

基于有限元模型的变压器绕组松动研究

许洪华¹, 陈冰冰¹, 弓杰伟², 李勇¹, 马宏忠²

(1. 南京供电公司, 江苏 南京 210019; 2. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

摘要:为了研究预紧力大小与变压器绕组松动的关系,通过有限元分析了不同预紧力对变压器振动信号的影响。绘制变压器模型并导入有限元分析软件 ANSYS Workbench 进行模态分析和谐响应分析,得到了变压器固有频率随着预紧力降低而减小的结果,而施加激励力后,预紧力的变化对振动信号也有较大的影响,其变化趋势由不同位置处的结构决定。因此可以通过计算变压器在不同预紧力时的振动响应特性,并与历史数据比较,从而判断绕组是否发生松动。

关键词:变压器;有限元模型;预紧力;模态分析;谐响应分析

中图分类号:TM406

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2016)02-0023-03

变压器在运输、安装以及长期运行后,可能会因为碰撞或短路冲击等原因而导致绕组压紧程度降低,而某一相绕组的垫块偏移、损坏也会导致绕组局部松动。变压器在此状态下长期运行将会给电网的安全运行带来很大危害^[1]。因此有必要对电力变压器进行绕组松动研究。近年来变压器故障研究侧重点为电气或油气参数的分析方面^[2-5],而振动法是通过分析变压器油箱表面的振动信号来进行故障诊断,与变压器没有电气连接,是一种可靠的变压器监测技术^[6-8]。因变压器绕组的松动或变形必然会导致变压器器身的机械动力学特性发生变化,并对振动的传播能力也不同^[9,10],则可从绕组结构等方面来研究其对振动的影响。

1 有限元建模

在复杂结构的动态分析中,需要利用各种离散化方法建立结构的离散化模型。有限元方法就是将结构离散为有限个单元,将各个单元的质量矩阵和刚度矩阵集成总的质量矩阵和刚度矩阵,从而得到总的系统有限元模型^[11]。文中通过 ANSYS Workbench 有限元建模对油浸式变压器进行绕组松动研究,研究对象是1台电压等级为10 kV的油浸式电力变压器。该变压器的绕组由绝缘电磁线紧密缠绕并加上一定预紧力构成,故在建模过程中可以将线圈等效为实体圆环,其余部分则按变压器原尺寸搭建,如图1所示。

模型中各零件材料参数的设置对于有限元分析来说十分关键,而绝缘垫块的非线性特性会导致其弹性模量随着所受预紧力的变化而变化,可以通过相关公式^[12]计算得到不同预紧力下绝缘垫块的弹性模量。

2 模态分析

模态分析用于确定结构的振动特性,其实质是求解具有有限个自由度的无阻尼和无外载荷状态下的运

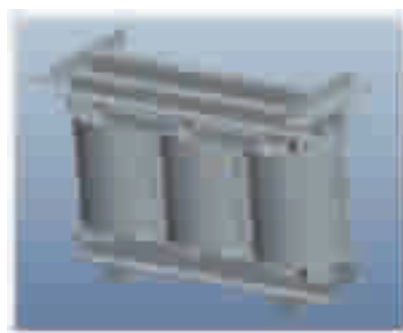


图1 变压器有限元模型

动方程,得到方程的特征值和特征向量,即各个模态的固有频率和模态振型。为了确定各阶频率以及振型对结构的不同影响,通过合理设计使变压器固有频率远离激励力频率,避免引起共振,并以此预测变压器绕组结构在其固有频率范围内受外部激励作用下的实际振动响应。振动特性决定结构对于各种动力载荷的响应情况,因此任何形式的动力学分析都必须建立在模态分析的基础上。

