

电容式电压互感器典型故障及缺陷分析

陈东明, 王建伟, 李旸, 商力新, 王燚增, 冉自强, 高全, 韩明礼

(国网冀北电力有限公司超高压分公司, 北京 102488)

摘要: 电容式电压互感器是变电站内重要的检测和保护设备。本文通过分析其运行时多类型故障, 为电容式电压互感器的设计、运行、维护等提供了相关建议。首先, 对 500 kV、 ± 500 kV 及 1 000 kV 变电站内电容式电压互感器运行中出现的 5 类典型故障及 1 类误诊断现象进行分析; 其次, 根据现场电压互感器故障实例, 结合其工作原理、运行条件、诊断数据、厂内解体情况等对电容式电压互感器漏油、电容单元异常、电磁单元异常等故障产生原因进行分析; 最后, 针对介损电桥自激法误判问题, 文中通过理论推算分析其产生原因, 并依托 Matlab/Simulink 仿真模型、现场测试等试验方式进行验证, 试验结果与理论推算相吻合。

关键词: 电容式电压互感器; 故障; 电容单元; 电磁单元; 电压异常; 自激法

Analysis of Typical Faults and Defects of Capacitive Voltage Transformer

CHEN Dongming, WANG Jianwei, LI Yang, SHANG Lixin

WANG Yizeng, RAN Ziqiang, GAO Quan, HAN Mingli

(Ultra High Voltage Branch of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 102488, China)

Abstract: Capacitive voltage transformer is an important detection and protection equipment in substation. In this paper, related suggestions of such aspects as design, operation and maintenance of the capacitive voltage transformer are provided through analysis of the multiple types of faults of the capacitive voltage transformer in operation. Firstly, 5 types of typical fault and 1 type of misdiagnosis phenomena of capacitive voltage transformers in 500 kV, ± 500 kV and 1 000 kV substations are analyzed. Then, the causes of such faults as oil leakage of the capacitive voltage transformer, abnormality of capacitor unit and electromagnetic unit are deeply analyzed in accordance with the real fault example of the voltage transformer at site and also in combination with its working principle, operating condition, diagnostic data and disassembly at the factory etc. Finally, as for the misjudgement of self excitation of dielectric electric bridge, the cause of its occurrence is analyzed by reasonable calculation, and verified by Matlab/Simulink simulation model and field test. The experimental results are consistent with the theoretical calculation.

Keywords: capacitive voltage transformer; fault; capacitor unit; electromagnetic unit; abnormal voltage; self-excitation

0 引言

电容式电压互感器(capacitive voltage transformer, CVT)由电容单元承受高电压, 具有绝缘强度高、可靠性强、体积小、质量轻等诸多优势, 在 35 kV 及以上电力系统中得到广泛应用^[1-7]。为应对复杂的电网工况, 电容式电压互感器内部集成了阻尼器、补偿电抗器、保护间隙、补偿电容等多种元器件, 减少电压互感器承受过电压损伤以及保证电压输出品质^[8-17]。

由于其内部元件种类的多样性, 随着运行年限的增加, 各元器件缺陷导致的故障逐步凸显出来, 并对电力系统的稳定运行造成一系列影响^[17-25]。文中结合近几年的典型故障进行分析、试验验证, 查找故障缺陷发生原因。

1 结构原理

与变压器类似, 电容式电压互感器等效原理^[26-28]见图 1, 图中: X_c 为等效容抗; X_l 为一次漏抗; R_l 为

一次直阻; Z_m 为励磁阻抗; R_2 为二次直阻; X_2 为二次漏抗; Z 为等效负荷; U_2 为二次电压。

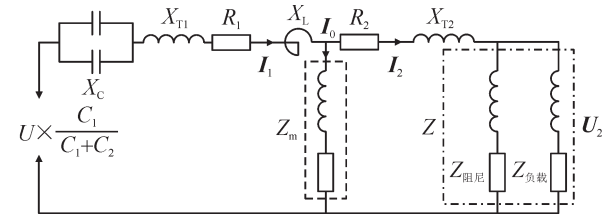


图1 电容式电压互感器运行等效原理图
Fig. 1 Equivalent schematic diagram of operation of capacitive voltage transformer

