

油浸式正立式电流互感器产气故障的诊断及仿真分析

王英杰^{1,2}, 陈波^{1,2}, 白洁^{1,2}, 赵顺^{1,2}, 刘学芳^{1,2}, 车传强^{1,2}

(1. 内蒙古电力集团有限责任公司内蒙古电力科学研究院分公司, 呼和浩特 010020; 2. 内蒙古自治区电力系统
智能化电网仿真企业重点实验室, 呼和浩特 010020)

摘要: 为研究油浸正立式电流互感器“产气—电容屏微放电”的联系, 结合某地区共 3 台同型号 220 kV 电流互感器发生波纹膨胀器顶盖故障, 对其中 2 台互感器开展了故障分析工作。对故障电流互感器开展绝缘电阻、介损值电容量测试及油气分析试验, 发现故障互感器油中 H₂、总烃及 C₂H₄ 均超过注意值, 绝缘油介损值超过注意值。随后对故障电流互感器开展解体检查, 发现其一次绕组外部的绝缘纸及各层电容屏存在大量褶皱, 工艺缺陷明显。基于 Comsol Multiphysics 6.3, 建立一次绕组外部及油纸绝缘、褶皱气隙有限元模型, 仿真分析其工艺缺陷状况下的放电过程, 结合解体和试验结果, 明确了故障原因。

关键词: 电流互感器; 解体; 油气分析; 有限元; 放电

Diagnosis and Simulation Analysis of Gas Generation Faults in Conventional Upright Oil-Immersed Current Transformers

WANG Yingjie^{1,2}, CHEN Bo^{1,2}, BAI Jie^{1,2}, ZHAO Shun^{1,2}, LIU Xuefang^{1,2}, Che Chuanqiang^{1,2}

(1. Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd., Inner Mongolia Power Research Institute Branch, Hohhot 010020, China; 2. Inner Mongolia Enterprise Key Laboratory of Smart Grid Simulation of Electrical Power System, Hohhot 010020, China)

Abstract: To investigate the correlation between gas generation and capacitive screen micro-discharge in oil-immersed upright current transformers, failure analysis was performed on two out of three 220 kV current transformers (same model) that experienced bellows expansion tank cover failures in a regional power grid. The faulty units underwent insulation resistance measurement, dielectric loss tangent ($\tan\delta$) and capacitance testing, and dissolved gas analysis (DGA). Results revealed that hydrogen (H₂), total hydrocarbon content, and ethylene (C₂H₄) concentrations in the insulating oil exceeded warning thresholds, accompanied by elevated dielectric loss values. Post-disassembly inspections identified significant wrinkling in the insulation paper surrounding the primary winding and across capacitive screen layers, indicating critical manufacturing defects. Using Comsol Multiphysics 6.3, finite element models were developed to simulate the primary winding's external insulation structure, oil-paper interfaces, and wrinkled air gaps. Partial discharge processes under these defect conditions were analyzed, confirming that insulation irregularities and capacitive screen deformation induced localized electric field concentrations. Combined with experimental and dissection findings, the root cause was attributed to progressive micro-discharges at wrinkled regions, exacerbated by degraded oil insulation properties, ultimately leading to gas accumulation and structural failure.

Key words: current transformer (CT); dissection; dissolved gas analysis (DGA); finite element; partial discharge (PD)

0 引言

油浸正立式电流互感器的油纸绝缘结构是其绝缘性能的关键。该结构主要由绝缘纸和绝缘油组成, 它们共同构成电流互感器的主绝缘和辅助绝缘^[1]。绝缘纸通常采用高压电缆纸或电容器纸等高质量纸材制成。这些纸材具有优良的电气性能和机械强度, 能够承受高电压和机械应力的作

用^[2-4]。在绕制过程中, 绝缘纸被紧密地包扎在一次绕组上, 形成多层绝缘结构。这些绝缘层之间通过电容屏进行分隔, 以进一步提高绝缘性能。电容屏(又称电容型绝缘屏)是由高压电缆纸、皱纹纸等绝缘材料与铝箔等金属导体结合形成的具备电容特性的绝缘结构。其个数主要由设备电压

基金项目: 2024 年电科院青年科技人员支持计划项目(蒙西地区充油变压器运行状态智能监测及预警技术研究)。
Project Supported by 2024 Young S & T Talent Support Program of Inner Mongolia Electric Power Research Institute(Research on Intelligent Condition Monitoring and Early-Warning Technology for Oil-Immersed Transformers in the Western Region of Inner Mongolia).

等级、绝缘要求及设计规格决定，通常电压等级越高所需个数越多，如 220 kV 电压等级一般需 10 个及以上主屏，部分设计还会在主屏间加端屏以优化绝缘性能与电场均匀性。电容屏可有效分散电场、降低电场强度以保护绕组，同时能屏蔽外界干扰、提升设备散热性能，将绕组热量传递至油箱及外部环境，进而提高设备稳定性与可靠性。

在油纸绝缘故障诊断领域，油色谱分析凭借对早期故障的高敏感性，已发展为核心技术手段，现阶段，《运行中矿物绝缘油故障判断导则(IEC 60599: 2022)》^[5]及《变压器油中溶解气体分析和判断导则》(DL/T 722—2014)^[6]是行业核心诊断规范。王琮等通过油浸式电流互感器局部放电缺陷的实例诊断，验证了油中特征气体组分与局部放电故障类型的直接关联性，进一步完善了放电类缺陷的油色谱诊断判据^[7]；连鸿松则针对电容型设备展开研究，明确了油中气体含量变化对绝缘性能的影响机制^[8]；高树功等学者发现，铁磁谐振等非绝缘劣化因素引发的异常电气工况，同样会导致互感器油色谱数据异常，这一研究拓展了油色谱诊断的场景覆盖范围，避免了故障误判^[9]；而于会民等对高压互感器用绝缘油的性能对比分析表明，绝缘油本身的理化特性差异会直接影响故障产气特征与诊断准确性^[10]。除油色谱分析外，在线监测技术也成为故障预警的重要补充，当前研究已实现局部放电监测、油中溶解气体在线分析(DGA)、介损监测等技术的融合应用，可

