

直流偏磁下磁饱和电抗器铁心电磁振动分析

闫荣格, 郜玉香, 贲彤, 陈俊杰

(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)

摘要:磁饱和电抗器能够根据系统传输功率的大小平滑地调节所补偿的无功功率,在电力系统等多种行业得到了广泛的应用。由于磁饱和电抗器铁心磁阀结构的特殊性以及交直流共同激励的工作方式使得其振动噪声相对于其他电抗器更加明显。本文对直流偏磁引起磁饱和电抗器铁心电磁振动问题进行分析。首先对电抗器铁心固有频率进行仿真及模态实验,得到电抗器的各阶固有频率及振型,并得出振动测试关键点位置;然后基于有限元分析建立了考虑电磁力与磁致伸缩效应作用的电磁-机械耦合模型,得到了不同直流偏磁下测试点振动位移时域和频域波形,为在设计上减少电抗器振动噪声提供理论依据与实验参考。

关键词:磁饱和电抗器;模态实验;直流偏磁;电磁振动

DOI: 10.12067/ATEEE1712017 **文章编号:** 1003-3076(2018)08-0027-07 **中图分类号:** TM474

1 引言

随着电力行业的快速发展,电力系统对电能质量和可靠性的要求越来越高,更多的无功补偿装置被广泛应用。磁饱和电抗器具有优良的工作特性,可根据系统传输功率的大小平滑调节所补偿的无功功率^[1],提高系统的输电质量与电网可靠性。另外,磁阀式可控饱和电抗器还具有成本低、寿命长、维护管理简单方便等诸多优点^[2,3]。磁饱和电抗器由于磁阀的存在及交直流共同作用的工作特点^[4],运行时产生的电磁振动引起了国内外学者的广泛关注。直流偏磁的存在会使电抗器铁心的磁化特性和磁致伸缩特性发生很大的变化,使电气设备的损耗增大,进而对其振动噪声水平产生影响^[5]。因此,对在直流偏磁参与下磁饱和电抗器振动特性的研究是十分必要的。

目前,国内外对于直流偏磁条件下电抗器铁心振动噪声问题的研究并不多见,但针对电力变压器直流偏磁下的铁心振动有相关研究^[6-9]。其中文献[6,7]分析了直流偏磁下铁心电磁场和振动问题,但未考虑电磁场与磁致伸缩之间的相互影响;文献[8]采用试验方法分析了直流偏磁对变压器铁心振

动噪声的影响;文献[9]给出了变压器在直流偏磁下振动噪声的监测方法。C. A. Baguley 和 U. K. Madawala 等学者于2011年对直流偏磁下铁磁材料的振动与损耗进行了深入的研究,提出了电抗器等电气设备铁心材料的振动和损耗会随着直流偏磁的增加而增大的观点^[10]。S. Chen 等学者研究了高压直流输电系统(HVDC)中直流偏磁对电气设备的影响,认为直流偏磁会使电抗器的振动加剧,并使振动频谱发生变化^[11]。但是文献[6-11]的研究并没有对引起电气设备振动噪声的根本原因——应力进行计算与分析。

本文针对直流偏磁引起的磁饱和电抗器铁心电磁振动问题展开研究。首先对电抗器铁心进行了模态分析及实验,得到了各阶固有频率及振型,并得出振动测试关键点位置。然后测量了直流偏磁下硅钢片磁特性,建立磁饱和电抗器的电磁-机械耦合模型,基于有限元分析软件对电抗器进行了直流偏磁条件下的仿真研究,并分析了测试点振动位移的时域及频域波形。最后,在理论以及实验的基础上,总结了直流偏磁条件下磁饱和电抗器的振动规律,为磁饱和电抗器直流偏磁条件下的振动问题提供了理论依据和实验参考。

收稿日期: 2017-12-11
基金项目: 国家自然科学基金项目(51237005;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;
郜玉香(1992-),女,河北籍,硕士研究生,研究方向为工程电磁场与磁技术。

