

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.06.019

基于振动非线性特征的变压器绕组状态检测

钱国超¹, 胡锦¹, 代维菊¹, 王浩州², 赵汉武¹, 洪凯星³

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217;

2. 云南电网有限责任公司昆明供电局, 云南 昆明 650299;

3. 中国计量大学机电工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 电力变压器是电网系统中的关键设备, 绕组又是变压器的核心部件。为了对带电绕组进行状态检测, 文中根据绕组结构参数随负载变化的关系, 建立振动幅值与电流之间的非线性模型, 证明了结构刚度与模型参数的数值关系, 并提出基于振动非线性特征的绕组压紧力评价方法。实验中, 在调整绕组轴向压紧力的同时进行短路负载实验, 获取电流与振动幅值的关系, 结果表明, 在绕组压紧力较小的情况下, 振动的非线性特征较显著, 且特征参数 C_3 准确反映了绕组结构等效刚度的变化。在实际应用中, 比较正常绕组和松动绕组对应的油箱表面振动特征, 并将结果以二维等高线的形式呈现, 结果表明, 油箱表面振动特征体现了测点附近绕组的结构状态。上述结果证明特征参数 C_3 是压紧力的单调函数, 当该数值大于 0.5 时绕组存在结构状态劣化。

关键词: 变压器绕组; 故障诊断; 电振动模型; 非线性特征; 压紧力状态; 振动图

中图分类号: TM41

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)06-0194-09

0 引言

电力变压器尤其是特高压交流变压器和换流变压器, 作为电能传输的重大装备, 其可靠性直接关系到电网的稳定运行。如何对在役变压器进行有效的状态检测是电力系统亟待解决的问题。目前, 普遍采用频率响应法和短路阻抗法来检测绕组状态^[1], 但这 2 种方法只针对处于停电状态的变压器。油色谱分析法主要针对绝缘油中的气体成分, 对绕组结构变化, 尤其是早期的压紧力松动不敏感^[2-3]。绕组机械结构抗短路强度不足是引起变压器损坏的主要原因之一^[4], 缺乏有效的在线检测方法是当前变压器状态评估面临的首要问题^[5-6]。

作为常规检测方法的补充, 基于振动的变压器绕组故障诊断方法仍在不断扩展^[7-10]。变压器振动主要来源于铁心和绕组两大部件, 铁心振动主要由硅钢片的磁致伸缩效应产生, 而绕组振动主要是因为线圈电流与漏磁场共同作用产生的电磁力^[11-12]。

绕组振动研究主要聚焦绕组的结构建模。文献[13]结合绝缘垫块的非线性特征和有限元模型分析了绕组的受迫振动特性。文献[14]提出了磁-机械耦合的绕组有限元模型, 能够准确计算强耦合下的振动特征。文献[15]将运行模态分析应用于绕组结构, 提出利用环境中的高斯白噪声作为激励, 并比较了运行模型分析结果与实际模态值。文

献[16-17]建立了绕组轴向的非线性振动模型, 提出了线饼、垫块和压板动态压缩力的计算方法。文献[18]分析了电磁力与结构参数耦合作用下的振动特征, 并提出了电-机械非线性耦合系数。文献[19]通过有限元仿真和实验分析了电磁力对稳态振动的影响, 建立了电磁力直流分量与固有频率变化的关系。电磁力对绕组作用体现在两方面, 一方面, 绕组在电磁力交流分量作用下产生受迫振动; 另一方面, 电磁力的直流分量会改变轴向应力分布, 进一步影响固有频率^[20]。因此, 研究电激励下的稳态振动响应与绕组负载电流之间的关系对运行变压器的故障诊断具有十分重要的意义。

正常变压器在稳态运行中产生的振动具有明显的周期性。文献[21-22]建立了绕组和铁心的基频振动与电参数的关系模型, 并解释了绕组和铁心中 100 Hz 振动的来源。文献[23]采用基于变分模态分解和排列熵的特征提取方法识别绕组松动状态, 并验证了该方法在 60%~110% 额定电流状态下的正确性。由于绕组主要产生 100 Hz 的振动, 文献[24]提出了利用油箱表面各测点 100 Hz 振动与电流的相关性来识别绕组状态。文献[25]利用基频振动相位识别绕组状态, 结果表明绕组变形和绕组松动都会产生较大的相位变化。文献[26]提出了基于谐波加权的振动特征, 并利用统计方法对不同状态的变压器进行分析, 结果表明异常变压器对应的高频谐波占比较显著。类似地, 文献[27]提出了频率复杂度、信号周期性和振动相似度等振动特征

收稿日期: 2024-04-07; 修回日期: 2024-06-15

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(LY22F030001)

量,并对 100 多台不同电压等级的变压器进行统计分析,结果表明振动特征能有效区分变压器状态。近年来,以经验小波分析、经验模态分解为代表的现代信号处理技术的发展为非平稳振动信号分析奠定了基础^[28-32]。

从上述文献和研究来看,现有非线性振动模型普遍采用数值分析法,无法直接提取表征绕组结构参数的振动特征。文中在前期基频振动模型的基础上,引入电磁力对结构参数的影响,重构了基频振动模型。此外,研究了负载电流与基频振动幅值之间的非线性变化关系,并建立了非线性特征与绕组结构之间的内在联系。

1 理论模型

1.1 运行变压器绕组振动模型

电力变压器绕组的典型结构如图 1 所示,绕组由分布均匀的线饼组成,线饼由绝缘纸包裹的铜导体组成,线饼之间用绝缘垫块隔开。前期研究表明这种均匀分布且对称的结构可用一个多自由度的数学模型描述。模型中, m 为每个线饼的质量,绝缘材料用刚度 k 和阻尼 c 的组合表示,这 3 个参数被称为绕组的机械结构参数。此外, f_i 、 x_i 分别为第 i 个线饼的电磁力和位移; N 为线饼总数。绕组单元固定在上、下夹板之间,下夹板与油箱底部固定,可认为位移为 0,上夹板提供恒定的轴向压紧力。图 1 最右侧为单自由度简化模型, f_0 、 x 分别为单自由度上的应力和位移响应。