在变压器振动计算中,固有频率和模态振型是其固有特性,只与结构质量和刚度分布有关。因此,可以建立变压器的振动微分方程:

$$M\ddot{X} + B\dot{X} + KX = F \quad (1)$$

式(1)中: M 为质量矩阵; B 为阻尼矩阵; K 为刚度矩阵; F 为绕组整体节点载荷列向量; X 为节点的位移向量; \dot{X} 为节点的速度向量; \ddot{X} 为节点的加速度向量。

振动模态是变压器的固有特性,在进行模态分析时不需要施加非零位移约束,所以忽略系统的阻尼和外载荷,可得:

$$M\ddot{X} + KX = 0 \quad (2)$$

设该方程的解为:

$$X = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

式(3)中: A 为位移幅值向量; φ 为位移响应滞后激励载荷的相位角,代入式(2),可得:

$$(K - \omega^2 M)gX = 0 \quad (4)$$

式(4)中: g 为重力加速度。由上式可知,非零解满足:

$$|K - \omega^2 M| = 0 \quad (5)$$

式(5)即为振动的特征方程,特征值的平方根 ω_i 即为结构自由振动的固有频率,特征向量 X_i 则为与 ω_i 对应的振型。因此,模态分析就转化为求解特征值的问题,可以通过有限元法进行特征值的求解。

利用有限元模型进行模态分析时,需先对变压器模型中各部分零件进行合理剖分来控制计算时间和计算精度。模型以0.04 m的单元大小自由划分网格,网格密集程度由各零件的刚度大小决定,刚度越小,网格越密集,计算越复杂。模型可以划分出164 033个节点和24 173个单元。计算前需对其施加边界条件,由此可以求得特征值和特征向量。完全约束底面钢板的底部位移以及4根螺杆的底部位移,并在螺杆的顶部施加预应力来模拟预紧力的影响,如图2所示。



图2 施加载荷和约束

在实际结构中,往往是低阶固有频率及其振型对动态特性的影响最大,故利用ANSYS有限元计算方法,对不同预紧力下的变压器模型进行模态分析,表1为预紧力与额定预紧力(变压器出厂时的预紧力,即为变压器绕组正常时的预紧力)的比值分别为0,0.25,0.5,0.75和1时的固有频率计算值。

表1 不同预紧力下固有频率的计算值 Hz

项目	预紧力 / 额定预紧力				
	0	0.25	0.5	0.75	1
固有频率1阶	93.85	96.62	101.29	107.49	121.64
固有频率2阶	136.24	140.56	147.36	160.36	173.98

从表1可以看出变压器模型的固有频率随着预紧力的下降而减小,符合理论结果。这是因为固有频率的大小在很大程度上取决于装配后的压紧程度,而且绝缘垫块的弹性模量也与此有关^[13]。因此,可以通过变压器固有频率来判断其预紧力的大小。

3 谐响应分析

谐响应分析是为了确定结构在已知频率和幅值的正弦载荷作用下的稳态响应,计算结构在不同频率下的振动情况,并得到振动响应曲线。变压器工作时,在电磁力的激励下,线饼振动可以看作是简谐运动,故通

过谐响应分析来模拟变压器带电运行时的振动情况。

绕组在简谐载荷下作受迫振动的运动微分方程为:

$$M\ddot{X} + B\dot{X} + KX = F\sin(\theta t) \quad (6)$$

若节点位移响应为 $X = A\sin(\theta t + \varphi)$,那么代入式(6)可得:

$$A = [-M\theta^2 \sin(\theta t + \varphi) + B\theta \cos(\theta t + \varphi) + K\sin(\theta t + \varphi)]^{-1} g F \sin(\theta t) \quad (7)$$