2 故障统计

2016年至今,某省公司所辖500 kV、±500 kV、1 000 kV变电站内电容式电压互感器异常共计53台次。根据设备故障现象进行分类,电容量异常占比29.7%、漏油占比27%、电磁单元故障占比16.2%、介损异常占比24.3%、其他故障占比2.8%。

3 故障分析

3.1 漏油故障

3.1.1 电气放电导致漏油

某站外电源间隔C相电容式电压互感器,设备型号TYD₃₅/√3-0.002HF,出厂日期2014年6月,2021年7月巡视发现该设备下部存在大量油迹,观察为顶部漏油并向下喷洒,见图2。



图2 电压互感器顶部漏油
Fig. 2 Oil leakage on top of voltage transformer

缺陷相诊断数据见表1。根据DL/T 596—2021电力设备预防性试验规程要求,电容量变化率不应大于±2%,介损不应大于0.2%(20℃)。上、下节分压电容量变化率虽符合标准要求,但增长明显,且介损数值严重超标。

表1 缺陷相诊断数据 Table 1 Diagnostic data of faulty phase				
试验	C_1		C_2	
项目	电容量/pF (20℃)	介损/%	电容量/pF (20℃)	介损/%
实测值	40 400	1.815	41 310	1.807
交接值	40 140	0.055	40 930	0.053
变化率	0.648%	3 300%	0.633%	3 409%

解体缺陷相,发现顶部接线排存在明显烧蚀缺

口,且未找到相应缺失铜片,电容单元油中有大量炭黑杂质,膨胀器顶部存在0.5 cm击穿点,见图3,正常相顶部接线排连接情况见图4。

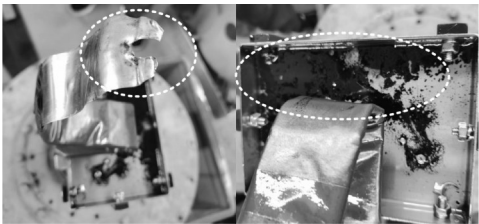


图3 缺陷相接线排烧蚀
Fig. 3 Ablation of wiring terminal of faulty phase

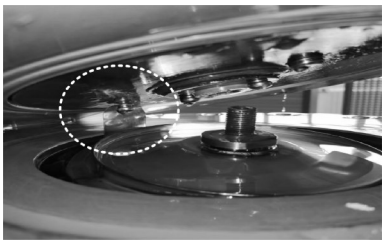


图4 正常相接线排连接情况
Fig. 4 Connection of wiring terminal of normal phase

拆解电容单元、电磁单元,外观及试验均无异常。电容单元电容量合格且极板表面光滑平整,但介损明显异常,判断为绝缘油污染导致。

电容分压单元软铜排通过螺丝紧固在互感器顶部盖板上,但接触面积小且安装空间小,铜排较短安装时存在扭折风险,运行时随着膨胀器不断伸缩也会导致上部连接点松动,进而出现接触不良,逐步在连接点处拉弧,使部分铜排碳化,进而污染电容单元内部绝缘油,导致介损试验明显异常,拉弧产生的气体,使内部压力增大通过膨胀器击穿孔进入膨胀器内部进而通过排气口喷出。

3.1.2 物理损伤导致漏油

2023年2月某站500 kV线路电容式电压互感器A相下节分压器下法兰处漏油严重,见图5。设备型号为TYD₅₀₀/√3-0.005H,出厂日期为2011年5月,运行时长为11年。

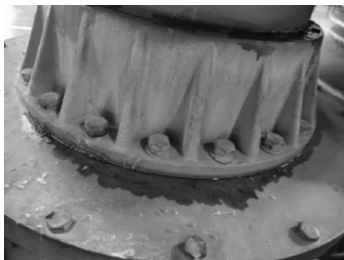


图5 分压器下法兰处漏油严重
Fig. 5 Severe oil leakage at the lower flange of the voltage divider