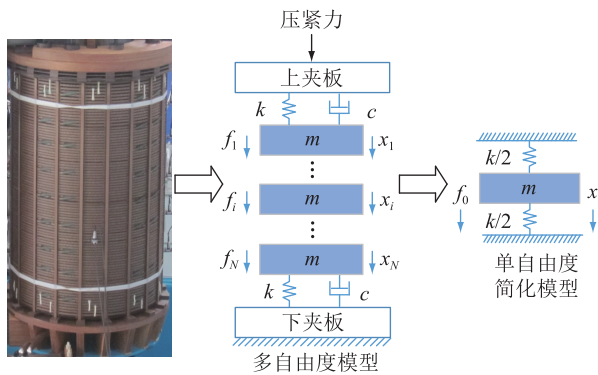


图 1 变压器绕组数学模型

Fig.1 Mathematical model of transformer windings

假设铁心和铁轭的刚度非常大,轴向绕组振动模型可以描述为:

$$M\ddot{\mathbf{x}} + C\dot{\mathbf{x}} + K\mathbf{x} = \mathbf{f} \quad (1)$$

式中: M 、 C 、 K 分别为质量、阻尼和刚度矩阵; \mathbf{x} 、 \mathbf{f} 分别为位移和电磁力矢量。有别于静态绕组,变压器正常工作时线饼受电磁力影响。电磁力与电流平方成正比,可以表示为:

$$f_i(t) = F_i(1 - \cos(2\omega t)) \quad F_i \propto I^2 \quad (2)$$

式中: F_i 为第 i 个线饼受到的电磁力幅值; I 、 ω 分别为电流有效值和频率。可将电磁力分解为直流分量和交流分量,其中直流分量影响绕组结构参数,而交流分量作为谐响应的激励。

绕组中的绝缘材料具有明显的非线性应力-应变特性。图 2 为实验变压器中绝缘材料所对应的机械特征曲线,可用二次曲线拟合,且其等效刚度 k 可表示为:

$$\begin{cases} \sigma = a\varepsilon + b\varepsilon^2 \\ k \propto \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = a + 2b\varepsilon \end{cases} \quad (3)$$

式中: ε 、 σ 分别为应变和应力; a 、 b 为固定的比例系数。根据图 2 中的拟合结果可得, $a = 1.0$ MPa, $b = 450$ MPa。

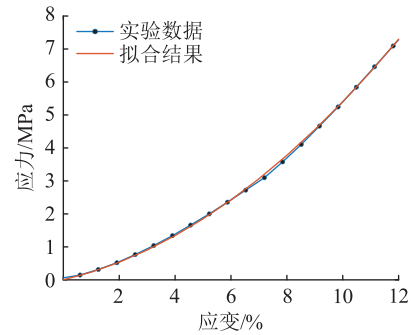


图 2 绝缘材料应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of insulations

根据式(2)可知,电磁力的直流分量会影响绕组的轴向应力分布。以 110 kV 变压器绕组为例,正常绕组的压紧力在 5 MPa 左右,而电磁力引起的应力变化通常为 kPa 级。当压紧力足够大时,电磁力对压紧力分布几乎不存在影响。

对于多自由度系统而言,其任意阶的固有频率 ω_n 与刚度 k 的关系可表示为:

$$\omega_n = \gamma\sqrt{k/m} \quad (4)$$

式中: γ 为与结构尺寸有关的常数。

对式(3)中的 k 求导,并计算 ω_n 对 k 的导数,如式(5)所示。

$$\begin{cases} \frac{dk}{d\sigma} \propto 2b \frac{d\varepsilon}{d\sigma} \propto 2bk^{-1} \\ \frac{d\omega_n}{dk} = 0.5\gamma m^{-0.5} k^{-0.5} \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5)可得,应力变化 $\Delta\sigma$ 对固有频率变化 $\Delta\omega_n$ 的影响如下:

$$\Delta\omega_n/\Delta\sigma \propto \gamma b m^{-0.5} k^{-1.5} \quad (6)$$

结合式(4)和式(6),并用电磁力变化 ΔF 代替

应力变化 $\Delta\sigma$,可得固有频率变化率的表达式为:

$$\Delta\omega_n/\omega_n = \lambda k^{-2} \Delta F \quad (7)$$

式中: λ 为常数,与绕组几何尺寸有关。前期研究^[19-20]通过有限元仿真和实验证明了松动绕组的固有频率更易受电磁力直流分量影响。

1.2 非线性电振动模型

在变压器绕组短路实验中,电流的频率为 50 Hz,因此电磁力交流分量的频率为 100 Hz。在不考虑固有频率随负载变化的情况下,振动幅值与电流平方成线性关系。实际绕组振动幅值不仅受电流变化影响,还受固有频率变化的影响。以图 1 中的单自由度简化模型为例,分析由固有频率变化引起的谐响应幅值变化。假设系统受到幅值为 F 、频率为 ω 的激励力作用:

$$m\ddot{x} + kx = F\sin(\omega t) \quad (8)$$

其稳态响应的表达式为:

$$\begin{cases} x(t) = X\sin(\omega t) \\ X = \frac{F/k}{1 - \omega^2/\omega_n^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中: X 为振动位移幅值,当 ω_n 与 ω 数值接近时,幅值达到最大。同时考虑激励力和固有频率对幅值的影响,可将幅值变化表示为:

$$dX = \frac{\partial X}{\partial \omega_n} d\omega_n + \frac{\partial X}{\partial F} dF \quad (10)$$

$$\frac{\partial X}{\partial \omega_n} = -\frac{2F}{m} \times \frac{\omega_n}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2} \quad (11)$$

$$\frac{\partial X}{\partial F} = \frac{1}{m(\omega_n^2 - \omega^2)} \quad (12)$$

