

油浸型倒立式电流互感器内绝缘缺陷特征及检测方法

孙帆^{1,2}, 王维庆¹, 金铭², 刘勇³

(1. 新疆大学可再生能源发电与并网控制教育部工程研究中心, 乌鲁木齐 830000;
2. 国网新疆电力有限公司, 乌鲁木齐 830011; 3. 安徽正广电电力技术有限公司, 合肥 230000)

摘要: 油浸型倒立式电流互感器是典型的少油设备, 长期运行于高电场强度环境下, 其绝缘工艺控制难度大, 导致因绝缘问题诱发的爆炸、喷油故障多发。本文以油浸型倒立式电流互感器故障分析为切入点, 分析了绝缘缺陷产生的原因, 对存在缺陷的设备开展气相色谱分析、局部放电检测、高电压介质损耗试验、长时额定电压红外测温测试, 最后对测试结果进行了缺陷特征分析, 并对在运设备提出合理化缺陷检测方法。

关键词: 电流互感器; 油浸倒立式; 故障分析; 绝缘缺陷检测

Inner Insulation Defect Characteristic and Detection Method of Oil-immersed-inverted Type Current Transformer

SUN Fan^{1,2}, WANG Weiqing¹, JIN Ming², LIU Yong³

(1. Engineering Research Center of Renewable Energy Power Generation and Grid-connected Control, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830000, China; 2. State Grid Xinjiang Electric Power Company Limited, Urumqi 830011, China; 3. Anhui Zhengguang Electric Power Technology Co., Ltd., Hefei 230000, China)

Abstract: The oil-immersed-inverted type current transformer is a typical minimum oil equipment. Under the long term operation in the environment of high electric field intensity, its insulation process control is difficult, leading to frequent explosions and oil injection faults due to insulation. In this paper, the fault analysis of the oil-immersed-inverted type current transformer is taken as the starting point to analyze the causes of insulation defects. The gas chromatography analysis, partial discharge detection, high voltage dielectric loss test and long-term rated voltage infrared temperature measurement test are performed on the defective equipment. Finally, the defect characteristics of the test results are analyzed and a reasonable defect detection method is proposed for the equipment in operation.

Keywords: current transformer; oil-immersed-inverted type; fault analysis; insulation defect detection

0 引言

油浸型倒立式电流互感器作为一种少油设备, 广泛应用于特高压交流变电站, 然而因其绝缘包绕工艺要求高, 导致其内绝缘缺陷多发, 主绝缘受损发生击穿甚至爆裂的情况时有发生^[1]。

目前, 对于油浸型倒立式电流互感器的绝缘缺陷成因机理和试验方法已经开展了较多的研究^[2-5], 但对于缺陷发展过程中的运行特征以及有效测试方法缺少实验验证, 试验规程中规定了电流互感器例行试验项目、周期和技术要求, 但多为停电试验要

求, 难以满足对油浸型倒立式电流互感器设备状态的评估要求。

本文以带缺陷油浸型倒立式电流互感器设备为研究对象, 在实验室验证了各类检测手段对于油浸型倒立式电流互感器内绝缘缺陷的适用性, 验证了高电压介损、红外测温、局部放电检测、油中溶解气体等手段对油浸型倒立式电流互感器内绝缘缺陷的检测有效性, 同时分析了该类设备内绝缘缺陷的运行特征, 对于少油绝缘设备的内绝缘缺陷检测提出了测试手段及指标控制意见。

1 倒立式电流互感器结构

油浸型倒立式电流互感器结构见图1,一次绕组为贯穿式导电杆结构,二次绕组多采用有机材料浇注于铝制屏蔽罩内,顶部一、二次绕组间及套管均采用绝缘纸包绕,浸油形成绝缘,倒立式电流互感器一次导电杆贯穿部分为高电场强度区,因此发生故障的部位多为互感器顶部主绝缘区,发生故障时膨胀器首先出现损毁^[6-8]。

