

DOI: 10.7652/xjtuxb201702016

短路冲击下变压器振动频响函数研究

张凡¹, 汲胜昌¹, 祝令瑜¹, 占草¹, 方超², 杜玮², 周倩雯²

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 国家电网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 430074, 武汉)

摘要: 针对离线测试方法无法对遭受短路冲击后的绕组状态进行在线评估和诊断的问题,提出了一种利用冲击电流下绕组振动的频响函数来表征绕组机械状态的方法。该方法利用振动信号和冲击电流构建了单输入多输出的振动系统,通过自功率谱密度函数获得短路冲击下变压器绕组振动的频响函数,并利用相关系数对多次短路冲击下绕组振动频响函数的相关性进行分析。对一台 220 kV 变压器短路冲击试验的研究结果表明,在多次短路冲击中,不同频响函数间的相关系数与相电抗的偏差之间存在一定的负相关关系,即相关系数随相电抗的偏差增大而降低,相电抗偏差越大,相关系数越低。该方法可以利用短路故障时的录波信息,通过绕组的振动频响函数和两次短路冲击的相关系数来表征变压器绕组的机械状态。

关键词: 电力变压器振动;短路冲击;频响函数;相关系数;故障诊断

中图分类号: TM835.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)02-0097-07

Frequency Response Function of Short Circuit Vibration for Power Transformer

ZHANG Fan¹, JI Shengchang¹, ZHU Lingyu¹, ZHAN Cao¹, FANG Chao²,
DU Wei², ZHOU Qianwen²

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

2. Wuhan Nari Limited Liability Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Offline method cannot make online diagnosis and assessment of transformer winding's mechanical condition once short-circuit occurs. A new method for characterizing the mechanical features is proposed via acquiring the frequency response function (FRF) of winding vibration under short-circuit impulse. The vibration signal from transformer oil tank and the short-circuit current from recorder are synthesized to establish a single-input and multiple-output vibration system, and the FRF of winding vibration is acquired in terms of the auto-power spectral density function. The correlation analysis determines the correlation coefficient (CC) of FRF under multiple short-circuit impulse. The short-circuit test for a 220 kV power transformer indicates that under multiple short-circuit impulse, the CC of FRF and the deviation of phase reactance obey the negative correlation, namely, the CC decreases with the increasing phase reactance deviation, and the larger the deviation of phase reactance, the smaller the CC. Compared with the traditional offline methods, this method takes advantages of the recorder information in the

收稿日期: 2016-04-02。 作者简介: 张凡(1991—),男,博士生;汲胜昌(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51377130)。

网络出版时间: 2016-11-04 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20161104.1956.014.html>

accident, and employs the FRF of winding vibration as well as CC between two short-circuit impulses to characterize the mechanical features of transformer winding.

Keywords: power transformer vibration; short-circuit; frequency response function; correlation coefficient; fault diagnosis

电力变压器作为电网中的重要设备在长期运行过程中可能会遭受多次外部短路冲击,使得变压器绕组的机械状况产生不可逆的累积变形,为电网的安全稳定运行带来巨大的隐患^[1-3]。因此,对于遭受短路冲击后的变压器进行绕组变形检测是十分必要的。

目前,变压器绕组变形的离线检测方法主要有低压脉冲法、短路电抗法、频率响应法以及扫频阻抗法^[4-6],但上述这些方法只能在离线状态下对变压器的电气机械结构特性进行诊断,无法满足带电或在线检测的要求。振动信号分析法通过监测变压器油箱表面的振动信号来对变压器状态进行监测,由于其易于实现在线监测、与被测系统无电气连接的特点,受到了广泛的关注,应用前景广阔^[7]。

国内外学者对于变压器振动的研究工作主要集中在变压器稳态运行条件下的振动特性、影响因素以及其在故障诊断中的应用^[8-12],对外部突发短路条件下变压器油箱表面振动信号的研究依然较少。实际上,变压器绕组变形往往是在多次短路冲击电流的作用下发生的,同时短路过程中的绕组振动远远大于铁心磁致伸缩引起的振动,更有利于及时准确地利用振动信号诊断分析绕组的机械状态。