利用有限元法求解上述方程,设定 θ 的频率范围和子步数,计算相应的幅值,从而得到幅值与频率之间的关系。

文中使用模态叠加法,将模态分析得到的振型乘上因子,并通过求和来计算结构的响应。模态叠加法比完全法求解更快且开销更小,包含预应力效果,而且可以使解按结构的固有频率聚集,可产生更平滑、更精确的响应曲线图。进行谐响应分析时,先设定计算频率范围为0~400 Hz,分为400个子步,设置阻尼比率为0.02,并在绕组上施加一个 $1.5 \times 10^{-4} g$ 的加速度来模拟电磁力的影响,以此可以计算出变压器的形变、加速度以及应力响应。预紧力与额定预紧力的比值为0.5时铁心顶部、C相顶部和C相正面的位移响应曲线如图3所示,其幅值表示的是相对值,表征各点在某一阶固有频率上振动量的相对比值,反映该固有频率上振动的传递情况,并不反映实际振动的数值。

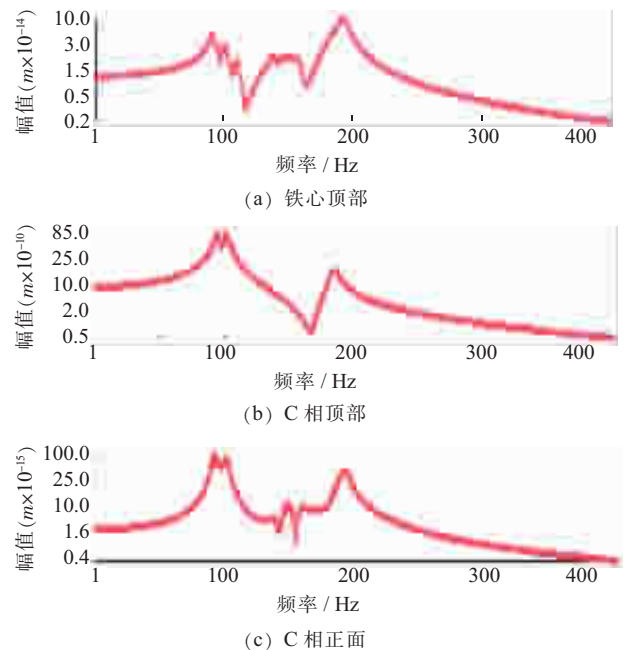


图3 预紧力为3134 N时不同位置的位移响应曲线

从图3可以看出,当激励力为100 Hz时,变压器模型有较大的幅值。这是因为模型在100 Hz附近有一阶固有频率,从而发生共振,导致了较大的振动。

通过计算带电情况下变压器在不同预紧力时的振动响应特性,找出故障特征明显的振动信号,并与绕组工作时的测试结果对比,可诊断出变压器内部是否出

现故障,而且还可以进一步判断故障位置。在对谐波响应分析结果的处理中,以额定预紧力时的响应为参考点,绘制变压器不同位置处 100 Hz 的响应与预紧力正常时的响应相对比曲线如图 4 所示。

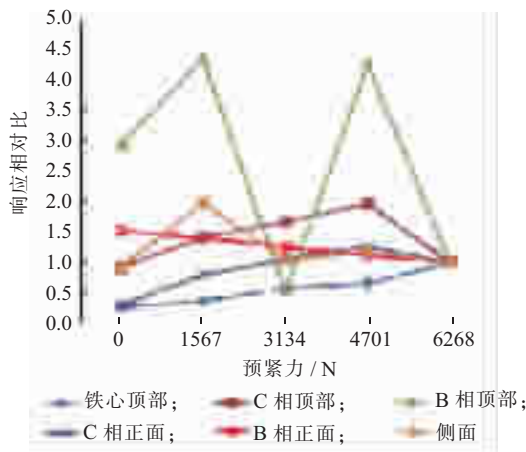


图 4 100 Hz 的幅值响应相对比

从图 4 中可以看出,与正常情况相比,铁心顶部的响应变化程度随着预紧力的减小而不断增大,这是因为绕组松散程度加强,振动增大,而铁心的刚度较大,所以呈现单调的趋势;其他部分测点则是先增大后减小,这与固有频率的分布、阻尼和非线性特征等都有一定的关系。

