

一起 500 kV CVT 电容量及介质损耗异常分析

刘赛¹, 张远航¹, 陈昊², 陈靖¹, 陆皓珉¹, 周程³

(1. 国网江苏省电力有限公司苏州供电分公司, 江苏 苏州 215004; 2. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司, 南京 210019; 3. 国网江苏省电力有限公司昆山市供电分公司, 江苏 昆山 215300)

摘要: 本文针对一起 500 kV 电容式电压互感器(CVT)例行试验中电容量及介质损耗异常事件, 系统开展了故障诊断。通过诊断试验, 横向对比设备试验数据, 纵向分析出厂、交接及例行试验历史数据, 初步判定 B 相中节电容单元存在内部绝缘缺陷。结合高电压介损试验及油色谱分析, 确定电容分压器内部出现过高能放电。最终通过解体检查, 发现第 5 个电容元件因极板毛刺引发局部放电, 导致极板击穿及绝缘油裂解, 确定故障源于极板冲压毛刺引发的局部场强集中, 叠加插片工艺缺陷造成的介质损伤, 在长期运行中导致电容元件极板击穿。最后提出了涵盖试验诊断方法改进、制造工艺优化及运维策略强化的综合防治措施, 确保提升 CVT 运行可靠性。

关键词: 电容式电压互感器; 电容量; 介质损耗; 诊断试验; 放电

Analysis and Treatment on Abnormal Capacitance and Dielectric Loss of 500 kV Capacitor Voltage Transformer

LIU Sai¹, ZHANG Yuanhang¹, CHEN Hao², CHEN Jing¹, LU Haomin¹, ZHOU Cheng³

(1. Suzhou Power Supply Branch, SGCC Jiangsu Power Co., Ltd., Jiangsu Suzhou 215004, China;

2. Nanjing Power Supply Branch, SGCC Jiangsu Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China;

3. Kunshan Power Supply Branch, SGCC Jiangsu Power Co., Ltd., Jiangsu Kunshan 215300, China)

Abstract: In view of an abnormal capacitance and dielectric loss during a routine test of a 500 kV capacitor voltage transformer (CVT), the fault diagnosis is systemetically developed. It is preliminarily judged through diagnostic tests, comparison of test data of equipment horizontally, and analysis of historical data of delivery test, handover test and routine test vertically that there is an internal insulation defect in the middle section capacitor unit in phase B. It is confirmed through high-voltage dielectric loss test and oil chromatography analysis that excessively high energy discharge is occurred inside the capacitive voltage divider. Finally, it is found through disassembly inspection that the 5th capacitor element leads to partial discharge due to burrs on the electrode plate, resulting in electrode breakdown and insulation oil pyrolysis. Moreover, its is confrmed that the fault is from both the local field strength concentration due to the burrs on the electrode plate stamping and the dielectric damage due to defect of the insertion process, which lead to breakdown of the capacitor element plate during long-term operation. Finally, the comprehensive prevention and control measures, containing the improvement of test diagnostic methods, optimization of manufacturing processes, and strengthening of operation and maintenance strategies, are propsoed so to ensure the enhanced reliable operation of CVT.

Keywords: capacitor voltage transformer; capacitance; dielectric loss; diagnostic tests; discharge

0 引言

电容式电压互感器(capacitor voltage transformer,

CVT)作为电力系统中测量、计量、继电保护获取电压的关键设备,其运行可靠性直接影响电网的安全稳定^[1-5]。CVT 通过电容分压和电磁感应原理将一

次侧高电压转化为可以方便测量的二次侧低电压,其内部电容单元的绝缘性能是设备长期稳定运行的核心保障^[6-8]。

CVT 在超/特高压交流电网广泛应用,受设计、生产工艺、运输安装和运行环境等因素的影响,中间变压器内部击穿、二次侧失压、电容单元受潮、击穿、电容单元与电磁单元不匹配、密封面渗漏油、电容分压器或电磁单元过热等原因引起的故障时有发生^[9-14]。CVT 在长期运行中可能因制造工艺缺陷、材料老化或外部环境影响导致电容单元电容量及介质损耗异常,进而引发测量误差甚至设备故障^[15-18]。本文针对一起 500 kV CVT 电容单元电容量及介质损耗异常事件,从现场常规试验和诊断性试验结果推断故障可能原因,通过解体检查,结合试验数据,最终确定故障原因。并据此提出针对性工作建议和措施,提高对 CVT 设备质量监督及运行维护的管控能力。

1 CVT 现场试验情况

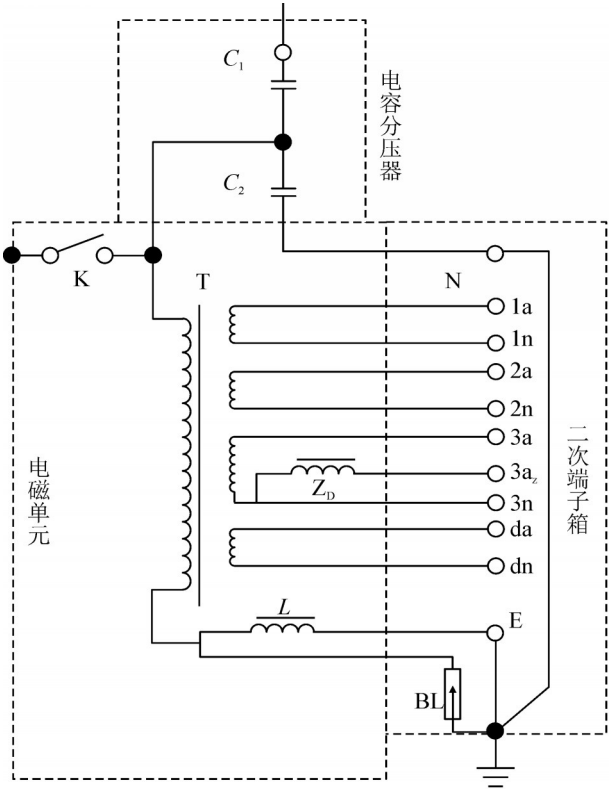
1.1 CVT 基本信息

CVT 的设备型号为***WVB500-5H,生产日期:2020 年 6 月,投运日期:2021 年 11 月,B 相铭牌信息见表 1,CVT 电气原理图见图 1。

