

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.06.007

一起 110 kV 电容式电压互感器电磁单元损坏故障分析

李丰, 周冬冬, 倪钱杭, 盛江, 朱涛, 杨嘉炜, 杨智
(国网绍兴供电公司, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 本文介绍了一起 110 kV 电容式电压互感器(CVT)电磁单元放电事故,通过对事故 CVT 外观检查、油色谱试验、电气试验及电磁单元内部解体等分析,判断本次事故是由于电容单元与电磁单元法兰连接处存在异物而密封不严造成的,电磁单元内进入的水分导致绝缘受潮,从而强度降低而发生放电现象。故障反应出设备生产阶段整机试验和异物检测手段的不足,对 CVT 以后的安全运行提出了具体的建议和防范措施。

关键词: CVT; 电磁单元; 放电事故

Analysis on Fault of Electromagnetic Unit of 110 kV Capacitive Voltage Transformer

LI Feng, ZHOU Dongdong, NI Qianhang, SHENG Jiang, ZHU Tao,
YANG Jiawei, YANG Zhi

(State Grid Shaoxing Electric Power Company, Zhejiang Shaoxing 312000, China)

Abstract: A discharge accident of the electromagnetic unit of 110 kV capacitive voltage transformer (CVT) is introduced in this paper. It is judged throughout such analysis as appearance inspection, oil spectrum test, electrical test and internal disassembly of the electromagnetic unit of the faulty CVT that the accident is caused by the lax seal due to foreign objects at the flange connection between the capacitor unit and the electromagnetic unit. The moisture penetrating into the electromagnetic unit causes the insulation to become damp, thus reducing strength and resulting in discharge. The fault reflects the deficiencies in the overall testing and foreign object detection methods during the production stage of the equipment, and specific suggestions and preventive measures are proposed for safe operation of CVT in the future.

Keywords: CVT; electromagnetic unit; discharge

0 引言

电容式电压互感器(capacitive voltage transformer, CVT)是一种利用电磁感应原理制作的设备,其作用是将一次侧的高电压转化为可以方便测量的二次侧低电压,用以监测变电站设备的运行情况,具有测量、保护、绝缘等作用,是变电站内不可或缺的重要设备^[1-5]。

本文介绍一起 110 kV 变电站线路 CVT 电磁单元放电事故。叙述了该事件发生的具体情况,从 CVT 外观检查情况、电气试验结果、油色谱试验数据进行分析,确定故障位置在 CVT 下部的电磁单元,最后将该 CVT 进行解体,逐步找到故障发生的原因。并据此提出防范措施,以期减少 CVT 放电事故的发生。

1 事件概况

1.1 异常信息

2023 年 7 月 14 日,某 220 kV 变电站值班员在巡视过程中发现就地监控后台中某台 110 kV 线路 CVT 电压显示异常,电压显示仅为 2.3 kV,实际应为 64.6 kV 左右,但测控装置及后台均无 CVT 告警及相关低电压告警信息。在现场 CVT 端子箱内测量发现各二次绕组电压均为 2 V 左右。

1.2 设备信息

该线路 CVT 生产时间为 2019 年 1 月,投运时间为 2019 年 5 月 11 日,铭牌基本信息见表 1,最后一次检修时间为 2022 年 12 月 22 日,检修数据见表 2。

收稿日期:2023-12-29

表1 CVT基本信息
Table 1 Basic information of CVT

项目	参数	项目	参数
型号	TYD110/ $\sqrt{3}$ -0.01H	总电容/pF	10 130
高压电容/pF	12 070	中压电容/pF	63 090
1a1n 额定二次电压/V	100/ $\sqrt{3}$	2a2n 额定二次电压/V	100/ $\sqrt{3}$
3a3n 额定二次电压/V	100/ $\sqrt{3}$	dadn 额定二次电压/V	100

