

一起电容式电压互感器二次电压异常故障分析

赵彦林¹, 周志新¹, 何亮¹, 雷雨田², 康勇¹, 陈楠¹, 武霖¹, 李俊廷¹

(1. 云南电网有限责任公司楚雄供电局, 云南 楚雄 675000;

2. 云南电力建设监理咨询有限责任公司, 云南 昆明 650000)

摘要: 本文介绍了一起发生在云南地区 35 kV 主变高压侧电容式电压互感器(CVT)二次侧电压异常降低故障情况,通过结合 CVT 的结构及工作原理、试验数据和设备解体后内部情况,并使用 LTspice 电路仿真软件与公式推导对故障原因进行了分析,判断本次故障是由于 CVT 电磁单元中的并联氧化锌避雷器因阀片老化而被击穿,造成补偿电抗器被短路,电磁单元一次侧电感分量大幅下降,导致电磁单元一次电压变化,从而引起二次电压异常,为今后 CVT 设备类似的故障排查提供了重要的经验参考。

关键词: CVT; 电压异常; 电磁单元; 补偿电抗器

Analysis of an Abnormal Secondary Voltage of Capacitive Voltage Transformer

ZHAO Yanlin¹, ZHOU Zhixin¹, HE liang¹, LEI Yutian², KANG Yong¹,
CHEN Nan¹, WU Lin¹, LI Juntong¹

(1. Yunnan Power Grid Co., Ltd. Chuxiong Power Supply Bureau, Yunnan Chuxiong 675000, China;

2. Yunnan Electric Power Construction Supervision Consulting Co., Ltd., Yunnan Kunming 650000, China)

Abstract: In this paper, a fault of abnormal voltage reduction at the secondary side of capacitor voltage transformer (CVT) on the high voltage side of 35 kV main transformer in Yunnan is introduced. The cause of the fault is analyzed in combination with the structure and operating principle of CVT, test data and the internal situation of the equipment after disassembly, and also by using LT spice circuit simulation software and formula derivation. It is judged that the fault is caused by the breakdown of the shunt zinc oxide arrester in the electromagnetic unit of CVT due to the aging of the valve plate, resulting in the short circuit of the compensation reactor, and the inductance component of the primary side of the electromagnetic unit is decreased greatly, resulting in variation of the primary voltage of the electromagnetic unit, thus causing the abnormality of the secondary voltage. This analysis provides an important experience reference for similar troubleshooting of CVT equipment in the future.

Keywords: CVT ; abnormal voltage; electromagnetic unit; compensating reactor

0 前言

电压互感器是电力系统中不可或缺的一种电气设备,其又分为电磁式电压互感器和电容式电压互感器(capacitor voltage transformer, CVT),与电磁式电压互感器相比,CVT具有耐电强度高,绝缘裕度大,运行可靠,调差精度高等优势,同时避免了传统电磁式电压互感器铁磁谐振的问题,因此 CVT 在电力系统中得到了广泛的应用^[1-8]。

CVT 在电力系统广泛使用的过程中,不可避免

的也会出现问题,常见的故障有:电磁单元中间变压器内部击穿、二次侧失压;电容单元开裂、受潮;电容单元与电磁单元不匹配等^[9-15]。本文介绍分析了一起 35 kV CVT 二次电压异常降低事故,该事故中实际故障部位在 CVT 电磁单元内部,常规预试无法检测到故障部位,这给故障排查和缺陷消除带来了一点波折,但这样的故障实例也为未来改进 CVT 的设计、生产和运维提供了宝贵的实践经验和教训,有助于提高整个电力系统中 CVT 设备的安全性和可靠性,也为今后 CVT 的故障诊断提供了重要的经验参考。

