

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.01.031

接线方式对配电变压器绕组频率响应影响

王珊珊, 文正其, 鄢小虎, 卢文华

(国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074)

摘要:通过对1台容量为200 kVA的S11-M-200/10型三相变压器的试验,分析比较了不同接线方式对频率响应曲线测量的影响。特别是对变压器外壳是否接地、注入电压的方向、非测试绕组的状态等的影响进行了深入的研究。研究表明:接线方式的不同可能导致频率响应曲线的巨大差异,某些情况下这些差异比绕组变形、变压器故障导致的差异更大。因此,笔者建议在进行变压器绕组频率响应曲线测量时应该保持各实验条件的一致。

关键词:变压器;绕组形变;频率响应法;接线方式

Influence of Connection Mode on Frequency Response of Distribution Transformer Winding

WANG Shanshan, WEN Zhengqi, YAN Xiaohu, LU Wenhua

(Wuhan NARI Limited Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Based on the experiments of a 200 kVA 3-phase power transformer (S11-M-200/10), the effect of terminal connections on frequency response analysis (FRA) results is studied. Highlight on the effect of transformer casing grounding status, direction of the injected voltage, and status of the non-test windings. This analyzed results show that different terminal connections lead to huge differences between each FRA curves. Wrong or different terminal connections might lead to different waveform of FRA and misinterpretation of the results. Therefore, it is suggested that the measurement of the frequency response curve of the transformer should be consistent with the experimental conditions.

Key words: transformer; winding deformation; frequency response analysis; connection mode

0 引言

电力变压器是电网中最重要和最关键的设备之一,其运行稳定性直接影响电网的稳定和安全^[1-5]。近年来,由于运输及近区短路而引起的变压器机械故障越显突出,成为变压器损坏事故的主要原因之一^[6-7]。在变压器运输或发生近区短路故障后,开展变压器结构机械故障诊断,能够有效合理安排检修,避免重大事故发生。频率响应法是目前公认的、有效的变压器绕组变形检测方法,具有较高的灵敏度^[8-12]。国家标准 DL/T 911—2004、CIGRE、IEC 及 IEEE 标准均推荐频率响应法作为变压器绕组变形的常规检测手段,但是对于频率响应法的接

线方式、诊断判据未形成一致规定^[13-16]。扫频频率响应法是现场使用较多一种变压器绕组形变诊断方法,采用正弦信号扫频的方式,在绕组一端对地注入扫频信号,在另一端测量输出信号,绘制频率响应曲线,并与以前的频率响应曲线、同型号不同变压器的频率响应曲线或同一台变压器不同相之间的频率响应曲线进行比较,诊断变压器绕组的形变程度^[6-10]。因此,获得稳定、真实的变压器绕组的频率响应曲线是正确判断绕组状态的关键。

但实际测试中,往往受各种因素的影响,如接线方式、接地、干扰源等,导致检测的频率响应曲线有所偏差,依据该数据判断变压器绕组状况易形成误判、错判,造成不必要的经济损失^[17-23]。Jayasinghe 等人比较了电压传递、输入导纳和电压传输比等3种扫

收稿日期:2016-07-07; 修回日期:2016-09-17

基金项目:国家电网公司科技项目(WNZ141-0012)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(WNZ-0012).

频法接线方式,表明电压传递和电压传输比能够覆盖大多数的绕组形变故障^[10]。Bagheri 等人发现高、低压绕组与箱体外壳的杂散电容对频率响应曲线的第一个反谐振峰和低频部分有较大影响^[17]。Reykherdt 等人的试验结果表明,测试电缆的地线布局对频率响应曲线的高频部分有很大影响^[18]。Werelius 等人根据文献分析得出,满足现有的扫频法测量仪器参数应具备频率范围 10 Hz~10 MHz,测量范围-100~20 dB,测量精度为±1 dB^[19]。曹小龙等人根据现场试验结果,分析了引线杂散电容、残余电荷、分接开关位置、接地及测量仪器等对扫频频率响应曲线的影响,建议频率响应法最好实现固定测试人员、固定测试仪器及固定测试方法以提高诊断精度^[20]。