表2 CVT 最后一次检修数据

Table 2 Data of the last maintenance of CVT

1. 绕组的绝缘电阻/mΩ				
主绝缘	1a1n	2a2n	3a3n	dadn
30 000	5 000	5 000	5 000	5 000
2. 介质损耗/%与电容量/pF				
$\tan\delta_1$: 0.062	$\tan\delta_2$: 0.102	C_1 : 12 236	C_2 : 63 016	
3. 变比				
1a1n	2a2n	3a3n	dadn	
1 065	1 057	1 062	627	
4. 直流电阻/mΩ				
1a1n	2a2n	3a3n	dadn	
27.7	51.1	59.9	439.8	

CVT 由电容单元与电磁单元两部分构成^[6-8],其中电容单元由高压电容与中压电容串联而成,中压电容分到大约 10 kV 的电压后与电磁单元内的中间变压器相连,其内部接线见图 1^[9-10]。阻尼装置 D 由阻尼电阻和速饱和电抗器串联组成,用于抑制投切过程、二次短路等暂态过程中出现的铁磁谐振^[11-15]。

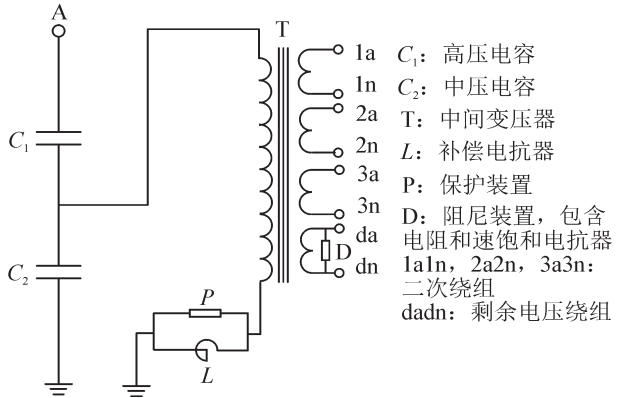


图1 CVT内部接线图
Fig. 1 Internal wiring diagram of CVT

2 事件详细分析

异常发生后运维人员对该 CVT 二次电压进行复核,情况无变化。同时对 CVT 二次接线仓进行检查和电压测量,经检查各接线端子均连接紧固,二次仓处的电压测量值与端子排处数值一致,初步判断为 CVT 内部故障,决定对该 CVT 进行停电检查。

2.1 外观检查

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,末屏接地良好。但发现油位过高,观察窗内已无油位线,注油时考虑到热胀冷缩现象的影响,即便此时天气温度较高,油位会适当上升但不会完全没过观察窗,说明电磁单元箱内有异物进入。且观察窗中可以清楚的看到悬浮在其中的黑色微小颗粒,见图 2。

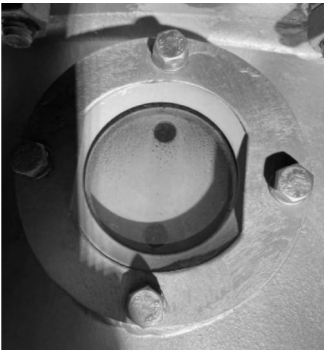


图2 油位观察窗
Fig. 2 Oil level sight glass

2.2 油色谱试验

对该 CVT 取油样进行油色谱试验,结果显示各项气体含量值均严重超标,远远超过了标准所给出的极限值。采用改良三比值法判断 CVT 故障类型,三比值 C_2H_2/C_2H_4 、 CH_4/H_2 、 C_2H_4/C_2H_6 的编码分别为 1、1、0,由判断标准^[16-17]初步判断 CVT 内部发生了低能放电,数据见表 3。

表3 油色谱试验数据
Table 3 Test data of oil color spectrum

参数	数值/(μ L/L)	参数	数值/(μ L/L)
氢气	9 409.98	乙烷	4 211.57
乙炔	1 566.57	乙烯	5 401.95
甲烷	763.37	一氧化碳	2 407.46
总烃	8 938.97	二氧化碳	17 633.43

