

阻容连接对直流分压器谐波分量影响研究

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: 阻容式直流分压器谐波分量监测依靠高、低压臂电容部分来实现,当低压臂阻容连接片断裂造成电容器开路,会导致交直流电压谐波分量异常。文章分析了 ± 800 kV 特高压直流换流站极母线阻容式直流分压器谐波分量异常增大的故障机理,通过解体检查、仿真分析、材料检测分析等技术手段验证了谐波分量与低压臂电容器开路间的关联关系,提出了针对性防范措施,对阻容式直流分压器设计制造、运行监控、检修维护特别是阻容连接片实时状态、监测等领域具有重要的参考、借鉴和指导意义。
关键词: 阻容式直流分压器; 阻容单元; 低压臂; 阻容连接片; 交变应力

Research on the Influence of Capacitive Resistive Connection Piece on Harmonic Components of DC Voltage Divider

ZHANG Hongwei

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

Abstract: The monitoring of harmonic components in a resistive capacitive DC voltage divider relies on the capacitance section of high and low voltage arms. The breakage of the resistive capacitive connection piece of the low voltage arm can cause an open circuit in the capacitor and lead to abnormal harmonic components in the AC and DC voltage. In this paper, the fault mechanism of abnormal increase in the pole bus resistive capacitive DC voltage divider of ± 800 kV ultra - high voltage DC converter station is analyzed. The correlation between harmonic components and open circuit of low-voltage arm capacitors is verified through disassembly inspection, simulation analysis, material detection analysis and other technical means. Moreover, the specific preventive measures are proposed, which have important reference, reference value and guidance significance for the design, manufacturing, operation monitoring, maintenance, especially the real-time status and monitoring of resistive capacitive connection piece of resistive capacitive DC voltage dividers.

Keywords: resistive capacitive DC voltage divider; resistance capacitance unit; low voltage arm; resistive capacitive piece; alternating stress

0 引言

阻容式直流分压器通过电阻和电容元件精密组合,可实现直流、工频交流及高频暂态分量等宽频带范围电压精准测量^[1-2],高、低压臂电阻可以实现电压值测量,而电容仅影响电压突变量和交流量测量^[3]。正常运行中,各项运行参数无法实时反应阻容连接片的当前状态,且由于阻容连接片的特殊位置难以直接观察,若存在开裂、搭接等现象,造成故障特征更模糊、故障机理更复杂、故障点更隐蔽。

国内外对阻容式直流分压器谐波分量及其影

响因素的研究主要结合分压器故障或测量值异常开展^[4-12],针对阻容连接状态及其对直流分压器影响领域的研究未见报道。文章分析了某 ± 800 kV 直流换流站极Ⅱ母线阻容式直流分压器低压臂阻容连接片断裂导致谐波分量放大的故障原因,通过解体检查、仿真分析、材料检测分析等技术手段验证了谐波分量与低压臂电容开路间的关联关系,提出了直流分压器内部放电并不会造成谐波值异常,低压臂电容开路是引起交直流谐波分量增大的原因等论点,并针对性提出防范措施。文章研究的内容填补了阻容连接状态对交直流谐波影响领域的空

白,对阻容式直流分压器设计制造、运行监控、检修维护等领域具有重要的参考和借鉴意义,特别是对阻容连接片实时状态的排查、监测具有重要的指导意义。

1 故障概况

1.1 直流分压器工作机理

1) 直流分压器结构

某 ± 800 kV 特高压直流换流站(送端整流站)共安装 2 台极母线直流分压器、2 台中性母线直流分压器,分别用于测量极母线电压(U_{DL})和中性线电压(U_{DN})^[13-14]。直流分压器采用阻容式,分压器内部由高压臂和低压臂串联构成。高压臂由阻容单元、环氧树脂绝缘筒和硅橡胶复合伞裙组成。环氧树脂绝缘筒是分压器的机械承载和密封部件,用 SF₆ 气体做为其绝缘介质。阻容分压单元由 5 节相同的阻容心子串联连接,均安装在环氧树脂绝缘筒内,其中第 1 节(最下端 1 节)阻容单元同时安装有高压臂部分阻容模块和低压臂阻容模块,在心体内部通过焊接方式连接,其余 4 节阻容单元则均为高压臂阻容模块。每 1 节阻容单元上均缠绕有黑色的电阻丝,电阻丝两端分别焊接在阻容单元上下端金具上。直流分压器结构如图 1 所示。