实时追踪互感器油纸绝缘状态变化，为潜在故障的早期预警提供支持。从故障类型与诱因来看，油纸绝缘故障主要包括局部放电、绝缘击穿、油泄漏等，其中局部放电作为绝缘劣化的早期典型征兆，是故障预警的核心监测对象。有研究者通过实验室加速老化试验，模拟互感器实际运行中的多应力作用环境(如温度、湿度、电场强度耦合)，系统观察油纸绝缘材料的介损、击穿强度等性能随老化时间的变化趋势，揭示了不同应力条件下的绝缘失效微观机理，为故障诊断判据的优化提供了试验支撑^[11-12]。

仿真分析与机理研究的深化，为油纸绝缘故障诊断技术的发展提供了重要理论支撑。王成智等针对油浸纸绝缘体系，开展电热联合作用下的绝缘特性研究^[13]；张金烽则聚焦复合电场环境，通过试验与仿真结合的方式，分析了复杂电场分布对油纸绝缘介电特性及击穿过程的影响，补充了特殊工况下产气过程的理论认知^[14]；罗毅等对介质阻挡放电影响因素的研究，明确了放电强度、频率与气体生成量的关联关系^[15]。现有研究中，部分成果聚焦于倒置式电流互感器或通用油纸绝缘体系^[16-17]，但其构建的多场耦合仿真框架对油浸式正立式电流互感器产气故障诊断体系的搭建与仿真模型的优化，仍具有重要的借鉴价值。

文中针对一批次油浸正立式电流互感器产气顶盖故障依托，通过电气试验、特性试验、油气分析、解体检查仿真分析等过程分析，基本确定了故障原因，为油浸式电流互感器类似故障的预

防和缺陷原因分析提供参考。

1 故障电流互感器基本情况

某地区共3台同型号220 kV 电流互感器发生波纹膨胀器顶盖故障，故障设备进行整体更换。故障电流互感器 A、B 均为某公司同批次及相近年份生产，2011 年 1 月至 2012 年 10 月期间交付投运。瓷套爬电距离 7 842 mm，45 号绝缘油，额定绝缘水平为 252 kV/460 kV/1 050 kV，共有 7 个二次绕组(含 1 个计量绕组，1 个测量绕组，5 个保护绕组)，一次绕组由两匝铝制半管对扣串联成，一次绕组外侧由绝缘纸和带孔铝箔纸交替绑扎形成内层纸绝缘，结构共有含零屏及末屏在内的 14 层主电容屏，每层电容屏间设 4 层端屏。

1.1 故障电流互感器 A 基本情况

巡视人员例行巡检过程中发现电流互感器 A 波纹膨胀器螺丝处破裂部分顶盖变形顶起，详见图 1。



图 1 220 kV 电流互感器 A 波纹膨胀器照片

Fig. 1 Photo of 220 kV current transformer A corrugated expander

依据 Q/ND 10501 06—2023《输变电设备状态检修试验规程》^[18]相关试验周期要求，电流互感器 A 最近一次周期反接线方式介损值电容量测

试(下称周期测试)，介损值 0.297%，电容量 1 008.0 pF。发现缺陷后现场开展反接线方式介损及电容量测试，介损值 0.553%(有明显增加)，电容量 1 020.0 pF，电容量初值差为 1.19%；发现缺陷后现场正接线方式介损及电容量测试，介损值 0.717%>0.7%(超出注意值)，电容值 762.1 pF。试验数据见表 1。

表 1 220 kV 电流互感器 A 电气试验数据
Table 1 Electrical test data of 220 kV current transformer A

项目		$\tan\delta/\%$	C_x/pF	电容量初值差/%
周期测试结果(反接线)		0.297	1 008.0	
故障后测试结果	正接线	0.717	762.1	—
	反接线	0.553	1 020.0	1.19(周期测试反接线方式下数据为初值)
规程注意值		≤ 0.700	—	初值差不超过 ± 5.00

发现缺陷后现场开展绝缘油色谱分析试验，实测 H_2 测试值 34 169.1 $\mu\text{L/L}$ ， C_2H_2 测试值 3.5 $\mu\text{L/L}$ ，总烃测试值 4 418.4 $\mu\text{L/L}$ ，根据文[18]要求，均超出注意值范围，三比值法计算编码为“110”。试验数据见表 2。

表 2 220 kV 电流互感器 A 绝缘油色谱分析数据
Table 2 Chromatographic analysis data of insulation oil for 220 kV current transformer A

特征气体	测试值/ $(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$	规程注意值/ $(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$
H_2	34 169.1	≤ 300
CO	121.5	
CO_2	316.8	
CH_4	4026.2	
C_2H_4	386.7	
C_2H_6	2.0	
C_2H_2	3.5	≤ 2
总烃	4 418.4	≤ 100

