

500 kV 油浸倒立式电流互感器绝缘诊断分解试验方法

柯于刚¹, 侯永春¹, 段光辉¹, 秦伟², 顾文雯¹

(1. 国网无锡供电公司, 江苏 无锡 214000; 2. 国网扬州供电公司, 江苏 扬州 211401)

摘要: 已安装投运的油浸倒立式电流互感器介质损耗因数和电容量测量, 采用常规正接线方式所测数据仅反映电容型套管直线段绝缘性能, 未对头部绝缘进行考核; 而采用常规反接线方式测量其结果为综合数据, 且易受与其相连接设备耦合电容的影响。针对这一问题, 本文提出了油浸倒立式电流互感器介质损耗因数和电容量测量分解试验方法, 该方法采用反接线结合屏蔽的方式, 可分别测量油浸倒立式电流互感器头部绝缘和电容型套管直线段绝缘的介质损耗因数和电容量。对诊断油浸倒立式电流互感器的绝缘缺陷及定位具有参考意义, 文章最后通过实例阐述了该方法的实际运用。

关键词: 油浸倒立式电流互感器; 头部绝缘; 介质损耗因数和电容量; 油色谱分析; 反接线; 屏蔽

Decomposition Test Method of Insulation Diagnosis of 500 kV Oil-immersed-inverted Current Transformer

KE Yugang¹, HOU Yongchun¹, DUAN Guanghui¹, QIN Wei², GU Wenwen¹

(1. SGCC Wuxi Power Supply Company, Jiangsu Wuxi 214000, China;

(2. SGCC Yangzhou Power Supply Company, Jiangsu Yangzhou 211401, China)

Abstract: As for the dielectric loss factor and capacitance measurement of installed and operated oil-immersed inverted current transformer, the data measured by the common forward wiring mode can only reflect the insulation performance of straight section of capacitive bushing and the insulation at the head is not checked. However, the result measured by the common reverse wiring mode is the comprehensive data and is easily affected by the coupling capacitance of the its connected equipment. Regarding this issue, the dielectric loss factor and capacitance measurement decomposition method of the oil-immersed-inverted current transformer is proposed in this paper. In this method the way of inverse wiring in combination with the screen is adopted to measure the dielectric loss and capacitance at the head insulation of the oil-immersed-inverted current transformer and on the straight section of the capacitive bushing. It has reference for both dielectric defect and location of oil-immersed-inverted current transformer. Finally, the practical application of the method is described through examples.

Keywords: oil-immersed-inverted current transformer; insulation of head; dielectric loss factor and capacitance; oil chromatographic analysis; reverse wiring; screen

0 引言

油浸倒立式电流互感器具有结构紧凑, 动热稳定能力强等优点, 在电力系统得到广泛的应用, 并有逐步取代正立式电流互感器的趋势^[1]。油浸倒立式电流互感器结构紧凑, 头部的电场强度比较集中, 对生产工艺和产品质量要求较高, 一旦某个环节把控不严, 易导致头部金属膨胀器冒顶、喷油甚至爆炸事故^[2-15]。特别是某些厂家的油浸倒立式电

流互感器运行一段时间后, 油中溶解气体含量检测通常会出现乙炔或其他特征气体超标的情况, 需要进行诊断性试验, 测试各部件的绝缘状况。

1 油浸倒立式电流互感器结构

油浸倒立式电流互感器的典型结构^[16-20]为: 二次绕组和铁心通过支撑管置于互感器头部, 二次绕组外部使用金属屏蔽罩, 屏蔽罩外包绕绝缘。以 LVB 型(LVB 为某厂家产品型号, L-代表电流互感

器,V-表示倒立式结构,B-表示带保护绕组)油浸倒立式电流互感器为例,其结构主要由膨胀器、导排、储油柜、产品器身、瓷套、底座、二次出线盒、过渡件等组成,如图 1 所示。其中产品器身包含铁心罩壳,二次绕组,电容屏套管(电容屏套管包含端屏,末屏,二次引线管,末屏引出线)。该倒立式电流互感器器身头部主绝缘外侧采用窄带铝箔纸包绕一层高压电容屏如图 2 所示。

