

Research on Vibrations and Noises of Power Transformer and Its' Reduction Measures

Mingcong Peng¹, Mingchao Xia¹, Songling Huang², Meigen Cao³

¹School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing

²State Key Lab of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing

³China Electric Power Research Institute, Beijing

Email: w77211@126.com

Received: Mar. 14th, 2015; accepted: Mar. 28th, 2015; published: Apr. 3rd, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

As more and more substations are built in residential and commercial areas, transformer noise becomes very prominent. Transformer noise level has become the important indicator to measure design and manufacture level of transformer manufacturers. Under working condition of load current, the main source of transformer vibration and noise is winding electromagnetic force. Considering from noise propagation path, this paper studies the source of vibration and noise, route of transmission and the corresponding reduction measures. It takes advantage of ANSYS Workbench and Virtual Lab Acoustics software to simulation analysis and builds the solid model of transformer. On the basis of the solid model, it simulates transformer vibration and noise generated by electromagnetic interaction by means of numerical analysis method and preliminarily verifies the effect of the reduction measures. Then, the test of transformer vibration and noise further verifies the effectiveness of the reduction measures and meanwhile confirms the reliability of the numerical analysis method.

Keywords

Transformer, Vibration, Noise, Reduction Measure, Numerical Analysis, Test

电力变压器的振动和噪声及消减措施研究

彭明聪¹, 夏明超¹, 黄松岭², 曹枚根³

¹北京交通大学电气工程学院, 北京

²清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京

³中国电力科学研究院, 北京

Email: w77211@126.com

收稿日期: 2015年3月14日; 录用日期: 2015年3月28日; 发布日期: 2015年4月3日

摘要

随着越来越多变电所建于居民区和商业区内, 变压器噪声问题变得十分突出。变压器噪声水平的高低, 已经成为了衡量变压器生产厂家设计和制造水平的重要指标。在负载电流工况下, 变压器的振动和噪声主要是由绕组电磁力产生的。本文从噪声传播路径考虑, 研究了振动和噪声的来源和传播途径, 以及相应的消减措施, 利用ANSYS Workbench和Virtual.Lab Acoustics软件联合仿真, 建立了变压器实体模型, 通过数值分析方式模拟变压器电磁作用产生的振动和噪声, 初步验证了消减措施效果。变压器振动和噪声试验进一步验证了消减措施的有效性, 同时证实了数值分析方法的可靠性。

关键词

变压器, 振动, 噪声, 消减措施, 数值分析, 试验

1. 引言

提高城市供电的可靠性和改善供电质量, 减少电力传输的损耗, 城网用大型变电站要建在市区。为了保证居民不受噪声干扰, 供电部门对变压器的噪声性能提出较高的要求[1] [2]。

电力变压器振动的根源在于以下三个方面: 硅钢片磁致伸缩引起的铁心振动; 硅钢片接缝处和叠片之间存在着漏磁而产生的电磁吸引力, 从而引起铁心振动; 当绕组中有负载电流通过时, 负载电流产生的漏磁引起绕组振动。研究表明[3] [4], 在负载电流工况下, 变压器的振动和噪声主要是由绕组电磁力产生的。

目前国内外针对变压器振动和噪声已经做了大量研究, 文献[5] [6]阐述了几乎所有可以降低变压器振动和噪声的方案, 但大多方案没有在实践中验证。同时诸多文献对变压器内部器身振动和噪声做了研究[7] [8], 但都没有涉及到变压器整机, 不能得到箱壁外的辐射噪声, 也不能深入到外部结构减振降噪层面上。本文以 220 kV、180,000 kVA 三相电力变压器作为研究对象, 利用数值分析方法模拟变压器电磁作用产生的振动和噪声, 并采用在器身与下油箱连接处安装减振垫的振动和噪声消减措施。仿真和变压器振动噪声试验验证了其效果。

2. 变压器的振动噪声

2.1. 变压器振动分析

当变压器绕组中流过负载电流时, 绕组周围就会产生漏磁场, 由于电流和漏磁场的作用, 在绕组内产生洛伦兹力, 洛伦兹力大小正比于电流平方。

$$d\mathbf{F} = i d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (1)$$

\mathbf{F} 为洛伦兹力(N), \mathbf{B} 为漏磁通密度(T)。

$$\mathbf{F} = \int_{\mathbf{v}} J_{\phi} \hat{\phi} \times (B_r \hat{r} + B_z \hat{z}) dv = F_r \hat{r} + F_z \hat{z} \quad (2)$$

