

Study on Vibration Characteristics of Transformer Windings

Wei Liu, Qiufeng Shang, Guozhen Yao

North China Electric Power University, Baoding Hebei
Email: 1007759705@qq.com, lindashqf@126.com, gz7943163@qq.com

Received: Aug. 20th, 2016; accepted: Sep. 5th, 2016; published: Sep. 8th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

On the basis of theoretical analysis of various factors affecting the vibration of transformer windings, the finite element model simulation analysis of the transformer was built by ANSYS. The effect of different precompression on the natural frequency of winding vibration was verified. The vibration signal of the transformer tank surface was studied by the on-line monitoring system of the transformer vibration. The experimental results showed that the vibration of the transformer windings was concentrated in the fundamental frequency 100 Hz. The amplitude of the fundamental frequency was proportional to the square of load current.

Keywords

Wind, ANSYS, Precompression, FEM

变压器绕组振动特性研究

刘 薇, 尚秋峰, 姚国珍

华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定
Email: 1007759705@qq.com, lindashqf@126.com, gz7943163@qq.com

收稿日期: 2016年8月20日; 录用日期: 2016年9月5日; 发布日期: 2016年9月8日

摘 要

在理论分析影响变压器绕组振动各因素的基础上, 利用ANSYS建立变压器有限元模型仿真分析, 验证了

不同的预紧力大小对绕组振动固有频率的影响。利用变压器振动在线监测系统,对变压器油箱表面测得的振动信号进行了研究,实验验证了变压器绕组振动主要集中在基频100 Hz处,且基频幅值与负载电流的平方满足正比例关系。

关键词

绕组, ANSYS, 预紧力, 有限元

1. 引言

变压器在电力系统中承担着电压变换,电能分配、传输,提供电力服务的功能,是电力系统关键设备之一,同时也是最容易发生故障的设备之一。由于变压器表面振动信号包含有丰富的信息,所以近年来已有大量文献[1]-[4]提出利用对振动信号的分析来诊断变压器内部绕组的故障。振动分析法是通过固定在变压器器身的振动加速度传感器来采集振动信号,通过对振动信号的故障特征矢量分析,判断故障是否发生[5]。监测系统与整个电力系统之间没有电气连接,对电力系统的正常运行没有任何影响,可以安全、稳定地达到在线监测的目的[6]。其中,对振动信号的特性分析是振动分析法的关键。

本文利用 ANSYS 软件建立变压器高低压绕组模型,通过有限元分析计算,研究预紧力对绕组固有频率的影响[7]。利用变压器振动在线监测系统采集变压器油箱表面振动信号进行验证。

2. 仿真分析

2.1. 振动原理

变压器振动是由变压器的本体振动和冷却装置的振动产生。在小于 100 Hz 的范围内,是由冷却系统引起。本体振动以 2 倍电流频率为基频,伴有其他高次谐波成分,基频分量在频谱能量分布中占主要部分[8]。国内外的研究表明[9],变压器的振动在于:

- 1) 硅钢片的磁滞伸缩引起的铁心振动;
- 2) 硅钢片接缝处和叠片之间存在着因漏磁而产生的电磁吸引力,引起的铁心振动;
- 3) 电流通过绕组时,在绕组间、线饼间、线匝间产生的动态电磁力引起绕组的振动。

2.2. ANSYS 有限元模型建立

利用 ANSYS 软件建立变压器的有限元模型,对变压器振动进行仿真分析。本文的研究对象是 S9 系列油浸式变压器,根据 S9 系列变压器的图纸,首先在 Solidwork 中建立了变压器的三维几何模型,其中绕组高度 300 mm,将三维模型转化为 x-t 格式,导入到 ANSYS Workbench 软件中,对导入的模型添加材料属性,低压绕组密度 8900 kg/m^3 ,弹性模量 128 GPa,泊松比 0.3,高压绕组密度 2700 kg/m^3 ,弹性模量 62 GPa,泊松比 0.3。考虑到实际绕组的匝数、高度等因素,采用非独立的网格划分方法,选取六面体网格,指定网格尺寸为 8 mm。施加载荷和约束等操作后,得到变压器高低压绕组有限元模型如图 1 所示[10]。

