

拉紧螺杆对并联电抗器的振动影响分析

闫荣格^{1,2}, 谷浩伟^{1,2}, 张晓杰^{1,2}, 赵文月^{1,2}, 张阿雪^{1,2}

(1. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 河北工业大学, 天津 300130;
2. 河北省电磁场与电器可靠性重点实验室, 河北工业大学, 天津 300130)

摘要: 并联电抗器在制造过程中通常采用拉紧螺杆紧固铁心, 螺杆外加的压紧力不仅会影响硅钢片的磁特性, 还会影响并联电抗器的振动特性。但是现阶段的研究并没有考虑压紧力对磁特性的影响, 也没有考虑拉紧螺杆对并联电抗器的振动影响。针对这一现象, 本文首先设计了考虑外加压紧力的磁特性测量系统, 对硅钢片的磁化方向施加压紧力并进行磁特性测量。然后建立了考虑外加压紧力的并联电抗器电磁—机械强耦合模型, 采用有限元法计算得到了不同压紧力下并联电抗器铁心的振动特性。最后测量了并联电抗器的振动加速度随着螺杆外加压紧力增大的变化值, 验证了分析方法和结果的准确性, 为进一步研究低噪声的并联电抗器提供了理论和实验指导。

关键词: 并联电抗器; 压紧力; 磁特性; 有限元法; 振动

DOI: 10.12067/ATEEE2008014

文章编号: 1003-3076(2021)03-0039-07

中图分类号: TM472

1 引言

随着我国特高压输电系统的深入发展, 并联电抗器在电力系统中的应用越来越多, 其安全稳定的运行对整个电力系统的稳定运行具有重要意义^[1,2]。由于特殊的铁心结构和工作方式, 并联电抗器在工作时的噪声和振动水平比较大^[3,4], 这不仅会产生噪声污染, 还会影响电抗器的使用寿命和电力系统的长期可靠运行^[5,6]。因此研究并联电抗器的振动噪声问题对于研制低噪声电抗器, 提高电抗器性能具有重要科学意义。

目前国内外的学者对并联电抗器振动进行了广泛的研究。电抗器产生振动的主要原因是在交变的磁场下铁心材料硅钢片产生的磁致伸缩效应^[7-9]。张艳丽等对无取向电工钢片的磁致伸缩特性进行测量及谐波分析^[10-12]。龚园等测量了旋转磁化下电工钢片的磁致伸缩特性^[13]。郜玉香等对硅钢片在有、无直流偏磁条件下的磁致伸缩特性进行了测量^[14]。贲彤等对硅钢片进行不同角度的切割, 研究了硅钢片各向异性磁特性^[15]。Gao Yanhui 等搭建了同时考虑麦克斯韦力和磁致伸缩力的干式铁心电

抗器模型^[16]。

电抗器在制造过程中会采用拉紧螺杆紧固铁心, 这会影响硅钢片的磁特性, 进而影响电抗器的振动特性。但目前的研究均未考虑拉紧螺杆外加的压紧力对硅钢片磁特性的影响, 更没有分析其对电抗器振动的影响。

针对以上问题, 本文设计了可以外加压紧力的磁特性测量系统, 对施加不同压紧力下的硅钢片进行磁化特性和磁致伸缩特性测量, 给出不同压紧力下硅钢片的磁化特性和磁致伸缩特性曲线; 并将其应用到并联电抗器的仿真模型中进行计算, 得到了外加压紧力对电抗器振动的影响; 最后通过实验验证了分析方法和结果的准确性, 为进一步研究低噪声的并联电抗器提供了理论和实验指导。

