

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2025.05.011

一起 500 kV 倒置式电流互感器电容量及介质损耗异常分析

张远航¹, 刘赛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: 针对某 500 kV 倒置式电流互感器 A 相一次绕组对末屏电容量及介质损耗因数超标缺陷, 开展常规例行试验及诊断性试验, 并结合设备解体检查进行综合研判, 确定故障是由器身头部主绝缘存在电缆纸褶皱及直线段高压屏轻微形变褶皱的结构性缺陷导致。表明运输或安装过程中的机械应力导致电容屏结构畸变, 该类隐性结构缺陷在长期运行中逐步劣化形成隐患。基于分析结果提出强化生产工艺管控、严格交接验收、加强状态监测等防范措施, 为电流互感器质量管控和状态评估提供了参考。

关键词: 倒置式电流互感器; 电容量; 介质损耗; 解体检查; 高压屏

Abnormal Capacitance and Dielectric Loss Analysis of 500 kV Inverted Current Transformer

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

(1. Suzhou Power Supply Branch Company of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Jiangsu Suzhou 215004, China; 2. Nanjing Power Supply Branch Company of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China; 3. Kunshan Power Supply Branch Company of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Jiangsu Kunshan 215300, China)

Abstract: In response to the defects of excessive capacitance and dielectric loss factor of primary winding of phase A to the end screen of a 500 kV inverted current transformer, the routine and diagnostic tests are carried out and, in combination with disassembly and inspection of the equipment for comprehensive analysis, it is determined that the fault is caused by structural defects such as cable paper wrinkles and slight deformation wrinkles of the high-voltage screen in the straight section of the main insulation at the head of the current transformer body. It is indicated that mechanical stress during transportation or installation leads to structural distortion of the capacitive screen, and such hidden structural defects gradually deteriorate and form hidden dangers during long-term operation. Based on the analysis results, such preventive measures as strengthening production process control, strict handover acceptance, and enhancing status monitoring are proposed so to provide reference for quality control and status assessment of current transformer.

Keywords: inverted current transformer; capacitance; dielectric loss; disassembly inspection; high-voltage screen

0 引言

电流互感器用于电力系统中电能计量、测量和继电保护, 起到电流转换和电压隔离的作用, 其绝缘性能直接影响系统运行可靠性^[1-6]。倒置式电流

互感器因体积紧凑、动热稳定性高、成本较低、散热性能较好等特点, 广泛应用于 500 kV 变电站, 但该类互感器的设计水平、制造工艺要求较高^[7-16]。其主绝缘由多层电容屏构成, 若存在工艺缺陷或机械损伤易引发绝缘劣化。近年来, 油纸电容型设备因

收稿日期: 2025-05-15

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(62203247); 国网江苏省电力有限公司科技项目(J2024203)。

绝缘异常导致的故障频发,现有研究多聚焦于受潮、放电等典型缺陷,而对制造工艺偏差或隐性结构缺陷的演化缺陷缺乏系统性分析^[13-23]。

本文对一起500 kV变电站500 kV倒置式电流互感器A相一次绕组对末屏电容量及介损异常为例,开展常规试验和诊断性试验,并结合解体分析,确定故障原因,提出防范措施和建议,为倒置式电流互感器的状态评估与故障预防提供了借鉴。

1 设备现场试验情况

1.1 异常情况简介

2024年,在对某变电站500 kV倒置式电流互感器开展例行试验时,发现电流互感器A相一次绕组对末屏电容量和介损值偏大,测试方法采用正接法,试验电压为10 kV。依据《DL/T 393—2021 输变电设备状态检修试验规程》(以下简称《规程》)^[24],电流互感器的电容量|初值差|≤3%(警示值),介质损耗因数≤0.006(20℃,注意值)。同2010年出厂值对比,初值差为4.92%,超过警示值要求,同时介损值为0.797%,超过注意值要求,试验数据见表1。结果表明电流互感器A相一次绕组对末屏电容量及介损值数据异常。

表1 电流互感器A相一次绕组对末屏异常试验数据
(温度:14℃,湿度:42%)

Table 1 Abnormal test data of primary winding of phase A of current transformer to the end screen
(temperature:14℃, humidity:42%)

测试年份	测量电压/ kV	电容量/ pF	介损值/ %	电容量 初值差/%
2010	10	425.0	—	—
2024	10	445.9	0.797	4.92

表2给出了电流互感器A相纵向历史试验数据对比情况,可发现本次试验值与出厂值对比,电容量初值差很大,超过3%警示值,同时介损值亦超过0.6%(20℃,注意值)。另外,电容量自从交接试

