

DOI: 10.7667/PSPC201786

特高压变压器磁屏蔽接地线断裂引起局部放电 异常的检测与分析

周加斌, 陈玉峰, 井雨刚, 许伟, 朱文兵, 朱庆东, 辜超

(国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003)

摘要: 针对特高压某站主变压器交接试验中出现的局部放电异常现象, 排除了外部干扰、试验检测系统的影响, 分析了变压器磁屏蔽及其接地的结构特点, 对放电部位进行定位。首次发现了特高压主体变压器内存在的磁屏蔽接地线断裂重大缺陷, 该缺陷导致磁屏蔽悬浮放电产生大量乙炔。更换磁屏蔽接地后变压器运行正常, 成功消除了该缺陷。分析处理结果表明, 综合运用局部放电试验方法、超声波定位方法和油中溶解气体色谱分析能够准确判断缺陷类型并进行精准定位。

关键词: 特高压变压器; 局部放电; 超声波定位; 磁屏蔽; 接地线

Detection and analysis of abnormal partial discharge caused by the fracture of magnetic shielding ground line in UHV transformer

ZHOU Jiabin, CHEN Yufeng, JING Yugang, XU Wei, ZHU Wenbing, ZHU Qingdong, GU Chao

(State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China)

Abstract: Based on the detection and analysis of the abnormal phenomenon in UHV transformer partial discharge test, this paper eliminates the influence of external disturbance and the test system, analyzes the structure characteristics of transformer magnetic shielding and grounding, and carries out the discharge location. It first discovers the fracture of magnetic shielding ground line in UHV transformer, which causes the magnetic shielding floating potential discharge and thereby produce a large amount of acetylene gas. The defect is eliminated successfully, and then the transformer operates normally by replacing the magnetic shielding ground line. The analysis shows that the integrated use of partial discharge test, ultrasonic positioning method and oil chromatographic analysis can accurately diagnose defect types and position them.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (No. 2015AA050204).

Key words: UHV transformer; partial discharge; ultrasonic positioning; magnetic shielding; ground line

0 引言

特高压输电能够实现大功率的远距离输送^[1-2], 1000 kV 特高压变压器是特高压变电设备中最重要的设备之一, 在设备的长途运输及现场安装过程中可能出现内部缺陷, 开展特高压变压器局部放电试验能够准确地判断变压器内部绝缘状态^[3], 及时发现设备内部缺陷, 避免设备潜在缺陷导致的系统调试或正常运行时的突发性故障, 对提高特高压系统的安全稳定运行具有重要意义。

特高压变压器因电压高、体积大、容量大的特点, 磁路也相应较长, 漏磁通会在油箱壁上、主磁通在铁芯、夹件上产生涡流损耗和附加损耗。为降低涡流损耗及附加损耗引起的变压器发热, 提高变压器经济运行效益, 交流特高压变压器设计时在油箱结构上采用磁屏蔽措施^[4-5]。磁屏蔽是由高导磁率的硅钢片条叠装组成, 装在变压器油箱内壁上用以对来自绕组端部的漏磁通进行疏导, 降低其在油箱中产生的涡流损耗和附加损耗。硅钢片磁屏蔽安装时需要使硅钢片与油箱壁之间具有良好绝缘并可靠接地, 若存在绝缘破损或接地不良, 将引起局部过热或放电缺陷。

目前, 在运变压器发现的磁屏蔽缺陷主要有设计缺陷、磁屏蔽绝缘破损、酚醛绝缘垫破损、磁屏蔽与铁芯搭接形成多点接地等原因造成局部过热或者局部放电^[6-8]。综合运用局部放电试验、超声波局部放电电监测和油中溶解气体色谱分析等多种检测手段^[9], 能够较准确地判断变压器内部缺陷类型和严重程度, 并对放电部位进行有效的定位分析。本文对 1000 kV 某站 1 号主变 A 相交接试验中局部放电异常现象进行了分析和研究, 首次发现了特高压主变变压器内存在的磁屏蔽接地线断裂重大缺陷, 探讨了该放电缺陷的检测、诊断和处理技术。

