

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.11.034

基于宽频带脉冲电流法的变压器局部放电多端检测技术研究

刘宏亮¹, 丁斌¹, 高树国¹, 齐辉², 张轩瑞³, 李军浩³

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 石家庄 050021; 2. 国网河北省有限公司石家庄分公司, 石家庄 050021; 3. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 为了多方面反映局部放电信号所含信息以及变压器绕组对局部放电信号传播的影响,文中在35 kV变压器构造悬浮放电和尖端放电缺陷,基于宽频带脉冲电流法测量局部放电发生时各检测点的脉冲信号,研究不同类型、不同位置的局部放电信号特征。研究表明,不同缺陷信号波形相似而统计特征不同;不同相放电时,套管末屏信号相较于铁心与中性点信号有明显变化;绕组对高频局放信号具有“选频”作用。

关键词: 脉冲电流法; 宽频带; 变压器; 多端检测

Multi-terminal PD Detection Technology of Transformer Based on Wide Bandwidth Pulse Current Method

LIU Hongliang¹, DING Bin¹, GAO Shuguo¹, QI Hui², ZHANG Xuanrui³, LI Junhao³

(1. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China;
2. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. Shijiazhuang Power Supply Branch, Shijiazhuang 050021, China;
3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To understand the information of partial discharge (PD) and the influence of transformer winding on PD signal propagation, two defect models of suspended discharge and point discharge are built in a 35 kV transformer. The signal at each detection point is measured based on the wide bandwidth pulse current method, and the characteristics of PD signals in different types and at different positions are analyzed. Result shows that: the signal waveforms of different defects are similar but their statistical characteristics are different; the signal from the bushing tap has a more significant change compared with the signals from the core and the neutral point of the winding when PD occurs in different phases; and the winding has a “frequency selection” effect for PD signal.

Key words: pulse current method; wide bandwidth; transformer; multi-terminal detection

0 引言

电力变压器作为电力系统的关键设备,其安全可靠运行对电力系统的稳定有重要意义^[1-2]。电力变压器故障的主要形式是绝缘故障,而局部放电是导致绝缘故障的重要原因。目前,电力变压器局部放电检测方法主要包括:脉冲电流法^[3-4]、特高频法^[5-7]、超声检测法^[8-9]、油中气体分析法^[10-11]等。传统脉冲电流法测量频率低、频带窄、易受干扰;特高频法抗干扰能力强,但无法准确获得视在放电量;超声传感器灵敏度不高且影响因素较多;油中气体分析法的时效性不强。近年来,随着高频脉冲电流传感器

(HFCT)的应用,宽频带脉冲电流法已经广泛应用于变压器局部放电检测^[12-17],对变压器绝缘特性有了更深入的研究^[18-19]。宽频带脉冲电流法与传统脉冲电流法相比,与变压器没有电气连接,具有检测频带宽、局部放电信息量大的优点,更能真实反映局部放电原始脉冲电流的特征。

在变压器局部放电检测时,通常只能从高中压套管末屏接地线、绕组中性点接地线、铁心及夹件接地线等有限的几个检测点获得信号。同一次放电信号经过绕组传播到不同检测点时,会受到绕组结构和传播特性的影响^[20],在不同检测点对同一次放电信号的测量结果也不尽相同。许多学者已经

针对变压器绕组结构建立电路模型和多导体传输线模型仿真研究高频局部放电信号在变压器中的传播特性^[21-23]。而试验方面对于变压器传播特性验证较少,对于不同检测点之间信号的差异认识不足。

文中在实体变压器上构造悬浮放电和尖端放电两种缺陷,测量不同类型、不同放电位置的局部放电在套管末屏、铁心和绕组中性点接地线的高频脉冲电流信号,分析了绕组传播特性对于信号检测的影响,对现场局部放电检测点的选取有指导意义。

1 实验系统建立

1.1 变压器模型及缺陷设置

实验所用变压器模型为35 kV双绕组油浸式变压器,低压绕组三角形连接,额定电压400 V;高压绕组星形连接,额定电压35 kV。变压器模型截面见图1,三相高压套管下端与高压绕组连接处可内置缺陷,通过控制台在三相低压绕组感应式加压,在高压侧激发故障源产生局部放电信号。

