

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.05.020

铁基软磁材料电抗器噪声特性

张子希, 汲胜昌, 张玉焜, 柳树青, 高璐, 张凡

(西安交通大学(电工材料电气绝缘全国重点实验室), 陕西 西安 710049)

摘要:铁基软磁复合材料具有高磁导率、高磁感应强度、低铁损的特性,研究该材料为铁心的电抗器的振动噪声特性对电抗器减振降噪设计具有重要意义。文中基于有限元仿真模型,通过磁场-结构-声学多物理场耦合,对正常运行条件下电抗器的振动与噪声分布进行计算分析,并搭建电抗器噪声测量系统,分别测量硅钢铁心、混合铁心和铁基软磁铁心电抗器的噪声信号,进行试验验证。结果表明:混合铁心和铁基软磁铁心电抗器噪声明显低于硅钢铁心电抗器,混合铁心电抗器受电流变化影响最小。仿真数据显示,硅钢铁心电抗器磁致伸缩与麦克斯韦力噪声比值为1.15,磁致伸缩占比最大。铁基软磁铁心电抗器噪声小的主要原因是磁致伸缩效应小至可以忽略。

关键词:三相干式电抗器;铁基软磁复合材料;噪声机理;磁致伸缩;多物理场耦合;有限元

中图分类号: TM472

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)05-0199-09

0 引言

干式铁心电抗器主要用于补偿高压侧、远距离输电线路和变电站中低压侧的电容电流,维持电压稳定^[1-2]。为了避免电容电流过大在电网中造成过电压,并导致电抗器绝缘缺陷^[3],目前城市配电网广泛采用电抗器进行无功补偿,以减少电力系统的绝缘要求和投资。传统硅钢铁心电抗器噪声大、传播距离远,噪声引发的扰民问题愈发受到重视^[4]。

围绕干式铁心电抗器的振动噪声控制,国内学者开展了大量研究。文献[5]提出在悬空底座采用千斤顶进行临时支撑,用混凝土完全浇注,从而将侧面振动有效转移至底部;文献[6-7]提出了声源控制法和隔声罩法,建议在隔声罩内采用100 Hz频率的吸声材料,减少100 Hz噪声的干涉现象。但上述隔声装置容易引起电抗器整体散热困难,使内部绝缘老化、寿命缩减^[8]。

为了研究电抗器振动噪声特性,更准确地测量振动噪声数据,文献[9-10]合理选择测点,采用激光多普勒测振仪等仪器,建立电抗器振动噪声测量平台;文献[11]通过试验测量了3台特高压电抗器振动和噪声,对比分析了振动噪声的频谱特性,但未对其机理进行深入研究。

文献[12]基于多物理场耦合研究了电抗器铁心振动噪声机理;文献[13]采用有限元软件,分析了干式变压器振动信号分布特征;文献[14]仿真分析不同激励电压下并联电抗器铁心振动,发现磁通

密度影响噪声分布;为此,文献[15]提出一种基于电致发光效应的方法,更准确地以非接触式方法测量表面场强分布和畸变情况。

文献[16]进一步研究了不同弹性模量的气隙垫块对并联电抗器铁心振动的影响,指出麦克斯韦力、铁心磁致伸缩效应与绕组受力是无气隙垫块并联电抗器铁心振动的主要原因,对于气隙垫块则是弹性模量越大,振动抑制效果越好;文献[17]进一步研究了气隙结构的影响,指出并联电抗器铁心振动与气隙个数和气隙位置关系密切;文献[18]提出了适当增加每层气隙垫块总面积的抑制铁心振动的措施。由于电抗器铁心的磁致伸缩效应和漏磁现象不可避免,高压大容量并联电抗器的气隙结构的调整余地不大,且存在工程实际困难,所以上述措施的减振降噪效果并不明显。

文献[19]发现铁基软磁复合材料的磁致伸缩系数和磁晶各向异性均小于 10^{-7} ,指出了此类材料的优点和潜在应用前景;随后,文献[20]采用磁致伸缩系数与损耗均较小的铁基软磁复合材料制作铁心电抗器,实测噪声水平低于50 dB(A)。铁基软磁复合材料的应用能够大大降低电抗器噪声,应用前景广阔,但目前仅仅是从低磁致伸缩系数的角度研制出了试品,还未对其振动噪声特性、仿真计算方法以及麦克斯韦力的影响等方面开展更深入研究,也缺乏与其他类型铁心电抗器的对比分析。

文中搭建电抗器振动噪声试验平台,以铁心分别为硅钢、铁基软磁、硅钢-铁基软磁混合材料的3台三相干式电抗器为研究对象,测量分析各电抗器的振动噪声特性,建立电抗器振动噪声有限元仿真模型,对铁心及绕组进行磁场-结构-声学多物理场

收稿日期:2024-01-04;修回日期:2024-03-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52007145);陕西省重点研发计划资助项目(2022GXLH-01-30)

耦合,仿真计算电抗器的磁场、振动位移与加速度、声压级分布等。从试验和仿真两方面,研究铁基软磁铁心电抗器的噪声特性及分布,分析其降噪机理,并对比验证电抗器铁心不同位置采用铁基软磁材料时的降噪效果。

1 电抗器振动噪声产生机理

1.1 电抗器结构与参数

文中电抗器为三相干式电抗器,铁心结构如图1所示。

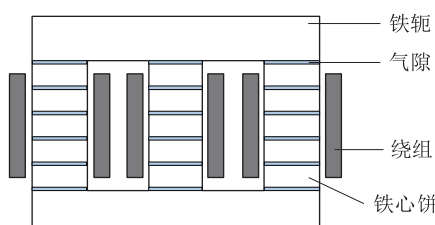


图1 铁心结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the core structure

铁基软磁复合材料是指对磁性颗粒进行绝缘包覆处理的一种复合材料,微观结构如图2所示。

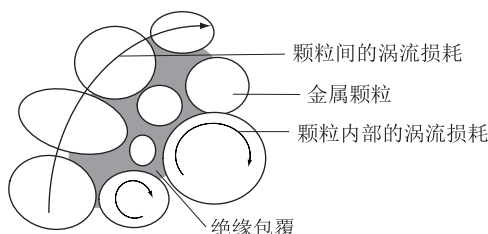


图2 铁基软磁复合材料微观结构与内部涡流

Fig.2 Micro structure and internal eddy currents of iron based soft magnetic composites