1 故障概况与排查

1.1 故障概况

2023 年某变电站上报某 35 kV 主变高压侧 CVT 二次电压异常降低情况,试验人员到现场进行初步检查,确认三相 CVT 本体无破损、漏油、无异响、异味,一次表象正常。后核实该间隔 A、B、C 三相 CVT 二次电压,A 相为 6.7 V,B 相为 61 V,C 相为 60 V,确认 A 相二次电压异常降低,其余两相正常。为了排除系统层面的影响因素,试验人员对该变电站系统进行了全面核查,该主变低压侧电压输出显示正常,因此,试验人员集中对高压侧 CVT 及其相关二次回路进行详细检查和测试,考虑到高压侧 CVT 二次回路中与 A 相相关的部分可能

存在断线、短路、接地或接触不良等故障,试验人员将 A 相 CVT 二次回路与设备解脱,分别进行了绝缘电阻测试、耐压试验以及二次回路通断性检查,均未发现明显异常。综上所述,通过对高压侧 A 相 CVT 二次回路全面的检查和测试,试验人员逐步排除了系统层面的影响因素,并逐渐将故障定位到设备自身问题,为后续精准维修提供了有力依据。

1.2 故障排查

设备停电后,试验人员在现场严格按照 Q/CSG 1206007—2017《电力设备检修试验规程》相关要求,开展了 C₁极板间、C₂极板间、中间变压器一次对二次绕组及地、二次绕组对地、低压端对地的绝缘电阻测试,试验数据见表 1。

表 1 三相 CVT 绝缘电阻试验数据
Table 1 Test data of insulation resistance of three-phase CVT

试验项目	相别	C ₁₁ /MΩ	C ₁₂ /MΩ	中间变压器一次对二次及地/MΩ	低压端对地/MΩ	二次绕组对地/MΩ
绝缘电阻	A	431 000	420 000	156 000	194 000	117 000
	B	400 000	380 000	152 000	178 000	121 000
	C	390 000	460 000	145 000	180 000	109 000

根据表 1 的试验结果,绝缘电阻测试数据均未发现异常情况,这在一定程度上可以初步判断 A 相 CVT 设备的绝缘性能良好,其内部各部件和部件之间没有明显的绝缘缺陷。

由于规程未要求 CVT 需周期性开展直流电阻测试,因此无历史值进行比较,所以现场同时测试了 A、B、C 三相 CVT 的二次绕组直流电阻,试验数据如表 2 所示。

根据表 2 的试验结果,A、B、C 三相 CVT 二次绕组直流电阻的试验数据进行横比后未发现有明显变化,故初步判断 A 相 CVT 设备的二次绕组接触良好,内部导体无明显损坏现象,其导通性能保持在正常范围内。

表 2 三相 CVT 二次绕组直流电阻试验数据
Table 2 Test data of DC resistance of secondary winding of three-phase CVT

试验项目	二次绕组	测试值/mΩ
二次绕组直流电阻	A 相 1a1n	27.20
	A 相 2a2n	41.88
	A 相 dadn	52.26
	B 相 1a1n	26.95
	B 相 2a2n	41.17
	B 相 dadn	52.66
	C 相 1a1n	26.55
	C 相 2a2n	40.63
	C 相 dadn	54.44

接下来对 A、B、C 三相 CVT 的电容量及介损值进行了现场测量,试验数据如表 3 所示。

表 3 三相 CVT 电容量、tanδ 试验数据
Table 3 Capacitance and tanδ test data of three-phase CVT

试验项目	试验对象	铭牌值/pF	测量值/pF	tanδ/%	容差/%	接线方法
电容量、tanδ	A 相 C ₁	19 796	19 460	0.058	-1.70	CVT 自激法
	A 相 C ₂	20 208	19 840	0.060	-1.80	CVT 自激法
	A 相 C _总	10 000	9 824	—	1.76	CVT 自激法
	B 相 C ₁	19 796	19 460	0.060	-1.70	CVT 自激法
	B 相 C ₂	20 208	19 820	0.064	-1.80	CVT 自激法
	B 相 C _总	10 000	9 819	—	1.81	CVT 自激法
	C 相 C ₁	19 796	19 460	0.061	-1.70	CVT 自激法
	C 相 C ₂	20 208	19 830	0.063	-1.80	CVT 自激法
	C 相 C _总	10 000	9 821	—	1.79	CVT 自激法