1.2 故障电流互感器 B 基本情况

处理电流互感器所在间隔隔离开关刀闸 C 相

发热缺陷时，发现电流互感器 B 波纹膨胀器螺丝处破裂，部分顶盖变形顶起，详见图 2。



图 2 220 kV 电流互感器 B 波纹膨胀器照片

Fig. 2 Photo of 220 kV current transformer B corrugated expander

现场开展绝缘电阻、介损及电容量测试，结果均符合文[18]要求，试验数据见表 3。

表 3 220 kV 电流互感器 B 电气试验数据
Table 3 Electrical test data of 220 kV current transformer B

参数		出厂试	例行试	规程注意值
绝缘电阻 /MΩ	一次绕组及	100 000	100 000	>1 000，且与
	二次绕组及	>2 500	>2 500	上次测量值
	末屏对地	100 000	100 000	相比无显著 变化
tanδ/%		0.260	0.477	≤0.700
C _x /pF		817.7	810.8	初值差不超
电容量初值差/%		-0.84		过±5.00

现场开展绝缘油色谱分析试验，实测 H₂ 测试值 35 307.04 μL/L，C₂H₂ 测试值 3.31 μL/L，总烃测试值 1 278.36 μL/L，根据文[18]要求，均超出注意值范围，三比值法计算编码为“110”。试验数据见表 4。

表 4 220 kV 电流互感器 B 绝缘油色谱分析数据
Table 4 Chromatographic analysis data of insulation oil for 220 kV current transformer B

特征气体	测试值/(μL·L ⁻¹)	规程注意值/(μL·L ⁻¹)
H ₂	35 307.04	≤300

CO	221.27	
CO ₂	273.18	
CH ₄	1 014.93	
C ₂ H ₄	1.56	
C ₂ H ₆	258.56	
C ₂ H ₂	3.31	≤2
总烃	1 278.36	≤100

2 解体检查分析

2.1 解体前试验

解体前，电流互感器 A 运输中瓷套上部自 3 至 6 片伞裙处断裂，绝缘油泄漏，不具备开展解体前电气试验及色谱分析条件，故解体现场直接进行拆解分析。

电流互感器 B 静置 24 h 后^[18]，对电流互感器开展绝缘电阻测试、介损值及电容量测试(10 kV 电压下)，结果见表 5。同时分别在电气试验前后，抽取互感器中油样，进行绝缘油耐压测试、绝缘油介损测试、油色谱分析及绝缘油微水试验。根据文[18]要求：电气试验前油中 H₂ 测试值 32 439.5 μL/L、C₂H₂ 测试值 3.3 μL/L、总烃测试值 3 007.6 μL/L，测试值均超过注意值，三比值法计算编码为“110”；电气试验后油中 H₂ 测试值 33 681.1 μL/L、C₂H₂ 测试值 3.4 μL/L、总烃测试值 2 943.7 μL/L，测试值均超过注意值，三比值法计算编码为“110”；电气试验前后绝缘油介损值分别为 0.042 9%、0.077 0%均超过注意值。具体结果见表 6、7。水分检测结果见表 8。

表 5 电流互感器 B 解体前绝缘电阻测试、介损值及电容量测试(10 kV 电压下)数据

Table 5 Insulation resistance test, dielectric loss value and capacitance test (under 10 kV voltage) data of current transformer B before disassembly

参数		解体前试验	规程注意值
绝缘电阻/MΩ	一次绕组及地	100 000	>1 000, 且与上次测量值相比无显著变化
	二次绕组及地	>2 500	
	末屏对地	100 000	
tanδ/%		0.487	≤0.700
C _x /pF		809.0	初值差不超过±5.00
电容量初值差/%		-1.06(出厂电容量为817.7 pF)	—

表6 电流互感器B解体前绝缘油介损值及体积电阻率试验数据

Table 6 Test data of dielectric loss and volume resistivity of insulation oil before disassembly of current transformer B

参数	电气试验前	电气试验后	规程注意值
油耐压值/kV	64.0	68.3	≥40(警示值)
tanδ/%	0.042 9	0.077 0	≤0.040(注意值)
体积电阻率/(Ω·m)	2.22×10 ¹²	2.11×10 ¹²	≥5×10 ⁹

表7 电流互感器B解体前绝缘油油中溶解气体试验数据

Table 7 Test data of dissolved gases in insulating oil before disassembly of current transformer B

特征气体	测试值/(μL·L ⁻¹)		规程注意值/(μL·L ⁻¹)
	电气试验前	电气试验后	
H ₂	32439.5	33681.1	≤300
CO	212.0	221.0	
CO ₂	412.2	383.4	
CH ₄	2710.5	2664.9	
C ₂ H ₄	1.7	1.7	
C ₂ H ₆	292.1	273.7	
C ₂ H ₂	3.3	3.4	≤2
总烃	3007.6	2943.7	≤100

表8 电流互感器B解体前绝缘油水分检测试验数据

Table 8 Test data of insulation oil moisture content before disassembly of current transformer B mg/L

电气试验前	电气试验后	规程注意值
11.2	11.1	≤25.0

2.2 解体检查

整体外观检查，电流互感器 A、B 膨胀器顶部盖板顶起、顶部排气塞未见漏油现象；互感器上端 P₁ 侧密封面、P₂ 侧焊接处、瓷套与膨胀器、二次绕组出线盒、二次绕组本体等均无异常。