文中铁基软磁复合材料选用的是气雾化铁硅原粉,其中硅的质量百分比为6.5%,在原粉中加入占金属磁粉质量0.5%~1.5%的0.01 g/mL磷酸、2%~5%的MgO粉末制备绝缘包覆。文献[21]表明,在6.5%硅含量下,铁心的磁致伸缩系数最小,磁致伸缩系数和各向异性皆小于 10^{-7} ,同时具有低铁损、高磁导率和高磁感应强度的优良特性。

文中,混合铁心上下铁轭采用硅钢片,铁心柱为铁基软磁材料条块叠成。铁基软磁电抗器铁心全部采用铁基软磁材料条块粘接组合而成。表1为3台电抗器的主要参数。由于铁基软磁材料相对磁导率较低,为了维持3台电抗器电感量一致,铁基软磁材料电抗器磁路的磁通面积增大,绕组匝数增多。

1.2 电抗器振动噪声特性

1.2.1 磁致伸缩对铁心振动噪声的影响

磁致伸缩材料是指随着交变磁场的周期性变化,

表1 电抗器主要参数

Table 1 The main parameters of the reactors

参数	硅钢铁心	混合铁心	铁基软磁铁心
额定容量/kvar	260	260	260
额定电压/kV	10	10	10
额定电流/A	15	15	15
等效磁密/T	1.5	0.75	0.4
磁通面积/cm ²	190	336	180×2
绕组匝数	900	1 050	660×2
体积尺寸	1 200 mm×	1 450 mm×	1 330 mm×
	520 mm×	660 mm×	1 030 mm×
	1 030 mm	1 230 mm	1 030 mm
体积/m ³	0.643	1.177	1.411

尺寸大小在磁场方向上会发生显著变化的铁磁性材料。文中硅钢铁心电抗器中硅钢片的磁致伸缩率与加载电压的平方成正比,频率为电压频率的2倍^[22]。

1.2.2 麦克斯韦力对电抗器振动噪声的影响

电抗器存在气隙,任何时候都是异性磁极,相邻的铁心饼上下表面的麦克斯韦力均为吸引力^[23],大小为:

$$F_M = \frac{B^2 S}{2\mu_0} = \frac{\phi^2}{2\mu_0 S} \quad (1)$$

式中: F_M 为麦克斯韦力大小; μ_0 为真空磁导率,大小为 4×10^{-7} H/m; B 为磁通密度; S 为磁通面积; ϕ 为磁通量。

在电抗器承受角频率为 $\omega = 2\pi f$ 的交流电压时, $\phi = \phi_m \sin \omega t$, ϕ_m 为磁通量峰值。

代入式(1)中可得:

$$F_M = \frac{\phi^2}{2\mu_0 S} = \frac{\phi_m^2}{2\mu_0 S} \sin^2 \omega t = \frac{\phi_m^2}{4\mu_0 S} (1 - \cos 2\omega t) \quad (2)$$

麦克斯韦力大小随磁通密度的变化而变化,两者正相关。麦克斯韦力的频率是工频的2倍,所以,振动噪声以100 Hz为主频率。

1.2.3 洛伦兹力对电抗器振动噪声的影响

电抗器铁心均存在气隙,正常运行时会产生漏磁通。通电绕组在漏磁场中会产生洛伦兹力,引起绕组周期性的振动。一般认为绕组线饼间的绝缘垫块为弹性元件^[24]。

电抗器绕组在磁场中受洛伦兹力大小为:

$$F_L = LIB \quad (3)$$

式中: F_L 为洛伦兹力大小; L 为导线的长度; I 为电流。

已知绕组所处漏磁场与电流成正比,在工频下,瞬时电流 $i = I_m \cos \omega t$, I_m 为电流峰值。所以,绕组所受洛伦兹力大小为:

$$F_L = ki^2 = \frac{1}{2}kI_m^2(1 + \cos 2\omega t) \quad (4)$$

式中: k 为比例系数。

从式(4)中可以得出,洛伦兹力是频率的周期函数,频率是工频的2倍,绕组的振动噪声以100 Hz为主频率^[25]。

1.3 噪声传播途径

根据电抗器结构及三相铁心电抗器振动噪声产生机理,其振动噪声传播途径如图3所示。

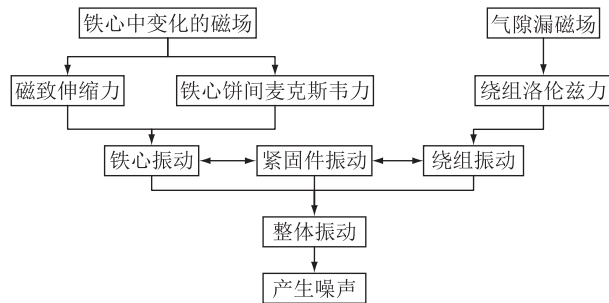


图3 三相铁心电抗器振动传递路径

Fig.3 Vibration transmission path of three-phase iron core reactor

在电抗器通电后,绕组中交变的电流在铁心中产生交变的磁场,交变的磁场产生磁致伸缩效应和麦克斯韦力,绕组线圈在漏磁场中产生洛伦兹力。这些力作用在电抗器的不同部位,引起铁心和绕组的振动,不同部位的振动又通过固定铁心的拉杆、铁心饼之间的气隙、绕组和夹件之间的螺栓和垫块相互传播和影响。固体振动进一步引起空气波动,向四周传播产生噪声。