2.3. 绕组振动与负载电流的关系研究

对于流过负载电流的变压器绕组来说,根据毕奥—萨伐尔定律,假设作用在电流元上的电力是 $dF = \delta dVB$,则作用在绕组上的电力为:

$$F = \int \delta dVB \quad (1)$$

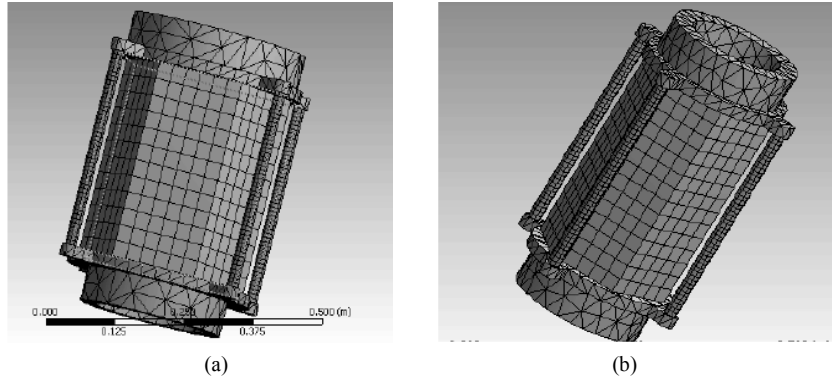


Figure 1. Finite element model of transformer winding (a) high voltage winding (b) low voltage winding

图 1. 变压器绕组有限元模型(a) 高压绕组(b) 低压绕组

其中磁感应强度 B 和电流满足正比例关系:

$$B = \frac{\mu}{4\pi} \int \frac{\delta dV r^0}{r^2} \quad (2)$$

结合式(1), (2)可知, 作用在变压器绕组上的电磁力与负载电流的平方呈正比例关系, 绕组振动加速度是与其所受电磁力的大小成正比的, 故绕组振动加速度幅值和负载电流的平方满足正比例关系。

在 ANSYS 中改变电流值, 记录不同频率处的振动加速度幅值如图 2 所示。

图 2 显示了绕组在不同电流作用下的振动情况。由图 2 可以看出, 绕组的主要振动频率为 100 Hz, 其他频率处的振动幅值明显低于主要振动成分, 且只有 100 Hz 的振动频率幅值与电流的平方呈现线性正比例关系。

2.4. 预紧力对固有频率的影响

通过研究变压器绕组构造发现, 可以认为铁心具有无穷大的刚度系数, 压板为刚性元件, 线饼为质量集中的单元, 端圈和绝缘垫块为弹性元件。故为了便于分析, 可以将绕组简单视为一个弹簧质量系统, 绕组的固有振动频率:

$$w_{y0} = \sqrt{\frac{K'_y}{M} - \left(\frac{C'_y}{2M}\right)^2} \approx \sqrt{\frac{K'_y}{M}} \quad (3)$$

其中 C'_y 为系统摩擦系数, K'_y 为系统刚度系数, M 为系统质量。

由式(3)可以得到, 绕组的固有振动频率和绝缘垫片的刚度系数平方根之间满足正比例关系。绝缘垫块在一定范围内(σ : 0~104 kg/cm²)的受力具有如下形式:

$$\sigma = a\zeta + b\zeta^3 \quad (4)$$

其中 $a = 1.05 \times 10^3$ kg/cm², $b = 1.75 \times 10^4$ kg/cm², ζ 为绝缘纸板的形变。则绕组的固有振动频率:

$$\mu = \sqrt{\frac{K}{M}} = \sqrt{\frac{A(I_b + I_h)(a\zeta + 3b\zeta^2)}{M}} \quad (5)$$

其中 I_b 是底部垫块厚度, I_h 是顶部垫块厚度。由式(5)可看出, 绕组的固有频率除了受到绕组本身所用的绝缘垫块自身属性影响, 还受到预紧力的影响。绕组被压得越紧, 轴向预紧力越大, 其轴向固有频率就越高。

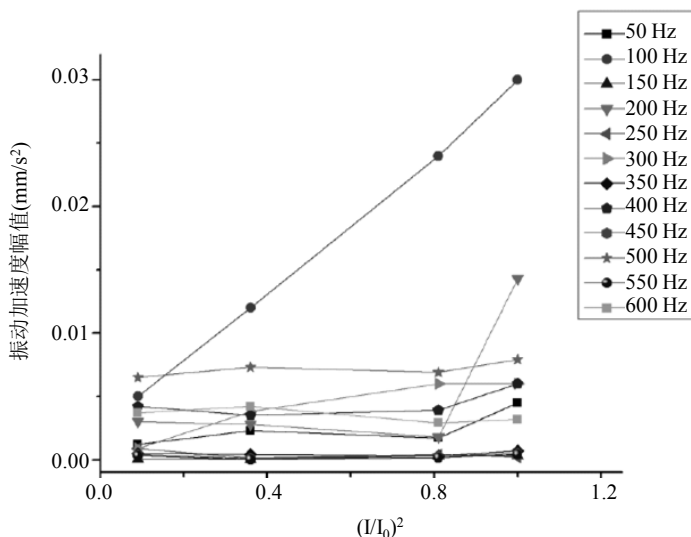


Figure 2. Relationship between vibration response and current at different frequency

