

采用振动传感阵列的高压并联电抗器铁心松动故障诊断方法

高树国¹, 孟令明¹, 张玉焜², 张凡², 汲胜昌², 田源¹

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021;
2. 西安交通大学电力设备与电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 铁心松动是高压并联电抗器长期振动效应下的主要机械故障之一, 利用单点振动信号分析法对其进行缺陷诊断存在测点选择困难、数据不具备典型性等缺点, 而利用振动传感阵列可有效避免以上问题。介绍了基于质量-弹簧模型的并联电抗器铁心振动机理, 通过高压并联电抗器振动测试平台, 确立了高压并联电抗器油箱振动形态测试方案, 得到各个频率分量下高压并联电抗器油箱表面的振动形态, 分析了电压和铁心松动对高压并联电抗器油箱表面基频振动形态的影响。借鉴图像形态学中纹理特征的提取方法提出了一种基于振动强度共生矩阵的特征提取算法, 以铁心处于紧固状态和不同松动状态下的 10 kV 并联电抗器模型为算例, 验证了所提算法的有效性。

关键词: 故障诊断; 高压并联电抗器; 振动传感阵列; 振动形态; 铁心松动

中图分类号: TH165⁺.3; TM472 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)03-0875-10

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.03.030

引言

高压并联电抗器是电力系统中的重要电力设备^[1-3], 其故障会造成巨大的损失。由于常年累月带负荷运行造成的损伤是不可避免的^[4-7]。高压并联电抗器所有故障类型中, 机械故障占较大比例, 其中铁心松动是最常见的机械故障之一^[8-11]。因此快速可靠地检测出高压并联电抗器铁心松动故障, 能够有效延长其寿命, 进而大幅提高电力系统运行的稳定性和经济性。

针对高压并联电抗器铁心松动故障的诊断已存在较多有效方法, 目前较为常见的是振动信号分析法^[12-15]。高压并联电抗器振动特征与铁心状态密切相关, 振动分析法通过分析高压并联电抗器油箱表面的振动信号来推断铁心的机械性能, 具有较高的科学性与合理性。但以往基于振动信号分析的高压并联电抗器铁心故障诊断方法经常以油箱单点的振动信号作为分析的基础^[16-18], 出现了测点选择困难、测量信号缺乏典型性以及诊断结果可靠性差等问题。高压并联电抗器油箱表面的振动形态具备良好的稳定性和唯一性, 基于振动传感阵列的高压并联电抗器铁心松动故障诊断方法通过分析对比正常状态和故障状态下电抗器油箱表面的振动形态, 对电

抗器铁心状态做出诊断, 较好地克服了基于单点振动信号故障诊断方法的缺点。

本文以基于质量-弹簧模型的高压并联电抗器铁心振动机理^[19-21], 及基于振动传感阵列的高压并联电抗器振动测试平台为基础, 确立了高压并联电抗器油箱表面振动形态获取方法; 分析对比了铁心松动和电压对基频振动形态的影响; 借鉴图像形态学中纹理特征提取方法, 提出了一种基于振动强度矩阵的高压并联电抗器油箱表面振动形态特征提取算法, 以 10 kV 三相模型并联电抗器振动形态为算例, 验证了算法的有效性; 进而提出一种基于振动传感阵列的高压并联电抗器铁心松动故障诊断方法。

1 基于质量-弹簧模型的铁心振动机理

高压并联电抗器正常运行期间, 其铁心柱振动来源主要是铁心饼上下截面受到的交变麦克斯韦力, 所以轴向振动更为明显。铁心柱由多个铁心饼与气隙叠加而成, 稳态运行时轴向振动可用质量-弹簧模型描述, 此时可将铁心饼视为上下运动的质量模块, 铁心饼之间的大理石和环氧板可视为存在一定刚度和阻尼的介质, 如图 1 所示。该模型基于 3 个假设:

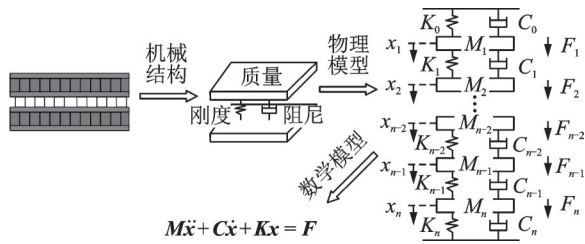


图 1 质量-弹簧模型图

Fig. 1 Diagram of mass-spring model

1) 铁心刚度无穷大;

2) 铁心柱轴向振动时主要发生形变的部分是环氧板或大理石;

3) 环氧板和大理石的质量忽略不计。

图 1 中, M_i 为第 i 层硅钢叠片的质量, 用于表征铁心饼的惯性; K_i 为刚度系数; C_i 为阻尼系数; F_i 为铁心饼所受麦克斯韦力。

基于图 1 模型, 建立 n 自由度的二阶线性微分方程描述铁心柱轴向的动力学行为, 如下式所示:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \quad (1)$$

式中 M 为铁心饼质量矩阵; C 为阻尼系数矩阵; K 为刚度系数矩阵; F 为麦克斯韦力矩阵; x 为铁心柱位移矩阵。

根据文献[22-23], 方程组的稳态解部分可用余弦函数表示, 频率是激励力的两倍, 幅值与激励力幅值成正比。在本文中, 由于电源频率为 50 Hz, 因此铁心轴向振动的频率为 100 Hz, 振动幅值与电压的平方成正比。