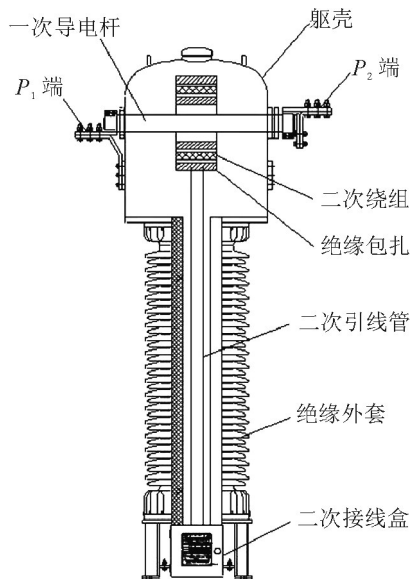


图1 油浸型倒立式电流互感器结构
Fig. 1 Structure of oil-immersed-inverted type current transformer

2 设备故障解析

2.1 故障情况

发生故障的两台油浸型倒立式电流互感器均为220 kV电流互感器,运行时间均超过一年不满两年,图2-4为一台倒立式互感器顶部炸裂故障,事故发生时互感器顶部发生爆炸伴有燃烧。图5为一台互感器顶部喷油故障,该故障发生时,膨胀器被顶起,绝缘油高温喷出。

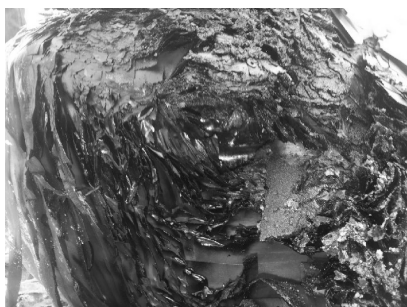


图2 故障互感器顶部铁心及二次绕组外部绝缘烧损
Fig. 2 External insulation burning on the top iron core and secondary winding of the faulty phase of the current transformer

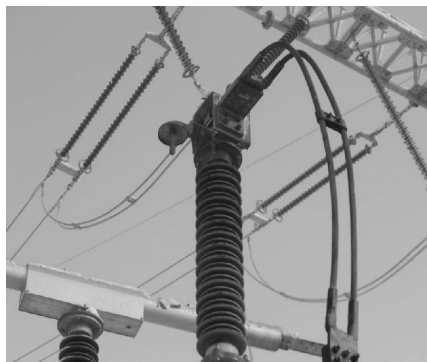


图3 故障互感器顶部炸裂脱落
Fig. 3 Top explosion and peel off of faulty phase of the current transformer



图4 铁心罩壳发生放电击穿
Fig. 4 Discharge breakdown of iron core casing



图5 电流互感器膨胀器撕裂喷油
Fig. 5 Torn and oil injection of current transformer expander

对图2-4的爆炸设备和图5的喷油设备进行解体检查。图4中发生燃爆的事故相设备中发现铁心罩壳上存在电击穿痕迹。图5设备的检查发现电流互感器金属膨胀器被顶起,并伴有撕裂,顶部主绝缘各密封处未发现渗漏油现象;外瓷套表面完好,器身解体检查未发现放电痕迹;高压电屏主绝缘电缆纸与皱纹纸有虚软空穴现象,绝缘纸包裹存在褶皱,见图6。喷油设备未发现绝缘击穿痕迹,油纸绝缘部分未发现局放痕迹,绝缘油也没有明显

地油粘稠现象以及腊状物,其他部位解体未发现异常。



图6 喷油互感器解体顶部绝缘虚软空穴
Fig. 6 Virtual soft void on top insulation after disassembly of the oil injected current transformer

2.2 绝缘缺陷原因分析

对图 5 中的喷油设备进行绝缘油色谱检测分析,测试结果见表 1。发现油中 H₂ 数值增长明显,超过 10 000 μL/L,严重超出标准提出的告警数值。

表1 喷油互感器油色谱数据
Table 1 Oil chromatographic data of oil injection current transformer

特征气体	测试结果/(μL/L)
H ₂	10 978.30
CO	50.21
CO ₂	444.01
CH ₄	838.21
C ₂ H ₄	2.10
C ₂ H ₆	368.36
C ₂ H ₂	1.40
总烃	1 210.88

根据事故后油色谱检测结果,结合事故的突发性和剧烈性,可以判断事故不同程度的存在局部放电现象。局部放电产生的热量会加速绝缘的老化,危害电气设备的使用寿命,随着运行时间的不断延长,气体含量不断地积累升高,持续放电造成主绝缘侵蚀受损^[9-11]。

两例发生事故的电流互感器均通过出厂试验和现场特殊性交接试验,在投运不满两年时发生事故。其中喷油事故的互感器解体中未发现明显放电击穿痕迹,说明绝缘层内放电缺陷程度较弱、过程缓慢^[12-13]。

