

基于多物理场耦合的特高压并联电抗器 振动噪声仿真分析与实验研究

吴书煜¹, 马宏忠¹, 姜宁², 戴锋², 朱超², 谭风雷²

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 国网江苏省电力有限公司检修分公司, 江苏 南京 211102)

摘要:为全面研究特高压并联电抗器振动噪声特性及预测大小,考虑电抗器振动噪声产生机理,建立了基于多物理场耦合的电磁-结构-噪声全过程仿真电抗器模型。基于场-路耦合的电磁学理论,采用虚位移原理计算了电抗器电磁力;基于电磁-结构耦合的动力学理论,以电磁力为载荷,求取电抗器振动特性与振动速度;基于结构-噪声耦合的声学理论,以电抗器振动速度为载荷,分析了电抗器噪声分布;通过实验验证了模型的准确性。研究表明:油箱表面振动信号可反映电抗器内部运行状态,送电瞬间电抗器从暂态过渡到稳态需1.5个电流周期,电抗器振动以100 Hz为主振频率,噪声集中于100 Hz为中心频率的1/3倍频带,最大噪声为83.2 dB。分析研究结果为电抗器的减振降噪提供了理论支持。

关键词:特高压并联电抗器;多物理场耦合;振动;噪声

中图分类号:TM 47

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202002007

0 引言

特高压电网的大力发展解决了我国能源分配不均、能源消费与能源资源逆向分布的问题^[1]。特高压电网的建设需要特高压设备的支持,我国生产制造的特高压变压器、开关设备、电容器和互感器等已处于世界先进水平^[2],而特高压并联电抗器(以下简称电抗器)作为无功补偿与降低工频电压升高的关键设备^[3-4],广泛应用于特高压变电站,其加强了电力系统的稳定性与安全性。由于电抗器电压高、容量大,易造成振动增大、噪声污染等严重问题,给自身的运行和周围环境造成了巨大影响,因此,分析与研究电抗器振动噪声是十分关键且必要的。

目前,国内外学者更多地关注电抗器的电磁场分布^[5]、抗震试验^[6]、可控性^[7]以及温度场分布^[8-9]等方面,关于振动噪声影响电抗器运行及环境的研究较少,随着电抗器振动噪声问题的日益凸显^[10],其越来越受到相关人员的重视。电抗器振动噪声的研究主要有实验测量法与仿真法:文献[11]测量了电抗器振动和噪声,简单分析了振动噪声的频谱特性,并未对电抗器振动噪声的产生变化机理进行深入研究;文献[12]对电抗器振动信号进行实测,分析了不同电流、电压和直流偏磁下的振动变化,并引入振动频率特征量描述电抗器的工作状态,为电抗器的在线监测提供了支持,文献[13]结合理论与实验分析,

提出了振动控制技术,但文献[12-13]需要大量实验数量的支持,工程实用性较差;文献[14]考虑声波干涉特性,建立了声场分布模型,采用相干声波理论计算了声场,但声源模型简单,有待进一步优化;文献[15]通过理论分析、建模仿真和实验测量,研究了电抗器噪声的产生机理与控制方法,总结了声压级与运行电压的关系,但未论述振动转换为噪声的过程。上述研究成果为电抗器振动噪声研究奠定了一定的理论基础,但缺乏系统且完整的理论分析,需要进行更加详细具体的研究。

本文以BKDF-240000/1000型号的特高压并联电抗器作为振动噪声研究对象,全面考虑电抗器振动噪声产生的原因、经过和结果,基于多物理场耦合的有限元理论,建立了多物理场耦合的电磁-结构-噪声全过程仿真电抗器模型;利用瞬态电磁场分析研究了电抗器磁场、电磁力分布规律,利用模态分析与谐响应分析研究了电抗器振动特性,通过声学分析总结了电抗器噪声分布特点;采用加速度传感器测量电抗器振动信号、声压计采集电抗器噪声信号,通过实验对比验证了本文电抗器振动噪声模型的准确性。

1 振动噪声理论分析

1.1 振动噪声产生机理

与变压器结构类似,电抗器主体部分由绕组和铁芯构成。因漏磁和电流相互作用产生的绕组电磁力、铁芯所受电磁力以及铁芯的磁致伸缩是引起电抗器振动的主要原因,其通过铁芯构件与变压器油等传到油箱表面,从而引起油箱表面的振动,构成电抗器整体的振动特性。电抗器噪声以振动速度为声

收稿日期:2019-02-23;修回日期:2019-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577050);国网江苏省电力有限公司重点科技项目(J2018014)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577050) and the Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co.,Ltd.(J2018014)