结合式(10)一式(12)和式(7)可得:

$$dX = \frac{1}{m(\omega_n^2 - \omega^2)} dF - \frac{2F}{m^2} \times \frac{\lambda k^{-1}}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2} dF \quad (13)$$

对式(13)进行积分,用电流平方 I^2 代替电磁力 F ,并代入初始条件 $I=0, X=0$,可得:

$$X = C_1 I^2 - C_2 I^4 \quad (14)$$

$$\begin{cases} C_1 \propto \frac{1}{\omega_n^2 - \omega^2} \\ C_2 \propto \frac{1}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2} \times \frac{1}{k} \end{cases} \quad (15)$$

式中: C_1, C_2 为绕组结构非线性特征参数。

式(14)为考虑结构非线性条件的绕组电振动模型。由式(15)可知, C_1 和 C_2 均和固有频率与激励频率之间的差值有关,不能直接用于表征压紧力的变化,于是引入新的特征参数 C_3 :

$$C_3 = \left| \frac{C_2}{C_1^2} \right| \propto \frac{1}{k} \quad (16)$$

绕组等效刚度与轴向压紧力直接相关,且在压紧力较小时刚度变化较显著,因此, C_3 可用于绕组的压紧力状态检测。根据式(16)可知,压紧力减小时绕组对应的 C_3 会显著增大。

1.3 测试数据处理流程

在变压器绕组短路实验中,可通过测量电流与振动幅值的数值关系识别电振动模型中的 C_1 和 C_2 。实验测量采用加速度传感器,第 j 次测量对应的加速度幅值 A_j 和位移幅值 X_j 满足 $A_j = |\omega^2 X_j|$ 。假设实验中得到的电流有效值序列 Q 和对应 100 Hz 幅值序列 A 分别为:

$$\begin{cases} Q = \{I_1, I_2, \dots, I_T\} \\ A = \{A_1, A_2, \dots, A_T\} \end{cases} \quad (17)$$

式中: T 为序列长度。

为了避免振动传递和测量仪器对测试结果的影响,以额定负载下的电流有效值 I_N 和振动幅值 A_N 为基准,对上述两序列进行归一化处理。利用最小二乘法进行参数拟合可得:

$$C_1 = \frac{\sum_j I_j^6 \sum_j A_j I_j^4 - \sum_j I_j^8 \sum_j A_j I_j^2}{\sum_j I_j^6 \sum_j I_j^6 - \sum_j I_j^8 \sum_j I_j^4} \quad (18)$$

$$C_2 = \frac{\sum_j I_j^4 \sum_j A_j I_j^4 - \sum_j I_j^6 \sum_j A_j I_j^2}{\sum_j I_j^6 \sum_j I_j^6 - \sum_j I_j^8 \sum_j I_j^4} \quad (19)$$

2 实验验证

2.1 实验平台搭建

文中实验对象为 SZ9-50000/110 型号的三相变压器,并从中选取 C 相绕组。变压器油箱的长、宽分别为 4 900、1 670 mm,绕组高度为 1 330 mm,铁心直径为 620 mm。在实验中,绕组和铁心固定在油箱内,并保持无油状态。振动传感器采用机械支架固定在线饼上,其型号为 PCB 608A11。在轴向均匀选取 5 个测点,其中 3 号测点处于绕组中心位置,测点布置如图 3 所示。

实验通过调整绕组压紧力模拟绕组结构的衰退过程,如图 3 所示,绕组的顶部安装了液压顶,并通过液压泵调节压紧力大小。将绝缘垫块上 5 MPa 左右的标准压紧力设定为 100%,以间隔调整的模式,将压紧力从 20% 调整到 100%。

短路负载实验过程中,将低压侧短路,并在高压侧加压。假设额定电流数值为 100%,为获取不同负载电流下的绕组振动,电流每增加或减少 10% 记录一次数据。实验过程中,电流和振动信号同步采样,并将采样率设置为 10 kHz。