1 特高压变压器局部放电试验异常情况

1.1 被试变压器技术参数

1000 kV 某站 1 号主变压器由主体变压器(以下简称主体变)和调压补偿变压器(以下简称调补变)组成, 其中主体变的主要技术参数为

设备型号: ODFPS-1000000/1000

额定容量: 1000MVA/1000MVA/334 MVA

额定电流: 1649.6A/3299.1A/3036.3A

额定电压: $1050/\sqrt{3}/525/\sqrt{3} \pm 4 \times 1.25\%/110$ kV

联结组标号: Ia0i0

冷却方式: OFAF

相数: 单相

调压方式: 中性点无励磁调压

1.2 试验接线、加压程序和判断标准

试验采用 GB/T 50832-2013 和 DL/T 1275-2013 标准规定的接线方法, 试验电源使用额定输出频率为 30~300 Hz 的变频电源, 采用主体变低压侧端子单边加压的方式, 分别从高压、中压、低压端子套管末屏处抽取信号测量高压、中压、低压绕组局部放电量, 试验接线如图 1 所示, 图中: L 为补偿电抗器; C 为电容分压器; PD 为局部放电测量仪(以下简称局放仪); C1、C2、C3 为耦合电容(套管电容); ZK1、ZK2、ZK3 为检测阻抗; a1、x1 为低压绕组首末端; A 为高压端; Am 为中压端; X1 为中性点。

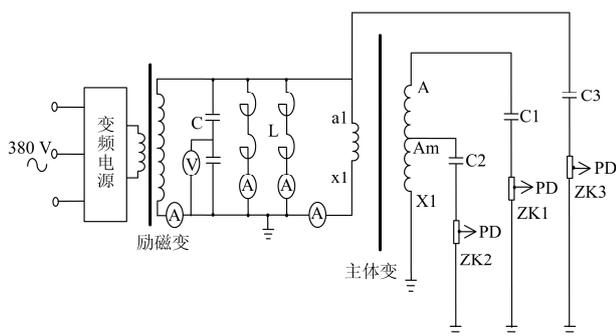


图 1 主体变试验接线图

Fig. 1 Test wiring diagram of main transformer

依据相关标准的技术要求, 1000 kV 变压器主体变现场局部放电试验电压及其加压程序^[10-13]如图 2 所示。

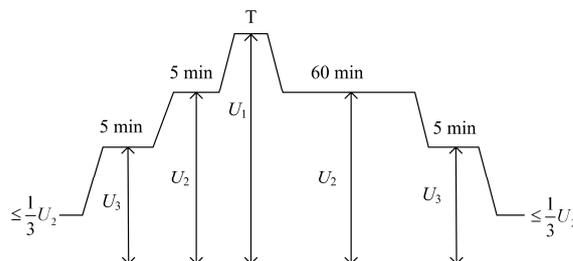


图 2 主体变局部放电试验加压程序

Fig. 2 Partial discharge test procedure for the main transformer

1000 kV 系统最高运行电压 U_m 为 1100 kV, 主体变试验时各电压为: $U_1=1.5U_m/\sqrt{3}=952.6$ kV, $U_2=1.3U_m/\sqrt{3}=825.6$ kV, $U_3=1.1U_m/\sqrt{3}=698.6$ kV, $T=120 \times \text{额定频率}/\text{试验频率}(s)$, 但不少于 15 s。

试验合格的判断标准如下所述^[10-13]。

1) 试验电压不产生突然下降。

2) 在 $1.3U_m/\sqrt{3}$ 的长时试验期间, 主体变 1000 kV 端子的局部放电量的连续水平不应大于 100 pC, 500 kV 端子的局部放电量的连续水平不应大于 200 pC, 110 kV 端子的局部放电量的连续水平不应大于 300 pC。

3) 在 $1.3U_m/\sqrt{3}$ 下, 局部放电不呈现持续增加的趋势, 偶然出现较高幅值的脉冲以及明显的外部电晕放电脉冲可以不计入。

4) 在 $1.1U_m/\sqrt{3}$ 下, 视在电荷量的连续水平应不大于 100 pC。

5) 试验后, 被试变压器的油中溶解气体分析结果应合格, 试验前后结果应无明显差别。

1.3 试验异常情况

2016 年 4 月 14 日, 试验人员开展 1 号 A 主体变局部放电试验, 局放仪为保定天威 TWPD-2E 型四通道局部放电测量仪, 高、中、低压侧检测阻抗分别为 6、5、4 号阻抗, 试验频率为 149.5 Hz。