验后,其值就略大于出厂值。根据《规程》要求,介损值和电容量初值差均不满足要求。

表2 电流互感器A相历史试验数据

Table 2 Historical test data of phase A of current transformer

测试年份	测量电压/ kV	电容量/ pF	介损值/ %	电容量 初值差/%
出厂2010	10	425.0	—	—
交接2010	10	433.1	0.200	1.91
预试2013	10	434.0	0.492	2.12
预试2019	10	435.5	0.176	2.47
本次2024	10	445.9	0.797	4.92

注:电容量初值差以出厂值作为初值。

1.2 电流互感器基本信息

倒置式电流互感器基本结构见图1,主要由一次导杆、二次绕组、铁心、金属膨胀器、储油柜、瓷套、器身等组成。设备头部大底部小,一次导杆从头部铁心环心穿过,二次绕组绕于头部铁心上并置于二次绕组屏蔽罩内,通过直线段下引到设备底部,主绝缘包扎在二次绕组外侧,内设有多层导电或半导电的电屏,每一对电容屏间电容值基本相同,把油纸绝缘分为多个绝缘层,实现电屏之间的电压均匀分布。

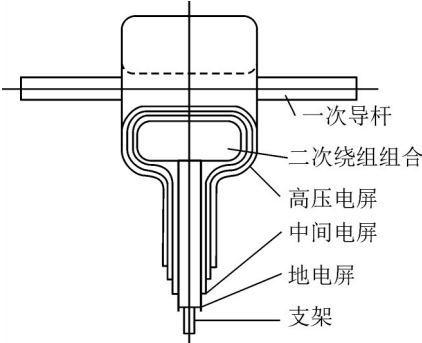


图1 倒置式电流互感器结构图
Fig. 1 Structural diagram of inverted current transformer

电流互感器生产日期为2010年7月,投运日期为2010年10月,铭牌信息见表3。

表3 电流互感器铭牌信息(A相)

Table 3 Nameplate information of current transformer (Phase A)

参数	数值	参数	数值
型号	****-550	出厂编号	000066
绝缘类型	油纸电容型	制造日期	2010.7
最高电压	550 kV	绝缘水平	1 175/1 550 kV
动稳定电流	160 kA 峰值	热稳定电流	63 kA 有效值/3 s
结构型式	倒置式	额定电流比	2×2 000/1
端子标志	1S1-1S2	1S1-1S2、2S1-2S2、3S1-3S2、4S1-4S2	6S1-6S2
电流比	2×2 000/1	2×2 000/1	7S1-7S2
额定输出/VA	15	10(cos ϕ = 1.0)	7S1-7S3
准确级	5P	TPY	2×1 000/1
			2×2 000/1
			7.5
			15
			0.2S
			0.2S

1.3 电流互感器运行工况

截止 2024 年例行检修前,查阅最近一次红外精确测温记录,异常电量互感器和相邻电流互感器的测温结果、红外图谱记录分别如图 2-3 和表 4-5 所示(R01:搭接头;R02:电流互感器头部;R03:搭接头;R04:瓷套上半部;R05:瓷套下半部)。

参照 DL/T 664—2016《带电设备红外诊断应用规范》电流、电压致热型设备缺陷诊断依据:热像特征以瓷套整体温升增大且瓷套上部温升偏高,温差

2~3 K^[25]。测试结果表明,设备未见明显异常,但与相邻电流互感器红外图谱以及异常电流互感器 B、C 相头部 R02 温度对比分析,可知 A 相整体温度相对略高,尤其是头部 R02,虽然在标准内,但是该温度值表明电流互感器 A 相可能存在隐患。另咨询制造商、专职确认该批次电流互感器无家族性缺陷。从投运以来,未见变电运维人员报告出现过不良工况。异常电流互感器后台运行记录见图 4,结合图 4 可知,未见明显数据异常情况。

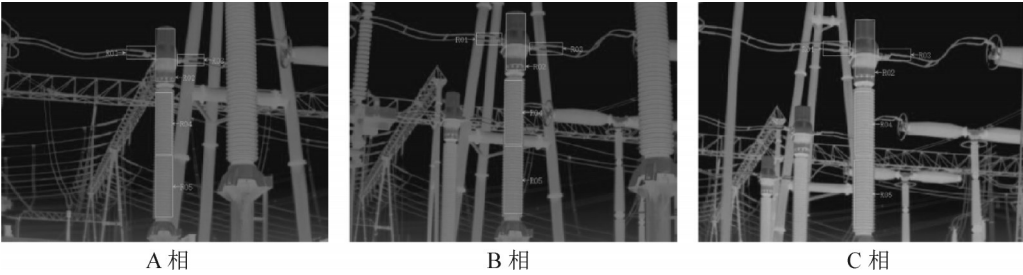


图 2 异常电流互感器红外测温图谱
Fig. 2 Infrared temperature measurement spectrum of abnormal current transformer