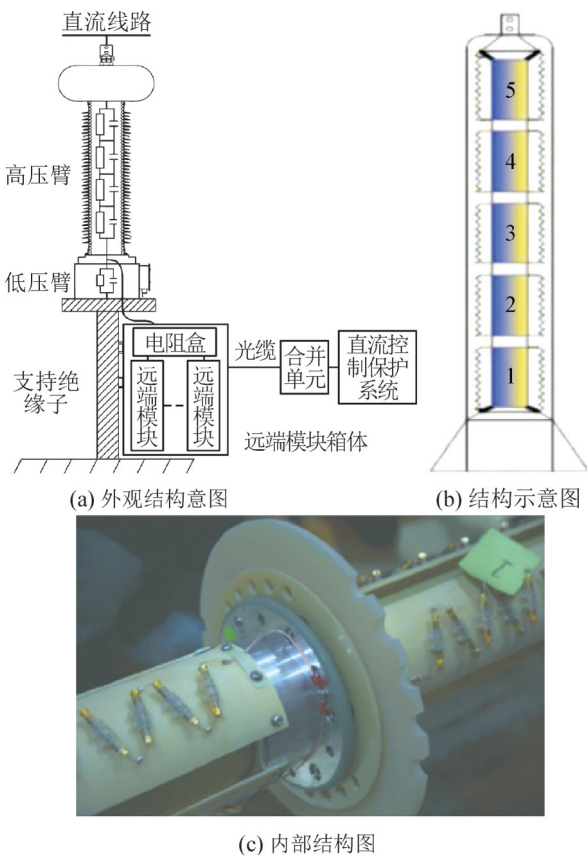


图1 直流分压器结构示意图

Fig. 1 Structural schematic diagram of DC voltage divider

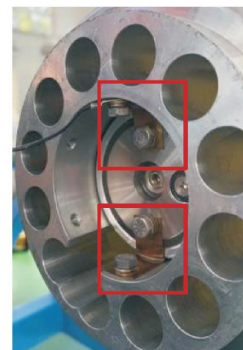
电容器置于阻容单元内部,电阻器安装在电容器两端法兰外部的 3 个环氧板上。每节电阻元件由 3 串电阻并联,每串由 26 个电阻元件串联;每节电容器由 154 个电容元件串联。阻容单元顶部用螺栓固定,底部除螺栓固定外,还用 2 处阻容连接片与心子底部金具相连。2 节阻容单元之间采用金具连接,并配有黑色等电位线,5 节阻容单元连在一起形成电容和电阻的串并联结构。阻容单元和环氧树脂绝缘筒如图 2 所示。



(a) 阻容连接方式



(b) 顶部金具



(c) 底部金具

图2 绝缘筒及阻容单元

Fig. 2 Insulation tube and resistive-capacitive unit

2) 直流分压器传递函数

直流分压器低压臂并联有放电间隙与压敏电阻串联组成的过压保护回路^[15],过压保护回路能够在低压臂承受过电压时导通,形成放电通道,从而保护低压臂和二次回路元件。直流分压器等效电路如图 3 所示。

根据基尔霍夫定律,对图 3 所示等效电路进行分析,得出输出电压 U_2 与直流电压 U_1 间的关系为

$$(C_1 + C_2) \frac{du_2}{dt} + \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right) u_2 = C_1 \frac{du_1}{dt} + \frac{u_1}{R_1} \quad (1)$$

式中: R_1 、 C_1 分别表示高压臂电阻和电容值; R_2 、 C_2 分别表示低压臂电阻和电容值; u_1 、 u_2 分别表示一、二次侧电压。

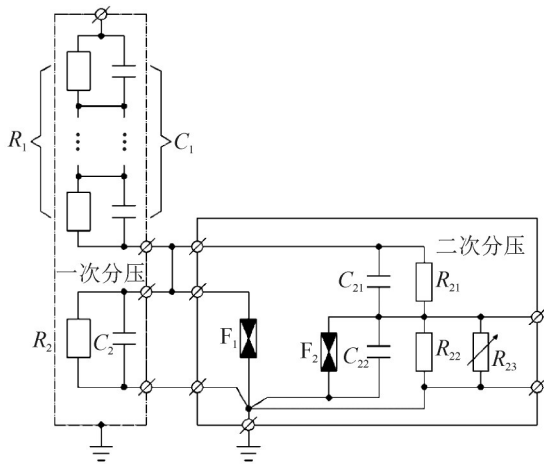


图3 直流分压器等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of DC voltage divider

对式(1)进行拉普拉斯变换,可得零输入条件下阻容分压环境传递函数 $H_{RC}(s)$ 为

$$H_{RC}(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{C_1 s + \frac{1}{R_1}}{(C_1 + C_2)s + \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}} \quad (2)$$

从式(2)可以看出,当输入电压 U_1 为直流,即角频率 $\omega = 0$,则频率 f 为

$$f = j\omega = 0 \quad (3)$$

此时,输入电压 U_1 与输出电压 U_2 的比值可简化为

$$\frac{U_2(0)}{U_1(0)} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (4)$$

而当输入电压 U_1 的频率趋近于无穷大时,即 $f \rightarrow \infty$,则输入电压 U_1 与输出电压 U_2 之比为

$$\frac{U_2(\infty)}{U_1(\infty)} \approx \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (5)$$

由式(5)可知,阻容式直流分压器电压值测量主要依靠是其电阻部分实现,谐波分量的测量则依靠其电容部分来实现^[16]。

当直流分压器参数设计合理时,即阻容分压回路完全匹配,即:

$$R_2 C_2 = R_1 C_1 \quad (6)$$

在此工况下,输出电压 U_2 阶跃响应的初始值与稳态值基本相同,此时一次分压回路的幅频特性比较平坦,因此一次分压回路测量结果不会出现失真和过调。在阶跃响应中,暂态响应过程非常短暂,暂态响应时间可以忽略不计,可以认为不经过暂态过程直接进入稳态^[17]。

3) 直流分压器运行情况

该直流分压器于 2012 年 12 月投入运行,最近一次检修试验时间为 2025 年 5 月,检修后各项试

验数据均正常。试验要求如下:

- ① 试验环境温度为 28℃、空气湿度为 40%;
- ② 高、低压臂电阻测量仪器为绝缘电阻测试仪,电容测量仪器为 AI-6000K 介损仪电容表;
- ③ 高、低压臂电阻的试验参考值为出厂试验值。试验标准为测量值与参考值的差值 $\leq \pm 1\%$;
- ④ 高压臂电容的试验参考值为出厂试验值,低压臂电容的试验参考值为交接试验值,试验标准为测量值与参考值的差值 $\leq \pm 5\%$ 。

最近 3 次试验结果如表 1 所示。

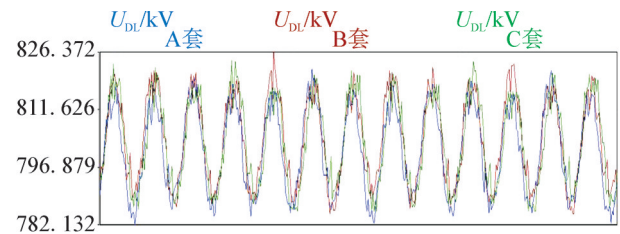
表1 极母线故障直流分压器试验数据
Table 1 Test data of pole busbar fault DC voltage divider

测量项目		参考值	测量值			互差/%
			2021年	2024年	2025年	
高压臂	电阻值/MΩ	400.0	397.3	398.0	399.0	-0.25
	电容值/pF	400.0	395.5	402.0	392.7	-1.86
低压臂	电阻值/kΩ	61.0	61.1	60.3	61.1	0.16
	电容值/μF	4.650	4.330	4.540	4.508	-3.05

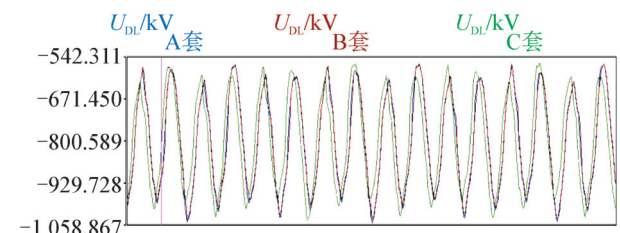
1.2 故障概况

2025 年 3 月 18 日,换流站极 II 母线直流电压测量值出现 200~300 kV 的 6 次谐波分量,造成极 II 转单极控制方式后,双极直流功率出现异常波动。

直流功率异常波动后,现场每间隔 2 h 对站内极 I、极 II 直流母线电压进行录波监测。2025 年 3 月 18 日至 25 日,跟踪发现极 II 极母线直流电压测量值多次出现 200~300 kV 的 6 次谐波分量,对比同时刻极 I 直流电压测量值 6 次谐波分量幅值约 21 kV。电压波形如图 4 所示。



(a) 极 I 极母线电压波形



(b) 极 II 极母线电压波形(波动较大时)

图4 双极电压波形对比

Fig. 4 Comparison of bi-polar voltage waveform

为验证极 II 极母线电压中较大的 6 次谐波分

量是否真实存在,现场使用非接触式电压传感器在极Ⅰ、极Ⅱ直流母线进行测量,实测结果表明双极直流母线电压均存在低幅值6次谐波,且极Ⅰ、极Ⅱ直流电压6次谐波分量波形基本一致。电压波形如图5所示。

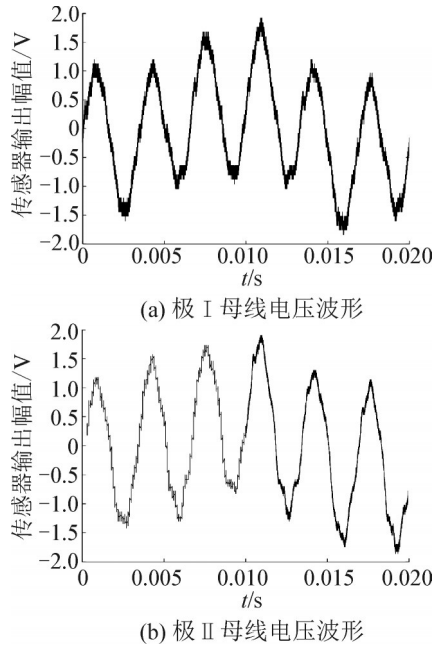


图5 非接触式电压传感器测量结果
Fig. 5 Measurement result of non-contact voltage sensor

2 检查试验

2.1 阻容值测量

返厂解体前,检查直流分压器外观、压力,检查结果均正常,但微水含量明显升高($>1\,000\,\mu\text{L/L}$),判断是因运输过程中降压导致微水含量升高^[18]。测量直流分压器高、低压臂电容值和电阻值^[19-20],测量结果如表2所示。

表2 极母线故障直流分压器阻容测量数据
Table 2 Resistive-capacitive measurement data of pole busbar fault DC voltage divider

测量项目		参考值	测量值	互差/%	结论
高压臂	电阻值/M Ω	400.00	420.93	5.075	超标
	电容值/pF	400.000	407.389	1.85	合格
低压臂	电阻值/k Ω	61.00	61.15	0.26	合格
	电容值/ μ F	4.65	4.35	-6.45	超标

从表2可以看出,直流分压器高压臂电容值和低压臂电阻值测量结果合格,高压臂电阻值和低压臂电容值超标。其中,高压臂电阻值与微水含量密切相关^[21],电阻值超标应是微水含量升高所致,且由式(4)可知,分压器输出电压 U_2 与高压臂电阻值 R_1 呈反比例关系,高压臂电阻值变化只会造成输出电压值随之变化,不会影响谐波分量,更不会产生谐