开始升压至 20 kV 左右时, 局放仪上开始出现放电信号, 随着电压升高, 放电信号增强, 局放量约为 3000~5000 pC, 如图 3 所示。采用紫外成像仪进行观测, 发现中压套管有放电现象^[14-15], 如图 4 所示。

后经反复升降电压后起始放电电压升高, 低压侧施加 100 kV 以下电压不再出现上述外部电晕放电现象, 可能的原因是表面污秽在反复升压过程中不再附着于套管。继续升压至 110 kV 时, 局放信号突然增加至超出局放仪量程, 且高中低压侧通道信号均同步达到溢出状态, 达到数十万 pC, 无法通过

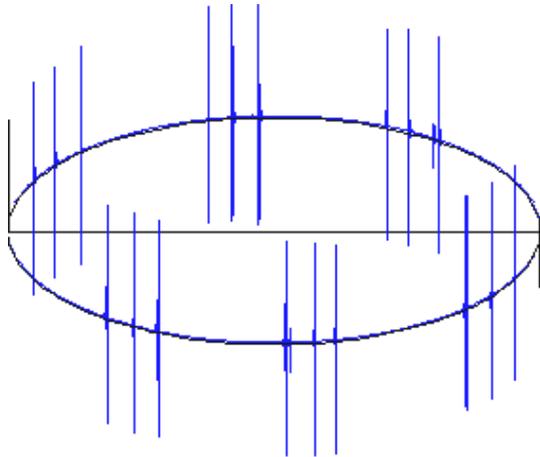


图 3 局放干扰信号

Fig. 3 Interference signal of partial discharge



图 5 超声传感器的布置

Fig. 5 Arrangement of ultrasonic sensors



图 4 中压套管电晕放电图

Fig. 4 Corona discharge of medium voltage bushing

传递关系确定放电来源。采用紫外成像仪检查加压回路及主体变外部时未再发现明显放电点。降压至 80 kV 时该信号消失，重复试验多次上述现象未消失。

为确认试验加压系统和检测系统是否存在故障及干扰，4月15日进行#1B主体变局部放电试验，结果无异常。16日再次进行1号A主体变局放试验，加压至110 kV时试验现象与14日相同。

2 放电点的定位

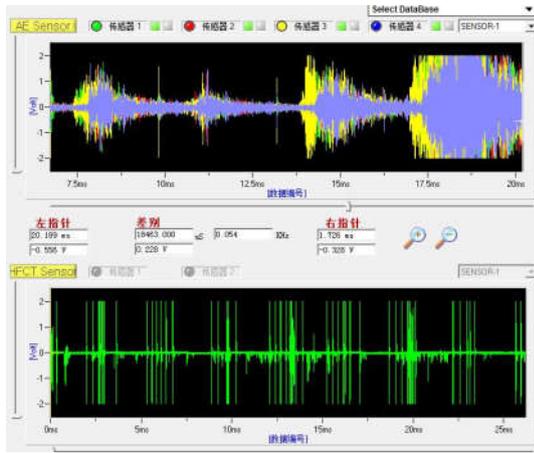
为确定放电点位置，试验人员采用 PD-TP500A+超声检测仪对变压器本体进行检测及定位，传感器频带范围为 80~300 kHz，将四个超声传感器分别布置在高压、中压、低压、中性点套管下方，铁芯接地铜排上布置高频电流传感器，中压套管附近检测到放电信号。为准确判断放电点位置，试验人员重点对中压侧套管附近进行了超声传感器的布置，其位置如图 5。

各传感器位置：1号距变压器顶盖 62 cm，距中间加强筋 33 cm；2号距变压器顶盖 119 cm，距中间加强筋 28 cm；3号距变压器顶盖 24 cm，距中间加强筋 35 cm；4号距变压器顶盖 119 cm，距中间加强筋 18 cm。

加压至局放仪上出现局部放电信号时测量超声信号，如图 6 所示，其中图 6(a)为采集 30 ms 时长的放电信号波形，图 6 (b)为 7.5~20 ms 区间的信号。图中可以看出四个超声传感器信号及铁芯接地电流能检测到明显的放电信号，且均为超量程状态(刻度范围为-2.5~2.5 V)，与局放仪测试数据特点相吻合。3号传感器信号超前4号传感器信号约 0.5 ms，可以判断变压器内部存在显著的放电现象，且放电部位在3号传感器附近，靠近变压器顶盖。基于时差及幅值的比较，试验人员确定了放电区域，如图 7 所示。现场与厂家技术人员沟通得知，该区域为高、中压绕组上端 500 kV 场强区域，油箱壁装有磁屏蔽。