2 压紧力下硅钢片磁特性测量

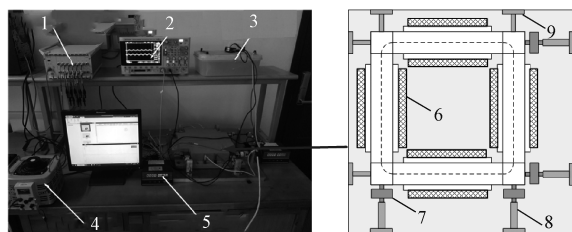
为了准确测量不同压紧力下硅钢片的磁化特性和磁致伸缩特性, 本文设计了外加压紧力的磁特性测量系统, 如图1所示, 该系统由数据采集器、示波器、电阻箱、调压器、压力显示屏、爱泼斯坦方圈、力传感器、施压螺杆、固定螺杆组成。测试前, 将硅钢

收稿日期: 2020-08-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51777054)

作者简介: 闫荣格(1969-), 女, 河北籍, 教授, 博士, 研究方向为工程电磁场与磁技术;
谷浩伟(1994-), 男, 河北籍, 硕士研究生, 研究方向为工程电磁场与磁技术。

片裁剪为320 mm长、30 mm宽的长条形,共32片,并将其放置在爱泼斯坦方圈中。测试时在样片表面固定应变片,数据采集器采集应变片的应变信号实现磁致伸缩的检测。



1—数据采集器;2—示波器;3—电阻箱;4—调压器;
5—压力显示屏;6—爱泼斯坦方圈;7—力传感器;
8—施压螺杆;9—固定螺杆

图1 磁特性测量系统

Fig.1 Magnetic characteristic measurement system

本文利用该测量系统测量了型号为50ww470的无取向硅钢片。测量过程中施加50 Hz的励磁电压,同时施压螺杆对硅钢片施加压紧力并用传感器记录压力值。通过示波器采集爱泼斯坦方圈一次侧绕组励磁电流和二次侧感应电压,并通过式(1)和式(2)计算得到磁场强度和磁通密度。

$$H = \frac{N_1 I}{l_m} \quad (1)$$

$$B = \frac{U}{4.44fN_2 A} \quad (2)$$

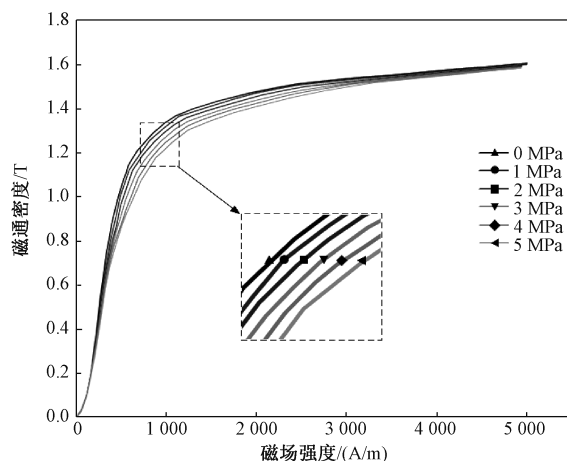
式中, H 为磁场强度; N_1 为初级线圈的匝数; I 为励磁电流; l_m 为有效磁路长度; B 为磁通密度; U 为次级线圈感应电压; f 为频率; N_2 为次级线圈匝数; A 为横截面积。

在考虑磁致伸缩效应的振动计算时,通常以单值曲线表示磁致伸缩与磁场强度的关系,并引入磁致伸缩峰-峰值 λ_{pp} :

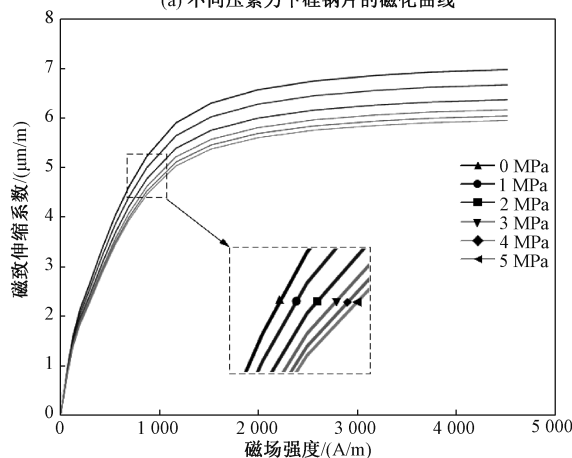
$$\lambda_{pp} = \lambda_{\max} - \lambda_{\min} \quad (3)$$