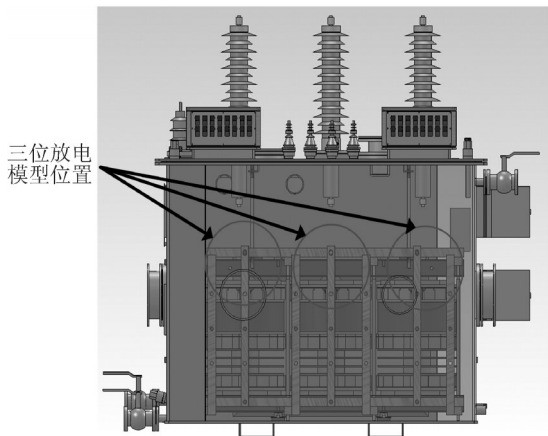


图1 35 kV变压器
Fig. 1 35 kV transformer

实验所用悬浮和尖端放电模型结构见图2。模型由带孔有机玻璃管、地电极和高压电极组成,高压电极接套管底部高压端,地电极接地。悬浮放电模型将悬浮放电填充物放置在两电极之间产生悬浮电位,尖端放电模型通过针状金属产生高的面电荷密度,当电场强度达到放电的要求时,模型出现放电,从而模拟变压器悬浮和尖端放电缺陷。

1.2 测量系统

三相低压绕组同时加压,高压绕组开路,HFCT接在A、B、C三相高压套管末屏接地线、铁心和中性点接地线处,测量各检测点的脉冲电流信号,见图3, C_0 为套管电容。HFCT有效带宽为1~30 MHz,转换特性不低于5 mV/mA,通过50 Ω同轴电缆与示波器相连。示波器最大采样率2.5 GS/s,模拟带宽500 MHz。

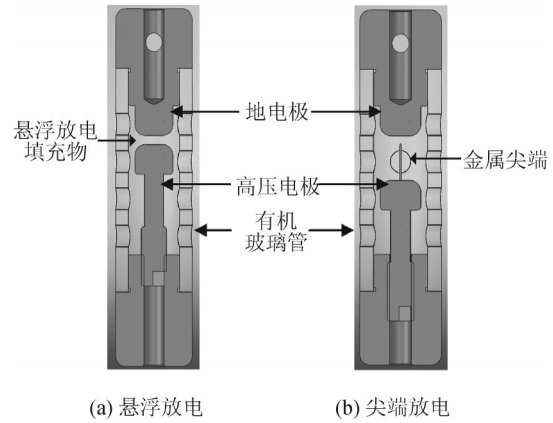


图2 局部放电模型

Fig. 2 Models of PD defect

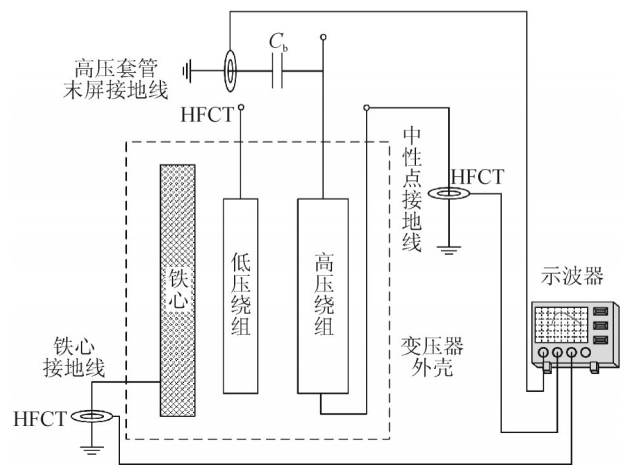


图3 测量接线图

Fig. 3 Connection diagram of PD detection

2 多检测点脉冲电流信号测量结果

2.1 不同放电类型测量结果对比

A相发生悬浮放电时,各检测点脉冲时域波形见图4。A相套管末屏信号迅速达到峰值又迅速下降,持续时间为0.2 μs,幅值大,波形畸变小且极性明显。A相发生放电时,B、C相套管末屏均能检测到脉冲信号,波形发生明显畸变,波头出现高频振荡,且脉冲极性与A相相反,持续时间为0.4 μs。信号衰减明显,B相信号衰减19.3 dB,C相信号衰减17 dB。铁心接地点脉冲电流信号表现为高频振荡与低频振荡叠加,高频振荡持续0.1 μs,低频信号持续0.4 μs。信号整体表现与A相信号极性相同,幅值较A相衰减9.3 dB。高压绕组中性点信号在开始阶段出现高频振荡,持续0.1 μs,随后出现低频振荡,振荡持续时间为0.5 μs。中性点脉冲极性与A相套管末屏信号极性相同,幅值较A相衰减13.7 dB。