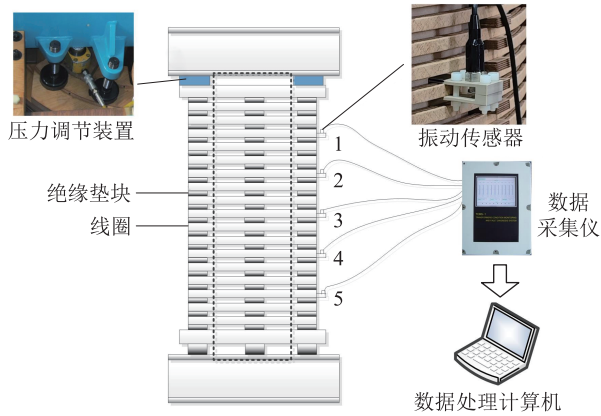


图3 绕组实验平台

Fig.3 Experimental platform of windings

2.2 实验数据分析

以测点2在100%负载电流下的振动信号为例,不同压紧力下的振动时域和频域如图4所示。与理论模型相同,在50 Hz 电流作用下,绕组的振动几乎为100 Hz。

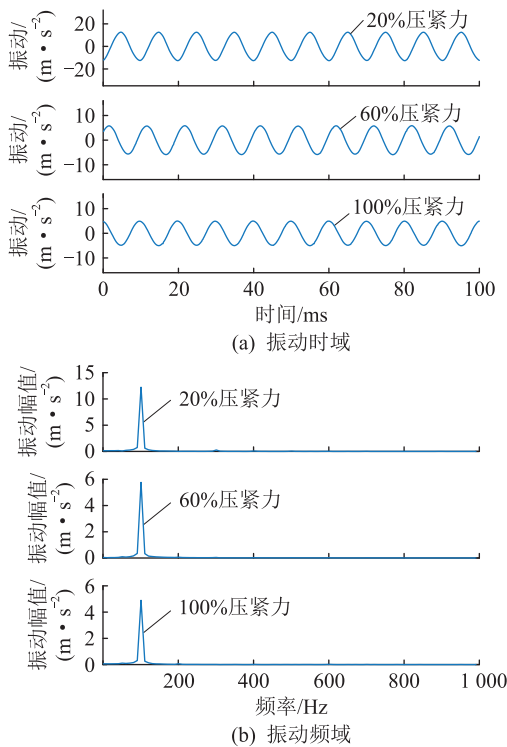


图4 测点2在100%负载电流下的振动

Fig.4 Vibrations of measuring point 2 under 100% load current

图5为测点2的振动幅值与电流有效值平方的关系。当压紧力接近100%时,振动幅值与电流几乎成线性关系。当压紧力接近20%时,曲线存在明显的上翘,式(14)所示模型更适合两者之间的非线性关系。

图6和图7分别为对称测点,即测点2和测点4的非线性特征参数与压紧力的关系。根据式(15)

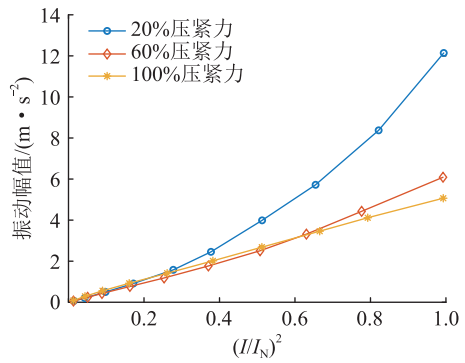


图5 测点2 振动幅值与电流平方的关系

Fig.5 Relationship between vibration amplitude and current squared of point 2

可知, C_1 和 C_2 并不是压紧力的单调函数,在 ω_n 与 ω 接近时存在极值点。在压紧力调整过程中,绝缘垫块的等效刚度在变化,因此固有频率发生变化,而激励力频率 ω 保持不变。根据图6中的特征变化趋势,测点2的 C_1 和 C_2 在80%压紧力下达到极值,而 C_3 具有明显的单调性。由于测点2和测点4关于中心点对称,其振动特征具有相似性。

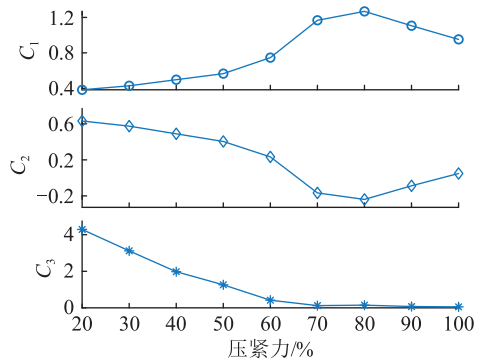


图6 测点2 非线性特征参数与压紧力的关系

Fig.6 Relationship between nonlinear characteristic parameters and clamping force for point 2

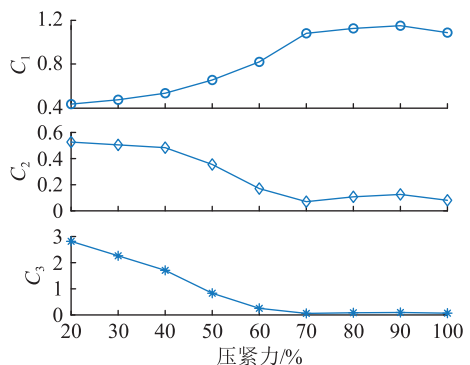


图7 测点4 非线性特征参数与压紧力的关系

Fig.7 Relationship between nonlinear characteristic parameters and clamping force for point 4

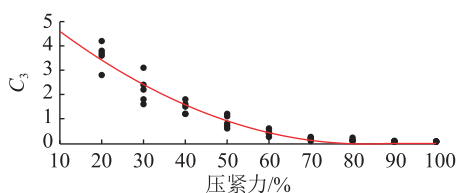
绕组5个测点的非线性特征参数 C_3 在不同压紧力下的数值如表1所示。实验结果表明,当压紧

力小于 60% 时,特征值变化较为显著;当压紧力大于 70% 时,特征值接近 0。因此,特征参数 C_3 更适用于检测绕组是否存在松动。在上述结果基础上,计算各测点 C_3 的平均值,并拟合其随压紧力变化的趋势,拟合结果见图 8(a)。图 8(b) 展示了绝缘垫块等效刚度 k 与压紧力的变化关系,其中等效刚度 k 根据式(3)和绝缘垫块的实际几何参数计算得到。图中的红色拟合曲线具有相同的趋势,这证明 C_3 与等效刚度 k 有关,符合式(16)中 C_3 数值与等效刚度成反比的结论,可用于表征绕组压紧力状态。

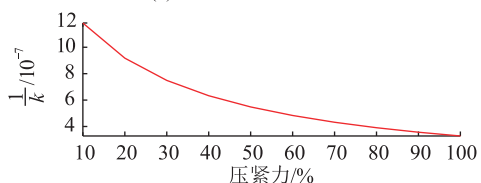
表 1 非线性特征参数 C_3 与压紧力关系

Table 1 Relationship between nonlinear characteristic parameter C_3 and clamping force