式中, λ_{\max} 为磁致伸缩蝴蝶曲线上的最大值; λ_{\min} 为最小值。将磁致伸缩峰-峰值与磁场强度通过三次样条插值得到磁致伸缩单值曲线如图2所示。

从图2(a)中可以看出,随着压紧力的增大,硅钢片的磁化曲线所受影响越大,将越晚进入饱和区,其导磁能力逐步下降,即压紧力使硅钢片自发磁化方向转向难磁化方向;当材料趋于饱和状态时,外加压紧力对材料的磁特性影响逐渐消失,这说明外加压紧力只是降低材料的相对磁导率,并不会改变材料的饱和点。从图2(b)中可以看出,压紧力对硅钢



(a) 不同压紧力下硅钢片的磁化曲线



(b) 不同压紧力下硅钢片的磁致伸缩单值曲线

图2 不同压紧力下硅钢片的磁特性曲线

Fig.2 Magnetic characteristic curve of silicon steel sheet under different pressures

片的磁致伸缩效应影响也较大。随着压紧力的增大,磁致伸缩效应减弱。这是因为压紧力加剧了硅钢片内部磁畴的转动,使磁畴向难磁致伸缩方向旋转,且随着压紧力的增加,偏转角越大,磁致伸缩变化越小。

综上,压紧力在0~5 MPa之间时,随着压紧力的增大,硅钢片的导磁能力下降,磁致伸缩效应减弱。针对硅钢片的这一特性,可以在适当的范围内对硅钢片的铁心施加压紧力,在不影响电抗器正常运行的同时,使硅钢片的磁致伸缩效应减弱,达到降低电抗器铁心电磁振动的目的。

3 磁-机械耦合模型的有限元分析

本文建立了考虑外加压紧力下电抗器铁心的电磁-机械强耦合模型,根据有限元法对电抗器的振动特性进行分析。

电抗器的能量系统包括磁场能、电流位能、磁边界上的位能、应变能和外力的位能、磁致伸缩能。其能量泛函为:

$$I = \int_{\Omega_2} \frac{1}{2} \mathbf{H} \cdot \mathbf{B} d\Omega - \int_{\Omega_2} \mathbf{A} \cdot \mathbf{J} d\Omega + \int_{\Gamma_2} \left(\int_0^A (\mathbf{H} \times \mathbf{n}) \cdot d\mathbf{A} \right) d\Gamma + \int_{\Omega_1} \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} d\Omega - \int_{\Gamma_1} (f_r \cdot \mathbf{u}) d\Gamma - \int_{\Omega_1} (f_\Omega \cdot \mathbf{u}) d\Omega + \int_{\Omega_1} (\boldsymbol{\sigma} \cdot d\mathbf{H}) d\Omega \quad (4)$$

式中, Ω_1 、 Ω_2 分别为机械场和磁场的分析域; Γ_1 、 Γ_2 分别为机械场 Ω_1 和 Ω_2 磁场的边界; $\boldsymbol{\sigma}$ 为应力; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为应变; f_r 为外表面力密度; f_Ω 为外体积力密度; \mathbf{u} 为位移矢量; \mathbf{A} 为矢量磁位; \mathbf{B} 为磁感应强度, 是应力 $\boldsymbol{\sigma}$ 的函数; \mathbf{H} 为磁场强度。 $\int_{\Omega_1} (\boldsymbol{\sigma} \cdot d\mathbf{H}) d\Omega$ 为磁-机械耦合项, 反映了电抗器模型的强耦合特征, d 为电抗器铁心硅钢片的磁致伸缩系数, 是应力 $\boldsymbol{\sigma}$ 的函数。