源,以变压器油与空气为传播介质,构成电抗器整体的噪声特性。

1.2 场-路耦合理论分析

在实际运行中,电抗器磁场是时变的,忽略位移电流与集肤效应^[16],在满足 Maxwell 方程的基础上,得到三维瞬态电磁场方程如式(1)所示。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right) = -\mathbf{J} + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{A}$ 为矢量磁位; v 为材料的磁阻率; $\mathbf{J}$ 为绕组电流密度; $\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$ 为电磁感应引起的涡流电流密度。

在采用有限元法计算得到磁位的基础上,通过转化后处理得到电磁场的多种物理量,并假设绕组内电流密度不变,利用虚位移原理^[17]求解电磁力:

$$\mathbf{F} = \frac{\int_V \left[\mathbf{J} d\mathbf{A} - d \left(\frac{1}{2} \mathbf{J} \mathbf{A} \right) \right] dV}{d\mathbf{g}} = \frac{\int_V \frac{1}{2} \mathbf{J} d\mathbf{A} dV}{d\mathbf{g}} \quad (2)$$

其中, $d\mathbf{g}$ 为虚位移。

1.3 电磁-结构耦合理论分析

电抗器振动可以看成受迫简谐运动,即在周期性变化的电磁力作用下做简谐运动。模态分析与谐响应分析是结构振动的2个主要特性:模态分析用于求解电抗器固有频率和振型;谐响应分析用于确定电抗器在已知幅值和频率的正弦电磁力作用下的稳态响应,从而优化电抗器结构避免共振,并确保电抗器可以承受由电磁力产生的振动。模态分析与谐响应分析遵循式(3)所示的动力学方程。

$$\mathbf{M}\mathbf{a}(t) + \mathbf{C}\mathbf{v}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (3)$$

其中, $\mathbf{M}$ 为质量矩阵; $\mathbf{C}$ 为阻尼矩阵; $\mathbf{K}$ 为刚度矩阵; $\mathbf{a}(t)$ 为加速度矢量, $\mathbf{v}(t)$ 为速度矢量, $\mathbf{x}(t)$ 为位移矢量, $\mathbf{a}(t)=\mathbf{v}'(t)=\mathbf{x}''(t)$; $\mathbf{F}(t)$ 为力矢量。

式(3)中,无阻尼的模态分析 $\mathbf{C}=\mathbf{O}$ ($\mathbf{O}$ 为零矩阵)、 $\mathbf{F}(t)=0$,主振型位移为正弦函数 $x_i=x_{mi}\sin(\omega_i t+\phi_i)$,其中, ω_i 为自振圆频率,其值为 $|\mathbf{K}-\omega^2\mathbf{M}|=0$ 的解, ϕ_i 为初始相位,可得自振频率 $f_i=\omega_i/(2\pi)$ 。谐响应分析中,式(3)等号左侧为电抗器结构运动特性,等号右侧为场-路耦合的计算结果,其大小正比于电流的平方。通过求解式(3),可得电抗器振动的加速度等物理量,由此可知,通有频率为 50 Hz 的电流的电抗器振动频率为 100 Hz 及其倍频。

1.4 结构-噪声耦合理论分析

电抗器噪声以振动速度为声源,以变压器油和空气为传播介质,噪声在产生、传播的过程中遵循媒质的运动方程、连续方程和状态方程^[18],分别如式(4)~(6)所示。

$$\rho_0 \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial v_y}{\partial t} + \frac{\partial v_z}{\partial t} \right) = - \left(\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho_0 \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial v_y}{\partial t} + \frac{\partial v_z}{\partial t} \right) \quad (5)$$

$$p = c_0^2 \rho \quad (6)$$

其中, ρ_0 为流体密度; v_x 、 v_y 、 v_z 分别为电抗器在谐响应计算中的 x 、 y 、 z 轴振动速度; p 为空间各点声压; ρ 为媒介密度增量; c_0 为声速。

在理想的流体介质中,忽略2阶以上微量及流体粘性的影响^[19],电抗器简谐运动声波满足的波动方程为:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (7)$$

将声压转化成声压级 L_p :

$$L_p = 20 \lg \frac{p_e}{p_0} \quad (8)$$

其中, p_e 为声压有效值; p_0 为基准声压,其值为 2×10^{-5} Pa。

2 多物理场耦合模型建立与仿真设置

2.1 电抗器模型的建立

本文研究对象为 BKDF-240000 / 1000 型号的特高压并联电抗器,其额定电压为 $1100/\sqrt{3}$ kV,额定电流为 377.9 A。电抗器整体由绕组、铁芯、油箱、套管等组成,绕组采用自粘换位铜导线螺旋绕制,铁芯结构为一铁芯柱带两旁轭,铁芯柱由铁芯饼与气隙垫块交替叠加而成,油箱选用高强度的钢材制成,以槽型增加油箱整体强度,套管用于绕组首端高压引线,整体结构图如附录中的图 A1 所示。

2.2 电抗器振动噪声分析过程

特高压并联电抗器振动噪声分析采用电磁-结构-噪声的多物理场耦合方法,实现了电抗器振动噪声全过程仿真。振动噪声分析流程如下:

(1)在 SolidWorks 中建立 1:1 真实数据特高压并联电抗器三维仿真模型;

(2)在 Maxwell 中设置瞬态磁场求解器,时间求解步长为 0.5 ms,经过处理得到电磁力的时域波形图并记录数据;

(3)在 MATLAB 中对电磁力进行快速傅里叶变换(FFT),得到电磁力的频率、幅值与相位;

(4)在 ANSYS Workbench 中进行模态分析与谐响应分析,以电磁场计算的电磁力作为载荷激励,得到电抗器振动速度,同时定义结构-噪声耦合传递文件;

(5)在 ANSYS Acoustic 中进行声学分析,定义耦合噪声源,接收结构场计算结果,求解计算电抗器各处电抗器的声压和声压级等多个参数;

(6)将仿真结果与实验数据进行对比。

2.3 电抗器模型设置与条件假设

在建立电抗器三维模型的基础上,设置场-路耦

合仿真求解条件如下:

(1)施加激励为顺时针的正弦电流,设置匝数与绕组层数,忽略集肤效应,并假设电流激励在绕组中均匀分布;

(2)绕组材料属性为铜,铁芯材料属性为具有 $B-H$ (B 、 H 分别为磁感应强度和磁场强度)曲线特性且自定义的硅钢片;

(3)忽略铁芯夹件、垫脚等对电磁场的影响。

在计算得到的电抗器电磁力基础上,设置电磁-结构耦合仿真求解条件如下:

(1)电抗器以装配体呈现,各部分零件接触良好,自定义材料属性,设置材料密度、弹性模量及泊松比等参数;

(2)对电抗器油箱底部及套管支撑件底部施加固定约束,频率范围设置为0~1 000 Hz,求解步长为10;

(3)对绕组和铁芯施加电磁力载荷激励,包括幅值与相位。

在计算得到的电抗器振动速度基础上,设置结构-噪声耦合仿真求解条件如下:

(1)谐响应分析中定义结构-噪声耦合噪声文件,声学分析中定义耦合噪声源,即将结构场电抗器振动速度作为噪声源传递到噪声场;

(2)设置声音传播区域材料属性,添加噪声计算边界条件;

(3)进行声学分析时,应注意频率范围、求解步长和求解方法与谐响应分析保持一致。

3 多物理场耦合仿真结果分析

3.1 场-路耦合结果分析

将铁芯与绕组模型导入Maxwell中,选择瞬态电磁场求解器对电抗器进行计算分析,进行材料选择、激励添加、边界条件设定等步骤后完成求解计算。电抗器铁芯磁感应强度矢量图与云图如附录中的图A2所示,电抗器绕组磁感应强度矢量图与电磁体积分力密度分布图如附录中的图A3所示。图A3中,0.05 s和0.015 s是50 Hz工频正弦交流电流下的2个时间点。

由图A2可知,电抗器磁场沿铁芯分布,主要集中于铁芯饼及铁轭拐角内侧^[20],最大值为1.403 8 T。由图A3可知,电抗器运行过程中,电磁力的方向不发生改变,因为电磁力是电流与磁场共同作用产生的,在电流的1个周期内,磁场与电流保持同时变化,根据左手定则,电磁力方向不变。由于特高压电抗器绕组较高,电磁力在分布上呈现向外发散状态,轴向电磁力两边大于中间,径向电磁力两边小于中间。而油箱表面振动是由垂直油箱壁的振动速度分量引起的^[21],即轴向电磁力引起油箱顶部振动,径向

电磁力引起油箱四周振动,因此,在油箱表面采集振动信号,能够反映绕组运行状态。

3.2 电磁-结构耦合结果分析

将电抗器电磁力FFT结果作为谐响应分析载荷激励,忽略数值较小的倍频电磁力的影响,输入参数为100 Hz电磁力的幅值与相位。电抗器油箱模态振型与固有频率如附录中的图A4所示,电抗器正面加速度频率响应如图1所示。

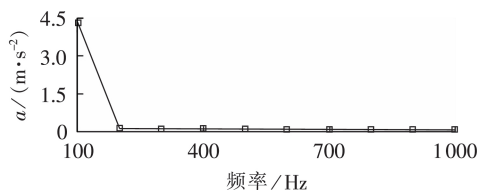


图1 加速度频率响应

Fig.1 Acceleration frequency response

由图A4可知,电抗器油箱的前10阶固有频率较低,随着频率的增大,模态振型由套管逐渐移向油箱本体,在电抗器以100 Hz为主振频率的情况下,油箱不会引起共振^[23]。电抗器振动主要由绕组与铁芯的电磁力产生,因此,在油箱表面采集振动信号,通过信号处理方法,提取特征信息,可反映电抗器内部绕组和铁芯的运行状态。由图1可见,油箱正面加速度100 Hz频率响应的幅值最大,随着倍频的增大,振动幅值减弱。