对于变压器突发短路下的振动研究,主要集中在对振动信号进行处理分析,提取特征值以及机理建模。文献[13]采用振动烈度对各频率分量下的振动加速度进行了归一化的计算,并利用 Gabor 时频变换对突发短路冲击的振动信号进行了研究;文献[14-15]利用振动信号的包络线以及复小波时频分析技术,研究了多次短路冲击下变压器油箱振动信号的变化情况,从多次冲击过程中能量变化的角度对绕组状态进行了诊断;文献[16]对 500 kV 变压器绕组的模型进行了突发短路试验,研究了绕组幅向的振动情况;文献[17]采用有限元仿真软件,研究了短路过程中绕组不同位置处的振动规律;文献[18]通过解析算法,研究了短路冲击下铁心窗内外绕组不同位置的轴向位移规律以及绕组振动时电磁力的变化规律;文献[19-20]从绕组和压紧力的角度对绕组的轴向动力学进行了研究。上述研究成果为振动信号分析法在变压器突发短路过程中的应用奠定了一定的理论基础,但是对于变压器遭受短路冲

击电流下的故障诊断和状态评估依然不足。同时,在短路冲击下,三相绕组的短路相电抗会发生不同趋势的变化^[21],而现有的国家标准只是从短路电抗偏差的绝对值对变压器抗短路能力进行评估^[22],缺少对于电抗正负偏差条件下的判断。

本文从变压器绕组振动的动力学模型出发,研究了短路冲击电流下的变压器振动频响函数,并利用该方法对一台 220 kV 变压器的振动进行了冲击电流下频响函数的计算。在此基础上,获得了多次短路冲击下的频响函数的相关系数,结合短路电抗法的测量结果,研究了相关系数与电抗正负偏差的关系,为变压器短路冲击后的状态评估提供了一种新方法。

1 短路冲击电流下变压器振动机理

正常运行中电力变压器油箱的振动主要来自于铁心的磁致伸缩效应以及绕组在漏磁场中的受迫振动。其中铁心振动的基频为 100 Hz,加速度与电压的平方成正比,即 $a \propto u^2$ ^[11];绕组振动的基频为 100 Hz,加速度与电流的平方成正比,即 $a \propto i^2$ ^[11]。变压器发生外部短路故障时,绕组中会流过较大的冲击电流。在不同程度的变压器外部短路故障中,以变压器出口三相同同时对地的近区短路形成的短路电流最大。该故障发生时,流经变压器绕组的电流解析表达式如下

$$I = 2^{1/2} I_d \left[\cos(\alpha) \exp\left(-\frac{r_d}{L_d} t\right) - \cos(\omega_0 t + \alpha) \right] \quad (1)$$

式中: I_d 为三相稳态短路时的电流有效值; r_d 和 L_d 分别为短路简化回路的电阻与电感; ω_0 为电源的角频率 50 Hz; α 为短路时刻电压的相角。

由式(1)可得,当 $\alpha = 0$ 、 $t = 0.01$ s 时,电流达到最大值

$$I_m = 2^{1/2} I_d \left[\exp\left(-\frac{r_d \pi}{L_d \omega}\right) - \cos \pi \right] = K_d 2^{1/2} I_d \quad (2)$$

式中: K_d 为峰值因数,与变压器容量有关^[21]。变压器绕组在漏磁场中会受到幅向电动力和轴向电动力的作用,由于轴向和幅向绕组结构形式不同使得绕组的幅向刚性大于轴向刚性,因此变压器绕组振动主要以轴向振动为主,常以质量-弹簧-阻尼模型进

行等效^[23],如图1所示。

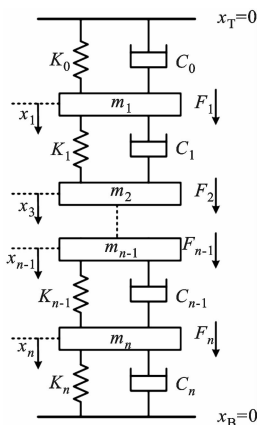


图1 饼式绕组质量-弹簧-阻尼模型

由绕组轴向振动数学模型,可得变压器绕组轴向振动的动力学方程组

$$\mathbf{M} \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} + \mathbf{C} \frac{d\mathbf{x}}{dt} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{A}_y I^2 + \mathbf{M}\mathbf{g} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为绕组质量矩阵; $\mathbf{x}$ 为线饼位移矩阵; $\mathbf{C}$ 为阻尼系数矩阵; $\mathbf{K}$ 为弹性系数矩阵; $\mathbf{A}_y$ 为电磁力矩阵系数; I 为电流幅值; g 为重力加速度。