缺陷相诊断数据见表2,试验数据未见异常。

表2 缺陷相诊断数据

Table 2 Diagnostic data of faulty phase

电容单元	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_2
实测电容/nF	14.38	14.35	19.17	95.79
电容初值/nF	14.30	14.36	19.06	95.42
实测介损/%	0.064	0.077	0.081	0.092
介损初值/%	0.053	0.053	0.053	0.053

电容心子浸泡在绝缘油中、油位正常,拆解均未见异常点。瓷套法兰与瓷套之间距离在 0.15~0.2 mm,符合 0.1~0.3 mm 设计要求。底盖密封垫圈尺寸实测为 7.4~7.5 mm,原尺寸为 8 mm,使用后压缩在设计允许的合理范围内。

对该节分压器瓷套的上、下断面和内壁进行检查,瓷套上端口内壁未见损伤点,瓷套下端口内壁有横向裂纹,见图 6。

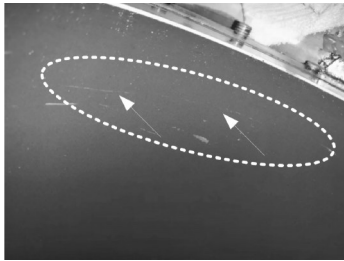


图6 瓷套下端口内壁有横向裂纹

Fig. 6 Transverse cracks on the inner wall of the lower port of the porcelain

电压互感器两端的密封面处的瓷套受力最为集中,尤其是下节分压器瓷套的下端面。由于下部连接电磁装置,体积大、重量重,在运输、装卸过程中,容易受到机械冲击,若震荡冲击造成细微裂痕,在长时间运行中受热胀冷缩的作用,导致瓷套法兰位置应力不均,多年累积造成瓷套法兰的贯通伤。分压器与电磁单元的结构剖面图见图 7。

瓷套下部内侧开裂,在内部压力下形成内部与外部油隙通道,导致漏油故障。由于绝缘油具有相当强的渗透性,一部分绝缘油在重力作用下从底板和法兰胶装用的水泥胶合剂间的缝隙处流出,另一部分在毛细管作用下,渗入到瓷套和法兰胶装用的硅酸盐水泥合剂中,胶合剂中油达到一定饱和程度后,慢慢融化黑色缓冲层,最终从下法兰的上端缓缓向法兰渗出。渗漏油路径见图 8。

表4 2213A 相电压互感器诊断数据

Table 4 Diagnostic data of 2213 voltage transformer of phase A

项目	分压器			变比			
	C_{11}	C_{12}	C_2	1a1n	2a2n	3a3n	dadn
实测值	10 310	15 260	66 460	911.2	911.2	911.1	525.7
交接值	10 240	12 160	65 870	1 100	1 100	1 100	635
变化率/%	0.68	25.49	0.90	-17.16	-17.16	-17.17	-17.21
实测介损/%	0.068	0.084	0.082	—	—	—	—