表1 CVT 铭牌信息(B相)
Table 1 Information of CVT nameplate (Phase B)

参数	数值
型号	***500-5H
二次绕组	1a-1n,2a-2n,3a-3n,da-dn
二次额定电压/V	100/ $\sqrt{3}$,100/ $\sqrt{3}$,100/ $\sqrt{3}$,100
电容单元编号	396227
互感器编号	196227
准确级	0.2/0.5/3P/3P
额定输出/VA	50/50/50/50
额定绝缘水平/kV	820/1 306/1 890
额定高压电容/pF	5 228
额定总电容/pF	5 000
额定中压电容/pF	114 545
电容器绝缘油	PXE
制造日期	2020.6

2023 年 3 月的例行停电为设备首检,停电后对该 CVT 进行外观检查,本体外观无明显异常,无渗漏油现象,周围无油迹,端子箱内二次接线牢固,线缆和接线端子状况良好。



C₁:高压电容(C₁₁串C₁₂串C₁₃); C₂:中压电容; N:电容分压器低压端; 1a,1n:主二次1号绕组端子; 2a,2n:主二次2号绕组端子; 3a,3n:主二次3号绕组端子; da,dn:剩余电压绕组端子; 3a_z,3n_z:阻尼器端子; T:中间变压器; L:补偿电抗器; K:中压接地开关; E:补偿电抗器低压端; BL:ZnO避雷器; ZD:阻尼器。

图1 CVT 电气原理图
Fig. 1 Electrical schematic diagram of CVT

1.2 异常情况简介

在对该 500 kV CVT 开展常规例行试验时,发现 CVT B 相中节电容单元介损值及电容量试验数据异常,试验数据见表 2。

表2 CVT B相中节电容分压器异常试验数据
(温度:8℃,湿度:50%)
Table 2 Abnormal test data of middle capacitor voltage divider in phase B of CVT
(temperature: 8℃, humidity: 50%)

B 相 中节	试验电 压/kV	介损值 tanδ/%	电容量/pF	电容量初值 差/%
	10	0.375 (0.055)	15 570.0(15 185.2)	2.53

注:括号内数据为出厂值。

CVT 中节电容采用正接法进行高压介损和电容量测量,试验电压为 10 kV。根据 DL/T 393—2021《输变电设备状态检修试验规程》(以下简称规程)要求,电容式电压互感器的电容量|初值差|≤2%(警示值),介质损耗因数≤0.002 5(膜纸复合)(注意值)^[19]。测量结果表明:CVT B 相中节电容单元介损

值及电容量试验数据异常。

表3给出了CVTB相中节分压器纵向历史试验数据对比情况,可以发现交接试验与出厂试验对比,介损值相近,电容量初值差很小,只有0.29%。然而例行试验与出厂试验对比,电容量初值差为2.53%,且介损值为0.375%,2023年3月首检的例行试验结果与2021年11月的交接试验对比,电容量初值差为2.23%,介损值和电容量初值差均不满足要求,且电容量呈逐渐变大趋势。

表3 CVTB相中节电容分压器历史试验数据

Table 3 Historical test data of middle capacitor voltage divider in phase B of CVT

参数	出厂试验	交接试验	例行试验 (2023.03.12)
电容值/pF	15 185.2	15 230.0	15 570.0
介损值tanδ/%	0.055	0.051	0.375
电容量初值差/%	—	0.29	2.53(2.23)

注:括号内数据为出厂值。

截止2023年例行检修前,查阅最近一次红外精确测温记录,其测温结果、红外图谱记录见图2和表4(R01:搭接头、R02:上节、R03:中节、R04:下节、R05:油箱)。参照DL/T 664—2016《带电设备红外诊断应用规范》电压致热型设备缺陷诊断依据:热像特征以整体温升偏高,且中上部温升高,温差2~3 K,判定为缺陷^[19]。测试结果表明,设备未见明显异常,咨询制造商和上级单位,确认该批次CVT无家族性缺陷。从投运以来,未见变电运维人员报告出现过不良工况。CVT各相电压幅值见图3。结合图3所示的后台CVT相电压幅值曲线,未见明显数据波动和幅值越限情况。

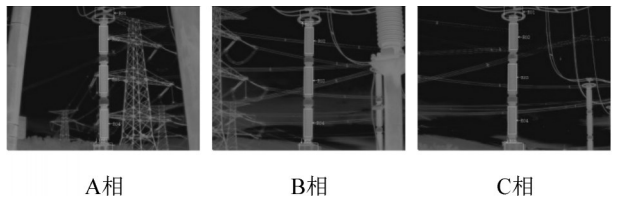


图2 CVT红外测温图谱

Fig. 2 Infrared temperature measurement spectrum of CVT

表4 红外图谱记录

Table 4 Infrared spectrum records

设备名称	电压互感器	检测仪器	A600S
拍摄日期	2023.1.15	拍摄时间	17:25:16
环境温度/℃	7.0	环境湿度/%	45.0
辐射率	0.9	距离/m	8.0
位置	R01	负荷电流	—
	R02		
	R03		
	R04		
	R05		
红外分析(max)A	14.8	15.9	16.0
红外分析(max)B	15.1	16.0	17.2
红外分析(max)C	14.7	15.8	16.1