3.3 结构-噪声耦合结果分析

以谐响应分析的振动速度为噪声源,定义耦合噪声文件,对电抗器进行噪声分析。电抗器声压级分布云图如附录中的图A5所示。由图A5可知,整体上电抗器内部噪声大于外侧噪声,声压级分布范围为75.31~83.20 dB。由于铁芯硅钢片的特殊材质、电磁力和磁致伸缩等原因,最大噪声位于铁芯上轭,声压级为83.20 dB。

4 电抗器振动噪声实验及结果验证

4.1 电抗器振动实验

对盱眙特高压变电站BKDF-240000/1000型号的特高压并联电抗器进行振动信号采集实验,通过压电加速度传感器测量振动信号,测点分别布置在油箱正面、右侧面以及顶部(顶部测点在停电检修期间安装),具体如附录中的图A6所示。压电加速度传感器的电压灵敏度为100 mV/g,量程可达50 g,采样频率设置为16 kHz。

分别采集电抗器稳定运行状态下与送电瞬间的振动信号,将实验结果与仿真计算结果进行对比。图2为电抗器送电瞬间振动信号时域波形,以及稳定运行状态下不同测点的加速度频率响应的仿真与实验结果对比。

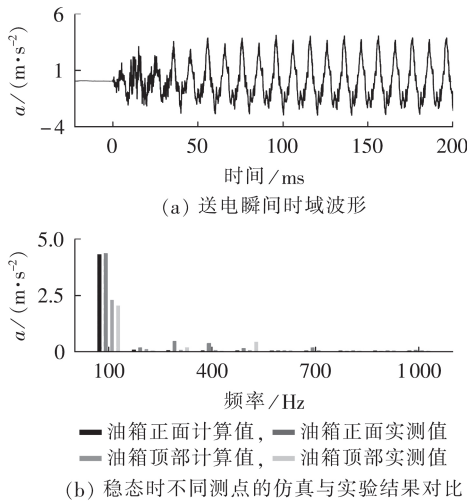


图2 振动信号时域波形和加速度频率响应的仿真与实验结果对比

Fig.2 Time-domain waveform and comparison of acceleration frequency response between simulative and experimental results for vibration signal

如图2(a)所示,送电瞬间,电抗器由静止状态经瞬态过渡到稳态需要约1.5个电流周期,振动频率以100 Hz为主,与1.3节和3.1节的分析结果一致,同时送电情况下能更好地激发电抗器内部状态,为电抗器状态监测与故障诊断提供更有意义的数 据。对电抗器稳定运行状态下的振动信号进行FFT,由图2(b)可知,实验结果与仿真结果基本一致,验证了模型的正确性。在实际运行中,由于电抗器的结构和运行条件更加复杂,在100 Hz振动频率幅值最大的情况下,其他倍频振动的变化呈现无规律且多样性的特点。

4.2 电抗器噪声实验

对BKDF-240000/1000型号的特高压并联电抗器进行噪声测量实验,通过声压计获取噪声信息。为降低外界环境的影响,选择天气状况良好且风速较小的晴朗天气。测点与电抗器表面的水平距离为0.3 m和2 m,与地面的垂直距离为1.5 m。为提高测量的准确度,采取增加测量点的方法。噪声测点分布如图3所示。

对与电抗器表面的水平距离 $l=0.3$ m的36个测点以及 $l=2$ m的44个测点采集噪声信息,获得电抗器以100 Hz为中心频率的1/3倍频带的噪声声压级,并与仿真计算结果进行对比,结果如图4所示。表1为与电抗器不同距离的测点的整体噪声计算值与实测值的对比。

由图4可知,由于环境背景噪声和其他两相电抗器的影响,电抗器不同测点之间的噪声实测值起伏偏差较大,不同测点的计算值呈现距离本体近则噪声大、距离本体远则噪声小的变化趋势。由表1可知,电抗器噪声整体实测值比计算值大,但误差较

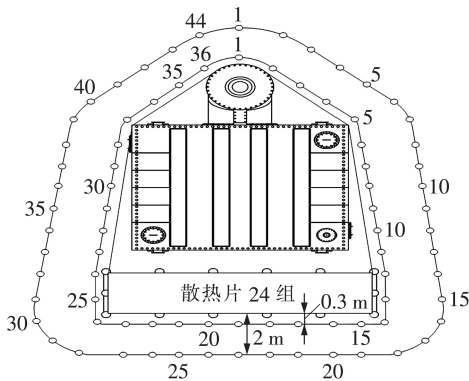


图3 噪声测点分布

Fig.3 Distribution of noise measuring points

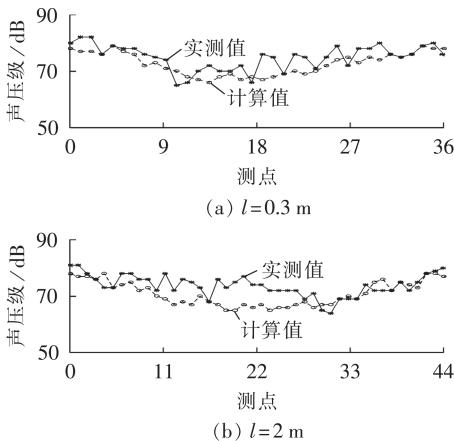


图4 不同测点的电抗器噪声计算值与实测值对比

Fig.4 Comparison between calculative and measured values of reactor noise at different measuring points

