

变压器频率响应法测试结果的影响因素分析及改善

曹小龙¹, 胡春梅², 曹小虎², 张治武², 陈平¹, 刘栋梁¹, 周斌³

(1. 甘肃省天水供电公司, 天水 741020; 2. 甘肃省电力公司检修公司, 兰州 730000;

3. 甘肃省陇南供电公司, 陇南 742500)

摘要: 目前采用频率响应法诊断变压器绕组变形的应用相当广泛,但在实际测量中,其测试结果会受到诸多因素的影响而失真,若不能准确识别这些影响因素,测试结果的可比性将大大降低,从而给测试结果的分析、判断带来困难甚至错误。笔者结合频率响应法检测技术在水电网的应用情况,总结了现场由于各种影响因素造成的绕组频率响应曲线异常的实例并将其逐一归类,为今后判断变压器绕组变形提供依据。

关键词: 变压器; 绕组变形; 频率响应; 影响因素

中图分类号: TM41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2012)07-0081-07

Influencing Factors on Deformation Diagnosis of Transformer Windings

CAO Xiao-long¹, HU Chun-mei², CAO Xiao-hu², ZHANG Zhi-wu²,
CHEN Ping¹, LIU Dong-liang¹, ZHOU Bin³

(1. Gansu Province Tianshui Power Supply Company, Tianshui 741020, China; 2. Gansu Province Power Grid Maintenance Overhaul Company, Lanzhou 730000, China; 3. Gansu Province Longnan Power Supply Company, Longnan 742500, China)

Abstract: Frequency response method is widely applied to diagnosis of transformer winding deformation. However, measurement distortion will take place because of many influencing factors, which may decrease the comparability of measurement results, and thus make analysis and judgement of the results difficult or even false. To accurately identify the influencing factors, we sum up and classify different abnormal curves of windings' frequency response due to different influencing factors according to the application of frequency response detection technology in Tianshui grid. This study is expected to provide evidence for deformation judgement of transformer windings.

Key words: transformer; winding deformation; frequency response; influencing factor

0 引言

电力变压器绕组变形是指在电动力和机械力的作用下,绕组的尺寸或形状发生不可逆的变化^[1]。绕组变形是导致变压器发生损坏事故的主要原因之一^[2]。因此,对受短路冲击后的变压器应进行绕组变形测试,以确保变压器的安全稳定运行。有关规程^[3-5]已将该项试验放在变压器试验项目的重要位置。运行单位目前主要采用频率响应法(以下简称FRA法)来诊断变压器绕组是否变形、变形的种类及变形的程度。应用FRA法检测变压器绕组变形虽然具有极高的灵敏度,但在实际测试中由于受各种因素影响,导

致检测数据有所偏差而得不到变压器真实数据,而可靠的测试是变压器绕组变形判断的基础,总结绕组变形测试的影响因素及防范措施是非常必要,可以避免在绕组变形作结论时发生误判、错判情况。

1 变压器绕组变形的频率响应法

FRA法是采用正弦信号扫频的方法,从变压器某个绕组的一端对地注入扫频信号,在绕组的另一端测量传递过来的信号,计算传递函数并绘制出频率响应曲线。当变压器结构固定后,频响曲线就是固定的。FRA法诊断变压器绕组变形的主要原理就是建立在比较绕组频率响应特性变化的基础上,即相当于比较变压器绕组的结构特征“指纹”图,故要求

收稿日期:2011-11-22; 修回日期:2011-12-26

测试系统具备极高的检测灵敏度和工作稳定性^[6]。而变压器绕组变形后,会使频响曲线发生变化。通过比较同一绕组不同时期,同一变压器同一电压等级绕组不同相间,同类变压器同类绕组的频响曲线可以判断被试绕组是否有变形情况。因此,在判断变压器绕组是否变形时必须获得稳定、真实的变压器绕组的频率响应曲线才能对变压器变形与否做出正确的结论。在测试过程中,改变测试条件对测试结果的重复性有一定影响,这其中包括测试方法和变压器本身等因素对测试结果的影响。

2 影响频响曲线的主要因素及改善措施

变压器绕组结构的任何变化,都意味着变压器的分布电感、电容的变化^[7],而 FRA 法对变压器绕组变形测试的关键,取决于对电感、电容微小变化的灵敏度。然而测试回路中任何电气参数的改变同样也会改变变压器的分布电感、电容的变化,从而影响到变压器绕组频率响应曲线的变化。现场测试时的影响因素是多方面的,检测时要正确甄别,去伪存真。下面结合近年来天水电网变压器现场实测典型案例进行分析。