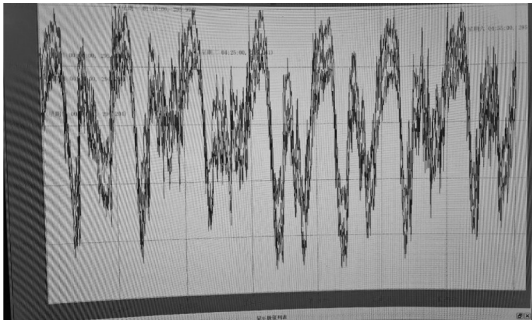


图3 CVT各相电压幅值

Fig. 3 Voltage amplitude of each phase of CVT

1.3 异常排查

发现CVT电容单元介损值及电容量试验数据异常后,试验人员在现场严格按照文献[19]要求,开展常规试验和诊断性试验,并进一步排查异常原因。

1.3.1 绝缘电阻测试

绝缘电阻测试结果见表5和表6,根据《规程》要求,分压电容器极间绝缘电阻≥5 000 MΩ(注意值),N-地绝缘电阻≥1000 MΩ(注意值),电容分压器绝缘电阻均满足条件,说明电容单元绝缘状况良好。根据《规程》要求,二次绕组绝缘电阻≥100 MΩ(注意值),同比及互比无明显偏低。中间变压器二次绕组和E-地的绝缘电阻均显著大于100 MΩ,且三相之间相对均衡。说明电磁单元绝缘状况良好。

表5 CVT电容分压器绝缘电阻(温度:8℃,湿度:50%)

Table 5 Insulation resistance of capacitive voltage divider of CVT (temperature: 8℃, humidity: 50%)

MΩ			
位置	相位		
	A	B	C
C ₁₁	29 700(29 000)	29 800(30 500)	26 500(27 000)
C ₁₂	31 100(31 000)	27 900(28 000)	27 700(28 500)
C ₁₃	11 700(12 000)	12 900(12 500)	15 133(17 000)
C ₂	39 700(37 000)	33 900(32 000)	41 100(35 800)
N-地	37 800(38 000)	35 900(33 700)	37 700(35 000)

注:括号内为交接试验值。

表6 中间变压器绝缘电阻(温度:8℃,湿度:50%)

Table 6 Insulation resistance of intermediate transformer (temperature: 8℃, humidity: 50%)

MΩ			
位置	相位		
	A	B	C
1a-1n	2 874(2 700)	2 945(3 200)	2 952(3 100)
2a-2n	2 952(2 700)	2 982(3 100)	2 917(2 900)
3a-3n	3 021(3 000)	3 010(2 850)	2 873(2 850)
da-dn	2 946(2 800)	2 842(2 900)	2 952(3 050)
E-地	3 945(4 050)	3 879(3 700)	3 955(3 500)

注:括号内为交接试验值。

1.3.2 变比测试

变比测试结果见表7,试验初值取交接试验值,

铭牌额定变比分别为 5 000(1a-1n, 2a-2n, 3a-3n)、2 886.8(da-dn)。根据《规程》要求,CVT 电压比较核应符合设备技术要求。B 相各电压变比数据相较于 A、C 相,数据明显偏小,这同 B 相中节电容电容量初值差较大的现象相互对应。对于变比异常这一情况,考虑可能由以下 2 种情况导致:1)电容分压器电容量变化:包括绝缘介质受潮、部分电容单元击穿;2)中间变压器电磁单元故障:绕组一次绕组匝间短路,油箱电磁单元进水、受潮或者损坏等情况^[20-21]。

表7 CVT 通压试验-变比测试结果(温度:8℃,湿度:50%)
Table 7 Voltage transformation -ratio test results of CVT (temperature:8℃, humidity: 50%)

位置	A	B	C
1a-1n	5 017(5 011)	4 942(5 007)	5 015(5 008)
2a-2n	5 015(5 010)	4 944(5 008)	5 014(5 007)
3a-3n	5 014(5 010)	4 944(5 007)	5 012(5 008)
da-dn	2 900(2 895)	2 854(2 892)	2 898(2 893)

注:括号内为交接试验值。

1.3.3 中间变压器直流电阻测试

中间变压器直流电阻测试结果见表 8,根据《规程》要求,CVT 二次绕组电阻测量|初值差|≤2%(警示值)。对 CVT 各二次绕组的电阻值横向和纵向对比,均无明显差异,满足|初值差|≤2%的要求,二次绕组电阻合格。一次绕组封装于设备内部,现场无法开展直流电阻测试,初步判断中间变压器电磁单元故障的可能性较低。

表9 CVT 介损及电容量测试结果(温度:8℃,湿度:50%)
Table 9 Dielectric loss and capacitance test results of CVT (temperature: 8℃, humidity: 50%)

相位	电容单元	试验电压/kV	介损值 tanδ/%	电容量/pF	电容量初值差/%
A	C ₁₁	10	0.060(0.075)	15 069(15 110)	-0.27
	C ₁₂	10	0.060(0.074)	15 051(15 080)	-0.19
	C ₁₃	2	0.080(0.067)	17 330(17 330)	0.00
	C ₂	2	0.110(0.095)	116 500(116 500)	0.00
B	C ₁₁	10	0.070(0.068)	15 107(15 250)	-0.93
	C ₁₂	10	0.375(0.051)	15 570(15 230)	2.23
	C ₁₃	2	0.080(0.065)	17 330(17 470)	-0.69
	C ₂	2	0.080(0.081)	116 800(118 100)	-1.10
C	C ₁₁	10	0.060(0.063)	15 128(15 160)	-0.21
	C ₁₂	10	0.060(0.085)	15 143(15 190)	-0.31
	C ₁₃	2	0.050(0.067)	17 450(17 450)	0.00
	C ₂	2	0.070(0.076)	117 500(117 500)	0.00

注:括号内为交接试验值。

表8 CVT 二次绕组直流电阻测试结果
(温度:8℃,湿度:50%)
Table 8 DC resistance test results of secondary winding of CVT (temperature: 8℃, humidity: 50%)

					MΩ
二次 绕组	相位	出厂值 (20℃)	实测值	折算值	初值 差/%
1a-1n	A	26.70	25.33	26.58	-0.45
	B	26.65	25.28	26.53	-0.46
	C	26.77	25.42	26.68	-0.35
2a-2n	A	48.82	46.45	48.74	-0.16
	B	48.77	46.51	48.81	0.08
	C	48.72	46.46	48.75	0.07
3a-3n	A	53.32	51.02	53.54	0.41
	B	53.29	51.01	53.53	0.45
	C	53.36	50.98	53.50	0.26
da-dn	A	162.94	156.02	163.72	0.48
	B	162.73	155.41	163.08	0.22
	C	162.89	155.79	163.48	0.36