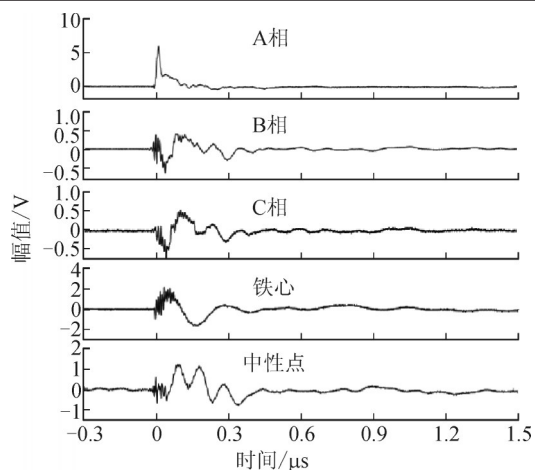


图4 悬浮放电时域波形

Fig. 4 Time domain waveform of PD signal of suspended discharge

A相悬浮放电各检测点频域特征见图5。放电发生在A相套管与高压绕组连接处,信号通过套管电容耦合到末屏,A相套管末屏处HFCT测得信号

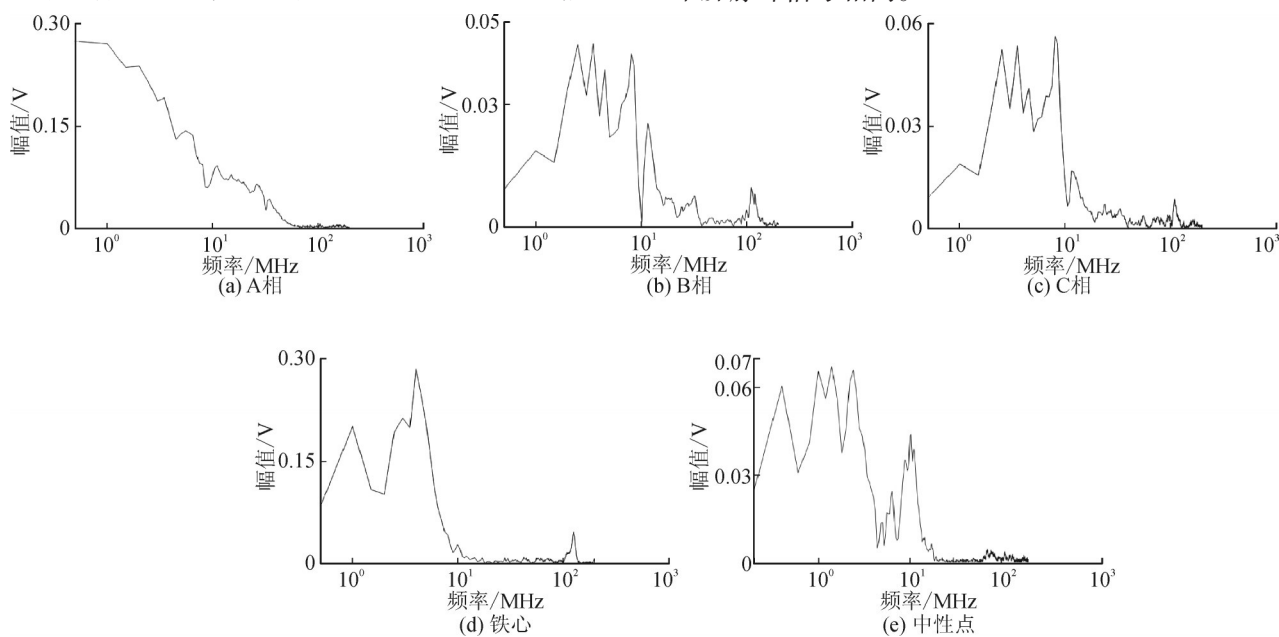


图5 频谱分析

Fig. 5 Spectrum analysis of PD signal

悬浮和尖端放电都表现为在绕组的相同位置高压电极对地电极发生的击穿放电现象,击穿信号在HFCT检测频带内差别小,因而在各检测点的单个脉冲时域波形没有明显区别,而其统计特征却有明显差异。悬浮放电和尖端放电的PRPD谱图见图7。悬浮放电在正、负半周分布对称,集中在正、负半周电压峰值附近。这是由于位于两电极间的金属在正、负半周电压作用下,对电场的畸变作用是相同的,因此放电信号表现为正、负半周对称。尖端放电具有明显的极性效应:在正半周放电脉冲数多,主要分布在电压峰值附近,而在负半周放电脉冲数

