

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.05.014

干式空心电抗器噪声特性及降噪措施仿真研究

王悦旻, 赵彦珍, 王杰昊

(西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 随着中国特高压输电工程的输送容量和距离不断提升,复合高次谐波电流流经换流站中干式空心电抗器所产生的振动噪声问题亟待解决。文中基于场—路耦合原理研究了电抗器的振动和噪声特性,通过建立等效的三维有限元仿真模型,分析了电抗器的磁场、电流、电磁力、噪声分布特点,并与实测结果进行比较,验证了所建模型的可靠性。在此基础上,对不同隔声罩结构的隔声效果进行了仿真分析,结果表明:通过采用金属板、空腔、吸声材料相组合的结构,可以有效改善隔声罩的降噪效果。研究结果为工程上实现电抗器的减振降噪提供了有效依据和参考。

关键词: 干式空心电抗器; 有限元仿真; 噪声; 隔声罩

Simulation Study on Noise Characteristics and Noise Reduction Measures for Dry-type Air-core Reactor

WANG Yueyang, ZHAO Yanzhen, WANG Jiehao

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: With the continuous improvement of transmission capacity and distance of UHV transmission projects in China, the vibration and noise caused by the compound high-order harmonic current flowing through the dry-type air-core reactor in the converter station needs to be solved urgently. In this paper, the vibration and noise characteristics of the reactor are studied based on the field-circuit coupling principle. By setting up an equivalent three-dimensional finite element simulation model, the distribution characteristics of magnetic field, current, electromagnetic force and noise of the reactor are analyzed, and the reliability of the model is verified by comparing with the measured results. On this basis, the sound insulation effects for different structures of sound insulation cover are simulated and analyzed. The results show that by using the combination structure of metal plate, cavity and sound absorbing material, the noise reduction effect of sound insulation cover can be effectively improved. The study results has provided an effective basis and reference for the realization of vibration and noise reduction of reactor in engineering.

Key words: dry-type air-core reactor; finite element simulation; noise; sound insulation cover

0 引言

干式空心电抗器作为电力系统中的主要感性设备,起到补偿无功容量、限制短路电流、滤除高次谐波等重要作用^[1-6]。然而,随着中国特高压输电工程的输送容量和距离不断提升,换流站中的噪声问题也日益突出。当复合高次谐波电流流经滤波系统时,会在电抗器等设备上产生振动噪声,不仅严

重影响到周围居民的正常生活,还会给换流站、输电工程的正常稳定运行带来安全隐患^[7-9]。因此,有必要对电抗器的振动和噪声特性开展研究,为工程上实现其减振降噪提供一定参考。

近年来,国内外学者针对干式空心电抗器的振动噪声问题开展了一系列研究。文[10]通过搭建耦合电磁、机械和振动声学的多物理场模型,研究了单层空心线圈从施加激励到声学响应的振动和噪

声特性,但并未对实际干式空心电抗器开展进一步研究。文[11]基于准稳态法提出了一种干式空心电抗器辐射噪声的计算方法,其计算结果与实测结果较为吻合,但该方法没有考虑发生结构共振时所产生的方向效应。文[12]基于频响函数提出了一种干式空心电抗器的噪声预估方法,通过实验验证了其有效性和准确性,但该方法的精准度与所要预测的噪声频率有关,只有频率较高时整体预测效果才能较好。

文中以一实际干式空心滤波电抗器为研究对象,针对上述存在的问题,在有限元仿真软件 Comsol 中建立等效的三维仿真模型,对电抗器进行模态和谐响应分析,考虑其固有频率和振型对噪声仿真结果的影响;通过给电抗器施加单频等效谐波电流激励^[13],仿真得到电抗器在不同运行工况下的噪声分布结果,并与实测结果对比,验证所建模型较为准确可靠。在此基础上,对不同隔声罩结构的隔声效果进行仿真,提出一种能够有效降低电抗器噪声水平的隔声罩结构。

1 电抗器参数及仿真模型

1.1 电抗器主要参数

以一台额定电流为 342.108 A,额定容量为 2 098.928 kvar 的 5 包封干式空心滤波电抗器为研究对象,其主要参数及各包封参数分别见表 1、2。

表 1 干式空心滤波电抗器主要参数

Table 1 Main parameters of dry-type air-core filter reactor

| 额定参数 | 数值 | 结构参数 | 数值 |
|-----------|-----------|---------|----------|
| 额定电感/mH | 57.085 | 包封高度/mm | 2 965.00 |
| 额定电流/A | 342.108 | 包封内径/mm | 2 300.00 |
| 额定容量/kvar | 2 098.928 | 包封外径/mm | 2 655.90 |

表 2 干式空心滤波电抗器各包封参数

Table 2 Each encapsulated parameters of dry-type air-core filter reactor

| 包封序号 | 层号 | 线圈匝数 | 额定电流/A | 线径/mm |
|------|----|-----------|---------|-------|
| 1 | 1 | 218.166 7 | 71.448 | 1.67 |
| 2 | 2 | 208.166 7 | 42.125 | 1.81 |
| 3 | 3 | 197.500 0 | 49.445 | 1.85 |
| 4 | 4 | 191.166 7 | 61.567 | 1.90 |
| 5 | 5 | 190.000 0 | 117.523 | 1.98 |

