

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.11.033

特高压变压器中局部放电脉冲电流传播特性的仿真研究

王丽丽¹, 刘宏亮¹, 高树国¹, 范辉¹, 齐辉²

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 石家庄 050021;

2. 国网河北省电力有限公司石家庄分公司, 石家庄 050021)

摘要: 特高压变压器是特高压输电系统的核心部分,局部放电的有效检测是保证其安全可靠运行的重要手段。而局部放电信号在绕组中传播会出现衰减畸变,给准确判断变压器故障带来困难。为了研究局部放电在特高压变压器中的传播特性,基于多导体传输线理论,结合特高压变压器单相五柱式结构特点,建立三维有限元简化单柱模型,计算了绕组的电阻、电容和电感分布参数。通过求解传输线方程得到特高压变压器中部出线处发生局部放电时绕组各匝响应,分析了局部放电信号在绕组中的传播规律。局部放电信号在绕组中以一定速度传播,绕组电压出现持续时间较长的低频率振荡,而电流幅值沿着绕组传播有明显衰减,主要通过绕组与铁心或者箱体之间的电容流入大地。

关键词: 特高压变压器; 多导体传输线; 局部放电; 传播特性; 有限元

Simulation on Propagation Characteristics of Partial Discharge Current in UHV Transformers

WANG Lili¹, LIU Hongliang¹, GAO Shuguo¹, FAN Hui¹, QI Hui²

(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)

Abstract: Effective detection of partial discharge (PD) in ultra high voltage (UHV) transformer is very important to ensure safe and reliable operation of UHV power transmission system. Propagation of PD signal in transformer windings causes signal attenuation and distortion, which makes accurate fault diagnosis of transformer difficult. In this paper, a finite element model of one-pole transformer winding is established based on the theory of multi-conductor transmission line (MTL) and the single-phase 5-pole structure features of a UHV transformer to study the propagation characteristics of PD signals. The distribution parameters of resistance, capacitance and inductance of the windings are calculated. By solving the MTL equation, the response of each turn in the winding is obtained while PD occurs at the outlet of the UHV transformer. The propagation characteristics of PD are analyzed. Results show that: 1) the PD signal propagates in the winding at a certain speed; 2) the voltage has low-frequency oscillation with a long duration; and 3) the current attenuates significantly along the winding and flows mainly into the ground through the capacitance between the winding and the core or transformer case.

Key words: UHV transformer; MTL; PD; propagation characteristics; FEM

0 引言

近年来,随着电力负荷的增加,电力设备朝着高电压、大容量方向发展。特高压变压器作为特高压输电系统的核心部分,其稳定可靠的运行是保证电能顺利输送的前提^[1-2]。电力变压器多年运行经

验表明,绕组故障是电力变压器典型故障的主要类型,变压器绕组的故障类型有多种,如绕组变形、过热和绝缘老化,其中绝缘故障形成的事故约占全部变压器事故的85%以上^[3-6]。局部放电造成变压器绝缘劣化现象越来越普遍和严重,对于局部放电的有效检测对保证特高压变压器安全可靠运行具有重要意义。

目前,针对特高压变压器的局部放电试验已经开展许多研究,包括试验程序、试验接线、试验参数计算、现场抗干扰措施、局部放电检测手段等^[7-12]。目前对于局部放电主要是采用脉冲电流法,检测信号的幅值、相位和视在放电量,通过统计谱图判断放电类型^[13]。而放电点在绕组中的出现具有很强的随机性,放电信号经过变压器绕组传播到高压套管接地线、中性点接地线和铁心接地点等检测点时,必然会受到绕组结构对于信号传播的影响,具体表现为信号的衰减、延迟和畸变^[14]。因此,根据检测到的放电信号幅值估算放电强度,进而判断故障类型、分析故障严重程度以及对故障进行定位完全依赖于对放电脉冲在绕组中传播规律的认识。

目前对变压器绕组建模主要有集中参数的电路模型^[15-16]和分布参数的多导体传输线模型^[17-20]。一般认为,集中参数电路模型的频率上限为1 MHz,而多导体传输线模型将绕组看成多根传输线首尾相连的情况,充分考虑到了高频局部放电信号在绕组中传播的信号延迟与衰减情况,能够在局部放电宽频带范围内准确反映绕组特性。