为了深入研究接线方式对变压器频率响应测试结果的影响,文中搭建变压器频率响应测试平台,分别测试并分析了不同信号注入方式、接地方式等对频率响应曲线的影响,利用相关系数对各种情况进行绕组形变诊断,能够指导现场快速判断测量结果的差异是否由不恰当的接线方式所引起,对现场的绕组形变频率响应测试提出了相关建议,具有较大的工程应用价值。

1 频率响应法的接线方式

文中采用绕组形变测量仪器 FRAX-101(频率范围 20 Hz~10 MHz,采样率 100 MS/s,输入、输出阻抗均为 50 Ω,峰—峰值为 10 V,动态范围>120 dB,精度:-100 dB 下为±0.5 dB)在实际变压器上开展不同接线方式下的频率响应测试。试验的三相变压器型号为 S11-M-200/10,额定容量为 200 kVA, Dyn11。电压传输型 FRA 测试接线图见图 1。图 1(a)表示对于单个绕组,采用绕组一端输入,另一端输出;图 1(b)表示采用一个绕组作为输入,另一侧的对应编号绕组作为输出。通过测量不同频率下的电压传递系数,见式(1),即可获得绕组的 FRA 曲线。

$$TF_{FRA} = \frac{U_{in}(f)}{U_{out}(f)} \quad (1)$$

文献调研表明,不论图 1(a)或(b),相对于测量绕组,其他绕组可保持开路或短路,中性点可保持接地或悬浮,各种接线方式均有采用。但各种接线方式的测量灵敏度是不同的,对故障的反应程度也是有所差别。国标中对这几种接线方式均有推荐,但在实际应用中应尽可能采用一致的接线方式,进而方便进行标准化对比。

典型的绕组 FRA 测试曲线见图 2。根据 IEC 60076-18—2012 标准,FRA 测试曲线的低频部分主要由铁

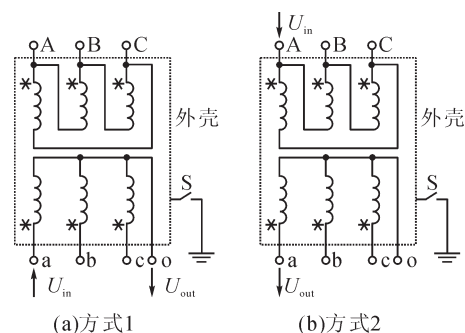


图 1 电压传输型频率响应测试接线方式

Fig. 1 Test connection for transfer voltage FRA measurement

心决定;中频部分主要由绕组之间的相互作用决定;较高频率部分主要由单个绕组的内部连接方式决定;1 MHz 以上部分主要测量布局 and 连接导线决定。

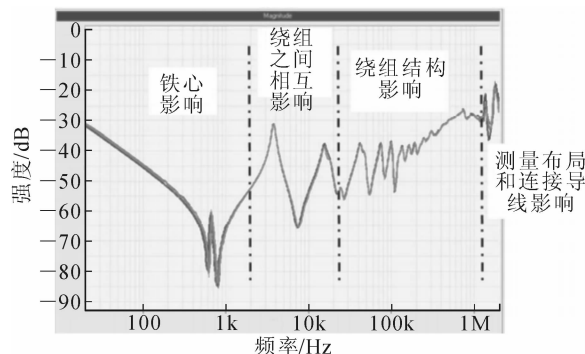


图 2 典型的绕组 FRA 测试曲线

Fig. 2 Typical FRA measurement curve

2 不同接线方式下的频率响应曲线

频率响应法诊断变压器绕组变形的核心是准确获得变压器绕组的频率响应曲线并进行相关比较。大量现场操作经验表明:接线方式的不同可能导致频率响应曲线的巨大差异,某些情况下这些差异比绕组变形、变压器故障导致的差异更大。