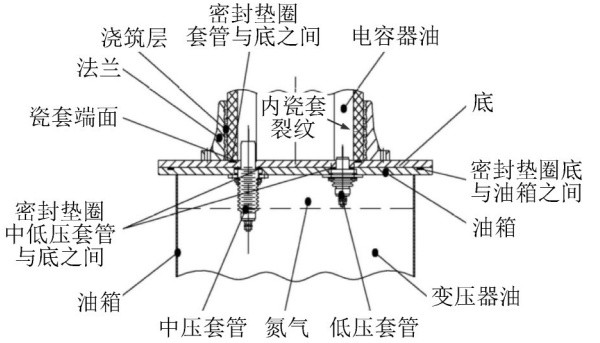


图7 分压器与电磁单元结构剖面图

Fig. 7 Structural sectional view of voltage divider and electromagnetic unit

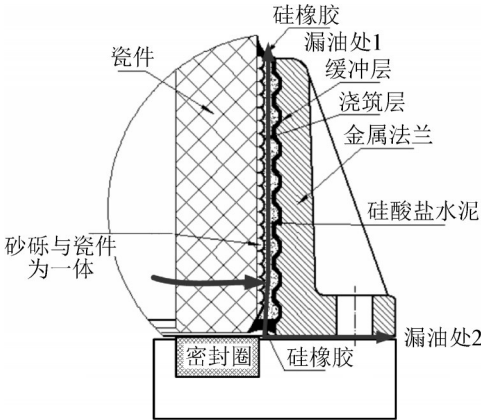


图8 渗漏油路径

Fig. 8 Oil leakage path

3.2 电容单元故障

2022 年 1 月某站主控显示 220 kV 2213 间隔三相电压不平衡,A 相电压明显偏高,监控数值见表 3,上述间隔电压互感器红外检测均未见异常,且线路对端电压与母线一致。设备型号为 TYD₂220/√3 -0.005GH,出厂日期 2014 年 7 月。

表3 监控电压数值

Table 3 Monitoring of voltage values

调度号	U_a /kV	U_b /kV	U_c /kV
4 甲母线	132.17	132.50	132.37
5 甲母线	132.23	132.48	132.32
2213 间隔	141.87	132.14	132.10

拆除 C_{11} ,采用正接法测量介损电容量,变比试验中无 C_{11} 分压,数据见表 4。

故障电压互感器的一、二次直流电阻,绝缘电阻试验数据均合格。表4中 C_{12} 电容量明显增大,中间变压器各绕组变比等比减小。二次输出电压公式为

$$U_2=U_1C_1/(C_1+C_2)/k_{中} \tag{1}$$

式中: $k_{中}$ 为中间变压器变比; U_1 为系统一次电压。

假定故障仅由 C_{12} 故障引起,其他元器件均正常,则当 $\Delta C_{12}=25.49\%$,为与实测条件保持一致,不考虑 C_{11} 分压时,则由式(1)得 U_2 的增量为 -17.148% ,该计算结果与表4中实测的变比数值近似一致,且中间变压器一、二次绕组直流电阻、绝缘电阻数值均无异常,因此可排除中间变压器对变比的影响。

线路电压与母线电压一致,则2213 A相实际电压 $U_{2213A\text{实际}} \in (131, 133)\text{ kV}$,由表3知 $U_{2213A}=141.87\text{ kV}$,则 $\Delta U_{2213A}=U_{2213A}/U_{2213A\text{实际}} \in (1.067, 1.083)$ 。结合现场诊断数据,并考虑消除不同试验仪器的固有偏差影响,根据两次正常数值间关系,选取仪器校正系数为1.007,令 $k_{\text{计算}}=U_1/U_2$,由式1可得 $k_{\text{计算}2213A} \approx 1.082$,理论推算结果在实际变化范围内,表明此次异常是由电容单元引起,推断为电容极板存在击穿点。

3.3 电磁单元故障

3.3.1 一次绕组绝缘故障

2023年6月某站500 kV线路电容式电压互感器B相后台电压显示异常,仅为14.65 kV,A、C相电压数据正常。测量电压互感器二次低电压:A、C相的1a1n、2a2n、3a3n为61V,dadn为105 V;B相的1a1n、2a2n、3a3n、dadn均为2.7 V。该设备型号为TYD500/ $\sqrt{3}-0.005\text{H}$,出厂日期为2019年7月,运行时长为3年。

诊断试验发现: C_{11} 、 C_{12} 在10 kV下介损、电容量均未见异常,电容末端N,电磁单元内二次绕组直流电阻、绝缘电阻数据均合格。 C_{13} 、 C_2 电容采用自激法施加2 kV,或是采用正接法整体施加10 kV时,均不能进行正常加压,降低介损电桥自激法输出电压、电流,将试验电压限制于500V以下,得到相应试验数据,如表5所示。

表5 B相诊断数据
Table 5 Diagnostic data of phase B

项目	C_{13}		C_2	
	电容量/pF	介损/%	电容量/pF	介损/%
实测值	16 630	0.017	146 000	0.056
交接值	16 660	0.055	146 800	0.078
变化率/%	-0.18	—	-0.54	—
绝缘电阻:一次末端X仅为1.2 kΩ(施加电压1 kV)				
变比	1.2% U_N 时,比差:-84.2%,角差:458 5'			
	3.2% U_N 时,比差:-85.7%,角差:480 9'			