文中基于多导体传输线理论,针对特高压变压器主体结构,使用 Ansoft Maxwell 有限元仿真软件,建立单柱绕组有限元模型,并计算得到绕组电阻、电容和电感分布参数。在 MATLAB 中编写程序计算特高压变压器高压绕组中部出线发生局部放电时,变压器绕组的响应,得到局部放电信号在绕组中的传播规律,对现场开展局部放电试验、分析局部放电信号的波形信息、准确判断变压器故障有重要意义。

1 多导体传输线理论

将变压器绕组的每一线匝成为1根传输线,按线圈绕制关系首尾相连,线匝编号从1到 N ,则整个绕组可表示为MTL模型,见图1。图1中: U_s 和 I_s 表示绕组首端的电压与电流; U_R 与 I_R 表示绕组末端的电压与电流;斜线表示绕组首末端相连的情况。对于连续式绕组,编号从绕组高压首端第一匝开始计数,到绕组末端接地引线为最后一匝;对于插入电容连续式绕组,除按照连续式绕组的编号方式对其自身导线进行编号外,还要紧跟其后对插入的屏蔽线进行编号。

多导体传输线方程见式(1)

$$\begin{cases} \frac{d^2}{dz^2} U(z) = ZY \cdot U(z) \\ \frac{d^2}{dz^2} I(z) = YZ \cdot I(z) \end{cases} \quad (1)$$

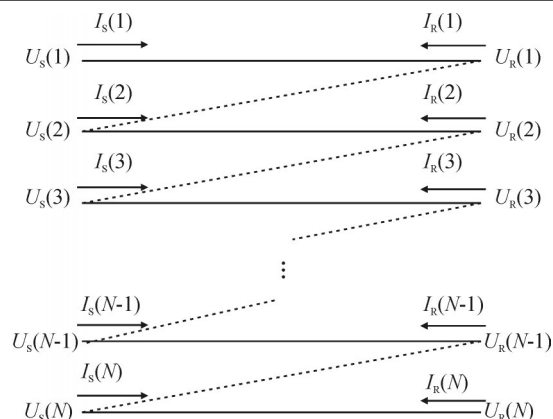


图1 变压器绕组的MTL模型

Fig. 1 The multi-conductor transmission line model of transformer

式(1)中: U 、 I 为 N 阶列向量,表示每匝线圈中沿线的电压与电流; $Z=R+j\omega L$ 、 $Y=G+j\omega C$ 分别表示传输线阻抗矩阵和导纳矩阵, R 、 L 、 G 、 C 分别是单位长度的电阻、电感、电导和电容 N 阶方阵,实际变压器内漏电流较小,电导 G 可以忽略。由于 $Z \times Y$ 是满矩阵,即每匝电压和电流都影响着其他匝的电压和电流。通过相似变换对式(1)进行解耦。假设存在可逆矩阵 T_U 和 T_I ,对 U 和 I 进行模量变换

$$\begin{cases} U(z) = T_U \cdot U_m(z) \\ I(z) = T_I \cdot I_m(z) \end{cases} \quad (2)$$

得到变换矩阵 T_U 和 T_I ,通过相似变换同时使 $Z \times Y$ 和 $Y \times Z$ 矩阵对角化,实现二阶方程的解耦。

$$T_U^{-1} Z Y T_U = T_I^{-1} Y Z T_I = \begin{bmatrix} \gamma_1^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \gamma_2^2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \gamma_n^2 \end{bmatrix} = \gamma^2 \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{d^2}{dz^2} U_m(z) = T_U^{-1} Z Y T_U \cdot U_m(z) = \gamma^2 U_m(z) \\ \frac{d^2}{dz^2} I_m(z) = T_I^{-1} Y Z T_I \cdot I_m(z) = \gamma^2 I_m(z) \end{cases} \quad (4)$$

