

一起 500 kV 电容式电压互感器二次绕组失压故障分析

代英俊

(国网四川省电力公司超高压分公司, 成都 610041)

摘要: 某 500 kV 变电站主变 500 kV 侧电容式电压互感器(CVT)在运行过程中突然发生二次绕组失压故障,随后临时停电对故障 CVT 进行整体更换。为了分析 CVT 二次绕组失压故障原因,对故障 CVT 开展了绝缘电阻、直流电阻、变比、绝缘油、介损及电容量等一系列诊断性试验;结合故障时设备现场检查情况、诊断性试验数据、常见二次绕组失压原因逐一分析得出故障原因为 CVT 电磁单元中间变压器断线。为了定位 CVT 中间变压器断线位置,在变电站现场对故障 CVT 进行解体,对分离后的电磁单元及电容单元检查及试验,最终发现位于电容分压器瓷套内部电磁单元中间变压器引线断裂。最后对 CVT 设备的运行、维护、试验提出了一些措施及建议。

关键词: 电容式电压互感器(CVT); 二次绕组; 失压; 电磁单元; 中间变压器

Analysis of Secondary Winding Voltage Loss Fault of 500 kV CVT

DAI Yingjun

(Ultra High Voltage Branch Company of State Grid Sichuan Electric Power Company,
Chengdu 610041, China)

Abstract: A capacitive voltage transformer (CVT) on the 500 kV side of the main transformer at a 500 kV substation experienced the fault of secondary winding voltage loss during operation. Subsequently, a temporary power outage is implemented to perform the complete replacement of the faulty CVT. For analyzing the cause of the secondary voltage loss in the CVT, a series of such diagnostic tests as insulation resistance measurement, DC resistance measurement, ratio test, insulating oil analysis, dielectric loss test and capacitance measurement are performed on the faulty CVT. It is concluded that, in combination with the detailed analysis of the on-site inspection, the diagnostic test data and common causes for secondary voltage loss of the equipment in the fault, the cause of the fault is the breakdown of wire in the intermediate transformer within the CVT's electromagnetic unit. For locating the exact broken position of the intermediate transformer in the CVT, the faulty CVT is disassembled on-site at the substation. The separated electromagnetic unit and capacitor unit are inspected and tested, finally finding that the wire in the intermediate transformer of electromagnetic unit inside the pocelain houding of capacutive voltage divider is broken. Finally, some measures and suggestions on the operation, maintenance and test of the VCT are propsoed.

Keywords: capacitor voltage transformer (CVT); secondary winding; loss of voltage; electromagnetic unit; intermediate transformer

0 引言

电压互感器作为电网重要设备之一,其作用是将电网一次高电压转换为二次较低电压供测量、保护以及计量装置使用。相较于传统电磁式电压互感器,电容式电压互感器(capacitor voltage transformer, CVT)具有电磁式电压互感器的全部功能,不存在电

磁式电压互感器与断路器断口电容的串联铁磁谐振问题^[1],同时 CVT 具有体积小、免维护、防爆燃等优点,在 35 kV 及以上电网系统中广泛使用。随着 CVT 在电网系统中大量推广应用,其运行稳定性受到原材料、设计水平、制造工艺及运行环的综合境影响,在运行过程中出现了较多的故障缺陷。CVT 缺陷主要分为电容单元缺陷及电磁单元缺陷两大

类。电容单元缺陷主要有电容元件击穿导致的电压异常、电容单元发热、电容单元漏油、介损及电容量试验数据超标^[2-14]；电磁单元缺陷主要有电磁单元发热、密封不良受潮、中间变压器元件绝缘损坏、电磁单元漏油等^[15-22]，这些缺陷引发的故障严重影响了电网设备的安全稳定运行，降低了电力系统供电可靠性。

本文针对一起 500 kV CVT 二次绕组失压故障进行了深入剖析，根据停电检查、诊断性试验、结构原理、以及解体检查等查明了故障原因。结合运行中 CVT 常见的缺陷，本文为 CVT 的日常运行维护及检修试验提供一些建议与措施，旨在提升 CVT 设备运行稳定性及可靠性。

1 故障简介

2024 年 12 月 27 日 22 时 55 分，某 500 kV 变电站监控后台发出“2 号主变第一、第二套保护 500 kV 侧 CVT 断线、装置异常、闭锁后备保护动作”、“2 号主变 5043 开关保护 CVT 断线”、“2 号主变 5043 开关失灵闭锁动作”、“安控装置异常”等一系列异常信号。