铁心饼上下表面在交变磁场作用下产生的麦克斯韦力可表示为:

$$F = \frac{\Phi_m^2}{4\mu_0 S} [1 - \cos(2\omega t)] \quad (2)$$

式中 Φ_m 为最大磁通; S 为铁心饼截面积; ω 和 μ_0 分别为激励力频率和磁导率。

再由激励电压与磁通的关系:

$$U = 4.44fN\Phi_m \quad (3)$$

式中 f, N 分别为激励电压频率, 绕匝匝数。

结合齐次方程的通解为:

$$x = pe^{-\frac{Ct}{2M}} \sin(\lambda t + \varphi) \quad (4)$$

式中 p, φ 为与铁心柱初始状态有关的参数。

$$\lambda = \frac{\sqrt{4MK - C^2}}{2M} \quad (5)$$

式中 M, K 和 C 分别为质量, 刚度和阻尼。

非齐次方程分解为:

$$\begin{cases} \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{C}{M} \frac{dx}{dt} + \frac{K}{M} x = \frac{kU_0^2}{2M} \\ \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{C}{M} \frac{dx}{dt} + \frac{K}{M} x = \frac{kU_0^2}{2M} \cos(2\omega t) \end{cases} \quad (6)$$

由此解为:

$$x = pe^{-\frac{Ct}{2M}} \sin(\lambda t + \varphi) + \frac{kU_0^2}{2K} + q \cos(2\omega_0 t + \theta) \quad (7)$$

其中:

$$q = \frac{kU_0^2}{2\sqrt{(K - 4M\omega_0^2)^2 + 4C^2\omega_0^2}} \quad (8)$$

$$\theta = \arctan \frac{2C\omega_0}{K - 4M\omega_0^2} \quad (9)$$

式中 U_0 和 ω_0 分别为激励电压及其角频率。

同时铁心受到麦克斯韦力的大小与激励电压平方成正比:

$$F \propto aU_0^2 \quad (10)$$

为了简化麦克斯韦力 F 与电压 U 的关系, 引入 a 作为关系系数。

2 振动测试平台与振动形态复原

2.1 基于振动传感阵列的振动测试平台

如图 2 所示, 试验室中搭建的基于振动传感阵列高压并联电抗器振动测试系统包含以下几个部分: 10 kV 三相并联电抗器模型、振动传感阵列、数据采集卡、计算机软件平台。振动传感阵列采用灵敏度为 100 mV/g、频响范围为 0.5~10 kHz 的微型单轴加速度传感器, 每次测量时将 8 个传感器通过热熔胶固定在电抗器油箱表面。振动测试平台中采用的并联电抗器为定制的三相油浸式铁心并联电抗器模型, 其额定容量为 76 kvar, 主要参数如表 1 所示。电抗器油箱内部结构如图 3 所示, 可通过调节螺杆预紧力来模拟紧固件松动缺陷, 此外油箱顶部还设置了手孔, 供传感器深入油箱中获取特定结构件的振动信号。

模型电抗器通过金属联结部件与油箱顶部相连, 这种结构有利于在实验室环境下对铁心机械状态进行调节。模型电抗器共有 3 个铁心柱, 每个铁心柱在绕组包围的部分被划分为 5 段, 段与段之间用环氧板间隔, 环氧板上的压紧力由铁心上下夹件和轴向螺杆提供, 通过螺杆上的螺母来调节螺杆提供给夹件的预紧力, 达到调节铁心轴向松紧度的目的, 利用螺母扭矩来衡量铁心松紧。

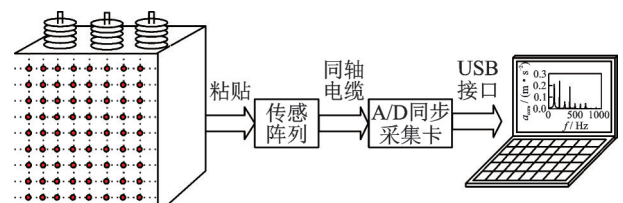


图 2 基于振动传感阵列的振动测试平台

Fig. 2 Diagram of vibration testing platform based on vibration sensor array

表 1 高压并联电抗器主要参数

Tab. 1 Main parameters of the high voltage shunt reactor

参数名称	参数值
型号	BKS-76/10
形式	三相油浸式
冷却方式	ONAN
额定容量/kvar	76
额定电压/kV	10
额定电流/A	4.39
实测电抗/ Ω	1301.22



图 3 10 kV 三相电抗器模型

Fig. 3 10 kV three-phase reactor model

2.2 铁心本体振动与电压的关系

为了探究铁心本体振动随电压升高的变化趋势,有必要首先获取电抗器油箱内部振动信号。对于叠片式结构的电抗器铁心本体而言,其一体性较差,硅钢片表面固定较大质量的传感器势必会影响其机械结构,因此实验采用微型压电式加速度传感器进行铁心振动测量,固定方式采用粘接安装。结合电磁场方向和铁心柱的质量-弹簧模型,铁心柱的分段结构在交变麦克斯韦力作用下沿边界产生法向弹性形变,因此铁心的轴向振动是研究的关键。考虑到铁心结构特殊性和油箱内部结构复杂性,实验选取铁轭顶端的三相位置作为测量区域,同时将多余的线缆收束固定,以免传感器端的线缆受迫振动影响测试精度。

在额定电压下对铁心振动信号进行采集,振动信号如图 4 所示,A,C 两相测点的振动主频率所对应幅值达到 0.01g,B 相测点的振动主频率所对应幅值相对较低,这是由于 B 相铁心位于电抗器中心位置,其一体性相对较好,而 A,C 两相铁心靠近油箱四周的紧固夹件,此处两者的振动相互影响。