2 模态分析

模态是指物体结构的固有振动特性,每阶模态都包括固有频率、阻尼比和模态振型这 3 个参数。本文对电抗器主要结构部件进行振动模态分析,得到电抗器模型的频率响应函数、各阶模态、固有频率及振型,为避免部件固有频率与振动主要频率发生谐振提供理论支持。

实验首先对一台 220V、4.4kVar 的单相磁饱和电抗器进行模态仿真及实验分析。模态实验现场如图 1 所示。实验中首先将力传感器固定在某一点,比如 1 点,然后将振动加速度传感器固定在 1 点,用激振器对电抗器激振,从而得出一组信号数据;继续改变振动加速度传感器位置,使其固定在下个位置,直到得到 120 组数据为止。将得到的实验模态与仿真模态分析结果进行对比,其中前六阶的各阶振型对比如图 2~图 7 所示。为更加清晰地与仿真得出的振型图作对比,将实验得到的振型图从各个角度观察其振型。



图 1 模态实验现场图
Fig. 1 Picture of modal experiment site

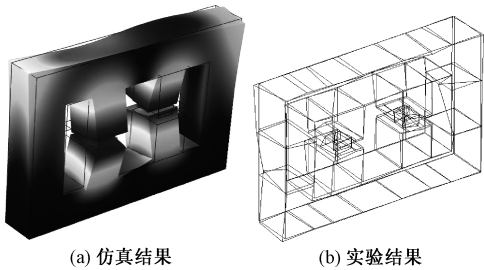


图 2 第一阶振型
Fig. 2 First order mode shape

从图 2 可以看出,两个磁阀处的振动位移最大,变形最明显;图 3 和图 4 说明,铁轭处更容易发生形变;由图 5 可知,旁轭处的振动位移很大,发生了严

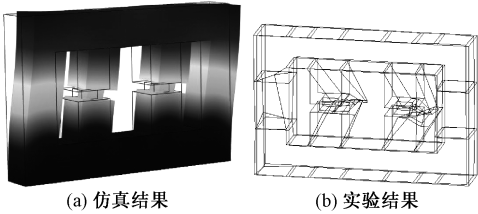


图 3 第二阶振型
Fig. 3 Second order mode shape

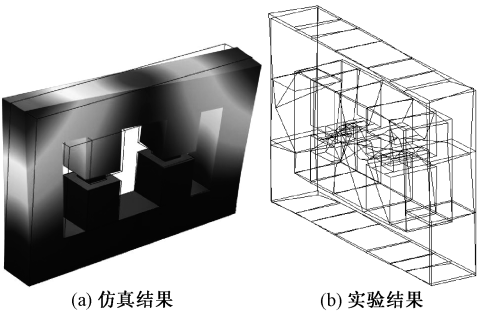


图 4 第三阶振型
Fig. 4 Third order mode shape

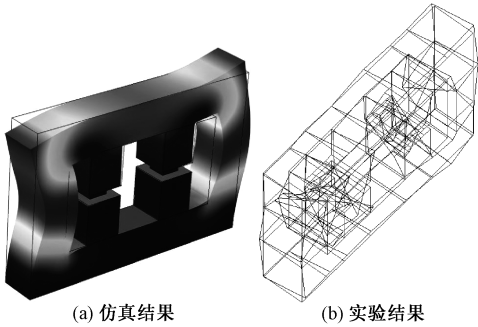


图 5 第四阶振型
Fig. 5 Fourth order mode shape

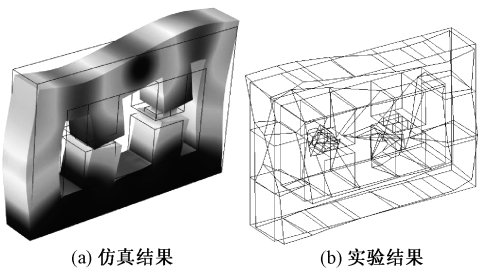


图 6 第五阶振型
Fig. 6 Fifth order mode shape

重的变形;图 6 显示,铁轭、铁轭拐角及中心铁心柱处产生了严重的畸变;图 7 说明铁轭及旁轭处振动位移较大,更容易产生形变。总的来说,铁轭、铁轭拐角处、旁轭、中心铁心柱及磁阀处振动位移较大,