变电站内运维人员立即对 2 号主变第一、第二套保护装置、2 号主变 5043 开关保护装置、安控装置、2 号主变高压侧 CVT 端子箱进行检查，最终确认装置告警信息均为 2 号主变 500 kV 侧 CVT 断线。

现场检查 2 号主变 500 kV 侧 CVT 端子箱内二次电压空开位置均在合闸位置，运维人员测量二次电压空开电压发现 A、B 相所有二次绕组电压均为 60 V 左右，C 相所有二次绕组电压为 0。2 号主变 500 kV 侧 CVT 设备外观检查无异常、电容单元及电磁单元红外测温正常，CVT 一次连线正常，现场设备无异常声响。

2 号主变 500 kV 侧 CVT 设备型号为 TYD500/ $\sqrt{3}-0.005H$ ，国内某公司产品，2007 年 1 月出厂，2007 年 9 月投入运行，上次试验日期为 2024 年 3 月，介损及电容量试验均数据合格。

1.1 检查处理情况

2024 年 12 月 28 日，2 号主变临时紧急停电，检修及试验人员对 2 号主变 500 kV 侧 CVT 开展检查及试验工作。A、B 相检查无异常，介损及电容量试验合格。C 相二次接线盒内接线端子完好，无放电痕迹，N、X 端子接地良好。C 相 CVT 绝缘电阻、二次绕组直流电阻试验合格，上节及中节电容分压器介损及电容量试验合格，下节电容分压器使用自激法测试失败。对下节电容分压器开展变比试验：1a-1n、2a-2n、3a-3n、da-dn 等 4 个二次绕组均无输出电压。初步判断为电磁单元或电容分

压器故障导致无输出电压，需立即对故障 CVT 进行更换。12 月 29 日对 2 号主变 500 kV 侧 C 相 CVT 进行更换，更换后 CVT 二次电压恢复正常。

1.2 试验情况

2024 年 12 月 30 日，试验人员对故障 CVT 开展诊断性试验，试验项目包含绝缘电阻试验、电容量及介损试验、绝缘油试验、变比试验等。

电容分压器、电磁单元二次绕组对地及之间绝缘电阻试验结果见表 1。

表 1 绝缘电阻试验
Table 1 Insulation resistance test

测试点	MΩ			
	二次绕组之间	二次绕组对地	N 对地	X 对地
测试值	≥500	≥500	≥500	≥500

上节(C_{11})、中节(C_{12})电容分压器的介损及电容量试验采用正接线进行试验，试验数据合格；下节电容分压器的介损及电容量采用自激法进行试验^[23]，试验开始后仪器升压失败，无法测试 C_{13} 及 C_2 单元介损及电容量。下节电容分压器采用常规正接线进行试验，试验数据合格。下节电容分压器正接线试验方法为：解开 CVT 二次接线盒内 N 端接入济南泛华 AI-6000F 抗干扰介质损耗测试仪 C_x 测试端，电磁单元 X 端保持接地，所有二次绕组开路，试验接线图见图 1。CVT 介损及电容量试验数据见表 2。

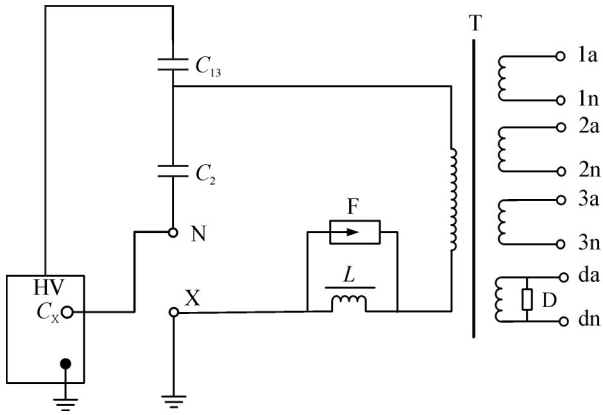


图 1 下节正接线示意图
Fig. 1 Schematic diagram of positive wiring in the lower section

表 2 介损及电容量试验
Table 2 Dielectric loss and capacitance test

位置	测试值 $\tan\delta/\%$	测试值 C/nF	初值 C/nF	初值差/ $\%$
上节	0.063	14.94	14.88	0.40
中节	0.056	15.01	15.04	-0.20
下节	0.057	15.02	15.00	0.13