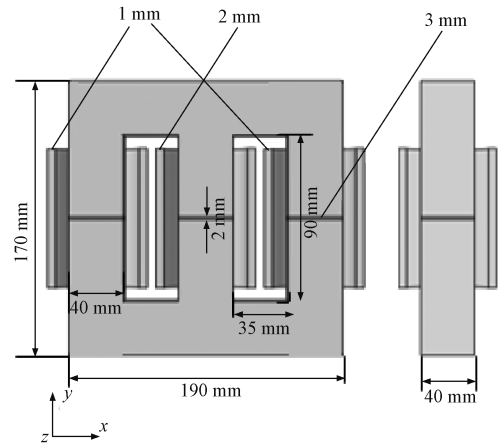
应用能量变分原理, 将求解转化为多元函数求极值的问题, 具体求解过程如文献[17]所示。

4 电抗器振动特性的仿真与分析

本文中研究的电抗器仿真模型结构如图3所示, 铁心中柱上绕制直流绕组, 起着改变铁心磁通饱和程度进而调节电抗器无功补偿容量的作用。两侧铁心柱上绕制交流绕组, 产生交流磁通。仿真时所加激励为 220 V 工频电压, 直流激励为 2 A。采用上述模型计算得到电抗器的振动加速度特性如图4所示。

由于铁心底部设置固定约束, 所以相对于铁心下部, 铁心的气隙处和上端振动加速度较大。因此取气隙上表面测点 A、铁心内侧拐角处测点 B 和铁心上表面测点 C 三点进行加速度比较。在相同的激励下, 三点在不同压紧力作用下的振动加速度如图5所示。

从 A、B、C 三点的振动加速度曲线可以看出, 各点的振动加速度随着压紧力的增大逐渐减小, 这是由两方面因素造成的, 一方面是压紧力对电抗器铁心有紧固作用, 另一方面是在压紧力的作用下磁致伸缩效应减弱。但是 A、B、C 三点的振动加速与压紧力并不是线性关系, 随着压紧力的增大, 三点的振动加速度减小的趋势逐渐降低, 如图6所示。



1—交流线圈;2—直流线圈;3—气隙

图3 并联电抗器结构

Fig.3 Structure of shunt reactor

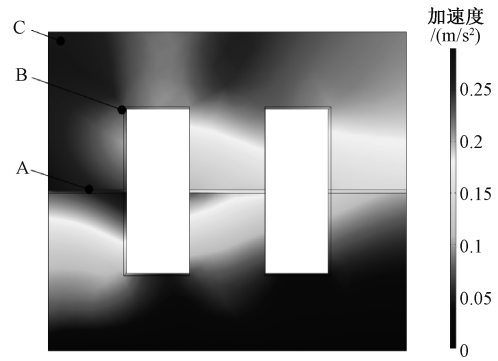


图4 并联电抗器的振动加速度特性

Fig.4 Structure of shunt reactor vibration characteristics
shunt of reactor

5 实验验证

为了验证上述分析的正确性, 制作了电抗器样机, 对电抗器的振动进行实验测试。样机结构尺寸与仿真模型大小相同, 气隙处采用环氧树脂填充, 额定电压为 220 V, 交流绕组 410 匝, 直流绕组 645 匝。本文使用扭矩扳手对并联电抗器的螺栓施加不同的压紧力并进行了振动对比实验测试。并联电抗器振动测试系统如图7所示。

拉紧螺栓的拧紧力矩为:

$$T = T_1 + T_2 = F_0 \tan(\varphi + \rho_v) \frac{d_2}{2} + F_0 \mu \frac{1}{3} \times \frac{D_w^3 - d_0^3}{D_w^2 - d_0^2} = K F_0 d \quad (5)$$