2.3 电气试验

对该 CVT 进行绝缘电阻、介质损耗、变比及直流电阻等相关项目的电气试验^[18-20]。与最近一次检修数据相比,绝缘电阻测试时一次主绝缘正常,二次绕组绝缘明显异常,且 3a3n 与 dadn 的绝缘远低于 1a1n 和 2a2n,dadn 的绝缘为 0,其对地绝缘被完全击穿。在进行介质损耗试验时 CVT 内部有放电声及油流放电涌动异响,试验电压无法抬升,但电容量测试正常。变比试验结果明显异常,但 4 组变比间的倍率关系是正确的,直阻测试显示 dadn 电阻值与检修数值相差较大,具体试验结果见表 4。

表4 电气试验数据
Table 4 Electrical test data

1. 绕组的绝缘电阻/MΩ				
主绝缘	1a1n	2a2n	3a3n	dadn
30 000	350	332	40	0
2. 介质损耗/% 与电容量/pF				
一次对二次及外壳	第一次	tanδ ₁ : -0.044		C ₁ : 12 180
		tanδ ₂ : -0.602		C ₂ : 63 080
	第二次	高压电流波动无法升压		
	中间变对地	高压电流波动无法升压		
3. 变比				
1a1n	2a2n	3a3n	dadn	
258.5:1	256.1:1	258.4:1	149.4:1	
4. 直流电阻/mΩ				
1a1n	2a2n	3a3n	dadn	
25.92	49.97	56.08	487.2	

3 设备解体

为进一步分析 CVT 具体故障原因,对其进行解体检查。将电容单元与电磁单元法兰连接螺栓拧下后,发现在二者连接的密封圈处存在一根不应该存在的尼龙扎带,密封圈与扎带接触处有明显的压损痕迹,且电容单元底板处存在有明显的锈迹;电容单元与电磁单元连接线完好,具体见图 3。



图3 密封圈处存在尼龙扎带
Fig. 3 Nylon tape at the sealing ring

在电容单元与电磁单元连接线未拆除的情况下采用正接法对电容量进行测试^[21-22],测试结果显示高压电容量 C_1 为 12 170 pF, $\tan\delta$ 为 0.073%,中间电容量 C_2 为 63 590 pF, $\tan\delta$ 为 0.078%,与 1.2 节铭牌标注的电容量值相差 0.8%左右,误差在允许的范围内^[23-24],因此推测上部的电容单元功能正常,故障确定是出现在下部的电磁单元。

将电磁单元从箱内取出后发现电磁单元外部元器件如接线板、补偿电抗器外表面布满了黑色游离态物质,绝缘油已变色,箱体底部可见明显的大片水斑,见图 4。由此初步推测应该是电磁单元箱

密封不严,水分进入导致 CVT 故障,故障产生的黑色游离态物质在绝缘油中四处游走,附着在各元器件表面。

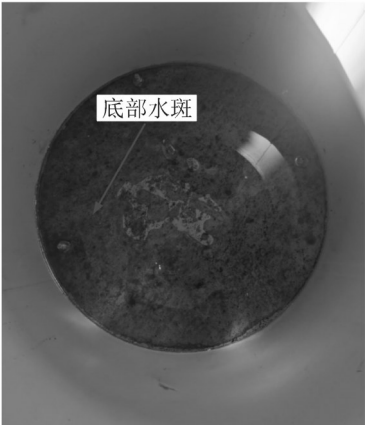


图4 黑色游离态物质及底部水斑
Fig. 4 Black free material and bottom water spots

将电磁单元拆解后发现阻尼电阻和补偿电抗器完好,铁心端面有发热氧化痕迹,中间变压器一次绕组及其附近的速饱和电抗器存在明显的放电击穿现象,放电能量将两者的外层绝缘以及两者间的绝缘纸板彻底击穿,同时伴随有黑色颗粒状物质产生,见图 5。



图5 一次绕组及速饱和电抗器击穿部位
Fig. 5 Breakdown position of primary winding and fast saturation reactor