由式(1)、式(3),可得 $\alpha=0$ 时的绕组轴向振动动力学方程

$$\mathbf{M} \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} + \mathbf{C} \frac{d\mathbf{x}}{dt} + \mathbf{K}\mathbf{x} = (\mathbf{M}\mathbf{g} + \mathbf{A}_y I_d^2 (\cos(2\omega_0 t) +$$

$$1 - 4\cos(\omega_0 t) \exp(-\beta t) + 2\exp(-2\beta t)))\epsilon(t) \quad (4)$$

式中: $\beta=r_d/L_d$ 。

通过求解式(4),可以获得变压器短路冲击过程中各线饼的位移^[24]。对获得的位移求取二阶导数即可获得绕组不同位置的振动加速度。对于大容量的电力变压器而言,短路冲击电流的第1个峰值将达到额定电流的10倍左右,这将使得绕组的振动远远大于铁心的振动,可以认为此时变压器的振动主要来自于绕组振动。因此,可以通过监测短路冲击下油箱表面的振动信号对电力变压器绕组的机械状态开展监测。

2 频响函数原理

在弹性振动的众多描述方法和信号处理方法中,频响函数能够直接反应激励和响应的关系,描述动力学系统自身内在频域表现的一种简单而直接的方法。通过频响函数可以对短路电流冲击下的绕组机械状态进行研究。

2.1 频响函数的定义

变压器的振动模型显然是一个单输入多输出

(SIMO)的机械系统,即短路电流作为单一输入,绕组不同线饼振动加速度作为系统的多个输出。对式(4)进行傅里叶变换可得绕组轴向位移的频响函数

$$\mathbf{H}(\mathbf{j}\omega) = \mathbf{A} \mathbf{I}_d^2 ((\pi\delta(\omega + 2\omega_0) + \pi\delta(\omega - 2\omega_0) + 2\pi\delta(\omega) + \frac{2}{2\alpha + \mathbf{j}\omega} + \frac{4(\alpha + \mathbf{j}\omega)}{(\alpha + \mathbf{j}\omega)^2 + \omega_0^2}) + 2\pi\mathbf{M}\mathbf{g}\delta(\omega)) / (\mathbf{M}(\mathbf{j}\omega)^2 + \mathbf{C}\mathbf{j}\omega + \mathbf{K}) \quad (5)$$

结合式(5),绕组轴向振动的频响函数为

$$\mathbf{H}_a(\mathbf{j}\omega) = (\mathbf{j}\omega)^2 \mathbf{H}(\mathbf{j}\omega) \quad (6)$$

根据所计算的变压器的物理结构,对式(5)、式(6)中的参数进行赋值,便可以获得理论上变压器三相同同时对地短路时线圈振动随短路电流的幅频特性曲线。实际上,变压器振动在传递到油箱表面的过程中会受到变压器结构、变压器油、油箱测点、短路位置和短路方式的影响,难以通过理论计算准确获得振动的频响函数。因此,在实际的操作中,仍然以黑箱模型对频响函数进行描述,即认为短路电流作为系统的单一输入激励,油箱表面不同位置的振动作为系统的多个输出。显然,这是一个单输入多输出的振动系统,油箱上测点的频响函数为

$$H_i(\omega) = \frac{Y_i(\omega)}{X(\omega)}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

式中: $Y_i(\omega)$ 和 $X(\omega)$ 分别为测点振动信号和短路电流的傅里叶变换。

在利用短路冲击电流和振动信号对频响函数进行计算时,需要对冲击电流和振动信号同时进行测量,测量精度会受到环境噪声的干扰。因此,难以通过式(7)对输入、输出进行傅里叶变换求得频响函数,只能采用功率谱估计的方法对频响函数进行估计^[25]。在众多的传递函数估计方法中, H_v 法虽然只能获得频响函数的幅频信息,但相比较 H_1 和 H_2 方法而言更接近实际的频响函数^[26]。