畸变最小,最接近原始局部放电信号。从频谱可以看出,放电的能量主要集中在10 MHz以下,且随着频率越高能量越小。B、C相脉冲电流信号频谱基本相同,主要集中在1~10 MHz范围内,且在100 MHz附近存在峰值,B相在11.5 MHz的峰值明显大于C相。铁心接地点处脉冲电流信号主要频率在10 MHz以下,高频振荡频率为126 MHz,频率峰值数较少。高压绕组中性点脉冲电流信号10 MHz附近的频率分量较大。

A相尖端放电各检测点脉冲时域波形见图6。与图4中悬浮放电时各检测点脉冲波形没有明显的差别,均表现为A相末屏信号畸变小、幅值大、持续时间长;B、C相末屏信号衰减、畸变明显,且极性与A相信号相反;铁心接地脉冲信号高频信号与低频信号叠加,信号幅值大;绕组中性点脉冲信号开始阶段出现高频振荡随后出现低频振荡,极性与A相末屏脉冲信号相同。

较少。这是由于在正极性下随着电压升高尖电极附近出现流柱,流柱前方的空间正电荷加强流柱前方电场,促进放电进一步发展;负极性下,尖电极附近的正电荷加强尖电极附近电场而削弱流柱前方电场,流柱发展较缓慢,因此正极性下尖端放电比负极性下更为剧烈。

2.2 不同放电位置测量结果对比

局部放电模型位于B相和C相套管与高压绕组连接处时各个检测点的波形见图8。局部放电位于B相时,B相套管末屏信号幅值大、畸变小,A、C相信号幅值较小,极性与B相相反。C相发生放电时,C相

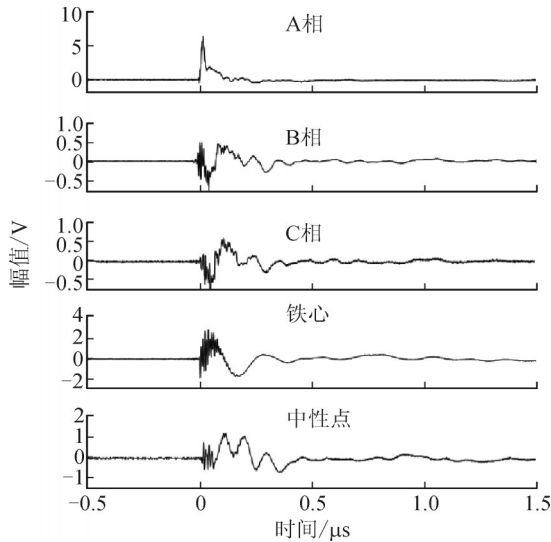


图6 尖端放电时域波形

Fig. 6 Time domain waveform of PD signal of point discharge

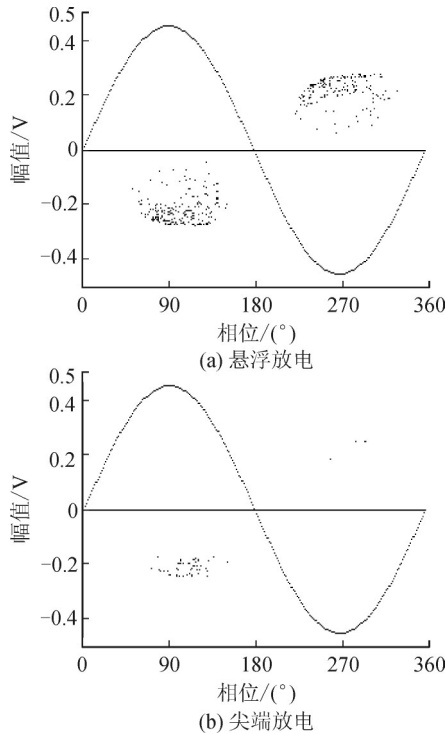


图7 不同缺陷PRPD谱图

Fig. 7 PRPD patterns of different type of defect

套管末屏信号幅值较大而A、B相信号衰减明显。A、B、C三相发生局部放电时,铁心接地点和绕组中性点脉冲信号区别较小,仅从HFCT检测获得的局部放电信号时域波形很难区别局部放电所在位置。