图 7-8 为倒立式电流互感器主绝缘结构示意图,导电杆与铁心间的绝缘介质为紧密均匀包裹的绝缘纸,内圈绝缘介质为耐受高电压的主绝缘,同时也是导电杆与铁心圆柱模型的电容电介质,当其中存在褶皱、空穴时,电介质参数相应发生变化,导

致分布电容参数发生变化。气隙或者油隙空穴处的击穿场强比油纸绝缘层低,而根据分布参数,气隙存在处的电场强度更高,导致互感器顶部主绝缘强度变差^[14-16]。

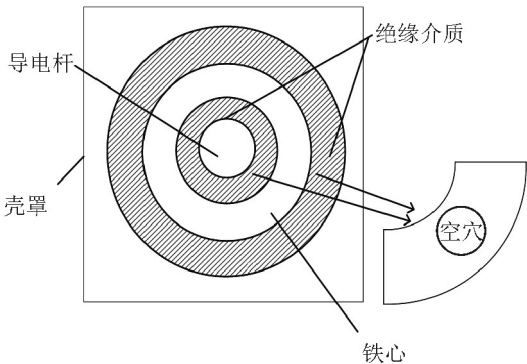


图7 互感器主绝缘结构示意图 I
Fig. 7 Schematic diagram of the main insulation structure of the transformer I

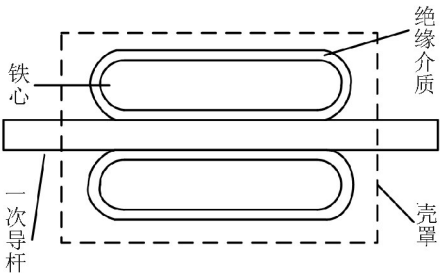


图8 互感器主绝缘结构示意图 II
Fig. 8 Schematic diagram of the main insulation structure of the transformer II

此外,由于二次引线管处于低电位,故储油柜和瓷套管连接处会出现电场畸变,可能存在局部场强过高的情况,长期运行易导致绝缘薄弱处发生放电击穿。结合油色谱检测和解体情况,油浸型倒立式电流互感器铁心罩壳外部绝缘存在气隙和空穴是局部放电产生的直接原因,在设备运行时引起局部放电。

综上,认为互感器主绝缘故障的主要原因为以下几点:

- 1)由于产品工艺处理不当,使互感器绝缘材质内部含了气泡、水分或其他杂质,绝缘纸包裹不够均匀、致密,在绝缘包扎及烘干的过程中产生空气间隙。空气间隙在互感器器身注油、抽空的环节被油隙取代,形成了隐蔽性缺陷;
- 2)运输过程中长期横至,导致重力作用下绝缘纸发生偏移,同一圈绝缘纸产生不平衡绝缘程度,在高电压作用下弱绝缘侧发生放电,随着运行缺陷逐步扩大;
- 3)因油间隙产生的局部放电,发展过程缓慢,

放电微弱,安装现场的交接试验无法对互感器局放进行测量,所以缺陷在交接耐压试验和出场试验中未能发现,但运行过程中随着长时间处于高电压区域,在放电的作用下,绝缘持续受损,气体不断产生,油气压力超过膨胀器刚性变形的临界值时造成金属膨胀器鼓帽永久变形,油纸绝缘强度不断下降,导致在高电压作用下发生直接击穿。

3 缺陷特征及检测手段

通过停电采集油样的方式,采用油色谱检测方法排查可能存在绝缘缺陷的同型号电流互感器,发现油色谱数据异常,氢气含量大幅超出运标准建议的设备,认为存在疑似缺陷。以存在疑似缺陷的电流互感器作为研究对象,分别采用油色谱检测、高电压介质损耗、局部放电测试、红外测温 4 种测试方法进行缺陷特征检测试验^[17-19]。

3.1 气相色谱分析

疑似存在缺陷的倒立式电流互感器油色谱数据,氢气、总烃均超过标准规定注意值。微水含量、介质损耗等实验结果符合规定要求,色谱测试结果见表 2。

表 2 疑似带缺陷设备油色谱检测数据
Table 2 Oil chromatography detection data of equipment with suspected defects