为实现高压并联电抗器端电压可调,将三相并联电抗器与三相电力变压器高压端相连,三相电力变压器低压端与三相调压器相连,通过三相调压装

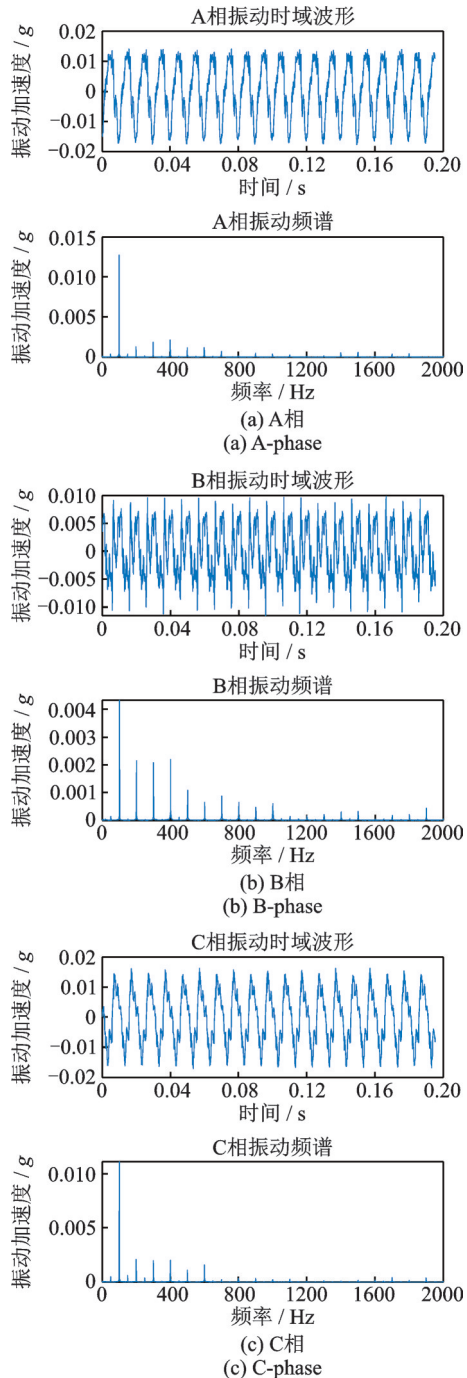


图 4 铁心顶部轴向振动

Fig. 4 Axial vibration on top of core

置调节三相并联电抗器端电压,如图 5 所示。以 20 V 为步长,同步调整调压器的三相电压由 110 V 到 230 V,每次升压后对三相铁心顶部测点振动信号进行同步采集。如图 6 所示,铁心轴向振动幅值

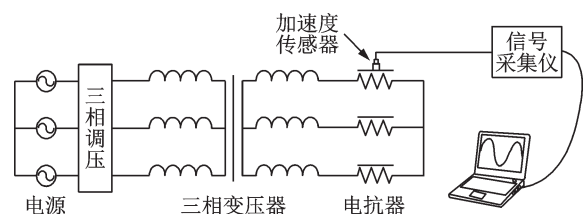


图 5 电抗器振动测试平台

Fig. 5 Reactor vibration test platform

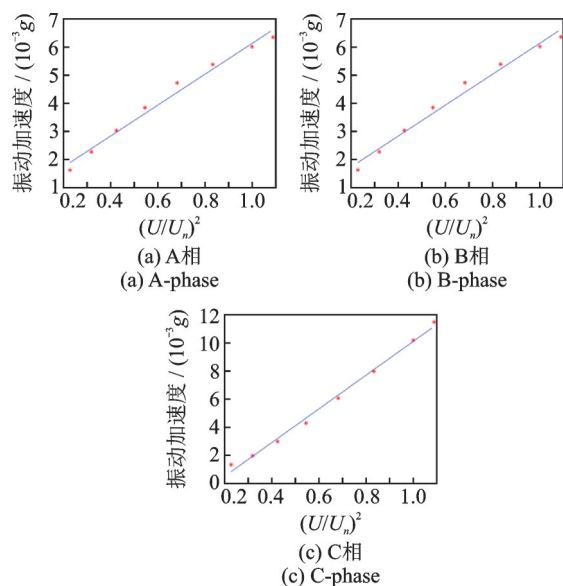


图6 铁心振动主频幅值随电压变化趋势

Fig. 6 Change trend of core vibration main frequency amplitude with voltage

随电压平方的升高成比例增大,其中, U_n 为电阻器额定电压。分析可知,磁通密度的增大,相邻铁心饼之间的麦克斯韦力增大,导致铁心饼上下表面产生较为明显的形变;其次,铁心在增大的磁通密度作用下磁致伸缩加剧,硅钢片材料沿磁场方向产生一定程度的周期性伸缩,从而引起铁心振动增大;此外,磁通密度上升期间,铁心柱两端与铁轭的气隙连接处磁场出现一定程度畸变,从而引起靠近铁心柱两端结构的振动更强烈。

2.3 油箱振动形态复原

利用振动传感阵列获取电抗器油箱表面振动形态,不仅避免了单通道信号下的电抗器运行状态信息缺失,而且达到了电抗器振动形态可视化效果,有效地展现了油箱表面振动强度分布规律。

2.3.1 测试方案

振动传感阵列由多个按一定规则布置的压电式加速度传感器构成,如图7所示。其布置方法为:

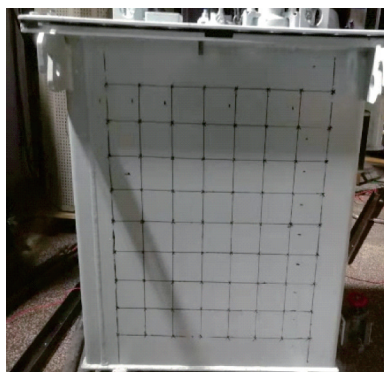


图7 振动测点分布图

Fig. 7 Diagram of vibration point distribution

1)对变压器油箱宽面进行等距网格划分,网格的交点作为振动测试的测点,网格间距不宜过大,本文中网格间距设定为8 cm;

2)每次测量时在每行测点上布置微型加速度传感器,即每次测量8个测点,用多张采集卡构成的多通道振动加速度传感器测得振动数据。

根据等效铁心柱的质量-弹簧模型振动机理与2.2节中试验验证结果分析可知,对于高压并联电抗器,电感值恒定,电流与电压成正比,因此高压并联电抗器振动与设备实际运行容量成正比。对于实际运行的高压并联电抗器和进行离线测试的高压并联电抗器,由于线网电压的波动和加载电源的实际条件,施加于电抗器的电压可能会发生变压,因此有必要探究外加电压对高压并联电抗器油箱表面振动形态的影响。为保证油箱表面的振动信号与铁心振动信号具备较强的相关性,需对被测区域进行选择。为避免非线性和外界干扰,一般需要被测区域远离风扇,避开加强筋。本文为加强测试的针对性,在电抗器生产过程中取消了油箱表面的散热片和加强筋。为获得尽可能多的油箱表面振动信息,将被测区域选择为正对铁心,且面积较大的油箱面。