将一次绕组绝缘纸层层剥开后,可以在一次线

圈处发现明显的击穿点。第一层线圈黑色击穿点较为明显,第二层线圈则明显黯淡了许多,第三层线圈处已无明显可见的击穿点,说明放电主要发生在一次线圈的外侧。将速饱和电抗器绝缘剥开后,发现速饱和线圈同样存在放电烧蚀痕迹,但放电痕迹并不是特别明显,见图6。拆解时发现绕组与饱和电抗器间的绝缘纸板已明显分层,绝缘纸板和高压绕组绝缘层中含有大量水分。

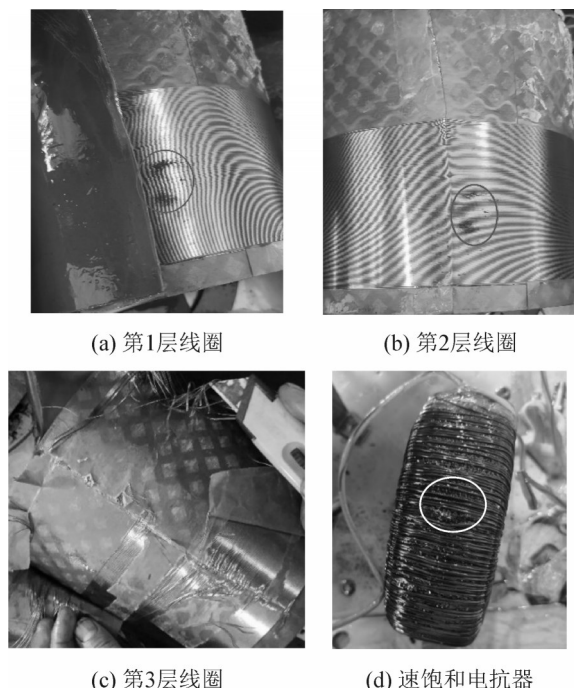


图6 一次绕组及速饱和电抗器击穿点
Fig. 6 Breakdown point of fast saturation reactor and primary winding

4 故障分析

综合上述试验及解体检查结果,判断该 CVT 电容单元并无故障,分析认为这是一起由于水分进入电磁单元导致绝缘受潮而发生的放电事故。CVT 生产过程中在电容单元与电磁单元密封圈处不慎混入了尼龙扎带,扎带的存在使得法兰连接处密封不严,并且扎带高高翘起,与箱壁间存在一定的角度,角度的存在使得水分从扎带与密封圈相接处进入电磁单元并顺着扎带流进元器件内部,而不是顺着箱壁进入油中后因为密度较大的原因沉入到箱底,水分进入路径见图7。

水分的存在使得一次绕组中的绝缘纸、漆包线受潮,因而绝缘强度大幅度下降,线圈层与层、匝与匝之间因绝缘强度不足而发生放电^[25-27],放电产生的能量将线圈与绝缘纸击穿,同时激磁电流增大,铁心饱和发热,二次失压。水分的存在也降低了一

次绕组与速饱和电抗器间绝缘板的绝缘强度^[28-29],速饱和电抗器电位较低,高电位的一次绕组向速饱和电抗器放电,速饱和电抗器绝缘被击穿。



图7 水分进入路径
Fig. 7 Moisture penetration path

综上所述,这是一起由于厂家质量把关不严,产品中混入不该存在的扎带,造成电磁单元密封不严、水分进入,导致绝缘受潮后绝缘强度降低而发生的一次线圈层间、匝间以及与低电位设备速饱和电抗器间的放电事故。

5 结语

针对此次 CVT 故障所暴露出的问题,提出以下几点建议和防范措施:

- 1)应加强整机组装后的试验或异物检测等技术手段;
- 2)运维人员对 CVT 要加强监视,特别是电磁单元油位和二次电压要密切关注,一旦发现油位过高或二次电压有明显异常应及时上报;
- 3)加强停电检修时对 CVT 的电气试验和油色谱试验检测。