特征气体	测试结果/($\mu\text{L/L}$)
H ₂	8 206.34
CO	131.84
CO ₂	154.22
CH ₄	668.81
C ₂ H ₄	98.28
C ₂ H ₆	0.51
C ₂ H ₂	0.97
总烃	768.57

3.2 局部放电检测

将电流互感器底部对地绝缘,试验环境温度 23℃,采用加压方式,测试脉冲电流信号,实验数据见表 3。

表 3 带缺陷设备局部放电测试数据
Table 3 Partial discharge test data of equipment with defects

电压/kV	放电量/pC
40(起始放电)	2 178
73	3 628
146	4 028
146(5 min)	4 385
146(10 min)	4 418
146(15 min)	4 446

逐步升高电压至额定相电压 146 kV 并持续观察,局放测试信号产生于 40 kV 时,额定电压下放电量达到 4 028 pC,并随着加压时间的延长,放电量有所增加,说明随着加压时间增长,绝缘缺陷在发展。同时也说明局部放电测试可以有效发现该类绝缘缺陷^[20-22]。

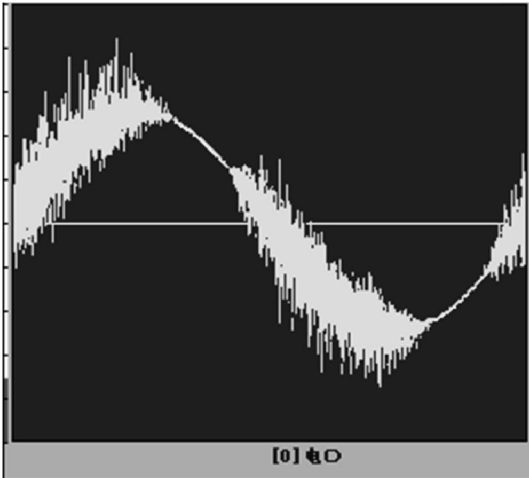


图 9 互感器局部放电试验 146 kV 图谱
Fig. 9 146 kV diagram of partial discharge test of current transformer

3.3 高电压介损

为进一步验证绝缘缺陷的特性,分别对电流互感器开展互感器一次绕组对地,一次绕组对末屏及地和末屏对地的高电压介损测量,分别测量互感器顶部及套管的介质损耗和电容^[23-25]。高电压介损试验结果见表 4。

表 4 互感器高电压介质损耗试验数据
Table 4 High voltage dielectric loss test data of current transformer

电压/kV	顶部绝缘		套管绝缘	
	$\tan \delta/\%$	C_s/pF	$\tan \delta/\%$	C_s/pF
10	1.366	513.7	0.230	243.7
30	1.798	514.5	0.227	243.8
50	2.333	517.4	0.228	243.8
73	4.861	534.5	0.225	243.9
90	8.052	557.6	0.224	243.9
110	9.888	586.7	0.224	243.9
146	9.881	610.4	0.223	243.9
110	10.470	590.1	0.220	243.9
90	9.396	568.6	0.221	243.9
73	6.441	544.9	0.222	243.9
50	2.774	570.5	0.225	243.9
30	1.635	514.1	0.227	243.8
10	1.143	513.3	0.230	243.8

可以看到,10 kV 时即常规高压介损试验电压

下,疑似待有缺陷的电流互感器一次绕组对末屏及地的介损达到了1.366%,超过规程要求的0.8%,但电容量数值变化不明显,30 kV时试验数据变化不明显,至50 kV时电容量开始快速升高。可以看出,该电流互感器整体介损随着电压的升高而增大,在110 kV左右趋于稳定值9.88%,电容量随着电压值的升高也有增大的趋势,介质损耗曲线见图10和电容量变化曲线见图11。从图10-11可知互感器顶部绝缘存在绝缘缺陷。套管绝缘介损测试结果表明,套管介质损耗随电压变化极小,可见绝缘缺陷主要为互感器顶部主绝缘部分。曲线图样也表明互感器顶部主绝缘部分存在典型的放电缺陷。

