

电力变压器油箱固有频率测试及其影响分析

赵宏飞¹, 马宏忠¹, 李 凯², 李 勇², 黄朝志¹, 钟 钦¹

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100;

2. 江苏省电力公司南京供电公司, 江苏 南京 210008)

摘要: 首先分析油浸式电力变压器振动产生机理以及油箱壁发生共振现象原因, 对常用油浸式电力变压器的油箱壁结构特点进行了分类, 提出了振动测点布置的方法。对 1 台 100 kV·A、10 kV/0.4 kV 油浸式变压器油箱表面固有频率进行测试, 并对所有测点固有频率特性进行分析, 并与变压器空载运行时油箱表面测得的振动信号进行比较, 由比较可知当使用振动测量法诊断变压器故障时需考虑油箱壁共振现象的影响。

关键词: 电力变压器; 固有频率; 振动; 共振; 故障诊断; 测点布置

中图分类号: TM 41

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.11.029

0 引言

在变压器设计、安装调试和运行过程中, 需要考虑许多参数的影响, 其中设备在运行条件下产生的振动就是其一。当变压器发生振动时不仅会产生噪声, 造成环境噪声污染, 而且当变压器长期处于强烈振动或共振状态时, 就会缩短其使用寿命, 甚至造成设备损坏^[1]。

近年来, 基于振动的电力变压器状态监测得到一定的研究和应用, 通过监测变压器的振动来分析变压器的运行状态^[2-9]。Garcia^[3-4]等对不同电压下变压器铁芯振动进行了较为全面的测试, 分析了影响其振动的因素; 熊卫华^[5]等以希尔伯特-黄变换能量谱的变化为依据对铁芯的故障状态进行判别; 郭洁^[6]等提出相应的信号特征提取方法用于获取变压器偏磁振动的特征。上述方法^[2-9]通过从变压器油箱表面间接获得铁芯或绕组的谐波能量或时频带能量的变化对铁芯或绕组的状态进行分析和诊断。由于油浸式变压器油箱有一定的固有频率, 这对从油箱表面间接获得的振动信号有一定的影响, 使得这些方法的准确性有一定的局限。顾晓安^[10]等通过仿真和实验对变压器油箱固有频率进行研究, 得出当油箱固有频率与来自铁芯的振动频率相接近时, 油箱将会产生谐振, 使噪声增大。但未曾有对油箱固有频率对振动测量法影响的研究, 因此, 测量、评价和研究变压器油箱的固有振动具有重要意义。

本文对一台油浸式变压器油箱表面不同点的固有频率进行测量, 通过与变压器空载运行时油箱表面相同点测得的振动信号进行对比分析, 说明油箱共振现象对基于振动测量法诊断变压器故障有影响。油箱固有频率测试结果为基于振动测量法诊断变压器故障以及变电站变压器降噪提供一定参考^[10-11]。

1 实验原理

1.1 变压器振动产生机理

正常运行中的电力变压器器身振动是由电力变压器铁芯、绕组的振动及冷却装置的振动引起的。本体振动的来源有^[12-14]: 硅钢片的磁致伸缩引起的铁芯周期性振动; 硅钢片接缝处和叠片之间因漏磁而产生的电磁吸引力引起的铁芯振动; 绕组中负载电流产生的绕组匝间电动力引起的振动; 漏磁引起的油箱壁振动。电力变压器本体的振动通过铁芯垫脚以及绝缘油 2 条路径传递给油箱壁, 使油箱壁产生振动, 进而产生油箱振动以及噪声, 并以声波的形式均匀地向四周发射。冷却装置自身产生振动与噪声, 并通过接头等装置将振动传递给油箱^[15]。

由于磁致伸缩的周期是工频电源周期的一半, 所以磁致伸缩引起的电力变压器本体的振动与噪声以 100 Hz 为基频。铁芯磁致伸缩固有的非线性特点以及绕组内电流的畸变, 会导致油箱表面测得的振动信号中存在着基频为 100 Hz 的高阶谐波分量。

