

短路条件下变压器振动特性研究

洪凯星¹, 潘再平^{1*}, 黄 海²

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江大学 仪器科学与工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要:利用振动法对运行中的变压器进行诊断是一种新的趋势,但是到目前为止,振动法的效果仍然不够理想。变压器表面振动信号比较复杂,如何得到一个能正确反映实际振动的模型是研究的关键,针对如何简化模型的问题,提出了短路条件下变压器油箱表面的振动模型,该模型基于振动的产生和传递过程。该模型的参数由单相短路实验得到的数据计算得到。利用得到的模型,只需要根据输入电流值即可计算振动估计值。最后,采用三相短路实验验证了模型的正确性。实验结果表明,估计信号和实测信号基本一致,利用简化的绕组模型和传递模型是完全可行的。

关键词:变压器;短路实验;油箱振动;振动模型

中图分类号:TH7;TM76

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)06-0087-04

Research on short-circuit vibration of power transformer

HONG Kai-xing¹, PAN Zai-ping¹, HUANG-Hai²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Department of Instrumental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Diagnose transformer using vibration method is a new trend which can monitor without shut apparatus down, but this method is still unsatisfied. The vibration signals from the transformer tank are complicated, and it is important to find a model which can reflect the vibration correctly. Aiming at how to simplify the vibration model, a transformer tank vibration model under short-circuit condition was presented. The model was based on how signal generates and how signal transmits. The model was obtained using data set sampled in single phase short-circuit tests. With the fully trained model, the estimated vibration signal at one point was calculated by employing the input current only. In order to validate the model, three phase short-circuit tests were taken. The results show a good agreement between estimated signals and measured signals, the results indicate that it is feasible to use a simplified windings and transmission model.

Key words: transformer; short circuit test; tank vibration; vibration model

0 引 言

变压器是电力系统中的重要设备之一,其安全运行^[1]对保证电网安全与可靠具有重大意义,因此对运行中的变压器进行状态检测和故障诊断有着重要的现实意义。与目前广泛运用的频率响应法和油色谱法相比,振动法对可能诱发变压器更大故障的机械结构缺陷反应灵敏且有效,并且与整个电力系统没有电气连接,对整个电力系统的正常运行无任何影响。

目前国内外学者在变压器振动方面作了一些研究。意大利的 Cipriano Bartoletti^[2]等对变压器表面的振动和声传感器获得的信号进行分析,并得到判断变压器状态的经验公式。西班牙的 Garcia^[3,4]等研究了油箱表面振动的相位、幅值的变化情况,以及其与电流、电压、温度之间的数值关系。但该文并没有建立振动模型,文章中的数据只能反映振动的一般特性。西安交通大学的汲胜昌^[5-7]博士研究了负载电流与绕组振动的关系,初步探索了利用油箱表面振动来检测变

收稿日期:2010-01-25

作者简介:洪凯星(1985-),男,浙江天台人,硕士研究生,主要从事变压器故障的在线检测方面的研究。E-mail: hongkaixing@zju.edu.cn

通信联系人:潘再平,男,教授,E-mail: panzaiping@zju.edu.cn

压器故障的可能性,并引入小波包分析提取变压器箱壁的振动信号的特征信息。上海交通大学的谢岸坡等人^[8-9]从动力学建模入手,建立了完善的绕组分析模型,通过深入的理论分析和试验研究,找出变压器不同运行状况时在预紧力的作用下绕组和箱体的振动特征。

利用振动法对电力变压器进行状态检测和故障诊断是目前变压器领域的一个前沿问题,如何寻找一个能够反映变压器状态的特征矢量是研究的难点。变压器内部结构和信号传递过程非常复杂,因此正常情况下油箱表面振动很难用统一的表达式来表示。变压器油箱表面的振动主要来自绕组和铁芯,而绕组比铁芯更容易发生故障,因此有必要找到一个能够反映绕组振动的模型。绕组的振动可以认为是由电流引起,而铁芯的振动与硅钢片内部的磁场有关。铁芯振动的频谱范围很广,而绕组振动的频率成分比较单一,在正常运行过程中,两种频率成分是混叠在一起的,目前还尚未有方法能够将两种信号分离开。

为了能得到反映绕组特性的振动,又不混入铁芯的振动,本研究提出一个短路条件的绕组振动模型。在短路条件下,振动信号主要来自绕组,相比之下较简单,同时又能反映绕组工作状态。

