C. The calculation of rectifier and converter perance character rustics[J]. Journal IEE, 1945, 92(II): 495-590.
- [2] H. Rissik. Mercury-arc current convertors[M]. London: Sir Isaac Pitman Sons,Ltd., 1933.
- [3] Kimbark E. W. Direct Current Transmission[M] NewYork: Wiley-Interscience s, 1971.
- [4] Changyue Zou, Hong Rao, Shukai Xu, et al. Analysis of resonance between a VSC-HVDC converter and the AC grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(12): 10157-10168.
- [5] 侯延琦,刘崇茹,王宇,等. 柔性直流输电系统高频振荡抑制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2021,41(11):3741-3751.
- [6] Galliana F, Capra P P, Cerri R, et al. Automated precision DC voltage fixed ratios divider[J]. Measurement, 2018 (122): 291-296.
- [7] 张耀月. $\pm 800\text{kV}$ 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.
- [8] 王奇,谭炳源,刘青松,等. 特高压换流站直流分压器闪络故障研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2019,52(10): 934-940.
- [9] 安海清,李振动,金海望,等. 张北柔直电网直流分压器二次电压测量异常引起误闭锁机理分析及改进措施[J]. 电力自动化设备,2021,41(8):156-160,168.
- [10] 全国电力设备状态维修与在线监测标准化技术委员会. 电力设备预防性试验规程:DL/T596—2021[S]. 北京:中国电力出版社,2021.
- [11] 张平,杨朋威,汤汉松,等. 直流电压测量装置暂态阶跃响应性能现场测试技术[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(9): 143-149.
- [12] 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.
- [13] 杜镇宇,阳岳希,季柯,等. 张北柔直工程高频谐波振荡机理与抑制方法研究[J]. 电网技术,2022,46(8):3066-3075.
- [14] 张宏伟. 超高压罐式断路器瓷套管故障分析与改进措施研究[J]. 江西电力职业技术学院学报,2025,38(1):1-6.
- [15] 张宏伟. GIS 盆式绝缘子表面异物沿面放电故障分析[J]. 电力学报,2025,40(10).
- [16] Jing Lyu, Xin Zhang, Xu Cai, et al. Harmonic State-Space Based Small-Signal Impedance Modeling of Modular Multilevel Converter with Consideration of Internal Harmonic Dynamics[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(3): 2134-2148.
- [17] 张宏伟. 金属回线避雷器能量对其击穿性能的影响研究[J]. 电瓷避雷器,2025(6).
- [18] 季柯,阳岳希,周啸,等. 柔性直流输电工程振荡案例分析与抑制技术[J]. 电气工程学报,2025,20(3):116-135.
- [19] Ke Ji, Guangfu Tang, Jie Yang, Yunfeng Li, et al. Harmonic Stability Analysis of MMC-Based DC System Using DC Impedance Model[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1152-1163.
- [20] 刘泽洪,郭贤珊. 高压大容量柔性直流换流阀可靠性提升关键技术研究与应用[J]. 电网技术,2020,44(9):3604-3613.
- [21] 张宏伟. 高频谐波对阻容式直流分压器绝缘性能影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2025,46(6).
- [22] 郭贤珊,王庆,陈争光,等. MMC-HVDC 子模块高频脉冲产生机理分析及保护策略研究[J]. 高电压技术,2023,49(9): 3977-3987.
- [23] 李奇南,孙宝奎,孙华东,等. 柔性直流输电系统中高频振荡研究综述[J]. 电力自动化设备,2025,45(1):156-171.
- [24] 翟少磊,罗奕,段怡,等. 直流分压器暂态温升及冷却特性研究[J]. 高压电器,2023,59(3):140-149.
- [25] Jos Arrillaga, Bruce C. Smith, Neville R. Watson, et al. Power System Harmonic Analysis[M]. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd., 1997.

- [26] 夏道止,沈赞垠. 高压直流输电系统的谐波分析及滤波[M]. 北京:水利电力出版社,1994.
- [27] 马秀达,卢宇,汪楠楠,等. 张北柔直工程近工频次同步振荡机理及振荡抑制策略[J]. 全球能源互联网,2025,8(4): 489-496.
- [28] Zhang Yonggang, Klabunde Christian, Wolter Martin. Study of resonance issues between DFIG-based offshore wind farm and HVDC transmission[J]. Electric Power Systems Research,2021,190(1): 106767.1-106767.10.
- [29] 杨诗琦,刘开培,秦亮,等. MMC-HVDC 高频振荡问题研究进展[J]. 高电压技术,2021,47(10):3485-3496.
- [30] Shore N.L., Andersson G.. A three-pulse model of DC side harmonic flow in HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery. 1989,4(3). 1945-1954.
- [31] Ake Ekstrom. High power electronics HVDC and SVC[M]. Stockholm: The royal institute of technology, 1990.