波分量。低压臂电容值超标且小于其设计参考值,应是造成交直流电压谐波分量异常的根本原因。

2.2 解体检查

在原生产厂家对直流分压器解体检查,具体解体过程如下:

- 1)将直流分压器内部 SF_6 气体回收至零表压。
- 2)拆下顶部盖子。在拆开四周螺栓后,拔下顶盖,发现直流分压器顶盖内部、第5节即最上端1节心子顶部表面以及分压器绝缘筒壁上均附着有少量黑色粉末。
- 3)拆卸分压器底部低压端法兰面与绝缘筒间的连接螺栓,并将低压端法兰和阻容模块整体抽出。心子抽出后,继续拆除端子箱和其他附件,发现第1节心子(含低压臂)底部电容与金具间的2处阻容连接片均断裂,但仍处于搭接状态,在热胀冷缩、交变应力等外力作用下会出现时断时续情况,造成低压臂电容 C_2 无法可靠接地,如图6所示。



图6 2处连接片均断裂
Fig. 6 Breakage of two connection pieces

当低压臂电容接地点断开时, C_2 电容与主回路断开连接,二次侧等效电容 C_3 降低至 $0.26\,\mu\text{F}$ 。根据阻容分压原理,该工况下输出电压中的交流分量会明显放大,即直流分压器低压侧电容 C_2 电容值减小会造成分压器输出电压中的交流分量放大^[22]。该工况下的等效电路如图7所示。

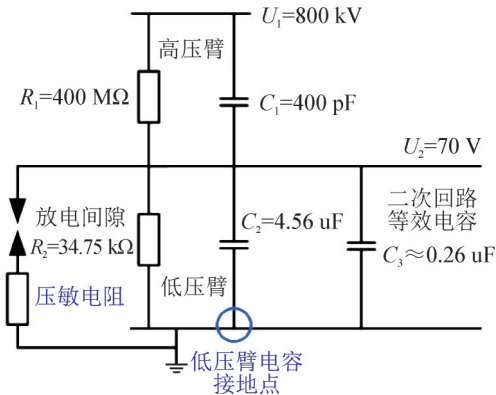


图7 低压臂电容接地点断开时等效电路
Fig. 7 Equivalent circuit when the grounding point of the low-voltage arm capacitor is disconnected

4)继续抽出并拆解第2节心子,发现第2节心子下端的两处阻容连接片中1处已完全断裂,1处已有裂纹、但未完全断裂,如图8所示。

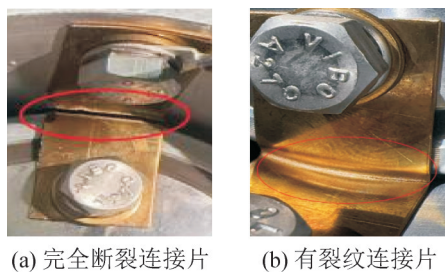


图8 第2节下端电气连接片断裂

Fig. 8 Breakage of electrical connection piece at the lower end of the second section

5)继续抽出并拆解剩余的心子,发现第2节与第3节连接处、第3节与第4节连接处以及第4节与第5节连接处所有阻容连接片均已断裂,但断裂后仍处于搭接状态。同时在拆解第3、4、5节心子过程中,发现其连接金具固定螺栓处有疑似放电痕迹和黑色粉末,如图9所示。

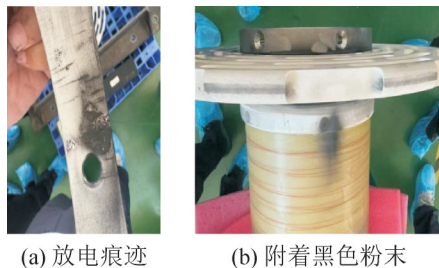


图9 心子连接处放电痕迹和黑色粉末

Fig. 9 Discharge trace and black powder at the core connection

综上,根据5节阻容心子拆解情况,可见第1、2、3、4、5节心子底部阻容连接片均存在不同程度的断裂情况,且第3、4、5节心子连接金具有疑似放电痕迹和黑色粉末状物质,但断裂阻容连接片至少有1片断裂处仍搭接在一起,分压器电容电阻串并联结构仍比较完整,连接片断裂情况如图10所示。

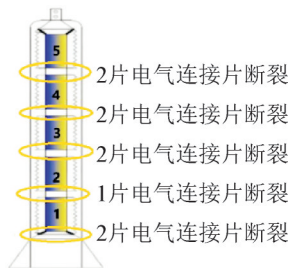


图10 每节电气连接铜片断裂情况

Fig. 10 Breakage of copper piece in each section of electrical connection piece

2.3 黑色粉末检测

对阻容心子附着的黑色粉末进行检测,从检测

结果来看,黑色粉末成分复杂,主要成分为含铝物质(氢氧化铝 55.0 Wt.%~65.02 Wt.%、铝屑 1.0 Wt.%~5.0 Wt.%、氧化铝 20.0 Wt.%~30.0 Wt.%),还含有少量硅酸盐(1.0 Wt.%~5.0 Wt.%)、碳单质(1.0 Wt.%~5.0 Wt.%)和聚酯(5.0 Wt.%~20.0 Wt.%)。