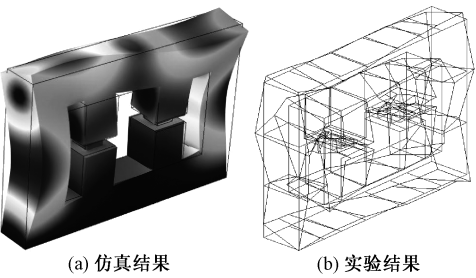


图7 第六阶振型

Fig.7 Sixth order mode shape

变形最明显。故选取 A ~ F 6 个点作为重要测试点,来研究各点在不同直流偏磁下振动位移的时域和频域波形,各测试点分布位置如图 8 所示。其中 A 点位于铁轭,B 点位于铁轭拐角处,C 点位于旁轭,D 位于中心铁心柱,E、F 两点分别位于磁阀 1 和磁阀 2。

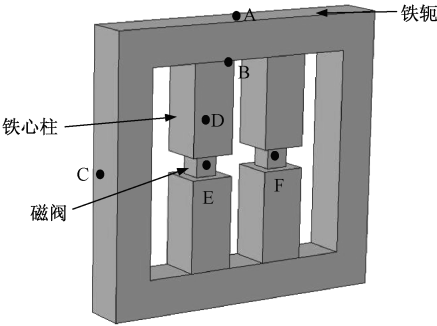


图8 磁饱和电抗器振动测试点

Fig.8 Magnetic saturation reactor vibration test point

固有频率值仿真及实验对比结果见表 1。其中误差 = (实验值 - 仿真值)/实验值。

表 1 固有频率仿真及实验值的对比

Tab.1 Contrast of simulation and experimental values of natural frequency			
阶次	实验值/Hz	仿真值/Hz	误差(%)
1	221.5	185	16.5
2	498.9	405	18.8
3	1389.5	1302	6.3
4	1601.8	1435	10.4
5	1876.4	1761	6.2
6	1998.6	1912	4.3

从表 1 可以看出,第 3 阶、第 5 阶与第 6 阶固有频率吻合较好,基本可以断定 3、5、6 阶为磁饱和电抗器实际固有频率值,可以考虑从结构以及工作频率两条路径来抑制共振。以上结果可为以后的频率分析做参考。

3 直流偏磁下硅钢片磁特性测量

本文首先利用德国 BROCKHAUS 公司的磁致伸缩测量系统对硅钢片进行磁化特性及磁致伸缩特性测试,测量装置实物图如图 9 所示。

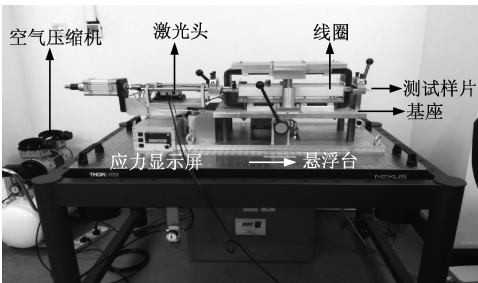


图9 磁特性测量装置

Fig.9 Magnetic characteristic measuring device

本文按照 2010 年国际电工委员会公布的硅钢片的磁致伸缩特性测量 IEC 标准^[12]对无取向硅钢片 50WW470 进行测量,得到硅钢片的基本磁化曲线及磁致伸缩与磁场强度的关系,结果如图 10 所示。