1.2 场—路耦合仿真模型

根据电抗器结构,建立三维场—路耦合仿真模型,并考虑撑条、星形支架和下方支柱绝缘子、铝升高座、玻璃钢支柱等金属构件的影响^[14-15]。其中,以层为最小单位所建立的有限元仿真模型见图 1。由

于实际电抗器在生产过程中要经过固化流程,使得线圈机械结构更为稳定,故在模型中需要考虑其两侧和端部绝缘,并添加“阻尼”、“重力”、“辊支承”边界条件进行仿真。

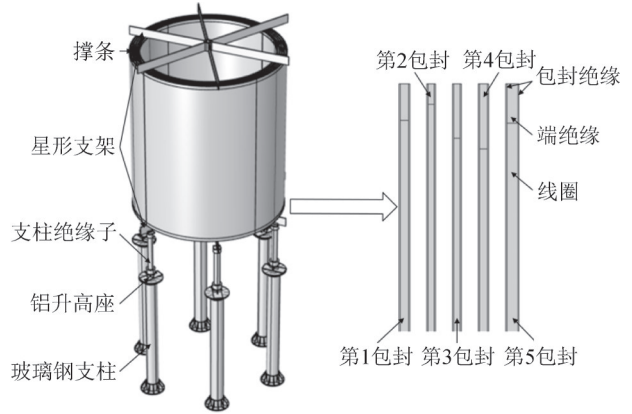


图 1 有限元仿真模型

Fig. 1 Finite element simulation model

根据电抗器结构所建立的等效电路模型见图 2。假设电抗器线圈层数为 n ,每层线圈均可等效为其自感 $L_i(i=1, 2, \dots, n)$ 与直流电阻 R_i 相串联的一条支路,每两个支路之间还存在互感 $M_{ij}(j=1, 2, \dots, n)$ 。

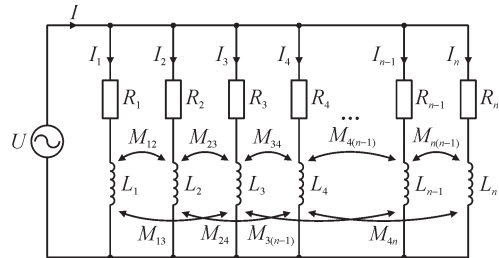


图 2 等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model

1.3 仿真流程

软件中利用“磁场”、“固体力学”、“压力声学”3个模块来实现3个物理场的耦合,具体仿真流程见图 3。

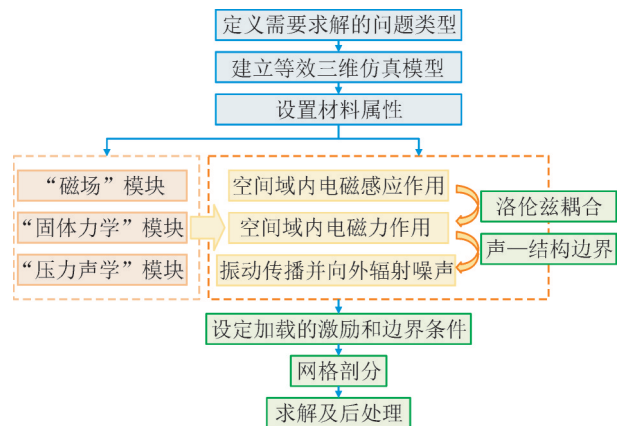


图 3 多物理场仿真流程

Fig. 3 Multiphysics simulation process

2 计算原理

2.1 电抗器振动与噪声产生过程

干式空心电抗器振动与噪声的产生过程见图4。当电抗器通以交流电流时,线圈在交变磁场作用下持续受到电磁力作用,从而引起包封振动,带动周围空气振动并对外辐射出噪声。此过程使得电抗器的振动与噪声分量与电磁力分量相一致^[12]。

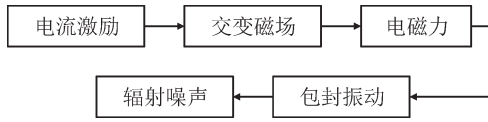


图4 电抗器振动与噪声产生过程

Fig. 4 Vibration and noise generation process of the reactor

不考虑振动状态下电抗器线圈位置的变化,根据电磁感应原理,电抗器产生的磁感应强度与其流过的电流成正比;结合安培定律可得,线圈中所承受的电磁力与电流的平方成正比^[16]

$$F \propto B \times I \propto I^2 \quad (1)$$

式(1)中: F 为线圈所受电磁力; B 为线圈中的磁感应强度; I 为线圈中流过的电流。

2.2 电抗器振动与噪声计算方法

2.2.1 模态计算方法

电抗器在电流激励下的振动受其模态特性的影响,当电磁力频率接近固有频率时,会导致电抗器发生共振,且振动分布与对应的模态振型相似^[16]。通过模态分析可以确定电抗器的固有频率、振型和阻尼比,为结构设计过程中的振动分析、结构优化及振动故障诊断等提供依据^[17]。

结构动力学运动方程为

$$[M]\{u''\} + [C]\{u'\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (2)$$