(a)



(b)
图 6 局部放电超声信号

Fig. 6 Ultrasonic partial discharge signal

2016年4月16日, 试验人员对1号主变主体变A相局放试验后的油样进行了油中溶解气体色谱分析, 分析结果如表1。



图 7 放电点位置
Fig. 7 Discharge position

表 1 油中溶解气体色谱分析检测结果

Table 1 Chromatographic analysis results of dissolved gas in oil

| 气体 | CH ₄ | C ₂ H ₆ | C ₂ H ₄ | C ₂ H ₂ | H ₂ | 总烃 | CO | CO ₂ |
|----------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|-------|----|-----------------|
| 含量/ ($\mu\text{L/L}$) | 22 | 2.1 | 22 | 87 | 151 | 133.1 | 30 | 70 |

根据三比值法和特征气体, 被试变压器内乙炔含量达到 87 $\mu\text{L/L}$, 可以判断变压器内存在放电缺陷, 结合局放仪和超声检测仪上放电信号特征, 符合悬浮放电特点。

3 现场检查与分析

3.1 磁屏蔽结构

1000 kV 变压器侧面油箱上装设的磁屏蔽为 L

型, 来自绕组端部的漏磁通过磁屏蔽进入上铁轭及下铁轭。因铁芯拉带通常为无磁钢材料制作, 磁通受其阻挡经过条形磁屏蔽进入与其相邻的 L 型磁屏蔽, 进而进入铁芯的上轭及下轭形成闭合回路, 减少了流经油箱壁的漏磁通, 其安装结构如图 8 所示。

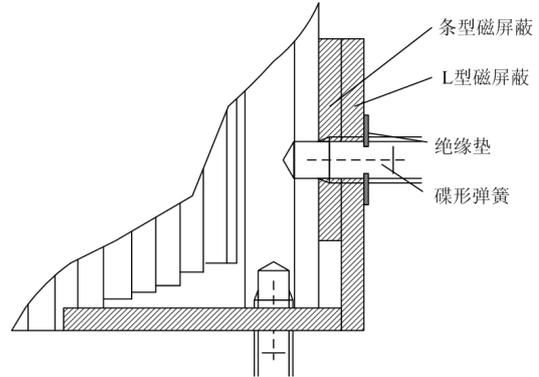


图 8 L 型磁屏蔽结构

Fig. 8 L type magnetic shielding structure

由图 8 可知, 变压器的漏磁主要通过 L 型磁屏蔽进入铁芯形成闭合回路, 少量漏磁通过油箱壁上的磁屏蔽形成闭合。同时为减少该部分漏磁通流经夹件的压钉和支板产生局部过热, 该部件制造时应选用高磁阻材料, 使其与绕组距离适度增大^[16]。