文献[13-15]指出,短路冲击电流下振动信号频带小于600 Hz,因此本文采用 H_v 法对0~600 Hz范围内的频响函数进行估计,计算式为

$$|H(\omega)|^2 = \frac{S_{yy}(\omega)}{S_{ii}(\omega)}, \quad \omega \in [0 \text{ Hz}, 600 \text{ Hz}] \quad (8)$$

式中: $|H(\omega)|$ 为频响函数的幅频特性; $S_{yy}(\omega)$ 和 $S_{ii}(\omega)$ 分别为电流平方和振动信号的自功率谱密度函数。

2.2 相关系数的计算原理

利用式(8)可以获得变压器单次短路冲击下箱体振动的频响函数,对于多次短路冲击则需要利用

相关系数对两次短路冲击的频响函数 0~600 Hz 幅频特性进行描述。相关系数的计算方法定义为:设有两个长度为 N 的频响函数幅值序列 $X(n)$ 、 $Y(n)$,且序列中的数为实数。首先用标准方差和协方差公式计算两个序列各自的标准方差 D_x 、 D_y 和协方差 C_{xy} ,则归一化协方差系数为^[27]

$$R_{xy} = -\log(1 - C_{xy} / (D_x D_y)^{1/2}) \tag{9}$$

相关系数越大,说明在两次短路冲击下的频响函数的幅频特性越接近,重合程度越高,即绕组的机械状态变化的程度越小。

3 变压器短路冲击振动试验

对一台送检的三相三绕组 220 kV 电力变压器,按照国家标准《电力变压器第 5 部分:承受短路的能力》(GB1094.5—2008)中的相关规定进行短路耐受能力的试验,被测试变压器如图 2 所示,参数见表 1。试验过程中,按照高-中、高-低短路分别对 A、B、C 三相绕组在最大分接、额定分接以及最小分接下各进行 3 次短路冲击试验,单次试验持续时间不小于 0.25 s,以检验该型变压器的动稳定性。每次短路冲击之后,对相电抗值进行测量^[22]。

表 1 220 kV 变压器参数

型号	SS11-240000/220
连接组标号	YNyn0d11
额定电压/kV	(220±2×2.5%),115,37
额定容量/MV·A	240,240,160
额定电流/A	629.8,1204.9,2 496.6
频率/Hz	50

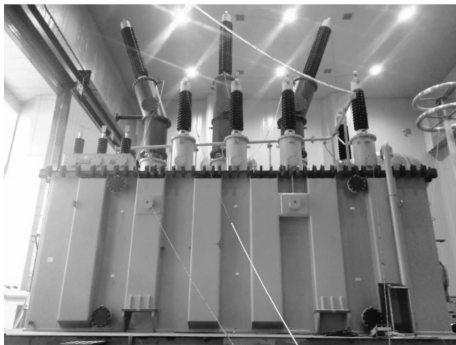


图 2 进行短路冲击试验的 220 kV 变压器

限于篇幅,本文只描述 B 相高低压短路的电流与振动信号以及频响函数幅频特性,并只针对高低压短路 3 相 9 次测试结果进行分析。

3.1 测试装置与测点位置

利用基于压电效应的振动加速度传感器,对短

路冲击过程中变压器油箱表面的振动信号进行监测。该传感器采用永磁体底座,可以牢固吸附在箱体表面,传感器参数如表 2 所示。采用同步采样方式,采样速率为 10^4 /s,采样深度为 16 bit。电流信号和振动信号的采集装置相互独立,电流信息通过电流互感器 AGV-500 获得,电流比为 5 000/1。

表 2 振动加速度传感器参数

型号	BZ1183
工作频带/kHz	0.5~20
灵敏度/ $\text{mV} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})^{-1}$	10
分辨率/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	10^{-3}
量程/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	±400