上述过程有明确的物理意义:当一组激励加在有损多导体传输线的一端时,多导体传输线上的电压和电流首先按照一定的比例分解成 N 个模电压和模电流,每一组模电压和模电流按照各自的传播常数进行传播,相互之间不存在耦合作用^[19]。可以求得电压和电流的通解为

$$\begin{cases} U(z) = T_U \cdot U_m(z) = T_U (e^{-\gamma z} U_m^+ + e^{\gamma z} U_m^-) \\ I(z) = Y_c T_U (e^{-\gamma z} U_m^+ - e^{\gamma z} U_m^-) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中:特征导纳矩阵 $Y_c = Y T_U \gamma^{-1} T_U^{-1}$; U_m^+ 和 U_m^- 为电压的前行分量和反行分量,均为 N 维列向量。

传输线的平均匝长为 l ,第 k 匝电流与电压与第 $k+1$ 匝的连续性条件为

$$\begin{cases} U_k(l) = U_{k+1}(0) \\ I_k(l) = I_{k+1}(0) \end{cases} \quad (6)$$

假设第 k 匝绕组末端发生局部放电, 则电流连续性方程在第 k 匝末端变为

$$I_k(l) - I_{k+1}(0) = -I_{PD} \quad (7)$$

式(5)-(7)完整地描述了变压器 N 匝首尾相连绕组传输线模型的所有边界条件, 可完整的求解出当局部放电电流信号入侵变压器某一匝时, 各个线匝的响应情况。将传输线的微分方程转化为关于 U_m^+ 和 U_m^- 这 $2N$ 个变量的矩阵方程, 不改变计算的复杂度, 且便于编程实现大型变压器的仿真计算。

2 特高压变压器建模及分布参数提取

2.1 特高压变压器建模

ODFPS-1000000/1000 特高压变压器采用中性点无励磁调压, 额定容量: 1 000 MVA/1 000 MVA/334 MVA。采用分体结构, 变压器分为主体和调压变两部分。主体变压器采用单相五柱铁心, 其中三心柱套线圈, 每柱三分之一容量, 高、中、低压线圈并联, 旁柱绕有励磁线圈。主体油箱外设调压补偿变压器, 变压器的低压和中性点利用主体和调压变两部分各自的套管通过外部导线连接在一起^[21], 接线原理图见图2。

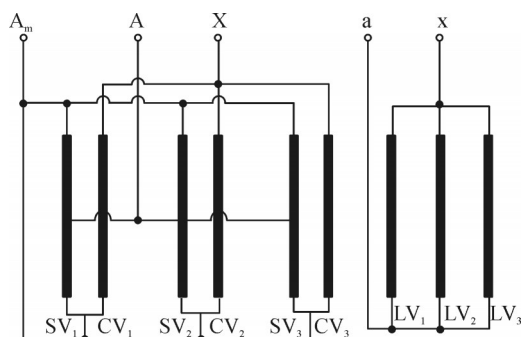


图2 特高压变压器主体接线图

Fig. 2 Wiring diagram of UHV transformer

高压线圈(串联绕组, SV)中部出线, 每个线圈总段数 2×70 , 总匝数 2×871 。1柱和3柱上部右绕向, 下部左绕向; 2柱上部左绕向, 下部右绕向, 幅向出头。中压线圈(公共绕组, CV)端部进线, 1柱和3柱右绕向, 2柱左绕向, 下部幅向出头与高压线圈上、下端部串联, 上端轴向出头, 每个线圈总段数133, 总匝数871。低压线圈(LV)端部进线, 1柱和3柱右绕向, 2柱左绕向, 轴向出头。每个线圈总段数166, 总匝数316^[22]。其结构尺寸见图3。