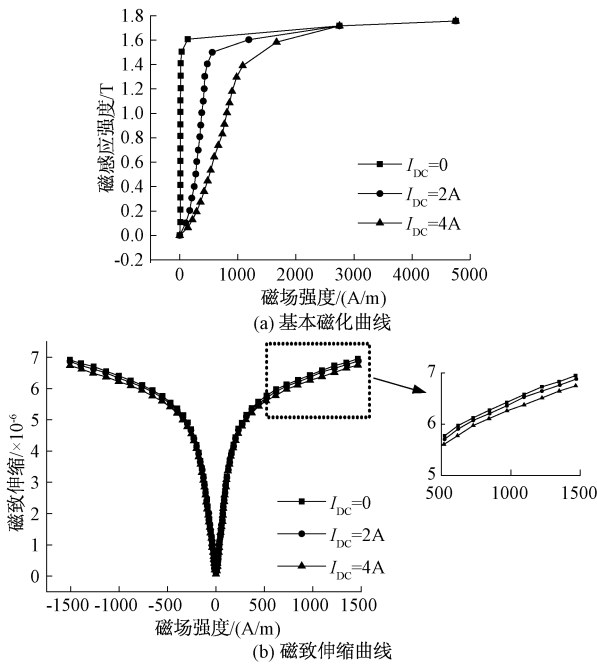


图 10 硅钢片的磁特性曲线

Fig.10 Magnetization and magnetostriction curves of silicon steel

由图 10(a)可知,磁化曲线随着直流偏磁的增大而向右移动。并且当磁感应强度达到 1.66T 时,磁感应强度不再随着磁场强度的增大而快速增大,即当磁感应强度达到 1.66T 时,铁心接近于饱和状态。从图 10(b)可以看出,磁致伸缩曲线

则随着直流偏磁的增大而缓慢下降,但变化不明显,即直流偏磁对该硅钢片磁致伸缩的影响较小。将基本磁化曲线及磁致伸缩曲线利用插值的方法应用到磁饱和电抗器振动噪声的仿真计算中,使计算结果更加准确。

4 磁饱和电抗器数值分析模型

4.1 磁场分析

电抗器运行时,由铁心构成的磁路中存在着交变电磁场,电抗器铁心磁场的计算方程为^[13]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (2)$$

$$\mathbf{H} = \nu \mathbf{B} \quad (3)$$

将式(1)~式(3)联立后得到磁场的求解微分方程:

$$\nabla \times \nu \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{J} \quad (4)$$

式中, \mathbf{H} 为磁场强度(A/m); \mathbf{J} 为电流密度(A/m²); \mathbf{B} 为磁感应强度(T); \mathbf{A} 为矢量磁位; ν 为磁阻率,满足 $\nu = 1/\mu$,其中 μ 表示导电媒质的磁导率(H/m)。在非线性的铁磁介质中,磁阻率 ν 为空间坐标的函

数,同时也是磁感应强度 \mathbf{B} 的函数。电磁场的边界条件设为:

$$\begin{cases} \Gamma_1: \mathbf{A} = 0 \\ \Gamma_2: \mathbf{H} \times \mathbf{n} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, Γ_1 为第一类边界条件,规定了边界上磁矢位 \mathbf{A} 的值,即 $\mathbf{A}(x,y,z) = 0$; Γ_2 为第二类边界条件,表示磁场强度 \mathbf{H} 与边界的法相方向一致,即 $\mathbf{H} \times \mathbf{n} = \nu \nabla \times \mathbf{A} \times \mathbf{n} = 0$ 。

4.2 磁致伸缩应力分析

磁致伸缩应变可由图10(b)得到的磁致伸缩特性曲线与磁场强度插值计算得到^[14]。将插值得到的磁致伸缩应变作为机械场分析的初始应变,依据弹性力学基本原理,应力和应变呈线性关系,磁致伸缩应力可表示为:

$$\boldsymbol{\sigma} = D \boldsymbol{\varepsilon} \quad (6)$$

式中, $\boldsymbol{\sigma}$ 为磁致伸缩应力; D 为弹性张量; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为磁致伸缩应变。

对于三维弹性材料,在载荷作用下,体内任意一点的应力状态可由6个应力分量 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ 来表示,式(6)可表示为:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} = \frac{E(1-\alpha)}{(1+\alpha)(1-2\alpha)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\alpha}{1-\alpha} & \frac{\alpha}{1-\alpha} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\alpha}{1-\alpha} & 1 & \frac{\alpha}{1-\alpha} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\alpha}{1-\alpha} & \frac{\alpha}{1-\alpha} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\alpha}{2(1-\alpha)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\alpha}{2(1-\alpha)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\alpha}{2(1-\alpha)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, E 为弹性材料的杨氏模量; α 为弹性材料的泊松比; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 为弹性体的正应力; $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ 为弹性体的剪应力; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 为弹性体的正应变; $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ 为弹性体的剪应变。