J_ϕ 为 ϕ 方向的短路电流密度, \hat{r} , $\hat{\phi}$, \hat{z} 为圆柱坐标系下单位向量。 F_r , F_z 分别为轴向和幅向电磁力。

运行中的变压器, 绕组可以看成受外界激励的机械振动, 变压器油箱表面振动可以看成一种近似正弦的稳态响应[9] [10]。因此我们可以利用 ANSYS Workbench 的谐响应分析模块模拟电磁作用产生的振动。

根据经验和计算[11] [12], 绕组中的轴向电磁力

$$\begin{aligned} F_z &= \sum_{i=1}^n B_{ri} \cdot I_i \cdot L_i \approx 2\pi r_p I_d \sum_{i=1}^n B_{ri} \\ &= 2\pi r_p \cdot I \cdot N \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^n B_{ri}}{m} \right) = 2\pi r_p INB_{pr}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{其中 } B_{pr} = \frac{\sum_{i=1}^n B_{ri}}{m} \quad (4)$$

式中 r_p ——绕组平均半径, I_d ——单根导线电流(A), I ——绕组电流, N ——绕组匝数, m ——并联导线根数, B_{pr} ——绕组内等效平均磁感应强度(幅向) (T), B_{ri} ——第 i 根导线中心磁感应强度(幅向) (T)。

本文中忽略轴向电磁力和幅向电磁力的差别, 因此根据式(3)、(4)可知, SSZ11-180000/220 变压器最大幅向和轴向绕组电磁力约为 2.0×10^5 N。对每一项绕组均施加 2.0×10^5 N 的轴向载荷和径向载荷, 如图 1 所示。

忽略了散热片、套管、油枕等外部连接设备, 网格划分含有 169,786 个单元, 铁心和绕组均细化, 其它自由划分。对变压器各部件赋以相对应的材料属性, 如表 1 所示。

经过谐响应分析求解后, 得到 100 Hz 下变压器振动情况, 如图 2、图 3 所示。

由图 2、图 3 可知, 器身振动最大处在绕组上, 上铁轭到下铁轭振动传递, 逐渐减小。箱壁外振动分布较均匀。

2.2. 声场分析

对于油浸式电力变压器, 众所周知铁心的振动也是噪声来源之一, 为分析更接近实际工作情况, 声场分析中包含铁心和绕组两部分。所以, 由磁致伸缩引起的铁心振动和电磁力作用引起的绕组振动作为噪声的总能量来源, 能量传递到油箱表面, 转化为声波传入人耳。油箱表面每个与空气介质接触的面都独立地辐射噪声, 表面每个单元位移以时间空间分布的 u_x , u_y , u_z 表示, 辐射声源总能量等于单元振动速度 v_x , v_y , v_z 的机械振动能量总和。油箱表面振动辐射的声能源为

$$W = \rho c k_i \oint_S v_n^2 dS_c = \rho_0 c_0 k_i \sum_i v_{n,j}^2 S_{c,j} = \rho_0 c_0 k_i \sum_i \left(\frac{\partial u_{n,j}}{\partial t} \right)^2 S_{c,j} \quad (5)$$

式中, W ——总辐射噪声声功率;

ρc ——声传播介质的特性阻抗, 变压器箱壁周围介质为空气, 即为 $\rho_0 c_0$;

k_i ——箱壁外 i 面的声辐射系数, 文中设声场分析外边界表面以平面波向外辐射, $k_i = 1$;

v_n ——油箱表面与空气介质接触面振动的时间空间均方速度;

