

基于辨识模型的变压器故障诊断方法研究

王峰, 王春宁

(南京供电公司, 江苏南京 210019)

摘要:提出了一种基于辨识模型的电力变压器绕组变形和铁心松动的故障检测方法。根据变压器的运行特点, 结合其正常状态和故障状态下不同的振动特性, 利用安装在变压器表面的振动传感器监测振动信号, 对振动信号进行频谱分析, 并根据振动特征频谱判定变压器中是否存在绕组变形和铁心松动故障, 实例验证了该方法的正确性。

关键词:变压器; 故障诊断; 辨识模型; 绕组变形; 铁心松动

中图分类号: TM41

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)01-0026-04

电力变压器是电力系统的核心设备之一, 其安全运行是电网安全运行的基础^[1,2]。变压器最常用的监测方法是油色谱分析(DGA), 也是目前相对比较成熟的方法^[3]。虽然DAG方法在保证电力变压器安全运行方面做出了很大贡献, 但是DGA方法存在对非热故障无能为力、对早期潜伏性故障诊断困难等不足。基于振动数据分析的变压器诊断方法最先在美国、加拿大等开展研究及应用。BERLER Z等人提出, 通过在线监测变压器油箱表面振动噪声信号来分析判断绕组及铁心状况。在线监测变压器油箱表面振动噪声信号, 分析判断绕组及铁心状况的频谱分析和时域波形, 能较好反应绕组故障^[4]。GARCIA B等结合空载和负载振动信号, 消除磁致伸缩对绕组振动信号的干扰, 以获取基于绕组压紧力的振动相关系数^[5]。基于振动的变压器故障诊断方法通过分析变压器器身振动信号来判断变压器早期潜在的故障, 是一种在线监测方法, 属体外监测, 安装在运行设备表面的振动传感器获取其振动信号, 再应用时域和频域分析方法对信号进行分析处理得出变压器的工作状况。基于辨识模型的电力变压器的故障检测方法结合基于振动的变压器故障诊断方法, 通过建立变压器运行状态的辨识模型和特征向量, 比较特征量与正常阈值得出变压器是否存在故障。该方法具有与整个电力系统没有电气上的联系, 监测安全方便等优点, 同时避免了传统理论模型参数多, 原始参数困难等难题。

1 变压器箱体振动理论模型

1.1 变压器绕组振动模型

大型电力变压器的绕组是由一系列铜线饼叠加而成, 相邻铜线饼之间由绝缘垫块隔开, 绕组上下部都有铁轭, 起到压紧绕组的作用^[6]。变压器工作时, 绕组中的电流与漏磁场作用, 产生电磁力作用于线饼上, 在电磁力的激励下, 单个线饼可以看作是在进行

力学中的简谐振动。线饼间的绝缘油, 对绕组振动起到阻尼的作用。单个线饼的简化动力学模型如图1所示。

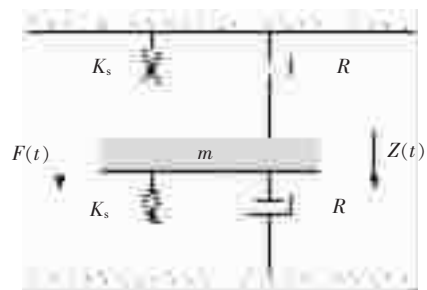


图1 单个线饼简化动力学模型

图1中, m 为单个线饼的质量; K_s 为线饼间绝缘垫块的静刚度; R 为相邻线饼间绝缘油的阻尼系数; $Z(t)$ 为单个线饼的位移; $F(t)$ 为线饼所受的电磁力。对于变压器绕组的整体结构, 可以做如下简化: 假设绕组所有线饼单元质量相同, 以 m 表示; 相邻线饼间变压器绝缘油的阻尼系数相同, 以 C 表示; 相邻线饼间刚度相同, 用 K 表示; 绕组两端的线饼与铁轭的连接处的刚度各不相同。结合以上分析与以及单个线饼模型, 可以得出绕组整体动力学模型, 如图2所示。