式中, T 为拧紧力矩; T_1 螺纹副的螺纹阻力矩; T_2 为

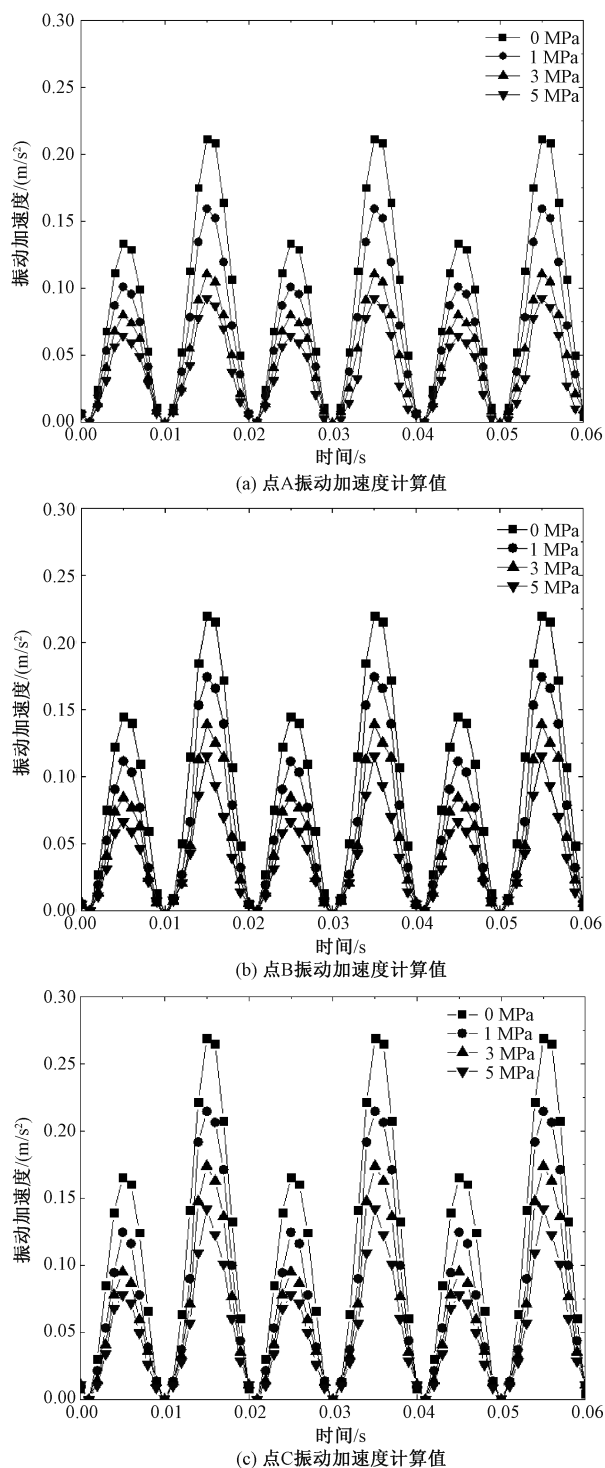


图5 不同压紧力下 A、B、C 三点振动加速度
Fig.5 Vibration acceleration of A, B and C under different pressures

螺母与被联接件(或垫圈)支撑面间的端面摩擦力矩; d 为螺纹公称直径; F_0 为压紧力; K 为拧紧力矩系数; d_2 为螺纹中径; φ 为螺纹升角; ρ_v 为螺纹当量摩擦角; μ 为螺母与被联接件支撑面间的摩擦因数;