1.3.4 压变介损及电容量测试结果

CVT 介损及电容量测试结果见表 9 所示。对 B 相中节电容分压器 C₁₂的电容量和介损值进行横向和纵向比较,发现电容量明显增大,介损值亦偏大,电容量和介损值均不满足要求。根据表 9 数据,求解该 CVT 各相的分压比,见表 10。可知 B 相分压比与 A、C 相对比,明显下降,这与 CVT 通压试验-变比测试结果中 B 相的变比减小相互对应。同时考虑到 B 相缺陷后分压比为 22.96,相较于 23.26 初值差仅为 1.29%,推算至一次相电压,可能仅会产生约 3 kV 的电压差,推算至二次相电压,波动量也仅在 0.75 V 左右,结合 CVT 运行过程中的二次 PT 断线告警判据之一为三相电压之和不为零且三相电压相量和大于 7 V(有效值),该 CVT 缺陷不会导致相

关PT断线告警,后台系统屏亦难以发现问题,这与图3后台电压波动曲线相互印证。因此,可以初步判断,B相中节分压器 C_{12} 存在严重缺陷,导致其电容量偏大,可能存在电容元件放电击穿等情况,需要对该节电容单元进行解体检查及试验,进一步探明异常原因^[22-24]。

表10 CVT分压比计算结果

Table 10 Calculation results of division ratio of CVT

相位	C_1	C_2	分压比 K
A	5 249(5 258)	116 500(116 500)	23.19(23.15)
B	5 316(5 306)	116 800(118 100)	22.96(23.26)
C	5 279(5 288)	117 500(117 500)	23.25(23.22)

注:括号内为交接试验值对应的计算值。分压比 $K=U_1/U_2=(C_1+C_2)/C_1$, C_1 为 C_{11} 、 C_{12} 和 C_{13} 的串联值。

2 CVT解体前试验及解体检查

针对现场检查试验的结果,在高压试验大厅内

对B相中节电容单元开展解体检查及试验。首先,在解体前再次开展多项诊断性试验,复核试验结果与现场是否存在较大差异。在再次确认初步判断无误的前提下,对电容单元进行解体,寻找故障发生部位及原因。最后对解体后的各部件进行单独检查及试验,明确各部件性能是否受损。

2.1 解体前试验

根据中节分压器单元 C_{12} 可能存在的绝缘性能不良、击穿放电等问题,设计诊断性试验项目为:1)高电压介损试验;2)微水和油色谱试验。

2.1.1 高电压介损试验

图4为高电压介损试验接线原理图,对该电容单元进行高电压介损试验,试验结果见表11。第1次在10 kV试验电压下的介损值为0.275%,超过《规程》注意值(0.25%)。第2次经过额定电压96 kV试验电压后,介损值下降至0.084%,符合《规程》要求。电容量初值差始终在1.4%左右。

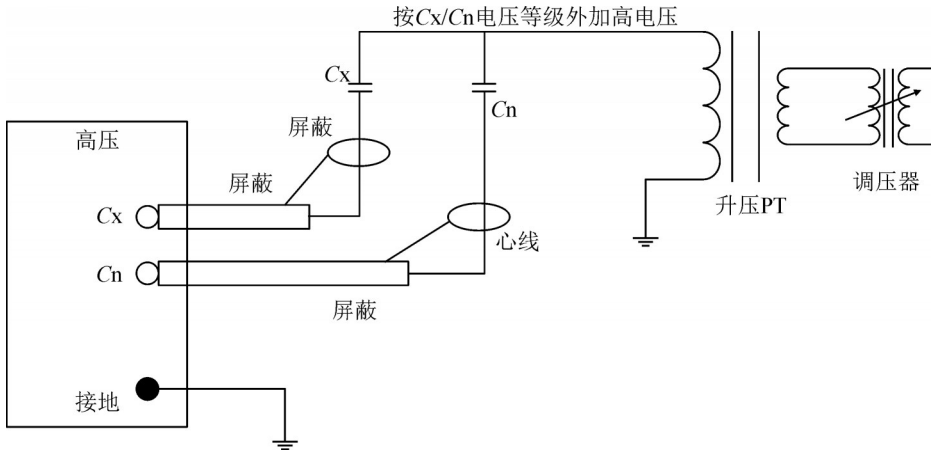


图4 高电压介损试验接线原理图
Fig. 4 Wiring schematic diagram of high-voltage dielectric loss test

表11 CVT B相中节电容分压器高电压介损试验数据

Table 11 High voltage dielectric loss test data of middle capacitor voltage divider in phase B of CVT

试验电压/kV	电容量/pF	介损值tanδ/%	电容量出厂值/pF	电容量初值差/%
10	15 376.0	0.275		1.26
96	15 401.4	0.084	15 185.2	1.42
10	15 397.9	0.084		1.40

为排除电容单元外表面对试验结果的影响,对该电容单元表面进行擦拭以及烘干干燥处理后再次进行试验,试验结果见表12。

综合2组试验成果,数据结果对比如图5所示。当试验电压升高后,介损值是减小的,并且通

过2次加压,其介损值有所降低,但是电容值变化不明显。由此可见此次试验存在卡登效应。由于卡登效应的存在,干扰了试验人员的判断,无法准确确定电容器的绝缘状况。

表12 表面处理后 CVT B相中节电容分压器高电压介损试验数据

Table 12 High voltage dielectric loss test data of middle voltage divider in phase B of CVT after surface treatment

试验电压/kV	电容量/pF	介损值tanδ/%	电容量初值/pF	电容量初值差/%
10	15 348.8	0.041 9		1.08
96	15 352.2	0.044 8	15 185.2	1.10
10	15 348.8	0.041 3		1.08

