

大型电力变压器的噪声预估研究

莫娟^{1,2}, 刘吉轩², 苏俊收², 陈花玲², 曹枚根¹

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100055; 2. 西安交通大学机械工程学院, 西安 710049)

摘要: 针对大型电力变压器的低噪声设计问题, 提出了一种以改进变压器结构降低其噪声为目的的噪声预估方法。首先通过建立变压器整体结构有限元模型和振动谐响应分析, 得到变压器油箱结构表面振动响应; 基于间接边界元方法, 通过建立变压器的声学数值分析模型, 将变压器油箱表面振动响应导入到声学模型中作为边界条件, 采用声学分析软件求解变压器整机辐射噪声, 从而实现变压器的噪声预估。运用文中提出的方法, 定量预估了某型变压器的场点噪声, 并且与同工况下的实测噪声进行对比分析, 验证了噪声预估方法的可行性和有效性。最后, 采用该预估方法定量预估了变压器几种结构改进措施的降噪效果, 为该型变压器的低噪声设计提供了结构改进依据, 证明了改预估方法的实用性。

关键词: 电力变压器; 数值分析; 间接边界元; 噪声预估

中图分类号: TM41; TM113.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2014)06-0032-06

Noise Prediction of Large Power Transformer

MO Juan¹, LIU Jixuan², SU Junshou², CHEN Hualing², CAO Meigen¹

(1. China Electric Power Research Institute of SGCC, Beijing 100055, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming at the low noise design of large power transformer, a prediction method of transformer noise is proposed to reduce the noise through improving the structure of the transformer. The surface vibration response of transformer oil tank structure is obtained by establishing a finite element model of transformer for vibration analysis. Based on the indirect boundary element method, an acoustic numerical analysis model of transformer is established by using LMS acoustic analysis software, the surface vibration response of transformer oil tank is imported into the acoustic model as boundary condition, and the radiated noise of transformer is solved by using the acoustic analysis software, so that the transformer noise prediction is realized. The proposed method is adopted to quantitatively predict the field noise of a transformer, and the predicted noise is compared with the measured one in same condition to verify the feasibility and effectiveness of the proposed noise prediction method. In addition, the noise reduction effects of several improved transformer structures are predicted quantitatively with the proposed method to provide a basis for low noise design of this type of transformer.

Key words: power transformer; numerical analysis; indirect boundary element; noise prediction

0 引言

随着城市规模的不断扩大及城区电网建设的需要, 越来越多的变电站将处在城市的中心或人口密集区, 于是变电站的噪声问题变的越来越突出。为了

降低变电站噪声, 对变电站设备, 尤其是变压器的噪声指标相应地提出了更高要求, 对变电站设备进行降噪研究和低噪声设计势在必行。虽然, 中国对于输变电线路的降噪开展了比较多的研究, 但对噪声比较高的变压器设备本体降噪研究还不多见, 现有的研究主要是针对变压器铁心绕组结构^[1-6], 而对机械

收稿日期: 2013-12-18; 修回日期: 2014-01-20

基金项目: 国家电网公司重点研究项目(GCB51201203041)。

Project Supported by Key Research Project of State Grid Corporation(GCB51201203041).

结构减振降噪以及噪声预估的研究不够深入。

传统的变压器设计方法局限于对产品功能与造型进行设计,较少考虑其振动与噪声特性,在完成产品设计后,如果噪声不达标再对其进行降噪处理,就需要改变产品的局部或者整体设计,势必增加了成本,延长了产品的开发周期,降低了产品的竞争力。为了降低变压器噪声,欧美的研究人员比较多地采用实验的方法来研究各种措施的有效性,他们普遍在实验室环境下模拟变压器的工作状态,虽然这种方法取得了一定成果,但是存在的不足是:基于实验的方法往往比较盲目,导致研究成本过高,耗费大量的时间和资金等,而且不能从本质和理论的高度加以认识和指导。为此,有必要在变压器改进设计过程中,针对所设计减振降噪方案,通过仿真计算,对其降噪效果加以预估,从而为变压器减振降噪措施的实施提供指导。为了达到此目的就需要一种切实可行的变压器噪声预估方法^[7]。