依据诊断数据初步判断中间变压器一次绕组存在绝缘薄弱点,当电压超过某一较低电压时,该处绝缘击穿,导致二次输出电压异常。

遂将电容单元与电磁单元分离,对电容单元进行额定电压下介损与电容量试验。测得 C_{11} 、 C_{12} 、 $C_{下总}$ 的电容量变化率分别为 -0.20% 、 -0.18% 、 -0.18% ,介损分别为0.048%、0.052%、0.046%,数据均合格。电磁单元内绝缘油颜色略微偏黄,进行色谱与微水分析,乙炔、微水严重超标,表明内部存在高能放电点,绝缘油试验数据见表6。

表6 绝缘油试验数据
Table 6 Test data of insulating oil

色谱与微水试验/($\mu\text{L/L}$)						
CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	H ₂	总烃	微水
2 232	146	1 766	2 068	5 402	6 213	21.9

从dadn绕组施加100 V电压,进行空载试验,线圈部位有气泡冒出。对电磁单元进行解体,将中间变压器取出后发现:1)中间变压器铁心与绝缘衬垫间、变压器高压线圈端部绝缘存在明显碳化痕迹;2)拆解线圈仅高压首段几圈放电碳化迹象,其余线圈均未发现有层匝间击穿痕迹;3)油箱底部有铁锈痕迹;4)铁心与油箱底部的纸绝缘垫板成松软状态,疑似被水浸泡。电磁单元内故障见图9。

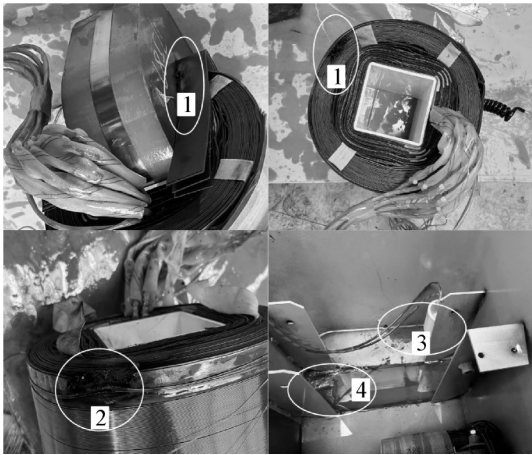


图9 电磁单元内故障
Fig. 9 Internal fault of electromagnetic unit

根据试验及解体情况,判断产品运行时受潮导致水份在电磁单元下部堆积,底部绝缘衬垫长期浸泡呈现松软状态,铁心与高压绕组间的绝缘衬垫也因吸附水分,绝缘性能下降,当绝缘无法承受运行电压时,高压绕组端部对铁心放电,绝缘油被分解,色谱数据异常,绕组首端与尾端同时接地,中间变压器失去电压变换作用,现场测量的二次绕组的电压为感应电位。

故障后运行原理如图 10, R 为铁心与高压绕组间绝缘衬垫间的等效绝缘电阻, 衬垫受潮后, 电阻 R 在高电压时被击穿, 趋近于零, 高压绕组首端经过铁心接地, 低电压下呈现低阻状态。

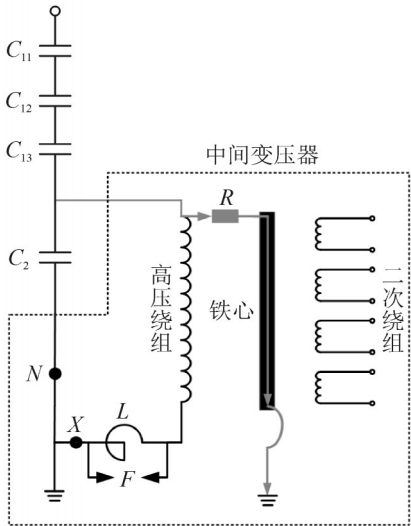


图 10 故障后工作原理
Fig. 10 Operating principle after the fault

3.3.2 速饱和阻尼装置故障

2021 年 5 月某站外电源 35 kV 电容式电压互感器电磁单元红外测量异常, 见图 11。图 11 中依次为 A、B、C 三相红外监测温度: 7.8℃、18.4℃、8.7℃。该设备型号为 TYD35/ $\sqrt{3}$ -0.02FH, 出厂日期为 2011 年 8 月, 运行时长为 10 年。