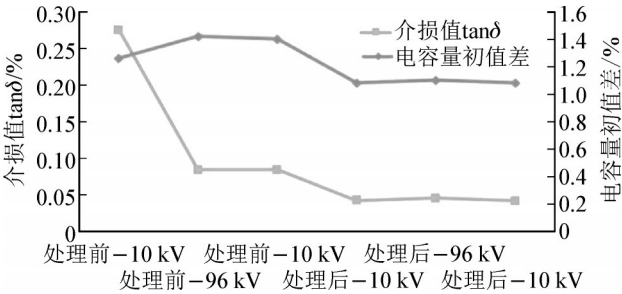


图5 表面处理前后CVT B相中节电容分压器高电压介损试验结果对比

Fig. 5 Comparison of high voltage dielectric loss test results of middle capacitor divider in phase B of CVT before and after surface treatment

卡登效应如图 6 所示。由于试验现场没有高电压及强磁场干扰,产生这一现象的主要原因是绝缘材料本身带有导电性杂质在交流电压下产生离子电导损耗,在较低电压下,介质中杂质受到纸纤维的阻拦作用较弱而游离于介质空间,总体介损值较大^[25-29]。而在试验电压升高后,杂质在较强电场作用下逐渐摆脱纸纤维的阻拦,集中于电极两端,极化损耗逐渐变小,使介损值降低。当试验电压升高到一定值时,介质中大部分带电粒子集中到电极两端,被试品中的有功损耗也基本趋于稳定。

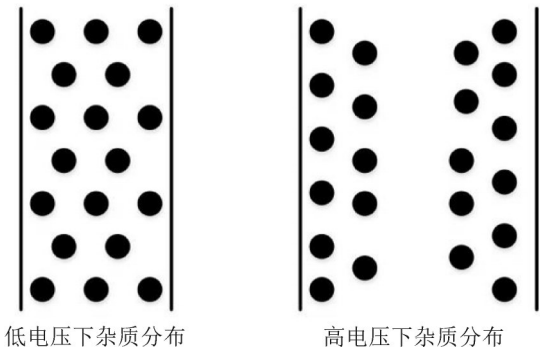


图6 绝缘介质的卡登效应

Fig. 6 Carden effect of insulating medium

2.1.2 微水和油色谱试验

该 CVT 采用合成绝缘油,取 CVT B 相中节的绝缘油进行微水和油色谱试验,试验结果见表 13。根据《规程》中表 191 互感器/分压器绝缘油试验项目及要求,AC 330 kV 及以上电压互感器/分压器:乙炔 $\leq 2 \mu\text{L/L}$ (注意值),总烃 $\leq 100 \mu\text{L/L}$ (注意值),水分 $\leq 15 \text{ mg/L}$ (注意值)。乙炔和总烃体积比均超过规程的注意值,特征气体中乙炔含量较高,占总烃类气体 51.93%,因此,初步判断 B 相 CVT 中节电容器电容单元内部存在放电或者击穿等高能放电现象。微水体积比为 $7.3 \mu\text{L/L}$,说明油质无受潮现象。

表 13 CVT B 相油色谱试验

Table 13 Oil chromatography test in phase B of CVT

组分	水分	二氧化碳	乙烯	乙炔	乙烷	甲烷	一氧化碳	氧气
体积比	7.3	443.4	65.6	213.4	8.2	123.7	47.5	1 534

2.2 解体检查

对拆除后的 CVT 进行外观检查,分压器的密封圈和紧固件完好,未老化、开裂和松动,未见渗漏水迹和渗漏油,分压器中压端瓷套和引线无放电痕迹,无破损、松动或断线情况。中间变压器、补偿电抗器、保护间隙和阻尼器未发现放电痕迹和绝缘油碳化现象。打开油箱检查电磁单元的中间变压器,测试其电压比、直流电阻和绝缘电阻,试验数据满足《规程》要求。打开电容器顶部盖板,取出电容元件压板和电容心子,各电容元件的绝缘膜纸经检查未见划痕和破损情况,排除绝缘卷制过程导致的破坏损伤,电容心子整体未见明显异常,如图 7 和 8 所示。



图7 CVT B相中节电容分压器电容元件压板

Fig. 7 Platen for capacitor element of middle voltage divider in phase B of CVT



图8 CVT B相中节电容分压器电容心子

Fig. 8 Capacitor core of middle capacitor voltage divider in phase B of CVT

该电容器共由 84 个电容元件组成,对 84 个电容元件单独进行电容量测试,结果见表 14,发现自下往上第 5 个电容元件击穿。

对故障元件进一步解体,该元件由外向内第 4

至第 17 圈存在放电烧蚀孔洞及碳化点。其中第 10 圈有外层引线片插片,其放电烧蚀现象最为严重,引线片因烧蚀断裂成 2 段,放电点情况如图 9 和 10 所示。

表 14 电容元件电容量测试结果
Table 14 Test results of capacitance of capacitor element

μF									
序号	电容量	序号	电容量	序号	电容量	序号	电容量	序号	电容量
1	1.259	18	1.224	35	1.215	52	1.208	69	1.198
2	1.231	19	1.213	36	1.213	53	1.195	70	1.193
3	1.249	20	1.199	37	1.213	54	1.189	71	1.190
4	1.232	21	1.198	38	1.210	55	1.181	72	1.189
5	∞	22	1.199	39	1.210	56	1.183	73	1.189
6	1.220	23	1.196	40	1.223	57	1.223	74	1.175
7	1.223	24	1.191	41	1.194	58	1.203	75	1.186
8	1.221	25	1.199	42	1.220	59	1.196	76	1.178
9	1.235	26	1.210	43	1.197	60	1.208	77	1.181
10	1.219	27	1.195	44	1.209	61	1.211	78	1.185
11	1.228	28	1.192	45	1.221	62	1.212	79	1.177
12	1.208	29	1.239	46	1.228	63	1.203	80	1.184
13	1.224	30	1.235	47	1.208	64	1.223	81	1.180
14	1.207	31	1.227	48	1.204	65	1.209	82	1.161
15	1.222	32	1.236	49	1.206	66	1.213	83	1.175
16	1.233	33	1.220	50	1.220	67	1.209	84	1.171
17	1.221	34	1.228	51	1.207	68	1.205	—	—