2.1 变压器套管端部相连的所有引线的影响

2.1.1 引线杂散电容

变压器套管端部相连的所有引线对地或其他物体存在杂散电容,它往往是不固定的,三相之间也不会完全平衡,FRA 法测试采用的是高频信号,杂散电容对频响特性曲线有一定影响,而且这种影响随变压器电压等级的升高和容量的增大而增大。图 1 为某变压器拆除和不拆除引线测试时频响曲线,由图 1 可知杂散电容可能会影响频响曲线高频部分的一致性。

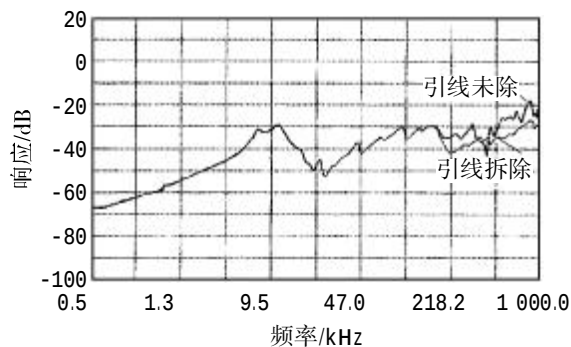


图 1 变压器引线的影响

Fig. 1 The impact of the transformer leads

2.1.2 电场干扰

绕组变形测试时被测变压器附近的强电场干扰不容忽视,在强电场下变压器三相套管端子处可能

会产生感应电压,感应电压幅值和相位不同,其值远大于 FRA 仪器输出电压值而对测试系统产生影响,使得三相绕组频响曲线不一致。变压器电压等级越高,感应电压越高,测试时受到的干扰也就越大。

2.1.3 改善措施

为排除变压器引线和电场干扰对频响曲线的影响,保证测试结果的重复性,测量前必须拆除变压器所有进出引线,并尽量拉开一定距离,使变压器处于完全隔离状态。同时已拆除进出引线必须直接接地,避免不同感应电压的影响。

2.2 变压器绕组残余电荷和绕组漏电感的影响

绕组残余电荷和绕组漏电感对绕组变形测试带来两方面不利影响,一方面是可能损坏检测仪器;另一方面是造成频响曲线的失真,造成测试结果的重复性不一致。

2.2.1 残余电荷的影响

常规绝缘试验如绝缘电阻、直流电阻、直流泄漏电流等,都需要对变压器绕组进行充电。如果试验后放电不充分,绕组中的残余电荷将直接影响到被试变压器绕组层间、匝间及对地电容量的大小,进而引起绕组频响曲线的变化。图 2 是某变压器直流电阻测试前后进行变形试验所得的曲线,通过与历史曲线的对比,发现高频略有上翘,中低频重合较好,有一定影响。

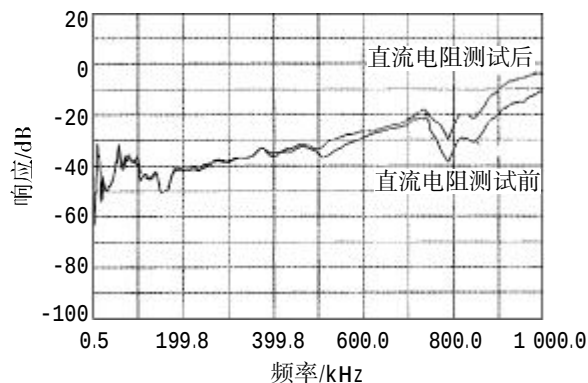


图 2 变压器直流电阻测试对频响法曲线的影响

Fig. 2 Transformer DC resistance test method of frequency response curves

2.2.2 绕组漏电感的影响

变压器局部放电试验通常与感应耐压同步进行,试验电源采用的是倍频电源(100~400 Hz),试验时铁心趋于饱和,如果在局部放电试验后马上进行绕组变形试验,由于绕组漏电感的变化,此时变压器内部电感的分布及大小较正常状态将有很大区别^[8],所测得的频响曲线与历史比较相差较大,给正确判断变压器状态带来了干扰。

2.2.3 改善措施

变压器有多项试验需要进行时, 为避免绕组充电造成的残余电荷和绕组漏电感对变形试验频响曲线造成的影响, 应合理安排试验先后顺序, 在条件允许的情况下尽可能的先进行变形试验。在拆除变压器引出线后对变压器各侧绕组进行充分短路接地放电, 以提高检测数据的重复性。