现有的研究曾经运用 ANSYS Classic 软件对变压器的局部结构进行了振动仿真^[8],运用声学有限元法对噪声进行预估。但由于变压器整体结构的复杂性与多样性,利用 ANSYS Classic 软件建模运算耗时、费力,而利用声学有限元法难以模拟实际边界条件,计算出的结果往往与实际情况相差甚多。基于此,笔者利用 ANSYS Workbench^[9]软件对某型号 500 kV 变压器振动进行谐响应分析计算,采用声学边界元法^[10]对变压器噪声进行定量预估,试图为变压器低噪声设计和结构改进提供可行的降噪效果验证方法。

1 变压器结构有限元建模

文中研究的某型号变压器的部件主要包括:油箱、内部夹件拉板组件、铁心绕组结构、散热片结构、油枕管路等。其中,变压器的油箱、夹件拉板组件、油枕、散热片、套管及升高座等的材料为 Q235A,铁心的材料为 30RGH105(硅钢片的一种),绕组的材料为铜,绝缘油的型号是 25 号克拉玛依油,另外还有绝缘纸板等 5 种材料。

由于变压器结构复杂,利用 ANSYS Workbench 软件直接建立装配模型较困难,文中选用功能强大的 Solidworks 软件建立变压器各构件实体模型,生成符合 Parasolid 标准的接口文件,通过通用接口导入到 ANSYS Workbench 软件中建立有限元模型。

1.1 计算模型简化

运用 Solidworks 对变压器各个部件进行几何建模时,根据变压器结构特点和计算需要,对各部件结

构进行了适当地简化,忽略了倒角、键槽、螺纹等对其整体刚度与质量影响不大的结构。经过软件装配后获得的变压器整体结构几何模型见图 1,模型内部特征见图 2。

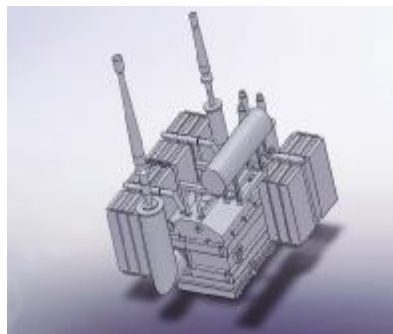


图 1 变压器整体结构几何模型

Fig. 1 The integral structure model of the transformer

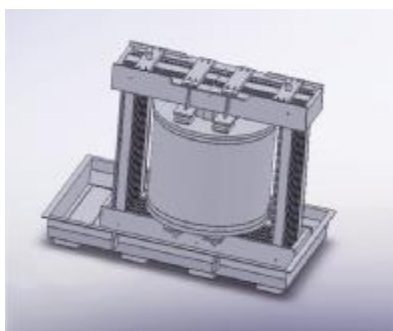


图 2 变压器模型内部特征

Fig. 2 Internal characteristics of the transformer model

1.2 有限元网格划分

ANSYS Workbench 网格划分比 ANSYS Classic 方便,导入 CAD 几何模型具有高度成功率,尤其是它的自动接触识别功能,对分析大型装配体时非常实用。网格划分采用 ANSYS Workbench 里的 Mesh 划分工具,考虑到变压器整体结构几何模型的复杂性,主要采用自由网格划分,在局部规则区域(如铁心绕组)采用映射网格划分。对于不规则的模型,如油箱,选用 10 节点的四面体单元(SOILD187),对于规则的模型,如铁心结构,选用 20 节点的六面体单元(SOILD186),即六面体主导法(Hex Dominant),单元大小采用 Workbench 默认の数値。在 ANSYS Workbench 的 Engineer data 中定义 5 种材料的属性,螺栓连接等效为绑定接触,有限元分析模型见图 3。

2 变压器振动谐响应分析

谐响应分析是计算线性系统结构在简谐激励下的响应,得到响应值(通常是位移)是随频率变化的曲线。由于电网中高次谐波的存在和变压器铁心结构的影响,变压器铁心振动频率除了基频外,还包含有各种基频整数倍的高频。为了计算变压器在基频

