

DOI: 10.7652/xjtuxb201710004

突发短路条件下变压器绕组振动特性的仿真研究

杨毅, 刘石, 田丰, 邓小文, 张楚, 高庆水, 孙文星
(广东电网有限责任公司电力科学研究院, 510080, 广州)

摘要: 为了研究小容量电源条件下变压器绕组在短路冲击下的振动特性,建立了基于冲击电流发生器的变压器短路冲击振动试验平台,根据一台单相 10/0.4 kV 变压器的结构参数,利用场-路耦合的有限元算法,获得了短路冲击下变压器绕组的电流变化规律,并与试验结果进行对比,验证了仿真方法的正确性。在此基础上,提取高低压绕组端部、中部线饼轴向电磁力的变化规律,利用瞬态动力学获得了高压绕组不同线饼在冲击电流下的振动响应。研究表明:三维有限元模型的场-路耦合算法可以准确地获得试验平台的电流特性;短路冲击下绕组轴向振动最大加速度位于绕组高度的 1/4 和 3/4 位置处,可以在油箱表面正对该位置的区域进行振动监测;绕组同一线饼中垫块间线匝振动加速度大于垫块所在位置的振动加速度;由于惯性,绕组轴向振动加速度最大值的时刻滞后于电流幅值最大的时刻。

关键词: 变压器;短路冲击;绕组振动;场-路耦合

中图分类号: TH113.1;TM411 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)10-0019-08

Simulation for Transformer Winding Vibration Characteristics under Short Circuit Impact

YANG Yi, LIU Shi, TIAN Feng, DENG Xiaowen, ZHANG Chu,
GAO Qingshui, SUN Wenxing
(Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: In order to study the vibration characteristics of transformer winding in short circuit under small power capacity, a short-circuit impact and vibration test platform based on the impact current generator is established. The current variations of the transformer winding under short-circuit impact are obtained with field-circuit coupling finite element analysis. And the simulation results are compared with experimental ones to verify the accuracy. In addition variation of axial electromagnetic force of the end as well as middle in winding is hence extracted to complete transient dynamic analysis of winding vibration. It indicates that three dimensional field-circuit coupling finite element model can accurately describe current characteristics of the test platform. The largest winding axial vibration under short-circuit impact locates at the 1/4 and 3/4 height of winding, so it is suitable to monitor the tank vibration near this zone. The axial vibration of winding in turn is larger than that in spacer and the moment of the maximum acceleration of the axial vibration of the winding lags behind current due to the inertia.

Keywords: transformer; short circuit impact; winding vibration; field-circuit coupling

电力变压器是电网中的重要的一次设备,其安全稳定运行一直受到运行部门和制造厂商的高度重视^[1-3]。长期运行的变压器,除了在电应力、热应力下产生老化使绝缘能力下降等故障外,还会因为遭受外部短路冲击,在绕组中流过较大幅值的短路冲击电流,引起巨大的电磁力,进而影响变压器绕组的机械状态。2013 年广西电网 110 kV 及以上变压器共发生 4 台次的绕组损坏事故,占变压器损坏事故总数的 80%^[4]。因此,加强对变压器绕组机械状态的检测对于保障电网安全可靠运行具有重要意义。

目前,常用的绕组机械状态检测方法包括短路电抗法、频响法、扫频阻抗法等^[5-8],但上述方法属于离线检测方法,无法满足在线监测的需求。在变压器发生短路冲击时,由于冲击电流幅值大,引起绕组强烈的振动,因此在线监测油箱表面振动信号可以在短路冲击发生的第一时间对绕组机械状态进行评估,从而避免变压器事故范围的扩大^[9-11]。

对于变压器短路冲击下的振动特性的研究主要集中在试验研究、利用振动信号进行绕组机械状态诊断以及二维有限元的结构分析。文献[13]利用激光测振仪获得了 500 kV 变压器绕组模型冲击电流下的绕组径向振动。文献[14]利用 Gabor 时频变换和振动烈度对短路冲击下绕组的振动信号进行分析,该方法可以灵敏地反应绕组状态的变化及故障特征。文献[15-16]利用振动信号的时域包络谱、复小波变换对多次短路冲击下绕组变形的累积效应进行了研究。文献[17]利用短路冲击电流和油箱表面振动信号构建了振动频响函数,并将该方法用于表征短路冲击过程中变压器绕组的机械状态^[17]。除了试验研究之外,文献[18]利用有限元法,通过建立三维三相变压器绕组整体模型对绕组电力进行仿真计算。文献[19]利用二维有限元模型对绕组在短路过程中的电磁力进行了计算。文献[20]利用二维有限元模型研究了 220 kV 电力变压器绕组在短路冲击下的振动响应,结果表明,绕组上、下两端的线饼会向中间压缩且有最大的位移。