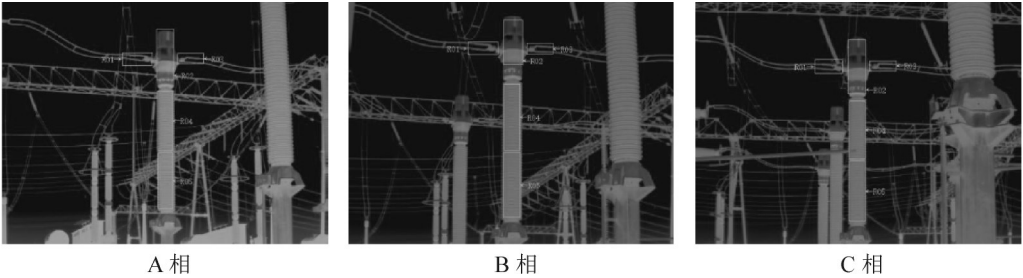


图 3 相邻电流互感器红外测温图谱
Fig. 3 Infrared temperature measurement spectrum of adjacent current transformer

表 4 异常电流互感器红外图谱记录
Table 4 Infrared spectrum record of abnormal current transformer

参数		数值		参数		数值	
设备名称		异常电流互感器		检测仪器		A600S	
拍摄日期		2023.11.14		拍摄时间		17:12:17	
环境温度/℃		7.0		环境湿度/%		54	
辐射率	0.9	距离/m	8.0	负荷电流/A		392.48	
位置		R01	R02	R03	R04	R05	
红外分析(max)A		13.2	16.3	15.1	15.6	15.6	
红外分析(max)B		13.9	15.5	14.8	15.5	15.4	
红外分析(max)C		14.0	15.0	14.2	15.1	15.3	

表 5 相邻电流互感器红外图谱记录
Table 5 Infrared spectra record of adjacent current transformer

参数		数值		参数		数值	
设备名称		相邻电流互感器		检测仪器		A600S	
拍摄日期		2023.11.14		拍摄时间		17:01:07	
环境温度/℃		7.0		环境湿度/%		54	
辐射率	0.9	距离/m	8.0	负荷电流/A		357.01	
位置		R01	R02	R03	R04	R05	
红外分析(max)A		14.6	14.9	14.6	14.9	15.4	
红外分析(max)B		14.6	14.8	14.6	14.9	14.9	
红外分析(max)C		14.6	14.9	14.6	14.9	14.9	

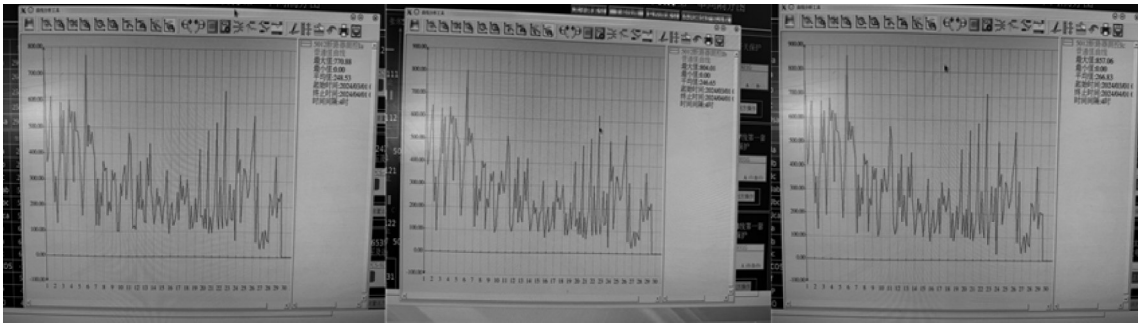


图4 异常电流互感器后台电流运行记录
Fig. 4 Current operation recording of abnormal current transformer

1.4 现场设备试验

根据《规程》要求,结合现场常规试验和诊断性试验,进一步分析设备异常原因。

1.4.1 绝缘油试验(色谱及微水试验)

结合周期性检修计划对该电流互感器进行全密封取油样,开展油色谱及微水试验,结果见表6。

表6 电流互感器绝缘油试验结果 Table 6 Insulation oil test results of current transformer			
μL/L			
组分	A	B	C
CH ₄	2.13	1.98	2.15
C ₂ H ₄	0.08	0.07	0.07
C ₂ H ₆	0.31	0.34	0.38
C ₂ H ₂	0.00	0.00	0.00
H ₂	21.80	4.43	14.03
CO	255.83	219.53	262.14
CO ₂	168.64	177.09	172.40
总烃	2.52	2.39	2.60
微水	8.00	9.00	10.00