CVT 电磁单元二次绕组直流电试验数据见表 3。CVT 电磁单元绝缘油中溶解气体组分含量试验数据见表 4,绝缘油耐压、微水及油介损试验数据见表 5。

表 3 二次绕组直流电阻试验
Table 3 DC resistance test of secondary windings
MΩ

1a-1n	2a-2n	3a-3n	da-dn
24.78	34.72	62.11	277.1

表 4 油中溶解气体组分含量
Table 4 Content of dissolved gas components in oil
μ L/L

H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	总烃
23.26	223.56	3 389.15	27.06	10.65	9.49	0	47.20

表 5 绝缘油试验
Table 5 Test of insulation oil

耐压	微水	介损 tanδ(90℃)
59.6 kV	3.2 mg/L	0.12%

CVT 电磁单元的额定电压较低,正常运行电压为 13 kV。一般情况下,交接试验及例行停电试验未进行开展绝缘油试验,根据 CVT 厂家技术标准,绝缘油耐压≥30 kV、介损 tanδ≤0.5%(90℃)。

2 故障原因分析

2.1 结构原理

500 kV CVT 主要包括电容分压器和电磁单元,该站故障 CVT 的电气原理见图 2。

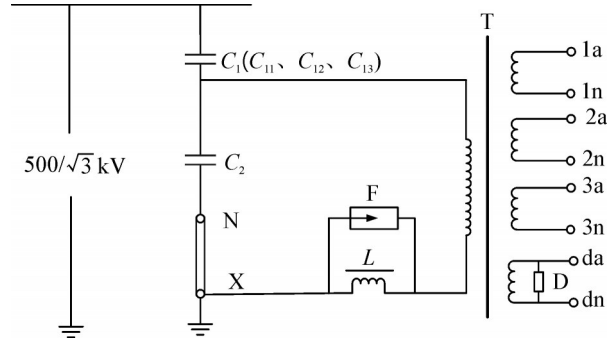


图 2 500kV CVT 原理图
Fig. 2 Principle diagram of 500kV CVT

图中: C₁ 为高压电容器, C₂ 为中压电容器, T 为中间变压器, L 为补偿电抗器, D 为阻尼器, F 为过电压保护用氧化锌避雷器, N 为电容分压器接地端, X 为中间变压器高压侧接地端。

该站 500 kV 电压等级的 CVT 为 3 节叠装串联而成,上节电容分压器(C₁₁)、中节电容分压器(C₁₂)、下节电容分压器(C₁₃、C₂)及电磁单元;各电容器单元相互独立且密封通过螺栓串联连接在一起。下

节电容分压器及电磁单元在 CVT 出厂时通过法兰连为一体;下节电容分压器瓷套内有 2 根连线分别与电容分压器下法兰的低压端子及中压端子相连,其中 C₂ 单元尾端连接低压端子套管通过连线与二次接线盒 N 端相连,中压连线连接中压端子套管通过连线与中间变压器高压侧相连。CVT 电磁单元位于油箱内由中间变压器、补偿电抗器和阻尼器等组成,二次绕组端子、N 端子、X 端子等位于二次接线盒内。

CVT 由高压电容 C₁(C₁₁、C₁₂、C₁₃)及中压电容由(C₂)组成,高压电容及中压电容位于瓷套内并充满绝缘油。中压电容 C₂ 从电网系统 500/√3 kV 抽出 13 kV 中压,中间变压器 T 将 13 kV 中压变为 0.1/√3 kV 及 0.1 kV 的低压供测量、保护以及计量装置使用。L 用以补偿电容分压器容抗,电磁单元采用速饱和电抗器用于稳定电压,使 CVT 输出电压随负载变化很小。F 为保护电抗器的氧化锌避雷器,工作电压 3 kV。D 用以阻尼 CVT 内部可能产生的铁磁谐振电压。CVT 二次接线盒内的 N、X 端子在不接载波装置时必须可靠连接并接地。

2.2 失压原因

CVT 在正常运行中的二次电压变化较小,CVT 故障时二次绕组失压有以下几种原因:

- 1) CVT 中间变压器高压侧对地装设了氧化物避雷器,运行中在谐振过电压作用下避雷器击穿,中间变压器高压侧对地短路造成 CVT 二次绕组无输出电压^[24];
- 2) 下节电容分压器 C₂ 单元击穿接地导致中间变压器高压侧对地短路,造成 CVT 二次绕组无输出电压^[25];
- 3) 中间变压器一次绕组断线造成高压侧绕组开路,一次无输入电压导致二次绕组无输出电压;
- 4) 中间变压器高压侧一次绕组短路接地,造成高压侧绕组电压降为 0,所有二次绕组无输出电压;
- 5) 中间变压器二次绕组断线造成二次开路无输出电压;
- 6) 中间变压器故障烧毁,造成二次绕组无输出电压^[26];
- 7) CVT 一次侧装设的熔断器发生熔断,造成 CVT 高压侧失压;
- 8) CVT 二次接线盒内 N 端或 X 端未可靠接地。

2.3 原因分析

结合故障时现场检查情况、试验情况、诊断性

试验数据以及 CVT 原理图逐一对二次绕组失压故障进行分析。

1) 分析 CVT 厂家说明书及铭牌电气原理图(图 2), 该型号 CVT 中间变压器高压侧未安装限制过电压的氧化锌避雷器, 仅在补偿电抗器两端并联氧化锌避雷器 F。避雷器 F 击穿, CVT 二次电压也能输出不会造成二次绕组失压。

2) CVT 出厂下节整体电容量为 15 nF, C_2 单元电容量为 111.6 nF, 根据电容串联计算 C_{13} 电容量约为 17.33 nF, 若 C_2 单元击穿则下节整体电容量试验数据应为 C_{13} 电容量 17.33 nF 左右, 根据表 2 试验数据可知下节整体电容量为 15.02 nF, 与出厂值 15 nF 相比变化较小, 因此 C_2 单元未发生击穿, 且下节整体电容量变化较小主绝缘良好。

3) 中间变压器一次绕组断线可能是造成 CVT 二次绕组失压的原因之一, 需对下节分压器进行解体检查确认一次绕组断线位置。

4) 中间变压器一次绕组高压侧短路接地, 故障类型为高能电弧放电, 将会产生大量的 H_2 、 C_2H_2 、 C_2H_4 等特征气体^[27]。分析 CVT 电磁单元绝缘油色谱试验数据(表 4), 其特征气体含量均在合格范围内且乙炔气体含量为 0, 因此中间变压器一次绕组高压侧未出现短路接地故障。

5) 故障 CVT 二次绕组直流电阻测试合格(表 3), 因此 CVT 二次绕组未发生断线缺陷。

6) 电磁单元中间变压器绝缘薄弱击穿导致二次输出电压异常^[28]。故障发生时, 电磁单元红外测温未发现异常且电磁单元油箱内绝缘油色谱、微水、耐压及介损试验均合格, 表明电磁单元未受潮、绝缘良好。

7) 2 号主变 500 kV 侧 CVT 一次侧未装设熔断器, 为保障电网设备安全稳定运行 110 kV 及以上电压等级 CVT 一次侧均未装设熔断器。

8) 2 号主变采用光纤保护, CVT 不承担载波通信工作, 正常运行时 N、X 端子应可靠接地。若运行中 N 端或 X 端未可靠接地将会产生悬浮电位, 并持续产生放电直至 N 端或 X 端与地之间的空气间隙被击穿。故障时 CVT 无异常放电声音, 停电检查二次接线盒 N、X 端子接地可靠, 接线盒内所有端子均无放电痕迹。

2.4 断线分析

根据已有研究表明, 采用图 1 常规正接线方式对 CVT 下节及电磁单元开展介损试验经常会出现负介损现象^[29]。为避免负介损对设备绝缘状态造成误判, CVT 下节介损及电容量正接线试验应采用以

下方法: 1) 解开二次接线盒内 X 端子与地之间的连线, X 端子保持悬空; 2) 解开 N-X 端子之间连接片, 拆除 N 端子与地之间连线; 3) 二次接线盒内所有二次绕组短路接地。CVT 下节正接线试验接线见图 3。