1.2 变压器油箱共振原理

假设变压器油箱受到的驱动力按余弦规律变化, 即有 $F = F_0 \cos \omega t$, F_0 为驱动力的幅值, ω 为驱动力的角频率, 则单自由度系统在驱动力作用下的强迫振动运动方程为:

$$m\ddot{x} = -kx - \gamma\dot{x} + F_0 \cos \omega t \quad (1)$$

其中, m 、 γ 、 k 分别为质量、阻尼和刚度。

令 $\omega_0^2 = k/m$, $2\beta = \gamma/m$, $f_0 = F_0/m$, 则上式可写成:

$$\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x = f_0 \cos \omega t \quad (2)$$

在阻尼较小的情况下, 上述微分方程的解为:

$$x = A_0 e^{-\beta t} \cos(\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} t + \varphi_0) + A \cos(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

式(3)表示小阻尼下的受迫振动是阻尼振动(等式右边第 1 项)和简谐运动(等式右边第 2 项)的叠加。经过一段时间后, 第 1 项的阻尼振动衰减到可

以忽略不计,受迫振动进入稳定的等幅振动,其表达式为:

$$x=A\cos(\omega t+\varphi) \tag{4}$$

稳态时受迫振动的频率和驱动力的频率相等。

其中,受迫振动的振幅 $A=\frac{f_0}{\sqrt{(\omega_0^2-\omega^2)^2+4\beta^2\omega^2}}$,

初相位 $\varphi=\arctan\frac{-2\beta\omega}{\omega_0^2-\omega^2}$ 。

在其他条件不变的情况下,受迫振动的幅值 A 随驱动力的频率而改变,驱动力的频率为某一特定值时,受迫振动的幅值将达到极大值,发生共振,相应的频率称为共振频率。利用求极值的方法求得共振频率为 $\omega_r=\sqrt{\omega_0^2-2\beta^2}$,此时振幅最大值为 $A_r=\frac{f_0}{2\beta\sqrt{\omega_0^2-\beta^2}}$,共振频率 ω_r 一般不等于系统的固有频率 ω_0 ,只有当阻尼很小($\beta\ll\omega_0$)时,共振频率才接近固有频率。

由于变压器本体的振动主要为基频 100 Hz 的高阶谐波,当振动的某一频率分量接近油箱的共振频率时,振动幅值会变得很大。这会产生更大噪声,造成环境噪声污染,当变压器长期处于强烈振动或共振状态时,就会缩短使用寿命,甚至造成设备损坏,而且对基于振动测量法诊断变压器故障会产生一定影响。因此对选取的变压器油箱测点固有频率进行测试具有一定的意义。

2 变压器器壁主要结构及测点布置原则

油浸式电力变压器油箱壁结构形式多样,按照油箱壁有无加强筋以及加强筋放置方式归纳起来,可简化成如图 1 所示 4 种形式^[16],其中图 1(d)是油箱壁上无加强筋结构。

不同厂家生产的变压器主体大小、结构形式不尽相同,因此,在确定测点数量时,应当考虑加强筋与油箱壁的相互关系。加强筋将油箱分割为若干矩形

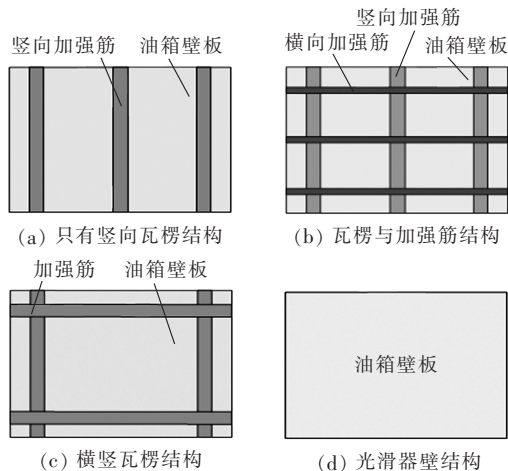


图 1 油浸式变压器油箱表面结构示意图
Fig.1 Wall structures of oil tank for oil-immersed transformer