2 电抗器振动噪声模型搭建及机理分析

2.1 多物理场仿真模块分析

文中通过磁场-结构-噪声多物理场耦合,仿真计算得到电抗器声场分布。

2.1.1 磁场模块分析

在正常工作状态下,电抗器绕组的电流在铁心中产生交变的磁场。以麦克斯韦方程组为基础,因变量为磁矢势 \mathbf{A} ,求解域方程为:

$$\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_e \quad (5)$$

式中: σ 为电导率; μ_r 为相对磁导率; \mathbf{J}_e 为绕组电流密度^[25],方向为电流方向。

磁感应强度 \mathbf{B} 和绕组电流密度大小 J_e 可以通过式(6)和式(7)得到。

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (6)$$

$$J_e = \frac{NI}{S} \quad (7)$$

式中: \mathbf{H} 为磁场强度; N 为绕组匝数。

2.1.2 结构力场模块分析

计算磁场后,添加固体力学模块,进一步计算磁场力作用下的振动加速度、振动位移、应力等,因变量为位移向量 \mathbf{u} ,其求解域方程如下:

$$\mathbf{M} \frac{d^2 \mathbf{u}}{dt^2} + \boldsymbol{\zeta} \frac{d\mathbf{u}}{dt} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F}_v \quad (8)$$

式中: \mathbf{M} 为质量矩阵; $\boldsymbol{\zeta}$ 为阻尼系数矩阵; \mathbf{K} 为刚度矩阵; \mathbf{F}_v 为体积力。

由磁场计算得到了磁致伸缩、麦克斯韦力和洛伦兹力,添加结构力学模块,磁场和结构力场相耦合,通过对应力张量 \mathbf{s} 求散度得到体积力 \mathbf{F}_v 。电抗器的固体材料均为线弹性材料,线弹性方程为:

$$\boldsymbol{\theta} = \nabla \cdot \mathbf{s} + \mathbf{F}_v \quad (9)$$

为了避免磁饱和现象,电抗器存在气隙^[26],相邻铁心饼之间产生的吸引力是麦克斯韦力^[27],以边界载荷的形式加在铁心饼上下表面,洛伦兹力以体载荷的形式加到电抗器的绕组中。

2.1.3 声场模块分析

选择压力声场模块,因变量为声压力 p 。将结构力场求得的电抗器振动加速度作为振动初始值代入到空气域中,由振动引起噪声。微分方程为:

$$\frac{1}{\rho_0 c^2} \times \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \cdot (\nabla p - \mathbf{q}) \left(-\frac{1}{\rho_0} \right) = Q \quad (10)$$

式中: Q 为单极源; \mathbf{q} 为偶极源; ρ_0 为空气密度; c 为声速。

2.2 模型建立

根据现场3台电抗器的实际尺寸,文中分别建立3台有限元仿真模型。为了兼顾计算效率和精度,硅钢铁心简化为9片硅钢片叠成,铁基软磁铁心简化为一块相对磁导率60的磁粉芯铁心。铁心底部振动位移均为0,绕组上下加约束。

由于文中实验只针对B相加载,因此只需要在B相绕组施加电流,铁基软磁铁心由于三相磁路是完全独立的,所以简化为单相磁路。3种电抗器简化模型如图4所示。

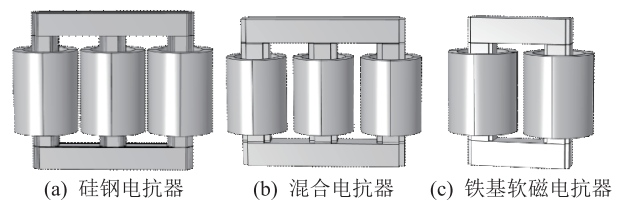


图4 三相电抗器模型

Fig.4 Three-phase reactor models

2.3 参数设定与边界条件

有限元模型中材料参数的选择和边界条件的界定直接关系到仿真是否与实际相符。文中设定如下：

(1) 磁场模块参数和求解域边界条件。硅钢铁心的相对磁导率为 7 000~10 000^[12]，铁基软磁铁心的相对磁导率为 60^[20]，铜绕组、空气、垫块和夹件的相对磁导率为 1，硅钢的饱和磁化强度为 1.56×10^6 A/m，饱和磁致伸缩常数为 3×10^{-6} ^[12]。空气域最外围是磁绝缘^[28]，满足 $n \times A = 0$ ， n 为边界法向量。三相绕组均匀多匝，激励为电流，文中实验与仿真仅对 B 相施加激励，绕组的导线截面积已知，均为 8×10^{-6} m²。

(2) 结构力场参数。环氧树脂气隙的弹性模量为 1.7×10^9 Pa，泊松比为 0.38；绕组的弹性模量为 1.26×10^{11} Pa，泊松比为 0.34，密度为 $8\ 940$ kg/m³^[29]。

(3) 声场参数。气域边界设置为完美匹配层，充当一个近乎理想的吸收体或辐射体域。

2.4 网格剖分

对电抗器模型采用自由四面体网格剖分，完美匹配层采用扫掠网格。为了计算速度和计算结果的收敛性，网格划分如图 5 所示。

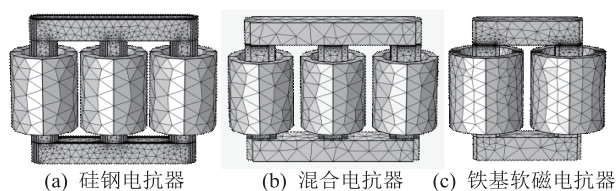


图 5 网格剖分
Fig.5 Meshing diagram

2.5 电抗器振动噪声仿真结果分析

对 3 台电抗器施加 15 A 的单相电流，仿真单相正常运行情况下的磁通密度、振动位移和加速度。

$I=15$ A 时，3 台电抗器铁心柱的磁通密度云图如图 6 所示。由图 6 可知，硅钢电抗器铁心柱磁通密度为 0.75 T，最大磁通密度在中间铁心柱与上铁轭的拐角连接处产生，为 1.14 T。混合电抗器铁心柱磁通密度为 0.46 T；铁基软磁电抗器铁心柱磁通密度为 0.3 T。