根据《规程》中表191-互感器/分压器绝缘油试验项目及要求,对于500 kV电流互感器,C₂H₂≤1 μL/L(注意值),H₂≤150 μL/L(注意值),总烃≤100 μL/L(注意值),微水≤15mg/L(注意值)。横向对比三相数据,差异较小,且数据均满足要求,可知电流互感器绝缘油试验结果合格。

1.4.2 绝缘电阻测量

根据《规程》要求,电流互感器一次绕组对地≥3 000 MΩ(注意值),末屏对地≥1 000 MΩ(注意值),二次绕组间及对地≥100 MΩ(注意值)或同比及互比无明显偏低。电流互感器绝缘电阻见表7,由表7可知各项绝缘电阻均满足条件,且同比及互比无明显偏低,说明电流互感器一、二次绕组及末屏绝缘状况良好。

表7 电流互感器绝缘电阻(温度:14℃,湿度:42%)
Table 7 Insulation resistance of current transformer
(temperature: 14℃, humidity: 42%)

MΩ			
测量位置	A	B	C
一次绕组对地	26 600	27 500	26 000
	(25 000)	(27 000)	(26 500)
末屏对地	6 000	6 500	6 300
	(7 500)	(7 200)	(7 500)
二次绕组之间	5 000	5 100	4 800
	(5 500)	(5 200)	(5 000)
二次绕组对地	6 800	6 500	6 800
	(6 500)	(7 000)	(7 000)

注:括号内为2010年交接试验值。

1.4.3 介损及电容量测量(一次绕组对末屏,正接法)

采用正接法测量一次绕组对末屏的介损和电容量,测量结果和历年数据对比见表8,电容量初值差为与出厂值计算得出。本次电流互感器A相例行试验值与出厂值比对,电容量初值差很大,超过3%警示值,介损值亦超过0.6%(20℃,注意值)。A相的一次绕组对末屏电容量自从交接试验后,其值就始终大于出厂值,且有增大趋势。

1.4.4 介损及电容量测量

根据公司《变电设备修试质量提升工作意见》要求,针对存在色谱异常特征的500 kV油浸倒立式电流互感器,应进行诊断性试验,对不同结构的500 kV油浸倒立式电流互感器,按不同要求开展电容量、变电压介损测试。现场应开展一次绕组对末屏(正接法)、一次绕组对整体(反接法)的电容量及介损测试,试验电压取0.5 kV、1 kV、2 kV、…、10 kV共11个点,取介损相对变化值(最大介损值-最小介损值)评估绝缘情况,当介损变化量超过阈值(0.03%)时,判定试验结果异常。

考虑到电流互感器A相电容量和介损异常这一情况,现场对电流互感器A相开展了一次绕组对末屏的电容量及介损测试,结果见表9,可知介损相

表8 电流互感器介损及电容量(温度:14℃,湿度:42%)
Table 8 Dielectric loss and capacitance of current transformer (temperature: 14℃, humidity: 42%)

相别	测试年份	测量电压/kV	电容量/pF	介损值/%	电容量初值差/%
A	出厂 2010	10	425.0	—	—
	交接 2010	10	433.1	0.200	1.91
	预试 2013	10	434.0	0.492	2.12
	预试 2019	10	435.5	0.176	2.47
	本次 2024	10	445.9	0.797	4.92
B	出厂 2010	10	425.0	—	—
	交接 2010	10	427.5	0.220	0.59
	预试 2013	10	426.6	0.446	0.38
	预试 2019	10	422.8	0.235	-0.52
	本次 2024	10	422.4	0.209	-0.61
C	出厂 2010	10	422.0	—	—
	交接 2010	10	423.6	0.228	0.38
	预试 2013	10	422.3	0.480	0.07
	预试 2019	10	422.3	0.480	0.07
	本次 2024	10	419.5	0.306	-0.59

对变化值为 1.392%-0.612%=0.780%,远大于阈值(0.03%),并且介损数据分布的波动性极大,因此可判定试验结果异常,同时电容量依旧超出《规程》要求。

表9 电流互感器A相变电压介损及电容量
(温度:14℃,湿度:42%)
Table 9 Variable-voltage dielectric loss and capacitance of phase A of current transformer (temperature: 14℃, humidity: 42%)