采用图 1(a)的接线方式在 200 kVA 的 S11-M-200/10 型三相变压器上进行试验,变压器外壳接地,非测试绕组端口保持开路,分别获得该变压器低压侧三相绕组的频率响应曲线见图 3,图 3 中 ao 表示电压由 a 端注入、o 端测量(下同)。由图 3 可知,变压器 a、c 相绕组的频率响应曲线在 1 MHz 以下几乎重合,而 b 相绕组的频率响应曲线在低频段(1 kHz 以下)与 a、c 相的差别较大。这是由于三相三臂式电力变压器的三相磁路并不对称,中间绕组(一般为 b 相)的磁路与两侧绕组(一般为 a、c 相)存在一定差别。这也验证了绕组频率响应曲线受铁心的影响较大。根据电力行业标准 DL/T 911—2004 规定相关系数计算方法,求取各相绕组间的相关系数,见表 1。

绕组变形程度与各相绕组间的相关系数见表 2^[3]。

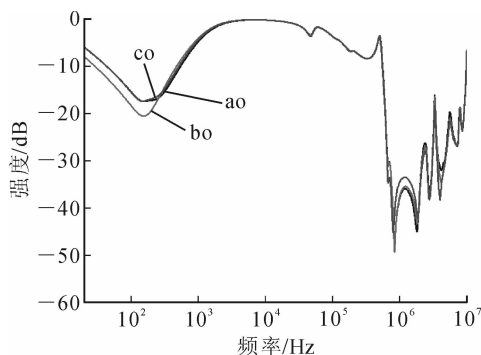


图3 变压器低压绕组频率响应曲线

Fig. 3 3-phase FRA curves of low voltage winding of transformer

表1 各相绕组间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between different windings

相别	低频段	中频段	高频段
a、b 相	2.09	2.97	3.32
a、c 相	2.89	1.93	0.82
b、c 相	2.40	2.20	0.82

由表2可知,表1中的相关系数均满足表2所示的正常范围。基于此认为:由变压器a、b、c相绕组频率响应曲线的略微差别是结构设计造成的,并不能证明绕组存在变形。因此在后续的分析中忽略这一影响,认为三相绕组对称,采用一相(a相)的频率响应曲线来表征变压器的频率响应曲线。

表2 绕组变形程度与相关系数关系

Table 2 Relationship between degrees of winding deformation and correlation coefficients

绕组变形程度	相关系数 R_{xy}
严重变形	$R_{LF} < 0.6$
明显变形	$0.6 \leq R_{LF} < 1$ 或 $R_{MF} < 0.6$
轻度变形	$1.0 \leq R_{LF} < 2.0$ 或 $0.6 \leq R_{MF} < 1.0$
正常绕组	$R_{LF} \geq 2.0$ 和 $R_{MF} \geq 1.0$ 和 $R_{HF} \geq 0.6$

注: R_{LF} 为曲线在低频段(1~100 kHz)内的相关系数; R_{MF} 为曲线在中频段(100~600 kHz)内的相关系数; R_{HF} 为曲线在高频段(600~1 000 kHz)内的相关系数。

2.1 接地对频率响应测试的影响

采用图1(a)的接线方式,分别在变压器外壳不接地及接地2种情况下测量低压侧a相绕组的频率响应曲线,见图4。图4中曲线ao表示电压由a端注入、o端测量所得的频率响应曲线,曲线oa表示电压由o端注入、a端测量所得的频率响应曲线。

为了表征变压器外壳接地状态对测量结果的影响程度,列出了不同接地状态下低压侧a相绕组的频率响应曲线ao与oa的相关系数,见表3。当外

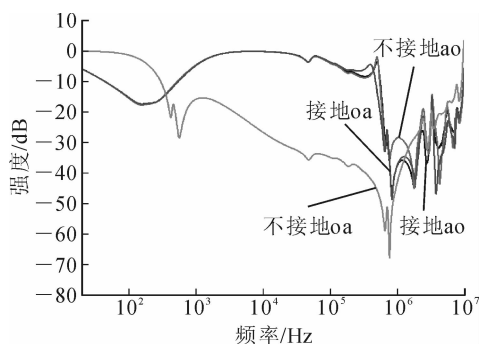


图4 a相绕组的频率响应曲线

Fig. 4 FRA curves of a-phase transformer winding

壳不接地时,2条频率响应曲线ao与oa在全频段均有较大差别,其中低频段的相关系数为0.06,可以认为2条频率响应曲线完全不相关;这可能是由于不接地时,铁心及外壳的电位不为0,绕组与地之间的分布电容减小,使得绕组内部的分布电容作用更加明显。而当变压器外壳接地时,ao与oa在仅中频段有较大差别,低频段及高频段较为一致。