其中,铝屑、氧化铝、氢氧化铝等含铝(Al)物质可能来源于金属结构件本身或其发生化学反应后的产物,聚酯类物质可能来源于套管内壁和心子支撑件,微量氟(F)元素可能来源于 SF_6 气体分解物。结合解体发现的疑似放电痕迹,判断直流分压器内部存在轻微放电,但放电并不是造成输出电压值测量异常的原因^[23]。

2.4 阻容连接片材料检测

选取具有代表性的完好、开裂、完全断裂3件铜连接片送检,样品如图11所示。

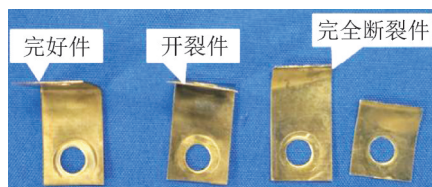


图11 阻容连接片送检样品

Fig. 11 Resistive-capacitive connection piece submitted for inspection

1)宏观分析

宏观分析结果显示,铜片断口整体呈黄铜色,无明显氧化、锈蚀现象,断口裂纹源位于铜片弯折内径表面,断面较平整。断面有明显塑性变形现象,完全断裂铜片折弯内径有数条平直折弯压痕,断面沿其中1条压痕扩展,其中未完全断裂铜片折弯内径裂纹从折弯压痕开裂。断口裂纹源区宏观形貌如图12所示。

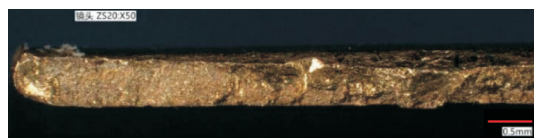


图12 连接片断口裂纹源区宏观形貌

Fig. 12 Macroscopic morphology of the crack initiation zone at the breakage surface of the connection piece

2)综合显微分析

利用扫描电镜(SEM)+能谱联用仪(EDS)技术,通过二次电子成像显示样品表面三维拓扑结构,可以判定元素种类和元素浓度。分析结果显示,断口裂纹源和扩展区微观形貌可见细密疲劳辉纹,终断区为撕裂状韧窝,呈抛物线状,有方向性。断面主要元素为铜(Cu)和锌(Zn)(基体主成分),未检测到异常腐蚀性元素或杂质元素。断口微观形貌如图13所示。

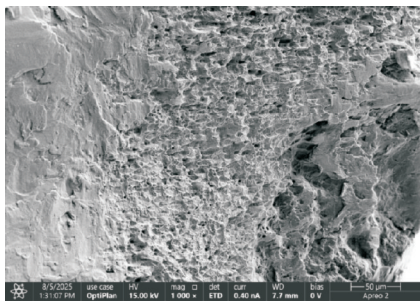


图13 连接片断口微观形貌
Fig. 13 Microscopic morphology of breakage of the connection piece

3) 金相分析

金相分析可以检测样品显微组织大小、形态、分布、数量和性质,并以此建立样品成分、组织和性能间的定量关系。从金相分析结果来看,阻容连接片断裂件和完好件铜片金相显微组织均为孪晶 α 相,平均晶粒度均为9.0级,组织无明显差异^[24]。断裂件裂纹源处晶粒内部可见滑移带,附近存在微裂。连接片双态组织形貌如图14所示。

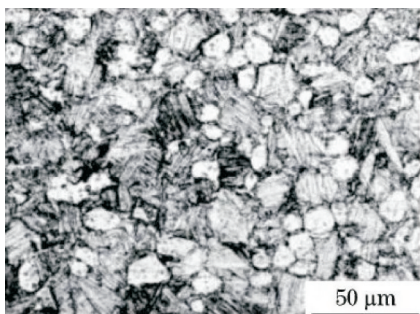


图14 连接片双态组织形貌
Fig. 14 Dual-state microstructure morphology of the connection piece

2.5 X射线探伤检测

正常运行中,难以通过电压波形监视判断运行直流分压器内部阻容连接片是否正常,因此,通过X射线探伤检测技术来判断连接片是否断裂。X射线检测如图16所示,可以看出阻容连接片位于金属法兰内部,X射线无法穿透。

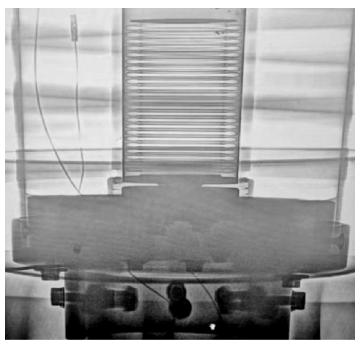


图15 阻容连接片X射线检测
Fig. 15 X-ray detection of resistive-capacitive connection piece

3 仿真分析

3.1 模拟运行工况

利用电磁暂态离线仿真(PSCAD)和实时数字模拟仿真系统(RTDS),分别模拟对侧受端逆变器交流电压不含5次谐波分量和叠加约5%的5次负序谐波分量两种典型运行工况。

从仿真结果来看,当交流电压不含5次谐波分量时,直流系统中亦不会出现6次谐波。当叠加约5%的5次负序谐波分量时,两站极母线电压中均出现一定量的6次谐波分量,幅值均为20 kV左右,与本次故障现象基本一致,由此确认本侧整流站双极母线直流电压6次谐波是由对侧受端逆变器交流侧5次谐波含量超标引起^[25]。电压波形如图16所示。