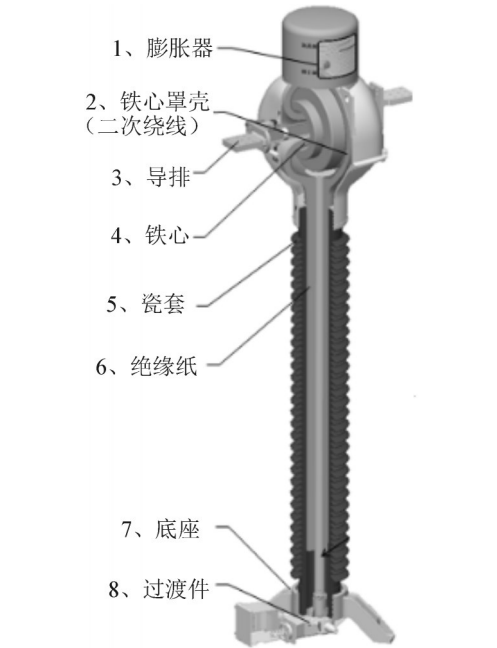


图 1 LVB 型电流互感器的结构及组成部件
Fig. 1 Structure and parts of type LVB current transformer

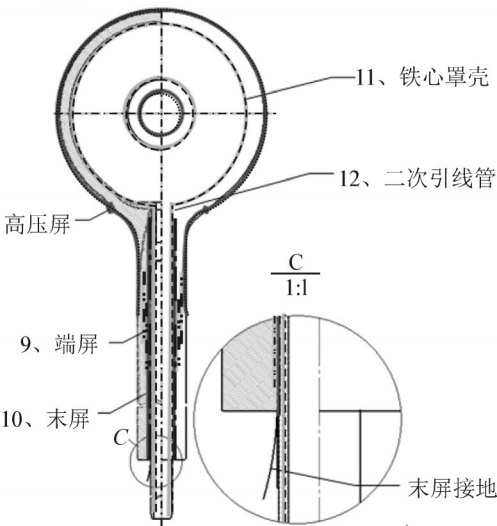


图 2 油浸倒立式电流互感器电容屏套管
Fig. 2 Capacitive screen bushing of oil-immersed-inverted current transformer

该电容屏通过 4 根等电位线与一次部件等电位连接,主绝缘内侧为铁心罩壳(二次绕组屏蔽),

铁心罩壳与二次引线管固定连接并通过底座接地排可靠接地,电容屏套管设计有多张端屏,各电容屏串联分压使得套管轴向电位逐级降低,二次引线管外侧设计有末屏,末屏与二次引线管之间包绕有电缆纸进行绝缘,产品安装时末屏与二次引线管均通过过渡件接地排接地。LVB 型油浸倒立式电流互感器运行时一次导电排对地电容由两部分组成,一部分是器身头部电容 C_1 ,这部分由高压对铁心罩壳的绝缘组成,另一部分是套管的电容屏 C_2 组成,也称直线部分绝缘^[21]。运行时末屏接地。

2 500 kV 油浸倒立式电流互感器的介质损耗因数及电容量测量分解试验方法

2.1 500 kV 倒立式电流互感器的器身头部绝缘的介质损耗因数及电容量测量方法

500 kV 变电站的电气一次接线中,500 kV 电流互感器高压一次接线端其一端与 500 kV 断路器连在一起,另一端与隔离开关接在一起。由于 500 kV 断路器一般由两个断口组成,每个断口有并联均压电容,对电流互感器的介质损耗因数和电容量测量结果影响较大,必须采用避免其带来影响的试验接线和方法。为了判断油浸倒立式电流互感器器身头部的绝缘状况,需要单独测量该部分绝缘的介质损耗因数和电容量。因投运后的电流互感器已安装就位,外壳及底座已接地,如果采用正接线方式进行测量,所测得的数据仅是倒立式电流互感器电容型套管直线段绝缘的介质损耗因数和电容量,对易发生绝缘缺陷的器身头部绝缘状况则未能有效检测^[22-28]。因此只能采用反接线的方式。但如果采用常规的反接线方式测量,所得数据是整体性的综合数据,对反映单个部位绝缘状况不灵敏,且结果易受周围设备耦合电容的影响。为消除 500 kV 断路器均压电容、隔离开关耦合电容及套管电容屏等影响,采用屏蔽的方式进行消除。测试时介质损耗电桥(此处以 AI-6000K 电桥为例)的加压线一端可靠接在电流互感器一次接线排上任意一端,另一端插入介质损耗电桥背面的 HV 端,再分别从“T 型”断路器的交叉点 T、电流互感器的末屏 CT 端及隔离开关支柱瓷瓶的中间法兰处各引一根屏蔽线接至介质损耗电桥 AI-6000K 的 C 端,具体试验接线见图 3。接线完成后,介质损耗电桥 AI-6000K 选择反接线和低压屏蔽模式进行测量,测量完成后即可得到电流互感器器身头部的介质损耗因数和电容量。值得注意的是,测量时与电流互感器连接的断路器和隔离开关均处于分闸状态。

$$\tan \delta_{\text{总}}(\%) = \frac{C_1 \tan \delta_1 + C_2 \tan \delta_2}{C_1 + C_2} =$$
$$\frac{1\,747 \times 0.17 + 0.269 \times 248.8}{1\,747 + 2\,488} = 0.182\,3\%$$