图9 第4圈放电点
Fig. 9 Discharge point at the 4th cycle

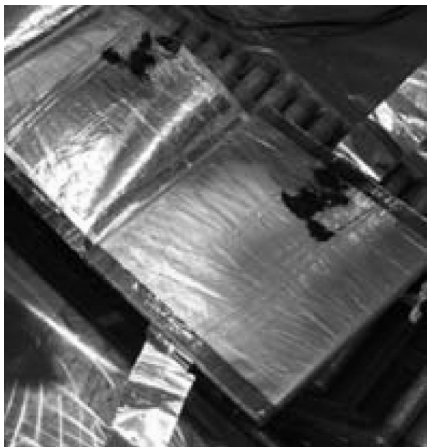


图10 第10圈放电点
Fig. 10 Discharge point at the 10th cycle

3 缺陷原因分析

综合上述试验和解体检查结果,可知电容元件放电击穿是导致 CVT B 相中节电容分压器电容量及介质损耗异常的直接原因,以下进一步分析导致电容元件放电击穿的可能原因。

1)原材料制作工艺不佳。电容元件极板铜引出片采用冲压方式制作而成,其边缘容易产生毛刺,使得极板上的局部场强集中,该部位在电场和热场长期作用下易发生局部放电。

2)制作过程中的人为因素。电极采用人工引出,电容元件卷制过程中操作人员在插入引出片时可能碰伤元件原材料,造成元件介质损伤,形成电弱点(电弱点指由于原材料选择或其他原因在本应均匀的介质表面产生凸起、凹陷或损伤等缺陷,使得介质绝缘性能降低),在长期电压和高温作用下老化导致元件击穿。

3)元件电场分布不均匀。电容元件的电场分布大致分为场强均匀区、场强畸变区和极不均匀区 3 个区域。其中,场强均匀区位于元件中心位置,极不均匀区位于元件最外围,场强畸变区位于均匀区与极不均匀区之间的过渡区域。在极不均匀区和场强畸变区易出现放电击穿情况,如图 11 所示。

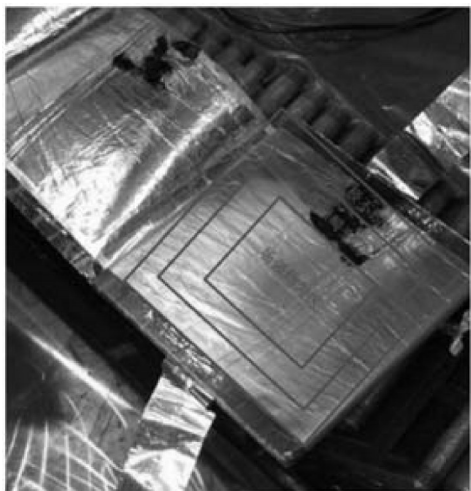


图11 电容器元件放电图

Fig. 11 Discharge diagram of capacitor element

该电容器串联电容元件共84个,单个电容元件击穿后电容量增长约1.19%,同诊断试验及返厂试验中电容量增量相吻合。电容元件存在击穿故障,同油色谱化验结果中存在大量乙炔的现象相对应。结合电容元件解体情况,故障电容元件从外往内共有50圈,在第4至第17圈均发现放电烧蚀孔洞及碳化点,其中第10圈有外层引线片插片,其放电烧蚀现象最为严重,引线片因烧蚀断裂成2段。因此,该电容元件初始放电点位于第10圈引线片插片处,放电能量积累逐渐并以第10圈为中心向外扩散。并且在极板与电容铝箔的十字交叉点上形成明显的放电击穿痕迹,而此区域位于元件的场强极不均匀区。电容元件初始放电点位于外层引线片插片位置,该放电部位并不是电容元件场强最集中部位^[30~34]。

由此分析导致此次缺陷的原因是个别电容元件的电极板制作时边缘毛刺未清理干净,或者在制造厂插片过程中有异物进入电容元件,在压装过程中造成电容元件局部绝缘损伤,造成局部场强集中,而该区域又位于元件场强极不均匀区,在电压和高温的双重作用下产生低能局部放电,加速了绝缘油和介质老化,在长期运行中,该放电点逐步扩大,最终导致电容元件绝缘纸板击穿。

4 结语

针对此次500 kV CVT电容量及介质损耗异常暴露出的问题,针对性地提出以下4点措施:

1)对该中节电容单元表面处理前后2次试验结果对比发现,卡登效应使得10 kV测试电压下对电容单元的介损试验有时不能提供准确依据,将会

干扰试验人员对其绝缘性能的判断,可考虑对被试品表面清理及干燥处理后再行试验,或者采用其他诊断试验辅助判断,如通过高压介损试验避免卡登效应的影响;

2)CVT电容单元、套管等存在较多电容元件串联的电气设备,单个电容元件完全击穿后电容变化量很可能小于《规程》警示值,且介损值亦不会明显增长。因此在对试验结果分析时,应结合同型号设备电容量变化量趋势。对于电容量初值差虽未超过规程警示值,但变化趋势与其他同型设备有显著差异时,应加强关注;

3)在工厂制造阶段,一是严格把控原材料质量选用优质原材料,增加进厂原材料的抽检数量。二是改进生产工艺,优化电极引出片的制作,采用折边处理等技术,减少极板周围毛刺,改善极板边缘电场分布。三是加强质量管控,提高员工操作技能,避免介质材料受损,强化技术监督检查指导,确保工序符合要求;

4)在运行过程中加强对CVT维护管理工作,一是加强巡视测温,一般CVT存在内部低能放电故障时,其放电位置温度会提升2~3℃,测温时应缩小红外热成像仪感温范围,进行同相不同节和同节不同相的温度对比。二是加强日常监测,CVT出现内部故障时其一、二次电压会与正常相存在不同程度的偏差,运维人员要实时监测电压数据,对于偏差较大数据,要跟踪记录并上报处理,避免故障扩大。