式(2)中: $[M]$ 为质量矩阵; $[C]$ 为阻尼矩阵; $[K]$ 为刚度矩阵; $\{F\}$ 为力矢量; $\{u''\}$ 为加速度矢量; $\{u'\}$ 为速度矢量; $\{u\}$ 为位移矢量。

在计算电抗器固有频率时,由于固有频率只与质量和刚度两个因素有关,且电抗器无阻尼自由振动为简谐振动,此时 $[C]=0$ 、 $\{F\}=0$,假设位移函数为 $\{u\}=\{z\}\sin(\omega t)$,代入式(2)可得电抗器无阻尼作用自由振动的特征方程

$$([K] - \omega^2[M])\{z\} = 0 \quad (3)$$

通过求解式(3),可以得到特征值 ω_j 及对应的特征向量 $\{z_j\}$ 。其中,特征值 ω_j 为 j 阶模态的固有频率,特征向量 $\{z_j\}$ 为该阶模态的振型。

2.2.2 电磁力计算方法

当加载单频电流 $i_1(t) = I_1 \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1)$ 时,线

圈所受的电磁力为^[18]

$$F = Ki_1^2(t) = \frac{K}{2} I_1^2 [1 - \cos(2\pi \cdot 2f_1 t + 2\varphi_1)] \quad (4)$$

式(4)中, K 为比例系数。

由式(4)可见,线圈所受电磁力的频率为激励电流频率的2倍。

当同时加载两个不同频率的谐波电流 $i_1(t) = I_1 \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1)$ 、 $i_2(t) = I_2 \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2)$ 时,线圈所受的电磁力为

$$F = K[i_1(t) + i_2(t)]^2 = \frac{K}{2} I_1^2 [1 - \cos(2\pi \cdot 2f_1 t + 2\varphi_1)] + \frac{K}{2} I_2^2 [1 - \cos(2\pi \cdot 2f_2 t + 2\varphi_2)] + KI_1 I_2 \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)] - KI_1 I_2 \cos[2\pi(f_1 + f_2)t + (\varphi_1 + \varphi_2)] \quad (5)$$

由式(5)可见,电磁力频谱中不仅包含了激励电流频率的二倍频分量 $2f_1$ 和 $2f_2$,也包含了激励电流频率的和频 $f_1 + f_2$ 与差频 $f_1 - f_2$ 。

2.2.3 振动计算方法

在电抗器受力计算的基础上,将电磁力映射到结构网格中进行振动计算。对于多频电流激励下的振动,可先利用Fourier级数展开对不同频率下的谐响应进行分析,再根据线性叠加原理解总响应。对于式(2),假设 $F = F_0 \sin(\omega t)$,进而求得位移和加速度分别为 $u = \beta F_0 \sin(\omega t/k)$ 、 $u'' = -\beta \omega^2 F_0 \sin(\omega t/k)$,其中 k 为刚度系数。放大系数 β 可表示为

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_j)^2]^2 + [2\zeta(\omega/\omega_j)]^2}} \quad (6)$$

式(6)中, ζ 为振动模态的阻尼比。

2.2.4 噪声计算方法

电抗器的包封振动通过周围空气或结构部件等介质向外辐射传递,成为由空气传播的可听噪声^[19]。

由Navier-Stokes方程推导得到声波方程,即空气的振动方程为

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = 0 \quad (7)$$

式(7)中: c 为声音在空气中的传播速度; p 为声压。

通过线性声波方程描述声压的变化和振动速度之间的关系^[17]

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = -\nabla p \quad (8)$$

式(8)中: ρ_0 为空气密度; v 为振动速度。

辐射的声功率由式(9)进行计算^[20]

$$W = \rho_0 c A_w \sigma v^2 \quad (9)$$

式(9)中: ρ_0 为空气密度; A_w 为声音辐射面的

面积; σ 为辐射效率。

3 仿真结果分析与实验

3.1 磁场与电流分布仿真

工频额定电流下电抗器的空间磁场分布仿真结果见图5。

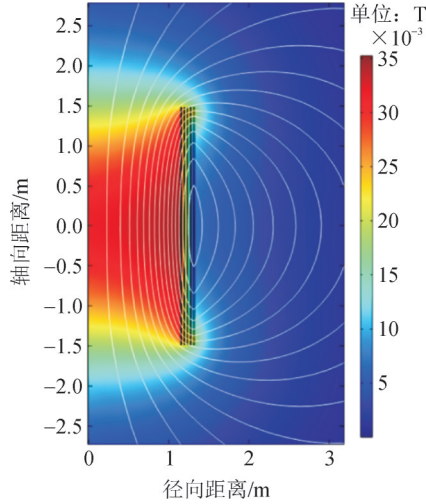


图5 电抗器空间磁场分布

Fig. 5 Spatial magnetic field distribution of reactor

由图5可见,电抗器的空间磁场整体呈上下对称分布,线圈端部磁场均较发散,最内层线圈中部磁场较为集中。对比仿真与实测得到的各包封电流见表3。

表3 仿真与实测电流结果对比

Table 3 Comparison between simulation and measured current results

| 包封序号 | 实测电流幅值/A | 仿真电流幅值/A | 误差/% |
|------|----------|----------|-------|
| 1 | 96.532 | 92.102 | -4.59 |
| 2 | 65.467 | 67.190 | 2.63 |
| 3 | 68.302 | 70.000 | 2.49 |
| 4 | 92.680 | 95.658 | 3.21 |
| 5 | 161.243 | 158.863 | -1.48 |