2.3 接线方式的影响

接线方式对频响曲线影响较大, 不同接线组别的变压器, 绕组变形测试的接线方式也不同。为便于对测试数据进行横向或纵向的相关性比较, 正确诊断出被测变压器绕组变形绕组的变形情况, 通常应按照规程^[9]给出方法(图 3)选定扫频测量回路的输入(激励)端和测量(响应)端。对于某一特定接线组别的变压器, 正常测试时必须具有一套相对固定的测试接线, 以便下一次检测时仍沿袭该接线方式, 避免因接线方式不同而造成频响曲线重复性差异。变压器的几种常用检测接线方式见图 3。

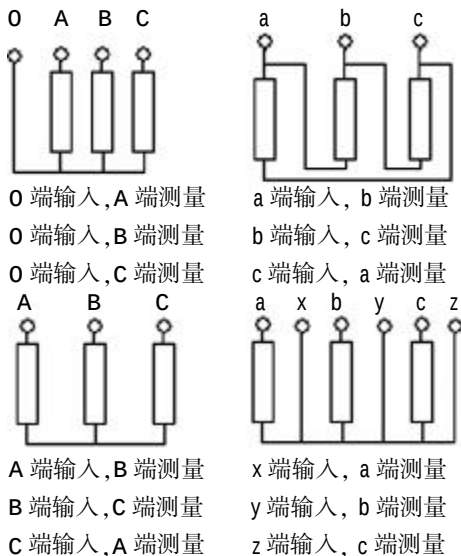


图 3 变压器的几种常用检测接线方式

Fig. 3 Transformer wiring of several commonly used detection

2.3.1 扫频信号的注入方式

从理论上讲变压器绕组的等值数学模型是一个完全理论化的无源 4 端线性网络, 则扫频信号源不论施加在绕组顶部还是绕组尾部, 其频响曲线不会发生明显变化^[10]。但由于真实变压器的首尾 2 端不可能完全对称, 故信号源位置对同一绕组的频响曲线具有一定影响。现场检测时对联接组别相同的变压器, 接线时有的采用中性点注入, 有的采用中性点输出, 但从某台变压器的实测情况(图 4)来看, 信号注入位置对同一绕组的频响曲线具有一定的影响从而为今后横向间的数据比较设置了障碍。信号注入

方式的影响见图 4。

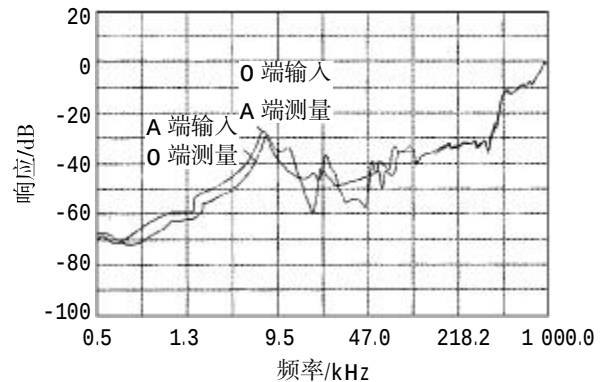


图 4 信号注入方式的影响

Fig. 4 The impact of the signal injection method

2.3.2 非测试绕组

通常采用频响法进行变形试验是在非被试绕组开路下进行的, 根据不同测试仪器测量要求, 非测试绕组可悬空或一点接地 (接地的目的是保持其他非测量绕组有一个确定的电位, 确保电容值稳定)。使高频电流的流向必须正确, 否则变压器内部对地电容分布及大小都将改变, 从而造成频响曲线发生较大变化。因此, 对同一台变压器历次试验应保持非测试绕组状态一致。

2.3.3 三角型接线的绕组的接线

对于三角型接线的绕组, 如果有可能解开, 有条件时应解开三相分别测量, 以提高测量数据的准确度。无法解开则应保持每次接线方式相同。

2.4 试验电源的影响

现场试验电源经常是与其他电动机、电焊机等机具共用, 导致仪器工作电源不稳, 以至输出频率不准确, 影响试验的结果^[11]。若仪器附近有高频振荡 (电焊机等) 等会对曲线产生影响, 图 5 是某变压器测试时附近有土建施工机具 (电焊机、台钻、切割机) 影响时的频响曲线。为避免试验电源对频响曲线的影响应注意仪器试验电源尽可能不与产生干扰的机具共用一个电源, 有条件时主机与笔记本电脑应采用隔离措施, 如加装隔离变压器或者其他保护装置。