参考文献

- [1] 周文,梁纪峰,焦亚东,等.电容式电压互感器电压暂降测量误差分析及校正[J].中国电力,2022,55(7):49-58.
ZHOU Wen, LIANG Jifeng, JIAO Yadong, et al. Error analysis and correction of voltage sag measurement for capacitor voltage transformer[J]. Electric Power, 2022, 55(7): 49-58.
- [2] 吴奇松,夏君宇,赵国庆,等. CVT电容分压器末端放电故障分析[J]. 变压器, 2024, 61(1): 62-65.
WU Qisong, XIA Junyu, ZHAO Guoqing, et al. Analysis of discharge fault at end screen of CVT capacitor voltage divider[J]. Transformer, 2024, 61(1): 62-65.
- [3] 刘赛,李正,陈昊,等. 高压油浸式电抗器稳态电磁特性仿真研究[J]. 变压器, 2023, 60(8): 40-47.
LIU Sai, LI Zheng, CHEN Hao, et al. Simulation analysis and research on steady-state electromagnetic characteristics of high-voltage oil-immersed reactor[J]. Transformer, 2023, 60(8): 40-47.
- [4] 陈昊,廖英祺,张连芹,等. 基于自适应滤波的信号分离与窄带干扰抑制[J]. 电力工程技术, 2019, 28(2): 129-134.
CHEN Hao, LIAO Yingqi, ZHANG Lianqin, et al. A method of signal separation and narrowband interference sup-

- pression based on adaptive filter[J]. Electric Power Engineering technology, 2019, 28(2): 129-134.
- [5] 宋守龙, 谭彦民, 李小燕. 一起电容式电压互感器二次电压不平衡故障的分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(2): 42-43.
- SONG Shoulong, TAN Yanmin, LI Xiaoyan. Analysis on secondary voltage unbalance fault of capacitor voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(2): 42-43.
- [6] 李应宏, 王贵山, 何学敏. 谐振机理在CVT故障中的影响分析及防护措施[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(1): 82-86.
- LI Yinghong, WANG Guishan, HE Xuemin. Influence analysis of resonance mechanism in capacitor voltage transformer fault and protective measures[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(1): 82-86.
- [7] 张驰, 张慧芬, 孙刚, 等. 基于电压变化特征的配电网故障类型及铁磁谐振辨识方法[J]. 广东电力, 2022, 35(6): 50-49.
- ZHANG Chi, ZHANG Huifen, SUN Gang, et al. Identification method of distribution network fault types and ferroresonance based on voltage variation characteristics[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(6): 50-49.
- [8] 刘坤雄, 张小庆, 赵铭, 等. 基于CVT宽频传递模型的杂散电容分步辨识方法[J]. 高压电器, 2023, 59(12): 55-62.
- LIU Kunxiong, ZHANG Xiaoqing, ZHAO Ming, et al. Stepwise identification method of stray capacitance based on wideband transfer model of CVT[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(12): 55-62.
- [9] 童涛, 徐碧川, 袁思凡, 等. 一起电容式电压互感器二次电压异常事故分析[J]. 电瓷避雷器, 2022(2): 98-104.
- TONG Tao, XU Bichuan, YUAN Sifan, et al. A CVT secondary voltage abnormal accident[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(2): 98-104.
- [10] 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.
- [11] 杨昊, 汪洋, 刘炬, 等. 电容式电压互感器绝缘击穿故障处理及防范措施[J]. 东北电力技术, 2022, 43(6): 29-32.
- YANG Hao, WANG Yang, LIU Ju, et al. Fault treatment and precautionary measure of capacitor voltage transformer insulation breakdown[J]. Northeast Electric Power Technology, 2022, 43(6): 29-32.
- [12] 张兴飞. 两起CVT电磁单元过热缺陷的分析和处理[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(2): 44-48.
- ZHANG Xingfei. Analysis and processing on two overheat defects of capacitor voltage transformer electromagnetic unit[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(2): 44-48.
- [13] 陈昊, 姚凯, 任帅, 等. 变电站设备联合巡检技术及应用[J]. 农村电气化, 2025(2): 36-40.
- CHEN Hao, YAO Kai, REN Shuai, et al. Joint inspection technology and its application for substation devices[J]. Rural Electrification, 2025(2): 36-40.
- [14] 饶蕾, 刘国建, 韩尊占, 等. 500 kV 电容式电压互感器介质损耗异常分析及处理[J]. 水电与新能源, 2022, 36(4): 63-66.
- RAO Lei, LIU Guojian, HAN Zunzhan, et al. Analysis and treatment of abnormal dielectric loss of a 500 kV capacitive voltage transformer[J]. Hydropower and New Energy, 2022, 36(4): 63-66.
- [15] 杨硕亮, 刘水平, 杨晓静, 等. 天然酯绝缘油浸渍电容式电压互感器的电气性能研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1): 83-88.
- YANG Shuoliang, LIU Shuiping, YANG Xiaojing, et al. Study on electrical performance of capacitive voltage transformer impregnated with natural ester insulated oil[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 83-88.
- [16] 陈润颖, 王周祥. 电容式电压互感器介损增长异常分析[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(4): 31-34.
- CHEN Runying, WANG Zhouxiang. Abnormal growth analysis of dielectric loss factor in capacitor voltage transformer[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(4): 31-34.
- [17] 李良书, 韩彦华, 李晋, 等. 电容式电压互感器典型故障案例分析[J]. 变压器, 2020, 57(9): 72-76.
- LI Liangshu, HAN Yanhua, LI Jin, et al. Typical fault case analysis of capacitor voltage transformer[J]. Transformer, 2020, 57(9): 72-76.
- [18] 带电设备红外诊断应用规范: DL/T 664—2016[S]. 2016.
- Application rules of infrared diagnosis for live electrical equipment: DL/T 664—2016[S]. 2016.
- [19] 输变电设备状态检修试验规程: DL/T 393—2021[S]. 2021.
- Code of condition-based maintenance & test for electric equipment: DL/T 393—2021[S]. 2021.
- [20] 王大伟, 杨罡, 张娜. 220 kV CVT故障的诊断及分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(2): 78-82.
- WANG Dawei, YANG Gang, ZHANG Na. Fault diagnosis and analysis on 220 kV capacitor voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(2): 78-82.
- [21] 余立伟, 毛兴华, 邹学伟, 等. 某220 kV电容式电压互感器异常诊断分析[J]. 湖南电力, 2020, 40(2): 42-44.
- SHE Liwei, MAO Xinghua, ZOU Xuwei, et al. Diagnosis