S_c ——油箱表面与周围介质交界面的面积。

根据式(5)计算得到振动声辐射总能量后, 可根据标准声压方程[13]计算箱壁外声压级的大小和分布。

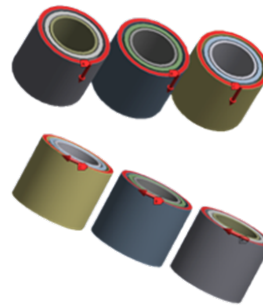


Figure 1. The axial and radial load
图 1. 施加轴向和径向载荷

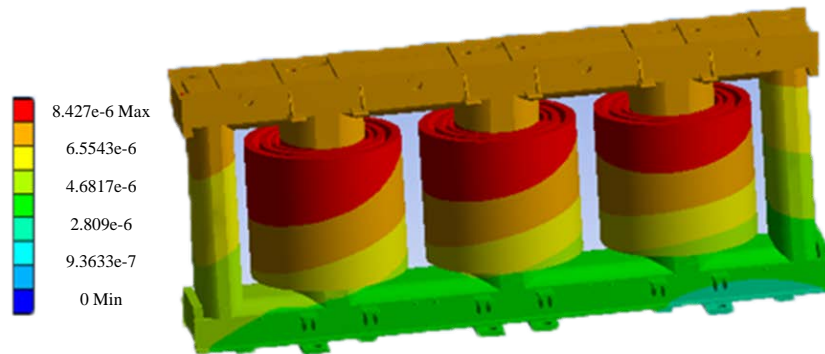


Figure 2. Deformation nephogram of transformer body
图 2. 变压器器身变形云图

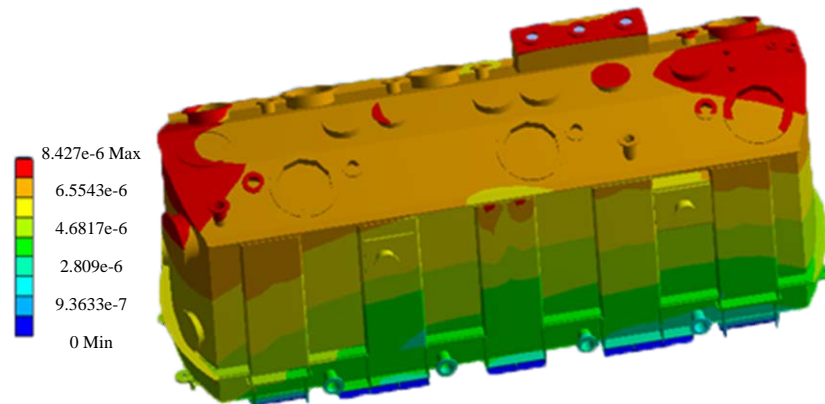


Figure 3. Deformation nephogram of transformer
图 3. 变压器整机变形云图

Table 1. Material properties
表 1. 材料属性

	密度(Kg/m ³)	弹性模量(Pa)	泊松比
硅钢片	7650	1.95e11	0.26
纯铜	8300	1.1e11	0.34
绝缘纸	1450	1.2e11	0.3
结构钢	7850	2e11	0.3
变压器油	895	7e11	0.5

2.3. 变压器辐射噪声

结合变压器实际情况和声学计算方法的特点，本文采用声学软件 Virtual.Lab Acoustics 间接边界元法对变压器辐射声场进行仿真分析，声学间接边界元法计算流程如图 4 所示。

将有限元振动结果导入到声学软件中，经过定义声学网格、映射转移计算以及定义位移边界条件等步骤，就可以进行声场分布计算。按照变压器国家标准，计算箱壁外 1 m 处的辐射噪声，变压器主频 100 Hz 下的声场分布如图 5 所示。