2.5 测量线缆的影响

2.5.1 测量线缆

测试线缆连接端子经过多次插接, 线缆的芯针可能会松动, 导致信号不稳定。图 6 是某变压器输入信号线接头内部松动时的频响曲线, 可知测量线缆本身的杂散电容也会影响频响曲线, 测试时应使用仪器专用的测量电缆及连接引线, 否则难以保证测试结果的有效性。

现场接线前应检查测量线缆的好坏, 不应有损

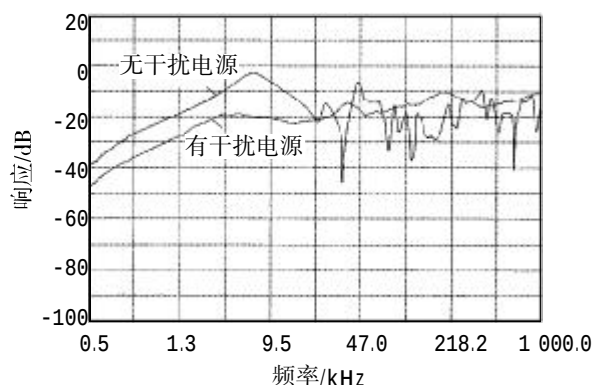


图 5 变压器附近有土建施工机具影响

Fig. 5 Transformer near the impact of civil construction equipment

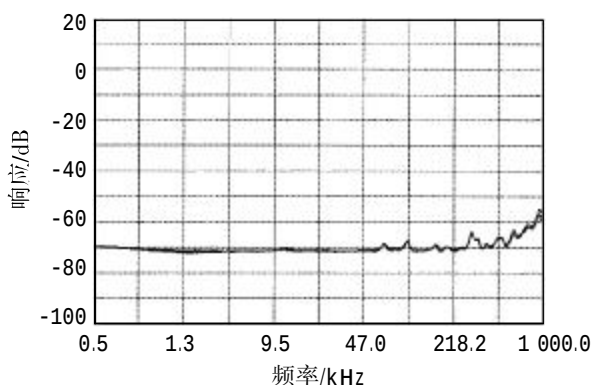


图 6 测量线缆接头内部松动的影响

Fig. 6 Measuring the impact of loose internal cable connectors

坏。一般用万用表或者通断试电笔进行检查。如检查线缆的导通情况和芯针的状况、专用测试钳或者匹配单元的匹配电阻值是否满足要求等。部分仪器厂家推荐检查测试线缆的经验方法是先将测试线短接,开机测量,检验曲线应近似一条 0 dB 直线^[12] (末端允许有 ± 1 dB 波动)。

2.5.2 引线接触不良

因测量信号较弱,输入信号和输出信号测量端应与检测仪器和变压器绕组端头可靠连接,以减小接触电阻对频响曲线的影响。测试线缆出现接触不良的问题,主要原因有缆线受力引起屏蔽层接触不良;图 7 为测试线缆线夹与变压器套管接头接触不良造成频响曲线失真曲线。因此,现场接线前如果发现套管接头上有导电膏、油污、油漆、锈迹,务必要清理干净后再接线。

2.6 变压器分接开关位置的影响

变压器绕组的频响曲线与分接开关的位置有关,分接开关的位置不同时,绕组的匝数也不同,绕组的分布参数(电感量、电容量)不同,从而引起绕组频响曲线有较大的区别。因此,测试时必须正确记录

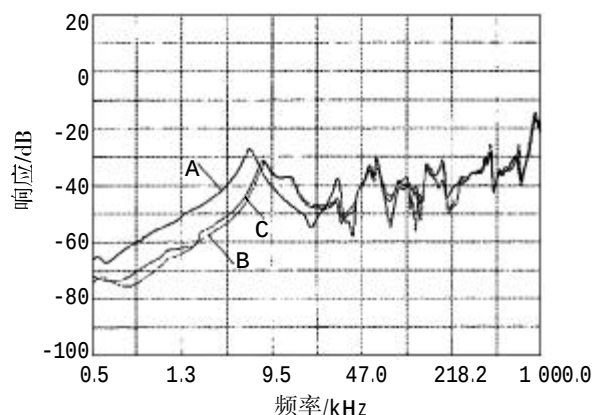


图 7 测试引线 with 套管接头接触不良

Fig. 7 Test leads and casing joints bad

分接开关的位置。对有载调压变压器现场应尽可能将被试变压器的分接开关放置在最高分接 (第 1 分接),以获取较全面的绕组信息;对无载调压变压器,应保证每次测量在同一分接位置,便于比较。图 8 为某有载调压变压器,高压绕组 A 相分接开关档位从第 1 分接切换到第 17 分接时,频响曲线的变化情况。由图 8 可知分接开关位置对变压器变形的影响是显而易见的。分接开关在 1、9、17 分接差异大致在 600 kHz 以下频段,且随着匝数差的增多,差异向低频段延伸。