由表3可见,仿真与实测得到的各包封电流误差均在5%以内,表明所建立的场—路耦合模型准确可靠。

3.2 电磁力分布仿真

由于电抗器的电磁力呈上下对称分布,故可选取其上半场域进行分析^[14,21],工频额定电流下电抗器的电磁力分布仿真结果见图6。

将电抗器包封上的电磁力分解为轴向和径向两个分量。由图6可见,各包封电磁力的轴向分量

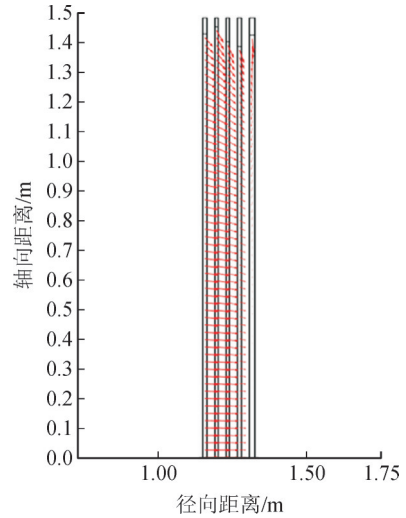


图6 电抗器上半场域电磁力分布

Fig. 6 Electromagnetic force distribution in the upper half of reactor

均指向电抗器中部,越接近中部其轴向分量越小;最外侧包封电磁力的径向分量方向与内部4个包封相反,即指向电抗器内侧。总体而言,电磁力分布趋向于沿径向向外扩展、沿轴向向内挤压电抗器。

具体地,以第5包封为例,选取包封上下中心点为高度零点,将电抗器自上而下划分为8个区间,其外侧所受电磁力径向及轴向分量见图7(a)、(b)。其中,设置指向电抗器外部为径向正方向,竖直向上为轴向正方向。

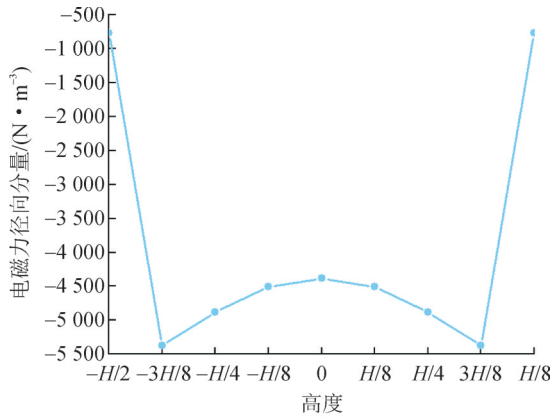
由图7可见,包封5外侧所受电磁力径向分量从包封端部至中部先增大后减小;其轴向分量在包封上下两端部最大,在包封中部最小,约等于0。

3.3 噪声分布实验与仿真

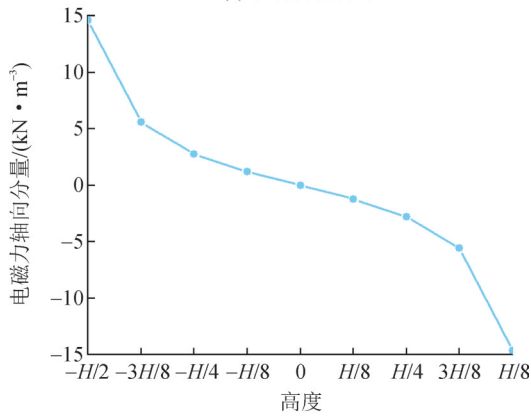
实验中所采用的噪声测量系统一般由可控谐波电源、中频变压器、电流传感器、声压传感器、数据采集与分析装置组成,实验现场见图8。

实验和仿真中所加载各次谐波电流的频率和幅值见表4。

实际测量时,测点布置在电抗器沿轴向1/3 H和2/3 H距外表面3 m的轮廓线上,各测点之间相距1 m,共计42个测点,见图9。实测结果表明,沿电抗器外表面轮廓线一周的噪声呈现出周期分布的特征,且相邻测点间测得的噪声声压级相差不超过5 dB,故选取两个高度下仿真与实验测得的平均A计权声压级进行比较。



(a) 径向分量分布



(b) 轴向分量分布

图7 封装5电磁力分布

Fig. 7 Electromagnetic force distribution of encapsulation 5

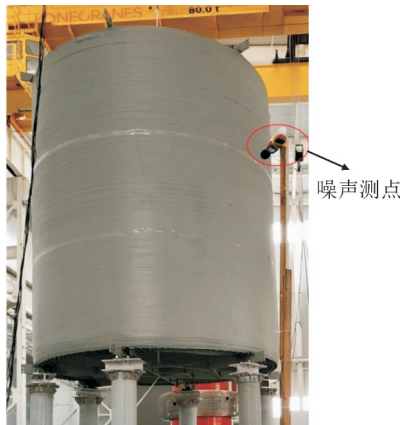


图8 电抗器噪声测量实验

Fig. 8 Experiment on noise measurement of reactor

表4 噪声实验和仿真加载电流

Table 4 Loading current for noise experiment and simulation

| 谐波次数 | 电流幅值/A | 等效电流频率/Hz | 声波频率/Hz |
|------|--------|-----------|---------|
| 1 | 128 | 50 | 100 |
| 5 | 226 | 250 | 500 |
| 6 | 226 | 300 | 600 |
| 11 | 200 | 550 | 1 100 |