在做好相关仪器的电磁屏蔽工作的同时,选择油箱表面具有较大平板面积的区域安装振动加速度传感器,同时远离油箱表面的加强筋结构^[28],安装位置如图 3 所示。

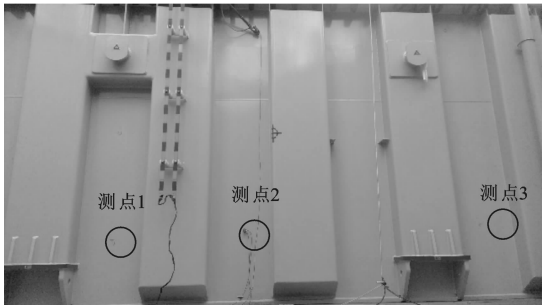


图 3 振动传感器安装位置

3.2 B 相绕组高-低压短路冲击试验

在额定分接开关位置处,根据预先短路法将三相绕组的低压侧全部短路接地,中压侧开路,中压中性点接地,采用单相电源将试验电压施加于高压 B 相套管和高压中性点 O_m 。在 3 次短路冲击时 B 相高压绕组的电流幅值及持续时间如表 3 所示。从录波仪上获得的第 2 次短路冲击时的电流如图 4 所示,该电流的对称幅值约为 2.4 kA,在短路之后的 0.01 s 时,短路电流达到峰值约为 6.6 kA,约为额定电流的 10 倍。

表 3 B 相高压绕组短路电流测量信息

分接位置	试验	相对称电流/A	相峰值电流/A	持续时间/s
额定分接	1	2 398	6 698	0.266
	2	2 394	6 583	0.266
	3	2 409	6 626	0.266

3.3 B 相短路冲击振动信号时域特点

保留短路合闸前的 0.05 s 和短路合闸后的

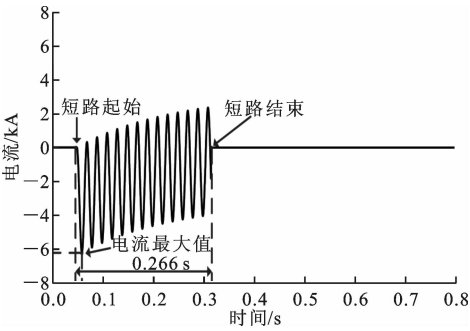


图 4 B 相高压绕组第 2 次短路冲击时的电流

0.75 s 的时域信号,油箱表面靠近 B 相绕组的测点 2 在 3 次高低压短路冲击时的振动信号如图 5 所示。从时域特点来看,油箱表面的振动在出现振动信号后的 0.05 s 左右达到振幅最大值,约 $-45\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,表现为垂直于油箱表面的收缩振动。强烈振动的持续时间和短路时间大致相等,短路结束后,振动幅值减弱,逐渐降至 0。从电流最大幅值和振动最大幅值的出现时刻来看,电流在短路后的 0.01 s 达到最大值,而短路振动在短路后的 0.05 s 附近达到最大值,两者并不相同,这可能与振动的传播过程有关。

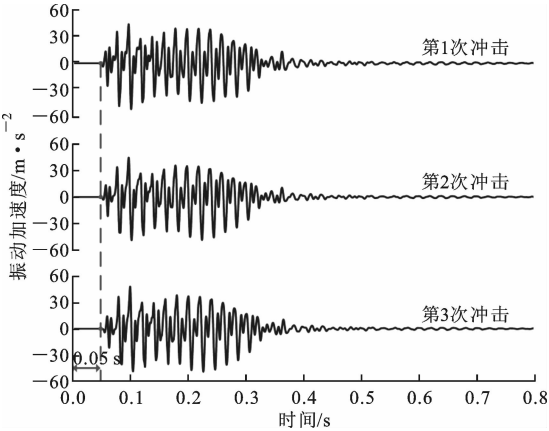


图 5 B 相 2 号测点 3 次短路冲击时域振动

从 3 次短路振动信号的时域特点来看,加速度信号在幅值上并未发生明显变化,尚无法直接定量地说明该变压器绕组是否未发生明显变形,还需进一步对结果进行分析。

4 结果分析

4.1 短路电抗法

根据高低压短路试验流程,A、B、C 三相分别在最大、额定以及最小分接开关位置处进行试验,因此三相电抗和短路电流分别具有如下的关系: $Z_A > Z_B > Z_C, i_A < i_B < i_C$ 。在每次短路冲击后对变压器的相电抗进行测量,结果如表 4 所示,其中相电抗的偏