考虑到特高压变压器每柱绕组除了绕向不同, 结构与尺寸基本相同, 且局部放电高频信号在一柱绕组内传播而对其他柱绕组影响较小。因此, 对特

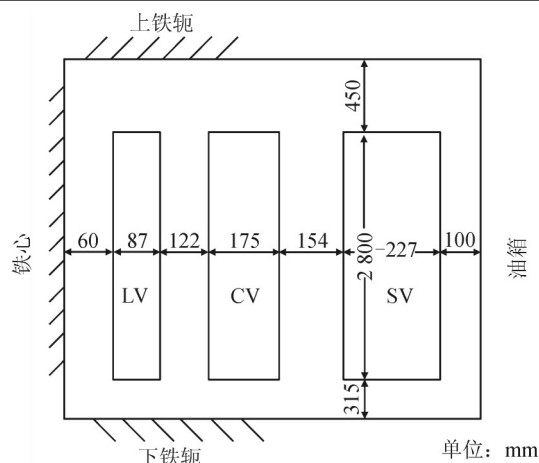


图3 变压器绕组尺寸

Fig. 3 Dimensions of UHV transformer winding

高压变压器一柱绕组进行建模可以准确研究局部放电信号在绕组中的传播过程, 同时减小有限元网格划分, 减小运算量提高计算精度。在 Ansoft Maxwell 有限元软件中建立特高压变压器一柱绕组模型, 见图4。

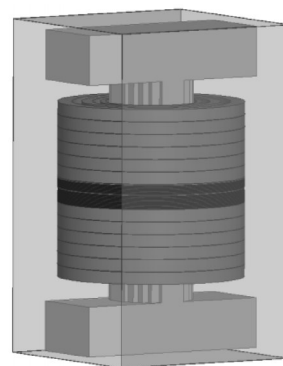


图4 单柱绕组有限元模型

Fig. 4 Finite element model of one-pole transformer winding

由于完全多导体传输线模型的计算量庞大, 故实际采用混合多导体传输线模型对特高压变压器建模, 即对局部放电发生处绕组以匝为单元, 对远离局部放电的位置以多饼为单元进行建模, 在保证精度的前提下对计算进行简化。对高压绕组上部在中部出线端两饼以匝为单元进行划分, 第3~10饼绕组以饼为单元, 第11~70饼绕组等分为6个单元, 高压绕组下部划分方法与上部相同。中压绕组和低压绕组分别等分为14个单元, 自上而下编号为1~14。按照实际尺寸建模, 绕组外部设置油箱外壳。

2.2 特高压变压器分布参数提取

1) 电阻参数。电阻计算需考虑高频下的集肤效应, 其表达式为

$$R = \frac{1}{bh\sigma} + \frac{1}{2(b+h)} \sqrt{\frac{\pi\mu f}{\sigma}} \quad (8)$$

式(8)中: b 和 h 分别为矩形导体横截面的长和

宽; μ 和 σ 分别为导体磁导率和导体电导率; f 为加载信号的频率。

2)电容参数。电容可由静电场能量求得

$$W_1 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[C_{ii} U_i^2 + \sum_{j=1}^n C_{ij} U_i U_j (i \neq j) \right] \quad (9)$$

式(9)中: W_1 为系统静电场能量; C_{ii} 为第*i*根导体的自电容; C_{ij} 为第*i*、*j*根导体的互电容; U_i 、 U_j 分别为第*i*、*j*根导体的对地电压。通过 Ansoft Maxwell 求解计算电场能量 W_1 , 可计算出系统的体积电容参数矩阵, 与油—纸复合绝缘介电常数相乘得到电容参数矩阵。

3)电感参数。电感由外电感 L_n 和内电感 L_i 两部分组成

$$L = L_n + L_i \quad (10)$$

外电感 L_n 可由静磁场能量求得

$$W_2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[L_{ii} I_i^2 + \sum_{j=1}^n M_{ij} I_i I_j (i \neq j) \right] \quad (11)$$

式(11)中: W_2 为系统静磁场能量; L_{ii} 为第*i*根导体的自感; M_{ij} 为第*i*、*j*根导体的互感; I_i 、 I_j 分别为第*i*、*j*根导体电流。Ansoft Maxwell 中, 铁心相对磁导率设置为 0.001 模拟铁心对高频电磁场的屏蔽作用, 通过求解计算磁场能量 W_2 , 可计算出系统的外电感参数矩阵 L_n 。

在高频情况下, 透入导体的磁通同样可以产生电感, 则由高频集肤效应进入导体内部的内电感 L_i 可以表示为

$$L_i = \frac{1}{4(b+h)} \sqrt{\frac{\mu}{\sigma \pi f}} \quad (12)$$

3 仿真结果

在 MATLAB 中编写相应程序, 首先计算出不同频率下的电感电容矩阵, 将激励信号进行傅里叶变换得到对应频率分量的信号幅值, 通过传输线方程求解, 得到变压器各匝在对应频率下的电压电流幅值, 最后通过傅里叶逆变换得到最终时域波形。