4.3 三维电磁-机械耦合模型

本文所研究的磁饱和电抗器振动主要来源于铁心材料的磁致伸缩以及电磁力,因此电抗器的电磁-机械系统的总能量包括磁场能、应变能、电流位能、磁致伸缩能及麦克斯韦力所做的功。系统的能量泛函可表示为:

$$\begin{aligned} I = & \int_{\Omega_1} \left(\int_0^B \mathbf{H} \cdot d\mathbf{B} \right) d\Omega - \int_{\Omega_1} \left(\int_0^A \mathbf{J} \cdot d\mathbf{A} \right) d\Omega - \\ & \int_{\Gamma_1} \left(\int_0^A (\mathbf{H} \times \mathbf{n}) d\mathbf{A} \right) d\Gamma + \int_{\Omega_2} (\mathbf{T} \cdot d\mathbf{H}) d\Omega + \\ & \int_{\Omega_2} \left(\int_0^\varepsilon \boldsymbol{\sigma} \cdot d\boldsymbol{\varepsilon} \right) d\Omega - \int_{\Gamma_2} (\mathbf{f}^F \cdot \mathbf{u}) d\Gamma - \int_{\Omega_2} (\mathbf{f}^n \cdot \mathbf{u}) d\Omega \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $\int_{\Omega_1} (\mathbf{T} \cdot d\mathbf{H}) d\Omega$ 为电磁-机械耦合项,反映了磁饱和电抗器模型的强耦合特征; Ω_1, Ω_2 分别为电

磁场和机械场的分析域; \boldsymbol{u} 为磁位移矢量; \boldsymbol{T} 为磁致伸缩材料因施加磁场而产生的应力; d 为电抗器铁心硅钢片的磁致伸缩系数,可以由测量得到的磁致伸缩与磁场强度之间的关系取得; Γ_1 、 Γ_2 分别为磁场和机械场的边界; \boldsymbol{f}^Γ 、 \boldsymbol{f}^Ω 分别为机械场的外表面力密度和外体积力密度。