由于本文所采用的微型传感器具有质量小的优点,且对箱体进行振动检测时是分批次放置的,因此对电抗器箱体固有模态的影响可忽略不计。为得到稳态加压测试条件下油箱的振动形态,要求测试平台测得的振动数据具备同步性。但受到加速度传感器个数、采集卡通道数目和计算机软件分析平台实时处理能力的限制,同时测量所有规定测点的振动难度较大,故采用移相校准的方式对分时测量的振动信号进行后期处理,保证同时性。

参考信号的选择有两种方案,分别是机械振动参考信号和电参考信号。若将油箱某一固定点振动信号作为参考信号,在理想的实验室条件下易于实现,但实际情况下参考信号会受传感器贴合位置和外界环境的影响而发生变化;电参考信号由于网线电压和高压并联电抗器整体电气特性的稳定性不易发生变化,因此本文选择模型电抗器A相电压信号作为参考信号,电压信号通过高压探头和信号采集装置测量记录。校准方法如图8所示,其具体步骤为:

1)在A相接端处固定高压探头,作为参考测点,该处电压信号记为 S_0 。

2)测量油箱正面各行测点的振动信号,记录此时*i*行*j*列的测点振动信号 S_{ij} 。

3)以 S_0 为基准进行相位校准,校准规则为:

$$\Delta\varphi_i = \varphi_i - \varphi_0, \quad i = 1, 2, \dots, 9 \quad (11)$$

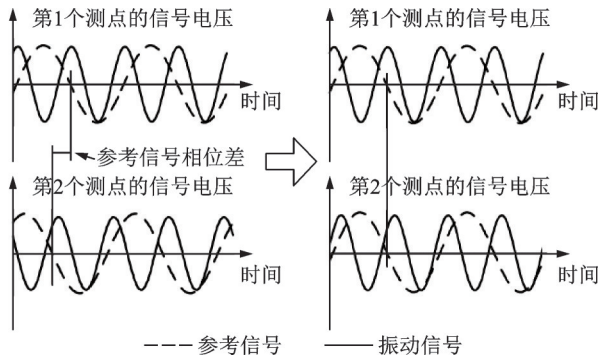


图 8 移相校准示意图

Fig. 8 Schematic of phase shift calibration

$P'_{ij} = P_{ij} + \Delta\varphi_i, i = 1, 2, \dots, 9; j = 1, 2, \dots, 8$ (12)
 式中 φ_i 为对不同行进行采样时固定点信号 S_0 基频分量的初相角; φ_0 为参考信号的初相角; P'_{ij} 为各点振动信号校正后的初相角; P_{ij} 为各点振动信号校正前的初相角。对于振动信号中的高频分量,也可以采取相同方法进行校准。

2.3.2 振动形态

通过电压信号校准,得到 A 相电压最大时油箱表面的振动数据,对校准后的数据进行三次样条插值,得到额定电压下不同频率分量的油箱表面振动形态,如图 9 所示。由图 9 知,100 Hz 为高压并联电抗器油箱表面振动主频,不同频率分量的振动形态不同,振动强度较强的片区同步性较好;随着频率的升高,油箱表面的振动形态呈现更加复杂的分布。由各频率振动分布可知箱体表面中心点的振动强度不一定最大,且不同测点处振动强度可能存在明显差异。因此,复杂环境下振动测点数量需要足够多,单一测点下的振动特征并不能概括电抗器的振动规律。

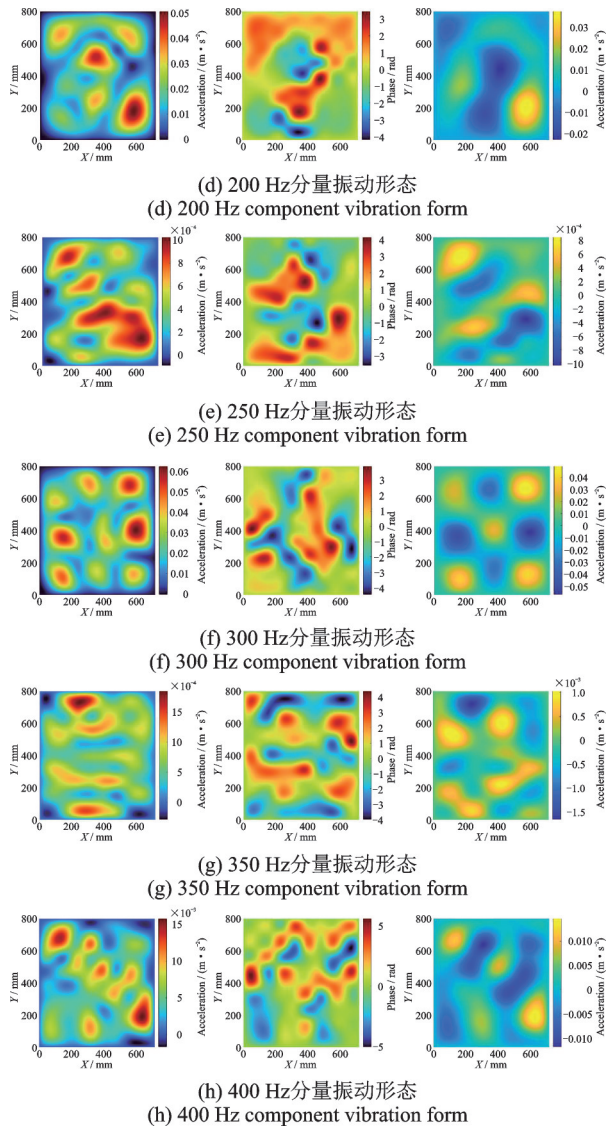
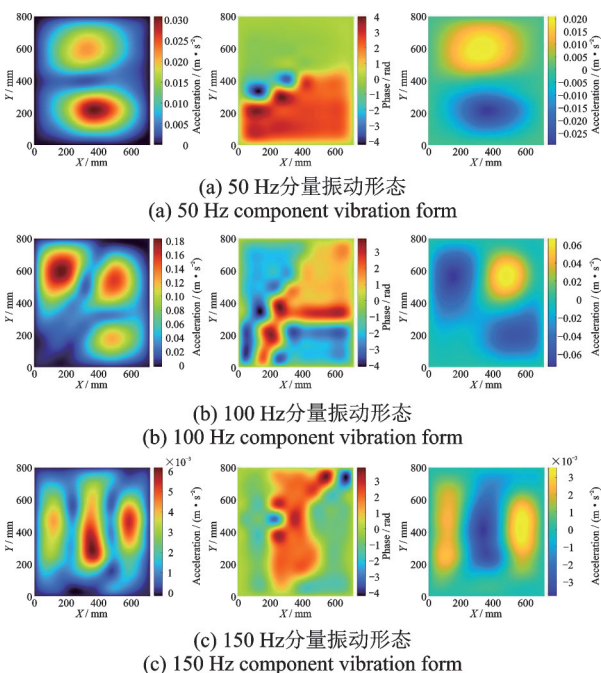