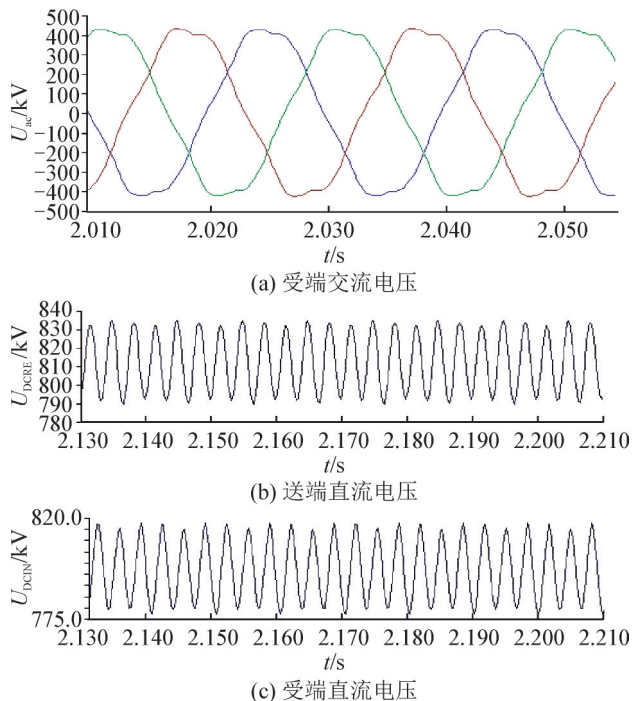


图16 电压谐波仿真结果
Fig. 16 Voltage harmonic simulation result

本次送端整流站极Ⅱ母线直流电压测量值呈现间歇性谐波电压放大现象。根据阻容分压原理,此时输入电压 U_1 与输出电压 U_2 间的关系为

$$U_2(\infty) = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_1(\infty) \quad (7)$$

从式(7)可以看出,谐波电压放大的原因有高压臂电容值 C_1 增大或低压臂电容值 C_2 减小^[26]。当高压臂电容内部部分心子短接时,高压臂电容值变大,此时正常电容心子承受电压增大,故障将进一步扩大,与本次故障分压器时好时坏的故障现象不一致,故可排除高压臂电容器存在异常的可能性。因此,可以确定低压臂电容值 C_2 减小是谐波分量异常的

根本原因,该结论与阻容测量、解体检查结果一致。

3.2 模拟分压器低压臂电容开路

利用 PSCAD 离线仿真系统搭建极 II 母线直流分压器模型,模拟直流分压器低压臂电容开路 ($C_3 \approx 0.26 \mu\text{F}$)。直流分压器谐波波形如图 17 所示,极 II 母线直流分压器测量值出现明显的谐波电压放大现象,其中 6 次谐波放大至 300 kV 左右,振幅与本次故障非常相似。

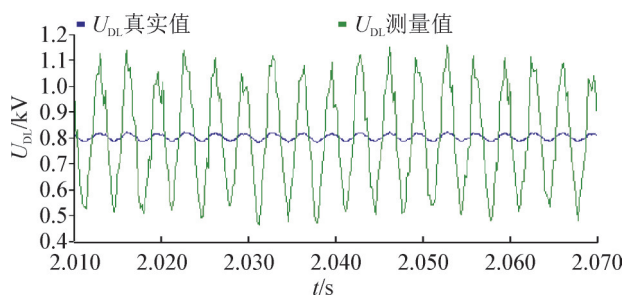


图 17 低压电容臂开路时的直流分压器谐波测量值
Fig. 17 Harmonic measurement value of DC voltage divider in the open circuit of low voltage capacitor arm

综上,确认本次送端整流站直流双极母线直流电压出现 6 次谐波分量的原因为对侧受端逆变站交流侧电压出现约 5% 的 5 次谐波分量^[27],而送端整流站极 II 母线直流电压 6 次谐波分量测量值异常增大的原因是直流分压器低压臂电容开路。

4 应力集中分析

阻容连接片 L 形折弯处极易形成应力集中,主要涉及弯曲应力和剪切应力^[28]。弯曲应力公式为

$$\sigma = \frac{My}{I} \quad (8)$$

式中: M 表示连接片弯矩,与载荷、折弯长度相关; y 表示截面离中性轴的距离,与折弯半径和材料厚度相关; I 表示截面惯性矩,与连接片宽度、厚度相关,公式为

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (9)$$

式中: b 表示宽度; h 表示厚度。

剪切应力公式为

$$\tau = \frac{V}{S} \quad (10)$$

式中: V 表示计算截面上所受的剪力,与载荷分布相关; S 表示连接片剖面面积。

应力集中应进行应力集中系数 K 修正, K 可用有限元分析或实验测量,为

$$K = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{nom}}} \quad (11)$$

式中: $\sigma_{\max}$ 表示截面突变处的局部峰值应力; σ_{nom}

表示截面名义应力。 K 值影响因素有连接片的折弯半径 r 和板厚 t 及过渡角。名义应力 σ_{nom} 计算公式为

$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{P}{tL} \quad (12)$$

式中: P 表示载荷; L 表示有效长度。

则,峰值应力 $\sigma_{\max}$ 修正为

$$\sigma_{\max} = K\sigma_{\text{nom}} \quad (13)$$

综合检验和分析结果,判断失效 L 形阻容连接铜片的断裂属于疲劳断裂,原因是 L 形结构易在直角连接处产生应力集中,在弯曲载荷作用下,外侧承受弯曲应力,内侧承受剪切应力,导致直角处成为高风险部位,极易萌生裂纹并扩展。运行中受电磁^[29]、库仑力^[30]及梯度力^[31]等客观因素影响^[32],折弯处交变应力峰值 $\sigma_{\max}$ 远大于材料屈服强度,裂纹不断扩展,最终导致连接片疲劳断裂。