1 测试原理

变压器油箱表面的振动主要是由绕组和铁芯产生,经过夹件、油传递到油箱表面。由于变压器的结构各异,所以表面振动信号很难用统一的表达式来表示,尽管如此,经过分析,振动信号和其他物理量之间还是存在某种规律。

变压器铁芯的振动主要来自铁磁材料的磁致伸缩现象。硅钢片的形变随磁场强度的变化而变化,铁芯的振动与绕组上的电压存在以下关系:

$$A_c \propto U^2 \quad (1)$$

式中 A_c —基频振动幅值; U —电压有效值。

由上式可知铁芯的振动是一个和绕组电流无关的量,并且只与施加的电压有关。

绕组的振动是由通电导体在漏磁场中受到电磁力作用产生的。由于不同变压器的绕组结构存在差异,且本研究的是油箱表面的振动,可把绕组模型简化为一个质量弹簧阻尼系统,在电磁力 f 的作用下:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f \quad (2)$$

式(2)中的质量系数 m , 阻尼系数 c , 弹簧系数 k 只与变压器具体结构有关,对于某一特定的变压器,在

实验中把这些参数当成一个常量。电磁力大小^[10]与绕组结构和电流大小有关,在结构不变的条件下,与电流的平方成正比。电磁力可表示为:

$$f \propto i^2, i = \sqrt{2}I \cos(\omega t + \theta) \quad (3)$$

式中 I —电流有效值; ω —电流的角频率; θ —电流相位角。

将电磁力代入式(2)可以得到振动的稳态解,对应的加速度信号的稳态解为:

$$\ddot{x}(t) = K_1 I^2 \cos(2\omega t + 2\theta + \varphi_1) \quad (4)$$

当 m, c, k, ω 参数不变时, φ_1 和 K_1 是常量。

绕组产生的振动主要是由 100 Hz 分量构成,因此在简化模型中用衰减和相移系统来表示绕组振动到油箱表面某测点的振动传递过程:

$$G(j\omega) = K_2 e^{j\varphi_2} \quad (5)$$

在 ω 不变时, K_2 和 φ_2 都为常量。

于是油箱表面振动的稳态解可表示为:

$$a(t) = K_1 K_2 I^2 \cos(2\omega t + 2\theta + \varphi_1 + \varphi_2)$$

记常数 $K = K_1 K_2$, $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$, 并用复数来表示,对应的由某一相产生的振动为(实际振动就是该复数的实部):

$$\vec{a}_i = K_i I_i^2 e^{j(2\omega t + \varphi_i + 2\theta_i)} \quad (i = A, B, C) \quad (6)$$

以上详细阐述了铁芯振动模型,绕组振动模型和基频振动传递模型三大模型。为了使油箱表面的振动信号不包括铁心分量,根据式(1),最好的办法是将绕组上的电压降为 0。在变压器短路实验中,将低压端短路,并在高压端加电压,使绕组电流达到额定。在该条件下,铁芯产生的振动可以忽略不计,油箱表面的振动可以认为全由绕组振动产生。短路条件下的变压器振动模型就是基于以上的条件,该模型实际只需考虑绕组产生的振动。

利用该模型计算短路条件下的油箱表面的振动,只需根据测得的相电流,并根据式(6)计算每一相产生的振动,总的振动就是 3 个振动的矢量叠加。在以下的实验测量和验证中,先根据油箱表面振动的大致情况选择最佳测点,再根据单相短路实验测得振动系数,最后利用三相短路实验对模型进行验证。

2 实验系统及方案

实验中采用的三相模型变压器型号为 S11-10/10,额定容量:10 kVA,初级额定电压:10 000 V,次级额定电压:400 V,联结组别:Yyn0。振动传感器型号为 PCB 的 608A12,灵敏度为 500 mV/g。