3 局部放电传播特征分析

对于脉冲电流信号的传播,变压器绕组可看作线性时不变系统。由于局部放电信号通过套管电容耦合到末屏,信号畸变小、幅值大,因此将放电所

在相的套管末屏信号近似为原始局部放电信号,则传递函数的频率响应特性 $H(j\omega)$ 可由式(1)获得

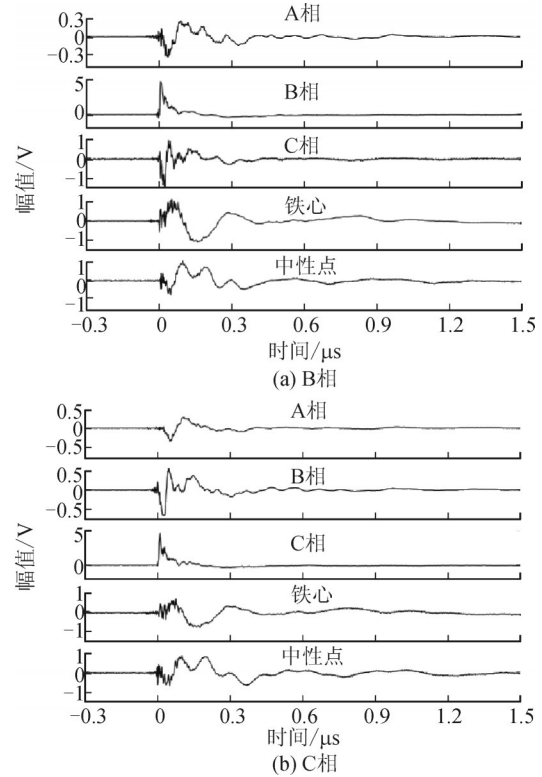


图8 B、C相局部放电时域波形

Fig. 8 Time domain waveform of PD signal while PD occurs in B and C phase

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \quad (1)$$

式(1)中: $X(j\omega)$ 为放电相套管末屏脉冲信号的傅里叶变换; $Y(j\omega)$ 为其他脉冲信号的傅里叶变换。

以A相为例,A相局部放电时,各检测点脉冲电流信号对A相套管末屏信号在0~30 MHz频率范围内的传递函数见图9。B、C相套管末屏的传递函数较为接近,在8.6 MHz处存在极大值点而在10 MHz处存在极小值点。绕组中性点传递函数在10 MHz处存在极大值点,而铁心接地点传递函数的1~5 MHz存在一系列极值点,极大值点的频率为4.4 MHz。

变压器绕组在高频下可以等效为阻、容、感混合网络结构,绕组存在一系列的谐振点,传递函数会出现极值点,极值点频率与绕组结构参数有关。因此,绕组对局部放电信号的传播具有一定的“选频”作用,能特定通过信号的某些频率分量并衰减其他频率分量。从图9中传递函数的测量结果上看,6~12 MHz范围内的信号更容易沿着绕组传播,其中10 MHz分量在传播到绕组中性点处由中性点接地线流入大地,因此表现为B、C两相套管末屏传递函数在10 MHz处有极小值点而绕组中性点传递