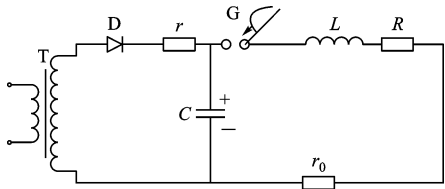
从上述研究现状可以看出,目前的研究工作缺乏利用电磁-结构耦合三维仿真模型对短路冲击下饼式绕组振动特性的研究,而根据变压器的结构特点,绕组上所受电磁力会受到铁心窗结构的影响。因此,利用三维有限元模型对短路冲击下的绕组振动特性开展仿真研究,对于完善基于短路冲击振动信号分析的绕组机械状态评估方法具有重要的意义。

本文利用冲击电流发生器建立了变压器绕组冲

击试验平台,满足了小电源容量条件下的变压器冲击试验要求。根据该试验回路参数,建立场-路耦合模型,获得了短路冲击电流的特点,并与试验结果进行了对比,验证了方法的正确性。在此基础上,通过提取绕组结构中每一饼的轴向电磁力,研究了安匝不平衡变压器绕组的受力特点,并通过瞬态结构动力学分析,获得了短路冲击条件下绕组不同线饼的振动特性,提出了油箱表面振动测点位置。同时,通过对试验和仿真获得的振动信号进行对比,分析了造成仿真和试验结果差异的原因,为今后的研究提供了方向。

1 短路冲击试验平台

在变压器进行短路冲击试验时,采用预先短路法将单相变压器的低压侧绕组通过金属铜排短路,然后将高压绕组的首末两端接入冲击电流发生器试验回路。结合冲击电流发生器电路和变压器的 T 型等效电路,忽略变压器的励磁电抗支路、连接线以及短路线的电感和电阻,得到最终的试验平台回路如图 1 所示。



C 为主电容;L 和 R 分别为线路电感和电阻;G 为球隙;r 为保护电阻;T 为高压试验变压器;R 为变压器的短路电阻;L 为变压器的短路电抗;r₀ 为分流器的电阻

图 1 短路冲击试验平台等效电路图

实验开始时,变压器通过二极管 D 给主电容充电,当电容电压达到特定值时触发球隙,形成一个 RLC 震荡回路。试验回路中的充电电容 C 为直接读取的电容值,变压器电感 L 及电阻 R 根据变压器短路负载试验的数据获得,高压绕组中的短路冲击电流通过回路中的分流器测量获得。单相变压器的参数及负载试验数据如表 1 所示。

表 1 单相变压器参数及负载试验数据

参数	数值	参数	数值
变压器型号	DY-50	短路阻抗/%	3.9
额定电压/kV	10/0.4	负载损耗/kW	0.51
额定电流/A	5/125	额定频率/Hz	50
高、低压匝数	2 250,90	高、低压线饼数	84,90
高压绕组直阻/ Ω	16.08	低压绕组直阻/ Ω	0.019 28

根据表中的负载试验数据,可以得到试验回路中的 R 和 L 分别为

$$R = \frac{p_0}{I^2} = \frac{510}{5^2} = 20.4 \, \Omega \tag{1}$$

$$L = (Z^2 - R^2)^{1/2} / 2\pi f = \left(\left(3.9\% \times \frac{10\,000}{5} \right)^2 - 20.4^2 \right)^{1/2} / 314 = 0.239 \, \text{H} \tag{2}$$

球隙击穿后,主电容 C 经 R 和 L 放电,回路产生衰减震荡的大电流,使其加载于一台单相试验变压器的高压绕组上,高压绕组流经的电流为

$$i = U_c e^{-\alpha t} \sin\left(\frac{\omega_d t}{\omega_0 L_0}\right) \tag{3}$$