图 9 各频率分量下振动加速度分布图

Fig. 9 Distribution of vibration acceleration under each frequency component



3 电压和铁心松动的影 响

3.1 电压对基频振动形态的影响

高压并联电抗器油箱振动多倍频现象受诸多因素影响,包括绕组绝缘材料和铁心气隙填充材料的非线性、麦克斯韦力与振动之间的耦合、铁心叠片间的摩擦碰撞和内部紧固件的松动。多频率分量中基频分量成因明确,存在被广泛认可的机理模型,因此选择基频振动形态作为研究对象。

为探究油箱宽面基频振动形态随端口电压的变化规律,分别进行了端口电压为 100%, 80% 和 60% 额定电压下的振动形态测试试验,此时铁心轴向紧固螺杆扭矩为 15 N·m,试验结果如图 10~12 所示。分析图 10~12 可知,随着端口电压的增加,油箱表面基频振动逐渐增强,但振动分布变化较小,不同电

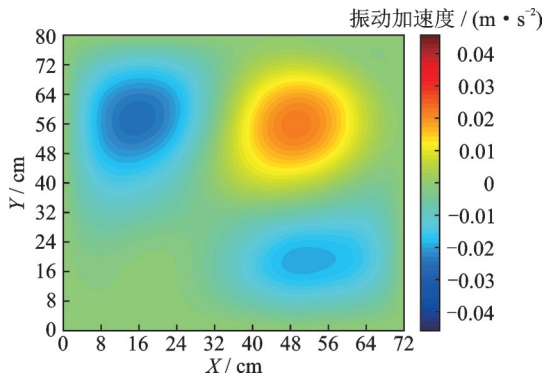


图10 100%额定电压-100 Hz振动加速度分布

Fig. 10 Distribution of vibration acceleration at 100% rated voltage-100 Hz

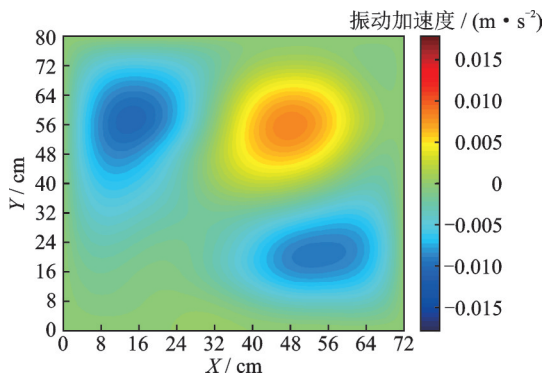


图11 80%额定电压-100 Hz振动加速度分布

Fig. 11 Distribution of vibration acceleration at 80% rated voltage-100 Hz

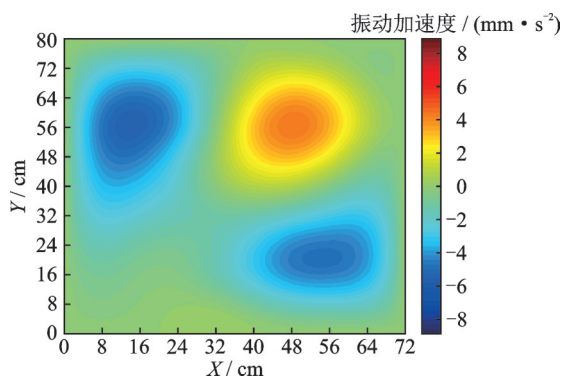


图12 60%额定电压-100 Hz振动加速度分布

Fig. 12 Distribution of vibration acceleration at 60% rated voltage-100 Hz

压下的振动形态具有较强的相似性。图像形态学中常用归一化互信息及结构相似性衡量两张图片间的差异,当两种指标为1时,图像间相似性极高;当两种指标为0时,图像间相似性极弱。从人眼辨识的角度讲,当两张图片的归一化互信息大于0.5,且结构相似性大于0.8时,它们在视觉上具有较高的相似性。归一化互信息及结构相似性定义参见文献[24]。

以100%额定电压时的振动分布图为准,求取其他额定电压下的振动分布图与其归一化互信

息,如表2所示。分析表2数据可知,随着额定电压的减小,归一化互信息逐渐减小,图像间相似性变弱,但表2中所有归一化互信息均大于0.5,结构相似性大于0.8,故图像间整体相似性较强。

表2 不同电压下振动分布相似性

Tab. 2 Similarity of vibration distribution under different voltages

额定电压百分比/%	结构相似性	归一化互信息
100	1	1
80	0.94	0.92
60	0.94	0.81

3.2 铁心松动对基频振动形态的影响

研究油箱表面振动形态的目的是为了对并联电抗器铁心松动故障进行诊断,故有必要研究铁心松动对油箱表面基频振动形态的影响。通过调节轴向螺杆上螺母的扭矩来模拟不同程度的铁心松动,扭矩越小,铁心松动程度越大。分别进行扭矩为12,8和4 N·m的振动形态测试试验,此时输入电压为额定电压,试验结果如图13~15所示。由图13~15可知,铁心轴向松动,油箱表面整体振动增强,基频振动形态发生改变。以预紧力为15 N·m,100%额定