去除二次绕组及绑扎带后，逐层剥离一次绕组外侧各层绝缘纸、主电容屏及各层端屏。电流互感器 A 及电流互感器 B 存在多处共性缺陷如下：

- 1)两台互感器末屏均存在大面积褶皱及铝箔纸重叠情况，见图 3；
- 2)两台互感器零屏至 11 屏间，大量存在绝缘纸褶皱情况，端屏下部褶皱明显见图 4；
- 3)两台互感器各层电容屏均可见多处大面积涂胶处，见图 5；
- 4)电流互感器 A 零屏引出线变形，见图 6；
- 5)电流互感器 B P₁ 侧 8 屏第二层端屏下方绝缘纸出现断裂，见图 7；
- 6)电流互感器 B P₁ 近端的 0 屏至 2 屏之间绝缘纸出现大面积空鼓褶皱，层间出现大片黏稠状物质，确定为 X 蜡，见图 8；





图 3 铝箔纸褶皱或重叠情况

Fig. 3 Folding or overlapping of aluminum foil paper



图 4 绝缘纸褶皱或重叠敷设情况

Fig. 4 Wrinkles or overlaps on insulation paper



图 5 大面积涂胶处

Fig. 5 Large area adhesive coating area

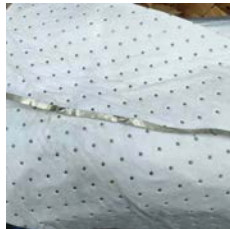


图 6 零屏引出线变形

Fig. 6 Deformed Zone in the Zero-Layer Capacitive Screen Lead



图 7 绝缘纸断裂情况

Fig. 7 Broken part of insulation paper



图 8 绝缘纸附着 X 蜡

Fig. 8 The area where X wax is attached to the insulation

3 电容屏放电仿真分析

3.1 X 蜡产生部位电容参数计算

以一次绕组油纸绝缘电容屏直线段为研究对象，有研究提出了其电容量的计算过程^[19]。结合

本案例故障电流互感器的技术参数，进行电流互感器直线电容屏电容量计算。

电流互感器一次绕组油纸绝缘原理见图 9。

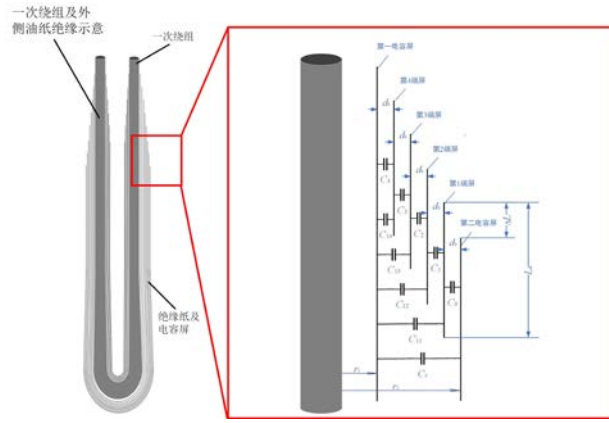


图 9 电流互感器一次绕组油纸绝缘结构原理示意

Fig. 9 Schematic diagram of oil paper insulation structure for primary winding of current transformer

一次绕组外侧由绝缘纸和带孔铝箔纸交替绑扎形成内层纸绝缘，结构共有含零屏及末屏在内的 14 层主电容屏，每层电容屏间设 4 层端屏。以第一电容屏、第二电容屏及其间的 4 层端屏为研究对象，如图所示， r_1 为第一电容屏半径， r_2 为第二电容屏半径，主屏及端屏间油纸绝缘厚度为 d_0 ，端屏宽度 L_d ，端屏超出主屏及各层端屏超出部分宽度为 ΔL ，则分别计算第一电容屏、第二电容屏间，有端屏段和无端屏段的电容。

1) 无端屏段电容为

$$C_x = \frac{2\pi\epsilon_s L_x}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (1)$$

式(1)中： C_x 为无端屏段电容； L_x 为无端屏段主屏长度； ϵ_s 为油纸绝缘介电常数。

2) 有端屏段电容分为端屏间电容及端屏与第一电容屏间寄生电容。第 k 层端屏与第 $k+1$ 层端屏间电容

$$C_k = \frac{2\pi\epsilon_s (L_d - \Delta L)}{\ln \frac{r_2 - kd_0}{r_2 - (k+1)d_0}}, (k = 0, 1, 2, 3, 4) \quad (2)$$

式(2)中， C_k 为第 k 层端屏与第 $k+1$ 层端屏间电容。

第 k 层端屏与第一电容屏间寄生电容

$$C_{1k} = \frac{2\pi\epsilon_s \Delta L}{\ln \frac{r_2 - kd_0}{r_1}}, (k=1,2,3,4) \quad (3)$$

式(3)中, C_{1k} 为第 k 层端屏与第一电容屏间寄生电容。

3)由如图所示各个电容的串并联关系, 易得第 k 端屏与第一电容屏的总电容为

$$C_{k1s} = (C_{(k+1)1s} + C_k) // C_{1k} = \frac{1}{\frac{1}{C_{(k+1)1s}} + \frac{1}{C_k}} + C_{1k} \quad (4)$$

($k=1,2,3,4$)

式(4)中, C_{k1s} 表示第 k 端屏与第一电容屏的总电容。

4)依据式(4)可求得各层端屏与第一电容屏的电容

$$C_{41s} = C_{14} // C_4 = \frac{2\pi\epsilon_s L_d}{\ln \frac{r_1 + d_0}{r_1}}$$

$$C_{31s} = (C_{41s} + C_3) // C_{13} = \frac{1}{\frac{1}{C_{41s}} + \frac{1}{C_3}} + C_{13} \quad (5)$$

$$C_{21s} = (C_{31s} + C_2) // C_{12} = \frac{1}{\frac{1}{C_{31s}} + \frac{1}{C_2}} + C_{12}$$

$$C_{11s} = (C_{21s} + C_1) // C_{11} = \frac{1}{\frac{1}{C_{21s}} + \frac{1}{C_1}} + C_{11}$$