表1 电抗器噪声整体计算值与实测值对比

Table 1 Comparison between calculative and measured values of reactor noise

距离/m	测量值/dB	计算值/dB	误差/%
0.3	74.92	72.63	3.06
2.0	73.55	70.98	3.49

小,验证了本文模型的准确性。在设计阶段可利用本文模型预估计电抗器表面的振动大小,以及对电抗器本体噪声进行计算与预测,通过电抗器噪声声压级等参数分析噪声对周围环境的影响,对降低电抗器振动噪声具有重要意义。同时,电抗器振动噪声建模仿真分析过程同样适应于其他电力设备,具有较好的工程实用性。

5 结论

本文基于电磁-结构-噪声的多物理场耦合计算方法,实现了电抗器振动噪声全过程仿真分析,所得结论如下。

(1)电抗器磁场沿铁芯分布,最大磁感应强度位于铁芯饼部位,其值为1.403 8 T;绕组电磁力频率以100 Hz为主,受力方向使电抗器趋于发散状态,轴向

受力呈现两边大中间小的特点,径向受力则相反。

(2)电抗器主要以100 Hz频率振动,送电瞬间由静止状态经瞬态过渡到稳态需要约1.5个电流周期;油箱固有频率较低,可通过采集油箱表面振动信号来反映电抗器内部绕组与铁芯运行状态。