4 结束语

从机械动力学角度通过有限元建模分析对变压器的绕组松动缺陷进行了研究,根据模态分析和谐波响应的结果可以发现,预紧力的变化对变压器绕组结构有很大的影响,当绕组压紧降到一定程度后,其固有频率会降低至 100 Hz,这时由于绕组电力的基频也为 100 Hz,所以会引起较大的振动。若长期在振动剧烈的状态下运行,则会导致变压器故障。变压器绕组的松动本质上影响了其本身的动力学性能,因此可以通过计算变压器在不同预紧力时的振动响应特性,并与历史数据比较,从而来判断绕组是否发生松动。

参考文献:

[1] 冯永新,邓小文,范立莉,等. 大型电力变压器振动法故障诊断

与发展趋势[J]. 变压器,2009,46(10):69-73.

- [2] 华德峰,卞超,甘强,等. 一起 220 kV 变压器绕组变形故障分析[J]. 江苏电机工程,2015,34(2):15-17.
- [3] 唐勇波,桂卫华,彭涛,等. PCA 和 KICA 特征提取的变压器故障诊断模型[J]. 高电压技术,2014,40(2):557-563.
- [4] 柯于刚,顾文雯. 220 kV 主变短路故障后的综合试验分析[J]. 江苏电机工程,2015,34(2):21-23.
- [5] 潘超,王梦纯,蔡国伟,等. 变压器直流偏磁场路耦合计算中的磁化曲线拟合[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):49-52.
- [6] 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.
- [7] BARTOLEYI C, DESIDERIO M, CARLO D D, et al. Vibro-acoustic Techniques to Diagnose Power Transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1):221-229.
- [8] 汲胜昌,李彦明,傅晨钊. 负载电流法在基于振动信号分析法监测变压器铁心状况中的应用[J]. 中国电机工程学报,2003,23(6):154-158.
- [9] 谢坡岸,饶柱石,朱子述. 大型变压器绕组有限元建模与分析[J]. 振动与冲击,2006,25(2):134-137.
- [10] 王世山,汲胜昌,李彦明. 利用振动法进行变压器在线监测的应用研究[J]. 变压器,2002,39(S1):73-76.
- [11] 谢坡岸. 振动分析法在电力变压器绕组状态监测中的应用研究[D]. 上海:上海交通大学,2008.
- [12] 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.
- [13] 余小辉,李岩,井永腾,等. 变压器绕组模型的固有频率计算与分析[J]. 变压器,2010,47(7):6-8.

作者简介:

许洪华(1981),男,山东临沂人,博士,从事电力系统运行与控制工作;

陈冰冰(1983),男,江苏南京人,高级工程师,从事输变电设备检修工作;

弓杰伟(1991),男,江苏泰州人,研究生在读,从事电力设备状态监测与故障诊断研究工作;

李勇(1982),男,江苏南京人,工程师,从事输变电设备运行维护工作;

马宏忠(1962),男,江苏南京人,博士生导师,从事电力设备状态监测与故障诊断、电能质量监控等研究工作。

Research on Transformer Winding Looseness Using Based on Finite Element Model

XU Honghua¹, CHEN Bingbing¹, GONG Jiewei², LI Yong¹, MA Hongzhong²

(1. Nanjing Power Supply Company, Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210019, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to investigate the relationship between pre-compression and transformer winding looseness, the influence of different pre-compressions on transformer windings is analyzed using finite element method. The model of transformer is built in ANSYS Workbench so that modal analysis and harmonic response analysis can be carried out. The analysis results show that natural frequency decreases with pre-compression reduces. With excitation force, pre-compression change has great effects on vibration signal, and changing tendency is decided by structure. Therefore, through comparing the vibration response characteristics of transformer under different pre-compression to historical data, winding looseness can be identified.

Key words: transformer; finite element model; pre-compression; modal analysis; harmonic response analysis