其中

$$\alpha = \frac{R_0}{2L_0}; \quad \omega_0 = \frac{1}{(L_0 C)^{1/2}}; \quad \omega_d = (\omega_0^2 - \alpha^2)^{1/2} \tag{4}$$

式中: α 为阻尼系数; U_c 为充电电压; R_0 为试验回路中的总电阻; L_0 为试验回路中的总电感; C 为主电容; ω_0 为回路自然频率。

为了使得冲击电流的频率接近 50 Hz,与工频短路电流的影响进行对比,需要对脉冲电容进行估算

$$C = \frac{1}{L\omega_0^2} = \frac{1}{0.239 \times (100\pi)^2} = 42.44 \, \mu\text{F} \tag{5}$$

根据主电容的脉冲电容器的组合,选择较为接近的电容值 48 μF ,则短路电流的实际频率为 47.01 Hz,已较为接近工频,短路电流幅值可以通过充电电压进行控制。因此,该试验平台能够满足变压器短路冲击条件下的振动特性研究。

2 短路冲击下绕组振动特性研究

2.1 绕组振动机理

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^[21],如图 2 所示。

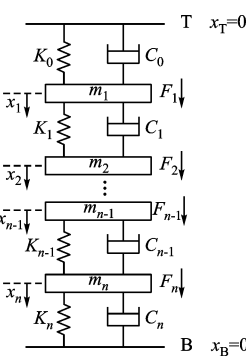


图 2 饼式绕组质量-弹簧-阻尼模型

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

$$\mathbf{M} \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} + \mathbf{C} \frac{d\mathbf{x}}{dt} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{A}_y i^2 + \mathbf{M}\mathbf{g} \tag{6}$$

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 为绕组中流过的电流; g 为重力加速度。

利用式(6),可以实现对短路冲击过程中绕组轴向振动加速度的求解。

2.2 绕组电磁力的仿真研究

由于短路冲击过程属于暂态过程,只能采用场-路耦合的办法对该过程绕组中的电流、绕组漏磁场以及绕组上的电磁力分布进行求解。

2.2.1 场-路耦合仿真模型 根据单相变压器的结构参数,建立三维模型并导入有限元软件中,模型如图 3 所示。

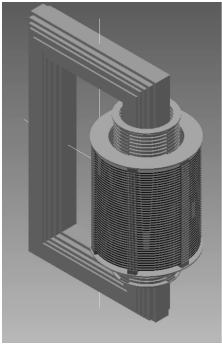


图 3 单相变压器三维模型

该变压器为单相双绕组变压器,高、低压绕组分成两部分分别嵌套在铁心的左、右柱上并串联。根据该变压器的结构,在进行磁场计算时根据对称性,对原模型进行切割,建立绕组的 1/4 模型,如图 4 所示。

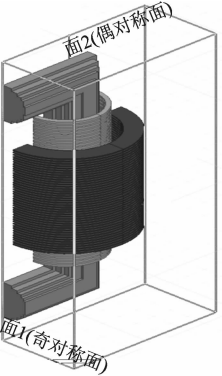
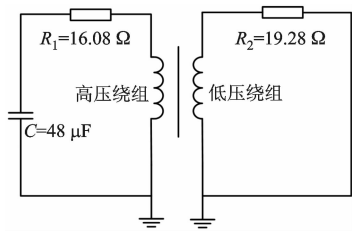


图 4 单相变压器 1/4 模型

为了将通过仿真获得的短路电流与基于冲击电流发生器的试验平台所产生的电流进行对比,根据

图 1 所示的试验平台等效电路及表 1 所示的单相变压器参数,结合场-路耦合算法,在外电路中设置耦合电路模型,如图 5 所示。



C 为冲击试验平台的主电容; R_1 和 R_2 分别为高低压绕组的直流电阻
图 5 场-路耦合模型的外电路

2.2.2 边界条件、材料参数及网格设定 对高、低压绕组线饼分别设置为 26.78 匝和 1 匝,根据对称边界条件,设置图 4 中的面 1 为奇对称面(磁力线垂直于面 1),面 2 为偶对称面(磁力线平行于面 2)。忽略垫块材料对磁场的影响,设置绕组材料的导电率为 3.8×10^8 S/m。为了更准确地获得结果,铁心材料为 30H120,采用非线性的 BH 曲线对耦合场中的磁场进行求解,非线性磁化曲线见图 6。