所以可求得第一电容屏与第二电容屏的总电容

$$C_\Sigma = (C_{11s} + C_0) // C_x = \frac{1}{\frac{1}{C_{11s}} + \frac{1}{C_0}} + C_x \quad (6)$$

式(6)中: C_{11s} 表示第 1 层端屏与第一电容屏的总电容; C_Σ 表示第一电容屏与第二电容屏的总电容。

3.2 电容屏褶皱局部放电建模

文中基于 Comsol Multiphysics 6.3, 构建二维轴对称油浸正立式电流互感器一次绕组油纸绝缘模型及二维绝缘屏形变放电模型。

3.2.1 几何结构及网格划分

一次绕组及油纸绝缘结构剖面示意图 10, 以发现大量绝缘屏褶皱及 X 蜡的 0 屏至 2 屏范围做简化建模, 其二维轴对称几何结构见图 11。单独建立产气后的放电气隙二维模型见图 12, 对边界 1、边界 2 及边界 3 制定细化分布, 电容屏褶皱处边界构建细化的指数型网格分布, 气隙低电位侧边界构建层数为 5 的边界层。

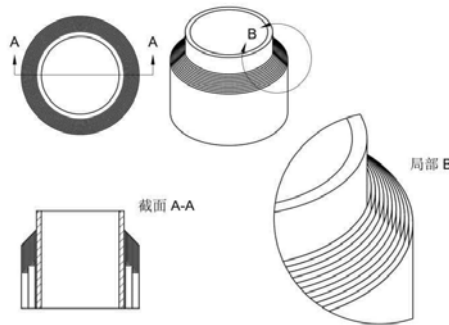


图 10 一次绕组及油纸绝缘结构剖面示意图

Fig. 10 Schematic diagram of longitudinal section of primary winding and oil paper insulation

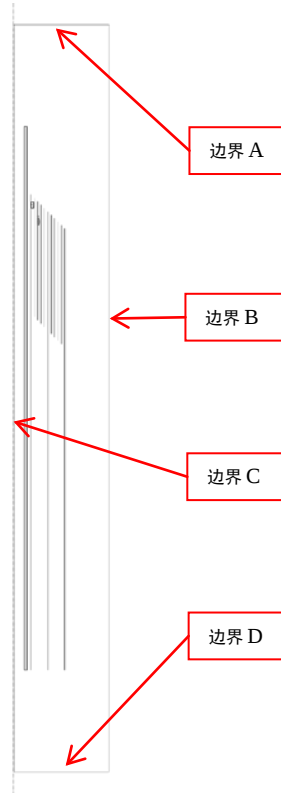


图 11 一次绕组及油纸绝缘二维轴对称几何

Fig. 11 Two dimensional axisymmetric geometry of primary winding and oil paper insulation

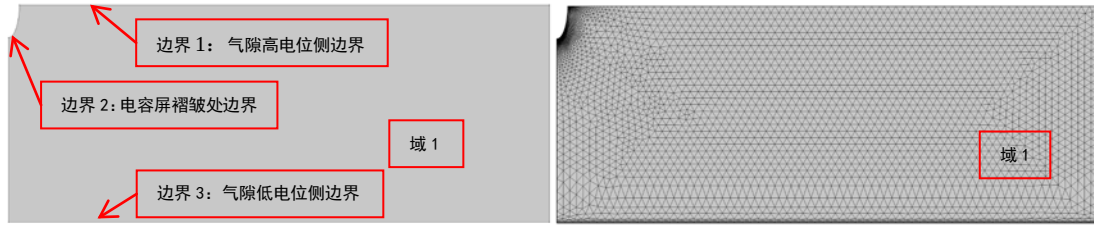


图 12 放电气隙二维模型

Fig. 12 Two dimensional model of discharge air gap

3.2.2 控制方程

粒子连续性方程

$$\frac{\partial n_s}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_s = R_s \quad (7)$$

式(7)中: ∂n_s 为粒子数密度, m^{-3} ; s 表示粒子种类; Γ_s 为粒子通量, 由漂移和扩散项组成, $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$; R_s 为化学反应源项, 由化学反应(电离、复合等)产生或消耗粒子, $\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$ 。

漂移—扩散通量方程

$$\Gamma_s = \mu_s n_s E - D_s \nabla n_s \quad (8)$$

式(8)中: μ_s 为迁移率, 表示粒子在单位电

场下的速度, $\text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$; D_s 为扩散系数, 与迁移率通过爱因斯坦关系关联:

$$D_s = \mu_s \cdot k_B \cdot T_s / q_s, \text{m}^2/\text{s}; E \text{ 为电场强度, V/m};$$

k_B 为玻尔兹曼常数($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$); T_s 为粒子温

度, K; q_s 为粒子电荷量(C, 电子为 $-e$, 离子为 $+e$ 或 $+Ze$);

泊松方程

$$\begin{aligned}\nabla \cdot (\varepsilon E) &= \rho \\ E &= -\nabla V\end{aligned}\quad (9)$$

式(9)中： ε 为介电常数，F/m； ρ 为空间电荷密度，C/m³； V 为电势，V。

仿真以甲烷(CH₄)气体为气隙主要成分，定义了4种反应形式见表9。

表9 反应形式汇总

Table 9 Summary of Reaction Forms	
电子碰撞反应	$A + e \rightarrow A^-$ (附着)
	$e + A \rightarrow A + 2e$ (电离)
粒子化学反应	$e + A^+ \rightarrow A$ (电子、离子复合)
	$A^+ + A^- \rightarrow A + A$ (离子、离子复合)