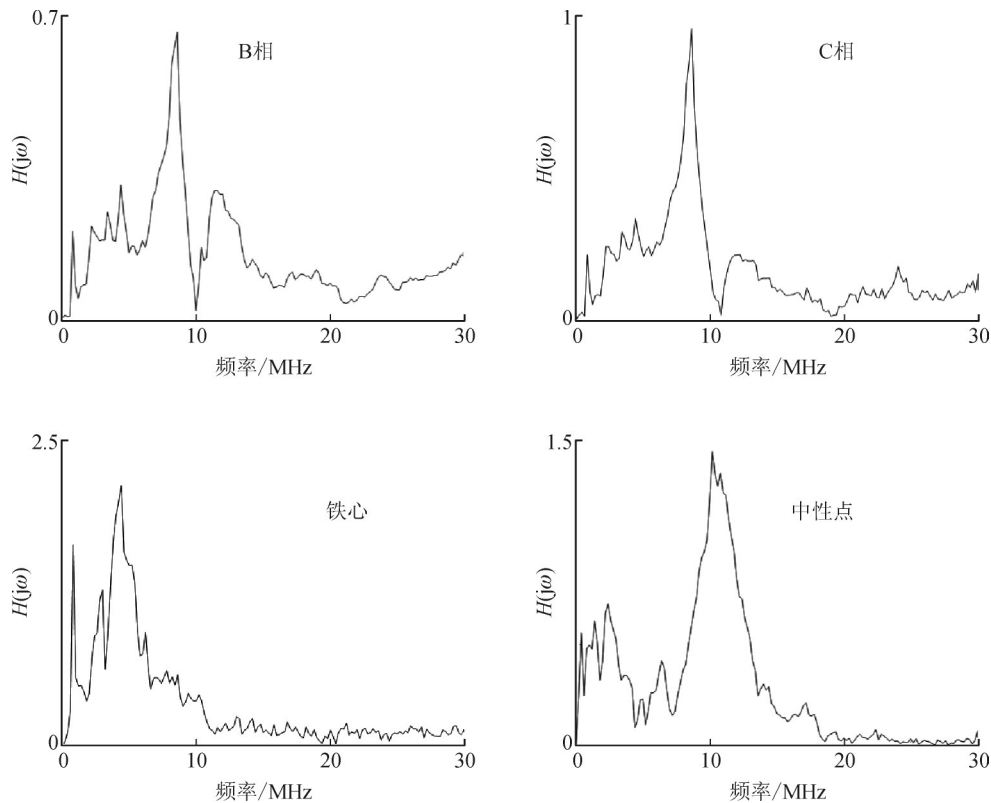


图9 传递函数图像

Fig. 9 Transfer function diagram

函数在 10 MHz 处有极大值点。频率在 1~5 MHz 范围内的信号更容易由绕组与铁心之间的耦合电容流入大地,表现为铁心接地点脉冲时域波形的低频振荡部分。

4 结论

文中基于宽频带脉冲电流法,在 35 kV 变压器模型的套管与高压绕组之间设置悬浮和尖端放电两种故障,在三相套管末屏接地线、铁心接地线和绕组中性点接地线测量局部放电脉冲电流信号,对比实验结果得到以下结论:

1)悬浮和尖端放电在各检测点的脉冲时域波形区别不大,都表现为高压绕组主绝缘的局部击穿现象。而不同放电类型的统计特征具有明显区别,为判断放电类型提供依据。

2)放电缺陷位于不同位置时,缺陷所在相的套管末屏信号幅值大、畸变小、持续时间短;其他两相信号衰减严重、畸变明显、极性与放电所在相末屏脉冲极性相反,很容易通过三相套管末屏信号判断放电所在相。铁心接地点和绕组中性点信号表现为高频信号与低频信号叠加,极性与放电所在相信号极性相同,高频分量主要集中在 100 MHz 附近,低频主要集中在 10 MHz 以下。很难通过铁心接地点

和绕组中性点的单次脉冲判断放电所在位置。

3)变压器绕组对局部放电信号传播具有“选频”作用:6~12 MHz 频率分量更容易沿着绕组传播且 10 MHz 分量通过中性点接地线流入大地。1~5 MHz 频率分量主要通过绕组与铁心之间的耦合电容经过铁心流入大地。

参考文献:

- [1] 王 谦. 基于模糊理论的电力变压器运行状态综合评估方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2005.
WANG Qian. Study of the comprehensive assessment method for the power transformer condition in service with fuzzy theory[D]. Chongqing:Chongqing University, 2005.
- [2] 周婧婧. 基于故障树分析的电力变压器可靠性评估方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2009.
ZHOU Jingjing. Study of a reliability assessment method of power transformer based on fault-tree analysis[D]. Chongqing:Chongqing University, 2009.
- [3] High-voltage test techniques-partial discharge measurements:IEC 60270—2000[S]. 2010.
- [4] 李军浩,韩旭涛,刘泽辉,等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术,2015,41(8):2583-2601.
LI Junhao,HAN Xutao,LIU Zehui,et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8):2583-2601.