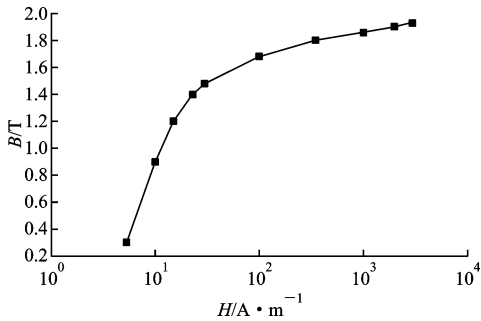


图 6 硅钢片的非线性 BH 曲线

根据三维模型的结构,对模型网格进行分区控制,铁心、高压绕组、低压绕组的最大网格尺寸分别为 40、20、10 mm,获得的网格剖分结果如图 7 所示。

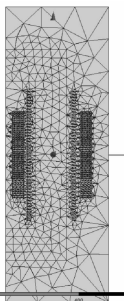


图 7 模型网格剖分结果

2.2.3 磁场仿真结果与后处理 在主电容 C 的充电电压为 4.5 kV 条件下,获得的仿真和试验电

波形如图 8 所示。由图 8 可以看出,高压绕组中的电流呈现出振荡波衰减的特点。在主电容 C 触发放电之后,高压绕组中的短路电流迅速增加,并在约 5 ms 之后达到峰值 72 A,然后逐渐振荡衰减,振荡频率约为 45 Hz。由于电流在 50 ms 左右时逐渐衰减至 0,因此在后续的仿真中只考虑了前 50 ms 绕组的振动。从试验和仿真电流来看,两者的频率基本相同,第 1 峰值的冲击电流幅值也基本相同,在随后的几个峰值中,试验电流的幅值要略大于仿真的结果,这可能是由于仿真电路中忽略了冲击试验平台中脉冲电容器和引线电感,使得回路中的电感总体偏小。同时,采用的整体饼式绕组会使绕组中的损耗增大,使得仿真结果中的电流略小于试验值。

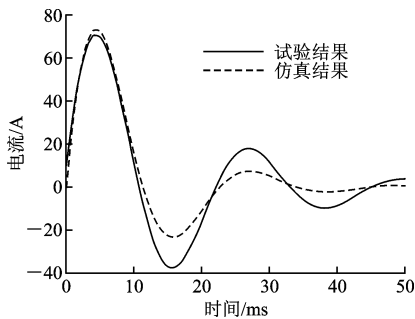


图 8 试验和仿真的电流波形

峰值电流时刻,铁心对称平面的绕组漏磁场分布如图 9 所示。从图中可以看出,由于高低压绕组的电流相反,绕组间的漏磁场被加强,由于铁心窗的影响,窗内绕组间的漏磁场要强于窗外绕组。同时,由于变压器的安匝不平衡,在安匝不平衡的区域,低压绕组所处的磁场呈现出了与安匝平衡区域不同的特点,这将会对绕组的轴向电磁力分布产生重要的影响。

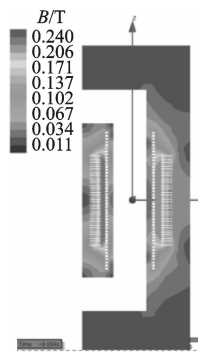


图 9 冲击电流峰值的绕组漏磁场

由于绕组结构在轴向上对称,将绕组上端部的线饼记为 1 号,从端部自上而下到中部线饼的编号依次增大,只需要提取高压绕组的 1 至 21 号线饼和

低压绕组的 1 至 24 号线饼上的电磁力,其余对称位置的线饼受力与上述线饼相同、方向相反,获得的高压绕组第 1、10、21 号线饼,低压绕组 1、12、24 号线饼的电磁力随时间变化的曲线如图 10 所示。