根据表3的试验结果,A、B、C三相CVT的电容量及介损值实测试数据均未发现异常情况,初步判断A相CVT设备的电容性能良好,电容内部的绝缘介质品质优良,无明显老化、受潮或其他导致介质损耗、电容量增大的问题。

为验证中间变压器的可靠性,现场使用CVT自激法测试电容量及介损值时,低压输出端分别接A相CVT的1a1n、2a2n、dadn 3个绕组进行测试,均正常出试验数据,间接证明中间变压器一、二次绕组间可以正常感应出电压,因此初步判断中间变压器一次侧无异常。

尽管以上述测试结果均指向CVT设备的电气性能良好,但A相CVT二次电压异常降低的问题仍未得到明确解释。考虑到CVT设备的电磁单元一次侧密封在下端油箱中,且无引出点,现场无法对电磁单元内部的补偿电抗器和氧化锌避雷器进行直接测量,因此需对A相CVT进行解体以便开展进一步的分析。

2 解体检查

设备解体后,再次对A相CVT设备电容单元的电容量及介损值进行复测,复测结果与设备解体前的现场测试结果相近,无明显变化,更加证实了故障根源不在电容单元。

在对A相CVT设备下端油箱中的电磁单元进行外观检查的过程中,试验人员发现其二次阻尼绕组dadn中的阻尼电阻有很明显的被灼烧痕迹,已经碳化,故障情况如图1所示,而其余电磁单元部件如并联的氧化锌避雷器等外观无破裂、烧蚀或其他明显损坏迹象。



图1 阻尼电阻故障情况图

Fig. 1 Diagram of damping resistance fault

但A相CVT设备的故障表象是其所有二次绕组电压异常降低,阻尼电阻主要用于限制和吸收电磁单元中的瞬变电压和电流,以保持电压输出的稳定性,仅仅是一个阻尼电阻烧毁,通常不会导致所有二次绕组电压均出现大幅度降低,故阻尼电阻烧

毁并非导致二次电压异常的根本原因。因此试验人员又分别对中间变压器、补偿电抗器阻抗和氧化锌避雷器展开测试,其中中间变压器和补偿电抗器试验数据与厂家核实后无异常,而补偿电抗器上并联的氧化锌避雷器在进行绝缘电阻测量时绝缘摇表电压无法上升到设定值,后使用万用表测量其电阻,显示只有数十欧,证明并联氧化锌避雷器已存在严重的绝缘缺陷,其在电磁单元内部位置如图2所示。



图2 并联氧化锌避雷器位置图

Fig. 2 Layout diagram of shunt zinc oxide arrester

通过上述解体检查,发现A相CVT电磁单元二次阻尼绕组dadn中的阻尼电阻已经被烧毁。同时发现电磁单元一次侧补偿电抗器上并联的氧化锌避雷器被永久击穿,而很明显阻尼电阻烧毁并非导致二次电压异常的根本原因,鉴于避雷器的重要作用在于保护设备免受过电压损害,其严重绝缘缺陷极有可能是导致A相CVT设备所有二次绕组电压异常降低的真正原因,但二次电压异常降低具体的故障机制、阻尼电阻烧毁的原因、并联的氧化锌避雷器绝缘损坏的原因均需通过进一步的技术分析和研究。