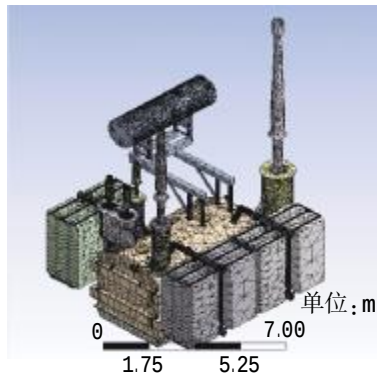


图 3 变压器有限元分析模型

Fig. 3 Finite element analysis model of the transformer 及各次谐波激励下的振动响应, 假设变压器本体结构是线性系统, 对变压器进行谐波响应分析^[11-15]。

谐波响应分析需要知道激励力的大小与分布, 对于文中的计算, 需要模拟变压器在通电不励磁状态下电磁力对各线圈进行加载的情况。由于难于得到实际电磁力大小, 可采用施加相对大小激励力的方法计算变压器的振动谐波响应。文中计算中给 4 个线圈的底面和外表面上均加 0.25 MPa 的压强, 然后根据已经建立的模型计算得到变压器整体结构对激励力的响应, 结果见图 4。图 4(a)是 100 Hz 谐波激励的计算结果, 图 4(b)是 300 Hz 谐波激励的计算结果。

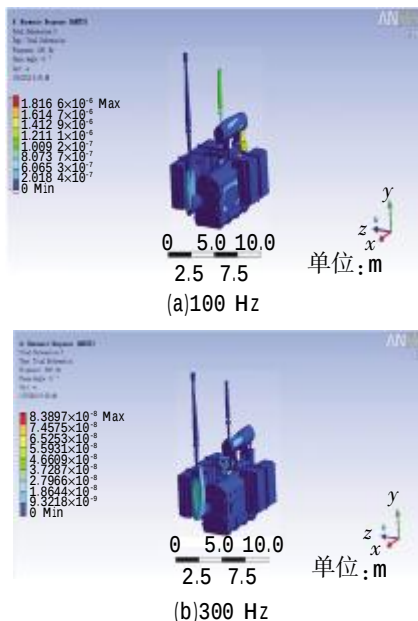
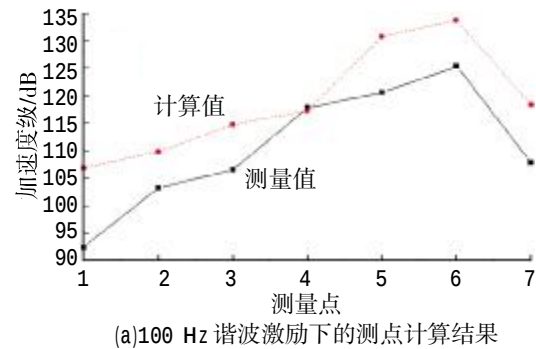


图 4 变压器谐波响应

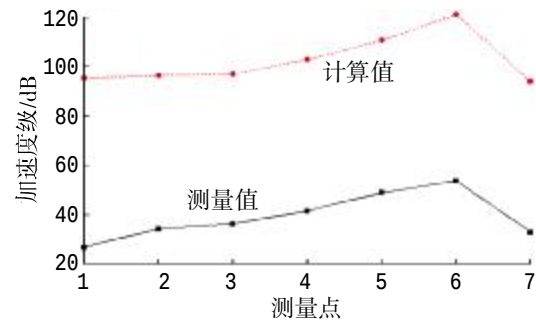
Fig. 4 Harmonic response of the transformer

采取相对比较方法检验有限元模型的合理性: 将有限元计算的变压器箱壁上各点振动加速度相对大小与试验测量的各点振动加速度的相对大小进行比较。图 5 是变压器箱壁上 7 个测点计算与测量的加速度值。