表3 不同接地状态下的ao与oa的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between ao and oa in different grounding status

状态	低频段	中频段	高频段
外壳不接地	0.06	0.16	0.36
外壳接地	4.36	0.24	1.09

采用图1(a)所示的接线方式时,外壳接地状态对频率响应测试的结果有较大影响。外壳不接地时,不同的注入电压方向会得到差别巨大的频率响应曲线,若以此为依据判断将得出绕组严重变形的结论。当外壳良好接地时,信号的注入方向对测量结果的影响较小。因此,当现场测试获得差异很大的频率响应曲线时,应检查变压器的外壳是否良好接地。

2.2 电压注入方向的影响

在仿真及理论分析过程中,一般认为变压器的等值数学模型是一个完全理论化的无源二端口线性网络。该二端口线性网络有一个确定的传递函数,因此不论扫频电压是由绕组顶部注入还是绕组尾部注入,其频率响应曲线将是相同的。但是实际的试验发现,扫频电压的注入方向对频率响应曲线的测量有明显影响,这一影响在变压器外壳不接地时尤为明显。

采用图1(a)的接线方式,在变压器外壳不接地的情况下,测量低压侧a相绕组的频率响应曲线。由a相绕组首端注入点压、中性点o测量得到频率响应曲线ao;由中性点o注入点压、a相绕组首端测量得到频率响应曲线oa,见图5。通过对比可知,即使是对同一绕组的测量,采用不同的扫频电压注入方向也会得到完

全不相关的两条曲线。因此在现场试验过程中需要保证在多次测量时,扫频电压注入方向应保持一致。

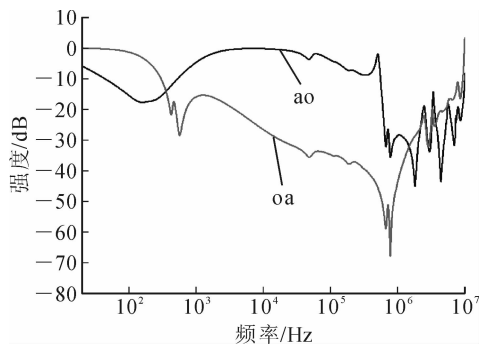


图5 电压注入方向的影响

Fig. 5 Effects of injection directions

造成这一现象原因可能是因为真实变压器的各个端口并不是完全对称的,不能由完全理论化的无源二端口线性网络等值。若建立包含分布参数的非理想化数学模型,还需要考虑各端口附近的分布电容、对地电阻等参数,这些参数与变压器的绝缘设置、接线状态有关。变压器绕组的各个端口之间存在着差异,因此不同的电压注入方向对应不同的等值数学模型,这就造成了频率响应曲线的不同。特别是对于 Dyn 接法的变压器,低压侧 a、b、c 3 个端口与中性点 o 在绝缘设置方面存在明显不同,使得绕组首尾两端实际试验参数的不一致,从而造成图 5 所示的频率响应曲线的明显差异。

2.3 高压侧状态的影响

根据测试仪器测量要求不同,采用频率响应法对变压器绕组进行测试时,非测试绕组可能处于开路、短路、接地状态。不同接线方式下测得的频率响应曲线可能存在着较大区别,此节中针对不同的高压侧状态比较了不同接线方式下的频率响应曲线。

采用图 1(a)的接线方式,测量低压侧 a 相绕组的频率响应曲线,在试验过程中保持变压器外壳良好接地,且均采用 a 端注入、中性点 o 测量的方式。改变高压侧端口状态时,测量得到的频率响应曲线见图 6。