(3)电抗器噪声以振动速度为声源,以100 Hz为中心频率的1/3倍频带为主,最大噪声点位于铁芯上轭,噪声从电抗器内部向外逐渐衰减;此仿真模型计算结果与振动噪声测量值相符,证明了模型准确性,为电抗器设计阶段的减振降噪提供了依据;同时,基于多物理场耦合的振动噪声仿真分析方法同样适用于因电磁产生振动噪声的其他电力设备。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 中国特高压交流输电技术创新[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 1-8.
LIU Zhenya. Innovation of UHVAC transmission technology in China[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 1-8.
- [2] 李鹏, 李金忠, 崔博源, 等. 特高压交流输电变电装备最新技术发展[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1068-1078.
LI Peng, LI Jinzhong, CUI Boyuan, et al. Achievements in the newest technology of UHV AC power transmission equipment[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1068-1078.
- [3] 张丽, 徐玉琴. 并联电抗器在超(特)高压电网中应用及发展[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(4): 75-78.
ZHANG Li, XU Yubin. Application and development of shunt reactors in EHV & UHV transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(4): 75-78.
- [4] 吴海涛, 吕志宁, 张浩, 等. 并联电抗器运行异常分析及处理[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(8): 67-69.
WU Haitao, LÜ Zhining, ZHANG Hao, et al. Research on the abnormality of parallel connective reactor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(8): 67-69.
- [5] 包博, 刘鹏, 谢天喜, 等. 750 kV 高压电抗器笼式出线结构均压特性研究[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 232-236.
BAO Bo, LIU Peng, XIE Tianxi, et al. Voltage-sharing characteristics of cage outgoing line structure for HV reactors in 750 kV power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 232-236.
- [6] 程永锋, 王海波, 卢智成, 等. 特高压电抗器-套管体系抗震性能及本体动力放大作用计算方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 6109-6117.
CHENG Yongfeng, WANG Haibo, LU Zhicheng, et al. Seismic performance and calculation method of dynamic amplification of body research of UHV reactor-rushing system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 6109-6117.
- [7] 田铭兴, 石鹏太, 马亚珍. n 级饱和磁阀式可控电抗器结构特性和仿真方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 95-101.
TIAN Mingxing, SHI Pengtai, MA Yazhen. Structural property and simulation method of n -stage saturable magnetic-valve controllable reactor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 95-101.
- [8] 刘奋霞, 刘晔, 禹云长, 等. 特高压油浸式铁心并联电抗器内部温度场数值计算与实验研究[J]. 高压电器, 2017, 53(1): 163-168.
LIU Fenxia, LIU Ye, YU Yunchang, et al. Numerical and experimental research of internal temperature field of oil-immersed core shunt reactor with ultra-high voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(1): 163-168.
- [9] 姜志鹏, 周辉, 宋俊燕, 等. 干式空心电抗器温度场计算与试验分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 218-224.
JIANG Zhipeng, ZHOU Hui, SONG Junyan, et al. Temperature field calculation and experimental analysis of dry-type air-core reactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 218-224.
- [10] 赵文清, 王强, 牛东晓. 基于贝叶斯网络的电抗器健康诊断[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 40-43.
ZHAO Wenqing, WANG Qiang, NIU Dongxiao. Reactor health diagnosis based on Bayesian network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 40-43.
- [11] 谭黎军, 陈洪波, 欧强, 等. 特高压并联电抗器运行振动与噪声特性研究[J]. 变压器, 2016, 53(7): 43-46.
TAN Lijun, CHEN Hongbo, OU Qiang, et al. Research on vibration and noise characteristics of UHV shunt reactor[J]. Transformer, 2016, 53(7): 43-46.
- [12] CHEN S, WANG F H, SU L. Experimental research of vibration characteristics of shunt reactor[C]//IEEE PES General Meeting Conference & Exposition. National Harbor, MD, USA: IEEE, 2014: 1-5.
- [13] SYUYA H, YASURO H, YASUAKI S, et al. Vibration analysis of a large capacity shunt reactor[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(3): 737-745.
- [14] 倪园, 周兵, 裴春明, 等. 1000 kV 特高压并联电抗器周围声波干涉特性分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(12): 3926-3932.
NI Yuan, ZHOU Bing, PEI Chunming, et al. Characteristics analysis of acoustic interference around 1000 kV UHV shunt reactor[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(12): 3926-3932.
- [15] 周兵, 宋倩, 倪园, 等. 高压并联电抗器噪声特性及控制[J]. 高电压技术, 2016, 42(6): 1819-1826.
ZHOU Bing, SONG Qian, NI Yuan, et al. Noise characteristics of high-voltage shunt reactors and its control[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1819-1826.
- [16] 郭健, 林鹤云, 徐子宏, 等. 三相三柱变压器零序阻抗的场路耦合计算与分析[J]. 电工技术学报, 2009, 23(3): 80-85.
GUO Jian, LIN Heyun, XU Zihong, et al. Calculation and analysis of zeros-sequence impedance of three-phase and three limbs transformer based on field circuit coupled method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 23(3): 80-85.
- [17] 颜威利, 杨庆新, 汪友华, 等. 电气工程电磁场数值分析[M]. 北京: 机械出版社, 2005: 220-224.
- [18] 赵玫, 周海亭, 陈光治, 等. 机械振动与噪声学[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 171-175.
- [19] 尤小健, 李威, 柴应彬. 基于面光滑有限元法的三维声传播问题研究[J]. 舰船科学技术, 2015, 37(12): 105-109.
YOU Xiaojian, LI Wei, CHAI Yingbin. Analysis of sound of propagation in three-dimensional fluid-filled pipes based on Face-based on Smoothed Finite Element Method(FS-FEM)[J]. Ship Science and Technology, 2015, 37(12): 105-109.
- [20] 张鹏宇, 李琳, 聂京凯, 等. 考虑铁心磁致伸缩与绕组受力的高压并联电抗器振动研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(13): 3130-3139.
ZHANG Pengning, LI Lin, NIE Jingkai, et al. Study on the vibration of high voltage shunt reactor considering of magnetostriiction and winding force[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(13): 3130-3139.
- [21] 张凡, 汲胜昌, 师愉航, 等. 电力变压器绕组振动及传播特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(9): 2790-2798.

- ZHANG Fan,JI Shengchang,SHI Yuhang,et al. Research on transformer winding vibration and propagation characteristics [J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(9):2790-2798.
- [22] 胡静竹,刘涤尘,廖清芬,等. 基于有限元法的变压器电磁振动噪声分析[J]. 电工技术学报,2016,31(15):81-88.
- HU Jingzhu,LIU Dichen,LIAO Qingfen,et al. Analysis of transformer electromagnetic vibration noise based on finite element method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(15):81-88.
- [23] 马宏忠,弓杰伟,李凯,等. 基于ANSYS Workbench的变压器绕组松动分析及判定方法[J]. 高电压技术,2016,42(1):192-199.
- MA Hongzhong,GONG Jiewei,LI Kai,et al. Analysis and determination method for transformer winding looseness based

on ANSYS Workbench[J]. High Voltage Engineering,2016,42(1):192-199.