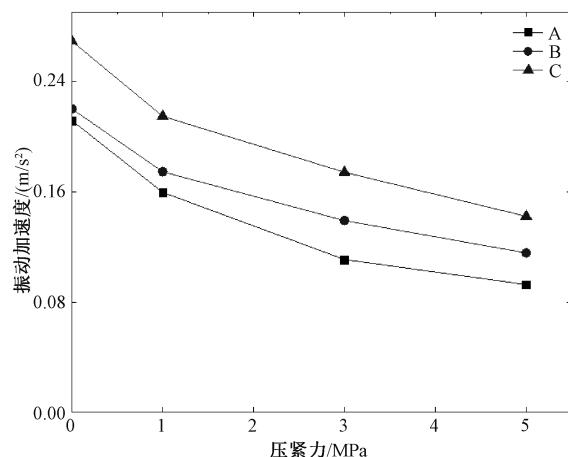


图6 振动加速度随压紧力变化曲线

Fig.6 Vibration acceleration varies with the pressure

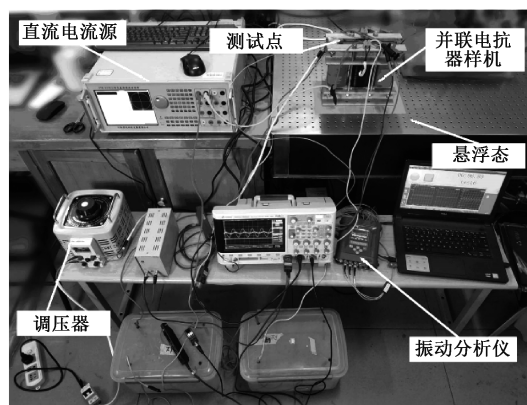


图7 并联电抗器振动测试系统

Fig.7 Vibration testing system of shunt reactor

D_w 、 d_0 为螺母与被联接件(或垫圈)支撑面直径、螺纹中径。

由于气隙被绕组包裹,无法测得气隙处的振动数据,因此对铁心的上铁轭拐角点 B 和上表面点 C 的振动加速度进行测量,结果如图 8 所示。

从图 8 可以看出,随着压紧力的增大,各点的振动加速度逐渐降低。点 B 和点 C 振动加速度的测量值与计算值相比,在变化趋势上基本相同;点 B 和点 C 的振动加速度计算值与实验测量值的最大值对比如表 1 所示。

由表 1 可知,铁心表面加速度计算值和测量值误差均在 10% 以内,符合工程允许偏差,造成这种误差的原因为:

(1) 上下铁轭夹件等部件的机械摩擦对铁心的振动有一定的影响。

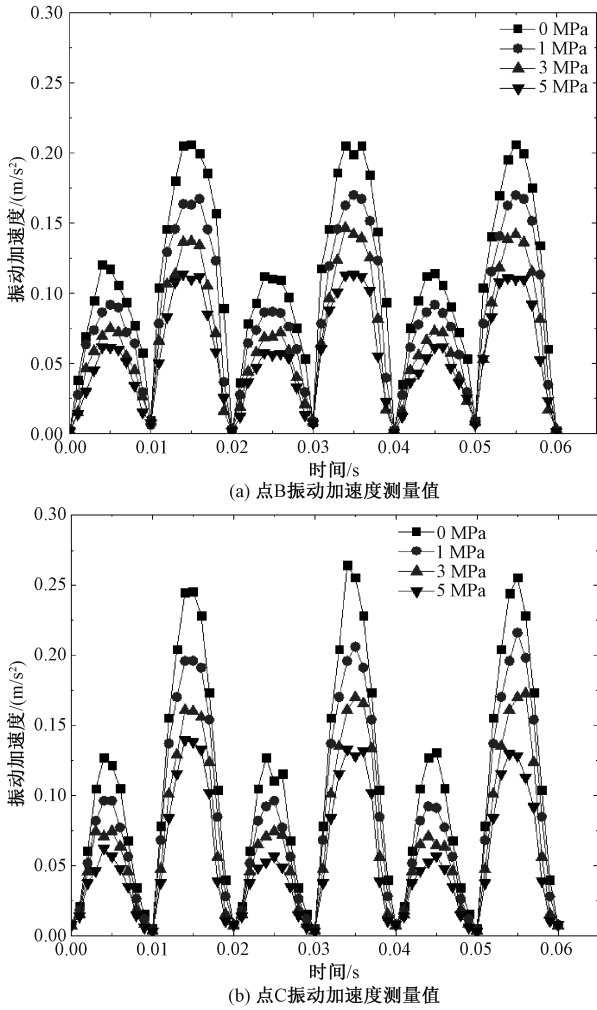


图 8 不同压紧力下 B、C 点振动加速度测量值
Fig.8 Measured values of vibration accelerations of point B and C under different pressures