图 6 中高压侧 A、B、C 3 个端口短路及短路接地情况下,测得低压绕组 a 相的频率响应曲线在中、低频段完全重合,仅在频率超过 1 MHz 时出现较明显差别。因此可以认为高压侧短路点是否接地对于频率响应曲线的测量没有影响。

高压侧 A、B、C 3 个端口开路时,绕组频率响应曲线在低频段存在明显的负增益,在图 6 中表现为曲线在低频段出现反谐振峰。大量的文献研究表明 1 kHz 以下频率段的谐振峰与铁心的状态有关。当高压侧绕组都开路时,高压侧绕组无法产生耦合电

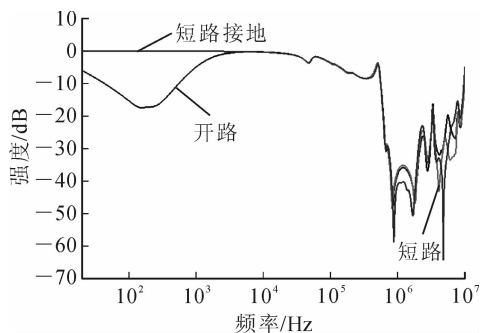


图6 不同高压侧状态下的 a 相频率响应曲线

Fig. 6 FRA curves of a-phase winding in different HV winding status

流,低压侧电流全部提供励磁致使铁心快速趋近饱和,从而影响变压器内部电感的分布与大小,造成频率响应曲线测试的不一致。

2.4 低压侧状态的影响

采用图 1(a)的接线方式,测量高压侧 A 相绕组的频率响应曲线,在试验过程中保持变压器外壳良好接地,且均采用 A 端注入、C 端测量的方式。改变低压侧端口状态时,测量得到的频率响应曲线见图 7。

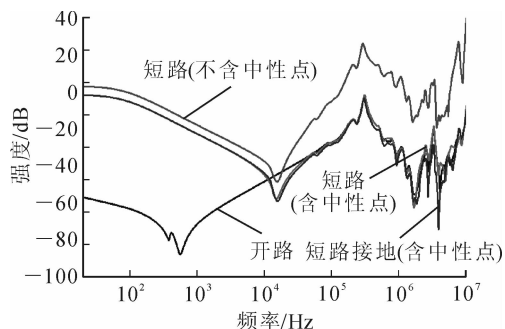


图7 不同低压侧状态下的 A 相频率响应曲线

Fig. 7 FRA curves of A-phase winding in different LV winding status

图 7 中低压侧 a、b、c、o 4 个端口短路及低压侧 a、b、c、o 4 个端口短路接地对应的频率响应曲线相关系数分别为 2.2(低频段)、1.91(中频段)、1.65(高频段),因此可以认为在短接中性点 o 的情况下,短接点接地与否对频率响应曲线的测量没有影响。低压侧 a、b、c 3 个端口开路时,图 7 中曲线在低频段同样出现反谐振峰。这一结论与文中 2.3 节相一致。

在低压侧短路时,是否短接中性点 o 主要影响频率响应曲线中、高频段的增益。从图 7 可以看出,不含中性点时频率响应曲线的增益增大,特别是在 100 kHz 以上时甚至出现了正的增益;而频率响应曲线的谐振峰及反谐振峰对应频率没有明显变化。

3 结果分析与讨论

前文比较了变压器外壳的接地状况、注入电压

的方向、非测试绕组的状态等因素改变时,频率响应曲线的变化情况。

变压器外壳不接地时,以 ao 和 oa 方式测量同一绕组的频率响应曲线存在显著差别,而外壳接地时二者几乎相同。同时无论外壳是否接地,以 ao 方式测量的结果总是相近的。因此认为变压器外壳接地情况将显著影响 oa 方式测得的频率响应曲线,其在外壳不接地情况下测得的频率响应曲线不可用。

非测试绕组的状态对测试绕组的频率响应曲线的测量也存在影响。当测量测试绕组(如低压侧 a 相绕组)的频率响应曲线时,非测试绕组(高压侧)短路及开路情况对应的频率响应曲线在低频段存在差别。开路时,绕组频率响应曲线在低频段存在明显的负增益,表现为曲线在低频段出现反谐振峰。而短路点是否与地相接对频率响应曲线的测量没有影响。