单元(同时各加强筋也可以看作矩形单元面),可定义 1 个长度变量 L ,通过测量各单元的具体尺寸 L ,确定每个单元面上的测点数量。油箱壁、加强筋的长(宽)尺寸 L 上每 300 mm 放置 1 个测点,具体布置原则见表 1。

表 1 变压器测点布置原则
Tab.1 Principles of measuring point disposal

L/mm	测点数量	L/mm	测点数量
$L\leq 300$	0	$900<L\leq 1200$	3
$300<L\leq 600$	1	$L>1200$	4
$600<L\leq 900$	2		

本次试验对象是 1 台型号为 S9-M-100/10-0.4 的三相油浸式电力变压器,变压器油箱为光滑器壁结构。取变压器顶部作为测点布置的讨论对象,顶部尺寸为 990 mm×550 mm,长方向 $L_x=990\text{ mm}<1200\text{ mm}$,按照表 1 测点布置原则,布置 3 个测点;宽方向 $L_y=550\text{ mm}<600\text{ mm}$,布置 1 个测点。

3 油箱固有频率测试仪器与方案设计

3.1 变压器油箱表面测点选择

综合考虑上文的测点布置原则以及变压器表面结构,选取了变压器顶部 A、B、C 三相铁芯正上方以及油箱壁四周中部共 11 个点的振动进行测量。测点具体分布为:顶部 3 个点、正面(靠低压侧)3 个点、背面(靠近高压侧)3 个点以及侧面 2 个点。选择的测点具体布置如图 2 所示,振动加速度传感器利用磁铁吸附在变压器油箱表面。

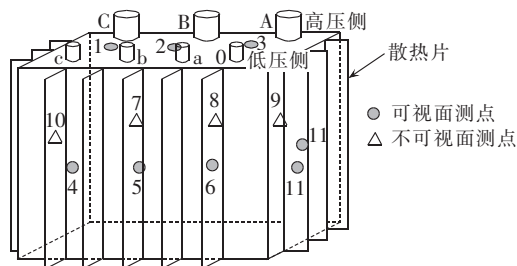


图 2 变压器油箱测点分布图
Fig.2 Allocation of measuring points

3.2 油箱固有频率测试

振动系统为线性系统,用一特定已知的激振力,以可控的方法来激励结构,同时测量输入和输出信号,通过传递函数分析,得到系统固有频率。响应与激振力之间的关系可用导纳 Y 表示:

$$Y=\frac{X}{F}=\frac{1/k}{\sqrt{(1-u^2)^2+4D^2u^2}}e^{i\varphi} \tag{5}$$

$$\varphi=\arctan\frac{-2Du}{1-u^2} \tag{6}$$

其中, X 为在油箱表面测得的振动信号, F 为冲击力锤输入的力信号, k 为刚度, $u=\omega/\omega_0$ 为频率比,

$D=\beta/\omega_0。$

导纳 Y 的意义为幅值为 1 的激励力所产生的响应,研究 Y 与激励力之间的关系,就可得到系统的频率响应特性曲线。在共振频率下时导纳值迅速增大,从而可得各阶共振频率。

本文使用锤击法,使用仪器:江苏联能电子型号为 LC-01A 的冲击力锤(力传感器灵敏度为 4 pC/N)、型号为 CA-YD-182 的压电式加速度传感器(灵敏度为 20 pC/g)、电荷调理电路以及数据分析仪,仪器连接图 3 所示。用尼龙头(其冲击脉宽及频率响应范围达到 3 kHz)的冲击力锤对油箱表面进行激振,通过测量力锤敲击的力信号和吸附在测点处振动传感器测量的振动加速度信号,再对数据进行传递函数分析,得到测试点各阶的固有频率,第 1 个峰就是系统的第一阶固有频率,后面几个峰值是高阶固有频率。