3.3 仿真分析及结论

3.3.1 初始值

在一次绕组及油纸绝缘二维轴对称几何模型中，设置边界1为二维对称轴，设置边界2、边界3为零电荷，设置域1为高压端，终端类型为电压，数值为220 kV，设置域2为低压压端，终端类型为电压，数值为2 kV，设置远端边界4为地电位。在放电气隙二维模型中，设置域1初始电子密度为 $1 \times 10^{-10} \text{ m}^{-3}$ ，设置边界3为低电位，设置边界2为高电位极，并以斜坡函数“ $f(t) = 1000 \cdot s^{-1} t$ ”平滑其输入，时间区间取[0, 1] s。

3.3.2 结果分析

在一次绕组及油纸绝缘二维轴对称几何模型中，以初始值220 kV高压端仿真分析，其切面电势及场强分布见图13，其中(1)、(2)为电势分布，(3)为场强等值线。由分布可以看出，在有电容屏段，场强分布更均匀，在无电容屏段，尤其是端屏末端部分，场强存在一定程度畸变。在端屏末

端设置二维截线A，计算可得，若0屏与第一层电容屏间端屏末端产生电容屏褶皱，并伴产气积累形成气隙，考虑寄生电容，其径向电势差在10 kV至20 kV范围内。

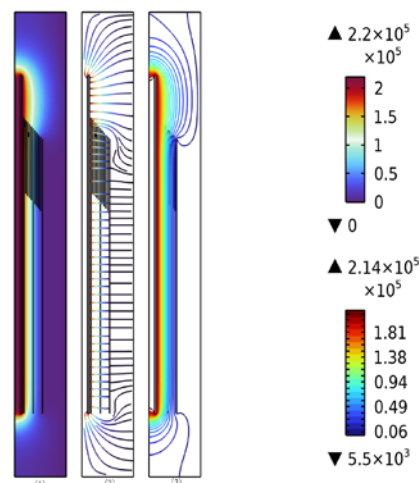
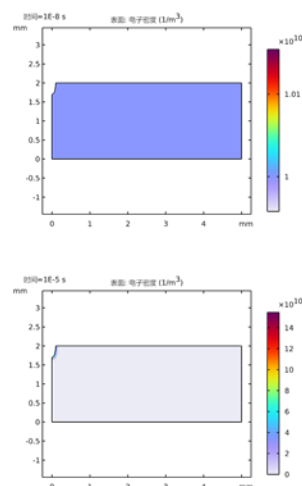


图13 一次绕组及油纸绝缘切面电势分布图

Fig. 13 Potential distribution diagram of the section of the primary winding and oil paper insulation

取10 kV为参考值，代入放电气隙二维模型中，斜坡函数“ $f(t) = 1000 \cdot s^{-1} t$ ”平滑其输入，时间区间取[0, 1] s，计算模型电子密度。分别取 1×10^{-8} 、 1×10^{-5} 、 2.51×10^{-4} 、 3.16×10^{-4} 、 4.11×10^{-4} 、 4.41×10^{-4} 、 1.58×10^{-3} 、1 s共8个时间切点，绘制模型电子密度分布图，见图14。