该理论数据与测试数据 0.183% 数据基本一致,说明油浸倒立式电流互感器的一次导电排对地电容 C 可以分解成头部绝缘部分电容 C_1 和套管电容屏电容 C_2 的并联。考虑到变电站邻近带电间隔对 A 相和 C 相影响较 B 相大,按照与 B 相相同的方式对 A 和 C 相分别进行了测试,测试结果见表 2,结果表明相邻带间隔的电磁干扰对测量结果影响较小。

表 2 A 相和 C 相 3 种测量方式对应的介质损耗因数及电容量
Table 2 Dielectric loss factors and capacitance of corresponding to three measurement methods of phase A and C

序号	测量方式	相别	介质损耗因数及电容量	
			$\tan \delta / \%$	C_x / pF
1	电桥采用反接线和低压屏蔽	A	0.182	1 994
		C	0.184	1 996
2	电桥采用正接线	A	0.235	246.2
		C	0.271	248.3
3	电桥采用反接线和低压屏蔽	A	0.175	1 749.0
		C	0.172	1 747.0

油浸倒立式电流互感器运行一段时间后需按周期进行停电例行试验。为及时发现缺陷,在停电实验前需要采集油样进行油中溶解气体分析,特征气体含量应满足以下标准:氢气 $\leq 150\text{ }\mu\text{L/L}$ (注意值)、总烃 $\leq 100\text{ }\mu\text{L/L}$ 、乙炔 $\leq 2\text{ }\mu\text{L/L}$ (110(66) kV)或乙炔 $\leq 1\text{ }\mu\text{L/L}$ (220 kV 及以上),否则需要进行诊断性试验^[23-28]。特别需要注意的是存在家族缺陷的产品,油样检测如有以下任一数据异常时应开展诊断性分解试验:乙炔 $\geq 0.01\text{ }\mu\text{L/L}$ 、氢气 $\geq 30\text{ }\mu\text{L/L}$ 、总烃 $\geq 10\text{ }\mu\text{L/L}$ 、一氧化碳 $\geq 200\text{ }\mu\text{L/L}$ 、微水 $\geq 15\text{ }\mu\text{L/L}$ 。由于该诊断性分解试验方法采用的是低压屏蔽方式(非高压端屏蔽),克服了油浸倒立式电流互感器末屏绝缘水平一般不高于 3 kV 电压的限制,可以采用逐步提高试验电压的方式,对绝缘状况进行更为准确的判断。试验电压可取 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。

现场对 500 kV 某变电站 5043 流变进行诊断性试验,该流变参数如下:

- 1)出厂编号:104497/104471/104503;
- 2)出厂日期:2008 年 11 月 27 日;
- 3)型号:OSKF-550;

4)投运日期:2009 年 12 月。
以往历次例行试验及油中溶解特征气体含量均正常,直到 2023 年 4 月 23 日,油色谱数据显示 B 相和 C 相油色谱数据数据首次出现了乙炔,油中溶解气体含量见表 3。

表 3 油中溶解气体含量
Table 3 Content of dissolved gases in oil
 $\mu\text{L/L}$

油中溶解气体分析	A	B	C
	本体	本体	本体
甲烷 CH_4	3.4	3.7	4.0
乙烯 C_2H_2	0.2	0.4	0.3
乙烷 C_2H_6	0.5	0.7	0.9
乙炔 C_2H_2	0	0.5	0.6
氢气 H_2	10.0	9.0	12.0
一氧化碳 CO	31.0	39.0	40.0
二氧化碳 CO_2	827.0	550.0	1 005.0
总烃	4.1	5.3	5.8

测试结果显示 A 和 B 相反接线 11 个点和正接线 11 点数据均正常,C 相流变正接线 11 个点数据正常,但是反接线和低压屏蔽方式测量时发现介质损耗因数最小值在 1 kV 为 0.201%。最大值在 7 kV,为 0.271%,最大值与最小值差值为 0.07%,超过 0.03%,数据见表 4。根据《关于明确 500 千伏色谱异常油浸倒立式电流互感器差异化运维检修策略的通知》判断为数据异常^[9]。考虑到该厂家同型号流变已存在家族性缺陷,现场使用型号为 LVQBT-500W3 的 SF_6 气体电流互感器对 5043 油浸倒立式电流互感器进行了三相的整体更换,至今运行正常。