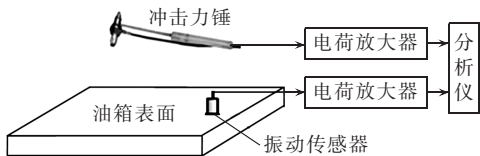


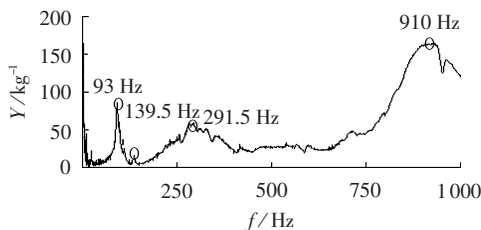
图 3 油箱固有频率测试仪器连接图
Fig.3 Connection diagram of instrument for testing inherent frequency of oil tank

4 测试结果及分析

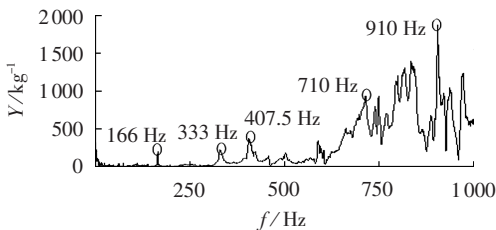
4.1 油箱固有频率测试结果分析

对变压器油箱表面的 11 个测点进行测试分析得出各测点的固有频率频响特性。考虑到测点比较多,为此代表性地选择变压器油箱顶部 2 号点(顶部)、靠低压侧 5 号点(正面)、靠近高压侧 8 号点(背面)以及 11 号点(侧面),分别绘制它们的频率响应特性曲线(1 kHz 以内)如图 4 所示。

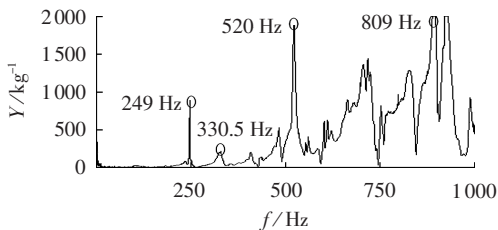
分析固有频率传递函数时,输出信号是振动加速度信号,单位为 m/s^2 ;输入信号是敲击锤的力信



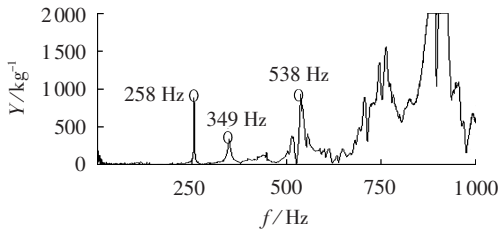
(a) 2 号点



(b) 5 号点



(c) 8 号点



(d) 11 号点

图 4 变压器油箱固有频率响应特性曲线

Fig.4 Characteristic curve of inherent frequency response of oil tank

号,单位为 N。从图 4 中可以得出如下结论。

a. 顶部 2 号测点的固有频率比较简单,1 kHz 范围内固有频率为 95 Hz、140 Hz、300 Hz、900 Hz 左右,共四阶,且频率特性幅值比侧面点的小。根据无阻尼的固有频率公式 $\omega_0 = \sqrt{k/m}$,可知质量越大,固有频率越低,由于顶部油箱结构简单且和铁芯相连,承载着整个铁芯和绕组的重力,导致结构稳定,所以第一阶固有频率比较低。

b. 5 号测点所在的油箱正面与散热片相连接,导致正面测点的固有频率比较复杂,高频部分特别密集,而且频率特性幅值比较大,900 Hz 左右的幅值最大,其幅值是顶部测点最大幅值的 10 倍,说明变压器侧面容易发生振动,产生噪声。背面(靠近高压侧)8 号点和侧面 11 号点的固有频率频响特性比较复杂,与 5 号点比较相似,可能是由于它们所在位置的油箱结构相同。