根据实验中电抗器摆放的高度,地面对声场的影响不可忽略,故在仿真中添加“对称/无限硬声场边界”来模拟地面对声音的反射和吸收效果。仿真

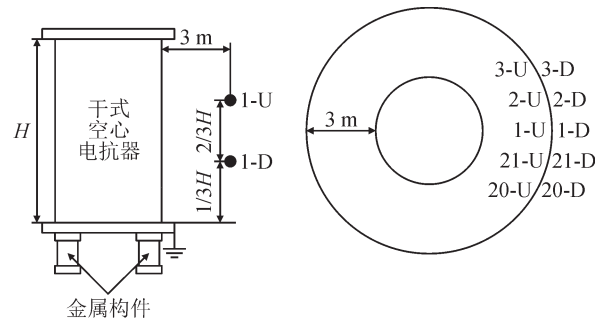


图9 电抗器周向测点布置图

Fig. 9 Layout diagram for circumferential measuring points of reactor

与实测噪声结果对比见表5,其中,实测结果为去除环境背景噪声干扰的平均A计权声压级。

表5 仿真与实测噪声结果对比

Table 5 Comparison between simulation and measured noise results

| 谐波次数 | 测点高度 | 各测点实测声压级/dB | 各测点仿真声压级/dB | 误差/% |
|------|-------|-------------|-------------|-------|
| 1 | 2/3 H | 38.265 | 38.349 | 0.22 |
| | 1/3 H | 38.580 | 38.391 | -0.49 |
| 5 | 2/3 H | 75.451 | 75.505 | 0.07 |
| | 1/3 H | 75.472 | 75.888 | 0.55 |
| 6 | 2/3 H | 78.493 | 78.183 | -0.39 |
| | 1/3 H | 78.279 | 78.924 | 0.82 |
| 11 | 2/3 H | 78.614 | 81.339 | 3.47 |
| | 1/3 H | 78.687 | 78.307 | -0.48 |

由表5可见,仿真与实测得到的各点各次谐波电流下的噪声声压级误差均在5%以内,表明仿真结果与实际电抗器外部噪声分布具有较好的一致性。

3.4 不同隔声罩结构隔声效果仿真

工程上主要从降低噪声源噪声和阻隔噪声传播途径两方面出发,对电抗器噪声进行控制^[22-23]。其中,隔声罩是一种罩形壳体结构,其作用是将噪声源封闭隔离起来,以减小向周围环境辐射噪声,因其技术措施简单、投资少、隔声效果好等优点得到了广泛应用^[24]。

在隔声罩实际装设过程中,其应与电抗器保持一定距离,各内壁面与电抗器的空间距离不得小于100 mm,以免引起耦合共振,使隔声量下降^[25]。隔声罩罩壁的结构层次见图10。

在软件中,通过“多孔弹性波”模块和“阻尼”边界条件对隔声罩结构进行仿真。其中,吸声材料对中高频吸声效果较好,低频吸声效果较差,其厚度为入射声波1/4波长时,在该频率下具有最好的吸声效果,但这也使得材料厚度需大于200 mm^[26]。因此,实际过程中很难通过加大吸声材料厚度来改善隔声罩的隔声效果。文中创新性地提出在吸声材

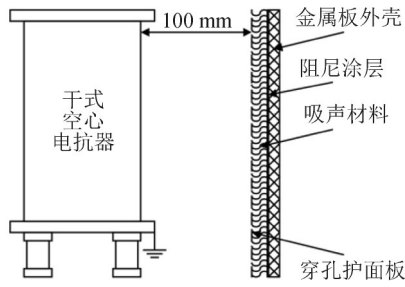


图10 隔声罩罩壁结构层次

Fig. 10 Structure level of sound insulation cover wall

料和金属板外壳之间添加一空腔结构,使得整体的吸声性能与空腔内填满相同吸声材料的效果相同,起到增加吸声材料的有效厚度、改善低频吸声性能的作用。仿真中所用隔声罩的结构参数见表6。

表6 隔声罩结构参数

Table 6 Structural parameters of sound insulation cover

| 结构参数 | 数值 | 结构参数 | 数值 |
|----------|-------|-----------|----|
| 隔声罩外径/mm | 3 698 | 空腔厚度/mm | 70 |
| 隔声罩高度/mm | 7 080 | 吸声材料厚度/mm | 50 |
| 金属板厚度/mm | 4 | | |