提取变压器 4 个侧面 1/3 高度上四个典型测点，如图 6 所示。

四个测点平均声压级值如表 2 所示。

由表 2 可知，正面和背面噪声要明显大于两个侧面。

Table 2. Sound pressure level value of measuring point
表 2. 测点声压级值

测点	1	2	3	4
声压级值(dB)	75.4	67.2	76.4	66.8

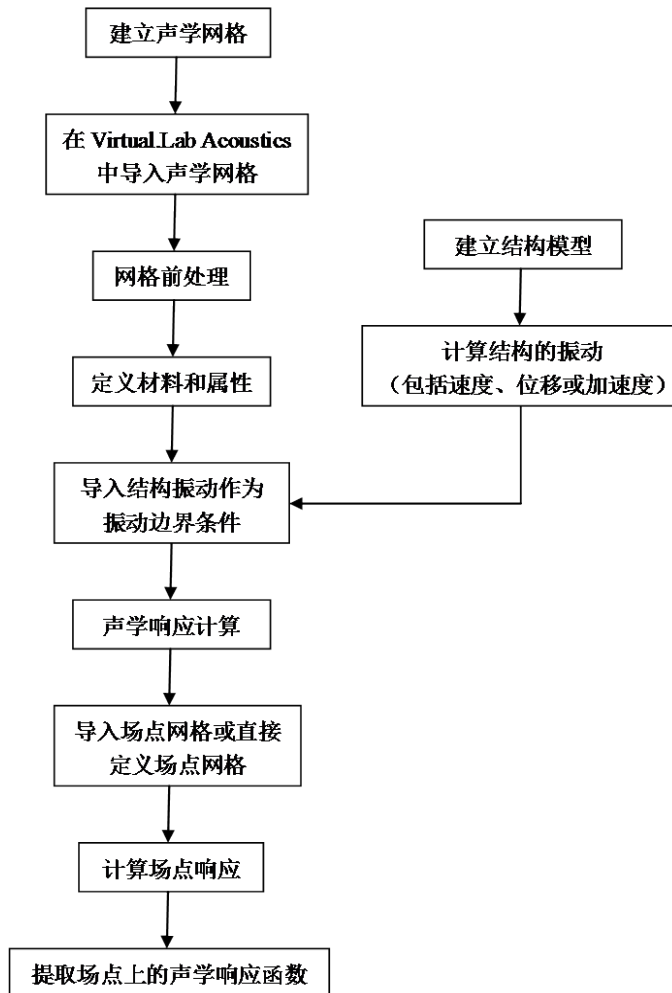


Figure 4. Indirect boundary element method calculation process
图 4. 间接边界元法计算流程

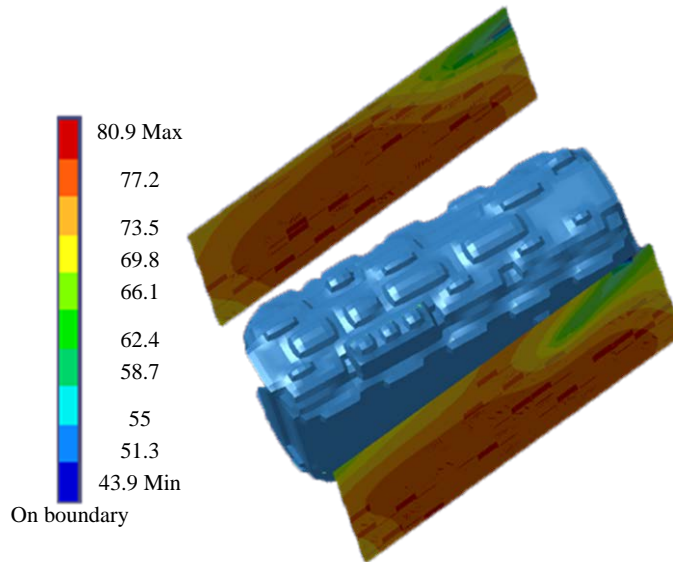


Figure 5. Acoustic field distribution of transformer
图 5. 变压器声场分布

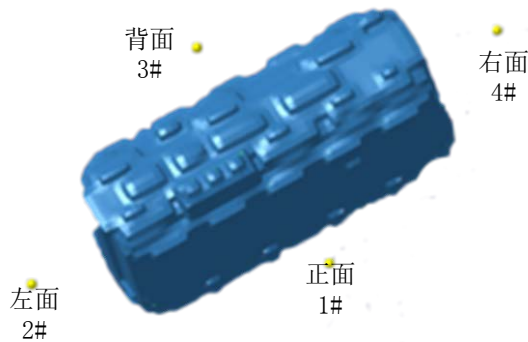


Figure 6. Four typical measuring point
图 6. 四个典型测点

3. 消减措施仿真

变压器本体噪声取决于铁心和绕组的振动。铁心和绕组振动是通过两条路径[14]-[16]传递给油箱的：一条是固体传递途径，铁心和绕组的振动通过其垫脚传至油箱；另一条是液体传递途径，铁心和绕组的振动通过绝缘油传至油箱。由仿真图 2 中振动的传递可看出，固体传递途径尤为明显，因此我们提出器身隔振措施，即在器身与下油箱刚性连接处放置减振垫，最大程度上抑制固体传递路径。