- [5] 黎大健,李军浩,李彦明.基于多传感器的变压器特高频局部放电定位方法研究[J].绝缘材料,2013(2):53-56.
LI Dajian, LI Junhao, LI Yanming. Mutisensor-based study of ultra-high frequency partial discharge location method for power transformer[J]. Insulating Materials, 2013(2):53-56.
- [6] 郑书生,陈金祥,李成榕,等.变压器绕组对局部放电特高频定位方法的影响[J].高电压技术,2013,39(2):324-329.
ZHENG Shusheng, CHEN Jinxiang, LI Chengrong, et al. Influence of windings on locating partial discharge in transformers by using ultra-high frequency method[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2):324-329.
- [7] SINAGA H H, PHUNG B T, BLACKBURN T R. Recognition of single and multiple partial discharge sources in transformers based on ultra-high frequency signals[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2014, 8(1):160-169.
- [8] 刘化龙.变压器局放超声检测和定位技术现状及发展[J].重庆理工大学学报,2014(7):71-79.
LIU Hualong. Actualities and perspectives of techniques of detection and localization of partial discharges in power transformers adopting ultrasonic methods[J]. Journal of Chongqing University of Technology, 2014(7):71-79.
- [9] 李继胜,李军浩,罗勇芬,等.用于电力变压器局部放电定位的超声波相控阵传感器的研制[J].西安交通大学学报,2011,45(4):93-99.
LI Jisheng, LI Junhao, LUO Yongfen, et al. Study of phased-ultrasonic receiving-planar array transducer for partial discharge location in power transformer[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(4):93-99.
- [10] 陈伟根,潘 翀,云玉新,等.基于小波网络及油中溶解气体分析的电力变压器故障诊断方法[J].中国电机工程学报,2008,28(7):121-126.
CHEN Weigen, PAN Chong, YUN Yuxin, et al. Fault diagnosis method of power transformers based on wavelet networks and dissolved gas analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7):121-126.
- [11] 王 健,李 喆.模拟变压器内部放电及局部过热对油中气体含量的影响[J].绝缘材料,2017(3):62-65.
WANG Jian, LI Zhe. Simulate the influence of internal discharge and local overheating on gas contents in transformer oil[J]. Insulating Materials, 2017(3):62-65.
- [12] 田 野.变压器宽频带局部放电在线检测技术的研究[D].北京:华北电力大学,2014.
TIAN Ye. Research on wideband method of partial discharge online monitoring technology for transformer[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2014.
- [13] 沈 煜,阮 羚,谢齐家,等.采用甚宽带脉冲电流法的变压器局部放电检测技术现场应用[J].高电压技术,2011,37(4):937-943.
SHEN Yu, RUAN Ling, XIE Qijia, et al. On-site applica-
- tion of partial discharge detection of transformer using very wide bandwidth pulse current method[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4):937-943.
- [14] ZHANG Zhengyuan, CHENG Yangchun, HU Tao, et al. Research on wide-band method of partial discharge online monitoring technology for transformer[C]//IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. [S.l.]: IEEE, 2016:1-4.
- [15] 李军浩,郭 飞,张 亮,等.变压器感应式振荡型操作冲击试验及局部放电测量技术[J].高电压技术,2016,42(4):1199-1206.
LI Junhao, GUO Fei, ZHANG Liang, et al. Inductive oscillating switching impulse test and partial discharge detection technology for transformer[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4):1199-1206.
- [16] 徐 澄,肖 荣.大型变压器内部放电故障实例诊断与分析[J].高压电器,201046(11):67-69.
XU Cheng, XIAO Rong. Diagnosis and analysis of an internal discharge fault in large transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(11):67-69.
- [17] 张正渊.变压器宽频带局部放电多端测量在线检测技术研究[D].北京:华北电力大学,2017.
ZHANG Zhengyuan. Research on wide-band online monitoring technology with multi-terminals for partial discharge of transformers[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [18] LI Junhao, ZHANG Liang, HAN Xutao, et al. PD detection and analysis of oil-pressboard insulation under pulsed DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1):324-330.
- [19] LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. PD characteristics of oil-pressboard insulation under AC and DC mixed voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(1):444-450.
- [20] 高文胜,桂俊峰,谈克雄,等.局部放电信号在电力变压器绕组传播过程中的畸变[J].中国电机工程学报,2002,22(4):31-36.
GAO Wensheng, GUI Junfeng, TAN Kexiong, et al. Distortion caused by partial discharge propagation along power transformer winding[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4):31-36.
- [21] 唐 炬,宋胜利,李 剑,等.局部放电信号在变压器绕组中传播特性研究[J].中国电机工程学报,2002,22(10):91-96.
TANG Ju, SONG Shengli, LI Jian, et al. Propagation characteristics of partial discharge pulses in transformer windings[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10):91-96.
- [22] 阮 羚,杜志叶,阮江军,等.基于多导体传输线模型的局部放电信号沿变压器绕组传播特性研究[J].变压器, (下转第244页)