作者简介:



吴书煜

吴书煜(1992—),男,山东莒南人,硕士研究生,主要研究方向为电力设备状态监测与故障诊断(E-mail:wusy010101@163.com);

马宏忠(1962—),男,江苏如皋人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力设备状态监测与故障诊断、磁悬浮承重技术、电力系统谐波分析(E-mail:hhumhz@163.com)。

(编辑 任思思)

Simulation analysis and experimental research on vibration and noise of UHV shunt reactor based on multi physical field coupling

WU Shuyu¹,MA Hongzhong¹,JIANG Ning²,DAI Feng²,ZHU Chao²,TAN Fenglei²

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

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co.,Ltd. Maintenance Branch Company,Nanjing 211102,China)

Abstract: In order to comprehensively study the characteristics of vibration and noise of UHV shunt reactors and their prediction values, considering the generation mechanism of vibration and noise of reactors, an electromagnetic-structure-noise whole process simulation reactor model based on multi physical field coupling is established. Based on the electromagnetics theory of field-circuit coupling, the electromagnetic force of the reactor is calculated by using virtual displacement principle. Based on the dynamic theory of electromagnetic-structure coupling, the vibration characteristics and velocity of the reactor are obtained with the electromagnetic force taken as a load. Based on the acoustic theory of structure-noise coupling, the noise distribution of the reactor is analyzed with the vibration velocity taken as a load. And the accuracy of the model is verified by experiments. The research results show that the vibration signals on the surface of oil tank can reflect the internal operating status of the reactor, and the reactor need about 1.5 current cycles to transition from transient state to steady state; the main vibration frequency of reactor is 100 Hz, and the noise concentrates on the 1/3 octave band with the center frequency of 100 Hz, and the maximum noise is 82.3 dB. The analysis and research results provide theoretical support for the reduction of vibration and noise of the reactor.