5 仿真结果与分析

5.1 模型建立

本文对磁阀式饱和电抗器进行数值计算,铁心材料采用 50WW470 硅钢片。电抗器主要参数见表 2。电抗器有限元剖分网格如图 11 所示。

表 2 计算与实验电抗器参数

Tab. 2 Calculation and experimental reactor parameters

参数	数值
额定频率/Hz	50
额定功率/kW	7.5
额定电压/V	220
控制绕组匝数/匝	48
工作绕组匝数/匝	242

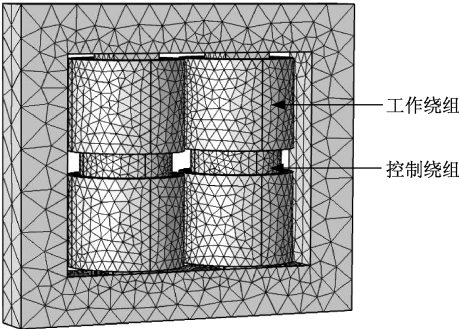


图 11 磁饱和电抗器网格划分图

Fig. 11 Mesh of magnetic saturation reactor

5.2 仿真结果与分析

图 8 中 A ~ F 六个测试点在直流偏磁电流分别为 0、2A、4A 时振动位移随时间变化的计算结果如图 12 所示。

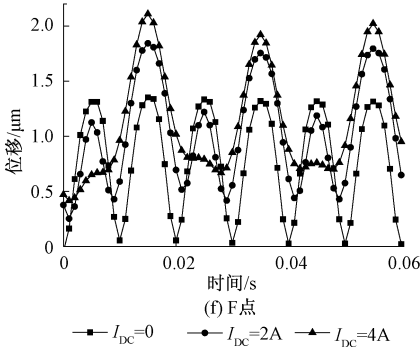
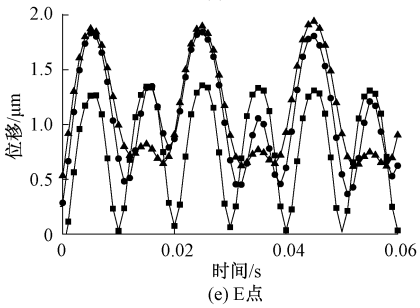
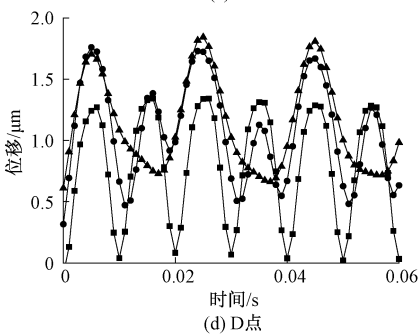
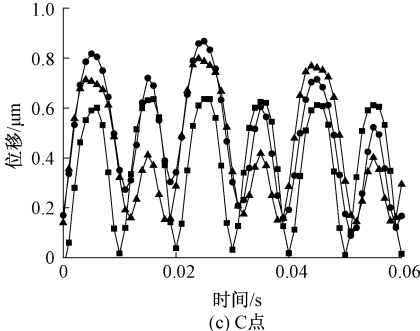
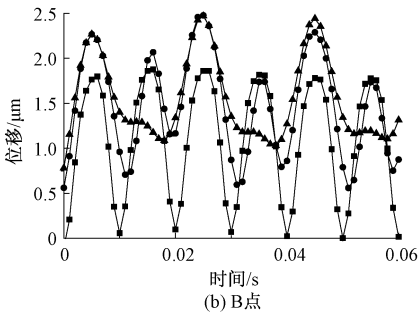
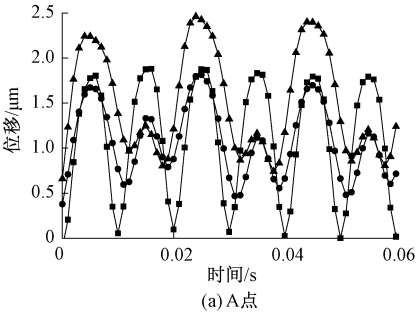


图 12 各点在直流偏磁下振动总位移随时间的变化曲线
Fig. 12 Variations of total vibration displacement at various points under DC bias with time

由图 12(a) 可知, 当直流偏磁从 2A 增加到 4A 时, 铁轭处 A 点的位移迅速增加, 而其他位置的变化不大。由图 12(b) 可知, 直流偏磁对铁轭拐角处 B 点的振动影响很大, 2A 的偏磁电流就能使铁心振动强度明显增大, 且 B 点的振动最为剧烈, 振动位移最大值可达到 $2.5\mu\text{m}$ 。由图 12(c) 可知, 旁轭点 C 的振动幅值较小, 最大振幅约为 $0.82\mu\text{m}$, 振动较弱。图 13(d) 显示当直流偏磁大小从 0 增加到 2A 时, 中心铁心柱上 D 点的位移增大较大, 直流偏磁对 D 点的振动影响也很大。由图 12(e)、图 12(f) 可知, 两个磁阀处的振幅较大, 最大值可达到 $2.2\mu\text{m}$, 振动非常严重。

总的来说, 随着直流偏磁幅值的增大, 电抗器振动位移幅值也随之增大, 且各个位置的振动位移随直流偏磁增长的程度也有所不同。除此之外, 铁轭拐角处和磁阀处的振动最为严重, 所以在以后减振降噪工作中应该将重点放在铁轭拐角处与磁阀处。