压紧力/%	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5
20	3.81	4.23	3.63	2.89	3.73
30	1.67	3.11	2.40	2.24	1.81
40	1.29	1.83	1.51	1.62	1.25
50	1.05	0.95	0.73	0.81	0.63
60	0.62	0.40	0.47	0.25	0.42
70	0.25	0.15	0.15	0.08	0.23
80	0.22	0.12	0.09	0.09	0.10
90	0.07	0.07	0.05	0.06	0.09
100	0.06	0.05	0.05	0.06	0.07



(a) 振动特征参数变化趋势



(b) 刚度变化趋势

图 8 非线性特征参数随压紧力变趋势

Fig.8 Nonlinear characteristic parameter as a function of clamping force

3 现场测试

3.1 测试平台

在上述实验验证中,采集的振动直接来源于绕组内部,而在实际测试中,无法将振动传感器放置在油箱内部,只能将其布置在靠近绕组的油箱表面。在现场测试中,采用与实验验证相同型号的变压器(SZ9-50000/110),验证振动传递对振动特征的影响。图 9 为测试变压器油箱表面的振动测点分布,传感器共有 25 个,分成 5 行 5 列。

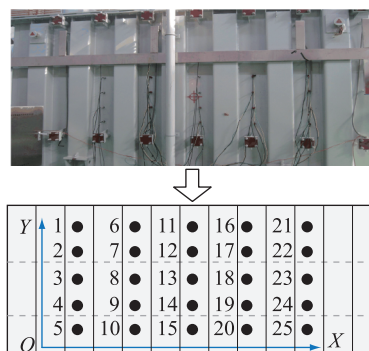


图 9 油箱表面振动测点布置

Fig.9 Arrangement of measuring points on the tank

文中测试模拟不同绕组故障类型和通电类型对油箱表面振动的影响。测试采用短路负载加压方式,并间隔采集电流在 0~100% 额定值过程中的油箱表面振动。测试共分成 3 组,如表 2 所示。测试 1 的对象是 100% 压紧力的变压器,采用三相对称加压方式。通过调节绕组上的压紧螺栓,在测试 2 和测试 3 中将 B 相的压紧力调整为 50%,其他两相保持不变。测试 2 仅对 B 相进行加压,而测试 3 对三相进行加压。

表 2 模拟故障列表

Table 2 List of simulated faults

测试编号	故障类型	通电类型
1	无故障	三相通电
2	B 相 50% 压紧力	B 相通电
3	B 相 50% 压紧力	三相通电

3.2 数据分析与讨论

在测试中,同步采集 25 个测点的振动。图 10—图 12 分别为油箱表面 3 个典型测点在测试 1 (无故障)、测试 2 和测试 3 中的振动时域和幅值趋势。将幅值趋势中的 100 Hz 幅值和电流都先进行归一化。从图 10 中可以看出压紧力正常的绕组以 100 Hz 振动为主。测试 1 中的测点振动幅值与电流平方几乎成线性关系,与图 5 的实验结果类似。由图 11 可知,测试 2 中 3 个典型测点在压紧力减小后出现少量 200 Hz 谐波,测点振动幅值随电流增大而快速增大。由图 12 可知,测试 3 中测点 2 和测点 22 的幅值变化趋势与测试 1 相似,而测点 12 的振动幅值与电流平方的非线性较显著。

在获取各测点振动幅值和电流有效值的基础上,计算对应的非线性特征参数 C_3 ,并以二维等高线图的形式呈现油箱表面各位置处的振动特征。图 13(a)—(c)分别为测试 1、测试 2 和测试 3 对应的特征参数 C_3 的二维分布图,其中横、纵坐标的数