5 结语

1) 直流分压器解体检查与仿真分析结果完全一致,低压臂电阻与电容间连接片断裂造成电容开路,是换流站直流输出电压谐波分量放大的根本原因。

2) 阻容连接片设计制造不合理,其 L 形折弯处形成应力集中,产生裂纹,运行过程中在热胀冷缩、交变应力等外力作用下裂纹不断扩展,极易形成疲劳断裂。解体检查结果亦证实,此类断裂并非个例。应从设计制造阶段加以改进,将直流分压器阻容连接方式由 L 形硬连接改进为多股软导线。

3) 正常运行中,阻容式直流分压器输电电压由高、低压臂电阻值决定,与其电容值无关。当阻容片断裂造成电容开路时,测量的直流电压值仍按电阻比分布,因此直流分压器仍可正常运行并测量电压,但是其交流谐波分量和冲击电压分布关系已发生较大改变,若系统出现过电压极易造成直流分压器放电。应提升交直流谐波监测和预警能力,在谐波监测主机中增加重要电流、电压谐波监测及含量超标告警功能。暂不具备谐波自动监测预警功能的换流站,建议定期开展交直流电气量谐波检测。

4) 直流分压器高、低压臂电容值仅影响电压突变量和交流量测量,因此运行过程中阻容连接片断裂后无法通过实时监测、测量参数反映,且由于其所处位置限制难以直接观察,若断裂处存在搭接现象,并随温度变化而改变,会导致故障现象极为隐蔽。因此,在不拆解直流分压器本体的情况下难以

判断阻容连接片状态,应研究直流分压器不解体情况下,阻容连接片状态的排查方法。

参考文献

- [1] YILMAZ S, KILCI S B. Modeling and simulation of a fuzzy heat distribution controlled high-voltage DC resistive divider[J]. Measurement and Control, 2020, 53(3-4): 485-500.
- [2] 杨永刚,任春阳,雷梅梅,等. 直流分压器高压臂电容器的研制[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(5): 42-47.
YANG Yonggang, REN Chunyang, LEI Meimei, et al. Development of high voltage arm capacitor for DC voltage dividers[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(5): 42-47.
- [3] 王奇,谭炳源,刘青松,等. ± 800 kV 直流分压器校准分析计算模型研究与应用[J]. 高压电器, 2017, 53(12): 163-167.
WANG Qi, TAN Bingyuan, LIU Qingsong, et al. Calibration model for ± 800 kV DC divider[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(12): 163-167.
- [4] LI Dengyun, LI Qian, HU Haoliang, et al. Temperature and heat transfer characteristics of DCTV resistance capacitance divider under thermal equilibrium condition[J]. High Voltage Technology, 2010, 36(4): 994-999.
- [5] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑-2008年[M]. 北京:中国电力出版社, 2009.
- [6] 袁欣然,徐天奇,姜燕波. 阻容式直流分压器高压臂短路故障暂态特性仿真研究[J]. 云南民族大学学报(自然科学版), 2023, 32(1): 90-95.
YUAN Xinran, XU Tianqi, JIANG Yanbo. Simulation study on transient characteristics of short-circuit fault of high voltage arm of resistor-capacitor DC divider[J]. Journal of Yunnan University of Nationalities (Natural Sciences Edition), 2023, 32(1): 90-95.
- [7] LI Fengqi, SHE Zhengqiu, LOU Dianqiang. Fault analysis of DC voltage dividers in Xiangjiaba - Shanghai ± 800 kV UHVDC project[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(12): 3244-3248.
- [8] GALLIANA F, CAPRA P P, CERRI R, et al. Automated setup to accurately calibrate electrical dc voltage generators[J]. Measurement, 2018, 123(1): 129-134.
- [9] TENG Yufei, LI Xiaopeng, WU Jie, et al. Simulation study on the transient characteristics of HVDC voltage divider and their effects on undervoltage sensing protection[C]// 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia). [S.l.]: IEEE, 2019: 2027-2031.
- [10] 汪本进,吴细秀,徐思恩,等. 复奉特高压直流分压器二次电压异常原因分析[J]. 高压电器, 2016, 52(1): 7-14.
WANG Benjin, WU Xixiu, XU Sien, et al. Investigate on the failure mechanism of the DC voltage divider for its secondary voltage jumping abnormally in fulong and fengxian substation[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1): 7-14.
- [11] 胡学兵,张正茂,雷鸣. 团林换流站高压直流电压异常波动分析与处理[J]. 高压电器, 2014, 50(9): 111-118.
HU Xuebing, ZHANG Zhengmao, LEI Ming. Analysis on HVDC voltage abnormal fluctuation of tuanlin converter station[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(9): 111-118.
- [12] 梁旭明,常勇,吴巾克,等. 高压直流输电直流分压器内部故障分析及反措[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(20): 118-121.
LIANG Xuming, CHANG Yong, WU Jinke, et al. Internal fault analysis of high voltage direct current transmission DC voltage divider with anti-accident measures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(20): 118-121.
- [13] ZHANG Yu, XIAO Xiangsheng, YAN Xu. Review of research on measurement technologies of DC high voltage: [C]// 2015 7th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE) IEEE, 2015.
- [14] ELG A P, BERGMAN A, HÄLLSTRÖM J, et al. Traceability and characterization of a 1 000 kV HVDC reference divider[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(6): 1709-1715.
- [15] 孙哲,李彦斌,张兆华,等. 特高压换流站直流分压器二次侧过电压保护[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2601-2608.
SUN Zhe, LI Yanbin, ZHANG Zhaozhua, et al. Study on surge protection of DC divider secondary side in UHV converter station[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2601-2608.
- [16] 滕予非,李小鹏,焦在滨,等. 特高压直流分压器传变特性及其对电压突变量保护影响[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 122-130.
TENG Yufei, LI Xiaopeng, JIAO Zaibin, et al. Analysis of the transfer characteristic of DC voltage divider in UHVDC system and its effects on undervoltage sensing protection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 122-130.
- [17] 滕予非,汤涌,汪晓华,等. 特高压直流输电工程直流分压器动态特性及其引起的误闭锁机理研究[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2646-2653.
TENG Yufei, TANG Yong, WANG Xiaohua, et al. Mechanism analysis of error block caused by dynamic characteristics of DC voltage divider in UHVDC[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2646-2653.
- [18] 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.