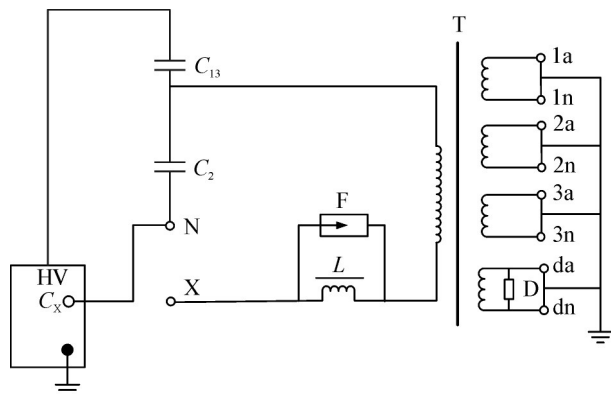


图 3 试验接线图
Fig. 3 Wiring diagram for test

CVT 下节直接采用图 1 常规正接线试验, 由于中间变压器杂散阻抗的影响, 使得仪器的测试电流超前向第二象限偏转造成 δ 偏过 90° 到达第二象限, $\tan \delta$ 介损变为负值^[30-31]。故障 CVT 下节采用图 1 常规正接线试验方法介损为正值且电容量数据合格, 自激法无法测试介损及电容量, 同时下节电容分压器变比无法测试, 说明电磁单元与电容单元之间电气连接已断开。

根据一系列诊断性试验数据分析: CVT 上中下节介损 $\leq 0.25\%$, 电容量初值差均不超过 $\pm 2\%$, 电容分压器及中间变压器绝缘电阻 $\geq 5 \text{ G}\Omega$, 均在合格范围, 设备主绝缘未见明显异常; 二次绕组直流电阻数值正常, 二次绕组绝缘良好且无断线现象; 绝缘油色谱试验数据中特征气体 H_2 与总烃均小于 $120 \mu\text{L/L}$, C_2H_2 含量为 0, 绝缘油耐压、微水、介损试验数据均满足厂家技术标准要求。说明电容分压器内电容单元及电磁单元主绝缘完好, CVT 二次绕组失压的原因是中间变压器高压侧一次绕组断线。

3 解体检查

为查找断线位置分析故障原因, 在变电站内开展了 CVT 解体检查及试验工作。拆开下节电容分压器与电磁单元, 油箱内部中间变压器、补偿电抗器、阻尼器、避雷器元件等外观完好; 低压端子套管与二次接线盒 N 端之间连线、中压端子套管与二次接线盒 X 端连线连接正常且无断线, 绝缘油无杂质。下节电容分压器与电磁单元见图 4。

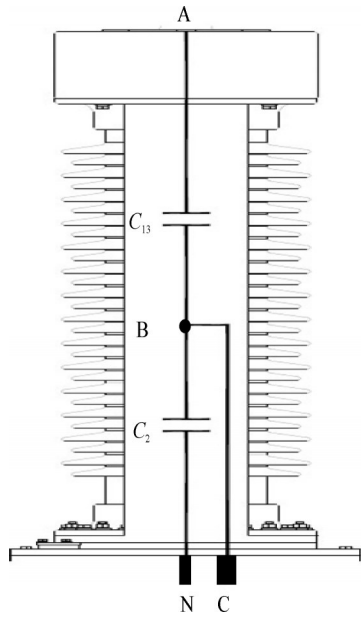


图 4 CVT 电磁单元与电容单元
Fig. 4 CVT electromagnetic unit and capacitive unit

将 CVT 下节电容分压器与电磁单元分离后,对电磁单元中间变压器开展绝缘电阻及变比试验。中间变压器绝缘电阻及变比试验合格,数据见表 6。

表 6 中间变压器变比试验
Table 6 Ratio test of intermediate transformer

绕组	1a-1n	2a-2n	3a-3n	da-dn
实测值	222.7	222.7	222.7	128.3
标准值	225.16	225.16	225.16	130.00

再次对下节电容分压器开展介损及电容量试验,由于电容分压器与电磁单元已分离可直接采用正接线对下节整体电容量(A-N)、C₁₃单元(A-X)、C₂单元(N-X)进行试验。下节电容单元结构见图 5。



图 5 下节电容单元结构示意图
Fig. 5 Structural schematic diagram of capacitor unit in the lower section

下节整体电容量(A-N)与诊断试验数据基本一致,C₁₃单元及 C₂无法测试介损及电容量,数据见表 7。

表 7 介损及电容量试验
Table 7 Dielectric loss and capacitance test

	测试值 tanδ/%	测试值 C/nF	初值 C/nF	初值差/%
C ₁₃ 及 C ₂	0.054	15.02	15.00	0.13
C ₁₃	—	—	17.33	—
C ₂	—	—	111.6	—