参考文献

- [1] 可翀,张博闻,等. 35 kV 电容式电压互感器二次电压异常分析与处理[J]. 河南电力, 2022, S2: 61-64.
KE Chong, ZHANG Bowen, et al. Analysis and handling of abnormal secondary voltage of 35 kV capacitive voltage transformer[J]. Henan Electric Power, 2022, S2: 61-64.
- [2] 夏君宇,吴奇松,赵国庆,等. 补偿电抗器对电容式电压互感器误差的影响[J]. 变压器, 2022, 59(2): 44-46.
XIA Junyu, WU Qisong, ZHAO Guoqing, et al. Influence of compensation reactor on error of capacitive voltage transformer[J]. Transformer, 2022, 59(2): 44-46.
- [3] 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.
- [4] 韩海安, 向鑫, 王晖南, 等. 电容式电压互感器温度特性研究[J]. 高压电器, 2021, 57(5): 123-129.
HAN Haian, XIANG Xin, WANG Huinan, et al. Study on temperature characteristic of capacitor voltage transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(5): 123-129.
- [5] 张超, 丁心志, 王宾. 基于时域解析法的电容式电压互感器铁磁谐振分析与抑制[J]. 广东电力, 2022, 35(10): 56-64.
ZHANG Chao, DING Xinshi, WANG Bin. Analysis and suppression of ferroresonance of capacitive voltage transformer based on time domain analytical method[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(10): 56-64.
- [6] 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]. 电磁避雷器, 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.
- [7] 徐长海, 王静君. 一起 35 kV 电容式电压互感器二次电压异常升高故障分析[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(3): 10-11.
XU Changhai, WANG Jingjun. Analysis of an fault of 35 kV capacitor voltage transformer's secondary voltage abnormal raising[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2014, 33(3): 10-11.
- [8] 黄海飞, 许家响, 王静, 等. 电容式电压互感器电磁单元异常发热故障分析[J]. 电力安全技术, 2021, 23(11): 67-69.
HUANG Haifei, XU Jiaxiang, WANG Jing, et al. Analysis on an overheat fault of electromagnetic unit of capacitor voltage transformer[J]. Electric Safety Technology, 2021, 23(11): 67-69.
- [9] 代双寅, 李琼林, 唐旭, 等. 基于迭代加权改进 BP 神经网络的电容式电压互感器变比幅频特性拟合方法[J]. 电测与仪表, 2022, 59(11): 42-47.
DAI Shuangyin, LI Qionglin, TANG Xu, et al. A fitting method of the transformation ratio magnitude - frequency characteristic of capacitive voltage transformer based on iterative weighted improved BP neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(11): 42-47.
- [10] 李宾宾, 罗沙, 黄杰, 等. 典型因素耦合影响下电容式电压互感器频率特性分析与仿真研究[J]. 电工技术, 2023(7): 60-63.
LI Binbin, LUO Sha, HUANG Jie, et al. Analysis and simulation of frequency characteristics of capacitor voltage transformer under the influence of typical factor coupling[J]. Electric Engineering, 2023(7): 60-63.
- [11] 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.
- [12] 王维喆, 艾博, 田晓云. 二次电压检测法在电容式电压互感器故障诊断中的应用[J]. 电工技术, 2021(3): 98-101.
WANG Weizhe, AI Bo, TIAN Xiaoyun. Application of secondary voltage detection method in fault diagnosis of capacitive voltage transformer[J]. Electric Engineering, 2021(3): 98-101.
- [13] 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.
- [14] 栗磊, 赫嘉楠, 熊军辉, 等. 基于波形分区重构的变压器励磁涌流与故障电流识别方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(2): 16-23.
LI Lei, HE Jianan, XIONG Junhui, et al. An identification method of inrush current and fault current based on waveform partition and reconstruction[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(2): 16-23.
- [15] 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): 50-59.
- [16] 变压器油中溶解气体分析和判断导则: DL/T722—2014 [S]. 2014.
Guide to the analysis and the diagnosis of gases dissolved in transformer oil: DL/T722—2014 [S]. 2014.
- [17] 张健能, 李春阳, 梁丽雪. 一起 220 kV 电容式电压互感器二次电压异常波动分析[J]. 变压器, 2020, 57(5): 79-83.
ZHANG Jianneng, LI Chunyang, LIANG Lixue. Analysis of abnormal fluctuation of 220 kV CVT secondary voltage[J]. Transformer, 2020, 57(5): 79-83.
- [18] 李建明, 朱康. 高压电气设备试验方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 1984.
- [19] 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.