- 的现状和前景[J]. 变压器, 2001, 38(11): 22-27.
WANG Guoli, HAO Yanpeng, LI Yanming. Present situation and prospect of PD location method used in power transformers[J]. Transformer, 2001, 38(11): 22-27.
- [6] LUNDGAARD L E. Partial discharge, XIII: Acoustic partial discharge detection-fundamental consideration[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1992, 8(4): 25-31.
- [7] 章涛, 王俊波, 李国伟. 10 kV 开关柜局部放电检测技术与运用[J]. 高压电器, 2012, 48(10): 100-104.
ZHANG Tao, WANG Junbo, LI Guowei. Research on the partial discharge detection technology for 10 kV switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10): 100-104.
- [8] 王俊波, 徐鑫, 李国伟, 等. 高压开关柜局部放电声电联合定位检测技术[J]. 无损检测, 2018, 40(1): 72-74.
WANG Junbo, XU Xin, LI Guowei, et al. Electroacoustic detection and location technology in partial discharge of high voltage switchgear[J]. Non-Destructive Testing, 2018, 40(1): 72-74.
- [9] 孙焱. 开关柜声电联合局部放电检测在晋中电网的应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
SUN Yan. Switchgear acoustoelectric combined application of partial discharge detection in Jingzhong power grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [10] 胡伟涛. 声电联合技术检测GIS局部放电的试验[J]. 电力科学与技术学报, 2012, 27(2): 57-64.
HU Weitao. Experimental on partial discharge detection in GIS using ultrasonic associated with electromagnetic wave method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2012, 27(2): 57-64.
- [11] 倪宏坤, 王立晶. 声电联合检测技术在GIS中的应用[J]. 国网技术学院学报, 2016, 19(5): 31-35.
NI Hongkun, WANG Lijing. Application of a joint test using ultrasonic associated with electromagnetic wave in GIS[J]. Journal of Shandong Electric Power College, 2016, 19(5): 31-35.
- [12] 赵廷志, 陈仁刚, 冯新岩, 等. 基于声电联合法的GIS局部放电检测分析[J]. 山东电力技术, 2016, 43(9): 35-38.
ZHAO Tingzhi, CHEN Rengang, FENG Xinyan, et al. Detection analysis of GIS partial discharge based on acoustic-electric method[J]. Shandong Electric Power, 2016, 43(9): 35-38.
- [13] 宋蓓华. 基于声电联合的GIS局部放电带电检测技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
SONG Beihua. Based on the UHF and AE combined GIS partial discharge on-line detection technology research[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [14] 师青梅, 皮伟, 左晶, 等. 应用超声光栅测量变压器油中超声波速度[J]. 物理与工程, 2011, 21(5): 28-30.
SHI Qingmei, PI Wei, ZUO Jing, et al. The measurement of ultrasonic velocity in transformer oil with ultrasonic grating[J]. Physics and Engineering, 2011, 21(5): 28-30.
- [15] GUBANSKI S M, BLENNOW J, HOLMGREN B, et al. Dielectric response diagnoses for transformer windings[R]. Paris: Report of CIGRE TF D1.01.14 Technical Brochure 414, 2010.
- 刘彦琴(1982—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电测、热工技术等。
- 刘君(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为变压器绝缘老化机制及其状态评估方面。
- 周波(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电气设备状态监测与故障诊断。
- 宋颖(1984—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为变电检修、电气试验等。
- 郭超(1988—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电气设备状态监测与故障诊断。
- 程鹏(1987—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为多物理耦合场数值计算、电气设备状态监测与故障诊断。
- 高竣(1989—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为电气设备状态监测与故障诊断(通讯作者)。
- 胡琳(1984—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为电气设备状态监测与故障诊断。

(上接第238页)

- 2009, 46(4): 34-38.
RUAN Ling, DU Zhiye, RUAN Jiangjun, et al. Research on characteristic of PD signal transmission along transformer winding based on multi-conductor transmission line model [J]. Transformer, 2009, 46(4): 34-38.
- [23] JAFARI A M, AKBARI A. Partial discharge localization in transformer windings using multi-conductor transmission line model[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(6): 1028-1037.
- 刘宏亮(1980—), 男, 正高级工程师, 主要从事电气设备试验及故障诊断工作。