由图 5 比较可以看出, 文中建立的有限元模型



(a) 100 Hz 谐波激励下的测点计算结果



(b) 300 Hz 谐波激励下的测点计算结果

图 5 变压器谐波响应

Fig. 5 Harmonic response of the transformer

计算结果与实测结果在各测点的幅值变化大小具有基本相同的趋势, 表明文中所建立的有限元分析模型基本正确。

3 变压器噪声预估方法

声学计算方法最常见的是边界元法和有限元法, 通过间接边界元法可以对变压器油箱噪声进行预估, 这种噪声预估方法可应用于变压器降噪措施的效果仿真计算^[16-19]。

对变压器结构进行声学仿真计算时, 是采用 Workbench 软件计算出结构的振动响应, 并且输出包含结构网格和振动响应的计算结果文件。结构网格见图 6。声学仿真过程为: 首先, 把它导入到 LMS 软件中, 对结构进行声学边界元网格划分, 声学边界元对网格的质量要求较高, 利用 LMS 建立的声学网格见图 7; 其次, 完成结构网格与声学网格的映射, 即把结构的振动响应数据映射到声学网格上; 最后, 在 LMS 软件中距变压器左面 2 m 处设置场点面, 在距离变压器正面 2 m 处 1/3 高度与 2/3 高度处, 各设置 16 个声压响应输出点, 为了与试验测试点相对应, 还设置了距离变压器底部 670 mm 的地面和距离变压器右边 3 500 mm 右面, 从而模拟实际测量的地面以及旁边墙面两个全反射面, 见图 8。

利用上述建立的声学仿真模型就可以计算变压器表面的噪声分布以及场点的噪声分布。图 9 是 50 Hz 与 100 Hz 时变压器表面的声压分布图; 图 10



图6 Workbench 中建立的结构网格

Fig. 6 Structure grid established in Workbench

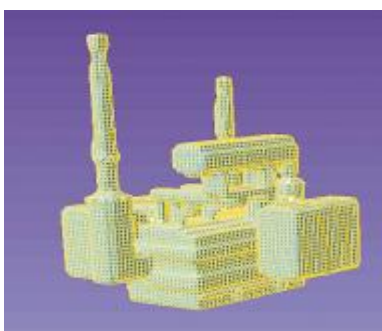


图7 LMS 中建立的声学网格

Fig. 7 Acoustic grid established in LMS

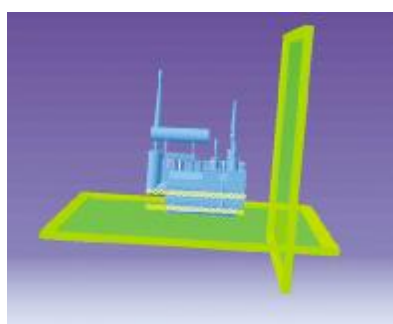


图8 声场设置图

Fig. 8 Setting diagram of sound field

是 1/3 高度处 16 个声压响应输出点在 0~100 Hz 的频率响应函数。

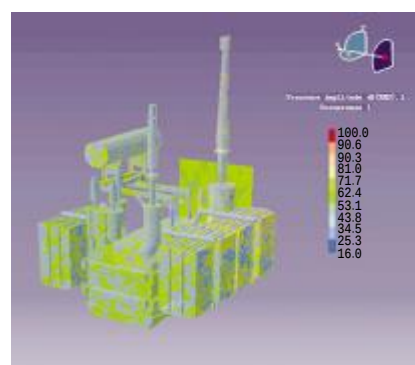
通过上述间接边界元法可以对变压器噪声进行预估, 这种噪声预估方法可应用于变压器降噪措施的效果仿真计算。

4 噪声预估实例

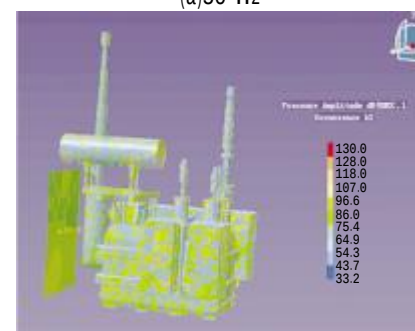
针对所研究的某型号变压器, 在 100% 额定电流工况下, 测试了距离该变压器 2 m、2/3 高度场点处的噪声以及油箱表面的振动, 测试现场见图 11。