序号	测量电压/kV	电容量/pF	介损值/%
1	0.5	463.3	1.392
2	1	462.7	0.612
3	2	461.7	1.008
4	3	462.6	1.218
5	4	457.9	0.897
6	5	457.5	1.203
7	6	445.9	0.967
8	7	445.1	0.817
9	8	444.2	0.834
10	9	443.7	0.775
11	10	443.8	0.792
12	9	444.3	0.795
13	8	444.1	0.865
14	7	444.7	0.863
15	6	445.6	0.844
16	5	446.6	0.852
17	4	461.2	1.174
18	3	461.7	1.097
19	2	461.3	1.153
20	1	459.0	0.951
21	0.5	465.9	1.143

综上所述,各项试验仅有电流互感器 A 相的电容量和介损异常,其余油色谱试验、微水试验及绝缘试验均正常,同时电流互感器运行工况、家族性缺陷等方面均无问题,且红外测温图谱亦满足规程要求(仅 A 相温度分布相较于 B、C 两相有所差别)。现场后续现场开展了电流互感器更换工作,为进一步确认故障及分析原因,对该台设备返厂解体。

2 诊断试验与解体分析

2.1 设备解体前试验

电流互感器返厂后开展了常规试验(如绝缘油试验、绝缘电阻、直流电阻、10 kV 电容量和介损因数测量等),除表 10 所示的 10 kV 一次绕组对末屏介损和电容量数据不合格外,其余未见异常。

表10 电流互感器A相返厂后10 kV介损和电容量
(温度:28℃,湿度:54%)
Table 10 10 kV dielectric loss and capacitance of phase A of current transformer after returning to the factory (temperature: 28℃, humidity: 54%)

施加电压/kV	10	
	介损值/%	电容量/pF
一次绕组对整体	0.224	1 220.3
一次绕组对末屏	0.789	444.5
施加电压/kV	2	
	介损值/%	电容量/pF
末屏对地	0.236	46 535

2.1.1 高电压介损及电容量测量

高电压介损和电容量能反映电流互感器的绝缘状况和内部电容屏状况,绝缘良好的电流互感器介损不随测量电压波动,可以反映出绝缘受潮、绝缘油劣

化脏污、屏间击穿等严重缺陷,但难以反映出绝缘内部潜在的绝缘薄弱部位及高电压局部放电等缺陷。表11给出了电流互感器A相的测量结果,可知一次绕组对末屏的高电压介损和电容量结果不合格。

表11 电流互感器A相高电压介损及电容量(温度:28℃,湿度:54%)
Table 11 High voltage dielectric loss and capacitance of phase A of current transformer (temperature: 28℃, humidity: 54%)

施加电压/kV		10	159	318
一次绕组对整体	介损值/%	0.224	0.219	0.225
	电容量/pF	1 220.3	1 219.3	1 220.4
一次绕组对末屏	介损值/%	0.789	0.795	0.803
	电容量/pF	444.5	445.4	445.6

2.1.2 局部放电试验

为进一步分析缺陷原因,对该电流互感器进行局部放电试验以进一步检查其绝缘性能。局部放电是判断电流互感器绝缘介质在高电场强度作用下,发生在电极之间的未贯穿放电。根据《规程》要求,1.2U_m/√3 (381 kV)下,要求局部放电量不超过20 pC。由表12可知,设备内部不存在低能量的局部放电。

表12 电流互感器A相局部放电量测量
(背景局放量:0.8 pC,温度:22℃,湿度:46%)
Table 12 Measurement of local discharge capacity of phase A of current transformer (background partial discharge: 0.8 pC, temperature: 22℃, humidity: 46%)

参数	数值	持续时间/min	局放量/pC
预加电压/kV	592	1	2.5
测量电压/kV	550	5	1.2
测量电压/kV	381	—	1.0

2.1.3 高压试验前后绝缘油检测分析

对绝缘油进行油耐压、含气量、微水及油介损试验以判断绝缘油的绝缘状态,试验结果见表13,4项测试结果均满足《规程》要求。表14给出了高压试验前后绝缘油中溶解气体分析结果,气体组分满足《规程》要求,表明绝缘油没有出现进水受潮和污染劣化现象。

表13 电气试验前后绝缘油试验数据
Table 13 Test data of insulation oil before and after electrical test

试验项目	高压试验前	高压试验后
油耐压/kV	68.5	69.4
含气量/%	3.59	3.63
微水/(mg/L)	8.0	8.6
介损值/%	0.496	0.497

表14 电气试验前后绝缘油中溶解气体
Table 14 Dissolved gases in insulating oil before and after electrical test

组分	μL/L	
	高压试验前	高压试验后
CH ₄	2.13	2.26
C ₂ H ₄	0.08	0.09
C ₂ H ₆	0.31	0.32
C ₂ H ₂	0.00	0.00
H ₂	21.80	22.21
CO	255.83	263.54
CO ₂	168.64	145.65
总烃	2.52	2.67