- and analysis of abnormality for a 220 kV capacitive voltage transformer[J]. Hunan Electric Power, 2020, 40(2): 42-44.
- [22] 张凯煜, 沈云超, 郭全军, 等. 一起500 kV电容式电压互感器电压异常事件的分析与处理[J]. 变压器, 2023, 60(8): 65-70.
- ZHANG Kaiyu, SHEN Yunchao, GUO Qunjun, et al. Analysis and treatment of an abnormal voltage event of 500 kV capacitive voltage transformer[J]. Transformer, 2023, 60(8): 65-70.
- [23] 姚锡钦. 一起110 kV电容式电压互感器二次电压异常的故障分析[J]. 变压器, 2024, 61(6): 67-70.
- YAO Xiqin. Fault analysis of secondary voltage anomaly of 110 kV capacitive voltage transformer[J]. Transformer, 2024, 61(6): 67-70.
- [24] 邱伟, 林岑, 郭超, 等. 基于SCADA系统的CVT缺陷排查与分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(6): 86-92.
- QIU Wei, LIN Cen, GUO Chao, et al. Defect investigation and analysis of capacitor voltage transformer based on scada system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(6): 86-92.
- [25] 方文睿, 唐雄民, 江天鸿, 等. 脉冲激励下介质阻挡放电负载的特性研究[J]. 高压电器, 2024, 60(5): 171-178.
- FANG Wenrui, TANG Xiongmin, JIANG Tianhong, et al. Research on characteristics of dielectric barrier discharge load under pulse excitation[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(5): 171-178.
- [26] 林榕兴, 王扬程, 陈志鹏, 等. 气体介质影响下梅花触头载流磨损特性与电接触寿命预测[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 197-205.
- LIN Rongxing, WANG Yangcheng, CHEN Zhipeng, et al. Current-carrying friction characteristics and electrical contact life prediction of plum blossom contacts under the influence of gas medium[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 197-205.
- [27] 陈介夫, 孙昊, 李刚, 等. 基于激光诱导等离子体的Mach-Zehnder干涉法测量气体介质恢复特性的研究[J]. 高压电器, 2024, 60(12): 199-205.
- CHEN Jiefu, SUN Hao, LI Gang, et al. Research on gaseous medium recovery characteristics measurement by mach-zehnder interferometry based on laser-induced plasma[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(12): 199-205.
- [28] 赵睿, 景瑞斌, 赵龙, 等. 绝缘介质理化特性辅助油浸式电抗器故障定位及诊断[J]. 变压器, 2023, 60(4): 62-66.
- ZHAO Rui, JING Ruibin, ZHAO Long, et al. Physical and chemical characteristics of insulating medium assist fault location and diagnosis of oil-immersed reactor[J]. Transformer, 2023, 60(4): 62-66.
- [29] 马高权, 周娜, 谢蒙飞, 等. 基于GWO-KELM模型的变压器油纸套管典型绝缘故障辨识方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(5): 38-48.
- MA Gaoquan, ZHOU Na, XIE Mengfei, et al. A typical insulation fault identification method of the transformer oil-paper bushing based on the GWO-KELM model[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(5): 38-48.
- [30] 李威, 胡润阁, 刘亚林, 等. 500 kV CVT电压异常分析与处理[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(3): 74-78.
- LI Wei, HU Runge, LIU Yalin, et al. Analysis and treatment on abnormal voltage issue of 500 kV CVT[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(3): 74-78.
- [31] 徐鹏, 殷鑑, 沈亚春, 等. 一起220 kV CVT二次电压异常事件调查[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(5): 94-99.
- XU Peng, YIN Jian, SHEN Yachun, et al. Investigation of abnormal secondary voltage of 220 kV CVT[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(5): 94-99.
- [32] 孙红梅, 张凯, 马瑾, 等. 500 kV变压器本体介质损耗因数温度换算研究[J]. 东北电力技术, 2023, 44(4): 30-32.
- SUN Hongmei, ZHANG Kai, MA Jin, et al. Research on temperature conversion of dielectric loss factor of 500 kV transformer[J]. Northeast Electric Power Technology, 2023, 44(4): 30-32.
- [33] 何聪, 张伟, 李良书, 等. 交流叠加冲击电压下环氧绝缘内部气隙局部放电特性[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(3): 33-39, 47.
- HE Cong, ZHANG Wei, LI Liangshu, et al. PD characteristics of void in epoxy insulation under AC and impulse superimposed voltage[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(3): 33-39, 47.
- [34] 李博文, 贺达, 杨智, 等. CVT铁磁谐振过电压的抑制与不同故障下二次电压特征分析[J]. 浙江电力, 2023, 42(7): 38-46.
- LI Bowen, HE Da, YANG Zhi, et al. Suppression of ferro-magnetic resonance overvoltage in CVT and feature analysis of secondary voltage under different faults[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(7): 38-46.

作者简介:

刘赛(1993—),男,工程师,主要从事交直流配电网调度与综合能源系统、电力设备运维检修工作。E-mail: cnsailiu@foxmail.com。

张远航(1983—),男,工程师,主要从事电力设备运维检修工作。

陈昊(1980—),男,研究员级高级工程师,特级技师,主要从事变电智能运检工作。

陈靖(1973—),男,工程师,主要从事电力设备运维检修工作。

陆皓琨(1992—),男,工程师,主要从事电力设备运维检修工作。

周程(1995—),女,工程师,主要从事电力市场和综合能源系统、电力营销工作。