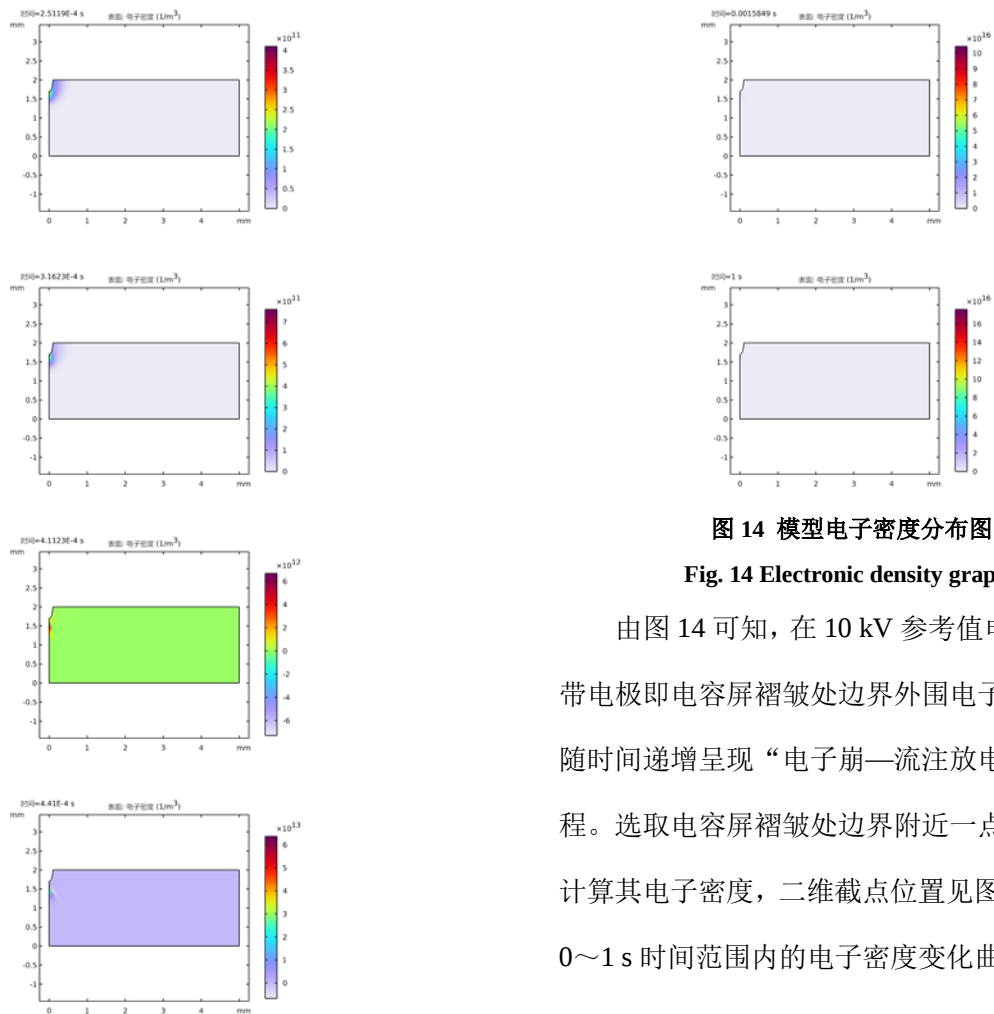


图 14 模型电子密度分布图

Fig. 14 Electronic density graphs

由图 14 可知，在 10 kV 参考值电压下，畸形带电极即电容屏褶皱处边界外围电子逐渐积累，随时间递增呈现“电子崩—流注放电”的典型过程。选取电容屏褶皱处边界附近一点为二维截点计算其电子密度，二维截点位置见图 15。该点在 0~1 s 时间范围内的电子密度变化曲线见图 16。

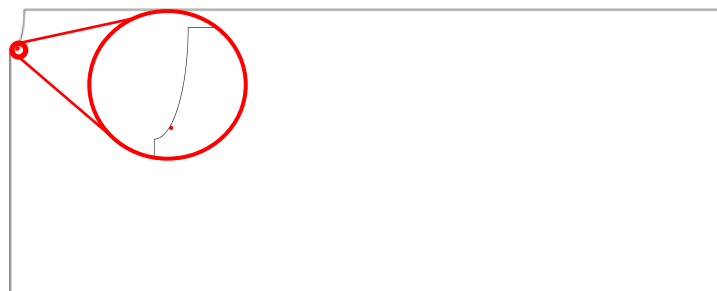


图 15 二维截点位置

Fig. 15 Location of the 2D intercept point

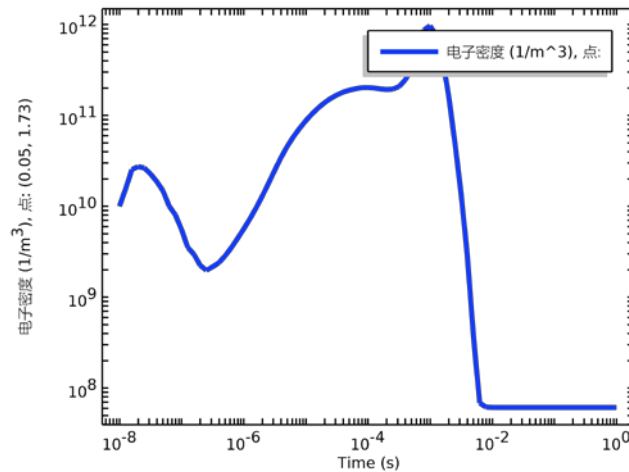


图 16 二维截点电子密度变化曲线

Fig. 16 Electron density variation curve of the 2D intercept point

由图 16 所示，在 $[1 \times 10^{-8}, 1 \times 10^{-3}]$ s 范围内，二维截点电子密度逐渐增大，在 1×10^{-3} s 时刻附近电子密度达到最大，在 $[1 \times 10^{-3}, 1 \times 10^{-2}]$ s 范围内，流注放电出现，二维截点电子密度随放电过程进展而降低。

4 结论

文中通过试验和解体检查了两台故障后电流互感器特性，同时结合仿真分析了产气后的放电机理，得出如下结论：

1) 电流互感器 A、B 解体检查结果表明，设备制造工艺把控不严，尤其是一次绕组外部的绝缘纸褶皱严重，各层电容屏也存在大量褶皱；依据 DL/T 722—2014《变压器油中溶解气体分析和判断导则》^[18]相关特征气体判断方法指导，结合现场试验中油介损值异常(0.077 0%>0.04%)，产气组分中存在大量 H_2 、 CH_4 ，同时乙炔超注意值的情况， CO_2/CO 比值小于 3，符合局部放电导致的缺陷特征；发现绝缘油劣化产生 X-蜡污染，但同时整体介损试验合格，排除 X-蜡长期积聚导致的过热产气(纸绝缘环流)。

2) 基于解体检查及油气分析等试验结果，开展仿真计算，通过有限元仿真分析发现，电流互感器一次绕组外侧绝缘屏端部易存在场强畸变，在畸变部位以 CH_4 为主的气隙产生时，易产生流注放电。

3) 结合解体检查及仿真分析，本次电流互感器顶盖故障的主要原因是由工艺问题引发场强畸变和排气不畅，长期运行下褶皱间隙气体积聚至不可知阈值，屏间微放电引起油绝缘劣化，产气顶盖；同时总烃的积累又加剧了放电。

文中的研究过程适应于同类油纸绝缘设备的异常产气分析，文中的工作可为相关同行业机构提供参考，帮助研究油纸绝缘实物及仿真过程的对应性。基于文中的研究，后续可开展静电、等离子体、热传递等多物理场下的仿真分析，对油介质“放电—产气—放电”的机制开展细化研究。

参考文献：

- [1] 郑立群. 高电压油浸电流互感器局部放电原因分析及其制造中需要注意的问题[J]. 变压器, 2016, 53(3): 35-38.