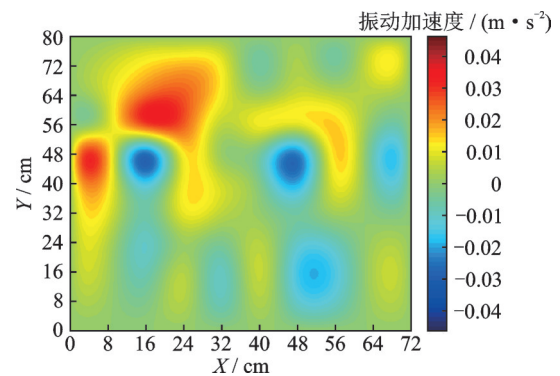


图13 12 N·m-100 Hz振动加速度分布

Fig. 13 Diagram of 12 N·m-100 Hz vibration acceleration distribution

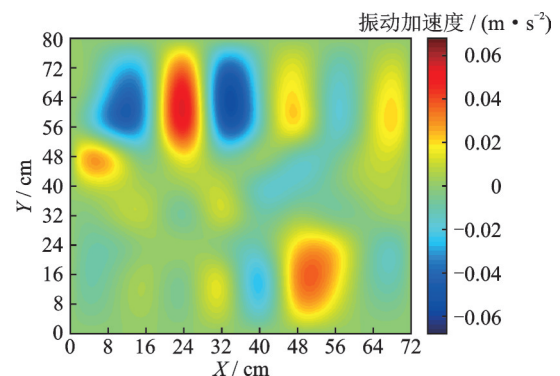


图14 8 N·m-100 Hz振动加速度分布

Fig. 14 Diagram of 8 N·m-100 Hz vibration acceleration distribution

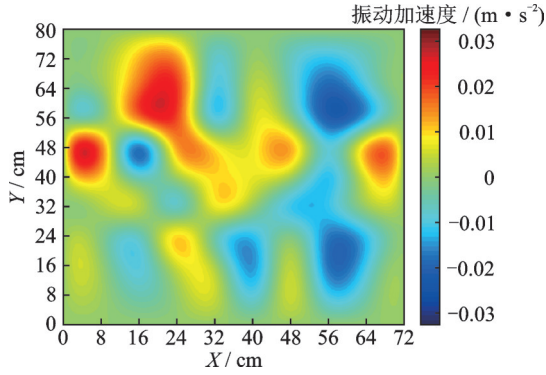


图15 4 N·m-100 Hz振动加速度分布

Fig. 15 Diagram of 4 N·m-100 Hz vibration acceleration distribution

电压时的振动分布图为准,求取铁心发生不同程度松动时归一化互信息及结构相似性,如表3所示。分析表3数据可知,随着铁心松动程度增加,归一化互信息和结构相似性分别逐渐减小,图像间相似性变弱,且表中所有归一化互信息均小于0.5,结构相似性小于0.8,图像间整体相似性较弱。

表3 不同松动程度下振动分布相似性

Tab. 3 Similarity of vibration distribution under different degrees of looseness

预紧力/(N·m)	结构相似性	归一化互信息
12	0.69	0.41
8	0.64	0.32
4	0.58	0.17

4 基于振动强度共生矩阵特征提取算法

为进一步量化振动形态的改变,借鉴图像形态学中图像纹理特征提取的方法,提出一种基于振动强度共生矩阵的振动形态特征提取算法。

4.1 特征提取算法

4.1.1 振动强度矩阵

振动强度矩阵定义如下:

1)在油箱表面建立 $Oxyz$ 坐标系, z 轴对油箱表面测点的振动加速度的等级进行度量; y 轴对油箱表面 y 方向的振动测点的数目进行度量; x 轴对油箱表面 x 方向振动测点数目进行度量,则油箱表面每一个测点对应一个三维数组 (x, y, z) :

$$x \in (1, 2, 3, \dots, N_x) \quad (13)$$

$$y \in (1, 2, 3, \dots, N_y) \quad (14)$$

$$z \in (1, 2, 3, \dots, N_z) \quad (15)$$

式中 N_x 为 x 方向测点的总数; N_y 为 y 方向测点的

总数; N_z 为振动加速度总等级数。

2)振动强度矩阵

振动强度矩阵中的任意元素 $A_{N_x \times N_y}$:

$$A_{N_x \times N_y} = z \quad (16)$$

4.1.2 振动强度共生矩阵

在振动强度矩阵的基础上对振动强度共生矩阵 A_c 进行如下定义^[25-26]:

$$A_c(i, j, d, 0^\circ) =$$

$$\text{card} \left((k, l), (m, n) \in (N_x \times N_y) \left| \begin{array}{l} k - m = 0 \\ |l - n| = d \\ A(k, l) = i \\ A(m, n) = j \end{array} \right. \right) \quad (17)$$

$$A_c(i, j, d, 45^\circ) =$$

$$\text{card} \left((k, l), (m, n) \in (N_x \times N_y) \left| \begin{array}{l} k - m = d \\ l - n = d \\ A(k, l) = i \\ A(m, n) = j \end{array} \right. \right) \quad (18)$$

$$A_c(i, j, d, 90^\circ) =$$

$$\text{card} \left((k, l), (m, n) \in (N_x \times N_y) \left| \begin{array}{l} |k - m| = d \\ l - n = 0 \\ A(k, l) = i \\ A(m, n) = j \end{array} \right. \right) \quad (19)$$

$$A_c(i, j, d, 135^\circ) =$$

$$\text{card} \left((k, l), (m, n) \in (N_x \times N_y) \left| \begin{array}{l} k - m = d \\ l - n = -d \\ A(k, l) = i \\ A(m, n) = j \end{array} \right. \right) \quad (20)$$