由于下节整体电容量与诊断试验数据基本一致,且 C₁₃单元(A-X)、C₂单元(N-X)无法测试数据,说明下节瓷套内整体电容量正常,结合中间变压器变比试验合格,进一步明确了 CVT 二次绕组失压原因是中间变压器高压侧一次绕组断线导致。下节瓷套内 B 点至电磁单元中压端子套管之间连线出现断线造成电磁单元中间变压器高压侧开路无输入电压,二次绕组无输出电压,对故障 CVT 下节电容分压器进行解体,检查发现瓷套内部电容分压器心子抽出中压部分连线焊接点脱落,造成电磁单元中间变压器高压侧断线开路。

4 结语

2 号主变 500 kV 侧 CVT 二次绕组失压故障缺陷反映出设备制造工艺存在一定质量缺陷,电压互感器在正常运行时下节瓷套内部电容单元与电磁单元连线断裂造成中间变压器高压侧一次侧绕组开路二次绕组输出无电压。CVT 作为电网中重要的设备之一,为保障电网设备安全稳定运行,提出以下建议及措施:

- 1)CVT 运行中应定期巡视检查设备有无异常响声,二次电压及开口三角电压是否正常,如有异常应停止运行;
- 2)CVT 运行中严禁人员接触或接近带电部分,若需检查设备应将其停电接地,不宜对运行中的 CVT 电磁单元开展绝缘油取样工作;
- 3)未经设备生产厂家同意,严禁拆卸 CVT 电容分压器及电磁装置密封用的紧固螺栓及注油孔密封件,避免 CVT 产生漏油及电磁单元进水受潮;
- 4)CVT 不承担载波通信工作,其二次 N、X 端子必须可靠连接并接地;否则高压将进入二次接线盒损坏二次设备危及人身安全,每次停电检修均应检查其连接可靠性;
- 5)CVT 中间变压器高压侧对地不应装设氧化锌避雷器,此类结构的设备在过电压时避雷器易击穿造成中间变压器高压侧一次绕组对地短路二次绕组失压影响设备运行,对于此类结构的 CVT 设备应优先安排停电开展隐患排查,并对存在隐患的 CVT 及时进行更换;

6)CVT 本身作为电压转换设备,其二次电压的变化可反映其内部运行状况。不同于常见的 CVT 的 C_1 或 C_2 电容单元元件击穿导致二次电压降低或升高,CVT 二次绕组失压故障应作为危急缺陷进行处理,需立即停电进行检查试验及处理;

7)CVT 二次绕组失压故障发生后,建议对下节电容分压器使用正接线及自激法测试介损及电容量,同时结合变比测试快速判断故障原因及位置;

8)定期开展 CVT 电容单元及电磁单元红外精确测温工作,对相间温差超过 2 K 的 CVT 应进行及时停电检查;

9)CVT 下节电容单元及电磁单元叠装在一起,通过内部引线进行电气连接,例行试验无法单独对电磁单元开展相关试验工作,建议 CVT 例行停电试验增加变比试验项目检查中间变压器电气连接是否存在异常;

10)CVT 电磁单元工作电压与 CVT 额定运行电压等级不对应,不宜将电磁单元绝缘油试验项目与 CVT 额定运行电压等级对应^[32]。CVT 为作为少油式设备,建议仅在诊断性试验时开展绝缘油试验工作。电磁单元电压运行一般为 10~20 kV,绝缘油试验标准以厂家标准为宜或参考 GB/T 7595 中 35 kV 绝缘油性能指标要求^[33]。