为分析变压器油箱的整体固有频率特性,对变压器油箱表面的 11 个测点的固有频率进行了统计,列出了每个点前三阶的固有频率见表 2。

从表 2 可以看出,变压器油箱固有频率和油箱的结构有很大关系。油箱顶部 3 个点的前两阶固有频率很接近,都是 93 Hz、140 Hz 左右,只有第三阶的不一样;除 5 号测点外,油箱正面和背面 6 个点的前两阶固有频率也很接近,都是 250 Hz、330 Hz 左右,由于测点本身位置不一样导致的其他固有频率不一样;油箱侧面 2 个点只有第一阶的固有频率比较接近,第二阶和第三阶均不一样,存在较大差异可能和它们所在位置结构和两侧散热片的制造工艺有关。

4.2 变压器油箱固有频率的影响分析

为分析变压器油箱固有频率对基于振动测量法诊断变压器故障的影响,在变压器空载运行时,测量

表 2 变压器油箱固有频率特性统计结果
Tab.2 Statistics of inherent frequency characteristics of oil tank

测点	频率/Hz		
	第一阶	第二阶	第三阶
油箱顶部	1 号	93.5	136.0
	2 号	93.0	139.5
	3 号	93.5	139.0
油箱正面 (低压侧)	4 号	250.5	332.5
	5 号	166.0	333.0
	6 号	252.0	330.5
油箱背面 (高压侧)	7 号	252.5	343.0
	8 号	249.0	330.5
	9 号	252.0	326.5
油箱侧面	10 号	260.5	533.0
	11 号	258.0	349.0

油箱表面 11 个点的振动加速度信号,并对信号进行分析。选取油箱顶部 1 号点的固有频率响应特性曲线(1 kHz 以内)如图 5 所示,变压器空载运行时,1 号点的振动频谱曲线如图 6 所示。

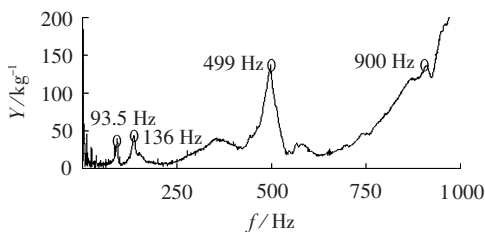


图 5 1 号点(顶部)固有频响特性曲线

Fig.5 Characteristic curve of inherent frequency response of point 1(on top)

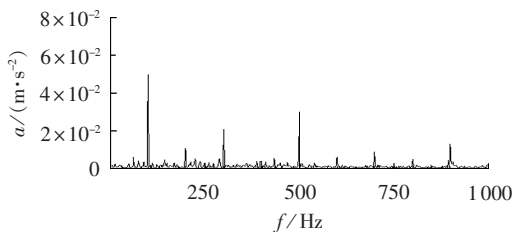


图 6 变压器空载运行时 1 号点振动频谱

Fig.6 Vibration spectrum of point 1 when transformer operates without load

变压器空载运行时,变压器油箱振动是由电力变压器铁芯的振动引起的,最主要的振动频率是 100 Hz,其幅值比其他高频分量高得多^[3]。但观察图 6 所示的 1 号点振动频谱发现 300 Hz、500 Hz、700 Hz 以及 900 Hz 分量都比较大,特别是 500 Hz 分量幅值,除 100 Hz 分量外是最大的。对照图 5 所示 1 号点固有频率响应特性曲线,发现 1 号测点的第三阶固有频率为 500 Hz 左右,铁芯振动中含有的 500 Hz 振动分量导致此测点处油箱壁发生共振现象,使测得的振动加速度信号很大。因此,油浸式变压器油箱的固有频率会对通过从变压器油箱表面间接获得铁芯或绕组的谐波能量或时频带能量的变化对铁芯或绕

组的状态和故障进行分析和诊断产生一定影响,使得这些方法的准确性有一定的局限。特别是仅采用 100 Hz 分量幅值的变化来判断变压器状态的方法,需要考虑油箱的固有频率对 100 Hz 分量的影响。

变电站噪声主要是变压器发出的,文献[15]研究了电力变压器振动与噪声关系,得出它们同步变化的特点,噪声信号主要也是由 100 Hz 及其高频分量构成,如果油箱发生共振现象,油箱振动加剧就会导致变电站噪声很大。要对变电站噪声进行控制,可先对油箱固有频率进行测试,得到油箱的固有频率特性,再针对特定范围频率噪声进行吸声、隔声控制或对变压器油箱进行加固,减少共振现象,降低噪声污染。