3.2 磁屏蔽接地结构

L 型磁屏蔽接地系统结构如图 9 所示。

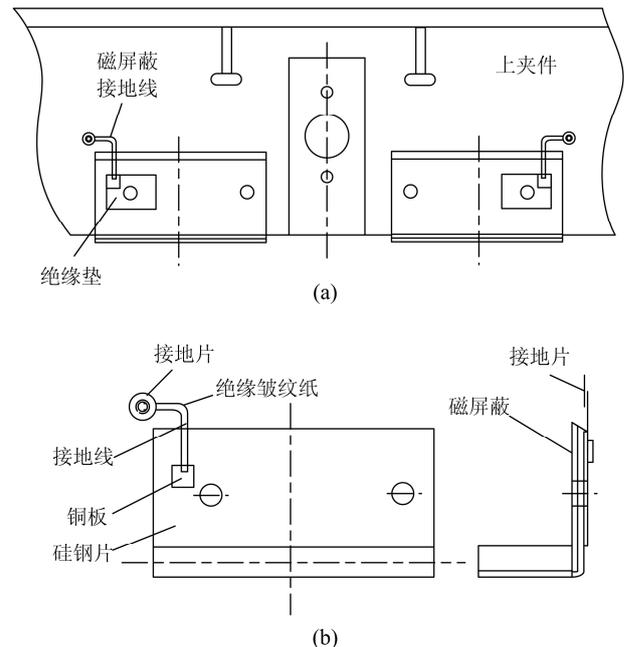


图 9 L 型磁屏蔽接地结构

Fig. 9 Grounding structure of L type magnetic shielding

L型磁屏蔽接地的安装工艺为：将接地引线(紫铜带)焊接在铜板上，然后采用铜焊工艺将铜板与硅钢片焊在一起，铜和硅钢片的过渡部位应工艺良好，确保焊点牢固。将焊接有地线的硅钢片均匀粘接在L型磁屏蔽上，接地硅钢片与压紧螺栓之间采用纸板绝缘垫隔开，确保其与磁屏蔽之间可靠连接。接地线的另一端焊接有接地片，将其引出后在上夹件可靠接地^[17]。如果磁屏蔽接地存在接触不良缺陷，则可能造成磁屏蔽在电场中的电位悬浮而产生局部放电。

3.3 现场检查情况

2016年4月18日放油进人检查后发现试验人员标定的放电区域为上夹件磁屏蔽处，如图10所示，焊有接地线的铜板与磁屏蔽硅钢片之间的焊接部位断裂，造成中压侧磁屏蔽脱离接地，因电位悬浮产生局部放电，放电造成磁屏蔽接地部位明显烧损，需进行更换，高、中压线圈绝缘未受损伤。该主变在出厂试验时情况良好，造成该缺陷的可能原因是变压器制造工艺控制不严，存在磁屏蔽接地线焊接工艺不良和固定不合理等缺陷，设备经过长距离运输及现场安装中振动力作用下使得焊接处逐步开裂，并最终断开，导致悬浮放电产生大量乙炔。根据检查结果，厂家技术人员对断裂的磁屏蔽接地线及绝缘件进行了更换，并重新滤油处理后局部放电试验通过，局放量符合标准要求。工程投运至今，该变压器运行正常，未发现乙炔含量升高。



图10 磁屏蔽放电部位

Fig. 10 Discharge position of magnetic shielding

4 结论

本文中特对高压变压器现场交接试验中局部放电异常现象进行了分析，首次在1000 kV变压器中发现因磁屏蔽接地不良导致的悬浮电位放电，证明了现场局部放电试验能够有效发现变压器在制造、运输和安装中产生的绝缘缺陷，检测分析与处理过

程表明，综合局部放电试验方法、超声波定位方法和油中溶解气体色谱的分析能够准确判断变压器内部缺陷类型并进行精准定位。

该缺陷的出现值得特高压变压器生产厂家在设计 and 制造时予以重视，采用良好的结构和工艺，防止交接验收及运行后产生灾难性故障。更换磁屏蔽接地后该变压器运行正常，成功消除了缺陷，保障了设备的安全稳定运行。

参考文献

- [1] 高凡, 吴军, 刘涤尘, 等. 特高压电网社会效益评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 12-17.
GAO Fan, WU Jun, LIU Dichen, et al. Research on the social benefit evaluation method of UHV power grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 12-17.
- [2] 耿庆申, 卢玉, 樊海荣, 等. 特高压和超高压交流输电系统运行损耗比较分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 72-77.
GENG Qingshen, LU Yu, FAN Hairong, et al. Comparative analysis of operation losses of UHV AC and EHV AC transmission systems[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 72-77.
- [3] 陈洪岗, 祝达康, 林一. 交流特高压现场交接关键试验技术研究[J]. 华东电力, 2014, 42(12): 2811-2814.
CHEN Honggang, ZHU Dakang, LIN Yi. Key testing technology for AC UHV on-site handover[J]. East China Electric Power, 2014, 42(12): 2811-2814.
- [4] 李鹏, 李金忠, 崔博源, 等. 特高压交流输电变电装备最新技术发展[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1068-1078.
LI Peng, LI Jinzhong, CUI Boyuan, et al. Achievements in the newest technology of UHV AC power transmission equipment[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1068-1078.
- [5] 官澜, 李光范, 李博, 等. 我国特高压电力变压器研制技术及发展[J]. 变压器, 2014, 51(8): 28-33.
GUAN Lan, LI Guangfan, LI Bo, et al. Manufacture technology and development of UHV power transformer in China[J]. Transformer, 2014, 51(8): 28-33.
- [6] 杨敏祥, 赵雪松, 宋巍, 等. 一起500 kV主变低压侧磁屏蔽绝缘破损的分析与验证[J]. 华北电力技术, 2015(5): 7-12.
YANG Minxiang, ZHAO Xuesong, SONG Wei, et al. The analysis and verification of insulation damage in the low voltage side magnetic shield of a 500 kV transformer[J]. North China Electric Power, 2015(5): 7-12.
- [7] 徐铭. 840 MVA主变压器磁屏蔽故障分析及处理[J].