参考文献

- [1] 冯宇. 电力互感器术语使用手册[M]. 北京:中国电力出版社,2017.
- [2] 熊亮,韦宇,庾印和. 一起 500 kV 电容式电压互感器二次电压异常下降故障分析[J]. 科技与创新,2020(18):67-70.
XIONG Liang, WEI Yu, TUO Yinhe. Analysis of abnormal secondary voltage drop fault in a 500 kV capacitive voltage transformer[J]. Science and Technology & Innovation, 2020(18): 67-70.
- [3] 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.
- [4] 王法顺,周刚,李伟琦,等. 一起 500 kV 电容式电压互感器二次电压异常的故障分析[J]. 电气开关,2022,60(2):105-108.
WANG Fashun, ZHOU Gang, LI Weiqi, et al. Fault analysis of an abnormal secondary voltage of 500 kV capacitive voltage transformer[J]. Electric Switcher, 2022, 60(2): 105-108.
- [5] 郭一. 电容式电压互感器二次电压异常分析及处置[J]. 山西电力,2023(4):39-42.
GUO Yi. Analysis and disposal of abnormal secondary voltage of capacitive voltage transformer[J]. Shanxi Electric Power, 2023(4): 39-42.
- [6] 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.
- [7] 徐龙,肖泽宇,李丰,等. 220 kV CVT 二次电压异常典型案例剖析[J]. 光源与照明,2021(5):92-94.
XU Long, XIAO Zeyu, LI Feng, et al. Analysis of typical cases of abnormal secondary voltage in 220 kV CVT[J]. Lamps & Lighting, 2021(5): 92-94.
- [8] 张辉,黄海飞,钱苏华,等. 一起 220 kV 电容式电压互感器介损超标分析[J]. 电力安全技术,2019,21(8):23-25.
ZHANG Hui, HUANG Haifei, QIAN Suhua, et al. Analysis of a 220 kV capacitive voltage transformer with excessive dielectric loss[J]. Electric Safety Technology, 2019, 21(8): 23-25.
- [9] 苏同斐,李红刚. 电容式电压互感器介损超标案例分析[J]. 机电信息,2020(17):37-38.
SU Tongfei, LI Honggang. Case analysis of excessive dielectric loss in capacitive voltage transformers[J]. Mechanical and Electrical Information, 2020(17): 37-38.
- [10] 梁曲棚,李涛. 某 500 kV 电容式电压互感器介损异常原因分析[J]. 广西电力,2018,41(6):69-72.
LIANG Quxu, LI Tao. Reason analysis of abnormal dielectric loss of a 500 kV capacitor voltage transformer[J]. Guangxi Electric Power, 2018, 41(6): 69-72.
- [11] 赵铁羽,王清龙,徐腾飞,等. 介损试验发现的 35 kV 电压互感器受潮缺陷分析[J]. 电工技术,2019(1):75-76.
ZHAO Tieyu, WANG Qinglong, XU Tengfei, et al. Analysis on moisture defect of 35 kV voltage transformer discovered by dielectric loss test[J]. Electric Engineering, 2019(1): 75-76.
- [12] 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.
- [13] 黄繁朝,房博一,陈极升. 一起 500 kV 线路 CVT 二次电压异常的故障分析[J]. 电工技术,2020(12):81-83.
HUANG Fanchao, FANG Boyi, CHEN Jisheng. Fault analysis of a CVT secondary voltage abnormality of 500 kV line[J]. Electric Engineering, 2020(12): 81-83.
- [14] 王波. 500 kV 电容式电压互感器受潮故障原因[J]. 电工技术,2022(16):112-115.
WANG Bo. Reasons for 500 kV capacitive voltage transformer damped fault[J]. Electric Engineering, 2022(16): 112-115.
- [15] 于群英,赵春明,杨代勇,等. 一起 500 kV 电容式电压互感器故障分析[J]. 吉林电力,2023,51(5):35-36.