电容量和介损值通常是评估绝缘材料性能的重要指标,电容量变化可能意味着绝缘材料的结构发生了变化,比如分层、受潮或者有局部放电。介损值增大通常表示绝缘材料中存在能量损耗,可能是由于受潮、老化或者电容屏缺陷。但根据上述常规和诊断性试验数据,可知一次绕组对整体和末屏绝缘电阻正常,说明一次绕组对整体和末屏绝缘良好,没有整体受潮或击穿问题。一次绕组对整体的介损符合要求的原因应为电流互感器头部绝缘电容量大、直线段部分电容量小,头部介损值偏小,使得整体介损偏小。油色谱各项试验结果正常,说明没有明显过热或放电现象。微水合格,说明绝缘油中的水分含量不高,基本排除了整体受潮的可能。局部放电量合格亦表明绝缘介质未发生放电。以下仅对导致电流互感器电容量和介损异常的可能原因进行阐述:1)电容屏之间的绝缘材料老化或分层,导致电容量变化和介质损耗增加。如果电容屏之间的绝缘层有缺陷,比如局部受潮或污染,可能会影响整体电容和损耗角,但主绝缘和末屏可能还是好的;2)在制造过程中电容屏尺寸或排列有问题,导致电容分布异常。或者在运输或者运行中的

机械应力导致电容屏变形,改变了电容结构^[26-28]。

2.2 设备解体分析

检查设备外观,整体无异常,未见渗漏油,膨胀器指示正常。将设备放油,拆解的导电管、二次接线板、储油柜内表面均未见异常。检查器身,器身一次等电位线连接可靠,器身外形良好,拆除外包绝缘漏出高压屏未见异常,器身外形良好,如图5所示。



图5 电流互感器器身整体
Fig. 5 Overall body of current transformer

检查器身头部主绝缘时发现器身正面、侧面及三角区多处局部电缆纸褶皱,如图6所示,但根据试验结果分析褶皱不影响设备主绝缘性能。继续拆解头部主绝缘,拆除主绝缘露出铁心罩壳,铁心罩壳表面未见异常,如图7所示。



头部正面褶皱 头部侧面褶皱 头部三角区褶皱

图6 电流互感器头部褶皱
Fig. 6 Wrinkles on the head of current transformer



图7 铁心罩壳
Fig. 7 Core housing

拆除器身电容屏套管主绝缘,电容屏各端屏未见异常,器身高压屏存在轻微形变褶皱,如图8所示。拆除端屏后露出末屏,末屏顶部连接未见异常,末屏引线焊接可靠。



图8 高压屏轻微形变褶皱
Fig. 8 Slight deformation and wrinkling of the high-voltage screen

通过常规试验、诊断性试验及解体检查,判断电流互感器一次绕组对末屏电容量及介质损耗异常直接原因是电容屏间局部缺陷和结构性问题,器身头部主绝缘时发现器身正面、侧面及三角区局部电缆纸褶皱,以及器身直线段高压屏存在轻微形变褶皱。主绝缘电容屏结构的改变,直接影响了电容量和介损。考虑到电流互感器A相的交接试验值相较于出厂值已经出现较大正偏差,推断是在运输或安装过程的机械应力导致电容屏褶皱变形,改变了电容结构,影响了电容量和介质损耗角,随后设备隐患随着运行过程进一步发展,导致电容量和介损逐渐增大^[29-30]。

3 结语

为了防范类似电流互感器故障再次发生,提高设备运行可靠性,提出以下防范措施和建议:

1)督促厂家加强生产制造的工艺管控,确保生产环境合格、使用材料合格、制造工艺合格,必要时派遣人员驻厂监造。设备制造要严格按照生产工艺进行,比如对绕组绝缘包扎、干燥、浸渍和试验等,加强一次绕组绝缘包扎缠绕工艺环节的技术监督,尤其注意包扎工艺,确保缠绕紧实;

2)加强新安装后设备或检修后设备的验收工作。对关键部位要严格检查,及时发现设备异常工况。严格执行试验规程,开展预防性试验工作。若遇设备状态量变化趋向《规程》注意值或警示值发展时,需予以重视,应结合投产交接试验、历次例行试验、其他试验指标,横向纵向比较进行综合判断;