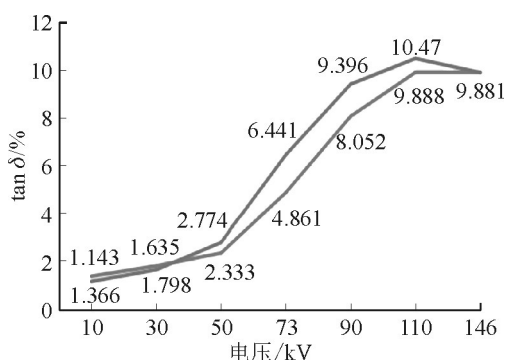


图10 互感器顶部绝缘高电压介质损耗测试结果
Fig. 10 Test results of high voltage dielectric loss on the top insulation of current transformer

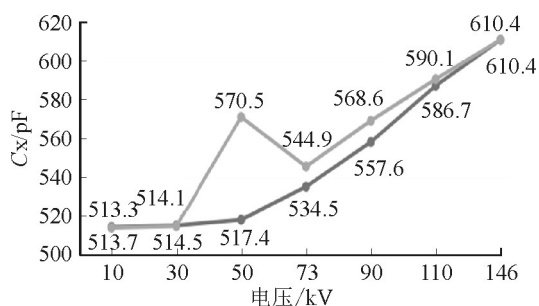


图11 互感器顶部绝缘高电压介质损耗电容量测试结果
Fig. 11 Test results of capacitance and high voltage dielectric loss on the top insulation of current transformer

3.4 红外测温

考虑互感器绝缘部分介质损耗数值的变化,在运行过程中绝缘受损的互感器相比正常设备,产生的发热量可能会更大,运行温度可能更高,因此,将一台局部放电测试符合标准要求的同型号电流互感器作为对照组,在实验室开展持续加压,模拟运行工况,使用红外测温设备观察运行温度变化情况^[26-33]。

实验结果表明,持续加压6 h后,疑似缺陷的电流互感器相比正常相互感器温度明显升高,见图12,温差近3℃。可见同等工况下,异常相设备

运行当中温度相比正常设备有一定差异。



图12 长时加压两互感器红外测温结果对比
Fig. 12 Comparison of infrared temperature measurement results between two current transformers under long-term voltage stress

4 结语

通过解体发生故障的油浸型倒立式电流互感器设备,定位设备缺陷部位,分析缺陷形成原因,认为制造过程中的绝缘层包绕工艺不到位是造成潜在绝缘缺陷的主要原因,缺陷的隐蔽性和发展的缓慢造成了交接试验难以发现潜在问题,对于缺陷设备局部放电测试。高电压介质损耗测试均能有效发现缺陷设备,对于在运的设备,推荐使用绝缘油气相色谱检测和红外测温作为排查疑似缺陷的手段。

参考文献

- [1] 姚锡钦. 220 kV 倒立式电流互感器的故障原因分析[J]. 变压器, 2023, 60(3): 73-75.
YAO Xiqin. Fault analysis of 220 kV inverted current transformer[J]. Transformer, 2023, 60(3): 73-75.
- [2] 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.
- [3] 高超, 熊佳明, 林志力, 等. 电力系统中全光纤电流传感器的研究进展[J]. 西安工程大学学报, 2023, 37(6): 78-88.
GAO Chao, XIONG Jiaming, LIN Zhili, et al. Research progress of all fiber optical current sensors in power system[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2023, 37(6): 78-88.
- [4] 罗传仙, 张民, 程林, 等. 基于声电联合传感阵列的变压器局部放电诊断技术研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(9): 81-90.
LUO Chuanxian, ZHANG Min, CHENG Lin, et al. Re-