2.5.1 麦克斯韦力下的振动加速度

3 台铁心电抗器铁心柱的振动加速度大小如图 7 所示。铁心振动加速度呈对称分布，振动加速度最大值出现在 B 相绕组对应的铁心柱上。

图 8 为硅钢铁心在 X、Y、Z 方向的麦克斯韦振动加速度分量。其中，X 方向为左右径向，Y 方向为前后径向，Z 方向为轴向。

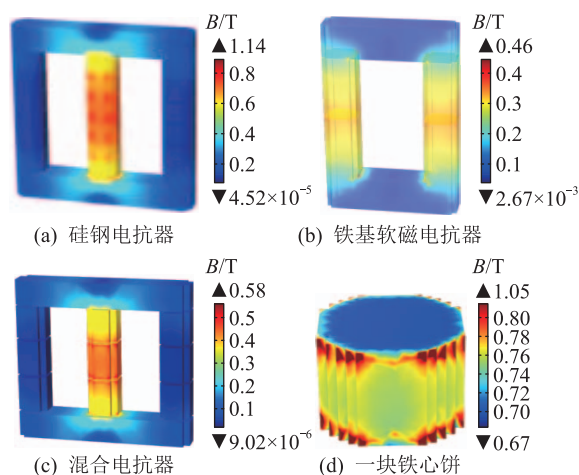


图 6 电抗器铁心磁通密度云图
Fig.6 Nephogram of magnetic flux density of reactors

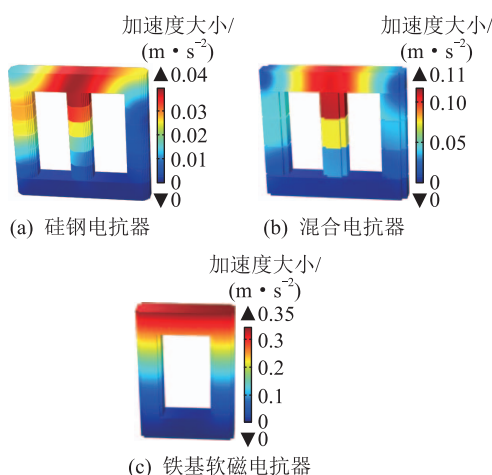


图 7 铁心振动加速度分布云图
Fig.7 Nephogram of vibration acceleration distribution of reactor cores

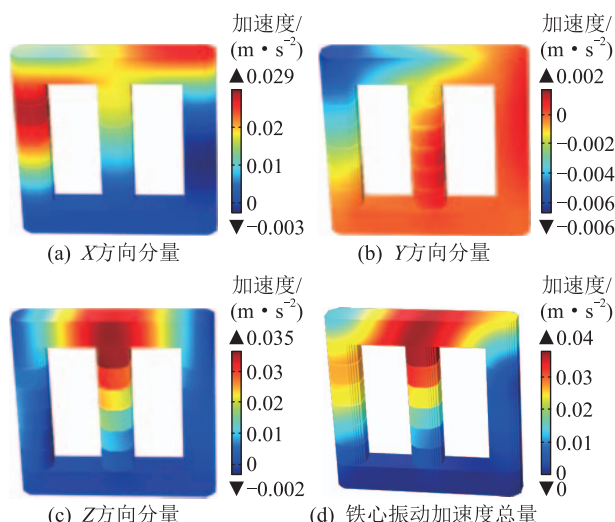


图 8 硅钢铁心麦克斯韦振动加速度云图
Fig.8 Nephogram of Maxwell vibration acceleration of silicon steel cores

由图 8 可见,铁心柱轴向振动加速度较大,最大振动位置为 B 相绕组对应的中间铁心柱顶端,加速度为 0.035 m/s^2 ,整体振动呈左右对称分布。由于铁心底部约束,所以轴向振动方向向上。Y 方向即铁心前后振动加速度最小。

经仿真分析,铁心的麦克斯韦力振动主要由通电绕组对应的铁心柱轴向振动产生。

2.5.2 电抗器铁心磁致伸缩振动加速度

因铁基软磁材料的磁致伸缩系数小于 10^{-7} ,仿真得出的振动噪声几乎为零,因此不再分析混合铁心与铁基软磁铁心电抗器磁致伸缩引起的振动,主要计算硅钢铁心磁致伸缩的情况。

硅钢铁心电抗器铁心柱的磁致伸缩振动加速度如图 9 所示。由图 9 可见,磁致伸缩振动最大值出现在上轭中间部位,最大加速度为轴向加速度 0.07 m/s^2 。

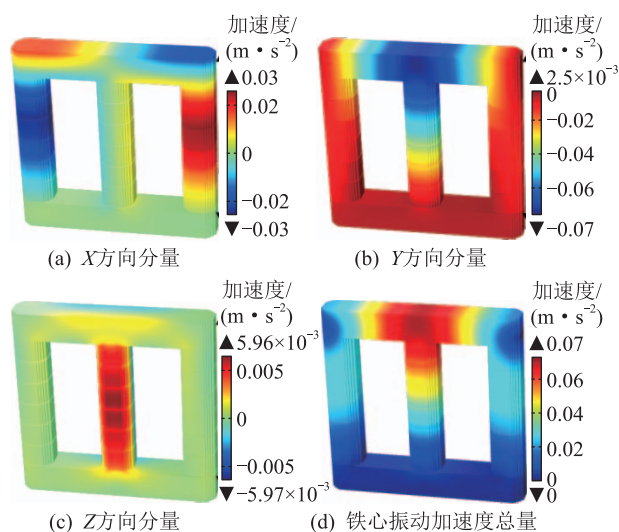


图 9 硅钢铁心磁致伸缩振动加速度云图

Fig.9 Nephogram of magnetostrictive vibration acceleration of silicon steel cores