表 4 某变电站 5043 流变 C 相头部绝缘介质损耗因数及电容量
Table 4 Insulation dielectric loss factor and capacitance at head of phase C of the 5043 current transformer at a certain substation

施加电压/kV	0.5	1	2	3	4	5
介质损耗/%	0.21	0.201	0.215	0.217	0.219	0.220
电容量/pF	1 765	1 764	1 763	1 764	1 764	1 764
施加电压/kV	6	7	8	9	10	—
介质损耗/%	0.225	0.271	0.221	0.222	0.223	—
电容量/pF	1 763	1 764	1 763	1 764	1 765	—

4 结语

- 1)油浸倒立式电流互感器介质损耗因数及电容量测量可以进行分解试验,可对头部绝缘和电容型套管直线段绝缘分别诊断。
- 2)油浸倒立式电流互感器可以采用反接线加低压屏蔽的方法,避免了末屏绝缘水平限制,便于

采用逐步提高试验电压的方式进行诊断性试验。

3)油浸倒立式电流互感器,可结合周期性检修计划进行全密封取油样,开展油色谱及微水检测,必要时结合诊断性电气试验对设备状态进行综合判断。

4)对油浸倒立式电流互感器绝缘性能有怀疑时可采用高电压法进行试验^[24],可以在 $(0.5-1.0U_m)/\sqrt{3}$ 范围内进行,根据介质损耗因数和电容量变化趋势进行判断。

参考文献

- [1] 顾文雯,柯于刚. 220 kV 倒置式电流互感器金属膨胀器喷油分析及措施[J]. 电工电气,2017(11):56-58.
GU Wenwen, KE Yugang. Cause analysis and countermeasures of 220 kV inverted current transformer metal expander oil injection[J]. Electrotechnics Electric, 2017(11): 56-58.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 马莹,王晓瑜. LVB-220W3 型倒立式电流互感器爆炸故障诊断分析[J]. 自动化技术与应用,2014,33(12):114-117.
MA Ying, WANG Xiaoyu. Analysis of explosion fault diagnosis of LVB-220W3 inverter type current transformer[J]. Techniques of Automation and Applications, 2014, 33(12): 114-117.
- [5] 钱国超,邹德旭,马仪,等. 倒立电流互感器典型缺陷及制造关键工艺分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2015,36(2):73-77.
QIAN Guochao, ZOU Dexu, MA Yi, et al. Typical defects and key manufacture technology of the inverted minimum oil current transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(2): 73-77.
- [6] 邹彬,郭森,袁聪波,等. 一起 220 kV 油浸倒立式电流互感器故障原因分析[J]. 变压器,2010,47(2):69-72.
ZOU Bin, GUO Sen, YUAN Congbo, et al. Fault analysis of 220 kV oil-immersed inverter-type current transformer[J]. Transformer, 2010, 47(2): 69-72.
- [7] 陈斌,朱亮,许蓬莱. 油浸式电流互感器一次绕组故障实例分析[J]. 浙江电力,2009,28(6):76-79.
CHEN Bin, ZHU Liang, XU Penglai. Analysis of an oil-immersed current transformer primary winding failure[J]. Zhejiang Electric Power, 2009, 28(6): 76-79.
- [8] 杨洋,黄文龙,郭锐,等. 一起罕见的电容式电流互感器缺陷的发现和析[J]. 电力电容器与无功补偿,2012,33(1):84-87.
YANG Yang, HUANG Wenlong, GUO Rui, et al. The discovery and analysis of a rare defect of capacitive current transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(1): 84-87.
- [9] 刘海峰,阎春雨,陈志勇,等. 油浸式电流互感器缺陷分析与状态诊断[J]. 河北电力技术,2006,25(4):1-2.
LIU Haifeng, YAN Chunyu, CHEN Zhiyong, et al. Defect analysis and condition diagnosis of oil-immersed TA[J]. Hebei Electric Power, 2006, 25(4): 1-2.
- [10] 张利燕,郭猛,陈志勇,等. 电流互感器故障诊断与分析[J]. 变压器,2011,48(11):57-59.
ZHANG Liyan, GUO Meng, CHEN Zhiyong, et al. Diagnosis and analysis of current transformer[J]. Transformer, 2011, 48(11): 57-59.
- [11] 梁之林,王朔. 220 kV 电流互感器故障分析[J]. 变压器, 2010,47(4):72-76.
LIANG Zhilin, WANG Shuo. Fault analysis of 220 kV current transformer[J]. Transformer, 2010, 47(4): 72-76.
- [12] 陈志勇,周阳,徐俊,等. 一起 220 kV 倒置式电流互感器事故原因分析[J]. 变压器,2017,54(11):64-67.
CHEN Zhiyong, ZHOU Yang, XU Jun, et al. Fault analysis of 220 kV inverted current transformer[J]. Transformer, 2017, 54(11): 64-67.
- [13] 肖建增,高阳,钟宏宇,等. 倒置式 CT 电容屏断裂缺陷局部放电特性研究[J]. 变压器,2016,53(2):54-58.
XIAO Jianzeng, GAO Yang, ZHONG Hongyu, et al. Research on PD characteristics of inverter-type CT under broken capacitive screen defect[J]. Transformer, 2016, 53(2): 54-58.
- [14] 徐鹏,甘强,邵新苍,等. 一起 500 kV SF₆ 气体绝缘电流互感器故障分析[J]. 变压器,2018,55(6):70-73.
XU Peng, GAN Qiang, SHAO Xincang, et al. Analysis of 500 kV SF₆ gas insulated current transformer fault[J]. Transformer, 2018, 55(6): 70-73.
- [15] 尚耀辉,赵建洲,刘亚亚,等. 油纸绝缘电流互感器的绝缘设计[J]. 电力电容器与无功补偿,2009,30(3):25-27.
SHANG Yaohui, ZHAO Jianzhou, LIU Yaya, et al. The insulation design of oil-paper insulated current transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2009, 30(3): 25-27.
- [16] 魏朝晖. 油浸倒立式电流互感器设计[J]. 变压器,2000, 37(9):6-9.
WEI Chaohui. Design of oil immersed inverted current