- YU Qunying, ZHAO Chunming, YANG Daiyong, et al. Fault analysis of a 500 kV capacitive voltage transformer [J]. Jilin Electric Power, 2023, 51(5): 35-36.
- [16]戴向伟. 500 kV CVT电磁单元故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(3): 105-109.
- DAI Xiangwei. Fault analysis on electromagnetic unit of 500 kV capacitor voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(3): 105-109.
- [17]黄燕珠. 35 kV 电容式电压互感器故障原因分析[J]. 广西电力, 2019, 42(4): 71-74.
- HUANG Yanzhu. Analysis of a 35 kV capacitive voltage transformer fault[J]. Guangxi Electric Power, 2019, 42(4): 71-74.
- [18]王贵山, 李应宏. 电容式电压互感器电磁单元故障原因分析及处理措施[J]. 广西电力, 2020, 43(3): 67-70.
- WANG Guishan, LI Yinghong. Cause analysis and treatment of electromagnetic unit faults of capacitor voltage transformers[J]. Guangxi Electric Power, 2020, 43(3): 67-70.
- [19]刘隰蒲, 王俊娜, 乐佳琪. 220 kV 电容式电压互感器发热故障分析及预防措施[J]. 变压器, 2021, 58(9): 81-83.
- LIU Xipu, WANG Junna, YUE Jiaqi. Fault analysis and preventive measures of 220 kV capacitive voltage transformer[J]. Transformer, 2021, 58(9): 81-83.
- [20]苏刚, 文峰, 杜航, 等. 220 kV 电容式电压互感器(CVT)运行中异常发热缺陷分析[J]. 机电信息, 2024(19): 67-70.
- SU Gang, WEN Feng, DU Hang, et al. Analysis of abnormal heating defects in the operation of 220 kV capacitive voltage transformer(CVT)[J]. Mechanical and Electrical Information, 2024(19): 67-70.
- [21]范茂金. 一起500 kV 电容式电压互感器异常发热原因分析[J]. 电世界, 2024, 65(6): 9-13.
- FAN Maojin. Analysis of abnormal heating causes of 500 kV capacitive voltage transformers[J]. Electric World, 2024, 65(6): 9-13.
- [22]田浩, 杨敏, 陈小龙, 等. 500 kV 电容式电压互感器异常发热原因分析及预防措施[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1): 106-113.
- TIAN Hao, YANG Min, CHEN Xiaolong, et al. Analysis on abnormal heating and preventive measures of 500 kV capacitor voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 106-113.
- [23]胡顺, 立梓辰, 王子健. 自激法在500 kV 电容式电压互感器高压试验中的应用[J]. 电气技术与经济, 2024(4): 87-89.
- HU Shun, LI Zichen, WANG Zijian. Application of self excitation method in high voltage test of 500 kV capacitive voltage transformer[J]. Electrical Equipment and Economy, 2024(4): 87-89.
- [24]易冉, 梁育雄, 黄启泰, 等. 一起220 kV CVT二次失压故障的分析与试验[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(5): 86-91, 95.
- YI Ran, LIANG Yuxiong, HUANG Qitai, et al. Fault analysis and test on secondary voltage loss of 220 kV capacitor voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(5): 86-91, 95.
- [25]周志昊, 杨芳芳, 金雍奥, 等. 220 kV CVT二次绕组失压故障判别与分析[J]. 电工技术, 2017(9): 86-87.
- ZHOU Zhihao, YANG Fangfang, JIN Yongao, et al. Discrimination and analysis of voltage loss fault in 220 kV CVT secondary winding[J]. Electric Engineering, 2017(9): 86-87.
- [26]乔亚军, 林其雄, 林李波. 500 kV CVT电磁单元过热缺陷分析与处理[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(4): 61-63.
- QIAO Yajun, LIN Qixiong, LIN Libo. Overheat defect analysis and treatment on electromagnetic unit of 500 kV CVT[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(4): 61-63.
- [27]变压器油中溶解气体分析和判断导则: DL/T 722—2014 [S]. 2015.
- Guide to the analysis and the diagnosis of gases dissolved in transformer oil: DL/T 722—2014 [S]. 2015.
- [28]陈东明, 王建伟, 李旻, 等. 电容式电压互感器典型故障及缺陷分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(6): 36-43.
- CHEN Dongming, WANG Jianwei, LI Yang, et al. Analysis of typical faults and defects of capacitive voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(6): 36-43.
- [29]陆丰. 正接法测量CVT出现负介损原因分析[J]. 中国新技术新产品, 2011(24): 11-12.
- LU Feng. Analysis of negative dielectric loss in CVT measurement by positive connection method[J]. China New Technology and Products, 2011(24): 11-12.
- [30]陈志高. 介质损耗因数出现负值原因分析[J]. 广西电力, 2012, 35(6): 66-69.
- CHEN Zhigao. Analysis of negative value of dielectric loss factor[J]. Guangxi Electric Power, 2012, 35(6): 66-69.
- [31]陈忠雷. 介损测试产生负值的原因分析[J]. 贵州电力技术, 2016, 19(7): 42-48.
- CHEN Zhonglei. Superficial analysis on the reason of negative values' generation in $\tan\delta$ measurement[J]. Guizhou Electric Power Technology, 2016, 19(7): 42-48.
- [32]王晓琪. 电力互感器[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [33]互感器 第5部分: 电容式电压互感器的补充技术要求: GB/T 20840.5—2013 [S]. 2013.
- Transformers—Part 5: supplementary technical requirements for capacitive voltage transformers: GB/T 20840.5—2013[S]. 2013.

作者简介:

代英俊(1987—), 男, 高级工程师、高级技师, 从事500 kV电网一次设备检修及试验工作。E-mail: dai0725@qq.com。