- [19] ± 800 kV 特高压直流设备预防性试验规程: Q/GDW 10299—2025[S]. 2025.
- [20] 邱进, 吴士普, 汪本进, 等. 特高压直流换流站分压器预试方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 152-157.
QIU Jin, WU Shipu, WANG Benjin, et al. Preventive test method research of UHV DC converter station DC voltage divider[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 152-157.
- [21] 谢超, 尚涛, 李乾坤. ± 800 kV 特高压直流分压器内部故障的 SF_6 分解物测试特性[J]. 高压电器, 2019, 55(5): 230-233.
XIE Chao, SHANG Tao, LI Qiankun. Test characteristics of SF_6 decomposition components for internal fault of ± 800 kV UHVDC voltage divider[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(5): 230-233.
- [22] 王欢, 王忠东, 卢树峰, 等. 基于误差状态模糊分析的电容式电压互感器内绝缘状态评价方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(4): 73-80.
WANG Huan, WANG Zhongdong, LU Shufeng, et al. Internal insulation condition evaluation method for capacitor voltage transformer based on fuzzy analysis of error condition[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(4): 73-80.
- [23] 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.
- [24] 金属平均晶粒度测定方法: GB/T 6394—2017[S]. 2017.
Determination of estimating the average grain size of metal: GB/T 6394—2017[S]. 2017.
- [25] 崔秋菊, 陈桂丰, 彭晓玲, 等. 铁氧体传输线电压测量用自积分电容分压器设计[J]. 高压电器, 2024, 60(6): 107-113.
CUI Qiuju, CHEN Guifeng, PENG Xiaoling, et al. Design of self-integrating capacitive voltage divider for ferrite transmission line voltage measurement[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(6): 107-113.
- [26] 肖勇, 翟少磊, 罗奕, 等. 在运阻容式直流分压器的频率响应补偿措施研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(2): 40-46.
XIAO Yong, ZHAI Shaolei, LUO Yi, et al. Research on frequency response compensation measures of operated resistive-capacitive DC voltage divider[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(2): 40-46.
- [27] 刘彬, 邓小聘, 李建光, 等. 柔性直流光纤电流互感器阶跃响应特性研究[J]. 高压电器, 2024, 60(5): 140-146.
LIU Bin, DENG Xiaopin, LI Jianguang, et al. Research on Step Response Characteristics of Flexible DC Fiber-optic Current Transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(5): 140-146.
- [28] 张宏伟. 拐臂脱离后隔离开关机械性能试验研究[J]. 机械研究与应用, 2022, 35(5): 229-232.
ZHANG Hongwei. Experimental study on mechanical performance of disconnector after crank arm disengaged[J]. Mechanical Research & Application, 2022, 35(5): 229-232.
- [29] MAXWELL J C. A treatise on electricity and magnetism[J]. Nature, 7(182): 478-480.
- [30] 徐云武, 李红斌, 张传计. 基于优选建模和深度置信网络的电压互感器误差定量评估方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(8): 55-62.
XU Yunwu, LI Hongbin, ZHANG Chuanji. Error quantitative evaluation method of potential transformer based on optimal modeling and deep belief network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(8): 55-62.
- [31] 姚力, 许灵洁, 李舜, 等. 基于数字比较法的宽频标准电流互感器溯源技术研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(8): 97-103.
YAO Li, XU Lingjie, LI Shun, et al. Research on traceability technology of broadband standard current transformer based on digital comparison method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(8): 97-103.
- [32] 张宏伟. 自由颗粒对盆式绝缘子绝缘特性的影响分析[J]. 电力安全技术, 2024, 26(5): 64-67.
ZHANG Hongwei. Analysis on the effects of free particles upon the insulation characteristics of basin insulators[J]. Electric Safety Technology, 2024, 26(5): 64-67.

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。