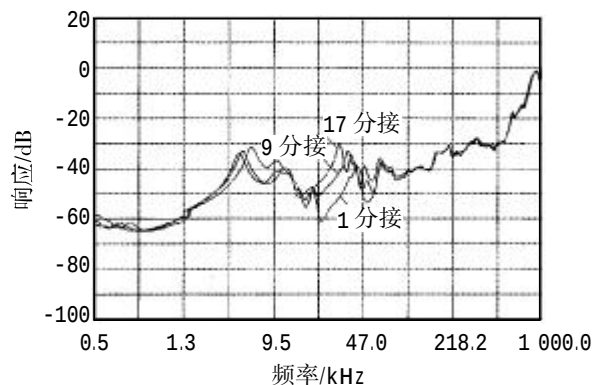


图 8 不同分接位置对频响曲线的影响

Fig. 8 Different tap positions on the frequency response curve

2.7 接地的影响

2.7.1 被测变压器本体的接地

测试前首先检查被测变压器本体接地状况是否良好,被测变压器的接地不良会造成频响曲线严重失真。文[13]介绍了一台变压器本体接地电阻(接地引下线与主接地网间的电阻为 57 Ω)对绕组频响曲线的影响,见图 9,说明变压器的接地电阻对绕组变形测试影响很大。在现场测量时也曾发现过被试变压器接地不良造成数据不稳定的现象,因此在分析测量数据时应考虑被测变压器的接地状态对绕组变

形测试数据的影响。

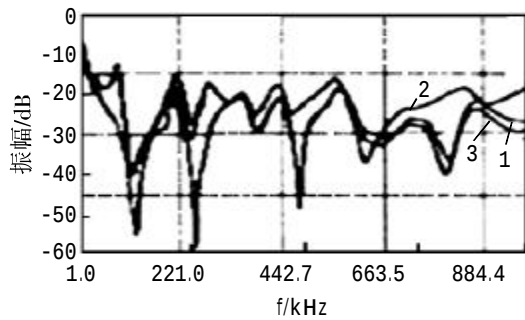


图 9 变压器本体接地电阻对频响曲线的影响

Fig. 9 The affect of transformer body earthing resistance on the frequency response curve

2.7.2 变压器铁心接地状态

变压器的铁心,在正常运行状态下是一点直接接地。铁心的接地状态直接影响变压器绕组频响曲线,铁心接地不良对绕组的频率响应曲线影响明显。图 10 是某变压器铁心不接地与接地良好状态下的 2 条频响曲线。可见,中高频域影响较大,谐振点位置有所改变。故测试时以铁心直接接地为宜,避免由此带来的影响。为了保证铁心可靠接地,测量前在铁心接地点处,使用锉刀或砂纸打磨掉防锈的油漆接地点有漆膜时一定要进行刮净处理,露出有光泽的金属再行接地。

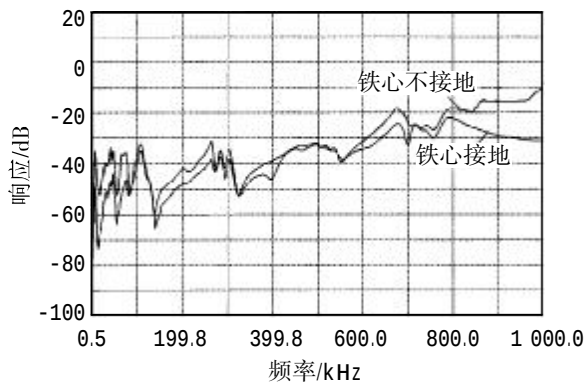


图 10 铁心接地

Fig. 10 Core ground

2.7.3 试验回路的接地

试验回路的接地主要是指扫频信号的 2 个检测端的接地线即信号线的屏蔽接地。测量过程中试验回路接地是非常重要的,它除了保护仪器设备外,主要是使高频电流的流向正确^[4],否则测量结果将无法一致。