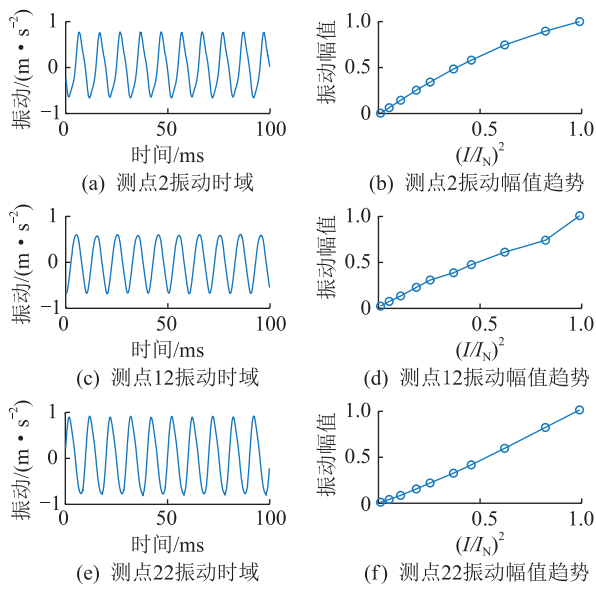


图 10 测试 1 中振动时域和幅值的趋势

Fig.10 Vibration time-domain and amplitude trend of test 1

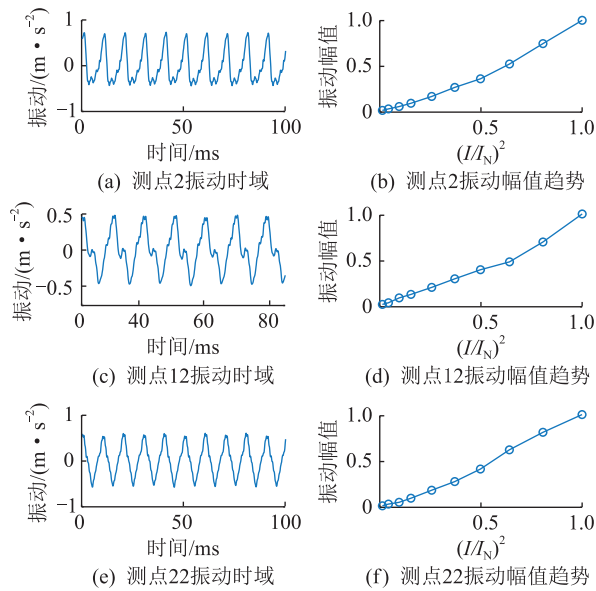


图 11 测试 2 中振动时域和幅值的趋势

Fig.11 Vibration time-domain and amplitude trend of test 2

值分别为 X、Y 方向上油箱表面的测点位置,与图 9 中的坐标轴对应。由图 13(a)可知,当绕组压紧力正常时,各测点的 C_3 值均小于 0.2。当 B 相绕组发生松动,并只对 B 相进行加压时,油箱表面各测点的 C_3 值均超过 0.5,且在靠近 B 相绕组上部位置时 C_3 具有最大值,其结果如图 13(b)所示。在测试 3 中,B 相绕组发生松动,而其他两相结构正常。当采用三相加压方式时,油箱表面振动实际是各相振动的混合。根据图 13(c)可知,B 相附近油箱表面对应的 C_3 值最大,特征值朝 A 相和 C 相方向逐渐递减。

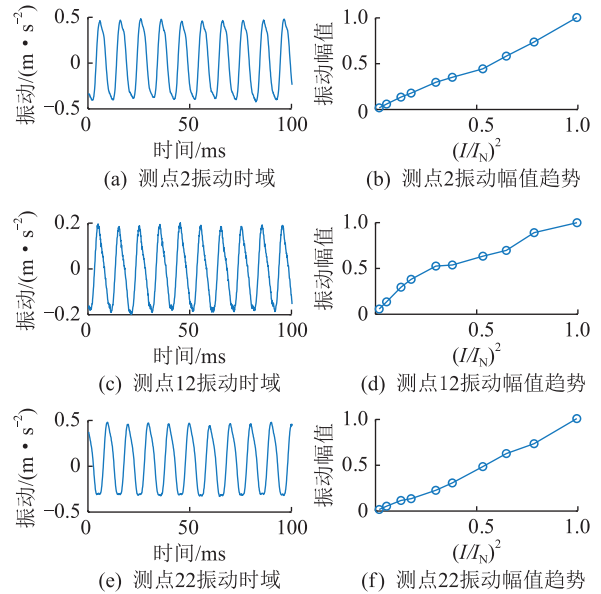
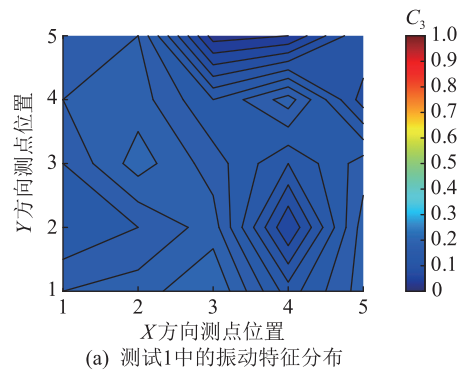


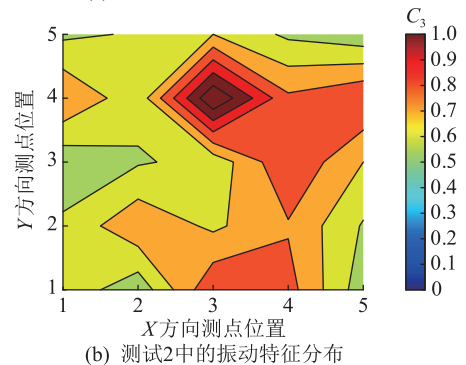
图 12 测试 3 中振动时域和幅值的趋势

Fig.12 Vibration time-domain and amplitude trend of test 3

最后,选取各相绕组附近 5 个测点,计算其特征值的平均值,结果如表 3 所示。受绝缘油阻尼、振动混合等因素影响,油箱表面振动特征与绕组振动特征存在细小差异。在测试 1 和测试 2 中,各相之间的数值相似,且与图 8(a)中的单绕组实验结果相近。在测试 3 中,A 相和 C 相绕组都是正常绕组,受 B 相振动传递影响,其特征平均值大于测试 1 中的数值,而 B 相平均值则接近测试 2 中的数值。上述结果证明了油箱表面测点的振动特征主要受邻近绕组的结构状态影响。



(a) 测试1中的振动特征分布



(b) 测试2中的振动特征分布

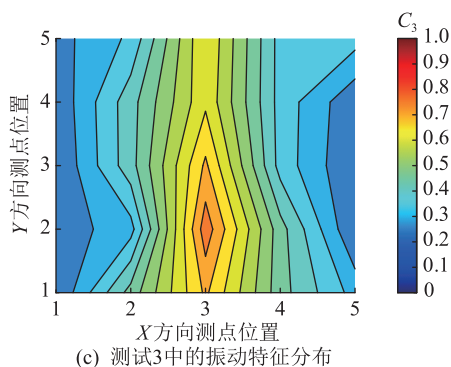


图 13 油箱表面振动特征分布

Fig.13 Distribution of the tank vibration characteristics

表 3 邻近测点特征平均值比较

Table 3 Comparison of average characteristics of adjacent measurement points

测试编号	A 相	B 相	C 相
1	0.17	0.15	0.16
2	0.64	0.82	0.67
3	0.27	0.71	0.33

4 结论

文中针对运行变压器绕组结构,根据不同电磁力下的结构参数特征,建立了负载电流与基频振动幅值之间的非线性模型,提出了利用稳态响应下的非线性参数来诊断绕组压紧力状态,并得到以下结论:

(1) 在原有的线性绕组电振动模型基础上进行改进,当压紧力减小时,振动响应受电磁力和结构参数的双重影响,非线性特征变得显著。文中所提非线性振动模型更适合描述负载电流与振动幅值的关系。

(2) 根据电流与振动的实验数据提取特征参数 C_1 、 C_2 和 C_3 。 C_1 和 C_2 分别表示结构的线性和非线性程度,随着压紧力减小, C_1 和 C_2 分别呈现减小和增大趋势,但并不具备整体的单调性。 C_3 为 C_2 和 C_1 的比值,与结构的等效刚度成反比。随着压紧力减小, C_3 值单调递增,这说明绕组结构非线性特征变得显著。

(3) 文中对油箱表面振动进行大规模布点测量,并采用二维等位线图的方式展示测试结果。受绝缘油阻尼、振动混合等因素影响,油箱表面的振动特征与绕组振动特征存在细小差异,但仍体现出了邻近绕组的结构状态。

参考文献:

[1] 付强,宇文瑶,刘代飞. 基于多指标融合的绕组混合故障分析方法[J]. 高电压技术,2021,47(2):537-545.