当油浸式电力变压器长期处于强烈振动或共振状态时,紧固件会发生松动,会缩短设备使用寿命,甚至造成设备损坏。对油箱壁进行测试,分析油箱的固有频响特性,为减小油箱振动以及加固提供参考。

5 结 论

本文对 1 台 100 kV·A、10 kV/0.4 kV 的油浸式变压器油箱表面固有频率进行测试分析,并将所有测点固有频率特性进行归纳分析,得出以下结论。

a. 将被加强筋分割后的油箱壁形成的若干矩形单元看作独立的矩形单元面,定义一个长度变量 L 作为确定布点数量的基本依据,可解决不同结构变压器统一布点原则问题,能对不同测试单位及人员布置的测点位置和数量进行规范和统一。

b. 当变压器本体(铁芯、绕组)驱动力的频率和油箱固有频率接近时,油箱振动幅值将达到很大。油浸式变压器油箱的固有频率对基于振动测量法诊断变压器故障产生一定影响,使得这些方法的准确性有一定的局限,研究油箱的固有频率能为基于振动测量法诊断变压器故障提供参考。

c. 对变电站噪声进行控制,可先对油箱固有频率进行测试,得到油箱的固有频率特性,再针对特定范围频率噪声进行吸声、隔声控制或对油箱进行加固,减少共振现象,降低噪声污染。

d. 变压器长期处于强烈振动或共振状态时,就会缩短使用寿命,甚至造成设备损坏,对油箱壁进行测试,分析固有频响特性,为加固措施提供参考。

参考文献:

[1] 冯永新,邓小文,范立莉. 大型电力变压器振动法故障诊断与发展趋势[J]. 变压器,2009(10):69-73.
FENG Yongxin,DENG Xiaowen,FAN Lili. Vibration method for large power transformer fault diagnosis and its trend[J]. Transformer,2009(10):69-73.