1) 试验回路接地不良。信号线的屏蔽接地一般均应可靠连接在变压器铁心接地上,因接地线接地不良时接地线与接地点之间的电容量的变化将影响频响曲线,见图 11,从而导致测试结果重复性降低。

测量时接地线尽可能用螺母紧固在铁芯接地点上,不可随意缠绕在油箱表面的螺栓上,并保证每次试验时试验回路应一点接地。

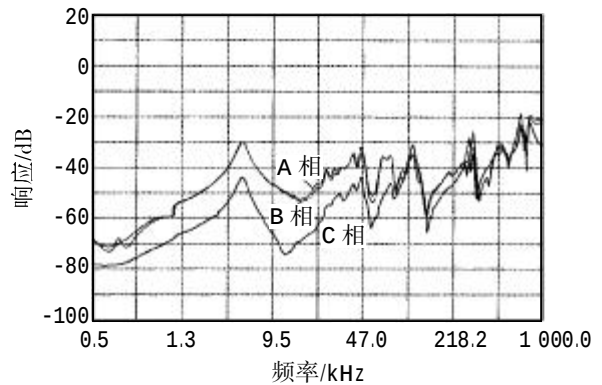


图 11 信号线屏蔽接地不良的影响

Fig. 11 Signal wire shield grounding adverse effects

2) 接地线接地的位置及长度。由于频响仪工作频段在 1~1 000 kHz 之间,因此接地线在工作状况下是电阻和电感组成的阻抗值,在频率较低情况下(包括工频)可认为是电阻性的(电感很小),但在高频情况下主要是电感性的,其阻抗值跟频率 f 是成正比的,因此接地线接地的位置及长度不一致,其接地线阻抗值是不同的,它在测量回路中对测试数据造成的差异也是不容忽视的。另外还要注意接地线长短应一致以保证三相阻抗回路大致相同。文[15]介绍了一台变压器在接地线在不同接地位置(此时接地线长度也不一致)对绕组频响曲线的影响比较极端的例子,见图 12,所以 2 个检测端下引接地线要保持长度应一致,每次试验接地在同一按地点,以避免阻抗不平衡而引起误差。

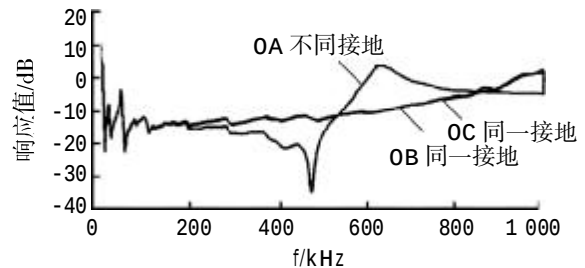


图 12 接地点不同时测量曲线

Fig. 12 Take place without simultaneous measurement curve

2.8 检测仪器的影响

2.8.1 仪器自身的影响

为确保仪器的正常测量,除了试验前对主机进行正常检查、预热,还要对检测仪器定期校验。图 13 是某仪器在冬季测量时仪器预热和不预热时的频响曲线对比。

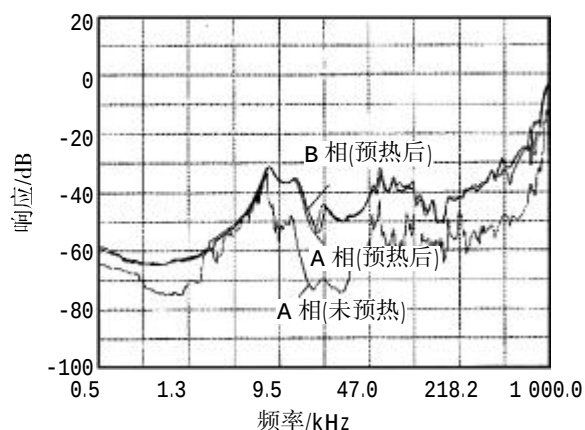


图 13 检测仪器预热前、后频响曲线

Fig. 13 Testing instrument to warm up before and after the frequency response curve

2.8.2 不同检测仪器的影响

选用绕组变形检测仪器时应选择稳定性、抗干扰性及重复性好的仪器。需要注意的是不同检测仪器所测同一台变压器相同部位的测试数据是没有可比性的。为了避免仪器本身带来的误差,尽可能每一次都使用同种测量仪器,否则可能会出现误差,导致错误结论。