表 1 振动加速度计算值与实验测量值对比

Tab.1 Comparison of calculated and experimental accelerations

测试点	压紧力/ MPa	计算值/ (m/s^2)	测量值/ (m/s^2)	误差 (%)
B	0	0.220 18	0.206 27	6.74
	1	0.174 57	0.163 24	6.94
	3	0.139 06	0.136 99	1.51
	5	0.115 66	0.113 29	2.09
C	0	0.269 36	0.264 24	1.94
	1	0.214 86	0.196 27	9.47
	3	0.174 23	0.160 22	8.74
	5	0.142 25	0.138 56	2.66

(2)绕组的振动、气隙附近的空气振动均对实验结果有一定的影响。

(3)仿真计算时将铁心底面设置为固定约束,

实际电抗器是平放在实验台上的。

但是总体来看加速度的测量值与计算值的变化趋势基本一致,同时误差也保持在可接受的范围内,验证了仿真的正确性,为进一步研究低噪声的并联电抗器提供了理论和实验指导。

6 结论

并联电抗器铁心在制造过程中通常采用拉紧螺杆紧固,螺杆外加的压紧力不仅会影响硅钢片的磁特性,还会影响并联电抗器的振动特性,以往的电抗器振动分析均未考虑这部分的影响。本文针对上述问题,测量了压紧力下硅钢片的磁化曲线和磁致伸缩曲线,将上述测量数据作为材料本构关系,建立了考虑螺杆压紧力下并联电抗器的电磁-机械强耦合模型,对并联电抗器的振动特性进行了仿真和实验分析,得到以下结论:

(1)测量了压紧力下硅钢片的磁化特性和磁致伸缩特性,建立了考虑螺杆压紧力下电抗器的电磁-机械强耦合模型,使整个模型更加接近实际工况。

(2)对并联电抗器进行了振动数值分析,计算结果与实验测量结果比较吻合,验证了该模型的正确性,为进一步研究低噪声的并联电抗器提供了理论和实验指导。

参考文献 (References):

- [1] 郑涛, 赵彦杰 (Zheng Tao, Zhao Yanjie). 超/特高压可控并联电抗器关键技术综述 (Overview of key techniques of EHV/UHV controllable shunt reactor) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2014, 38 (7): 127-135.
- [2] Ning J, Baoxing H, Ruoyu Z, et al. Application of empirical wavelet transform in vibration signal analysis of UHV shunt reactor [A]. IEEE Milan PowerTech [C]. 2019. 1-5.
- [3] Yan Rongge, Gao Xu, Zhu Lihua, et al. Research on three-dimensional stress distribution of reactor core [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26 (4): 1-4.
- [4] 田聪, 李琳, 宋雅吾, 等 (Tian Cong, Li Lin, Song Yawu, et al.). 并联电抗器铁心振动的模型实验与仿真研究 (Model experiment and simulation of core vibration for shunt reactor) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (3): 64-70.
- [5] 张鹏宁, 李琳, 聂京凯, 等 (Zhang Pengning, Li Lin,