对高压绕组中部出线端施加电流激励, 其时域波形见图 5, 信号波前时间 $t_f=4$ ns, 半峰时间 $t_r=25$ ns, 幅值为 5 A。高压绕组两端接中压绕组, 中压绕组另一端接地, 低压绕组两端接地。通过求解传输线方程得到变压器中部出线处发生局部放电时, 绕组各匝波形。由于高压绕组上下两部分对称性, 局放脉冲在首端分成两个幅值基本相同的电流脉冲分别由绕组中部出线端向高压绕组两端传播。

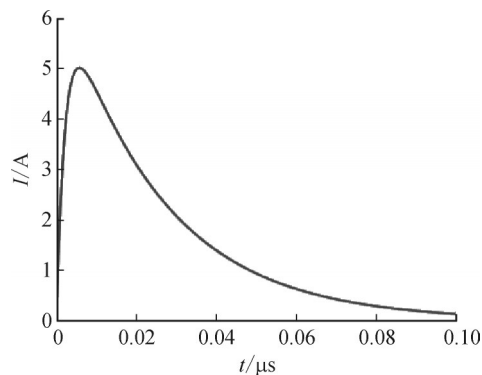


图5 局部放电波形

Fig. 5 Waveform of partial discharge

绕组首饼各匝电压电流波形见图 6。高压绕组第 1 匝电流出现峰值时, 由于耦合电容的影响, 绕组各匝均出现一个峰值, 相邻匝出现负峰是由位移电流通过匝间电容产生。由于电磁波传播需要一定时间, 各匝绕组电流达到最大值的时间 (即电流信号传到绕组的时间) 随着绕组匝数增大而增大, 首匝电流出现时间 6 ns, 第 2 匝电流峰值时间 96 ns, 第 4 匝电流峰值时间 282 ns, 高压绕组平均匝长 8.68 m, 由此可得脉冲在绕组中传播速度为 0.95×10^8 m/s。随着电流传播距离增大, 电流峰值减小, 且电流的衰减主要集中在前几匝。电压波形出现高频振荡, 振荡频率集中在 8 MHz 和 46 MHz 附近。

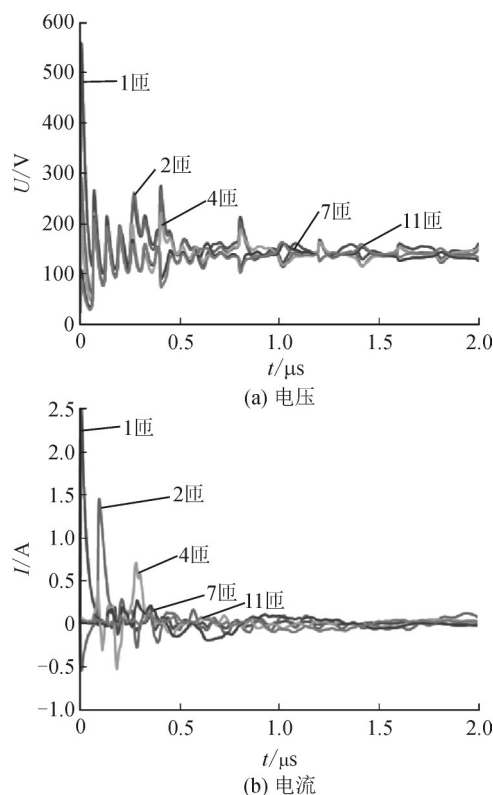


图6 高压绕组第一饼内各匝信号

Fig. 6 Signals in the first disc of the high-voltage winding

高压绕组出线端前几饼电压电流波形见图7。绕组电压在波头处发生高频振荡,同时还存在低频成分,振荡频率集中在30 kHz,且电压幅值随着信号传播而减小。绕组电流幅值也随着信号传播而出现明显减小,第10饼电流幅值仅为第1饼的十分之一,局部放电电流沿绕组传播出现明显衰减,说明信号更容易通过绕组与箱体和铁心之间的对地电容流入接地体。