2.9 其他因素的影响

2.9.1 变压器内部是否有油及油温的影响

有资料^[16-17]表明变压器内部是否有油以及本体温度、绕组温度可能会对绕组频响特性有一定影响。由于变压器油的介电常数 ϵ 与变压器油及油温有一定的关系,油和油温会改变变压器内部的电容分布,试验时应予以考虑。因此,每次测量时应正确记录被测变压器的油温及环境温度。

2.9.2 测试人员的影响

在现场测量中曾发现不同测试人员在不同时间采用同一台仪器对同一台变压器进行实测,测试结果竟然不相同。原因是多方面的,其中最主要的是每个测试人员对这项试验认识不同,测试方法也有一定差异,从而造成测量结果的差异。因此有条件时尽可能的将测试人员固定下来。另外在测试过程中,接线人员对测量回路也会形成杂散电容,杂散电容与接线人员在变压器上距套管的位置有关,所以说接线人员也是干扰源,会在高频条件下影响测试结果的重复性。因此接线人员尽量远离套管,以减少杂散电容的影响。

3 结语

1)现场测试尽管会遇到诸多不同类型的影响因素,有些难以控制,这些因素关系到绕组变形检测的有效开展和检测数据的准确性,但是只要对影响因

素适当识别和排除,测试获得的频响特征曲线就可以具有“指纹”价值。

2)用 FRA 法检测变压器绕组状态要保证测试条件的统一,在测试中做到 3 个“固定”,即固定测试人员、固定测试仪器、固定测试方法(接线方式、接地等)。

3)由于 FRA 法检测绕组状态易受检测条件及检测方式变化所造成的影响。同时,也存在无法定量判断的缺陷,实际应用中还需积累更多的经验。频响曲线只是绕组变形判据之一,判断变压器是否变形还需应结合相关测试手段(短路阻抗测量、空载损耗,油色谱分析、直流电阻、绕组电容量等)进行分析。切不可偏概全,否则,容易引起误判断。在实际分析判断中,需要综合考虑多方信息,全面诊断,综合分析,可有效判别变压器绕组的状态。

参考文献:

- [1] 陈化钢. 电力设备预防性试验方法及诊断技术[M]. 北京:中国科学技术出版社,2001.
CHEN Hua-gang. Electrical equipment test methods and preventive diagnostics [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2001.
- [2] 陈化钢. 电力设备异常运行及事故处理[M]. 北京:中国水利电力出版社,1999.
CHEN Hua-gang. Abnormal operation of electrical equipment and incident handling [M]. Beijing: China Water Power Press, 1999.
- [3] DL/T 393—2010. 输变电设备状态检修试验规程[S].
DL/T 393—2010. Regulations of condition-based maintenance & test for electric equipment[S].
- [4] GB 50150—2006. 电气装置安装工程电气设备交接试验标准[S].
GB 50150—2006. Standard for hand-over test of electric equipment electric equipment installation engineering[Z].
- [5] 国家电网公司. 国家电网公司十八项电网重大反事故措施[Z]. 北京: 国家电网公司, 2012.
State Grid Corporation. State grid corporation of eighteen major anti-accident measures power[Z]. Beijing: State Grid Corporation, 2012.
- [6] 戴文进, 刘保彬. 频响法在变压器绕组变形检测中的应用[J]. 电力建设, 2005, 26(6): 42-44.
DAI Wen-jin, LIU Bao-bin. Application of frequency response method in measuring distortion of transformer windings[J]. Electric Power Construction, 2005, 26(6): 42-44.
- [7] 赵克境, 赵 岩, 潘晓冬. 变压器绕组变形试验方法技术分析[J]. 黑龙江电力, 2006, 28(2): 119-121.
ZHAO Ke-jing, ZHAO Yan, PAN Xiao-dong. Technique analysis of transformer winding deformation testing method [J]. Heilongjiang Electric Power, 2006, 28(2): 119-121.