式中 card 代表满足集合条件的振动强度矩阵中元素对 (k, l) 和 (m, n) 的数目; d 为元素对间距; θ 为元素对在坐标平面内与 x 轴正方向所成角度,在式(17)~(20)中 θ 分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 及 135° 。

4.1.3 振动对比度

振动对比度定义如下:

$$F_{\text{CON-}\theta} = \sum_{i=1}^{N_z} \sum_{j=1}^{N_z} (i-j)^2 A_c(i, j, d, \theta) \quad (21)$$

振动对比度是基于振动强度共生矩阵的二阶统计量,对油箱表面振动分布局部变化强弱进行刻画。油箱表面相邻区域振动变化较小,振动对比度随之变小;油箱表面相邻区域振动变化较大,振动对比度随之变大。

4.2 算例验证

以 10 kV 三相模型并联电抗器铁心处于紧固状态和松动状态时油箱表面振动形态为算例,验证基于振动强度共生矩阵的并联电抗器油箱表面振动形态特征提取算法的有效性。算法参数设置如下: $N_x=8, N_y=9, N_z=72$ 。

描述并联电抗器铁心状态的状态向量 k 和度量状态向量差异的状态向量的夹角余弦 $\cos \beta$ 定义如下:

$$k = [F_{\text{CON-0}^\circ} \quad F_{\text{CON-45}^\circ} \quad F_{\text{CON-90}^\circ} \quad F_{\text{CON-135}^\circ}] \quad (22)$$

$$\cos \beta = \frac{\langle a \cdot b \rangle}{|a| \cdot |b|} \quad (23)$$

式中 a 和 b 分别表示正常状态下的物征向量和待测状态下的特征向量。

以铁心紧固,100% 额定电压下对应的状态向量为基准向量,求取其余状态对应的状态相量和它的夹角余弦 $\cos \beta$,结果如表 4 所示。

表 4 不同状态下的余弦夹角

Tab. 4 Cosine angle in different states

铁心状态	螺母扭矩/ (N·m)	额定电压 百分比/%	$\cos \beta$	$\beta/(^\circ)$
紧固	15	100	1	0
	15	80	0.9983	3.34
	15	60	0.9907	7.82
松动	12	100	0.9557	17.13
	8	100	0.9253	22.30
	4	100	0.9041	25.31
松动	12	80	0.9532	17.60
	8	80	0.9245	22.41
	4	80	0.9018	25.60
松动	12	60	0.9463	18.86
	8	60	0.9264	22.12
	4	60	0.8906	27.05

由表 4 可知,铁心处于紧固状态,逐渐减小端口电压,夹角余弦变化较小;额定电压下,铁心发生松动,夹角余弦变化较大,且随着铁心松动程度增加,夹角余弦逐渐减小;即该算法对端口电压变化不敏感,对铁心松动具有良好的灵敏性。在采用基于振动传感阵列的并联电抗器铁心松动故障诊断方法判断铁心机械状态时,夹角余弦阈值可设定为 0.98,若夹角余弦值小于 0.98,可判断为铁心发生松动。

5 结 论

本文以基于质量-弹簧模型的高压并联电抗器

铁心振动机理,及基于振动传感阵列的高压并联电抗器振动测试平台为基础,得到如下结论:

(1) 结合质量-弹簧模型的铁心振动机理,本文通过测量铁心本体轴向振动信号,验证了铁心振动幅值与电压平方成正比的关系;

(2) 确立了稳态加压试验方法的并联电抗器油箱表面振动形态获取方法,通过移相校准的方式获取油箱表面多倍频振动形态,随着频率的升高,油箱表面的振动形态呈现更加复杂的分布;

(3) 借鉴图像形态学中图像纹理特征提取方法,提出了一种基于振动强度共生矩阵的振动形态特征提取算法,以 10 kV 三相模型电抗器为算例,验证了该算法的有效性;并在此基础上提出了一种基于振动传感阵列的电抗器铁心松动故障诊断方法。该方法可以准确识别电抗器铁心轴向松动,克服了基于单点振动信号分析法测点选择困难,诊断结果可靠性差的缺点。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 国家能源局,中国电力企业联合会.2017年全国电力可靠性年度报告[R].2018.
National Energy Administration, China Electricity Council. Annual report of national electric power reliability in 2017[R]. 2018.
- [3] 国家电力公司发输电运营部.500(300)kV 变压器及电抗器质量调查报告[R].北京:国家电力公司,2002.
Power Generation and Transmission Operation Department of State Electric Power Company. Quality investigation report of 500 (300) kV transformer and reactor [R]. Beijing: State Electric Power Company, 2002.
- [4] 汲胜昌,门阳,刘昱雯,等.运行中电力变压器油箱表面振动特性的研究[J].电工电能新技术,2007,26(2):24-28.
JI Shengchang, MEN Yang, LIU Yuwen, et al. Study on the oil tank surface vibration characteristics for the running power transformer [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2007, 26(2): 24-28.
- [5] 朱叶叶,汲胜昌,张凡,等.电力变压器振动产生机理及影响因素研究[J].西安交通大学学报,2015,49