接线方式的不同可能导致频率响应曲线的巨大差异,因此在现场试验过程中需要保持接线方式、接地情况、连接线摆放位置等等条件相一致。多次测量时还应该选择同样的仪器、设备,软件频带、精确度、注入电压等的设置也应该保持统一。

4 结论

1)用频率响应法检测变压器绕组状态时要保证测试条件的统一。在多次现场试验过程中,要保持试验设备(包括试验软件所选取的频率带、精确度、响应时间等)、接线方式(包括接地状态、非测试绕组接线等)一致,必要时还应保持试验人员的一致。试验接线完成后可以用照片、图表的形式记录下试验条件及接线方式,为下次测试提供参考依据。

2)考虑到铁心剩磁、残余电荷等的影响,在多次测量时应保持其前置试验类型及顺序一致。

3)为了解运输途径对绕组形变的影响,频率响应法应该是变压器出厂前的最后一项测试,同时也是运输到现场后的第一项测试,以此来判断运输前后绕组状态的变化。

4)注入电压的方向对频率响应曲线的测量有较大影响,特别是在测量低压侧绕组时这一影响尤为显著。为保证试验结果的可靠性,多次测量时都保持扫频电压从绕组首段注入,在末端进行测量,同时在试验过程中变压器外壳应该良好接地。

5)频试验条件、接线方式的不同可能导致频率响应曲线的巨大差异,某些情况下这些差异比绕组变形、变压器故障导致的差异更大。特别是在原始数据缺失、试验记录不完整的情况下,很容易造成误判。因此在实际的判断中应该综合考虑多方面的

信息,综合分析变压器绕组的可能状态。

参考文献:

- [1] BAGHERI M, NADE M S, BLACKBURN T, et al. Frequency response analysis and short-circuit impedance measurement in detection of winding deformation within power transformer[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2013, 29(3): 33-40.
- [2] SHINTEMIROV A, TANG W H, WU Q H. A hybrid winding model of dic-type power transformer for frequency response analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2): 730-739.
- [3] 臧 状, 陈江波, 李 辉, 等. EEMD 能量熵在配电变压器绕组状态监测中的应用[J]. 高压电器, 2015, (11): 187-193.
ZANG Zhuang, CHEN Jiangbo, LI Hui, et al. State monitoring of distribution transformer windings with EEMD energy entropy[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11): 187-193.
- [4] 程昌奎, 郑永建, 庞 军, 等. 变压器局部放电监测中的最优小波与脉冲鉴别去噪方法研究[J]. 高压电器, 2016, 52(3): 123-128.
CHENG Changkui, ZHENG Yongjian, PANG Jun, et al. Extraction of partial discharge signals from noises based on scale wavelet selection and pulse-sequence analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(3): 123-128.
- [5] 李龙女, 李 岩, 井永腾, 等. 电力变压器漏磁场与杂散损耗计算的研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 122-127.
LI Longnü, LI Yan, JING Yongteng, et al. Research of leakage magnetic field and stray loss calculation in power transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 122-127.
- [6] CHRISTIAN J, FESER K. Procedures for detecting winding displacements in power transformers by the transfer function method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 214-220.
- [7] KIM J W, PARK B K, KIM S W, et al. Fault diagnosis of a power transformer using an improved frequency-response analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 169-178.
- [8] WANG Z D, LI J, SOFIAN D M. Interpretation of transformer FRA responses—part I: Influence of winding structure[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2): 703-710.
- [9] SOFIAN D M, WANG Z D, LI J. Interpretation of transformer FRA responses—part II: Influence of transformer structure[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2582-2589.
- [10] JAYASINGHE J A, WANG Z D, JARMAN P N, et al. Winding movement in power transformers: A comparison