3 原因分析

3.1 二次电压异常

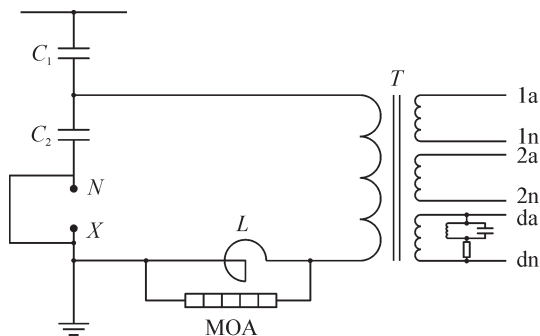
试验人员结合故障位置和故障现象,并通过公式推导和仿真验证的方式对故障原因进行了分析。CVT结构原理图见图3,在其正常运行过程中,等效电路图见图4。

CVT正常运行时补偿电抗器补偿电容分压器中 C_2 两端的电压,让CVT的二次电压和一次电压之间保持正确的相位,同时使 C_2 两端的电压与一次电压之间保持正确的分压比,其等效电路中总的电感量为公式

$$L_{\text{总}} = L_1 + L_m + L \quad (1)$$

又因为

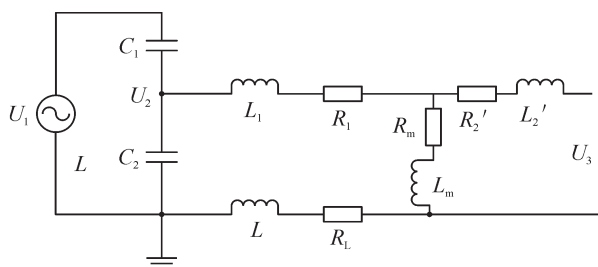
$$X_{L_{\text{总}}} = j\omega L_{\text{总}} \quad (2)$$



C_1 —高压电容; C_2 —中压电容; T —中间变压器;
 L —补偿电抗器; MOA—并联氧化性避雷器;
 L_x —阻尼电感; C_x —阻尼电容; R_x —阻尼电阻;
 N —中压电容尾端; X —电磁单元尾端。

图3 CVT结构原理图

Fig. 3 Structural schematic diagram of CVT



U_1 —系统电压; U_2 —中间抽头处的电压; C_1 —高压电容;
 C_2 —中压电容; L_1 —中间变压器一次侧电压;
 L_2' —中间变压器二次侧电感; L_m —中间变压器励磁电感;
 L —补偿电抗器电感; R_1 —中间变压器一次侧电阻;
 R_2' —中间变压器二次侧电阻; R_m —中间变压器励磁电阻;
 R_L —补偿电抗器电阻。

图4 CVT等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit diagram of CVT

$$X_{C1} = -j \frac{1}{\omega C_1} \quad (3)$$

$$X_{C2} = -j \frac{1}{\omega C_2} \quad (4)$$

而 C_2 与电磁单元并联回路中电阻分量相较于电感分量可忽略不计,故 C_2 与电磁单元并联回路的等效阻抗约为

$$Z_2 \approx (X_{C2} \times X_{L_{\text{总}}}) / (X_{C2} + X_{L_{\text{总}}}) \quad (5)$$

若满足:

$$X_{L_{\text{总}}} = -2X_{C2} \quad (6)$$

则此时 Z_2 呈容性,中间抽头处的电压公式为

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 \times Z_2 / (Z_1 + Z_2) \quad (7)$$

此时 U_1 与 U_2 保持同相位,分压比由 Z_1 与 Z_2 决定,仿真验证过程中为更加直观,电压幅值使用有效值代替,仿真验证结果见图 5。

当补偿电抗器的两端并联的氧化锌避雷器被击穿,此时补偿电抗器相当于被短路,因 L_m 与 L_1 只是占 L 总的一小部分,故此时 $X_{L_{\text{总}}}$ 大幅下降,导致 Z_2 由容性变为感性, U_2 与正常运行时相比大幅下降