以电抗器加载5次谐波电流为例,电抗器添加不同隔声罩结构前后的噪声分布仿真结果见图11,为方便观测,选取1/16模型进行绘制。

实测过程中,常用插入损失 IL 来衡量隔声罩的降噪效果。其定义为安装隔声罩前后,在相同条件下,罩外离电抗器一定距离的某测点测得的声压级之差^[27]

$$IL = L_p - L_p' \quad (10)$$

式(10)中: L_p 为隔声罩安装前测得的声压级; L_p' 为隔声罩安装后在同一测点处测得的声压级。

两个测点添加不同隔声罩结构前后的声压级和插入损失 IL 仿真结果见表7。

由表7可见,单独采用金属板或吸声材料的隔

表7 添加不同隔声罩结构前后测点噪声对比

Table 7 Comparison of measuring point noise before and after adding different structures of sound insulation cover

| 测点 | 未添加隔声罩/dB | 添加隔声罩(金属板)/dB | 插入损失 IL /dB | 添加隔声罩(吸声材料)/dB | 插入损失 IL /dB | 添加隔声罩(金属板+吸声材料)/dB | 插入损失 IL /dB | 添加隔声罩(金属板+空腔+吸声材料)/dB | 插入损失 IL /dB |
|------|-----------|---------------|---------------|----------------|---------------|--------------------|---------------|-----------------------|---------------|
| 2H/3 | 75.505 | 69.576 | 5.929 | 62.990 | 12.515 | 58.108 | 17.397 | 62.613 | 12.892 |
| H/3 | 75.888 | 65.144 | 10.744 | 65.837 | 10.051 | 60.749 | 15.139 | 51.045 | 24.843 |

同时,隔声罩在实际装设时考虑了电抗器的对流和辐射散热,其与电抗器本体之间留有足够的空间距离,且仿真验证添加隔声罩前后,电抗器周围温度未见明显升高,具有一定的工程应用价值。

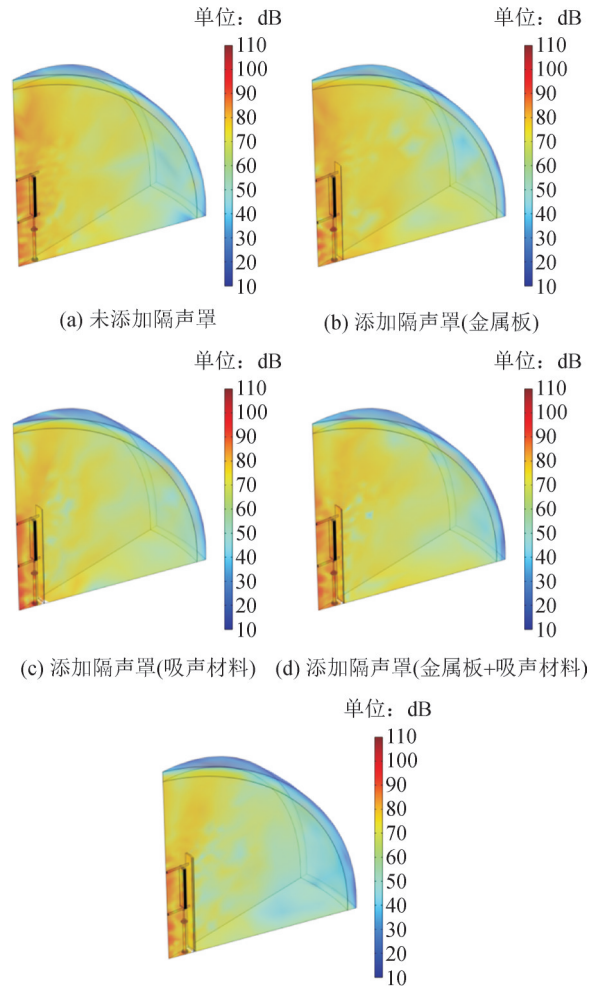


图11 添加不同隔声罩结构前后噪声分布

Fig. 11 Noise distribution before and after adding different structures of sound insulation cover

声罩结构,其测点仿真得到的隔声效果较差,通过采用二者结合并添加空腔的结构可以有效改善这一问题。因此,实际工程中建议采用金属板、空腔、吸声材料相组合的隔声罩结构对电抗器进行降噪处理。

4 结论

文中结合理论分析、有限元仿真和实验验证对干式空心电抗器的振动和噪声特性开展了研究,主

要结论如下:

1)干式空心电抗器的振动和噪声频率为各激励电流频率的二倍频分量及各激励电流频率之间的和频和差频。

2)工频额定电流下,电抗器的磁场整体呈上下对称分布,线圈端部磁场均较发散,最内层线圈中部磁场较为集中;各包封的电磁力分布趋向于沿径向向外扩展、沿轴向向内挤压电抗器;包封外侧所受电磁力径向分量从包封端部至中部先增大后减小,轴向分量在包封上下两端部最大,在包封中部最小。

3)隔声罩能够将噪声更多地集中在电抗器内部,并将一部分声能转化为热能,以减小向周围环境辐射的噪声;通过采用金属板、空腔、吸声材料相组合的结构,可以有效改善隔声罩的降噪效果。

参考文献:

- [1] 陈东明,王建伟,商力新,等. 35 kV 并联干式电抗器故障缺陷分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(4): 79-85.
CHEN Dongming, WANG Jianwei, SHANG Lixin, et al. Fault analysis of 35 kV shunt dry-type reactor. [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(4): 79-85.
- [2] 穆海宝,有晓宇,董勤晓,等. 35 kV 干式空心电抗器匝间绝缘热-机联合损伤分析[J]. 西安工程大学学报, 2017, 31(2): 271-277.
MU Haibao, YOU Xiaoyu, DONG Qinxiao, et al. Thermal-mechanical combined damage analysis of 35 kV dry-type air-core reactor inter-turn insulation[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2017, 31(2): 271-277.
- [3] 金亮,杨承晓. 基于参数辨识的干式空心电抗器波过程计算及绝缘设计[J/OL]. 电瓷避雷器: 1-13[2025-10-18]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1129.TM.20250703.1041.002>.
JIN Liang, YANG Chengxiao. Calculation of dry air-core reactor wave process and insulation design based on parameter identification[J/OL]. Insulators and Surge Arresters: 1-13[2025-10-18]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1129.TM.20250703.1041.002>.
- [4] 李威,潘志敏,戴昀翔,等. 基于磁阻效应的干式空心电抗器匝间短路磁场检测研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(3): 36-44.
LI Wei, PAN Zhimin, DAI Yunxiang, et al. Research on magnetic field detection of inter-turn short circuit of dry-type air-core reactor based on reluctance effect[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(3): 36-44.
- [5] 李维鹏,武士龙,褚微,等. 干式空心电抗器汇流排的设计研究[J]. 变压器, 2024, 61(6): 16-21.
LI Weipeng, WU Shilong, CHU Wei, et al. Design and research of dry-type air-core reactor busbar[J]. Transformer, 2024, 61(6): 16-21.
- [6] 王智弘,李威,尹旭,等. 基于相位差变化的干式空心电抗器匝间短路故障监测研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(4): 71-78.
WANG Zhihong, LI Wei, YIN Xu, et al. Study on inter-turn short

- circuit fault monitoring of dry-type air-core reactor based on phase difference change[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(4): 71-78.
- [7] 陈栋,王丽君,刘飞,等. 干式空心滤波电抗器降噪技术研究及实施[J]. 声学技术, 2021, 40(4): 545-549.
CHEN Dong, WANG Lijun, LIU Fei, et al. Research and implementation of noise reduction techniques for dry type hollow filter reactors[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(4): 545-549.
- [8] 汲胜昌,李金宇,伍小生,等. 换流站交流滤波电容器振动与噪声研究综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1159-1167.
JI Shengchang, LI Jinyu, WU Xiaosheng, et al. Review of vibration and audible noise of AC filter capacitors in converter stations[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1159-1167.
- [9] 李志远,黄国兴,黄莹,等. 换流站滤波电容器可听噪声的测试与特性研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(4): 35-39.
LI Zhiyuan, HUANG Guoxing, HUANG Ying, et al. Test and characteristic study on audible noise of filter capacitor at converter station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(4): 35-39.
- [10] GNING P, LANFRANCHI V, DAUCHEZ N, et al. Multiphysics model for predicting the sound radiation of a single-layer air-core coil[J]. Applied Acoustics, 2019(146): 327-333.
- [11] LILLEN J L. Acoustic noise generated by air power reactor in open-air substation[J]. European Transactions on Electrical Power, 2006, 16(3): 297-310.
- [12] 张嵩阳,祝令瑜,汲胜昌,等. 基于频响函数干式空心电抗器噪声预估方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(6): 71-77.
ZHANG Songyang, ZHU Lingyu, JI Shengchang, et al. Noise predicting method of dry-type air-core reactor based on the frequency-response function[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(6): 71-77.
- [13] 陆居志,李健,汲胜昌,等. 干式空心电抗器噪声等效电流测试方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(1): 77-85.
LU Juzhi, LI Jian, JI Shengchang, et al. Study on equivalent current test method of noise of dry-type air-core reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(1): 77-85.
- [14] 刘宏,梁基重,牛曙,等. 匝间短路故障下干式空心电抗器电动力仿真研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(6): 61-68.
LIU Hong, LIANG Jizhong, NIU Shu, et al. Study on simulation of electrodynamic force in dry-type air-core reactor under interturn short circuit fault[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(6): 61-68.
- [15] FIORENTIN T A, LOPES L F L, SILVA O M, et al. Vibroacoustic models of air-core reactors[J]. The International Journal of Acoustics and Vibration, 2016, 21(4): 453-461.
- [16] 高璐,汲胜昌,祝令瑜,等. 高压换流站干式空心电抗器的振动产生机理及影响因素研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(16): 5960-5970.
GAO Lu, JI Shengchang, ZHU Lingyu, et al. Study on vibration mechanism and impact factors of dry-type air-core reactor in HVDC converter stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 5960-5970.
- [17] 杨嘉萌. 干式空心电抗器绕组振动产生机理及抑制措施研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.