考虑到变压器噪声频率主要是 100 Hz 及其倍频, 下面将变压器各测点处 100 Hz 噪声预估结果与实测结果进行对比, 见表 1。

下面再运用上述噪声预估方法对某型号高压变压器采取减振降噪措施后的降噪效果进行仿真预估。采取的减振降噪措施如下。



(a) 50 Hz



(b) 100 Hz

图9 变压器表面的声压分布图

Fig. 9 Sound pressure distribution on the surface of transformer

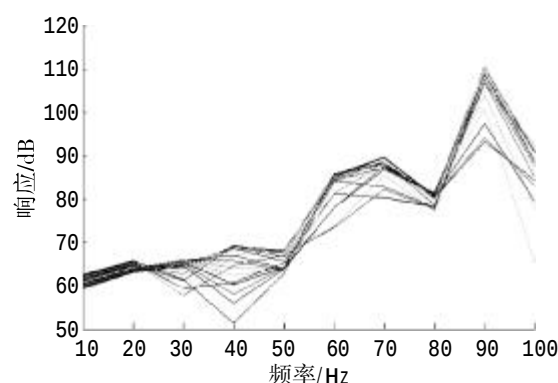


图10 频率响应函数图

Fig. 10 Frequency response function diagram



图11 变压器振动和噪声测试现场

Fig. 11 The vibration and noise testing transformer

4.1 油箱内壁敷设绝缘纸板(方案 1)

在变压器油箱的前后面内壁上附上一层绝缘纸板, 具体的安装位置见图 12。

4.2 油箱表面安装空气薄膜阻尼装置(方案 2)

在油箱前后两外表面上布置一层空气薄膜阻尼

表 1 噪声预估结果与实测结果对比

Tab. 1 Contrast to noise prediction and experimental results

噪声场点	实测噪声/dB	预估结果/dB	相对误差/%
1	63.4	63.1	0.47
2	63.8	63.3	0.78
3	64.2	63.5	1.10
4	64.3	63.5	1.24
5	63.5	62.9	0.94
6	64.8	64.1	1.08
7	63.6	62.9	1.10
8	64.1	63.6	0.78
9	63.2	62.8	0.63
10	64.5	63.7	1.24

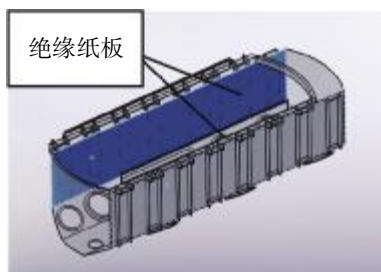


图 12 油箱内壁加绝缘纸板

Fig. 12 Inner wall of oil tank added insulation board

结构, 安装后应保证油箱壁与附加钢板之间存在空气间隙, 见图 13。

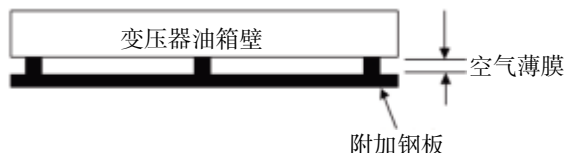


图 13 空气薄膜阻尼结构安装示意图

Fig. 13 Air pump damping structure installation diagram

4.3 变压器底部布置金属橡胶隔振器(方案 3)