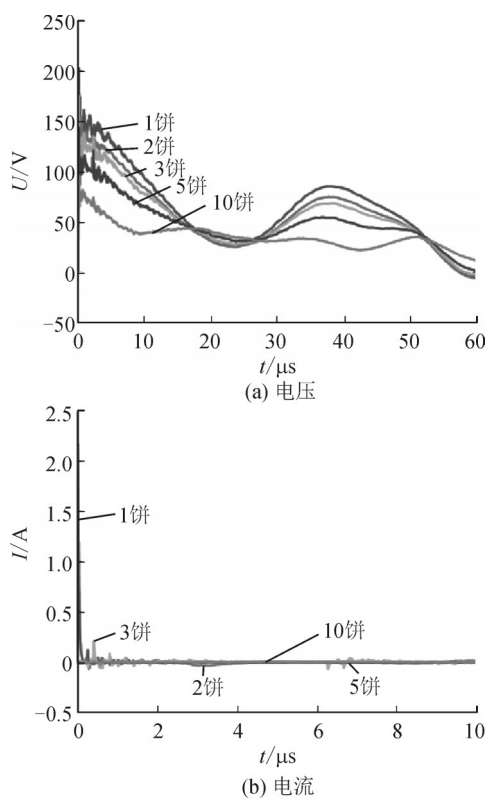


图7 高压绕组各饼信号

Fig. 7 Signals of different discs of the high-voltage

铁心良好接地,将铁心同样视为一根没有电感电阻的传输线,只考虑绕组对铁心耦合电容的作用,通过增补传输线方程解得流过铁心处的电流波形见图8。铁心接地点处信号表现为正极性脉冲,同时出现振荡,振荡频率16 MHz,信号持续时间0.8 μs,幅值为局部放电信号的五分之一。

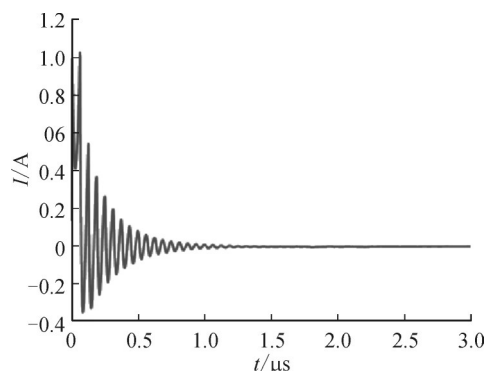


图8 铁心接地电流

Fig. 8 The current of the transformer core

4 结论

为了研究局部放电在特高压变压器中的传播特性,文中基于多导体传输线理论,结合特高压变压器单相五柱式结构特点,建立三维有限元简化单柱模型,计算了绕组的电阻、电容和电感分布参数。通过求解传输线方程得到特高压变压器中部出线处发生局部放电时,绕组各匝电压电流信号。分析计算结果可得到以下结论:

1)局部放电信号在绕组以一定速度传播,传播速度为 0.95×10^8 m/s。

2)绕组电流在传播过程中衰减较大,电流主要集中在局部放电发生的邻近几匝,而距离局部放电发生位置较远的绕组中的电流基本为0;电压在波头处发生8 MHz和46 MHz的高频振荡,同时还存在低频成分,振荡频率集中在30 kHz,持续时间较长。

3)电流更容易通过绕组与铁心和箱体之间的电容流入接地体。在铁心接地处得到局部放电电流信号幅值衰减为五分之一,且出现明显振荡,频率为16 MHz,对于实际局部放电脉冲电流法检测频带的选取具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 刘泽洪,郭贤珊. 特高压变压器绝缘结构[J]. 高电压技术,2010,36(1):7-12.
LIU Zehong, GUO Xianshan. Insulation structure of UHV power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1):7-12.
- [2] 刘宇. 特高压变压器主保护及工程应用研究[D]. 北京:华北电力大学,2009.
LIU Yu. Study on main protection and application for UHV transformer[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
- [3] 纪鹏. 局部放电特高频信号的传播特性研究[J]. 现代工业经济和信息化,2017(16):11-13.
JI Peng. Study on propagation characteristics of partial discharge UHF signals[J]. Modern Industrial Economy and Informatization, 2017(16):11-13.
- [4] 陈刚. 电力变压器典型故障及其演变[J]. 东北电力技术,2002,23(4):5-8.
CHEN Gang. The typical troubles of power transformer and their evolution[J]. Northeast Electric Power Technology, 2002, 23(4):5-8.
- [5] 王志娇. 变压器绕组绝缘缺陷检测方法的研究[D]. 北京:华北电力大学,2011.
WANG Zhijiao. Study on the methodology of diagnosis for transformer winding insulation defects[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.