图 2. 不同频率处振动响应和电流的关系

文中选取了 6 个不同的预紧力，高低压绕组在额定电流，不同预紧力下的振动结果如表 1，表 2 所示。

仿真结果证明，随着预紧力的增大，绕组的固有频率也随之增大。当绕组固有频率和电磁力频率接近时，会引发谐振现象。这在变压器的运行过程中是要严格避免的。

3. 变压器绕组振动特性实验研究

3.1. 振动采集实验系统构成

为了研究变压器表振动信号，对华北电力大学动模实验室中变压器在正常运行情况下进行在线监测。本文设计的振动信号采集系统框图如图 3 所示。变压器的振动物理信号不能直接在电路中分析和处理，需先经过加速度传感器以一定规律转换为电信号形式。加速度传感器输出的电信号形式经过信号调理电路，转换成幅值等参量符合模数转换器输入范围的信号，通过模数转换器将调理后的模拟信号转换成数字信号，送给数字信号处理器分析处理模块。

本文选用的传感器输出的信号是 4~20 mA 电流，模数转换模块的输入信号是电压形式，信号调理电路将电流环传感器输出的电流信号转换为电压信号。

本文采用 AD7656 作为系统的模数转换芯片，AD7656 具有很高的运行速率和精度，内部模数转换器是 16 位结构，片上有 6 个采样通道。它的模拟输入采用双极性设计，吞吐率有 250 K/S，经过模数转化后的数据，通过并行方式传输到 DSP。利用 DSP 进行 FFT 频谱分析。

3.2. 不同功率下绕组振动幅值分析

通过改变接入变压器的不同负载功率，测得变压器在不同负载功率下的振动时域信号，经过傅里叶变换，可以得到各功率下绕组振动加速度信号如图 4 所示。

由频域图可以看出，振动信号的频率主要集中在 1000 Hz 以内，1000 Hz 之外的频率处振动幅值几乎为零。变压器的振动主要集中在 100 Hz 处，200 Hz，300 Hz，400 Hz 处也有分布。其他次谐波的振动幅值远小于 100 Hz 振动幅值。

Table 1. The relationship between mode frequency of high voltage winding and pre-compression

表 1. 高压绕组模态频率和预紧力关系

预紧力(MPa)	模态频率(Hz)
6	112
10	125
14	134
18	147
22	152
26	168

Table 2. The relationship between mode frequency of low voltage winding and pre-compression

表 2. 低压绕组模态频率和预紧力关系

预紧力(MPa)	模态频率(Hz)
6	98
10	105
14	113
18	119
22	125
26	132

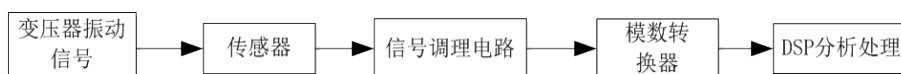


Figure 3. Block diagram of vibration signal acquisition system

图 3. 振动信号采集系统框图

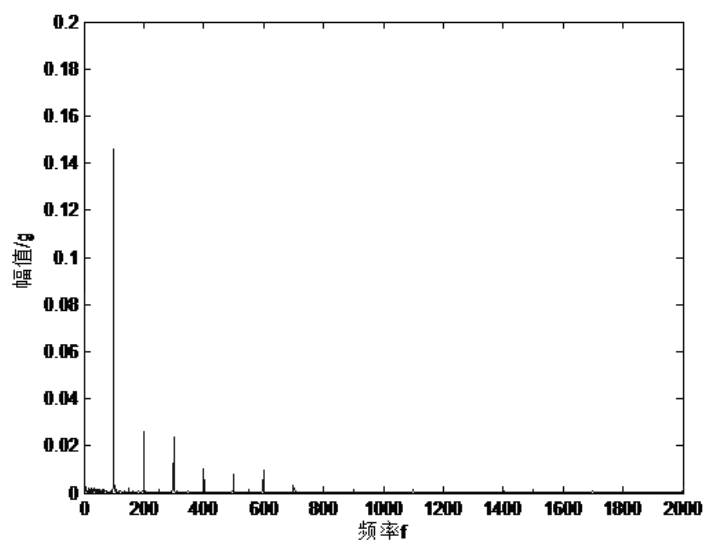


Figure 4. Vibration acceleration signal of transformer winding

图 4. 变压器绕组振动加速度信号

3.3. 绕组基频振动幅值和电流关系分析

因为该系统是无穷大系统，所以电压可以认为是 360 V 恒定电压。因为负载功率定义为流过负载的电流值与施加在负载两端电压值的乘积。电压为恒定值不变，所以负载电流和负载功率成正比例关系。不同负载功率下振动幅值的变化即可以类比为不同负载电流下振动幅度的变化。以电流的平方值为横坐标，100 Hz 频率处的振动幅度为纵坐标，电流的平方值和 100 Hz 频率下的振动幅度的关系如图 5 所示。