Zheng Liqun. PD analysis of HV oil-immersed current

- transformer and cautions in its manufacture[J]. Transformer, 2016, 53(3): 35-38.
- [2] 何 清, 王 伟, 陈 元, 等. 一起 220 kV 油浸式电流互感器故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(3): 111-115.
He Qing, Wang Wei, Chen Yuan, et al. Fault analysis on 220 kV oil-immersed current transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(3): 111-115.
- [3] 王 伟, 郑含博, 韩金华, 等. 一起 500 kV 电流互感器闪络故障原因分析[J]. 变压器, 2016, 53(9): 64-67.
Wang Wei, Zheng Hanbo, Han Jinhua, et al. Analysis of flashover fault of 500 kV current transformer[J]. Transformer, 2016, 53(9): 64-67.
- [4] 马 奎, 吴旭涛, 马 炜, 等. 油浸倒置式 CT 双针缺陷模型设计及其局放特性研究[J]. 绝缘材料, 2015, 48(8): 56-60.
Ma Kui, Wu Xutao, Ma Wei, et al. Design of double needles defect model in oil immersed inverted current transformer and its partial discharge characteristic[J]. Insulating Materials, 2015, 48(8): 56-60.
- [5] IEC 60599: 2022 Guide for the interpretation of dissolved and free gases in mineral insulating oils in electrical equipment[S].
- [6] DL/T 722—2000 变压器油中溶解气体分析和判断导则[S].
DL/T 722—2000. Guide for analysis and judgment of dissolved gases in transformer oil[S].
- [7] 王 琼, 杨文良, 车传强, 等. 一起油浸式电流互感器局部放电缺陷的诊断和分析[J]. 变压器, 2020, 57(3): 82-86.
Wang Qiong, Yang Wenliang, Che Chuanqiang, et al. Diagnosis and analysis of oil-immersed current transformer with PD defects[J]. Transformer, 2020, 57(3): 82-86.
- [8] 连鸿松. 油中气体含量对电容型设备绝缘性能的影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(5): 96-101.
Lian Hongsong. Study on the influence of gas contents in the oil on the insulation performance of capacitive equipment[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(5): 96-101.
- [9] 高树功, 胡则剑, 刘红文, 等. 35 kV 配电线路铁磁谐振诱发电压互感器油色谱异常的研究[J]. 绝缘材料, 2019, 52(2): 81-86.
Gao Shugong, Hu Zejian, Liu Hongwen, et al. Study on abnormal oil chromatography of potential transformer induced by Ferro-Resonance in 35 kV distribution line[J]. Insulating Materials, 2019, 52(2): 81-86.
- [10] 于会民, 王会娟, 杨 雪, 等. 高压互感器用绝缘油的性能对比分析[J]. 绝缘材料, 2023, 56(9): 101-107.
Yu Huimin, Wang Huijuan, Yang Xue, et al. Performance comparison and analysis of insulating oil for high voltage instrument transformer[J]. Insulating Materials, 2023, 56(9): 101-107.
- [11] 燕宝峰, 郭红兵, 韩 磊, 等. 一起油浸式电流互感器缺陷原因分析[J]. 内蒙古电力技术, 2013, 31(5): 120-122.
Yan Baofeng, Guo Hongbing, Han Lei, et al. Analysis and processing of oil-immersed TA defect[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2013, 31(5): 120-122.
- [12] 杨家辉, 程建伟, 张 曦, 等. 500 kV SF₆ 电流互感器主绝缘故障的仿真分析[J]. 南方电网技术, 2017, 11(5): 29-35.
Yang Jiahui, Cheng Jianwei, Zhang Xi, et al. Main insulation fault simulation analysis of 500 kV SF₆ current transformer[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(5): 29-35.
- [13] 王成智, 胡 伟, 罗晓庆, 等. 电热联合作用下交流油浸纸套管绝缘特性[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2629-2636.
Wang Chengzhi, Hu Wei, Luo Xiaoqing, et al. Insulation characteristics of oil-impregnated paper bushing under the combined electrical-thermal effect[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2629-2636.
- [14] 张金烽. 复合电场下油纸绝缘低温介电与击穿特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
Zhang Jinfeng. Ph.D.dissertation[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2019.
- [15] 罗 毅, 方 志, 邱毓昌, 等. 介质阻挡放电影响因素分析[J]. 高压电器, 2004, 40(2): 81-83.
Luo Yi, Fang Zhi, Qiu Yuchang, et al. Analysis of influencing factors on dielectric barrier discharge[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(2): 81-83.
- [16] 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 for an inverted oil-immersed current transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(3): 99-105.

- [17]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.

- [18]Q/ND 10501 06—2023 输变电设备状态检修试验规程[S].

Q/ND 10501-06—2023 Condition-based maintenance test regulations for power transmission and transformation equipment[S].

- [19]李文燕, 刘江明, 张翹喆, 等. 电流互感器末屏断裂缺陷及其影响分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(5): 95-98, 103.

Li Wenyan, Liu Jiangming, Zhang Xuanzhe, et al. Analysis of current transformer end shield breakage defect and its influence[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(5): 95-98, 103.

王英杰(1997—), 男, 工程师, 从事电气一次设备故障分析及高试设备检测相关工作 (E-mail : mbswcw@163.com)。

陈 波(1984—), 男, 副高级工程师, 从事输变电技术监督及试验室检测工作(E-mail chenbo0472@163.com)。