2.5.3 电抗器绕组振动位移及振动加速度

$I=15 \text{ A}$ 时,受洛伦兹力作用,3 台电抗器绕组振动位移如图 10 所示。由图 10 可见,由于固定约束加在绕组上下两端,硅钢电抗器与混合电抗器 B 相绕组洛伦兹力振动最大位移发生在绕组中间段,且方向是向绕组外部对称振动。铁基软磁铁心电抗器 2 个 B 相绕组中间内侧振动位移最大。经仿真分析,绕组的振动主要由通电绕组的中部径向振动产生。

3 种电抗器绕组的最大振动位移分别为 1.27、1.13、1.52 nm,与铁心振动数值对比,差三个数量级。所以,洛伦兹力引起的振动很小,文中忽略洛伦兹力的影响。

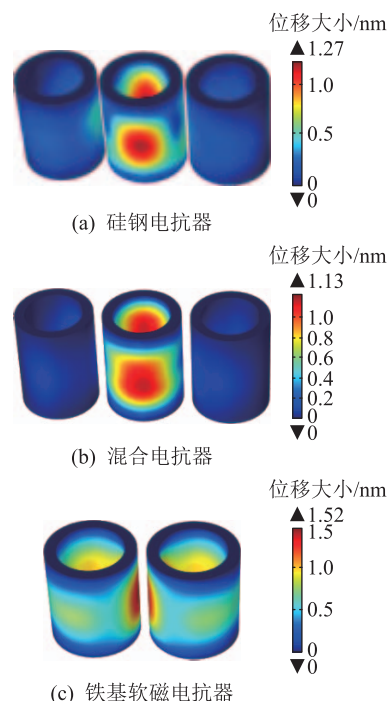


图 10 绕组洛伦兹力振动位移云图

Fig.10 Nephogram of Lorentz force vibration displacement of windings

2.5.4 电抗器声场

$I=15 \text{ A}$ 时,受磁致伸缩、麦克斯韦力的作用,硅钢电抗器噪声声压级分布如图 11 所示。

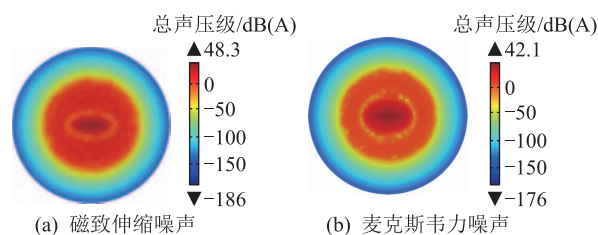


图 11 硅钢电抗器声场分布云图

Fig.11 Nephogram of sound field of silicon steel reactors

由图 11 可以看出,中间有一部分干涉现象,导致一定位置的声压级突然减小。硅钢电抗器磁致伸缩振动噪声最大值为 48.3 dB(A) ,麦克斯韦振动噪声最大值为 42.1 dB(A) 。磁致伸缩与麦克斯韦噪声声压级比值为 1.15,磁致伸缩影响较大。

$I=15 \text{ A}$ 时,硅钢电抗器在麦克斯韦力、磁致伸缩效应两种载荷共同作用下的总噪声大小与分布如图 12 所示。

铁基软磁铁心电抗器声压级分布如图 13 所示。图 13 中,混合铁心电抗器噪声声压级最大值为 53.4 dB(A) ,铁基软磁电抗器噪声为 62.3 dB(A) 。与硅钢电抗器总声压级最大值 71.4 dB(A) 相比,铁基软磁材料电抗器噪声小是因为只有麦克斯韦力振动,磁致伸缩几乎为 0。

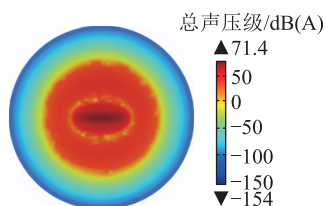


图 12 硅钢电抗器总声场分布云图

Fig.12 Nephogram of total sound field of silicon steel reactors

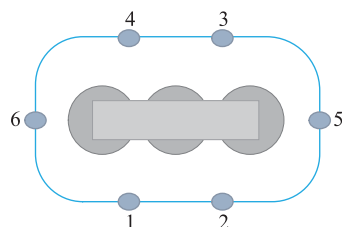


图 15 噪声测点布置示意

Fig.15 Schematic diagram of noise measurement points

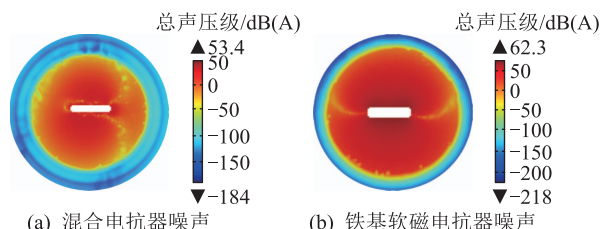


图 13 铁基软磁材料电抗器声场分布云图

Fig.13 Nephogram of sound field of powder core reactors

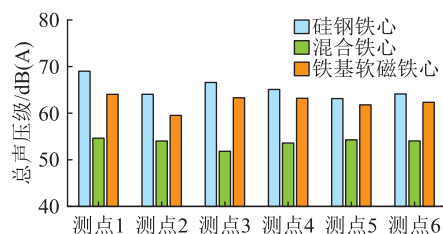


图 16 额定电流下各电抗器噪声比较

Fig.16 $I_N = 15 \text{ A}$, noise comparison of reactors

3 电抗器噪声试验平台的搭建及特性分析

3.1 电抗器的噪声测量系统及测点布置

文中电抗器噪声试验系统如图 14 所示。其中, L 为被测电抗器, R_2 为其等效电阻; C 为实验补偿电容器, R_1 为其等效串联电阻。声学传感器的量程为 16~134 dB(A), 频率范围为 20 Hz~20 kHz。考虑到电抗器噪声频率在 1 000 Hz 以下, 选择采集卡采样频率为 10 240 Hz。