- [8] 吴晓东,魏泽民.影响变压器频率响应测试结果的因素分析[J]. 电力设备,2004(10):60-63.
WU Xiao-dong,WEI Ze-min.Factor analysis of effect on testing result of frequency response for transformer [J]. Electrical Equipment,2004(10):60-63.
- [9] DL/T 911—2004.电力变压器绕组变形的频率响应分析法[S].
DL/T 911—2004.Frequency response analysis on winding deformation of power transformer[S].
- [10] 解裕平,张成良.频响法检测变压器绕组变形的研究[J]. 内蒙古电力技术,2000,18(2):4-6.
JIE Yu-ping,ZHANG Cheng-liang. The research for checking the deformation of the transformer coils by using the frequency response analysis method [J]. Innermongolia Electric Power,2000,18(2):4-6.
- [11] 毕建刚,王献丽,高克利.变压器绕组变形现场测试中应注意的问题[J]. 变压器,2009,46(12):29-31.
BI Jian-gang,WANG Xian-li,GAO Ke-li. Problems in field test of transformer winding deformation [J]. Transformer,2009,46(12):29-31.
- [12] 包玉树. 变压器绕组变形检测技术在江苏电网的应用[J]. 江苏电机工程,2005(4):49-51.
BAO Yu-shu. Application of winding distortion inspection technology of transformer in Jiangsu power grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2005(4):49-51.
- [13] 吴国跃,李世伟,刘多禄.电力变压器绕组变形实测中的影响因素[J]. 高电压技术,2001,27(3):81-82.
WU Guo-yue,LI Shi-wei,LIU Duo-lu. Analysis of influence factors in detecting power transformer winding deformation[J]. High Voltage Engineering,2001,27(3):81-82.
- [14] 谢宇风,谢从珍.变压器绕组变形实测中影响因素研究[J]. 华中电力,2004,17(2):38-41.
XIE Yu-feng,XIE Cong-zhen. Analysis of influence factors in detecting power transformer winding deformation [J]. Central China Electric Power,2004,17(2):38-41.
- [15] 王景林,李锐海.接地线对变压器绕组变形试验的影响[J]. 云南电力技术,2007,35(1):1-2.
WANG Jing-lin,LI Rui-hai.Influence of ground wires on transformer winding deformation testing [J]. Yunnan Electric Power,2007,35(1):1-2.
- [16] 何文林,陈金法,应高亮,等.频响分析法测试变压器绕组变形的研究[J]. 中国电力,2000,33(12):39-42.
HE Wen-lin,CHEN Jin-fa,YING Gao-liao,et al. A study on detecting winding deformation in transformers with FRA method[J]. Electric Power,2000,33(12):39-42.
- [17] 程盛.正确应用频率响应相关系数分析和判断绕组变形[J]. 高压电器,2006,42(1):66-69.
CHENG Sheng.Analysis and judgement of the winding deformation based on the frequency response relevant factor[J]. High Voltage Apparatus,2006,42(1):66-69.

曹小龙(1971—),男,汉族,甘肃天水人,大学,高级工程师,从事高电压试验工作。

(上接第 80 页)

- ZHENG Chuan,CAI Jin-ding. Quantification of factors influencing transmission line parameters [J]. High Voltage Engineering,2008,34(4):813-815
- [16] 封滢彦,俞集辉.超高压架空输电线的工频电场及其影响(一)[J]. 重庆大学学报,2004,27(4):10-14.
FENG Yan-yan,YU Ji-hui. Power frequency electric field caused by EHV lines and its effect[J]. Journal of Chongqing University,2004,27(4):10-14.
- [17] 王广周,张嵩阳,闫东,等.500kV超高压输电线路电磁环境影响因素分析及其防护对策[J]. 高压电器,2010,46(8):93-100.
WANG Guang-zhou,ZHANG Song-yang,YAN Dong,et al. Analysis of influencing factors on electromagnetic environment under 500 kV EHV transmission lines with prevention strategies [J]. High Voltage Apparatus,2010,46(8):93-100.
- [18] 熊兰,宋道军,张又力,等.输电走廊工频电磁场的测量和解决方案[J]. 高压电器,2011,47(8):97-101.
XIONG Lan,SONG Dao-jun,ZHANG You-li,et al. Electromagnetic field intensity measurement and solution for unsafe environment along transmission lines[J]. High Voltage Apparatus,2011,47(8):97-101.
- [19] YAO De-gui,LI Bing,DENG Jun,et al. Power frequency magnetic field of heavy current transmit electricity lines based on simulation current method [J]. Automation Congress,2008,28(2):1-4.
- [20] PERRY D E,CHARTLER V L,REINER G.BPA 1 100 kV transmission system development corona and electric field studies[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems,1979,PAS-98(5):1728-1738.
- [21] WG36-01.Electric and magnetic field from power transmission systems-results of an international survey[C]// CIGRE.[S.l.]: CIGRE,1986:36-09.
- 王礼(1976—),男,工程师,从事电力系统方面的工作。
周为(1978—),男,工程师,从事电力系统方面的工作。