差如下

$$\delta_i = \frac{Z_i - Z_0}{Z_0} \times 100\%, \quad i = 1, 2, 3 \quad (10)$$

式中: Z_0 和 Z_i 分别为短路冲击试验前后的电抗值。偏差极差定义如下

$$\delta_m = \delta_{\max} - \delta_{\min} \quad (11)$$

表 4 变压器短路电抗及偏差

试验	AO		BO		CO	
	Z_i/Ω	δ_i	Z_i/Ω	δ_i	Z_i/Ω	δ_i
原始值	55.063		49.411		43.941	
1	55.019	-0.08	49.486	0.15	43.903	-0.09
2	55.076	0.02	49.267	-0.29	43.916	-0.06
3	55.123	0.11	49.245	-0.34	43.935	-0.01
δ_m		0.19		0.49		0.08

从表 4 中的数据可以得出如下结论:

(1)三相绕组在短路冲击的作用下,相电抗值均有不同程度的改变,改变程度与电流大小并无直接关系;

(2)从电抗偏差的变化趋势来看,各相在 3 次短路冲击后的电抗偏差趋势相同,具有一定的单调变化特点,说明变压器在多次短路冲击后变形朝着同一方向发展,具有一定的累积效应;

(3)从三相的相电抗偏差极差来看,B 相在 3 次短路冲击之后发生了较为明显的变化,相电抗偏差极差最大,为 0.49,C 相绕组的变化程度最小,为 0.1,说明 C 相绕组的抗短路能力最好,机械状态未发生明显变化。

从 3 相绕组的测量结果来看,各相相电抗偏差均符合要求^[21],说明该变压器具有较好的抗短路能力。

4.2 频响函数法

由式(8)可得 B 相 2 号测点在高压-低压 3 次短路冲击下的频响函数,如图 6 所示。由于短路冲击电流的功率谱密度多集中在 100 Hz 附近,因此传递函数中的 0~100 Hz 处的幅频特性几乎为 0,同时

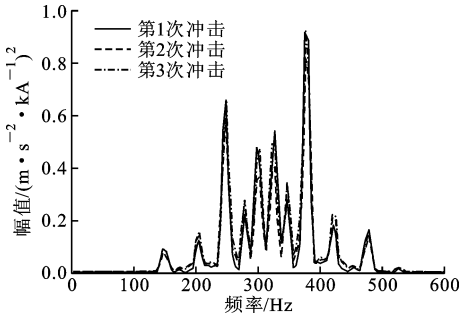


图 6 B 相 2 号测点幅频特性曲线

短路冲击振动过程是一个暂态过程,对系统中的其他频率成分同样具有激励作用,使得频响函数中能够体现出 100~600 Hz 的幅频特性。

从 3 次短路冲击下的频响函数的幅频特性曲线来看,3 条曲线的相似程度较高,因此需要借助相关性计算对相似程度进行描述。根据式(9)可得 3 次短路冲击下频响函数的相关系数 R_{xy} ,如表 5 所示,相关系数随相电抗偏差度的变化关系如图 7 所示,其中相电抗偏差度定义如下

$$\xi_{i-j} = |\delta_i - \delta_j|, \quad i, j = 1, 2, 3 \tag{12}$$

表 5 频响函数相关系数及相电抗偏差度

试验	AO		BO		CO	
	R_{xy}	ξ_{i-j}	R_{xy}	ξ_{i-j}	R_{xy}	ξ_{i-j}
1-2	1.73	0.10	1.87	0.44	2.59	0.03
2-3	1.90	0.09	2.20	0.05	2.38	0.05
1-3	1.33	0.19	1.84	0.49	2.34	0.08