以 A 点为例, 在不同直流偏磁条件下铁心振动的频域波形如图 13 所示。由图 13(a) 可知, $I_{\text{DC}} = 0$ 时 200Hz、400Hz、1600Hz、1800Hz 处振幅较大。由图 13(b) 可知, 当 $I_{\text{DC}} = 2\text{A}$ 时以 100Hz 为基频的 200Hz、300Hz、1700Hz、1800Hz、1900Hz 处的振幅较大, 这是由于直流偏磁使得铁心磁通出现饱和, 出现大量高次谐波, 使得铁心高频振动增强。由图 13(c) 可知, $I_{\text{DC}} = 4\text{A}$ 时, 铁心各频率段的振动强度发生了变化, 其中 100Hz 和 1900Hz 的振动强度增大, 200Hz 和 1800Hz 的振动幅值降低, 且谐波含量较 $I_{\text{DC}} = 2\text{A}$ 时更多。由图 13 可以看出, 200Hz 处振幅降低但 100Hz 处振幅却增大, 而且 1900Hz 处振幅显著增强, 其中 200Hz 和 1800Hz 与模态的第 1 阶、第 5 阶结果吻合较好, 而 1900Hz 处和模态的第 6 阶结果吻合次之。故对于此电抗器直流偏磁条件下更容易引发高阶共振。图 13 中, 振动强度最大的两个频率分别为 50Hz、100Hz, 这与实际情况也是相符合的, 因为 50Hz 和 100Hz 分别为电源基频和主振基频, 基频的振动要明显强于高次谐波引起的振动。

6 结论

本文从实验及仿真的角度研究了直流偏磁对磁饱和电抗器铁心振动的影响, 对实验及仿真结果进行分析, 得到了以下结论:

(1) 电抗器铁心测试点的振动位移随直流电流

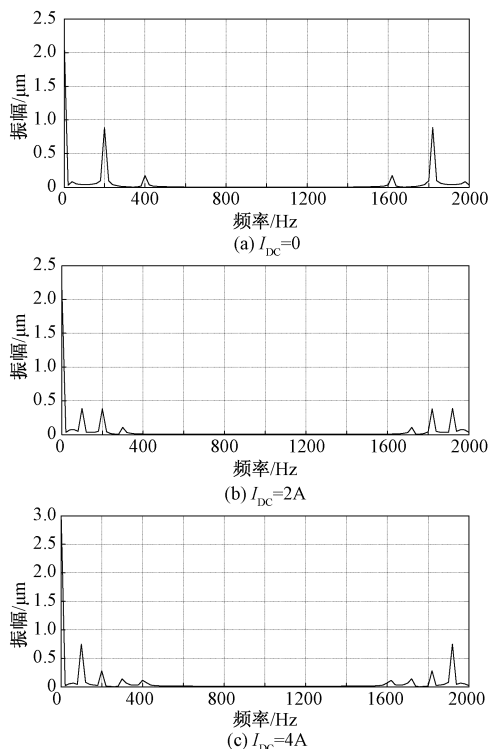


图 13 A 点在不同直流偏磁下的频域波形

Fig. 13 A point in different DC bias frequency waveform

的增大而增大, 说明直流偏磁越大, 振动对电抗器铁心造成的危害越大。

(2) 直流偏磁使得电抗器铁心全部测试点的振动均有不同程度的增强, 其中铁轭处及磁阀处测试点的振动明显强于其他测试点。

(3) 观察铁心振动的频谱图, 加入直流形成偏磁后, 主振基频 100Hz 及其整数倍处的点振幅较大, 直流电流加入后使磁致伸缩作用增强。

(4) 从频谱图分析可以推测 200Hz、1800Hz、1900Hz 处可能发生共振, 与模态分析结果的第 1 阶、第 5 阶、第 6 阶基本相吻合, 这些结果为后续工作打下了基础。

参考文献 (References):

- [1] Wenye L, Longfu L, Shuda D, et al. Overview of power controllable reactor technology [J]. Energy Procedia, 2012, 17: 483-491.
- [2] 单铁铭, 杨仁刚 (Shan Tieming, Yang Rengang). 磁饱和式可控电抗器在无功补偿中的应用 (Application of the magnetically controlled saturated reactor on SVC) [J]. 电测与仪表 (Electrical Measurement & Instrumentation), 2004, 41 (10): 34-38.
- [3] Tian M, Li Q, Li Q. A controllable reactor of transformer type [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004,