在短路实验中,将变压器低压端短路,并将高压端连接到三相调压器,调节电压使绕组电流达到额定,如图1所示。

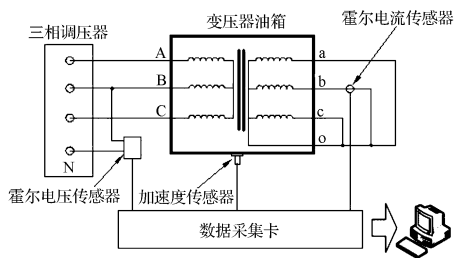


图1 实验测量系统

测量变压器各个不同位置处的振动,传感器位置布置如图2所示,在油箱顶部和侧面等间距地布置3个传感器。根据测得的信号选择最合适的测点,使之最能反映内部振动情况。

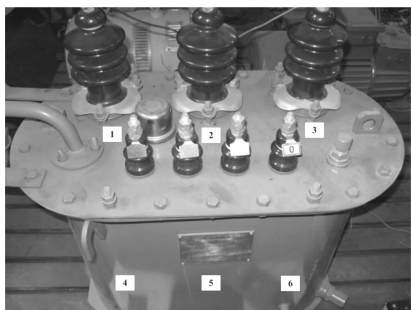


图2 变压器上振动传感器位置

如果要计算得到式(6)中 K 和 φ 的值,选择任意两串联的绕组进行单相短路实验,此时两绕组中的电流大小相等、方向相反,两个串联绕组产生的振动可以表示为:

$$K_{mn} I^2 e^{j\varphi_{mn}} = \vec{a}_m + \vec{a}_n \quad (m, n = A, B, C) \quad (7)$$

研究变压器在正常工作条件下绕组电流对油箱表面振动的影响,则应将三相同步短路,在变压器三相负载平衡时,3个绕组上的电流幅值相等,相位相差 120° ,相位以中间相的电流为参考。在不同相序下,振动表达式的结果是不同的,正相序(顺时针)下振动表达式为:

$$K_{ABC} I^2 e^{j\varphi_{ABC}} = \vec{a}_A + \vec{a}_B + \vec{a}_C \quad (8)$$

将A相与C相对调后得到逆相序下的振动表达式为:

$$K_{CBA} I^2 e^{j\varphi_{CBA}} = \vec{a}'_A + \vec{a}'_B + \vec{a}'_C \quad (9)$$

3 实验结果及分析

油箱表面振动多点测量结果如图3~图4所示(其中图3为油箱顶部1,2,3号位置测得的振动,图4为油箱侧面4,5,6号位置测得的振动)。振动信号以100 Hz

为主,油箱顶部3个测量点的振动相位基本一致,而且振幅相差不大。相比之下,4号观测点和6号观测点的相位几乎反相,且5号观测点的振动幅值比4号和6号小。相比之下2号位置信号比较明显且与位置关系不大,下文中将选择该位置为最佳测点,测量各相电流与振动的关系。

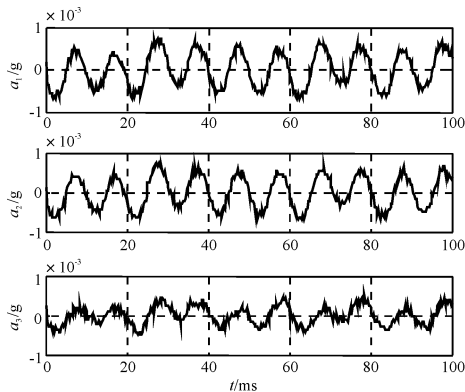


图3 油箱顶部振动

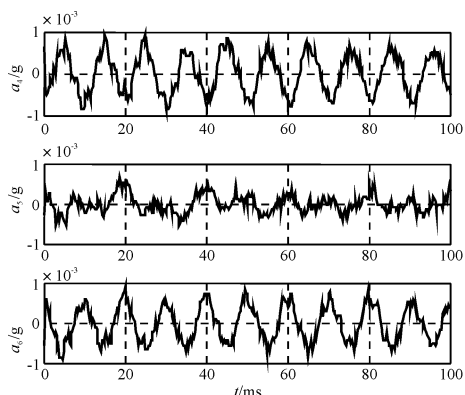


图4 油箱侧面振动

如式(7)所示,两绕组单相短路有3种不同的组合,不同情况下,测点的振动信号幅值与电流有效值平方的关系如图5所示。若不计测量误差的影响,可以认为3条拟合曲线都是过原点的直线。

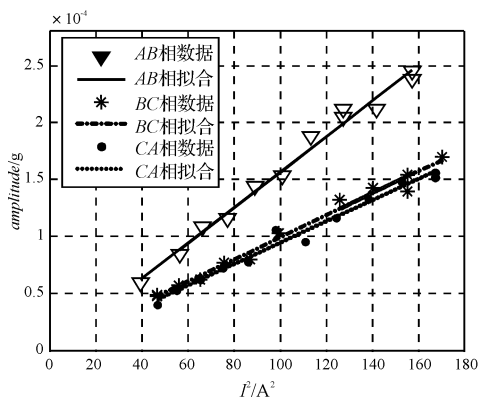


图5 单相短路下振动幅值与电流的关系

对照式(6)可知,振动信号与电流平方的相位差是常数,且振动信号基频的幅值与电流有效值的平方成正比,各个参数的测量结果如表 1 所示,根据式(7)可以计算得到单相绕组的振动系数,计算结果如表 2 所示。