- of FRA measurement connection methods[J]. IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, 2006, 13(6): 1342-1349.
- [11] WANG M, VANDERMAAR A J, SRIVASTAVA K D. Improved detection of power transformer winding movement by extending the FRA high frequency range[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 20(3): 1930-1938.
- [12] KORATOWSKI E, BANASZAK S. Diagnostics of a transformer's active part with complementary FRA and VM measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(3): 1398-1406.
- [13] DL/T 911—2004 电力变压器绕组变形的频率响应分析法[S]. 2004.
DL/T 911—2004 Frequency response analysis on winding deformation of power transformer[S]. 2004.
- [14] CIGRE Working Group A2/26. Mechanical condition assessment of transformer windings using frequency response analysis (FRA) [S]. FRA: CIGRE, 2013.
- [15] IEC 60076-18 Ed.1. Power transformers-part 18: measurement of frequency response[S]. 2012.
- [16] IEEE PC57.149/D9.1. IEEE draft guide for the application and interpretation of frequency response analysis for oil immersed transformers[S]. 2012.
- [17] BAGHERI M, PHUNG B T, BLACKBURN T, et al. Shunt capacitance influences on single-phase transformer FRA spectrum[C]//IEEE Electrical Insulation Conference. Ottawa: IEEE, 2013: 225-229.
- [18] REYKHERDT A A, DAVYDOV V G. Effects of test cable ground extensions on repeatability of frequency response analysis measurements on power transformers[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2012, 28(3): 26-34.
- [19] WERELIUS P, OHLEN M, ADEEN L, et al. Measurement considerations using SFRA for condition assessment of power transformers [C]//IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Beijing: IEEE, 2008: 898-901.
- [20] 曹小龙, 胡春梅, 曹小虎, 等. 变压器频率响应法测试结果的影响因素分析及改善[J]. 高压电器, 2012, 48(7): 81-87.
CAO Xiaolong, HU Chunmei, CAO Xiaohu, et al. Influencing factors on deformation diagnosis of transformer windings[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(7): 81-87.
- [21] MURAWWI E A, MARDIANA R, SU Q. Effect of terminal connections on SFRA results of three-winding power transformers[C]//International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, 2011:
- [22] ABEYWICKRAMA N, SERDYUK Y V, GUBANSKI S M. Effect of core magnetization on frequency response analysis (FRA) of power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3): 1432-1438.
- [23] SATISH L, SARAVANAKUMAR A. Identification of terminal connection and system function for sensitive frequency response measurement on transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 742-732.
- 王珊珊(1983—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为节能环保型变压器研究、变压器故障诊断, 电能质量评估。
- 文正其(1985—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为配电网状态检修、配电网智能化等。
- 鄢小虎(1986—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为变配电设备状态评估、故障诊断及智能化等。
- 卢文华(1976—)男, 博士, 高级工程师, 研究方向为配电网智能化。

(上接第 185 页)

1983.
GB 311.6—1983 High voltage test techniques, Part 5: Sphere-gaps for voltage measurement[S]. 1983.
- [18] 牛海清, 庄小亮, 蚁泽沛, 等. 气隙击穿电压大幅下降的气象条件[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3343-3348.
NIU Haiqing, ZHUANG Xiaoliang, YI Zepei, et al. Meteorological condition of dramatic decline of air gap breakdown voltage[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3343-3348.
- [19] 环境保护部. HJ 633—2012 环境空气质量指数(AQI)技术规范(试行)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
The Ministry of Environmental Protection. HJ 633—2012 ambient air quality index (AQI) technical regulations(trial)[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2012.
- [20] 施 围, 邱毓昌, 张乔根, 等. 高电压工程基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
SHI Wei, QIU Yuchang, ZHANG Qiaogen, et al. High voltage engineering foundation[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006.
- [21] 林浩然, 牛海清, 张耿斌, 等. 高湿条件下空气间隙放电规律的试验研究[J]. 高压电器, 2014, 50(1): 87-91.
LIN Haoran, NIU Haiqing, ZHANG Gengbin, et al. Experimental study on air-gap discharge characteristics in heavy humidity[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 87-91.
- 牛海清(1969—), 女, 副教授, 博士, 主要从事于高压输电线路及高压电气设备相关问题的研究。
- 徐 涛(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事电气设备外绝缘与在线监测方面的研究。