- 19 (4): 1718-1726.
- [4] 杨意妹, 祝丽花, 王斌, 等 (Yang Yimei, Zhu Lihua, Wang Bin, et al.). 考虑磁致伸缩效应的可控饱和电抗器电磁振动分析 (Analysis on electromagnetic vibration of controllable saturable reactor considering magnetostriuctive effects) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (8): 40-45.
- [5] 王佳音 (Wang Jiayin). 硅钢片磁致伸缩及直流偏磁下变压器振动噪声问题研究 (Research on magnetostriction of silicon-steel sheet and vibration and noise of transformer under DC bias) [D]. 沈阳: 沈阳工业大学 (Shenyang: Shenyang University of Technology), 2015.
- [6] 白保东, 刘闯, 王佳音 (Bai Baodong, Liu Chuang, Wang Jiayin). 直流偏磁下变压器振动的仿真及实验研究 (Simulation and experimental research of transformer vibration under DC magnetic bias) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (S2): 427-433.
- [7] 汪金刚, 毛凯, 段旭, 等 (Wang Jingang, Mao Kai, Duan Xu, et al.). 直流偏磁下的变压器振动仿真与试验 (Simulation and test of transformer vibration under DC bias) [J]. 电机与控制学报 (Electric Machines and Control), 2015, 19 (1): 58-67.
- [8] He Jinliang, Yu Zhanqing, Zeng Rong, et al. Vibration and audible noise characteristics of ac transformer caused by HVDC system under monopole operation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27 (4): 1835-1842.
- [9] 张轶君 (Zhang Yijun). 变压器直流偏磁引起的振动噪声监测方法研究 (Research on the method of vibration and noise monitoring of DC bias on transformer) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2008.
- [10] Baguley C A, Madawala U K, Carsten B. The impact of vibration due to magnetostriction on the core losses of ferrite toroidals under DC bias [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47 (8): 2022-2028.
- [11] Chen S, Wang F H, Su L. Experimental research of vibration characteristics of shunt reactor [A]. 2014 IEEE PES General Meeting, Conference & Exposition [C]. 2014. 1-5.
- [12] IEC/TR 62581-2010, Electrical steel - Methods of measurement of the magnetostriction characteristics by means of single sheet and Epstein test specimens [S].
- [13] 颜威利, 杨庆新, 汪友华 (Yan Weili, Yang Qingxin, Wang Youhua). 电气工程电磁场数值分析 (Numerical analysis of electrical engineering electromagnetic field) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2005.
- [14] 祝丽花, 杨庆新, 闫荣格, 等 (Zhu Lihua, Yang Qingxin, Yan Rongge, et al.). 考虑磁致伸缩效应电力变压器振动噪声的研究 (Research on vibration and noise of power transformer cores including magnetostriction effects) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (4): 1-6, 19.

Analysis on electromagnetic vibration of magnetic saturation reactor iron-core under DC magnetic bias

YAN Rong-ge, GAO Yu-xiang, BEN Tong, CHEN Jun-jie

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

Abstract: Magnetic saturation reactor can smoothly adjust the compensatory reactive power based on the size of the system transmission power, and it has been widely used in many industries such as electrical power system. Due to the particularity of magnetic saturation reactor iron-core magnetic-valve structure and the common excitation working mode of AC and DC, the vibration noise of magnetic saturation reactor is more obvious than other reactors. For this purpose, the electromagnetic vibration problem on magnetic saturation reactor iron-core caused by DC magnetic bias is analyzed in this thesis. First of all, the reactor iron-core natural frequency simulation and modal experiments are made to obtain the reactor natural frequency and mode of each order, and the test key points of vibration can be made as well. Then, based on the finite element analysis method, electromagnetic-mechanical coupling model is established considering electromagnetic force and magnetostrictive effect. The time-domain and frequency-domain waveforms of vibration displacement at measuring points under different DC magnetic bias are obtained in the end. This thesis provides a theoretical basis and experimental reference to reduce the reactor vibration noise.

Key words: magnetic saturation reactor; modal experiment; DC magnetic bias; electromagnetic vibration