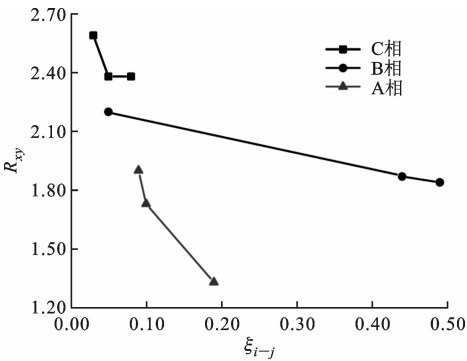


图 7 频响函数相关系数随相电抗偏差度变化关系

从表 5 以及图 7 的数据可以得出如下结论。

(1)在三相绕组中,C 相绕组的频响函数的平均相关系数最大,在 3 次短路冲击中保持在 2.3 以上,B 相绕组次之,A 相绕组最小。

(2)三相频响函数相关系数的不同可能与变压器的结构、传感器的安装位置以及三相绕组的短路电流不同有关。

(3)对同一相绕组而言,3 次短路冲击频响函数的相关系数与相电抗偏差度成一定的负相关关系,即 2 次短路冲击后的相电抗的偏差度越大,频响函数的相关系数越小,因此可以利用多次短路冲击下变压器油箱振动频响函数的相关系数来表征绕组的机械状态。

5 结 论

本文利用自功率谱密度函数估计频响函数的方

法,研究了基于振动信号与短路电流的电力变压器状态评估方法,并通过采集一台 220 kV 电力变压器短路试验时的电流和振动信息,对频响函数法的应用进行了初步的探索,试验结果表明:

(1)利用短路电流和振动信号求取频响函数的方法能够表征短路冲击过程中变压器绕组的机械状态;

(2)通过监测油箱表面的振动获得短路冲击中的振动信号,而短路电流信息既可以接入振动采集系统中同步采集获得,也可以利用故障录波仪获得,增加了该方法的实用性;

(3)利用相关性计算可以对多次冲击下的频响函数的重复性进行描述,在两次短路冲击下,相电抗的偏差程度越大,频响函数的相关系数越低,说明短路冲击对变压器绕组的机械结构产生的影响越大。

综上所述,利用短路冲击电流下变压器的振动频响函数来表征其绕组机械状态,为变压器的故障诊断提供了一种新的方法。

参考文献:

[1] 王梦云. 2004 年度 110 kV 及以上变压器事故统计分析 [J]. 电力设备, 2005, 6(11): 31-37.
WANG Mengyun. Statistical analysis of 110 kV and higher voltage transformer accident in 2004 [J]. Electrical Equipment, 2005, 6(11): 31-37.

[2] 王梦云. 2005 年度 110(66) kV 及以上变压器事故与缺陷统计分析 [J]. 电力设备, 2006, 7(11): 99-102.
WANG Mengyun. Statistical analysis of 110 (66) kV and higher voltage transformer accident in 2005 [J]. Electrical Equipment, 2006, 7(11): 99-102.

[3] 凌璐, 王圣. 110 kV 级变压器事故统计及短路故障分析 [J]. 变压器, 1995, 32(12): 33-36.
LING Han, WANG Sheng. Statistical and short circuit failure analysis of 110 kV transformer accident [J]. Transformer, 1995, 32(12): 33-36.

[4] 秦少臻, 王钰, 李彦明, 等. 监测变压器绕组变形的低压脉冲法的研究 [J]. 变压器, 1997, 34(7): 24-29.
QIN Shaozhen, WANG Yu, LI Yanming, et al. A study of the low voltage impulse method for detecting the transformer winding deformation [J]. Transformer, 1997, 34(7): 24-29.