- transformer[J]. Transformer, 2000, 37(9): 6-9.
- [17] 阎秀恪, 孙阳, 于存湛, 等. 油浸倒立式电流互感器主绝缘电场分析与优化设计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 37-43.
- YAN Xiuke, SUN Yang, YU Cunzhan, et al. Electric field analysis and optimal design of main insulation for oil-immersed inverted current transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 37-43.
- [18] 于智伟. 油浸倒立式电流互感器[J]. 高压电器技术, 1992(2): 7-12.
- YU Zhiwei. Oil-immersed inverted current transformer[J]. High Voltage Electric Appliance Technology, 1992(2): 7-12.
- [19] 李承政, 李先艳. 油浸式电流互感器的应用及其新产品的研发[J]. 电力设备, 2007, 8(1): 29-31.
- LI Chengzheng, LI Xianyan. Application of oil-immersed current transformer and the present manner of its research & development for new products[J]. Electrical Equipment, 2007, 8(1): 29-31.
- [20] 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. Failure example and analysis on 500 kV oil-immersed inverted current transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(6): 91-94.
- [21] 刘义华, 张国强, 金建国. 油浸倒置式电流互感器的介质损耗测量方法[J]. 浙江电力, 2007, 26(2): 59-61.
- LIU Yihua, ZHANG Guoqiang, JIN Jianguo. Measurement for dielectric loss of oil-immersed inverted current transformer[J]. Zhejiang Electric Power, 2007, 26(2): 59-61.
- [22] 输变电设备状态检修试验规程: DL/T 393—2010[S]. 2010.
- Regulations of condition based maintenance & test for electric equipment: DL/T 393—2010[S]. 2010.
- [23] 国网江苏省电力有限公司设备管理部. 关于明确500千伏色谱异常油浸倒立式电流互感器差异化运维检修策略的通知[Z], 2023.
- [24] 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. Test and analysis of dielectric loss of oil-immersed inverter-type current transformer under HV[J]. Transformer, 2016, 53(1): 59-63.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.

作者简介:

柯于刚(1979—), 男, 高级工程师, 主要从事高压电气试验工作。E-mail: keyugang1092@163.com。

侯永春(1980—), 男, 高级工程师, 主要从事继电保护工作。

段光辉(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事电网变电一次设备检修相关工作。

秦伟(1975—), 男, 高级技师, 主要从事高电压试验工作。

顾文雯(1985—), 女, 高级工程师, 主要从事调度自动化运维工作。