- search on transformer partial discharge diagnosis technology based on combined acoustic and electrical sensing array[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(9): 81-90.
- [5] 夏经德, 苗思雨, 邵文权, 等. 基于纵向阻抗的变压器虚拟相位保护[J]. 西安工程大学学报, 2023, 37(2): 54-62. XIA Jingde, MIAO Siyu, SHAO Wenquan, et al. Transformer virtual phase protection based on longitudinal impedance[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2023, 37(2): 54-62.
- [6] 魏晓耀, 岳光华. 倒立式电流互感器绝缘设计[J]. 中小企业管理与科技, 2019(10): 142-143. WEI Xiaoyao, YUE Guanghua. Insulation design of inverted current transformers[J]. Management and Technology of Small and Medium Enterprises, 2019(10): 142-143.
- [7] 蒋毅舟, 王舶仲, 邹英翔, 等. 高压电流互感器串并联结构分析[J]. 电工技术, 2019(21): 78-80. JIANG Yizhou, WANG Bozhong, ZOU Yingxiang, et al. Analysis of series and parallel structures of high voltage current transformers[J]. Electrical Technology, 2019(21): 78-80.
- [8] 陶峰. 220 kV 倒立式电流互感器介质损耗及电容量的测量[J]. 科技风, 2011(20): 7-8. TAO Feng. Measurement of dielectric loss and capacitance of 220 kV inverted current transformers[J]. Science and Technology Wind, 2011(20): 7-8.
- [9] 杨代勇, 于群英, 敖明, 等. 油浸倒立式电流互感器低温介损和局部放电特性研究[J]. 变压器, 2019, 56(3): 21-25. YANG Daiyong, YU Qunying, AO Ming, et al. Research on low temperature dielectric loss and partial discharge characteristics of oil immersed inverted current transformers[J]. Transformers, 2019, 56(3): 21-25.
- [10] 张光庆. 500 kV 油浸倒立式电流互感器乙炔超标原因分析[J]. 大众用电, 2021, 36(2): 59-60. ZHANG Guangqing. Analysis of reasons for excessive acetylene content in 500 kV oil immersed inverted current transformers[J]. Volkswagen Electric, 2021, 36(2): 59-60.
- [11] 邢小琛, 徐鑫, 李晶, 等. 一起 220 kV 油浸式电流互感器故障分析[J]. 山东电力高等专科学校学报, 2023, 26(5): 25-27. XING Xiaochen, XU Xin, LI Jing, et al. Analysis of a fault in a 220 kV oil immersed current transformer[J]. Journal of Shandong Electric Power College, 2023, 26(5): 25-27.
- [12] 赵世华, 刘赞, 孙利朋, 等. 一起脱氢处理工艺不当引起的倒立式电流互感器爆炸事故[J]. 变压器, 2019, 56(12): 80-84. ZHAO Shihua, LIU Yun, SUN Lipeng, et al. An explosion accident of an inverted current transformer caused by improper dehydrogenation treatment process[J]. Transformer, 2019, 56(12): 80-84.
- [13] 于杰, 陈莹. 支柱式浇注绝缘电流互感器局部放电试验分析与研究[J]. 中国设备工程, 2024(3): 198-200. YU Jie, CHEN Ying. Partial discharge test analysis and research on pillar cast insulation current transformers[J]. China Equipment Engineering, 2024(3): 198-200.
- [14] 钱国超, 邹德旭, 马仪, 等. 倒立少油电流互感器缺陷及制造工艺分析[J]. 云南电力技术, 2015, 43(S2): 156-158. QIAN Guochao, ZOU Dexu, MA Yi, et al. Analysis of defects and manufacturing process of inverted low oil current transformers[J]. Yunnan Electric Power Technology, 2015, 43(S2): 156-158.
- [15] 马晓薇, 樊培培, 华超. 500 kV 油浸倒立式电流互感器故障实例及分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(6): 91-94. MA Xiaowei, FAN Peipei, HUA Chao. Fault examples and analysis of 500 kV oil immersed inverted current transformers[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2018, 39(6): 91-94.
- [16] 孙志刚. 电流互感器的选型、运行检修及故障防范处理[J]. 内蒙古科技与经济, 2023(3): 100-102. SUN Zhigang. Selection, operation, maintenance, and fault prevention of current transformers[J]. Inner Mongolia Science and Technology and Economy, 2023(3): 100-102.
- [17] 魏齐. 220 kV 倒立式电流互感器漏油问题探究[J]. 电气技术与经济, 2018(4): 26-27. WEI Qi. Exploration of oil leakage in 220 kV inverted current transformers[J]. Electrical Technology and Economics, 2018(4): 26-27.
- [18] 徐宏武. 油纸绝缘倒立式电流互感器绝缘设计[J]. 中国新技术新产品, 2017(17): 38-39. XU Hongwu. Insulation design of oil paper insulated inverted current transformer[J]. China New Technology and New Products, 2017(17): 38-39.