图 11 35 kV 电压互感器红外测温
Fig. 11 Infrared temperature measurement of 35 kV voltage transformer

运行时三相电压均无异常, 仅红外测温差异大。诊断试验结果: 电容单元介损、电容量、绝缘电阻, 中间变压器二次直流电阻、绕组绝缘电阻、变比, 试验数据均符合规程要求, 且与初值无明显变化。排除中间变压器绕组绝缘故障导致的发热问题。

以往运行经验: 2016 年某站 66 kV 1 号母线、66 kV 3 号母线电容式电压互感器均发生过类似故障, 怀疑速饱和阻尼装置内部存在失谐现象。

阻尼器由谐振电容、并联谐振电抗、阻尼电阻构成, 电磁单元开盖检查, 谐振电容外观未见异常, 见图 12。谐振电容量实测值为 103.5 μF , 额定电容为 200 μF , 变化率为 -48.25%。



图 12 阻尼器原理及谐振电容器
Fig. 12 Dampener principle and resonant capacitor

正常运行时, 工频下谐振电容与并联谐振电抗处于谐振状态, 容性电流与感性电流相互补偿, 阻尼器呈现高阻抗, 流过阻尼器的电流均为 500 mA。谐振过电压时, 其他频次谐波下阻尼器谐振状态被破坏, 呈现低阻抗, 谐波电流经阻尼电阻消耗。

在复杂的工况下(如过电压, 系统谐波、投切)长期运行时 C_x 内部可能发生极板击穿、损耗等问题, 导致其电容量下降, 而 C_x 的电容量下降后相应的其容抗发生变化, 并联谐振回路失谐, 阻尼电阻 R_z 接入回路耗能发热, 且电阻做功时等同于互感器二次负荷增加, 中压变压器的负载电流增加后会发热。因此 B 相电磁单元温度较其它两相温度明显升高。

3.4 自激法误判故障

某换流站联络变 500 kV 侧电容式电压互感器, 设备型号为 TYD525/ $\sqrt{3}$ -0.005H, 出厂日期为 2018 年 9 月, 1a1n、2a2n、3a3n 额定电压为 100/ $\sqrt{3}$ V, dadn 为 100 V, 二次绕组容量均为 10 VA。

自激法时, 三相介损值较初值均有所增加, C 相 C_2 介损异常, 介损数据见表 7。

表 7 自激法试验数据						
Table 7 Test data of self excitation method						
项目	C_{13}			C_2		
	A	B	C	A	B	C
介损/%	交接	0.077	0.104	0.109	0.103	0.110
	实测	0.088	0.113	0.152	0.133	0.201
电容/nF	交接	16.91	16.87	16.89	126.00	126.80
	实测	16.87	16.86	16.84	125.7	126.80

介损电桥自激法是通过中间变压器反向加压, 对电容 C_{13} 、 C_2 施加预设电压, 并监测标准电容电流 I_N , 计算试品端电压 $U_2=I_N/\omega C_N$, 达到预设电压后开始测量, 介损电桥通过 C_x 测量线、加压红线测量流过 C_{13} 、 C_2 电流, U_2 相位由 U_1 提供, 见图 13。