- (6): 115-125.
ZHU Yeye, JI Shengchang, ZHANG Fan, et al. Vibration mechanism and influence factors in power transformers[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(6): 115-125.
- [6] 诺顿. 工程噪声和振动分析基础[M]. 北京:航空工业出版社, 1993.
Norton. Fundamentals of Engineering Noise and Vibration Analysis [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1993.
- [7] 许婧, 王晶, 高峰, 等. 电力设备状态检修技术研究综述[J]. 电网技术, 2000, 24(8): 48-52.
XU Jing, WANG Jing, GAO Feng, et al. A survey of condition based on maintenance technology for electric power equipments[J]. Power System Technology, 2000, 24(8): 48-52.
- [8] 张仲先. 500 kV 高压并联电抗器故障实例[J]. 高电压技术, 2000, 26(4): 75.
Zhang Zhongxian. An example of fault of 500 kV HV shunt reactor[J]. High Voltage, 2000, 26(4): 75.
- [9] 刘金, 王贵山, 孙上元, 等. 一起 500 kV 并联电抗器故障分析[J]. 广西电力, 2015, 38(3): 33-35.
Liu Jin, Wang Guishan, Sun Shangyuan, et al. Analysis of a 500 kV shunt reactor fault[J]. Guangxi Electric Power, 2015, 38(3): 33-35.
- [10] 包艳艳, 温定筠, 张广东, 等. 一起 750 kV 并联电抗器故障分析及修复方案[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(2): 40-44.
Bao Yanyan, Wen Dingyun, Zhang Guangdong, et al. Fault analysis and repair proposal on 750 kV shunt reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(2): 40-44.
- [11] 郑涛, 赵彦杰. 超/特高压可控并联电抗器关键技术综述[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(7): 127-135.
Zheng Tao, Zhao Yanjie. Overview of key techniques of EHV/UHV controllable shunt reactor[J]. Automation of Electric Power System, 2014, 38(7): 127-135.
- [12] 栾涛. 750 kV 油浸式并联电抗器电磁与振动研究[D]. 大连:大连理工大学, 2015.
Luan Tao. Research on electromagnetism and vibration of 750 kV oil-immersed shunt reactor[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [13] Gao Y, Muramatsu K, Fujiwara K, et al. Vibration analysis of a reactor driven by an inverter power supply considering electromagnetism and magnetostriction [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45 (10) : 4789-4792.
- [14] Zhang Pengning, Li Lin, Chen Zhiguang, et al. Study on vibration of iron core of transformer and reactor based on Maxwell stress and anisotropic magnetostriction [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 55 (2): 1-5.
- [15] 祝丽花, 杨庆新, 闫荣格, 等. 考虑磁致伸缩效应电力变压器振动噪声的研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 1-6.
Zhu Lihua, Yang Qingxin, Yan Rongge, et al. Research on vibration and noise of power transformer cores including magnetostriction effects [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 1-6.
- [16] Yan Rongge, Gao Xu, Zhu Lihua, et al. Research on three-dimensional stress distribution of reactor core [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 26(4): 16-19.
- [17] Gao Yanhui, Masahide Nagata, Kazuhiro Muramatsu, et al. Noise reduction of a three-phase reactor by optimization of gaps between cores considering electromagnetism and magnetostriction [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10): 72-75.
- [18] 黄中华, 王勇劲, 赵文强, 等. 正交试验优化方法在电抗器振动测试上的应用[J]. 青海电力, 2014, 33(4): 16-18.
Huang Zhonghua, Wang Yongjin, Zhao Wenqiang, et al. Application of orthogonal test optimization in reactor vibration test [J]. Qinghai Power and Energy, 2014, 33 (4): 16-18.
- [19] 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): 230-239.
Zhang Pengning, Li Lin, Nie Jingkai, et al. Study on the vibration of high voltage shunt reactor considering of magnetostriction and winding force [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2018, 33 (13) : 230-239.
- [20] 王起司. 油浸式电抗器振动噪音研究[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
Wang Qisi. Research on vibration and noise of oil-immersed shunt reactor [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [21] 叶敏, 肖龙翔. 分析力学[M]. 天津:天津大学出版社, 2001.
Ye Min, Xiao Longxiang. Analytical Mechanics [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2001.
- [22] 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.
- [23] 田聪, 李琳, 宋雅吾, 等. 并联电抗器铁心振动的模型实验与仿真研究[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(3): 64-70.

- Tian Cong, Li Lin, Song Yawu, et al. Model experiment and simulation of core vibration for shunt reactor [J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2018, 37(3): 64-70.
- [24] 周明全. 基于内容图像检索技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- Zhou Mingquan. *Content-based Image Retrieval Technology*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017.
- [25] 窦唯, 刘占生. 基于灰度-梯度共生矩阵的旋转机械振动时频图形识别方法[J]. *振动工程学报*, 2009, 22(1): 85-91.
- Dou Wei, Liu Zhansheng. A fault diagnosis method based on gray level-gradient co-occurrence matrix of time-frequency image for rotating machinery[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2009, 22(1): 85-91.
- [26] 李辉, 茆志伟, 张进杰, 等. 基于时频图像 GLCM-HOG 特征的往复压缩机故障诊断[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(10): 4030-4035.
- Li Hui, Mao Zhiwei, Zhang Jinjie, et al. Fault diagnosis for reciprocating compressor based on GLCM-HOG features of time-frequency image[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(10): 4030-4035.

Fault diagnosis method for core loose of high voltage shunt reactor using vibration sensing array

GAO Shu-guo¹, MENG Ling-ming¹, ZHANG Yu-kun², ZHANG Fan², JI Sheng-chang², TIAN Yuan¹

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China;

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

Abstract: Core loosening is one of the main mechanical faults of high voltage shunt reactors under long-term vibration effect. The defect diagnosis by single-point vibration signal analysis method has some drawbacks such as difficult selection of test points and non-typical data. The above problems can be effectively avoided by using vibration sensor array. This paper introduces the vibration mechanism of the core of shunt reactor based on mass-spring model. With the vibration test platform of high voltage shunt reactor, a test scheme of vibration morphology of high voltage shunt reactor tank is established, and the vibration morphology of high voltage shunt reactor tank surface under each frequency component is obtained. The influence of the voltage and core loosening on the vibration morphology of high voltage shunt reactor tank surface is analyzed. A method based on texture feature extraction in image morphology is presented. The feature extraction algorithm of the vibration intensity symbiosis matrix is applied to a 10 kV shunt reactor model with a fixed core and different loosening states to verify the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: fault diagnosis; high voltage shunt reactor; vibration sensor array; vibration morphology; core looseness

作者简介: 高树国(1982—),男,硕士,教授级高级工程师。电话:15830105382;E-mail:15830105382@139.com。

通讯作者: 张玉焜(1995—),男,博士研究生。E-mail:zyk469067928@163.com。