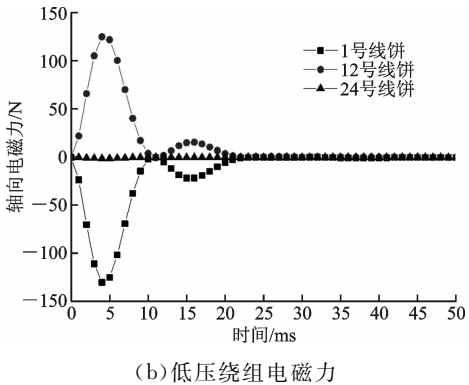
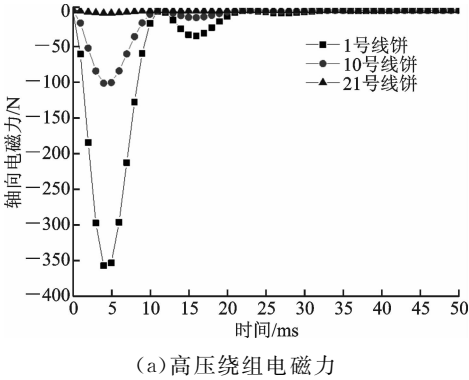


图 10 绕组轴向电磁力随时间变化规律

高压绕组上的电磁力随着线饼编号的增加不断减小,即线饼顶端的轴向电磁力最大、中部最小,力的作用表现为压缩绕组。当绕组电流达到最大时,线饼中的电磁力也同时达到最大。低压绕组线饼电磁力的变化趋势由于受到绕组安匝不平衡的影响,呈现出与高压绕组不同的特点。绕组端部的 1 号线饼和中部的 24 号线饼所受的电磁力,使得绕组压缩,而位于高压绕组端部的 10 号线饼所受的电磁力使绕组向端部伸长。对于安匝不平衡造成的电磁力分布规律的变化,提取电流峰值时刻线饼中的电磁力,如图 11 所示。

由图 11 可得,高压绕组没有受到安匝不平衡的影响,各处线饼上所受的电磁力均指向绕组的中部,使得绕组被压缩,而低压绕组受安匝不平衡的影响较大,端部的 3 个线饼呈现压缩,而其余部位均呈现出使绕组伸长的趋势。这说明轴向电磁力分布的特点受到绕组的安匝平衡状态的影响,安匝平衡时,高低压绕组分别呈现出压缩和伸长的状态,而当安匝不平衡时,安匝不平衡区域的绕组受力仅取决于该

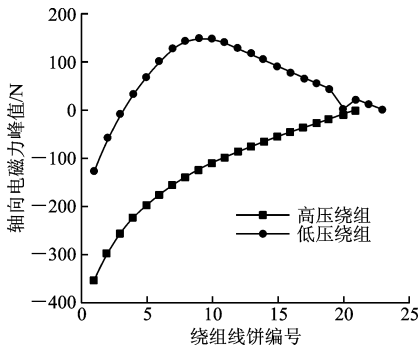


图 11 高、低压绕组线饼的峰值电磁力分布

区域绕组自身的电流和漏磁场分布特点。

2.3 绕组结构动力学的仿真研究

采用 ANSYS workbench 中的瞬态结构分析软件,对变压器绕组在短路电动力下的位移和轴向加速度进行仿真研究。在计算分析绕组结构动力学时,忽略了铁心等对变压器绕组振动特性没有影响的部件。由于高压绕组离油箱表面更近,同时高压绕组的整体受力要大于低压绕组,因此只对高压绕组在短路冲击电流下的振动开展研究,采用 INVENTOR 建立的高压绕组的结构模型如图 12 所示。

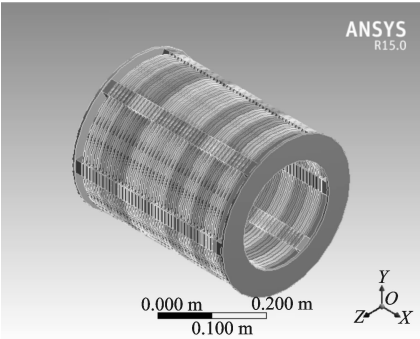


图 12 高压绕组三维模型

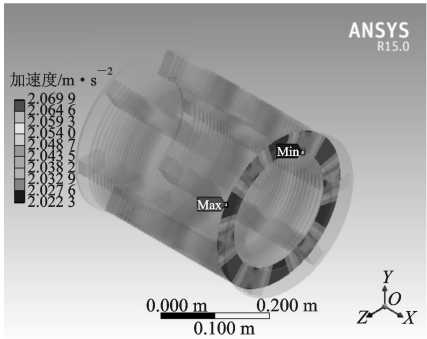
绕组线饼和绝缘垫块的材料参数设置见表 3。为了简化计算模型,设置如下条件将模型理想化:

- (1)绝缘垫块的杨氏模量是线性的,忽略非线性因素的影响;
- (2)忽略振动过程中变压器油的作用;
- (3)将一饼中的多匝线圈等效为一个单饼线圈,并设置一个集中力;
- (4)限制所有物体的径向运动,只保留轴向运动,并对接触面设置为不分离,对两端压板设置固定约束。

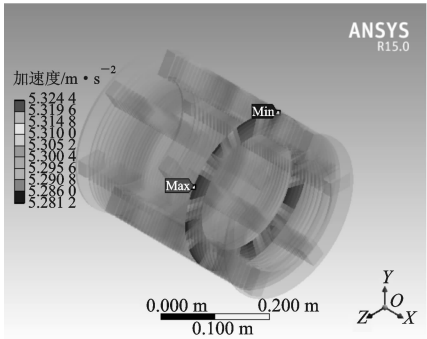
提取场-路耦合模型中每一个线饼的电磁力随时间的变化,并将其作为载荷添加到绕组中进行结构动力学计算。在 2.4 ms 时,1 号线饼、10 号线饼、20 号线饼的加速度云图如图 13 所示。

表 2 绕组材料参数

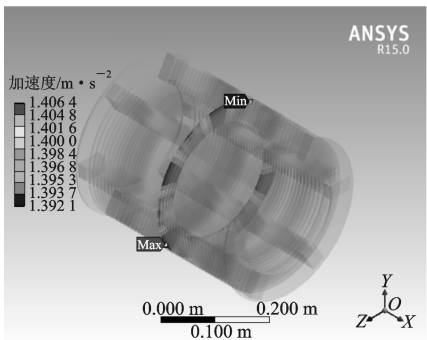
参数	数值	参数	数值
线饼材料		垫块材料	
密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2 770	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1 120
线饼杨氏模量/GPa	200	垫块杨氏模量/MPa	120
线饼材料泊松比	0.3	垫块材料泊松比	0.25



(a)绕组 1 号线饼振动加速度云图



(b)绕组 10 号线饼振动加速度云图



(c)绕组 20 号线饼振动加速度云图

图 13 2.4 ms 时绕组不同线饼振动加速度云图

在同一饼上,加速度的幅值相差较小,由于垫块的作用,使得垫块附近的加速度略小于垫块之间的线饼。这种分布规律是广泛存在的,因为线饼整体的轴向位移来自于绕组的轴向受力,因而在垫块之间的线饼区域引起的位移较大。但是,从幅值上来看,垫块上和垫块之间的绕组振动加速度差别很小,

因此可以认为单饼线圈是一个绝对的刚体,具有相同的振动加速度。不同位置线饼的加速度随时间变化如图 14 所示。

由图 14 可以看出,1 号线饼和 20 号线饼绕组振动加速度基本相同,而位于绕组 1/4 位置处的 10 号线饼绕组却具有较大的振动加速度。这是由于绕组所受的电磁力和约束的不同而导致的。虽然位于端部的绕组受到的轴向力较大,但是绕组顶部的压板刚性较大,约束较强因而引起的位移较小。绕组中部的线饼处在轴向漏磁场中,所受的轴向电磁力较小,因而线饼的振动加速度也小于绕组的 1/4 处。考虑到绕组的轴向对称性,绕组下部振动加速度分布也具有相同的规律。因此,从绕组整体的轴向振动加速度分布规律来看,振动加速度最大值应处于绕组整体高度的 1/4 和 3/4 位置处。

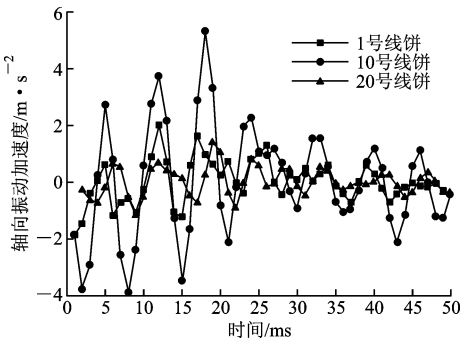


图 14 短路过程中绕组线饼轴向振动加速度

从绕组振动加速度与电流的对应时刻来看,绕组中的电流和电磁力在 5 ms 左右时达到最大,而绕组的振动加速度却在 20 ms 左右达到最大,这主要是因为绕组具有惯性,使得绕组从静止状态到具有最大振动加速度的时刻滞后于电流幅值最大的时刻。