且相位发生改变,此时 CVT 二次电压也随之大幅下降,仿真验证结果见图 6。

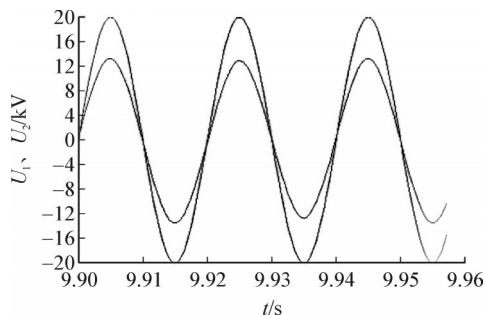


图5 CVT正常运行时 U_1 、 U_2 波形图

Fig. 5 Waveform of U_1 and U_2 of CVT in normal operation

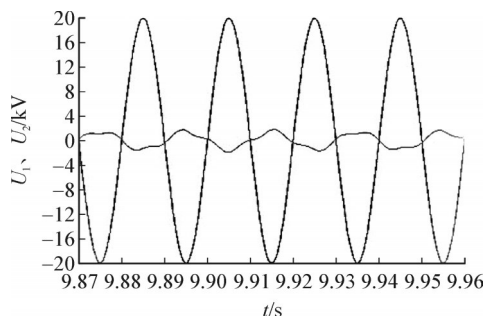


图6 并联氧化锌避雷器被击穿时 U_1 、 U_2 波形图

Fig. 6 Waveform of U_1 and U_2 in case of breakdown of shunt zinc oxide arrester

3.2 阻尼电阻烧毁

阻尼绕组在系统处于工频正常运行状态时, L_x 和 C_x 保持并联谐振状态,阻尼绕组回路相当于断路^[16-24]。但当补偿电抗器两端并联的氧化锌避雷器被击穿时,补偿电抗器相当于被短路, $X_{L_{\text{总}}}$ 将大幅下降并导致 Z_2 大幅下降且由容性变为感性,由图 6 的仿真结果可知此时的 U_2 波形发生畸变,波峰波谷反转, CVT 整体回路变为 RLC 二阶电路, U_2 中的分次谐波将 L_x 和 C_x 的并联谐振状态打破,而且由于氧化锌避雷器是被永久击穿,故阻尼回路长时间处于导通状态,使得原本不参与正常工作循环的阻尼回路持续导通,流经阻尼电阻的电流剧增,长时间处于过载状态,超过了阻尼电阻的设计承受能力,导致其因过热而烧毁。

3.3 氧化锌避雷器被击穿

该间隔 A、B、C 三相 CVT 设备于 2012 年 12 月投运,已正常运行运行 11 年,间接证明设备生产工艺、设计、安装均未存在问题,而 CVT 设备电磁单元一次侧并联氧化锌避雷器位于下端油箱内部,且无引出点,现场试验无法对其进行全面的健康状态评估和管理,确保其安全稳定运行,也无历史数据记录。而在发现 A 相 CVT 二次电压异常降低前,系统运行正常,运行方式未进行切换操作,保护装置

未发生过动作,监测系统正常工作,且监测到的电压、电流、功率正常,未监测到有过电压事件,CVT设备并联的避雷器雷击计数器示数无变化,故基本排除外部过电压导致A相CVT内氧化锌避雷器故障可能性,故重点转向内部故障的可能性排查。

由于A相CVT设备电磁单元一次侧并联氧化锌避雷器位于油箱内部,他的运行环境相对封闭且独特,面临更高的温度和压力条件。油浸式设备内部,尤其是靠近绕组等发热部位,温度往往高于外界空气温度^[25-34],长期处于较高温度环境下,氧化锌避雷器的阀片会加速老化,影响其非线性特性,降低其耐受过电压的能力,而且由于油箱内绝缘油的热胀冷缩,会在油箱内产生高于外界空气的压力,这对避雷器的密封性能提出更高要求。在这种环境下,A相CVT电磁单元一次侧的并联氧化锌避雷器阀片加速老化^[35-36],随着运行时间的推移,在某个临界点在正常电压下极有可能因阀片老化而被击穿。