在变压器箱底的定位销处布置 12 个减振垫，每个减振垫半径为 180 mm，厚度为 35 mm。减振垫的布置形式如图 7 所示。

减振垫材料选用粘弹性阻尼材料，其材料特性参数如表 3 所示。

谐响应分析求解，得到 100 Hz 下变压器振动情况，如图 8、图 9 所示。

与无减振措施变压器比较，旁轭处的振动有所加强，箱壁的振动减弱了。

变压器主频 100 Hz 下的声场分布如图 10 所示。

四个测点平均声压级值如表 4 所示。

由图 11 可知，器身隔振对于振动的衰减和噪声的降低具有比较好的效果，降噪幅度在 6 dB 左右。

Table 3. Material parameter of damping pad
表 3. 减振垫材料参数

材料	密度	剪切模量	泊松比	阻尼比
阻尼材料	789.5 Kg/m ³	2.0 Mpa	0.3	1.1

Table 4. Sound pressure level value of measuring point-vibration isolation of core and winding assembly
表 4. 测点声压级值 - 器身隔振

测点	1	2	3	4
声压级值(dB)	69.4	61.2	67.2	60.5

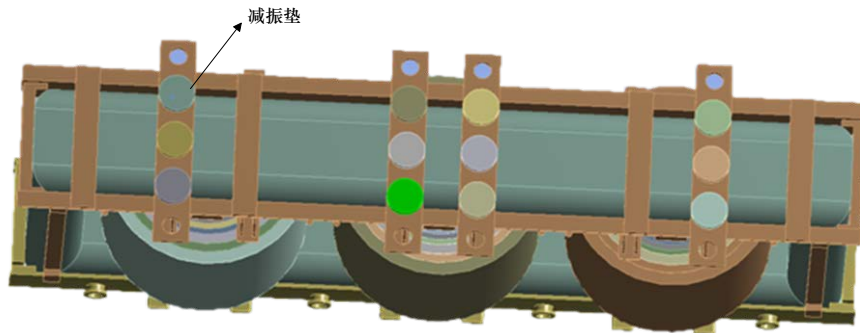


Figure 7. Arrangement of damping pad
图 7. 减振垫布置

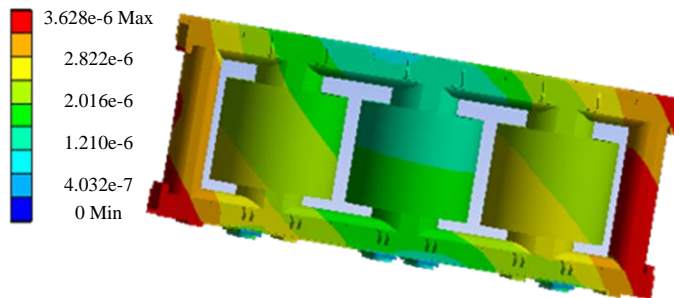


Figure 8. Deformation nephogram of transformer body-vibration isolation of core and winding assembly
图 8. 变压器器身变形云图 - 器身隔振

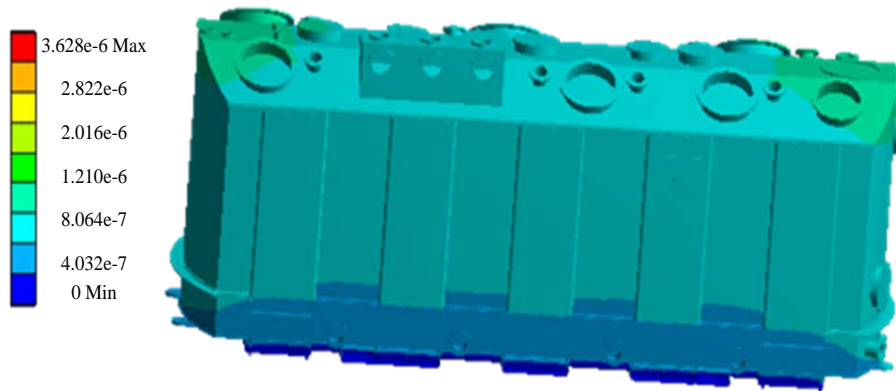


Figure 9. Deformation nephogram of transformer-vibration isolation of core and winding assembly
图 9. 变压器整机变形云图 - 器身隔振