3 短路冲击下绕组振动试验

3.1 振动传感器的布置与信号采集

利用前述的基于冲击电流发生器的变压器短路冲击试验平台对该变压器进行短路冲击试验。利用分流器外接电缆线直接获得震荡衰减的试验短路电流。采用 ICP 型的振动加速度传感器,经后端的调理电路和数据采集系统与笔记本相连,构成变压器振动测试系统。该系统能够同时满足电流和油箱表面振动信号的测量,其中振动加速度传感器参数如表 3 所示。

根据上一节的仿真结果,将 4 个振动加速度传感器安装在油箱表面距离绕组轴向高度 1/4 和 3/4 的区域,传感器安装位置如图 15 所示。

表 3 振动加速度传感器参数

灵敏度/ $\mu\text{A} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2$	量程/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	分辨率/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	频率/ Hz	质量/ g
20	400	0.001	0.22~16 200	23

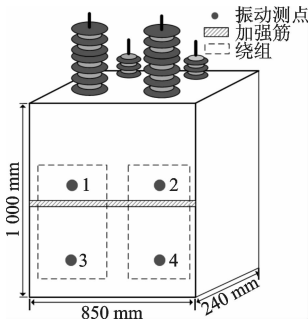


图 15 变压器振动测点位置

3.2 振动特性

在充电电压为 4.5 kV,即图 8 所示的冲击电流下,获得的油箱表面测点 1 的振动信号如图 16 所示。短路冲击后,油箱表面的 1 号测点产生强烈振动,并在 10 ms 和 50 ms 左右获得较大的振动加速度,幅值分别为 -12.72 m/s^2 和 12.65 m/s^2 。在 50 ms 以后,由于回路中的电流振荡衰减,逐渐降低,绕组振动逐渐进入自由振动状态,并逐渐衰减。由于油箱表面的振动由绕组各个线饼振动经绕组紧固件与变压器油传递后叠加,1 号测点的振动加速度幅值要高于仿真结果。同时,由于传递路径的不同,传递至油箱表面的振动存在不同的时延,使得 1 号测点振动,并且出现了数个较为强烈振动的时刻。

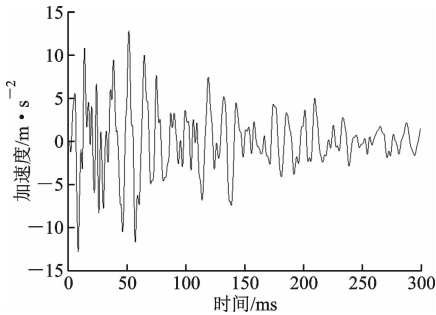


图 16 油箱表面测点 1 的振动

4 结 论

本文利用冲击电流发生器搭建了试验室内的短路冲击试验平台,建立了单相 10/0.4 kV 变压器绕组和铁心的三维模型,利用仿真技术获得了短路冲击下该台单相变压器的绕组振动特性,并与试验结果进行了对比分析,得到的结论如下。

(1)基于冲击电流发生器的变压器短路冲击试验系统能够满足电流频率及幅值的要求,便于小容量条件下对变压器的冲击振动特性开展研究。

(2)利用三维的场-路耦合算法,可以准确地获得短路冲击实验平台产生的电流和绕组短路过程中所受的电磁力变化规律。绕组轴向振动加速度最大的位置约处在绕组高度的 1/4 和 3/4 处,因此应当选择油箱表面正对绕组上述位置的区域进行振动监测。

(3)绕组线饼不同位置处的轴向振动加速度不同,垫块之间的线匝振动要强于与垫块接触的线匝。同时,由于惯性的影响,绕组振动加速度最大的时刻滞后于电流峰值时刻。

(4)油箱表面的振动信号来自于绕组振动信号的叠加,使得油箱表面的振动信号幅值大于绕组振动幅值,同时油箱表面的振动信号还会因传递路径的不同产生时延。

在本文研究的基础上,后续还将开展变压器振动传递特性的研究,解决突发短路状态下油箱表面振动信号和绕组本体振动的对应关系问题,进而提出科学合理的绕组故障诊断特征量。

参考文献:

[1] 刘勇,梁笑尘,汲胜昌,等. 变压器套管容性故障对频响曲线的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(2): 62-68.
LIU Yong, LIANG Xiaochen, JI Shengchang, et al. Influence of transformer bushing capacitive fault on frequency response curves [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(2): 62-68.