4 结语

根据上述分析情况,本次CVT二次侧电压异常降低故障主要是由于电磁单元中的并联氧化锌避雷器因阀片老化而被击穿,造成补偿电抗器被短路所导致,同时并联氧化锌避雷器的绝缘缺陷也导致了阻尼绕组中阻尼电阻的烧毁。针对该类型隐患的排查,在对设备进行解体检查前,无论是常规的电气性能测试还是油色谱分析、红外测温或局部放电测试,均无法准确定位故障点。此次故障暴露了目前的试验手段在对CVT设备进行定期维护和状态评估时存在一定的局限性,特别是在无法直接接触到位于油箱内部的关键元件的情况下,难以对其进行实时有效的健康状态监测和管理。

为保障CVT设备的可靠运行,提出以下防范措施:

1)改进监测技术。开发和应用新型的在线监测系统,如安装内置传感器或无线通信模块,实现对CVT内部关键元件如氧化锌避雷器、补偿电抗器等的实时温度、电流、电压监测,以便及时发现异常情况并预警;

2)强化设备选型与设计。在CVT内部避雷器设备选型时,选择具有更好耐热、耐压性能和更长使用寿命的避雷器元件,并改进类似油浸式设备中避雷器的设计,如增设隔离缓冲层、改善散热条件,减少内部元件因长期运行在高温高压环境下的老化速度;

3)建立基于设备状态评估的状态检修制度。

结合CVT设备的运行工况、运行时间、关键元件老化趋势、历史故障数据,实施有针对性的预防性检修和更换计划。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 时德钢,刘晔,张丽平,等.高电压等级电压互感器综述[J].变压器,2003,40(6):11-14.
SHI Degang, LIU Ye, ZHANG Liping, et al. Overview of high-voltage potential transformer[J]. Transformer, 2003, 40(6):11-14.
- [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] 房金兰.电容式电压互感器的技术发展[J].电力电容器,2007(2):1-4.
FANG Jinlan. Research on the technical development of capacitor voltage transformer[J]. Power Capacitor, 2007(2):1-4.
- [5] 周庆红,张鹏飞,张燕珂,等.220 kV电容式电压互感器二次电压单相异常试验分析[J].变压器,2019,56(4):74-77.
ZHOU Qinghong, ZHANG Pengfei, ZHANG Yanke, et al. Analysis of secondary voltage abnormal test of 220 kV capacitor voltage transformer[J]. Transformer, 2019, 56(4):74-77.
- [6] 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.
- [7] 魏菊芳,王楠,王伟,等.一起220 kV电容式电压互感器二次电压异常升高故障分析[J].电气应用,2018,37(8):40-45.
WEI Jufang, WANG Nan, WANG Wei, et al. Fault analysis of abnormal secondary voltage rise of 220 kV capacitive voltage transformer[J]. Electrotechnical Application, 2018, 37(8):40-45.
- [8] 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.
- [9] 张玉波,张磊,黎大健,等.电容式电压互感器二次电压