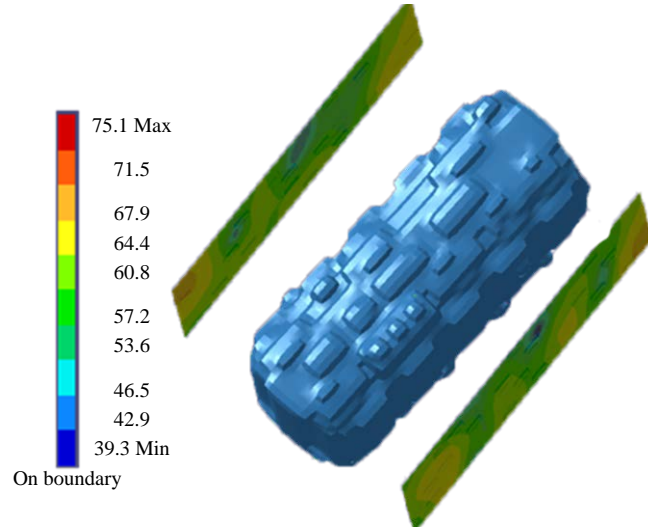


Figure 10. Acoustic field distribution of transformer-vibration isolation of core and winding assembly
图 10. 变压器声场分布 - 器身隔振

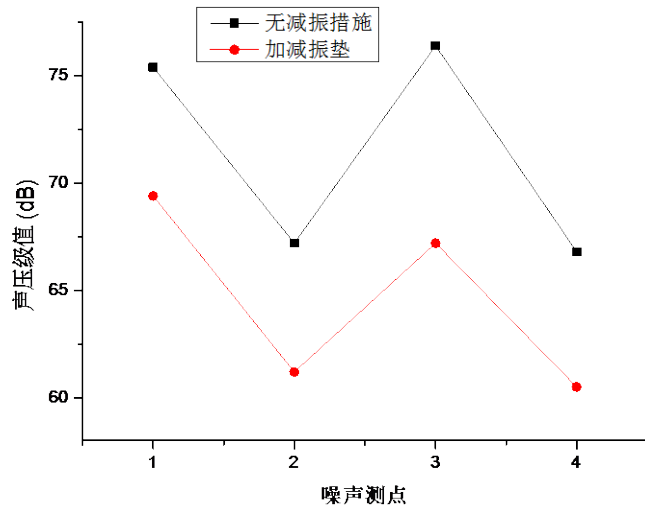


Figure 11. Comparison of simulation results
图 11. 仿真结果比较

4. 隔振设计

变压器、电抗器隔振设计时，可将变压器、电抗器简化等效为单质点模型(图 12)，基础或楼板加速度与油箱底部加速度之比叫隔振衰减系数 T_a ：

$$\begin{cases} T_a = \frac{a_{\text{tran}}}{a_{\text{ori}}} = \sqrt{\frac{1 + (2\xi\lambda)^2}{(1 - \lambda^2)^2 + (2\xi\lambda)^2}}, \\ \lambda = \frac{\omega}{\omega_n}, \quad \omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}}. \end{cases} \quad (6)$$

式中 a_{ori} 为变压器、电抗器油箱底部的振动加速度； a_{tran} 为变压器、电抗器基础或楼板的振动加速度； λ 为油箱振动频率 ω 与隔振系统固有频率 ω_n 之比； ξ 为隔振系统有效阻尼比。

5. 试验验证

所有试验都在同一台变压器上完成，进行变压器 100% 负载电流噪声测试，测量变压器箱壁外 1 m，变压器 1/3 高度的辐射噪声。

测试仪器选用 INV3060S，24 位信号采集分析仪；INV9206 声压传感器；INV9212 声强传感器。测试仪器以及测试现场分别如图 13、图 14 所示。

测试背景噪声为 38 dB。按照试验要求，布置声压和声强测点(和仿真相同的四个典型测点)。经过数据分析得到平均声压级值如表 5 所示。

测点声强级值图表 6 所示。

由于声强值受外界环境干扰较小，无任何减振措施和器身隔振比较，器身隔振措施明显降低了变压器辐射噪声。从表 6 中可以看出，器身隔振下各点的噪声值降噪幅度在 4~9 dB。根据厂家测试，220 kV 变压器噪声在 65~75 dB 之间，从噪声幅值以及消减措施降低噪声幅度规律来看，仿真与试验结果比较接近，验证了数值分析的可靠性。