- [2] 汲胜昌,刘味果,单平,等. 小波包分析在振动法监测变压器铁芯及绕组状况中的应用[J]. 中国电机工程学报,2001,21(12):24-27.
JI Shengchang,LIU Weiguo,SHAN Ping,et al. The application of the wavelet packet to the monitoring of the core and winding condition of transformers[J]. Proceedings of the CSEE,2001,21(12):24-27.
- [3] GARC A B,BURGOS J C,ALONSO M. Transformer tank vibration modeling as a method of detecting winding deformations-part I: theoretical foundation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006,21(1):157-163.
- [4] GARC A B,BURGOS J C,ALONSO M. Transformer tank vibration modeling as a method of detecting winding deformations-part II: experimental verification[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006,21(1):164-169.
- [5] 熊卫华,赵光宙. 基于希尔伯特-黄变换的变压器铁芯振动特性分析[J]. 电工技术学报,2006,21(8):9-13.
XIONG Weihua,ZHAO Guangzhou. Analysis of transformer core vi-bration characteristics using Hilbert-Huang transformation[J]. Transactions of the China Electrotechnical Society,2006,21(8): 9-13.
- [6] 郭洁,黄海. 500 kV 电力变压器偏磁振动分析[J]. 电网技术, 2012,36(3):70-75.
GUO Jie,HUANG Hai. Analysis on 500 kV power transformer vibration under DC magnetic biasing[J]. Power System Technology, 2012,36(3):70-75.
- [7] 程锦. 振动法在线监测变压器绕组及铁心状况[J]. 高电压技术, 2005,31(4):43-48.
CHENG Jin. Application of vibration method on monitoring the winding and core condition of transformer[J]. High Voltage Engineering,2005,31(4):43-48.
- [8] 汲胜昌,李彦明,傅晨钊. 负载电流法在基于振动信号分析法监测变压器铁心状况中的应用[J]. 中国电机工程学报,2003,23(6):154-158.
JI Shengchang,LI Yanming,FU Chenzhao. Application of on-load current method monitoring the condition of transformer's core based on the vibration analysis method[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(6):154-158.
- [9] 汲胜昌,周冬生,陈锦,等. 空载变压器油箱表面振动信号的初步研究[J]. 高电压技术,2004,30(8):30-32.
JI Shengchang,ZHOU Dongsheng,CHEN Jin,et al. Research on vibration signal of transformer tank surface under no-load condition [J]. High Voltage Engineering,2004,30(8):30-32.
- [10] 顾晓安,沈荣瀛,徐基泰. 大型电力变压器振动和噪声控制方法研究[J]. 噪声与振动控制,2001,21(5):7-11.
GU Xiaolan,SHEN Rongying,XU Jitai. Study on the vibration and noise control techniques in large power transformers[J]. Noise and Vibration Control,2001,21(5):7-11.
- [11] 谭闻,张小武. 电力变压器噪声研究与控制[J]. 高压电器, 2009,45(2):70-76.
TAN Wen,ZHANG Xiaowu. Investigation and control of power transformer noise[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(2):70-76.
- [12] WEISER B,PFUTZNER H. Relevance of magnetostriction and forces for the generation of audible noise of transformer cores [J]. IEEE Transactions on Magnetics,2000,36(5):3759-3777.
- [13] 徐剑,邵宇鹰,金之俭,等. 基于振动频响法的变压器绕组变形检测[J]. 噪声与振动控制,2009,29(6):26-29.
XU Jian,SHAO Yuying,JIN Zhijian,et al. The detection of transformer windings' deformation based on the method of frequency response analysis[J]. Noise and Vibration Control,2009,29(6): 26-29.
- [14] 徐剑,邵宇鹰,王丰华,等. 振动频响法与传统频响法在变压器绕组变形检测中的比较[J]. 电网技术,2011,35(6):213-218.
XU Jian,SHAO Yuying,WANG Fenghua,et al. Comparative research on behavior of vibration frequency response analysis and frequency response analysis in detection of transformer winding deformation[J]. Power System Technology,2011,35(6):213-218.
- [15] 马宏彬,何金良,陈青恒. 500 kV 单相电力变压器的振动与噪声波形分析[J]. 高电压技术,2008,34(8):1599-1604.
MA Hongbin,HE Jinliang,CHEN Qingheng. Vibration and sound waveform analysis of 500 kV single phase power transformer[J]. High Voltage Engineering,2008,34(8):1599-1604.
- [16] 耿明昕,吴健,刘吉轩,等. 油浸式电抗器(变压器)振动测量方法研究[J]. 华东电力,2012,40(5):848-850.
GENG Mingxin,WU Jian,LIU Jixuan,et al. Vibration measurement for oil-immersed reactor(transformer)[J]. East China Electric Power,2012,40(5):848-850.

作者简介:

赵宏飞(1988-),男,江苏扬州人,硕士研究生,研究方向为电力设备状态检测与故障诊断(E-mail:zhaohongfei198810@126.com);

马宏忠(1962-),男,江苏南通人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力设备状态监测与故障诊断、电能质量监控。

Test and analysis of inherent frequency of power transformer tank

ZHAO Hongfei¹,MA Hongzhong¹,LI Kai²,LI Yong²,HUANG Chaozhi¹,ZHONG Qin¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Jiangsu Nanjing Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Company, Nanjing 210008, China)

Abstract: The generation mechanism of oil-immersed power transformer vibration and the cause of its oil tank wall resonance are analyzed. The wall structures of widely-used oil tank for oil-immersed transformer are classified, for which, different disposals of vibration measuring points are proposed. The inherent frequency of a 100 kV·A, 10 kV/0.4 kV oil tank wall is tested and analyzed for all measuring points, which is compared with the wall vibration signal measured when transformer operates without load. Results show that, the impact of oil tank wall resonance should be considered when the vibration measurement method is applied in transformer fault diagnosis.

Key words: power transformers; inherent frequency; vibration; resonance; fault diagnosis; measuring point disposal