- 异常分析[J]. 广西电力, 2018, 41(1): 29-31.
- ZHANG Yubo, ZHANG Lei, LI Dajian, et al. Analysis of abnormal CVT secondary voltage[J]. Guangxi Electric Power, 2018, 41(1): 29-31.
- [10] 郭亮, 李哲, 李骁, 等. 雷电过电压引发电容式电压互感器铁磁谐振特性分析与防护研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(6): 147-151.
- GUO Liang, LI Zhe, LI Xiao, et al. Analysis and prevention research of ferroresonance in capacitor voltage transformer caused by lightning overvoltage[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(6): 147-151.
- [11] 曲欣, 王兴友, 吴西博, 等. 一起500 kV CVT二次电压异常分析及预防[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(3): 105-109.
- QU Xin, WANG Xingyou, WU Xibo, et al. Study and prevention on abnormal secondary voltage of 500 kV CVT[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(3): 105-109.
- [12] 陈少华, 余耀权. 电容式电压互感器二次电压异常分析与处理[J]. 变压器, 2004, 41(2): 45-46.
- [13] 王斯斯, 刘宇, 熊俊, 等. 一起500 kV电容式电压互感器电容击穿故障分析[J]. 广东电力, 2017, 30(1): 126-130.
- WANG Sisi, LIU Yu, XIONG Jun, et al. Analysis on breakdown of 500 kV capacitor voltage transformer[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(1): 126-130.
- [14] 洪乐洲, 吴贻志, 李靖翔, 等. 电容式电压互感器二次电压异常分析处理[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(3): 73-76.
- HONG Lezhou, WU Yizhi, LI Jingxiang, et al. Analysis and treatment on abnormal secondary voltage of capacitor voltage transformers[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(3): 73-76.
- [15] 丁涛, 陈卓娅, 刘忠, 等. 一起500 kV电容式电压互感器电压异常的分析处理[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 31(2): 52-55.
- DING Tao, CHEN Zhuoya, LIU Zhong, et al. Analysis and treatment of voltage abnormality in a 500 kV capacitor voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2010, 31(2): 52-55.
- [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] 丁骞. 电容式电压互感器电磁单元故障分析[J]. 广西电力, 2021, 44(1): 95-100.
- DING Qian. Treatment and analysis of several electromagnetic unit faults of capacitor voltage transformers[J]. Guangxi Electric Power, 2021, 44(1): 95-100.
- [18] 邱炜, 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.
- [19] 和兆伟, 任庆帅, 李超, 等. 35 kV电容式电压互感器(CVT)二次阻尼回路谐振电容器状态对设备的影响[J]. 通信电源技术, 2018, 35(3): 133-135.
- HE Zhaowei, REN Qingshuai, LI Chao, et al. Influence of the state of the resonant capacitor in the secondary lateral damping circuit on the 35 kV capacitive voltage transformer (CVT) [J]. Telecom Power Technologies, 2018, 35(3): 133-135.
- [20] 麻震烁, 陈东明, 陈习文, 等. CVT油箱发热缺陷的分析与处理[J]. 电工技术, 2018(13): 92-93.
- MA Zhenshuo, CHEN Dongming, CHEN Xiwen, et al. Analysis and treatment on the defect of CVT tank heating[J]. Electric Engineering, 2018(13): 92-93.
- [21] 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 overheating defects of capacitor voltage transformer electromagnetic unit[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(2): 44-48.
- [22] 刘凡栋, 邓文斌. CVT阻尼回路故障诊断系统研究[J]. 计算技术与自动化, 2020, 39(3): 70-72.
- LIU Fandong, DENG Wenbin. Research on fault diagnosis system of CVT damping circuit[J]. Computing Technology and Automation, 2020, 39(3): 70-72.
- [23] 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.
- [24] 陈璐, 李光茂, 张梦慧, 等. 一起110 kV电容式电压互感器异响原因分析[J]. 变压器, 2023, 60(12): 68-72.
- CHEN Lu, LI Guangmao, ZHANG Menghui, et al. Cause analysis of abnormal noise of a 110 kV capacitor voltage transformer[J]. Transformer, 2023, 60(12): 68-72.
- [25] 王兴东, 薛劲莹. 基于窄带物联网的油浸式电流互感器智能检测技术研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(5): 167-172.
- WANG Xingdong, XUE Jinying. Research on intelligent detection technology of oil-immersed current transformer based on narrowband internet of things[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 167-172.
- [26] 吴睿涵, 何亚倩, 江军, 等. 变压器油中溶解乙炔光热