Key words: UHV shunt reactor; multi physical field coupling; vibration; noise

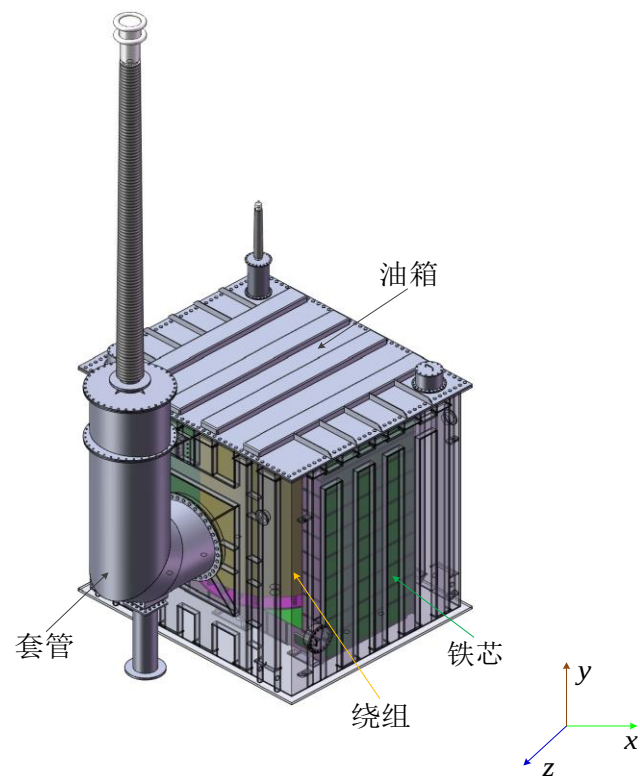


图 A1 电抗器整体结构

Fig.A1 Overall structure of reactor

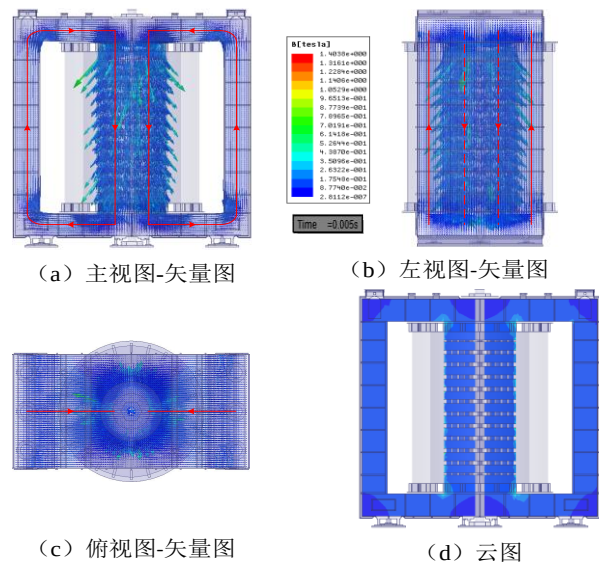


图 A2 铁芯磁感应强度矢量图与云图

Fig.A2 Magnetic induction intensity vector diagram and nephogram of iron core

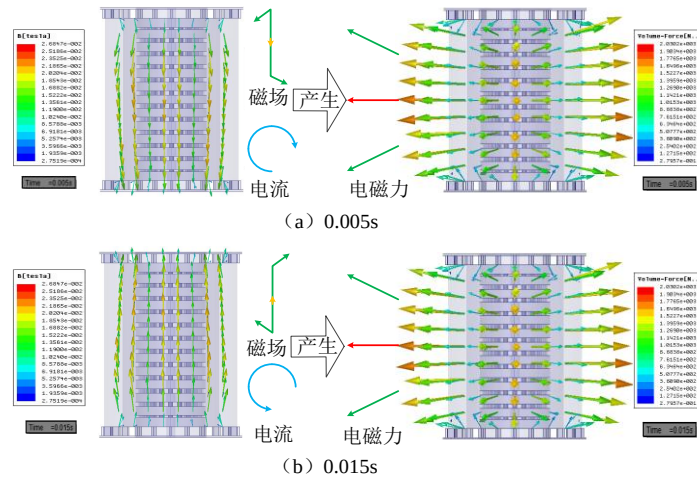


图 A3 绕组磁感应强度矢量图与电磁体积力密度分布图

Fig.A3 Magnetic induction intensity vector diagram and electromagnetic force density distribution diagram of winding

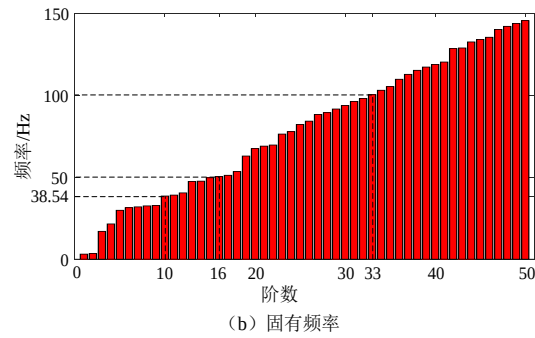
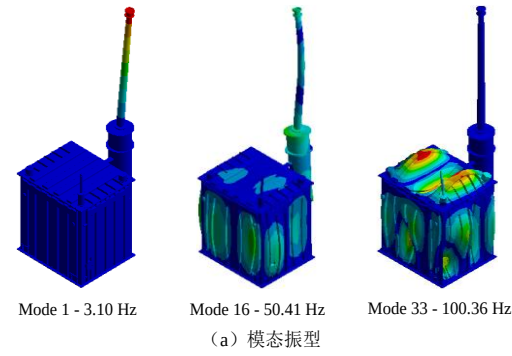


图 A4 油箱模态振型与固有频率

Fig.A4 Modal vibration mode and natural frequency of oil tank

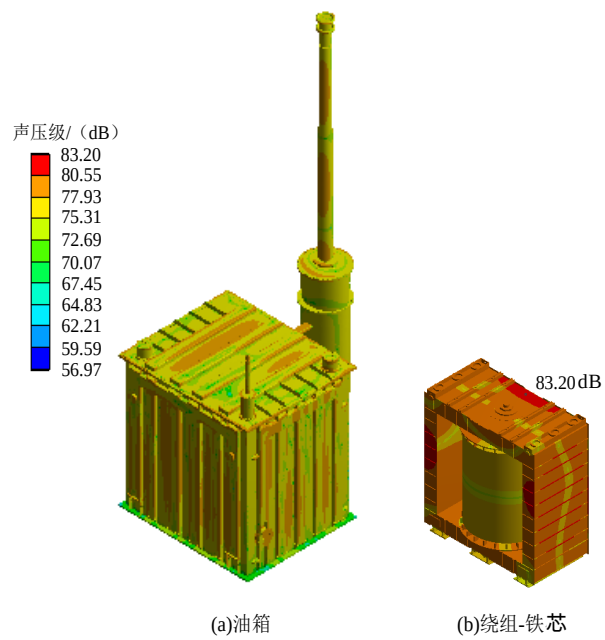


图 A5 电抗器声压分布云图

Fig.A5 Sound pressure distribution of reactor

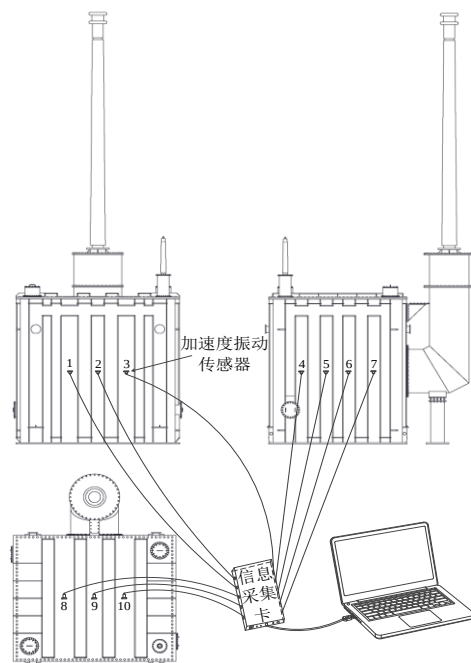


图 A6 振动测点分布图

Fig.A6 Distribution of vibration measurement points