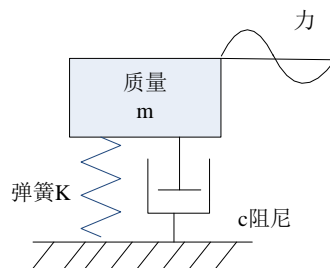


Figure 12. Analysis model of vibration isolation system
图 12. 隔振系统分析模型

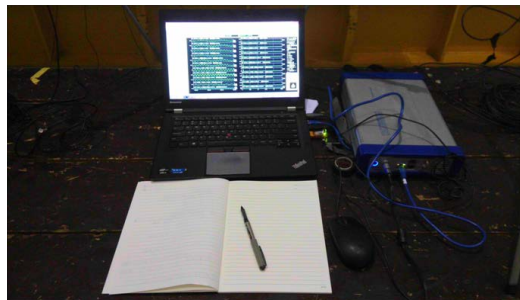


Figure 13. Test instrument
图 13. 测试仪器



Figure 14. Test site
图 14. 测试现场

Table 5. Average value of sound pressure level
表 5. 平均声压级值

减振措施	评价声压级值(dBA)
无减振措施	65.65
器身隔振	61.87

Table 6. Sound intensity level value
表 6. 声强级值

减振措施	声强级值(dBA)	
无减振措施	1	66.5
	2	57.8
	3	65.2
	4	57.5
器身隔振	1	58.0
	2	51.9
	3	57.9
	4	53.7

6. 结论

考虑到变压器内部结构的复杂性, 本文对电力变压器电磁作用产生的振动和噪声进行了数值模拟计算, 分析了变压器的振动和辐射噪声, 并提出消减措施, 进行了相关试验研究, 得出以下结论:

- 1) 采用器身隔振消减措施, 仿真下验证了消减措施的效果。初步证明器身隔振措施的有效性。
- 2) 基于数值分析的基础上, 对 220 kV 变压器进行了无减振措施和器身隔振措施的 100% 负载电流噪声测试。测试进一步验证了器身隔振措施具有很好的降噪效果。
- 3) 仿真结果与试验测量结果在降噪幅度上比较吻合, 证实了数值分析方法的可靠性。该方法为验证降低电磁噪声的方案提供理论分析方法和依据。

参考文献 (References)

- [1] 刘传彝 (2002) 电力变压器设计计算方法与实践. 辽宁科学技术出版社, 沈阳.
- [2] 谢毓城 (2003) 电力变压器手册. 机械工业出版社, 北京.
- [3] 董志刚 (1995) 变压器的噪声. *变压器*, **3**, 30-35.
- [4] 钟星鸣, 姚小虎, 韩强, 等 (2009) 非晶合金变压器铁心振动的实验研究. *科学技术与工程*, **17**, 4934-4939.
- [5] Foster, S.L. and Reiplinger, E. (1981) Characteristics and control of transformer sound. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **100**, 1072-1077.
- [6] 王和忠, 季小龙 (2008) 油浸式电力变压器的噪声源及降噪对策. *安徽电气工程职业技术学院学报*, **1**, 37-40.
- [7] Ucry, G.O., Saha, P. and Hadden, J. (1980) Prediction of far field sound radiation from transformers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **1**, 358-364.
- [8] 祝丽花, 杨庆新 (2013) 考虑磁致伸缩效应电力变压器振动噪声的研究. *电工技术学报*, **4**, 1-6.
- [9] 魏亚军, 臧春艳, 顿玲 (2013) 三相电力变压器振动噪声的多物理场研究. *科学技术与工程*, **19**, 5632-5635.
- [10] 张伟 (2011) 大型变压器绕组漏磁场与短路特性的研究. 华北电力大学, 北京.
- [11] 王世山, 李彦明 (2002) 利用有限元法进行电力变压器绕组电动力分析计算. *西安石油学院学报*, **4**, 56-58.
- [12] 黄强 (2007) 三绕组变压器绕组动态电磁力的叠加计算方法. *变压器*, **8**, 43-46.
- [13] 李太宝 (2005) 计算声学: 声场的方程和计算方法. 科学出版社, 北京.

- [14] 钟星鸣 (2010) 干式变压器的振动和噪声研究. 华南理工大学, 广州.
- [15] 许冰 (2012) 直流偏磁下变压器铁心振动和噪声的研究. 沈阳工业大学, 沈阳.
- [16] Shao, P.F., Luo, L.F. and Rehtanz, C. (2012) Electromagnetic vibration analysis of the winding of a new HVDC converter transformer. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **27**, 123-130.