按照变压器原来的安装方式, 在油箱底部布置了 12 个金属橡胶隔振器, 布置形式见图 14。

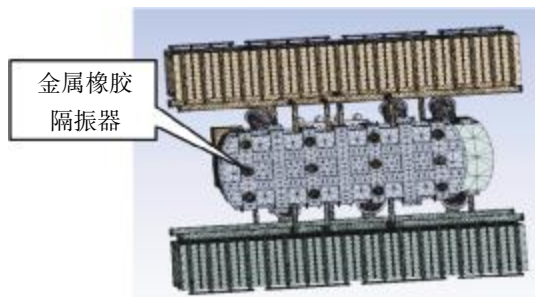


图 14 金属橡胶隔振器安装图

Fig. 14 Installation of metal rubber isolator

几种措施的降噪效果预估结果见表 2, 从表 2 中可见, 采用上述噪声预估方法可以实现对变压器

结构改进的降噪效果进行定量预估, 从而为变压器低噪声改进设计提供指导。

表 2 变压器降噪效果预估结果

Tab. 2 Transformer noise prediction results

改进方案	改进前噪声/dB	改进后噪声/dB	降噪效果/dB
方案 1	65.2	64.3	0.9
方案 2	65.2	62.3	2.9
方案 3	65.2	62.7	2.5

5 结语

文中提出了一种用于大型电力变压器噪声预估的数值分析方法, 即在难于得到变压器铁心绕组部分产生的电磁力情况下, 采用施加相对大小激励力的方法, 通过有限元分析, 计算出变压器的振动谐响应; 将得到的振动谐响应计算结果作为声学模型的边界条件, 再通过 LMS Virtual.Lab Acoustics 声学软件, 采用声学边界元法求解变压器结构辐射噪声的分布, 从而实现变压器整体辐射噪声的预估^[20-24]。

作为实例, 首先预估了某型号变压器在满负载运行条件下一个测量面的场点噪声, 并与实测噪声进行对比, 误差可控制在 2% 以内。并且, 针对某大型电力变压器的低噪声结构改进设计问题, 运用文中提出的方法, 定量预估了几种减振降噪措施的降噪效果, 为该型变压器的低噪声设计提供了结构改进依据。实例验证了文中预估方法的有效性。

研究表明, 文中提出的大型变压器噪声预估方法具有较好的可行性, 为变压器的低噪声结构改进效果验证提供了较为方便的方法, 具有一定的工程应用价值。

参考文献:

- [1] KITAGAWA W, ISHIHARA Y, TODAKA T. Analysis of structural deformation and vibration of a transformer core by using magnetic property of magnetostriction[J]. Electrical Engineering in Japan, 2010, 172(1):19-26.
- [2] 刘江明, 骆贤华, 孙正竹, 等. 变压器交流耐压试验异常分析及处理[J]. 变压器, 2013, 50(1):49-48.
LIU Jiangming, LUO Xianhua, SUN Zhengzhu, et al. Analysis and treatment of abnormal condition in AC withstand voltage test of transformer[J]. Transformer, 2013, 50(1):49-48.
- [3] 喇元, 王红斌, 陈忠东. 变压器状态检修技术的研究及应用[J]. 变压器, 2013, 50(8):61-65.
LA Yuan, WANG Hongbin, CHEN Zhongdong. Research and application of condition maintenance technology of transformer[J]. Transformer, 2013, 50(8):61-65.