- 干涉检测系统的温度和压强特性[J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 30-36.
- WU Ruihan, HE Yaqian, JIANG Jun, et al. Temperature and pressure characteristics of dissolved acetylene in transformer oil based on photothermal interference detection system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5): 30-36.
- [27] 周宇通, 袁吕超, 张杰, 等. 丁腈橡胶在油浸环境中的性能变化与机理研究[J]. 浙江电力, 2023, 42(11): 72-77.
- ZHOU Yutong, QIU Lyuchao, ZHANG Jie, et al. Research on property variation and mechanism of NBR immersed in oil[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(11): 72-77.
- [28] 纪宏德, 吴显德, 王海鑫. 基于C-Prophet的变压器油温预测方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(3): 48-55.
- JI Hongde, WU Xiande, WANG Haixin. New prediction method of transformer oil temperature based on C-Prophet[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(3): 48-55.
- [29] 李波, 张文乾, 刘维, 等. 基于熵权层次法的油浸式变压器绝缘状态评价[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 223-230.
- LI Bo, ZHANG Wenqian, LIU Wei, et al. Insulation condition evaluation of oil-immersed transformer based on entropy weight hierarchy method[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 223-230.
- [30] 方鲲, 韩睿, 王文浩, 等. 油纸绝缘热稳定性的分子动力学模拟[J]. 浙江电力, 2023, 42(6): 86-97.
- FANG Kun, HAN Rui, WANG Wenhao, et al. Molecular dynamics simulation on thermal stability of oil-paper insulation[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(6): 86-97.
- [31] 李琪茜, 张振东, 刘浩, 等. 影响油浸式电力变压器振动因素的研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(9): 96-101.
- LI Qiqian, ZHANG Zhendong, LIU Hao, et al. Study on factors affecting vibration of oil immersed power transformers[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(9): 96-101.
- [32] 宋继明, 毛继兵, 马卫华, 等. 基于深度神经网络的特高压变压器滤油注油过程故障诊断技术研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(12): 95-103.
- SONG Jiming, MAO Jibing, MA Weihua, et al. Research on oil filtration and injection process fault diagnosis for ultrahigh voltage transformers based on deep neural networks[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(12): 95-103.
- [33] 黄梦辉, 蒋涛, 董建军, 等. 基于LSTM的箱式变压器高压套管温度预测[J]. 电测与仪表, 2023, 60(10): 171-176.
- Huang Menghui, Jiang Tao, Dong Jianjun, et al. Temperature prediction of box-type transformer high-voltage bushing based on LSTM[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(10): 171-176.
- [34] 苗阿乐, 白晓春, 朱超, 等. 油浸式变压器用片式散热器参数研究与优化[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 206-214.
- MIAO Ale, BAI Xiaochun, ZHU Chao, et al. Study and optimization of panel-type radiator parameters for oil-immersed transformer[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 206-214.
- [35] 姜雄伟, 王文浩, 韩睿. 避雷器加速电热老化下的响应特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2023(5): 37-43.
- JIANG Xiongwei, WANG Wenhao, HAN Rui. Response characteristics of arrester under accelerated electrothermal aging[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(5): 37-43.
- [36] 胡敏. 氧化锌阀片加速老化试验条件的研讨[J]. 电瓷避雷器, 1992(5): 49-54.
- HU Min. Study on accelerated aging test conditions of Zinc oxide valve plate[J]. Insulators and Surge Arresters, 1992(5): 49-54.
- 作者简介:**
- 赵彦林(1999—), 男, 助理工程师, 从事高压试验工作。
E-mail: 15100287302@163.com。
- 周志新(1981—), 男, 工程师, 从事继电保护工作。
- 何亮(1990—), 男, 高级工程师, 从事高压变电运行工作。
- 雷雨田(1988—), 男, 高级工程师, 从事高压试验工作。
- 康勇(1984—), 男, 高级工程师, 从事高压试验工作。
- 陈楠(1990—), 男, 工程师, 从事高压试验工作。
- 武霖(1993—), 男, 工程师, 从事高压试验工作。
- 李俊廷(1996—), 男, 助理工程师, 从事高压试验工作。