FU Qiang, NING Wenyao, LIU Daifei. Analysis method for mixed faults in winding based on multi-index fusion[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 537-545.

[2] 张燕,方瑞明. 基于油中溶解气体动态网络标志物模型的变压器缺陷预警与辨识[J]. 电工技术学报, 2020, 35(9): 2032-2041.

ZHANG Yan, FANG Ruiming. Fault detection and identification of transformer based on dynamical network marker model of dissolved gas in oil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(9): 2032-2041.

[3] 王艳,李伟,赵洪山,等. 基于油中溶解气体分析的 DBN-SSAELM 变压器故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 32-42.

WANG Yan, LI Wei, ZHAO Hongshan, et al. Transformer DGA fault diagnosis method based on DBN-SSAELM[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 32-42.

[4] 罗竣匀,刘君,胡晓,等. 基于有限元的电力变压器抗短路能力校核方法研究[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(2): 78-87.

LUO Junyun, LIU Jun, HU Xiao, et al. Research on finite element-based calibration method for power transformer's ability to resist short-circuit[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(2): 78-87.

[5] 袁婉玲,崔子轩,禹洪波,等. 基于粗糙集-G1 法组合赋权的变压器健康状态评估[J]. 电力建设, 2022, 43(3): 50-57.

YUAN Wanling, CUI Zixuan, YU Hongbo, et al. Transformer health status evaluation based on rough set G1 combined weighting[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(3): 50-57.

[6] 杜江,孙铭阳. 基于变权灰云模型的变压器状态层次评估方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(20): 4306-4316.

DU Jiang, SUN Mingyang. Hierarchical assessment method of transformer condition based on weight-varying grey cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(20): 4306-4316.

[7] 陆云才,廖才波,李群,等. 基于声纹特征和集成学习的变压器缺陷诊断方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 46-55.

LU Yuncai, LIAO Caibo, LI Qun, et al. Transformer fault diagnosis method based on voiceprint feature and ensemble learning[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5): 46-55.

[8] 郝艳,咸日常,冷学冰,等. 基于电压、电流不平衡度差值的干式变压器匝间短路故障识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 12-21.

HAO Yan, XIAN Richang, LENG Xuebing, et al. Identification method for an inter-turn short circuit fault of a dry-type transformer based on voltage and current imbalance difference[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 12-21.

[9] 蔡文方,聂玲,应光耀,等. 振动分析法在变压器故障诊断及隐患治理中的应用[J]. 浙江电力, 2022, 41(2): 53-59.

CAI Wenfang, NIE Ling, YING Guangyao, et al. Application of vibration analysis in transformer fault diagnosis and hidden peril management[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(2): 53-59.