- [4] 范基康, 李向英, 李响. 小容量高电压电力变压器介损的探讨[J]. 变压器, 2013, 50(6): 29-33.
FAN Jikang, LI Xiangying, LI Xiang. Discussion on dielectric loss of small HV power transformer[J]. Transformer, 2013, 50(6): 29-33.
- [5] 黄莹, 李志远, 黄国兴, 等. 电力电容器可听噪声声功率级测试方法的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(3): 28-32.
HUANG Yin, LI Zhiyuan, HUANG Guoxing, et al. Study on the test methods to the sound power level of audible noise from power capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(3): 28-32.
- [6] 祝令瑜, 汲胜昌, 曹涛, 等. 电容器噪声传播规律的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(6): 50-55.
ZHU Lingyu, JI Shengchang, CAO Tao, et al. Study on propagation law of capacitor audible noise[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(6): 50-55.
- [7] GAO Yanhui, MURAMATSU K, HATIM M J, et al. Design of a reactor driven by inverter power supply to reduce the noise considering electromagnetism and magnetostriction[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(6): 2179-2183.
- [8] 顾晓安, 沈荣瀛, 徐基泰, 等. 国外变压器噪声研究的动向[J]. 变压器, 2002, 39(6): 33-38.
GU Xiao'an, SHEN Rongying, XU Jitai. Trend of transformer noise research abroad[J]. Transformer, 2002, 39(6): 33-38.
- [9] GORDON C G. A method for predicting the audible noise emissions from large outdoors power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(3): 1109-1112.
- [10] 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.
- [11] PETER H, ANDREAS H, MANFRED K, et al. 3D-FEM simulation for investigation of load noise of power transformers verified by measurements [C]//18th International Conference on Electrical Machines. [S.l.]: IEEE, 2008: 1-4.
- [12] ERTL M, LANDES H. Investigation of load noise generation of large power transformer by means of coupled 3D FEM analysis[J]. COMPEL: Int. J. for Computation and Maths. in Electrical and Electronic Eng., 2007, 26(3): 788-799.
- [13] KIM Y D, SHIM J M, PARK W Y, et al. Structure-vibration analysis of a power transformer (154 kV/60 MVA/single phase)[C]//Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology. [S.l.]: IEEE, 2009: 106-110.
- [14] 苏俊收. 500 kV 油浸式电力变压器的噪声预估与减振技术研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2013.
- SU Junshou. The study on noise prediction and vibration reduction techniques in 500 kV oil-immersed power transformers[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2013.
- [15] 李瑞明, 郭连水, 王巧霞, 等. 复杂装配体有限元网格生成方法的研究[J]. 机械工程师, 2007(4): 120-122.
LI Ruiming, GUO Lianshui, WANG Qiaoxia, et al. The research on mesh generation method of complicated assembly[J]. Mechanical Engineer, 2007(4): 120-122.
- [16] 陈青恒, 马宏彬, 何金良. 直流偏磁引起的 500 kV 电力变压器振动和噪声的现场测量与分析[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 93-96.
CHEN Qingheng, MA Hongbin, HE Jinliang. Field monitoring and analysis on vibration and noise of 500 kV electrical transformer under DC current biasing[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 93-96.
- [17] 顾晓安, 沈密群, 朱振江, 等. 变压器铁心振动和噪声特性的试验研究[J]. 变压器, 2003, 40(4): 1-4.
GU Xiao'an, SHEN Miqun, ZHU Zhenjiang, et al. Test research on vibrations and noise level in transformer core [J]. Transformer, 2003, 40(4): 1-4.
- [18] 李宪斌. 典型电力变压器结构减振降噪技术研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2013.
LI Xianbin. Study on vibration and noise reduction technology of typical power transformer[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2013.
- [19] RAUSCH M, KALTENBACHER M, LANDES H, et al. Combination of finite and boundary element methods in investigation and prediction of load-controlled noise of power transformers[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 250(2): 323-338.
- [20] 许庆新, 沈密群, 顾晓安, 等. 变压器铁芯远场辐射噪声预估方法[J]. 噪声与振动控制, 2002, 22(5): 12-15.
XU Qingxin, SHEN Miqun, GU Xiao'an, et al. The transformer core far field radiation noise prediction method[J]. Noise and Vibration Control, 2002, 22(5): 12-15.
- [21] 李增刚, 詹福良. LMS Virtual. Lab Acoustics 声学仿真计算高级应用实例[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
LI Zenggang, ZHAN Fuliang. Senior application of acoustic simulation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [22] 马宏彬, 何金良, 陈青恒, 等. 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 et al. Vibration and sound waveform analysis of 500 kV single phase power transformer [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(8): 1599-1604.

(下转第 44 页)