图 5 中为基频振动幅值与电流平方的关系，由图可得，实际关系曲线近似为一条单调上升的直线。由实验测得基频振动幅值和负载电流的平方值间有良好的线性关系，和理论分析的结果一致。正比例关系式为：

$$y = 0.143 \times 10^{-4} x + 0.145 \quad (6)$$

4. 结束语

通过在线测量变压器表面振动信号可以监测变压器内部绕组的状况，该方法已经引起越来越多国内外学者的研究。有效掌握振动信号的特性是振动分析法的关键。本文通过实验和建模仿真的方法对变压器绕组的振动特性进行研究。得到如下结论：

- 1) 在油箱表面测得的绕组振动信号主要集中在 100 Hz 处，200 Hz，300 Hz，400 Hz 处也有分布，1000 Hz 频率外几乎为零。
- 2) 绕组预紧力的变化会影响绕组的固有频率，当绕组固有频率和电磁力频率接近时，会引发谐振现象。在这种振动状态下可能会产生比预紧力大得多的动态力，从而造成绕组线圈结构的松散。因此，在变压器的运行中，要严格避免发生谐振现象。
- 3) 绕组基频振幅和负载电流的平方有良好的线性关系。

本文对变压器振动特性进行基础性研究，为振动法在变压器故障诊断方面的应用提供了理论依据。研究表明振动法有很好的可行性，振动信号在变压器内传递过程的分析，以及通过变压器振动信号对变压器故障类型的识别等方面还需要进一步的深入探讨。

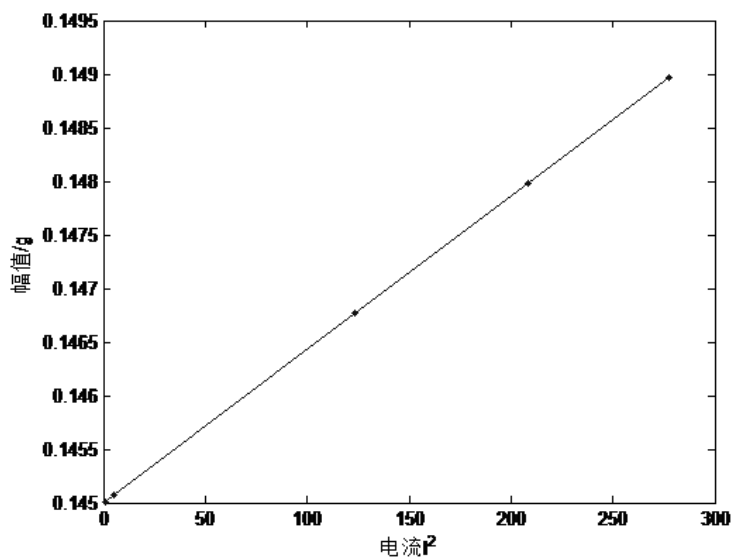


Figure 5. Relationship between vibration amplitude of fundamental frequency and current square value

图 5. 基频振动幅值与电流平方的关系

基金项目

项目名称：基于时域和谱域整形的脉冲预泵浦瑞利 BOTDA 温度/应变测量方法研究

河北省自然科学基金(F2014502098)

项目名称：基于多模 LD 直接调制和瑞利与布里渊自外差的温度和应变分布同时测量方法研究

国家自然科学基金(61377088)

参考文献 (References)

- [1] 洪刚. 基于振动法的变压器绕组及铁心状态监测与故障诊断方法研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2010.
- [2] 徐志. 基于振动法的变压器在线监测研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [3] 洪凯星. 基于振动法的大型电力变压器状态检测和故障诊断研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [4] 虞海强. 基于振动分析法的变压器状态检测研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西华大学, 2012.
- [5] 汲胜昌. 变压器绕组与铁心振动特性及其在故障监测中的应用研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安交通大学, 2003.
- [6] 曹海泉, 刘珊, 洪刚. 希尔伯特-黄变换在变压器铁心振动信号中的应用[J]. 变压器, 2010, 47(11): 30-33.
- [7] 乔丽威, 尚秋峰, 李永倩, 姚国珍. 电力变压器绕组和铁芯的模态分析[J]. 电源技术, 2014, 38(12): 2334-2336.
- [8] 王德勇. 电力变压器振动监测方法研究[J]. 中国高新技术企业, 2007(12): 90.
- [9] 袁国刚, 谢坡岸, 静波, 韩雪华. 轴向预紧力对变压器绕组振动特性的影响[J]. 噪声与振动控制, 2003(2): 25-27.
- [10] 乔丽威. 基于振动分析方法的电力变压器故障分析建模[D]: [硕士学位论文]. 河北: 华北电力大学, 2013.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>