[10] 薛健伺,马宏忠,杨洪苏,等. 基于格拉姆角场与迁移学习-

- AlexNet的变压器绕组松动故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(24):154-163.
- XUE Jiantong, MA Hongzhong, YANG Hongsu, et al. A fault diagnosis method for transformer winding looseness based on Gramian angular field and transfer learning-AlexNet[J]. Power System Protection and Control,2023,51(24):154-163.
- [11] 祝丽花,王斌,刘松,等. 不同负载对干式变压器电磁振动的影响分析[J]. 电工技术学报,2018,33(7):1599-1606.
- ZHU Lihua, WANG Bin, LIU Song, et al. Research on electromagnetic vibration of dry type transformer under different types of load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018,33(7):1599-1606.
- [12] 李琪菡,张振东,刘浩,等. 影响油浸式电力变压器振动因素的研究[J]. 电测与仪表,2023,60(9):96-101.
- LI Qihan, ZHANG Zhendong, LIU Hao, et al. Study on factors affecting vibration of oil immersed power transformers[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(9):96-101.
- [13] WANG S, WANG S H, ZHANG N M, et al. Calculation and analysis of mechanical characteristics of transformer windings under short-circuit condition[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2019,55(7):8401804.
- [14] JIN M K, CHEN W J, ZHAO Y, et al. Coupled magnetic-structural modeling of power transformer for axial vibration analysis under short-circuit condition[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2022,58(7):8401309.
- [15] ZHANG F, JI S C, MA H, et al. Operational modal analysis of transformer windings[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2020,35(3):1285-1298.
- [16] 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.
- [17] 张凡,马程,李秀广,等. 计及振动响应的变压器绕组轴向机械强度动态评估方法研究[J]. 中国电机工程学报,2023,43(16):6494-6505.
- ZHANG Fan, MA Cheng, LI Xiuguang, et al. Dynamic assessment of windings' axial mechanical strength in power transformers considering the vibration response[J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(16):6494-6505.
- [18] WU S Y, ZHANG F, DANG Y L, et al. A mechanical-electromagnetic coupling model of transformer windings and its application in the vibration-based condition monitoring[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2023,38(4):2387-2397.
- [19] HONG K X, PAN J, JIN M. Transformer condition monitoring based on load-varied vibration response and GRU neural networks[J]. IEEE Access,2020,8:178685-178694.
- [20] HONG K X, JIN M, HUANG H. Transformer winding fault diagnosis using vibration image and deep learning[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2021,36(2):676-685.
- [21] GARCIA B, BURGOS J C, ALONSO A M. Transformer tank vibration modeling as a method of detecting winding deformations-part I: theoretical foundation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2006,21(1):157-163.
- [22] 曹辰,路敦林,徐博文,等. 基于弹性力学-热力学的变压器铁芯磁致伸缩振动模型与松动故障诊断方法[J]. 高电压技术,2024,50(5):2146-2157.
- CAO Chen, LU Dunlin, XU Bowen, et al. Magnetostrictive vibration model and loosening fault diagnosis method of transformer core based on elastodynamics-thermodynamics[J]. High Voltage Engineering,2024,50(5):2146-2157.
- [23] 顾仲翔,马宏忠,张勇,等. 基于VMD与优化SVM的变压器绕组松动缺陷振动信号诊断方法[J]. 高压电器,2023,59(1):117-125.
- GU Zhongxiang, MA Hongzhong, ZHANG Yong, et al. Vibration signal diagnosis method of transformer winding looseness defect based on VMD and optimized SVM[J]. High Voltage Apparatus,2023,59(1):117-125.
- [24] HONG K X, HUANG H, ZHOU J P. Winding condition assessment of power transformers based on vibration correlation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4):1735-1742.
- [25] ZHENG J, HUANG H, PAN J, et al. Feature extraction of mechanical faults from phase variation in transformer vibration[J]. Applied Acoustics,2022,185:108440.
- [26] 杜厚贤,刘昊,雷龙武,等. 基于振动信号多特征值的电力变压器故障检测研究[J]. 电工技术学报,2023,38(1):83-94.
- DU Houxian, LIU Hao, LEI Longwu, et al. Power transformer fault detection based on multi-eigenvalues of vibration signal[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023,38(1):83-94.
- [27] HONG K X, HUANG H, FU Y Q, et al. A vibration measurement system for health monitoring of power transformers[J]. Measurement,2016,93:135-147.
- [28] 张九思,马宏忠,李勇,等. 基于VMD的变压器绕组松动故障分析与诊断[J]. 高压电器,2021,57(8):198-208.
- ZHANG Jiusi, MA Hongzhong, LI Yong, et al. Analysis and diagnosis on looseness of transformer winding based on VMD[J]. High Voltage Apparatus,2021,57(8):198-208.
- [29] 赵妙颖,许刚. 基于经验小波变换的变压器振动信号特征提取[J]. 电力系统自动化,2017,41(20):63-69,91.
- ZHAO Miaoying, XU Gang. Feature extraction for vibration signals of power transformer based on empirical wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(20):63-69,91.
- [30] 邓雯瀚,苗宇,许逵,等. 电力变压器状态评估方法的应用及展望[J]. 智慧电力,2023,51(10):93-102.
- DENG Wenhan, MIAO Yu, XU Kui, et al. Application and prospect of condition assessment method of power transformer[J]. Smart Power,2023,51(10):93-102.
- [31] 赵书涛,李小双,李大双,等. 基于相空间重构与GSA-LVQ

的有载调压变压器分接开关机械故障诊断[J]. 电测与仪表, 2023, 60(10):136-141.

ZHAO Shutao, LI Xiaoshuang, LI Dashuang, et al. Mechanical fault diagnosis of on-load voltage regulating tap-changer based on CEEMD-phase space reconstruction and GSA-LVQ[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(10):136-141.

[32] 崔星, 陈静, 孙婧琪, 等. 基于 ICEEMDAN 多尺度模糊熵和 MVO-KELM 的变压器绕组铁心机械故障诊断[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(10):81-90.

CUI Xing, CHEN Jing, SUN Jingqi, et al. Mechanical fault diagnosis for transformer winding core based on ICEEMDAN

multi-scale fuzzy entropy and MVO-KELM[J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(10):81-90.

作者简介:



钱国超

钱国超(1981),男,硕士,正高级工程师,从事高电压试验技术、电气设备状态智能诊断与评估工作(E-mail:qianguochao@yn.csg.cn);

胡锦涛(1995),男,硕士,工程师,从事电力变压器绝缘特性相关工作;

代维菊(1989),女,硕士,工程师,从事电力系统与电能传送相关技术工作。

Transformer winding condition detection based on the nonlinear characteristics of vibrations

QIAN Guochao¹, HU Jin¹, DAI Weiju¹, WANG Haozhou², ZHAO Hanwu¹, HONG Kaixing³

(1. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China;

2. Kunming Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650299, China;

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract. Power transformers are critical devices in power grid systems, with windings as their core components. To perform state detection on online windings, this paper establishes a nonlinear model between vibration amplitude and current based on the relationship between winding structural parameters and load variations. The numerical relationship between structural stiffness and model parameters is proved, and a winding clamping force evaluation method based on the nonlinear characteristics of vibrations is proposed. In the experiment, the relationship between current and vibration amplitude is obtained by adjusting the axial clamping force of windings and performing short-circuit load tests. The experimental results show that the nonlinear characteristics of vibrations are significant when the winding clamping force is small, and the characteristic parameter C_3 accurately reflects the equivalent stiffness change of the winding structure. In practical applications, the vibration characteristics of oil tank surface corresponding to normal windings and loose windings are compared, and the results are presented in the form of two-dimensional contour plot. The results indicate that the vibration characteristics of the tank reflect the structural state of the winding near the measurement point. The above results demonstrate that the parameter C_3 is a monotonic function of clamping force, and there is structural degradation in the winding when this value is greater than 0.5.

Keywords: transformer winding; fault diagnosis; electric-vibration model; nonlinear characteristics; clamping force state; vibration image

(编辑 陆海霞)