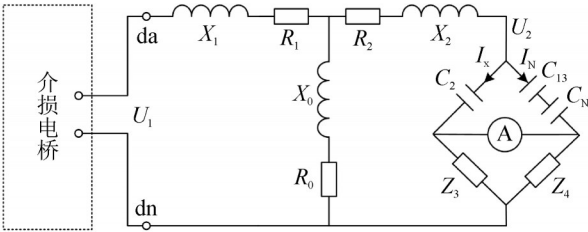


图 13 自激法测量原理
Fig. 13 Principle of self-excitation method measurement

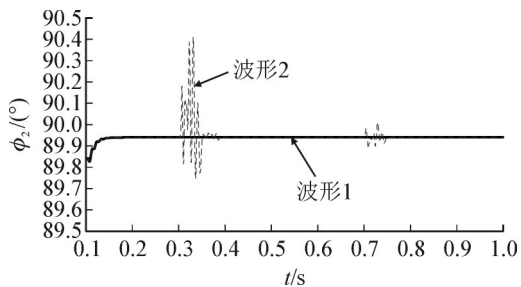


图16 电流电压相位差对比
Fig. 16 Comparison of current and voltage phase differences

由图16可知刚注入谐波时,即0.3s与0.7s起始的0.1s内相位差有区别,该处区别为锁相环未完全锁相导致,待相位完全锁定后波形1、2又完全重合,实际测量中介损电桥测量时间约为40s,上述时间扰动可以忽略。因此可以判断电压电流少量畸变引入谐波不会造成相位、介损角测量异常现象。

4 结语

本文通过对发现的电容式电压互感器故障进行缺陷分析,在对其设计工艺、运输安装、运行维护等方面提出相关建议,减少该类设备故障率,提升电网系统运行稳定性。

1)电容式电压互感器顶端内部软铜排应增加长度和厚度,适应膨胀器的变化,降低引线过短导致的虚接、脱落故障;

2)加强设备出厂、运输、安装的全过程监督,重视运输、安装、运行等条件,减少瓷套承受侧向力,防止瓷套出现裂纹;

3)提升电容极板的制作、缠绕工艺质量;

4)加强电磁单元气密性检查,必要时抬高注油孔高度及密封性,防止极端工况下雨水、潮气渗入;

5)自激时应根据互感器的容量、试验时电流等因素选择合适的加压绕组、测量电压,防止试验方法不当导致的误判故障。

参考文献

- [1] 张竹. 电容式电压互感器计量误差状态评估和预测方法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2018.
 - [2] 凌子恕. 高压互感器技术手册[M]. 北京:中国电力出版社,2005.
 - [3] 杜林,陈斌,陈贤顺,等. 内绝缘参量对电容式电压互感器计量精度的影响分析[J]. 电网技术,2016,40(12):3958-3965.
- DU Lin, CHEN Bin, CHEN Xianshun, et al. Measurement errors of capacitor voltage transformer with different internal insulation parameters[J]. Power System Technology, 2016,40(12):3958-3965.