表 1 单相短路下系数测量值

系数 $K/(10^{-7})$			系数 φ/rad		
K_{AB}	K_{BC}	K_{CA}	φ_{AB}	φ_{BC}	φ_{CA}
15	10	9	2.3	4.6	3.0

表 2 振动系数计算值

系数 $K/(10^{-7})$			系数 φ/rad		
K_A	K_B	K_C	φ_A	φ_B	φ_C
14.3	1.1	9.9	2.24	3.15	4.69

三相短路实验中,在正相序和 C 相与 A 相对掉后的逆相序下振动信号的幅值与电流有效值平方的关系如图 6 所示。

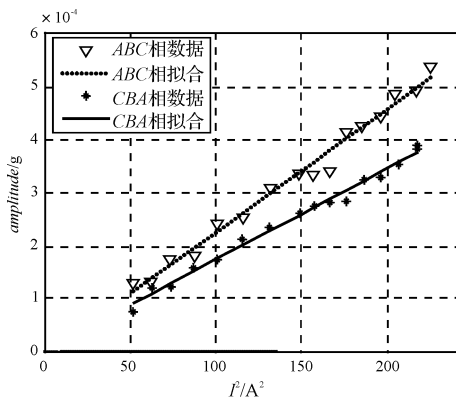


图 6 三相短路下振动幅值与电流的关系

从图 6 可以看出该模型变压器在不同相序下的振动大小是不同的,这与变压器内部结构有关。三相短路下的振动系数可以由实验直接得到,如根据图 6 中直线的斜率可以得到 K_{ABC} 和 K_{CBA} ,也可以由表 2 的振动系数根据式(8)、式(9)计算得到,这两种方法的差别如表 3 所示。实验证明两种方法得到的结果基本一致。

表 3 三相短路下振动系数

	K_{ABC}	K_{CBA}	φ_{ABC}	φ_{CBA}
计算值	22.7	17	0.31	3.64
实测值	23.4	17.4	0.34	3.5
误差	3%	2.3%	8.8%	4%

4 结束语

在短路条件下,变压器油箱表面的振动主要来源

于绕组振动,而绕组振动和短路电流有关。本研究提出的简化模型用一个简单的质量弹簧阻尼系统来表示振动的产生,并用一个在工频下参数不变的衰减和相移系统来表示绕组振动到油箱表面的传递过程,实验结果证明该模型完全是可行的。

在模型中,系数 K 和 φ 是两个非常重要的参数,实验证明了这两个参数在同一位置是固定不变的,而两个参数与变压器结构之间的关系有待进一步研究。

参考文献 (References):

- [1] BENTSSON C. Status and trends in transformer monitoring [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, 11(3):1379 - 1348.
- [2] BARTOLETTI C, DESIDERIO M, DI C D, et al. Vibro-acoustic techniques to diagnose power transformers [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004, 19(1):221 - 229.
- [3] 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):158 - 163.
- [4] GARCIA B, BURGOS J C, ALONSO A M. Transformer tank vibration modeling as a method of detecting winding deformations Part- II: Experimental verification [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, 21(1):164 - 169.
- [5] JI Sheng-chang, LUO Yong-feng, LI Yan-ming. Research on extraction technique of transformer core fundamental frequency vibration based on OLCM [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, 21(4):1981 - 1988.
- [6] 程 锦,汲胜昌,刘家齐,等. 绕组振动信号监测法中测试位置的影响与分析 [J]. *高电压技术*, 2004, 30(10):46 - 48.
- [7] 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.
- [8] 谢坡岸,饶柱石,朱子术. 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 - 138.
- [9] 邵宇鹰,饶柱石,谢坡岸,等. 预紧力对变压器绕组固有频率的影响 [J]. *噪声与振动控制*, 2006, 26(6):51 - 53.
- [10] 王璋奇,王 孟. 电力变压器绕组轴向振动稳定性分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2002, 22(7):25 - 28.

[编辑:李 辉]