3)安装在线监测装置或带电检测装置,借助状态检修手段,如局部放电、关键部位红外测温等,现场巡视重点查勘设备油位、渗漏油和机械振动情况,及时掌握运行状态。

参考文献

- [1] 王毓琦,李红斌,向鑫,等. 电力互感器检定与评估方法综述[J]. 高压电器, 2020, 56(4): 95-101.
WANG Yuqi, LI Hongbin, XIANG Xin, et al. Review of verification and evaluation methods of power transformers[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 95-101.
- [2] 付佳佳,卢丽鹏,刘彩霞,等. 基于自适应正弦滤波的低电压电流互感器在线检测方法研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2024(10): 84-88.
FU Jiajia, LU Lipeng, LIU Caixia, et al. Research on online detection method of low voltage current transformer based on adaptive sine filtering[J]. Automation & Instrumentation, 2024(10): 84-88.
- [3] 孙帆,王维庆,金铭,等. 油浸型倒立式电流互感器内绝缘缺陷特征及检测方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(2): 120-126.
SUN Fan, WANG Weiqing, JIN Ming, et al. Inner insulation defect characteristic and detection method of oil immersed inverted current transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(2): 120-126.
- [4] 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.
- [5] 陶雄武,周俊宏,陈德权,等. 电流互感器饱和误差二次补偿方法研究[J]. 自动化仪表, 2025, 46(4): 12-16.
TAO Xiongwu, ZHOU Junhong, CHEN Dequan, et al. Research on secondary compensation method of current transformer saturation error[J]. Process Automation Instrumentation, 2025, 46(4): 12-16.
- [6] GAO S, ZHANG S, XU Z, et al. The development of active capacitive voltage divider based on current transformer with compensation circuit[J]. Journal of Physics. Conference Series, 2021(1): 1206-1212.
- [7] 王有元,李伯男,黄磊峰,等. 倒置式油浸电流互感器受潮过程微水含量动态推演方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(6): 1921-1930.
WANG Youyuan, LI Bainan, HUANG Leifeng, et al. Dynamic deduction method of moisture content of inverted oil immersed current transformer during damp process[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 1921-1930.
- [8] 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.
- [9] 刘彬,邓小聘,李建光,等. 柔性直流光纤电流互感器阶跃响应特性研究[J]. 高压电器, 2024, 60(5): 140-146.
LIU Bin, DENG Xiaopin, LI Jianguang, et al. Research on step response characteristics of flexible DC fiber-optic current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(5): 140-146.
- [10] 徐鹏,崔光鲁,甘强,等. 油浸倒立式电流互感器缺陷分析及对策[J]. 湖南电力, 2022, 42(2): 80-84.
XU Peng, CUI Guanglu, GAN Qiang, et al. Analysis and countermeasures of oil immersed inverted current defect[J]. Hunan Electric Power, 2022, 42(2): 80-84.
- [11] 王中,李振华,成俊杰,等. Rogowski线圈电流互感器故障的早期诊断研究[J]. 高压电器, 2023, 59(2): 162-168.
WANG Zhong, LI Zhenhua, CHENG Junjie, et al. Research on early diagnosis of fault of current transformer with Rogowski coil[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(2): 162-168.
- [12] 沙玉洲,李淑兰,刘爽,等. 大型发电机组中两级组合式大电流互感器的技术探讨[J]. 变压器, 2024, 61(2): 22-25.
SHA Yuzhou, LI Shulan, LIU Shuang, et al. Discussion on technology of two-stage combined large current transformer in large generator set[J]. Transformer, 2024, 61(2): 22-25.
- [13] 季昆玉,刘洋,李伯男,等. 倒置式油浸电流互感器内部温度场分布及内部压力影响特性研究[J]. 重庆大学学报, 2021, 44(8): 134-145.
JI Kunyu, LIU Yang, LI Bainan, et al. Internal temperature field distribution and influencing characteristics of internal pressure of inverted oil-immersed current transformer[J]. Journal of Chongqing University, 2021, 44(8): 134-145.
- [14] 刘博闻,邹国平,魏兴昌,等. 用于过电压检测的电流互感器高频等效电路建模方法[J]. 高压电器, 2023, 59(3): 156-162.
LIU Bowen, ZOU Guoping, WEI Xingchang, et al. Modeling method of high-frequency equivalent circuit of current transformer for overvoltage detection[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(3): 156-162.
- [15] 杨智,郑一鸣,何文林,等. 冲击电压下500 kV油浸倒置式电流互感器局部放电特性研究[J]. 广东电力, 2020, 33(3): 111-119.
YANG Zhi, ZHENG Yiming, HE Wenlin, et al. Research on partial discharge characteristics of 500 kV oil-immersed current transformer under impulse voltage[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(3): 111-119.