- YANG Jiameng. Study on vibration generation mechanism and suppression measures of dry - type air - core reactor[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [18] 祝令瑜, 杜一鸣, 高璐, 等. 不同频率激励下干式空心电抗器匝间绝缘缺陷振动分布特性[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3201-3209.
- ZHU Lingyu, DU Yiming, GAO Lu, et al. Vibration distribution characteristics of dry - type air - core reactor with turn - to - turn insulation defects excited by different frequencies[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3201-3209.
- [19] 傅亮. 平式平波电抗器噪声测量问题的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- FU Liang. Research on the noise measurement problems of dry-type smoothing reactor[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [20] SMEDE J, JOHANSSON C G, WINROTH O, et al. Design of HVDC converter stations with respect to audible noise requirements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(2): 747-758.
- [21] 刘宏, 梁基重, 牛曙, 等. 匝间短路故障下干式空心电抗器振动特性研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(6): 69-75.
- LIU Hong, LIANG Jizhong, NIU Shu, et al. Study on vibration characteristics of dry - type air - core reactor under interturn short circuit fault[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(6): 69-75.
- [22] 张德金, 张月华, 赵杨, 等. ± 800 kV 直流输电工程干式空心滤波电抗器降噪措施研究[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 139-143.
- ZHANG Dejin, ZHANG Yuehua, ZHAO Yang, et al. Novel noise reduction device for dry-type air-core filter reactors in the ± 800 kV UHVDC transmission project[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 139-143.
- [23] 沈加曙. 电力电抗器的隔声设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- SHEN Jiashu. Research on acoustical enclosure design of reactors [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008.
- [24] 张林, 孙刚, 沈加曙, 等. 电抗器隔声罩设计和试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(12): 1352-1355.
- ZHANG Lin, SUN Gang, SHEN Jiashu, et al. Design and experimental study of acoustical enclosure for reactor[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(12): 1352-1355.
- [25] 张弛. 噪声控制中的隔声罩设计[J]. 噪声与振动控制, 1999, 19(2): 46-47.
- ZHANG Chi. Design of sound insulation cover in noise control[J]. Noise and Vibration Control, 1999, 19(2): 46-47.
- [26] 贺启环. 环境噪声控制工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- HE Qihuan. Environmental noise control engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [27] 倪园, 张建功, 周兵, 等. 并联电抗器隔声罩隔声性能测试及分析[J]. 高压电器, 2021, 57(2): 77-83.
- NI Yuan, ZHANG Jianguo, ZHOU Bing, et al. Test and analysis of sound insulation performance of sound insulation cover for UHV shunt reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 77-83.
- 王悦阳(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为干式空心电抗器的振动噪声特性及其减振降噪措施(E-mail: wangyueyang1998@stu.xjtu.edu.cn).
- 赵彦珍(1967—), 女, 博士, 教授, 从事电路和电磁场方面的教学和科学研究工作, 主要研究方向为工程电磁场数值计算和软件技术(通信作者)(E-mail: zhaoyzh@mail.xjtu.edu.cn).
- (上接第 123 页)
- 联主动均流[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 2068-2080.
- ZENG Zheng, SHAO Weihua, HU Borong, et al. Active current sharing of paralleled SiC MOSFETs by coupling inductors[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 2068-2080.
- [20] 余前军, 李自淳, 钱厚军, 等. 励磁整流柜高性能均流磁环[J]. 大电机技术, 2009(3): 48-50.
- YU Qianjun, LI Zichun, QIAN Houjun, et al. Flux diverter with high performance for exciting commutator[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2009(3): 48-50.
- [21] 曾嵘, 赵彪, 余占清, 等. IGCT 在直流电网中的应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4307-4317.
- ZENG Rong, ZHAO Biao, YU Zhanqing, et al. Development and prospect of IGCT power device in DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4307-4317.
- [22] 周文鹏, 曾嵘, 赵彪, 等. 大容量全控型压接式 IGBT 和 IGCT 器件对比分析: 原理、结构、特性和应用[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2940-2957.
- ZHOU Wenpeng, ZENG Rong, ZHAO Biao, et al. Comparative analysis of large-capacity fully controlled crimped IGBT and IGCT devices: Principle, structure, characteristics and applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2940-2957.
- [23] 杨斌, 王文栋. 发电厂励磁功率柜均流因素分析及处理[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 199-202.
- YANG Bin, WANG Wendong. Analysis and treatment of excitation power cabinet current sharing factors in power plants[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 199-202.
- [24] 胡俊轩. 励磁系统功率柜均流系数低的原因及对策——以大唐彬长发电有限责任公司为例[J]. 山西科技, 2017, 32(1): 155-157.
- HU Junxuan. Causes for and countermeasures of the low flow of the even coefficient of the power cabinets of excitation system-taking binchang power Generation Co., Ltd. of datang group as an example [J]. Shanxi Science and Technology, 2017, 32(1): 155-157.
- [25] 刘翔宇, 董正坤. 机组励磁系统不均流原因分析及对策[J]. 河北电力技术, 2011, 30(1): 40-42.
- LIU Xiangyu, DONG Zhengkun. Cause analysis and treatment on excitation system unbalancing current[J]. Hebei Electric Power, 2011, 30(1): 40-42.
- [26] 赵彪, 崔彬, 马己青, 等. 基于 IGCT-Plus 和中频隔离的大容量直流变压器[J]. 中国电机工程报, 2023, 43(3): 1114-1123.
- ZHAO Biao, CUI Bin, MA Yiqing, et al. High-power DC transformer based on IGCT-Plus and medium-frequency isolation[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 1114-1123.
- 韩迪(1992—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事电力电子产品相关技术研究(E-mail: joseph123567@163.com).
- 刘世钊(1995—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事电抗器特高压产品研究(通信作者)(E-mail: 812631349@qq.com).