- 水电与新能源, 2016(1): 53-59.
- XU Ge. Analysis and treatment of a magnetic shielding fault in 840 MVA main transformer[J]. Hydropower and New Energy, 2016(1): 53-59.
- [8] 李伟, 王刘芳, 余国钢. 大型电力变压器磁屏蔽异常实例及分析[J]. 安徽电力, 2005, 22(2): 1-5.
- LI Wei, WANG Liufang, YU Guogang. Example and analysis of magnetic shield fault of large power transformer[J]. Anhui Electric Power, 2005, 22(2): 1-5.
- [9] 杨小铭, 王煜, 饶丹, 等. 变压器状态监测组件功能整合研究和性能提升设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 130-135.
- YANG Xiaoming, WANG Yu, RAO Dan, et al. Design and application of IED in integrated monitoring intelligent component of transformer[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 130-135.
- [10] 1000 kV 系统电气装置安装工程电气设备交接试验标准: GB/T 50832—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- Standard for acceptance test of electric equipment of 1000 kV system electric equipment installation engineering: GB/T 50832—2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [11] 1000 kV 变压器局部放电现场测量技术导则: DL/T 1275—2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- Guide for on-site partial discharge measurement for 1000 kV power transformers: DL/T 1275—2013[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [12] 韩金华, 夏中原, 王伟, 等. 特高压变压器现场局部放电试验的变频电源方法应用[J]. 高压电器, 2013, 49(10): 51-57.
- HAN Jinhua, XIA Zhongyuan, WANG Wei, et al. Application of variable frequency power supply method to in-site ACLD test of 1000 kV UHV transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(10): 51-57.
- [13] 邓万婷, 鲁非, 罗维, 等. 交流特高压主变调变联合局放试验方法[J]. 变压器, 2016, 53(5): 48-51.
- DENG Wanting, LU Fei, LUO Wei, et al. United PD test method for UHV AC main and voltage regulating and compensating transformer[J]. Transformer, 2016, 53(5): 48-51.
- [14] 聂德鑫, 伍志荣, 罗先中, 等. 特高压变压器套管局部放电试验技术分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1448-1454.
- NIE Dexin, WU Zhirong, LUO Xianzhong, et al. Analysis on the partial discharge test technology of UHV transformer bushing[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1448-1454.
- [15] 李艳鹏, 晋涛, 张健. 紫外成像技术在特高压变压器局部放电试验中的应用[J]. 高压电器, 2013, 49(11): 123-126.
- LI Yanpeng, JIN Tao, ZHANG Jian. Application of ultraviolet imagery technology in partial discharge measurement test of UHV transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(11): 123-126.
- [16] 代金龙. 油浸式变压器、电抗器油箱磁屏蔽的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- DAI Jinlong. The research on magnetic-shielded tank of oil-immersed transformers & reactors[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [17] 张福东, 周明辉, 王洪伟, 等. 浅析变压器的磁屏蔽结构[J]. 变压器, 2011, 48(9): 17-20.
- ZHANG Fudong, ZHOU Minghui, WANG Hongwei, et al. Brief discussion on magnetic shielding structure of transformer[J]. Transformer, 2011, 48(9): 17-20.

收稿日期: 2017-08-30; 修回日期: 2017-11-07

作者简介:

周加斌(1986—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 研究方向为变压器状态评估与故障诊断; E-mail: zhoujb1986@sina.com

陈玉峰(1970—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为变压器状态评估与故障诊断; E-mail: chen-yufeng169@sina.com

井雨刚(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网继电保护现场调试。E-mail: jyg_jing@163.com

(编辑 周金梅)