- [4] 王德忠,王季梅. 电容式电压互感器速饱和电抗型阻尼器的研究[J]. 电工技术学报,2000,15(1):41-46.
- WANG Dezhong, WANG Jimei. A study of the protective device with inductor in series resistance for capacitor voltage transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000,15(1):41-46.
- [5] 周泽存. 高电压技术[M]. 第4版. 北京:水利电力出版社,1988.
 - [6] 李谦,江宇栋,刘尧,等. 配电网低频涌流对电磁式电压互感器影响和抑制方法的分析[J]. 高压电器,2022,58(2):142-148.
- LI Qian, JIANG Yudong, LIU Yao, et al. Analysis of influence of low frequency inrush current of distribution network on electromagnetic potential transformer and its suppression method[J]. High Voltage Apparatus, 2022,58(2):142-148.
- [7] 杨世海,周赣,周峰,等. 多绕组电压互感器二次负荷配置原则及其工程应用[J]. 高电压技术,2015,41(1):202-208.
- YANG Shihai, ZHOU Gan, ZHOU Feng, et al. Configuration principle of secondary load of multi-winding potential transformer and its engineering application[J]. High Voltage Engineering, 2015,41(1):202-208.
- [8] 赵修民. 电压互感器[M]. 太原:山西科学教育出版社,1987.
 - [9] 李广茂. 广州电网2005~2015年CVT运行分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2017,38(3):110-115.
- LI Guangmao. Operation analysis of CVT in Guangzhou grid from 2005 to 2015[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017,38(3):110-115.
- [10] 黄然,周仿荣,张恭源,等. 电容式电压互感器传变特性研究[J]. 高压电器,2015,51(8):158-163.
- HUANG Ran, ZHOU Fangrong, ZHANG Gongyuan, et al. Research of CVT transient response[J]. High Voltage Apparatus, 2015,51(8):158-163.
- [11] 陈坤汉,张伟平,黎润洪. 110 kV 电容式电压互感器油箱发热缺陷分析[J]. 高压电器,2015,51(2):152-156.
- CHEN Kunhan, ZHANG Weiping, LI Runhong. Analysis of oil tank heating defect of 110 kV capacitor voltage transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2015,51(2):152-156.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 陈敏维, 李棣, 季征南, 等. 一起电容式电压互感器绝缘在线监测案例分析[J]. 高压电器, 2012, 48(5): 99-104.
CHEN Minwei, LI Di, JI Zhengnan, et al. Analysis of an on-line monitoring insulation case of capacitor voltage transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(5): 99-104.
- [15] 崔志铭. 电容式电压互感器速饱和阻尼器优化计算模型研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [16] 马朝华. 电容式电压互感器暂态特性研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2007.
- [17] 陈斌. 电容式电压互感器的误差特性分析及评估[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [18] 陈新刚. 电磁式互感器励磁特性分析[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [19] 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.
- [20] 赵富强, 包旺宁, 贺政, 等. 330 kV 电容式电压互感器喷油故障分析[J]. 机械研究与应用, 2021, 34(4): 131-134.
ZHAO Fuqiang, BAO Wangning, HE Zheng, et al. Oil injection failure analysis of the 330 kV capacitive voltage transformer[J]. Mechanical Research & Application, 2021, 34(4): 131-134.
- [21] 徐鹏, 殷鉴, 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.
- [22] 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.
- [23] 顾用地, 李显鹏, 董新丰, 等. 一起500 kV 电容式电压互感器的故障处理及原因分析[J]. 电气工程学报, 2018, 13(12): 24-30.
GU Yongde, LI Xianpeng, DONG Xinfeng, et al. Treatment and analysis of 500 kV capacitor voltage transformer fault[J]. Journal of Electrical Engineering, 2018, 13(12): 24-30.
- [24] 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.
- [25] 王欢, 汪本进, 邓万婷, 等. 电容式电压互感器误差分析方法研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(11): 39-44.
WANG Huan, WANG Benjin, DENG Wanting, et al. Research on error analysis method of capacitor voltage transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(11): 39-44.
- [26] 郭成, 叶壮, 孟贤, 等. 电容式电压互感器电路参数对暂态误差影响研究[J]. 高压电器, 2021, 57(12): 131-139.
GUO Cheng, YE Zhuang, MENG Xian, et al. Study on influence of circuit parameters of capacitor voltage transformer on transient error[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(12): 131-139.
- [27] 熊小伏, 周家启, 周永忠. 电容式电压互感器暂态误差的数字校正方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 154-158.
XIONG Xiaofu, ZHOU Jiaqi, ZHOU Yongzhong. Digital correction method of transient error of capacitive voltage transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 154-158.
- [28] MOHNS E, CHUNYANG J, BADURA H, et al. A fundamental step-up method for standard voltage transformers based on an active capacitive high-voltage divider[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(6): 2121-2128.
- [29] 肖耀荣, 高祖绵. 互感器原理与设计基础[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2003.

作者简介:

陈东明(1990—), 男, 工程师, 主要从事超特高压设备维护检修, 故障诊断工作。E-mail: 310035856@qq.com。

王建伟(1975—), 男, 高级工程师, 主要从事超特高压设备检修、绝缘诊断、高电压技术等管理工作。

李旻(1986—), 男, 高级工程师, 主要从事超特高压设备维护检修, 故障诊断工作。

商力新(1984—), 男, 本科, 主要从事超特高压设备维护检修, 故障诊断工作。

王赟增(1993—), 男, 工程师, 主要从事超特高压设备维护检修, 故障诊断工作。

冉自强(1993—), 男, 工程师, 主要从事超特高压设备维护检修, 故障诊断工作。

高全(1983—), 男, 高级工程师, 主要从事超特高压设备维护检修, 故障诊断工作。

韩明礼(1994—), 男, 工程师, 主要从事超特高压设备维护检修, 故障诊断工作。