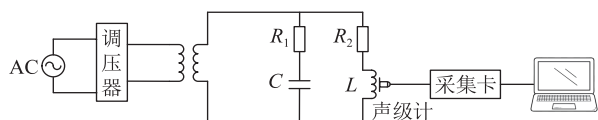


图 14 噪声试验系统

Fig.14 Noise experimental system

文中在 B 相绕组单相加载情况下测量各电抗器的噪声, 因此选择 B 相轴线附近的点进行噪声数据监测。噪声在空气中传播有衰减, 散热器也会造成干扰, 所以测点不应距离电抗器太远^[30]。

根据 GB/T 1094.10 的规定进行噪声测点布置, 噪声测点沿电抗器轮廓线距离电抗器侧 25 cm, 距离地面高度 55 cm^[31-32]。测点分布如图 15 所示。

3.2 噪声信号特性分析

加载额定电流 $I_N = 15 \text{ A}$ 时, 电抗器的噪声测量结果如图 16 所示。在相同额定运行条件下, 各测点的噪声水平如下: 硅钢铁心电抗器噪声大于铁基软磁铁心电抗器噪声, 混合铁心电抗器噪声最小。

造成上述结果的原因为: 铁基软磁复合材料的

磁致伸缩系数为 10^{-7} , 几乎为 0, 因此噪声的来源少。此外, 铁基软磁铁心和混合铁心电抗器磁通密度较小, 麦克斯韦力也较小, 总体噪声较小。

同时, 发现铁基软磁电抗器噪声各测点声压级均比混合铁心电抗器大 5 dB(A) 以上, 说明如果铁心全部采用铁基软磁复合材料的磁粉芯条块, 降噪效果反而没有混合铁心好。混合铁心电抗器经济成本较低, 降噪效果最好, 优于铁基软磁铁心电抗器。

电力系统在运行过程中, 电压难免存在波动, 导致流过电抗器的电流随之变化。为探究正常工作时电抗器噪声随电流的变化情况, 文中分别进行了 $90\%I_N$ 和 $110\%I_N$ 下的噪声测试, 并与额定电流 I_N 下的结果进行对比。各电抗器的噪声实验数据如图 17 所示。

由图 17 可知, 各测点的结果均为噪声水平随电流的增大而增大, 两者呈正相关。其中硅钢电抗器和混合电抗器的噪声水平变化较小。混合电抗器声压级变化最大值为 3.837 dB(A); 铁基软磁铁心电抗器的变化最大, 最大达 9.13 dB(A)。上述结果表明铁基软磁铁心电抗器的噪声受电流变化影响更大。因为电流为 15 A 左右时, 铁基软磁铁心还未到达磁饱和点, 而硅钢铁心更接近磁饱和。当电流从 $90\%I_N$ 增加到 $110\%I_N$ 时, 铁基软磁铁心的磁场增加更大, 引起麦克斯韦力的增加更大, 所以, 噪声声压级变化更大。

3.3 电抗器噪声水平分布特性分析

3 台电抗器 B 相加载测量噪声, 沿电抗器一周声压级水平分布如图 18 所示。

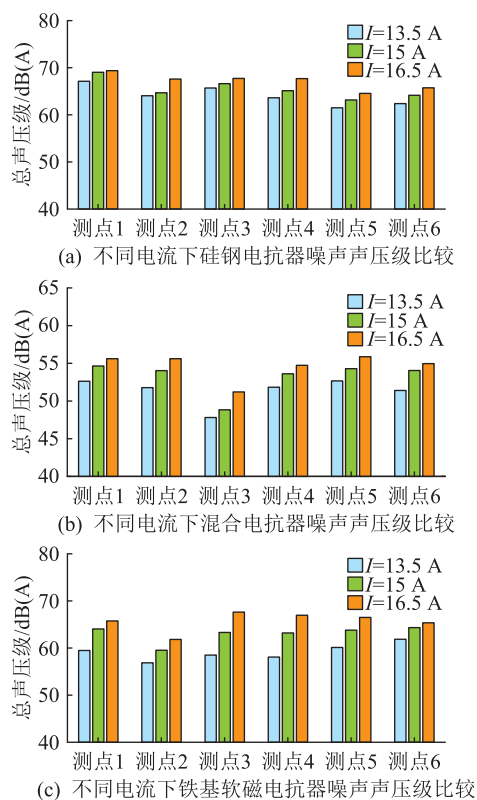


图 17 不同电流情况下电抗器噪声

Fig.17 Reactor noise at different currents

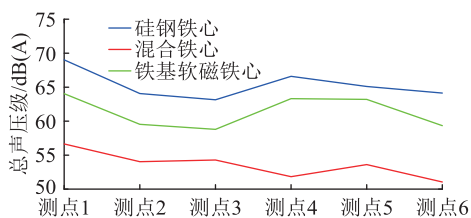


图 18 电抗器噪声水平分布情况

Fig.18 The noise level distribution of reactors

从图 18 可以看出,3 台电抗器近场噪声声压级存在一定周期性,每隔一个角度会出现一个周期性声压级峰值,测点 1 的声压级始终是所有测点中最大的。上述现象是由电抗器表面辐射声波干涉造成的。