- [10] 周洪, 罗星, 邓其军. 基于 DSP 的智能配电网网柜 FTU 设计[J]. 电力自动化设备, 2011, 32(2): 124-128.
ZHOU Hong, LUO Xing, DENG Qijun. Design of DSP-based FTU for RMU of intelligent distribution grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 32(2): 124-128.
- [11] LIU Shuxin, CAO Yundong, HOU Chunguang, et al. Development of on-line monitoring system of switchgear[C]// International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology, [S.l.]: IEEE, 2011: 295-298.
- [12] 王红亮, 黄新波, 王宏, 等. 智能变电站电容型设备介质损耗在线监测 IED 设计[J]. 高压电器, 2012, 48(1): 1-7.
WANG Hongliang, HUANG Xinbo, WANG Hong, et al. Design of an on-line monitoring IED of dielectric loss in capacitive equipment in intelligent substation[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(1): 1-7.
- [13] 刘曦, 濮峻嵩, 冯运, 等. 大电容量高压电气设备介质损耗测量装置的研制与应用[J]. 高压电器, 2012, 48(10): 17-21.
LIU Xi, PU Junsong, FENG Yun, et al. Development and application on dielectric loss testing device for large-capacity and high-voltage electrical equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10): 17-21.
- [14] 马立新, 林家隽, 肖川, 等. 电流突变抑制与智能化谐波检测系统[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(1): 49-53.
MA Lixin, LIN Jiajun, XIAO Chuan, et al. Current mutation suppression and intelligent harmonic detection system[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2012, 24(1): 49-53.
- [15] 李天云, 范夕庆, 汪剑波, 等. 基于小波滤波和跟踪微分器的介质损耗因素检测方法[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 223-226.
LI Tianyun, FAN Xiqing, WANG Jianbo, et al. A method to detect dielectric loss factor based on wavelet filtering and tracking differentiator[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 223-226.
- [16] 乐江源, 谢运祥, 张志, 等. 有源电力滤波器状态反馈精确线性化控制[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2): 81-85.
LE Jiangyuan, XIE Yunxiang, ZHANG Zhi, et al. State feedback exact linearization control for APF[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 81-85.
- [17] 王小华, 荣命哲, 徐铁军, 等. 中压开关柜在线监测系统硬件抗电磁干扰技术研究[J]. 高压电器, 2007, 43(5): 321-324.
WANG Xiaohua, RONG Mingzhe, XU Tiejun, et al. Study on anti-electromagnetic interference technology by hardware for online monitoring system of medium voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(5): 321-324.
- [18] 郝建, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 应用频域介电谱法的变压器油纸绝缘老化状态评估[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 187-193.
HAO Jian, LIAO Ruijin, YANG Lijun, et al. Aging status assessment of power transformer oil-paper insulation by frequency domain dielectric spectroscopy[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 187-193.
- [19] 杨丽君, 邓帮飞, 廖瑞金, 等. 应用时-温-水分叠加方法改进油纸绝缘老化寿命模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 196-203.
YANG Lijun, DENG Bangfei, LIAO Ruijin, et al. Improvement of lifetime model on thermal aging of oil-paper insulation by time-temperature-moisture superposition method[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 196-203.
- [20] TANG C, CHEN G, FU M, et al. Space charge behaviour in multi-layer oil-paper insulation under different DC voltages and temperatures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(3): 778-788.
- [21] 高迎霞. 电子式电流互感器高压侧电路及电源的研究[D]. 河北: 燕山大学, 2006.
GAO Yingxia. Research of the high voltage circuit and power supply for electronic current transformer [D]. Hebei: Yanshan University, 2006.

刘树鑫(1982—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为智能电器化、绝缘在线监测。

曹云东(1963—), 男, 博士生导师, 主要研究方向为电器智能化。

侯春光(1978—), 男, 讲师, 从事智能电器研究。

(上接第 37 页)

- [23] 汲胜昌, 程锦, 李彦明, 等. 油浸式电力变压器绕组与铁芯振动特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(6): 616-619.
JI Shengchang, CHENG Jin, LI Yanming. Study on the winding and core vibration characteristics of oil filled transformer[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(6): 616-619.
- [24] 郑建军, 刘兴业, 周欣竹. 边界元法及其在结构分析中的应用[M]. 安徽: 安徽科学技术出版社, 2006.
ZHENG Jianjun, LIU Xingye, ZHOU Xinzhong. Boundary element method and its application in structural analysis [M]. Anhui: Anhui Science and Technology Press, 2006.

莫娟(1979—)女, 博士研究生, 主要从事输变电设计技术及环保技术研究。

刘吉轩(1957—), 男, 研究员, 主要从事振动和噪声分析与控制等方面的研究(通信作者)。