[5] 高朝霞, 马涛, 王永儿, 等. 短路阻抗法结合频响法诊断变压器绕组变形的分析与应用 [J]. 电力设备, 2006, 7(12): 32-34.
GAO Chaoxia, MA Tao, WANG Yonger, et al. The short-circuit impedance combined with the frequency

- response analysis and its application of diagnosis in transformer winding deformation [J]. *Electric Equipment*, 2006, 7(12): 32-34.
- [6] 刘勇, 杨帆, 张凡, 等. 检测电力变压器绕组变形的扫频阻抗法研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(17): 4505-4516.
- LIU Yong, YANG Fan, ZHANG Fan, et al. Study on sweep frequency impedance to detect winding deformation within power transformer [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(17): 4505-4516.
- [7] 汲胜昌, 刘味果, 李彦明, 等. 变压器铁心及绕组状况的振动测试系统 [J]. *高电压技术*, 2000, 26(6): 1-3.
- JI Shengchang, LIU Weiguo, LI Yanming, et al. The vibration measuring system for monitoring core and winding condition of power transformer [J]. *High Voltage Engineering*, 2000, 26(6): 1-3.
- [8] BARTOLETTI C, DESODEROP M, CARLO D D, et al. Vibro-acoustic techniques to diagnose power transformers [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004, 19(1): 221-229.
- [9] 汲胜昌, 程锦, 李彦明. 油浸式电力变压器绕组与铁心振动特性研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2005, 39(6): 616-620.
- JI Shengchang, CHENG Jin, LI Yanming. Research on vibration characteristics of windings and core of oil filled transformer [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2005, 39(6): 616-620.
- [10] GARCIA B, BURGOS J C, ALONSO A M, et al. Winding deformations detection in power transformers by tank vibrations monitoring [J]. *Electric Power Systems Research*, 2005, 74: 129-138.
- [11] 朱叶叶, 汲胜昌, 刘勇, 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, LIU Yong, et al. Vibration mechanism and influence factors in power transformers [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(6): 115-125.
- [12] 汲胜昌, 王世山, 李清泉, 等. 用振动信号分析法监测变压器绕组状况 [J]. *高电压技术*, 2002, 28(4): 12-15.
- JI Shengchang, WANG Shishan, LI Qingquan, et al. The application of vibration method in monitoring the condition of transformer winding [J]. *High Voltage Engineering*, 2002, 28(4): 13-15.
- [13] 邵宇鹰, 徐剑, 饶柱石, 等. 短路冲击下变压器绕组状态在线诊断 [J]. *振动与冲击*, 2011, 30(2): 173-176.
- SHAO Yuying, XU Jian, RAO Zhushi, et al. On-line diagnosis for a transformer winding's state under short-circuit impact [J]. *Journal of Vibration and Impact*, 2011, 30(2): 173-176.
- [14] 张坤, 王丰华, 廖天明, 等. 应用复小波变换检测突发短路时的电力变压器绕组状态 [J]. *电工技术学报*, 2014, 29(8): 327-332.
- ZHANG Kun, WANG Fenghua, LIAO Tianming, et al. Detection of transformer winding deformation under sudden short-circuit impact based on complex wavelet algorithm [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(8): 327-332.
- [15] 王丰华, 李清, 金之俭. 振动法在线监测突发短路时变压器绕组状态 [J]. *控制工程*, 2011, 18(4): 596-599.
- WANG Fenghua, LI Qing, JIN Zhijian. On-line monitoring the winding condition of power transformer under sudden short-circuit based on the vibration method [J]. *Control Engineering of China*, 2011, 18(4): 596-599.
- [16] 陈玉红, 杨杰, 孟庆民, 等. 变压器绕组短路振动幅向模拟信号的采集和分析 [J]. *变压器*, 2011, 48(4): 33-40.
- CHEN Yuhong, YANG Jie, MENG Qingmin, et al. Collection and analysis of radial simulated signal of short circuit vibration of transformer winding [J]. *Transformer*, 2011, 48(4): 33-40.
- [17] ZHANG Haijun, YANG Bin, XU Weijie, et al. Dynamic deformation analysis of power transformer windings in short circuit fault by FEM [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2014, 24(3): 1-4.
- [18] YASUO H, KENICHI O. Axial vibration analysis of transformer windings under short circuit conditions [J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, 1980, 1(2): 443-451.
- [19] MUKUND R P. Dynamic response of power transformers under axial short circuit forces: part I Winding and clamps as individual components [J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus*, 1973, 92(5): 1558-1566.
- [20] MUKUND R P. Dynamic response of power transformers under axial short circuit forces: part II Winding and clamps as a combined system [J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus*, 1973, 92(5): 1567-1576.

(下转第 154 页)