4 结论

文中以硅钢、混合、铁基软磁铁心电抗器为试验对象,通过磁场-结构-声学多物理场耦合,仿真计算了电抗器振动及噪声的不同载荷影响占比,并通过搭建电抗器振动噪声测量系统分析其噪声特性。主要结论如下:

(1) 麦克斯韦力和磁致伸缩是造成硅钢电抗器铁心噪声的主要原因,其中磁致伸缩与麦克斯韦力引起的噪声声压级比值为 1.15。仿真发现铁基软磁材料电抗器噪声明显小于硅钢电抗器噪声。

(2) 搭建噪声试验平台,测量噪声数据,发现混合铁心电抗器噪声比硅钢铁心电抗器和铁基软磁铁心电抗器噪声小 5 dB(A) 以上,且受电流变化影响较小,电流从 90% I_N 变化到 110% I_N ,噪声仅变化 3.837 dB(A)。所以当仅有铁心柱为铁基软磁材料时,电抗器性能更好,噪音更小、更稳定。

参考文献:

- [1] 雷潇,廖文龙,白欢,等. 一起换流站直流滤波器干式电抗器过电压损坏分析[J]. 电瓷避雷器,2022(4):140-145.
LEI Xiao, LIAO Wenlong, BAI Huan, et al. Fault analysis of dry-type air-core reactor of DC filter in HVDC substation caused by overvoltage [J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(4): 140-145.
- [2] 邢超,奚鑫泽,何鑫,等. 多端直流输电系统中限流电抗器配置研究[J]. 电测与仪表,2023,60(5):72-78.
XING Chao, XI Xinze, HE Xin, et al. Research on configuration of current limiting reactor in multi-terminal HVDC system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 72-78.
- [3] 赵仲勇,陈宇,李阎君,等. 基于等效电路和温度场模型的 10 kV 干式铁芯串联电抗器故障的影响因素分析[J]. 科学技术与工程,2021,21(36):15469-15475.
ZHAO Zhongyong, CHEN Yu, LI Yanjun, et al. Analysis of influencing factors of 10 kV dry type iron core series reactor fault based on equivalent circuit and temperature field model [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(36): 15469-15475.
- [4] GAO L, JI S C, ZHU L Y, et al. Vibration and noise characteristics of air-core reactor used in HVDC converter stations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(2): 1068-1077.
- [5] 李青文. 750 kV 并联电抗器减振措施及效果分析[J]. 电力建设,2006,27(10):23-25.
LI Qingwen. Analysis on vibration-reduction measures and results of 750 kV parallel reactors [J]. Electric Power Construction, 2006, 27(10): 23-25.
- [6] 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.
- [7] ZHOU B, WANG Y Z, HU J Z, et al. Sound field characteristics and calculation method of shunt reactor [C]//2023 5th Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES). Chengdu, China. IEEE, 2023: 856-862.
- [8] 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, 6170.
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, 6170.

- [9] 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.
- [10] 张琛,熊庆,汲胜昌,等. 基于压电材料的变压器振动能量收集装置研究[J]. 电力工程技术,2021,40(6):173-178.
ZHANG Chen,XIONG Qing,JI Shengchang, et al. Vibration energy harvesting device for transformer based on piezoelectric material[J]. Electric Power Engineering Technology,2021,40(6):173-178.
- [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] 杨帆,张相杰,王鹏博,等. 特高压并联电抗器铁芯振动及噪声特征研究[J]. 高电压技术,2024,50(2):725-736.
YANG Fan,ZHANG Xiangjie,WANG Pengbo, et al. Study on the vibration and noise characteristics of the iron core in ultra-high voltage shunt reactor[J]. High Voltage Engineering,2024,50(2):725-736.
- [13] 李沂新,贾云飞,杨欣颐,等. 基于典型振动规律的干式变压器机械状态诊断[J]. 电力工程技术,2023,42(5):10-19.
LI Yixin,JIA Yunfei,YANG Xinyi, et al. Typical vibration laws based diagnostic of dry-type transformer mechanical states[J]. Electric Power Engineering Technology,2023,42(5):10-19.
- [14] 张鹏宁,李琳,程志光,等. 并联电抗器与变压器模型铁芯振动仿真与试验对比[J]. 电工技术学报,2018,33(22):5273-5281.
ZHANG Pengning,LI Lin,CHENG Zhiguang, et al. Vibration simulation and experiment comparison of shunt reactor and transformer model core[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2018,33(22):5273-5281.
- [15] 杨欣颐,贾云飞,高璐,等. 基于电致发光效应的绝缘子表面场强测量方法[J]. 高电压技术,2021,47(4):1411-1419.
YANG Xinyi,JIA Yunfei,GAO Lu, et al. Method for measuring surface electric field intensity of insulators based on electroluminescence effect[J]. High Voltage Engineering,2021,47(4):1411-1419.
- [16] 张鹏宁,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 magnetostriction and winding force[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2018,33(13):3130-3139.
- [17] 郭佳熠,耿江海,律方成,等. 基于气隙结构的特高压并联电抗器铁芯减振技术[J]. 高电压技术,2021,47(11):3892-3901.
GUO Jiayi,GENG Jianghai,LÜ Fangcheng, et al. Vibration reduction technology of UHV shunt reactor core based on air gap structure[J]. High Voltage Engineering,2021,47(11):3892-3901.
- [18] 林旗力,王延召,周兵,等. 气隙垫块布置对高压并联电抗器铁芯振动影响[J]. 变压器,2021,58(8):7-12.
LIN Qili,WANG Yanzhao,ZHOU Bing, et al. Effect of air gap pads arrangement on vibration of high voltage shunt reactor core[J]. Transformer,2021,58(8):7-12.
- [19] SHOKROLLAHI H,JANGHORBAN K. Soft magnetic composite materials (SMCs)[J]. Journal of Materials Processing Technology,2007,189:1-12.
- [20] 吴益明,吴鹏,刘红军,等. 基于低磁致伸缩磁材的低噪声电抗器研究[J]. 高压电器,2019,55(11):268-272,282.
WU Yiming,WU Peng,LIU Hongjun, et al. Research on low-noise reactors based on magnetic materials with low magnetostriction[J]. High Voltage Apparatus,2019,55(11):268-272,282.
- [21] STEINER PETROVICD,DONIK C,PAULIN I, et al. Solidification behavior of Fe-6.5Si alloy powder for AM-SLM processing, as assessed by differential scanning calorimetry[J]. Materials (Basel,Switzerland),2023,16(12):4229.
- [22] 张煦,曹辰,路敦林,等. 基于电-磁-结构多信息耦合的变压器振动特性仿真与试验[J]. 变压器,2023,60(7):51-58.
ZHANG Xu,CAO Chen,LU Dunlin, et al. Simulation and testing of transformer vibration characteristics coupling of multiple Information based on electromagnetic structure[J]. Transformer,2023,60(7):51-58.
- [23] 吴书煜,马宏忠,姜宁,等. 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[J]. 电力自动化设备,2020,40(3):122-127.
WU Shuyu,MA Hongzhong,JIANG Ning, et al. Simulation analysis and experimental research on vibration and noise of UHV shunt reactor based on multi physical field coupling[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(3):122-127.
- [24] 孟令明,高树国,丘子诚,等. 基于箱体振型特征的油浸式电抗器绕组松动识别方法[J]. 电工电能新技术,2023,42(1):58-69.
MENG Lingming,GAO Shuguo,QIU Zicheng, et al. Identification method of winding looseness of oil immersed reactor based on ODS characteristics of box[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2023,42(1):58-69.
- [25] 潘超,葛佳柔,刘天舒,等. 单相变压器首端匝间短路电磁振动特性研究[J]. 电力工程技术,2019,38(6):147-153,166.
PAN Chao,GE Jiarou,LIU Tianshu, et al. The electromagnetic vibration characteristics of the first end of single-phase transformer[J]. Electric Power Engineering Technology,2019,38(6):147-153,166.
- [26] 王革鹏,金文德,曾向阳,等. 特高压并联电抗器铁芯振动的分析与控制研究[J]. 电工技术学报,2022,37(9):2190-2198.