- Nie Jingkai, et al.). 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 (Study on the vibration of high voltage shunt reactor considering of magnetostriction and winding force) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2018, 33 (13): 3130-3139.
- [6] 闫荣格, 张晓杰 (Yan Rongge, Zhang Xiaojie). 考虑 ΔE 效应的磁控电抗器振动特性分析 (Vibration analysis of magnetic controllable reactor considering the ΔE effect) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2020, 39 (7): 1-8.
- [7] Ben T, Yang Q, Yan R, et al. Magnetically controlled saturable reactor core vibration under practical working conditions [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53 (6): 1-4.
- [8] Ben Tong, Yang Qingxin, Yan Rongge, et al. Research on stress characteristics of shunt reactor considering magnetization and magnetostrictive anisotropy [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54 (3): 8400104.
- [9] Gao Y, Muramatsu K, Hatim M, 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): 2179-2182.
- [10] 张艳丽, 王佳音, 白保东, 等 (Zhang Yanli, Wang Jiayin, Bai Baodong, et al.). 直流偏磁磁场对硅钢片磁致伸缩特性的影响分析 (Research on vibration and noise of transformers under DC bias) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (15): 4299-4307.
- [11] 张艳丽, 孙小光, 谢德馨, 等 (Zhang Yanli, Sun Xiaoguang, Xie Dexin, et al.). 无取向电工钢片磁致伸缩特性测量与模拟 (Measurement and simulation of magnetostrictive properties for non-grain oriented electrical steel sheet) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (11): 176-181.
- [12] 张艳丽, 孙小光, 白保东, 等 (Zhang Yanli, Sun Xiaoguang, Bai Baodong, et al.). 晶粒无取向硅钢片取向特性分析 (Analysis on oriented characteristics for non-grain oriented silicon steel sheet) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (S2): 99-104.
- [13] 龚园, 杨树平, 李强, 等 (Gong Yuan, Yang Shuping, Li Qiang, et al.). 旋转磁化下电工钢片的磁致伸缩特性 (Magnetostrictive properties of electrical steel sheet with rotational magnetization) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2017, 37 (16): 4826-4833, 4908.
- [14] 闫荣格, 郜玉香, 贲彤, 等 (Yan Rongge, Gao Yuxiang, Ben Tong, et al.). 直流偏磁下磁饱和电抗器铁心电磁振动分析 (Analysis on electromagnetic vibration of magnetic saturation reactor iron-core under DC magnetic bias) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (8): 27-33.
- [15] 贲彤, 陈龙, 闫荣格, 等 (Ben Tong, Chen Long, Yan Rongge, et al.). 考虑磁化及磁致伸缩特性各向异性的感应电机铁心电磁应力分析 (Stress analysis of induction motor core considering anisotropic magnetic and magnetostrictive properties) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2019, 34 (1): 66-74.
- [16] Gao Y, Kusano D, Muramatsu K. Loss and noise reduction of saturable magnetically controlled reactor by improving structure of magnetic valves [A]. IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation [C]. 2016.
- [17] 闫荣格, 王博文, 曹淑瑛, 等 (Yan Rongge, Wang Bowen, Cao Shuying, et al.). 超磁致伸缩致动器的磁-机械强耦合模型 (Magneto-mechanical strong coupled model for a giant magnetostrictive actuator) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2003, (7): 107-111.

Analysis of vibration effect of tightening screw on shunt reactor

YAN Rong-ge^{1,2}, GU Hao-wei^{1,2}, ZHANG Xiao-jie^{1,2}, ZHAO Wen-yue^{1,2}, ZHANG A-xue^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment,
Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province,
Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Tightening screw is usually used to fasten the core in the manufacturing process of shunt reactors. The pressure applied by the screw will not only affect the magnetic characteristic of the silicon steel sheet, but also affect the vibration characteristics of the shunt reactors. However, the effect of the pressure on the magnetic characteristic and the vibration effect of the tightening screw on the shunt reactors are not considered. In this paper, a magnetic characteristic measurement system considering the external pressure is designed, in which the pressure to the magnetization direction of the silicon steel sheet is applied and the magnetic characteristic of the silicon steel sheet is measured. Then the electromagnetic-mechanical strong coupling model of shunt reactor considering the influence of pressure is constructed. The vibration characteristics of shunt reactor under different pressures are calculated by the finite element method. Finally, the vibration acceleration of the shunt reactor with the increase of the pressure provided by screw is measured. The accuracy of the analysis method and results is verified, and the method provides theoretical and experimental guidance for further research on the low-noise shunt reactors.

Key words: shunt reactor; pressure; magnetic characteristic; finite element method; vibration