- [20]温晓阳,叶楠,徐文辉,等.两起电容式电压互感器故障的分析与处理[J].黑龙江电力,2021,43(1):81-84.
WEN Xiaoyang, YE Nan, XU Wenhui, et al. Analysis and treatment of two faults of capacitor voltage transformer[J]. Heilongjiang Electric Power, 2021, 43(1):81-84.
- [21]赵文炎,季盛强,纪海英,等. SF₆电流互感器介损因数与电压相互关系的研究[J].陕西电力,2015,43(6):47-50.
ZHAO Wenyan, JI Shengqiang, JI Haiying, et al. Study on relationship between dielectric loss factor of SF₆ current transformer and voltage[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(6):47-50.
- [22]麻守孝,苏进胜,张云凤,等.220 kV电容式电压互感器主电容介质损耗因数测试方法[J].四川电力技术,2013,36(1):77-80.
MA Shouxiao, SU Jinsheng, ZHANG Yunsheng, et al. Test method for dielectric loss factor of main capacitor of 220 kV capacitive voltage transformer[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2013, 36(1):77-80.
- [23]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.
- [24]林忠立,王腾滨.相对介损检测在一起220 kV电压互感器绝缘缺陷中应用[J].电工电气,2021(9):47-49.
LIN Zhongli, WANG Tengbin. Application of relative dielectric loss detection in 220 kV voltage transformer insulation defects[J]. Electrotechnics Electric (Jiangsu Electrical Apparatus), 2021(9):47-49.
- [25]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.
- [26]雷红梅,宋光文,廖腾飞.电压互感器零序电压回路典型故障的分析与研究[J].广西电力,2022,45(1):81-86.
LEI Hongmei, SONG Guangwen, LIAO Tengfei. Analysis and research on typical faults of zero sequence voltage circuit of voltage transformers[J]. Guangxi Electric Power, 2022, 45(1):81-86.
- [27]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.
- [28]刘宏亮,刘海峰,岳国良,等.电容式电压互感器的运行故障监测[J].电力电容器与无功补偿,2011,32(3):62-65.
LIU Hongliang, LIU Haifeng, YUE Guoliang, et al. Operation fault monitoring on capacitive voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(3):62-65.
- [29]杜志华,徐驰,秦至臻,等.基于智能融合终端的中压配电线路断线故障检测方案[J].电网与清洁能源,2022,38(12):79-85.
DU Zhihua, XU Chi, QIN Zhizhen, et al. A scheme for disconnection fault detection of medium-voltage distribution lines based on intelligent fusion terminals[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(12):79-85.

作者简介:

李丰(1976—),男,高级工程师,主要从事变压器故障与诊断、电气设备运行状态监测技术工作。

周冬冬(1994—),男,助理工程师,主要从事变压器故障与诊断工作。E-mail:18337151368@163.com。

倪钱杭(1968—),男,高级工程师,主要从事变压器故障与诊断、电气设备运行状态监测技术工作。

盛江(1977—),男,高级工程师,主要从事变压器故障与诊断、电气设备运行状态监测技术工作。

朱涛(1993—),男,工程师,主要从事变压器故障与诊断工作。

杨嘉炜(1994—),男,工程师,主要从事电气设备运行状态监测技术工作。

杨智(1992—),男,工程师,主要从事变压器故障与诊断工作。