- WANG Gepeng, JIN Wende, ZENG Xiangyang, et al. Analysis and control research on core vibration of UHV shunt reactor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37 (9): 2190-2198.
- [27] 汲胜昌, 张凡, 师愉航, 等. 基于振动信号的电力变压器机械状态诊断方法研究综述[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 257-272.
- JI Shengchang, ZHANG Fan, SHI Yuhang, et al. Review on vibration-based mechanical condition monitoring in power transformers[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 257-272.
- [28] 刘家骥. 油浸式变压器漏磁场及绕组短路振动分析[J]. 变压器, 2023, 60(8): 13-18.
- LIU Jiaji. Analysis of leakage magnetic field and windings vibration of oil-immersed transformers[J]. Transformer, 2023, 60(8): 13-18.
- [29] 张凌云. 铁心本体振动噪声特性的实验与仿真研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- ZHANG Lingyun. Experimental and simulation study on vibration and noise characteristics of core body[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [30] CHU F, NI X, LIN H, et al. Audible noise measurement and distribution characteristics analysis of filter reactor in converter station of HVDC[C]//The 16th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2020). Online Conference. London: IET, 2021: 1051-1055.
- [31] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电力变压器第 6 部分: 电抗器: GB/T1094.6—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Power transformers-part 6: reactors: GB/T 1094. 6-2011 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [32] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电力变压器第 101 部分: 声级测定 应用导则: GB/T 1094.101—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Power transformers-part 101: determination of sound levels-application guide: GB/T 1094.101-2023 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.

作者简介:



张子希

张子希(2000),女,硕士在读,研究方向为高压设备振动噪声(E-mail: kzhang0224@stu.xjtu.edu.cn);

汲胜昌(1976),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力设备在线监测及故障诊断、振动噪声产生机理及抑制。

张玉焜(1995),男,博士在读,研究方向为电力设备状态评估与故障诊断研究。

Noise characteristics of iron-based soft magnetic material reactor

ZHANG Zixi, JI Shengchang, ZHANG Yukun, LIU Shuqing, GAO Lu, ZHANG Fan

(Xi'an Jiaotong University(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment), Xi'an 710049, China)

Abstract: Iron-based soft magnetic composites have the characteristics of high magnetic permeability, high magnetic induction strength and low iron loss. It is of great significance to study the vibration and noise characteristics of this material reactor for the design of vibration and noise reduction. In this paper, based on the finite element simulation model, the vibration and noise distributions of the reactors under normal operating conditions are calculated and analyzed through the magnetic field-structure-acoustic multiphysics coupling. The noise measurement system of the reactor is built, and the noise signals of the silicon steel core, hybrid iron core, and iron-based soft magnet core reactor are measured separately for experimental verification. The results show that the noise of the hybrid iron core and iron-based soft magnetic core reactors is significantly lower than that of silicon steel reactors. The hybrid reactor is least affected by current changes. The simulation data shows that the magnetostriction to Maxwell force noise ratio of silicon steel core reactor is 1.15. Magnetostriction occupies the largest proportion. The main reason for the low noise of iron-based soft magnetic core reactor is that the magnetostrictive effect is negligible.

Keywords: three-phase dry-type reactors; iron-based soft magnetic composite; noise mechanism; magnetostrictive; multi-physical fields coupling; finite element

(编辑 方晶)