- [6] 阮 玲,赵 淳,阮江军,等.基于多导体传输线模型的变压器绕组分布参数计算[J].高压电器,2009,45(4):41-46.
RUAN Ling, ZHAO Chun, RUAN Jiangjun, et al. Calculation of distributed parameters of transformer winding based on the model of multi-conductor transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(4): 41-46.
- [7] 韩金华,夏中原,王 伟,等.特高压变压器现场局放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 tests of 1 000 kV UHV transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(10): 51-57.
- [8] 伍志荣,聂德鑫,陈江波.特高压变压器局部放电试验分析[J].高电压技术,2010,36(1):54-61.
WU Zhirong, NIE Dexin, CHEN Jiangbo. Analysis of partial discharge test of UHV transformer[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 54-61.
- [9] 方 璐,徐先勇,刘定国.基于UHV-FTRTPS的特高压交流变压器局部放电试验技术[J].高电压技术,2017,43(1):225-231.
FANG Lu, XU Xianrong, LIU Dingguo. Partial discharge test technology of UHV AC transformer based on UHV-FTRTPS[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 225-231.
- [10] 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.
- [11] 仇新艳,李付亮,彭春燕,等.特高压变压器交流耐压及局部放电试验装置[J].高压电器,2009,45(4):94-96.
QIU Xinyan, LI Fuliang, PENG Chunyan, et al. Test equipment of UHV transformer's AC withstand voltage and partial discharge tests[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(4): 94-96.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 徐希强.特高压电力变压器绕组波过程计算与仿真软件开发[D].沈阳:沈阳工业大学,2011.
XU Xiqiang. Calculation of winding wave process and development of simulation software in extra-high voltage power transformer[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2011.
- [16] 臧 英.特高压电力变压器波过程及绕组模型研究[D].济南:山东大学,2017.
ZANG Ying. Research of wave process and winding model in UHV power transformer[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [17] HASSAN HOSSEINI S M, BARAVATI P R. New high frequency multi-conductor transmission line detailed model of transformer winding for PD study[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2017, 24(1): 316-323.
- [18] 张旭东,张重远,陈 涛,等.基于多导体传输线模型变压器宽频参数的计算[J].变压器,2014,51(8):5-10.
ZHANG Xudong, ZHANG Zhongyuan, CHEN Tao, et al. Calculation of broadband admittance parameters for transformer based on MTL[J]. Transformer, 2014, 51(8): 5-10.
- [19] ZHANG Qiuhui, WANG Shuhong, QIU Jie, et al. Application of an improved multi-conductor transmission line model in power transformer[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(5): 2029-2032.
- [20] 王雁超.油浸变压器绕组的分数阶传输线模型研究[D].北京:华北电力大学,2016.
WANG Yanchao. Research on fractional transmission line model of oil-immersed transformer windings[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [21] 刘东升,赵 峰,张喜乐,等.1 000 kV交流特高压变压器关键技术研究[J].变压器,2010,47(5):30-34.
LIU Dongsheng, ZHAO Feng, ZHANG Xile, et al. Research on key technology of 1 000 kV AC EHV transformer[J]. Transformer, 2010, 47(5): 30-34.
- [22] 吴云飞,阮 玲,罗 维,等.特高压变压器生产工艺及试验技术研究[C]//中国电机工程学会高电压专业委员会2015年学术年会. [S.l.]:[s.n.], 2015:356-366.
WU Yunfei, RUAN Ling, LUO Wei, et al. Research on production technology and test technology of UHV transformer[C]//2015 Academic Annual Meeting of High Voltage Professional Committee of China Society for Electrical Engineering. [S.l.]:[s.n.], 2015: 356-366.

王丽丽(1986—),女,工程师,主要从事电气设备试验及故障诊断工作。

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。