- [19] 张大鹏. 高铁用电容式电流互感器绝缘特性及故障研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
- [20] 马晓薇, 樊培培, 华超, 等. 500 kV 油浸倒立式电流互感器末屏故障诊断探析[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2018, 23(1): 37-40. MA Xiaowei, FAN Peipei, HUA Chao, et al. Diagnosis and analysis of end screen fault in 500 kV oil immersed inverted current transformers[J]. Journal of Anhui Electrical Engineering Vocational and Technical College, 2018, 23(1): 37-40.
- [21] 金铭, 吴标, 许广虎, 等. 倒立式 220 kV 电流互感器喷油故障的分析和预防[J]. 电气开关, 2018, 56(4): 97-99. JIN Ming, WU Biao, XU Guanghu, et al. Analysis and prevention of fuel injection faults in inverted 220 kV current transformers[J]. Electrical Switch, 2018, 56(4): 97-99.
- [22] 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. Analysis of a fault in an oil immersed inverted current transformer and its preventive measures[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020, 41(3): 99-105.
- [23] 符劲松, 张欢, 邓维, 等. 油浸倒立式电流互感器高电压下介质损耗试验分析[J]. 变压器, 2016, 53(1): 59-63.
- FU Jinsong, ZHANG Huan, DENG Wei, et al. Analysis of dielectric loss test of oil immersed inverted current transformer under high voltage[J]. Transformer, 2016, 53(1): 59-63.
- [24] 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. Analysis of partial discharge causes in high voltage oil immersed current transformers and issues to pay attention to in manufacturing[J]. Transformers, 2016, 53(3): 35-38.
- [25] 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. Diagnosis analysis and simulation test research on batch defects of current transformers[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2021, 42(2): 48-53.
- [26] 岳宇飞. 220 kV 变电站电流互感器故障分析[J]. 河北电力技术, 2020, 39(3): 47-49.
- YUE Yufei. Analysis of current transformer fault in 220 kV substation[J]. Hebei Electric Power Technology, 2020, 39(3): 47-49.
- [27] 谢超, 胡蕴斌, 叶建铸, 等. 多种检测和试验方法对电流互感器故障的综合分析判断[J]. 变压器, 2013, 50(8): 75-76.
- XIE Chao, HU Yunbin, YE Jianzhu, et al. Comprehensive analysis and judgment of current transformer faults using various detection and testing methods[J]. Transformer, 2013, 50(8): 75-76.
- [28] 李佳琪, 咸日常, 张宁, 等. 一起电流互感器绝缘故障引发停电事故的分析与处理[J]. 变压器, 2022, 59(2): 51-55.
- LI Jiaqi, XIAN Richang, ZHANG Ning, et al. Analysis and handling of a power outage accident caused by insulation failure of a current transformer[J]. Transformer, 2022, 59(2): 51-55.
- [29] 韩豫东, 孙艳, 马振京, 等. 一起 500 kV 电压互感器绕组绝缘故障分析[J]. 电世界, 2024(1): 23-25.
- HAN Yudong, SUN Yan, MA Zhenjing, et al. Analysis of insulation faults in a 500 kV voltage transformer winding[J]. Electric World, 2024(1): 23-25.
- [30] 陈于晴, 黄青丹, 宋浩永, 等. 油浸式电流互感器主绝缘快速暂态过电压分布的研究[J]. 变压器, 2023, 60(12): 27-33.
- CHEN Yuqing, HUANG Qingdan, SONG Haoyong, et al. Study of VFTO distribution in insulation system of IOCT[J]. Transformer, 2023, 60(12): 27-33.
- [31] 孙月磊, 吴自然, 周新城等. 单相开口剩余电流互感器假剩余电流发生机理和数值消除方法研究[J]. 变压器, 2023, 60(2): 32-37.
- SUN Yuelei, WU Ziran, ZHOU Xincheng, et al. Research on mechanism and elimination of false residual current in single-phase open residual current transformer[J]. Transformer, 2023, 60(2): 32-37.
- [32] 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.
- [33] 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.

作者简介:

孙帆(1988—), 男, 高级工程师, 主要从事电气设备状态检测、电力系统控制及新能源研究。E-mail: 30375069@qq.com。

王维庆(1959—), 男, 教授, 研究方向为大型风力发电机组关键零部件的研制、整机智能控制及检测、电能转换、继电保护和并网送出技术, 研发建立系列大型风电机组电能转换理论体系和工程应用技术。

金铭(1987—), 男, 高级工程师, 主要从事电力设备检测监测, 电力系统防灾减灾等领域研究和工程技术工作。

刘勇(1975—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统过电压治理研究及技术开发。