[2] 刘勇,崔彦捷,秦睿,等. 套管故障对变压器频响曲线影响的仿真研究 [J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2406-2415.
LIU Yong, CUI Yanjie, QIN Rui, et al. Simulation study of influence of transformer bushing fault on frequency response curves [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2406-2415.

[3] 赵志刚,徐征宇,王健一,等. 大型电力变压器火灾安全研究 [J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3378-3384.
ZHAO Zhigang, XU Zhengyu, WANG Jianyi, et al. Research on the fire safety of large power transformer [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3378-3384.

[4] 王佳琳,黎大健. 110 kV 及以上变压器事故与缺陷分析 [J]. 广西电力, 2014, 37(4): 63-64, 73.
WANG Jialin, LI Dajian. Accidents and defects analy-

- sis of 110 kV and above voltage transformers [J]. Guangxi Electric Power, 2014, 37(4): 63-64, 73.
- [5] 曾刚远. 测量短路电抗是判断变压器绕组变形的有效方法 [J]. 变压器, 1998, 35(8): 13-17.
ZENG Gangyuan. Measuring the short-circuit reactance-an effective method for judging the deformation of transformer windings [J]. Transformer, 1998, 35(8): 13-17.
- [6] 孙翔, 何文林, 詹江杨, 等. 电力变压器绕组变形检测与诊断技术的现状与发展 [J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1207-1220.
SUN Xiang, HE Wenlin, ZHAN Jiangyang, et al. Current status and development of test and diagnostic technique of transformer winding deformation winding deformation [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1207-1220.
- [7] 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.
- [8] 姚陈果, 赵仲勇, 李成祥, 等. 基于暂态过电压特性的电力变压器绕组变形故障在线检测 [J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 873-880.
YAO Chenguo, ZHAO Zhongyong, LI Chengxiang, et al. Online detecting winding deformation of power transformer based on transient overvoltage [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 873-880.
- [9] 汲胜昌, 张凡, 钱国超, 等. 稳态条件下变压器绕组轴向振动特性及其影响因素 [J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3178-3187.
JI Shengchang, ZHANG Fan, QIAN Guochao, et al. Characteristic and influence factors of winding axial vibration of power transformer in steady-state operation condition [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3178-3187.
- [10] 汲胜昌, 刘味果, 单平, 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, SHAN Ping, et al. The vibration measuring system for monitoring core and winding condition of power transformer [J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(6): 1-3.
- [11] 汲胜昌, 周冬生, 陈锦, 等. 空载变压器油箱表面振动信号的初步研究 [J]. 高电压技术, 2004, 30(8): 30-32.
JI Shengchang, ZHOU Dongsheng, CHENG Jin, et al. Research on vibration signal of transformer tank surface under no-load condition [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(8): 30-32.
- [12] 张彬, 徐建源, 陈江波, 等. 基于电力变压器振动信息的绕组形变诊断方法 [J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2341-2349.
ZHANG Bin, XU Jianyuan, CHEN Jiangbo, et al. Diagnosis method of winding deformation based on power transformer vibration information [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2341-2349.
- [13] 陈玉红, 杨杰, 孟庆民, 等. 变压器绕组短路振动轴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.
- [14] 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 shock [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(2), 173-176.
- [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 analysis method [J]. Control Engineering of China, 2011, 18(4): 596-599.
- [16] 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.
- [17] 张凡, 汲胜昌, 祝金瑜, 等. 短路冲击下变压器振动频响函数研究 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(2): 97-103.
ZHANG Fan, JI Shengchang, ZHU Lingyu, et al. Frequency response function of short circuit vibration for power transformer [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(2): 97-103.

(下转第 46 页)