- [16] 范伟男,王勇,覃煜,等. 一起220 kV油浸倒置式CT异常发热缺陷诊断分析[J]. 高压电器, 2019, 55(3): 245-252.
FAN Weinan, WANG Yong, QIN Yu, et al. Diagnosis and analysis of abnormal thermal defect in a 220 kV oil-immersed inverted CT[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(3): 245-252.
- [17] 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.
- [18] 姚力, 许灵洁, 李舜, 等. 基于数字比较法的宽频标准电流互感器溯源技术研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(8): 97-103.
- YAO Li, XU Lingjie, LI Shun, et al. Research on traceability technology of broadband standard current transformer based on digital comparison method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(8): 97-103.
- [19] 李予全, 寇晓适, 张少锋, 等. 电流互感器密封失效引起的绝缘故障[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 147-153.
- LI Yuquan, KOU Xiaoshi, ZHANG Shaofeng, et al. Insulation fault caused by current transformer seal failure[J]. Electric Power, 2020, 53(11): 147-153.
- [20] 许飞宇, 燕伯峰, 刘宇鹏, 等. 空气缝隙对抗直流分量电流互感器影响研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(10): 203-208.
- XU Feiyu, YAN Bofeng, LIU Yupeng, et al. Research on influence of air gap on anti-DC component current transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(10): 203-208.
- [21] 李宝权, 陈志勇, 刘晓波, 等. 220 kV 油浸式电流互感器油色谱异常原因分析[J]. 东北电力技术, 2023, 44(10): 36-40.
- LI Baoquan, CHEN Zhiyong, LIU Xiaobo, et al. Analysis of abnormal oil chromatography of 220 kV oil-immersed current transformer[J]. Northeast Electric Power Technology, 2023, 44(10): 36-40.
- [22] 刘凯, 汲胜昌, 钟理鹏, 等. 500 kV SF₆ 电流互感器电容屏缺陷下的气体分解特性[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(2): 111-120.
- LIU Kai, JI Shengchang, ZHONG Lipeng, et al. Gas decomposition characteristics under capacitive screen defect in SF₆ current transformer[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(2): 111-120.
- [23] 付丽君, 陆昊, 关艳玲, 等. 一起 220 kV 电流互感器故障原因分析[J]. 黑龙江电力, 2022, 44(1): 75-78.
- FU Lijun, LU Hao, GUAN Yanling, et al. Fault analysis of 220 kV current transformer[J]. Heilongjiang Electric Power, 2022, 44(1): 75-78.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 杨智, 郑一鸣, 何文林, 等. 一起油浸倒置式电流互感器故障分析及其防范措施[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(3): 99-105.
- YANG Zhi, ZHENG Yiming, HE Wenlin, et al. Fault analysis and preventive measures of oil-immersed inverted current transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(3): 99-105.
- [27] 王琼, 车传强, 张建英, 等. 电流互感器批量缺陷的成因诊断分析和模拟试验研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(2): 48-53.
- WANG Qiong, CHE Chuanqiang, ZHANG Jianying, et al. Study on diagnosis analysis and simulation tests for batch defects of current transformers[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(2): 48-53.
- [28] 陈浩, 郭铁, 刘黎洋, 等. 主绝缘包扎工艺不良引发油浸式电流互感器内部异常产氢的原因分析[J]. 东北电力技术, 2022, 43(4): 48-52.
- CHEN Hao, GUO Tie, LIU Liyang, et al. Analysis of causes of abnormal Hydrogen production inside oil-immersed current transformer caused by poor main insulation bandage[J]. Northeast Electric Power Technology, 2022, 43(4): 48-52.
- [29] 贺春安, 唐福新, 叶飞, 等. 一种多二次绕组串级式测量用电流互感器设计及误差计算方法[J]. 变压器, 2023, 60(12): 6-11.
- HE Chun'an, TANG Fuxin, YE Fei, et al. Utility model relates to a multi-secondary winding cascade type current transformer for measurement design and error calculation method [J]. Transformer, 2023, 60(12): 6-11.
- [30] 詹江杨, 何文林, 杨智, 等. 油浸正立式电流互感器绝缘受潮缺陷的诊断分析[J]. 浙江电力, 2018, 37(3): 17-21.
- ZHAN Jiangyang, HE Wenlin, YANG Zhi, et al. Diagnosis on insulation damp defects of oil-immersed vertical current transformer[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(3): 17-21.

作者简介:

张远航(1983—), 男, 工程师, 从事电力设备运维检修工作。

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

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

陈靖(1973—), 男, 工程师, 从事电力设备运维检修工作。

陆皓珉(1992—), 男, 工程师, 从事电力设备运维检修工作。

周程(1995—), 女, 工程师, 研究方向为电力市场和综合能源系统, 从事电力营销工作。