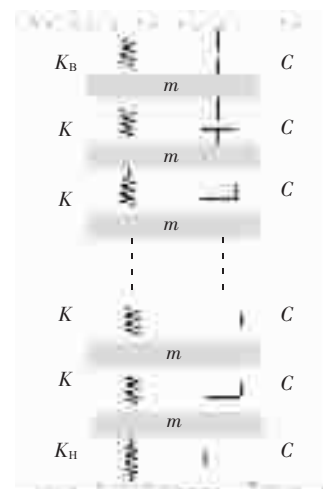


图2 绕组动力学模型

绕组模型的运动方程为:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 z_1}{dt^2} + C \frac{dz_1}{dt} + K_B z_1 + K(z_1 - z_2) = F_1 + mg \\ m \frac{d^2 z_2}{dt^2} + C \frac{dz_2}{dt} - K(z_1 - z_2) + K(z_2 - z_3) = F_2 + mg \\ m \frac{d^2 z_3}{dt^2} + C \frac{dz_3}{dt} - K(z_2 - z_3) + K(z_3 - z_4) = F_3 + mg \\ \vdots \\ m \frac{d^2 z_n}{dt^2} + C \frac{dz_n}{dt} - K(z_{n-1} - z_n) + K_H z_n = F_n + mg \end{cases} \quad (1)$$

式中: z_n 为第 n 个线饼的位移; C 为相邻线饼间变压器绝缘油的阻尼系数; K_B 为线饼与上端部铁轭之间的刚度系数; K 为相邻线饼间的刚度系数; K_H 为线饼与下端部铁轭之间的刚度系数; F_n 为第 n 个线饼单元所受的电磁力; mg 为单个线饼的质量; $m \frac{d^2 z_n}{dt^2}$ 为第 n 个线饼单元的惯性力; $C \frac{dz_n}{dt}$ 为第 n 个线饼单元受到的阻尼力; $K z_n$ 为第 n 个线饼单元受到的弹性力。可以推得,变压器绕组动力学模型的振动加速度为:

$$a = -4\omega^2 G \sin(2\omega t + \psi) = -4\omega^2 \frac{pI_m^2}{\sqrt{(K - 4M\omega^2)^2 + 4C^2\omega^2}} \sin(2\omega t + \psi) \quad (2)$$

式中: G 为振动加速度系数; M 为变压器绕组质量。

1.2 变压器铁心振动模型

变压器绕组内部的磁场可以看作是均匀磁场,绕组内部磁场强度为^[7]:

$$H = \frac{N}{L_0} I(A/m) = \frac{4\pi N}{10^3 L_0} I(Oe) \quad (3)$$

磁感应强度为:

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 \mu_r (N/L_0) I \quad (4)$$

式中: L_0 为铁心环路的平均长度; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ 为真空磁导率; μ_r 为相对磁导率; N 为初级绕组总匝数。

近年来,由于铁轭和铁心柱采用无纬环氧黏带绑扎以及铁心叠压方式的改进,变压器硅钢片叠片间和接缝处的电磁力引起的振动较为微弱,铁心部分的振动可以看作仅由磁致伸缩效应产生。磁场中的硅钢片发生的线性形变与磁场强度的关系为:

$$\frac{1}{L} \frac{dL}{dH} = \frac{2\varepsilon_s}{H_c^2} |H| \quad (5)$$

式中: H_s 为矫顽力; ε_s 为硅钢片的饱和磁致伸缩率。由磁致伸缩率的定义知:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{2\varepsilon_s}{H_c^2} \int_0^H |H| dH = \frac{2\varepsilon_s}{H_c^2} H^2 = CH^2 \quad (6)$$

式中: L 为硅钢片的初始长度; ΔL 为硅钢片长度改变量; $C = \frac{\varepsilon_s}{H_c^2}$ 为硅钢片的伸缩系数。可以推得,硅钢片的磁致伸缩率为:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{2\varepsilon_s}{H_c^2} \int_0^H |H| dH = \frac{2\varepsilon_s}{H_c^2} H^2 = \frac{\varepsilon_s B_0^2}{B_s^2} \cos^2 \omega t = \frac{\varepsilon_s V_0^2}{(N_1 A \omega B)^2} \cos^2 \omega t \quad (7)$$

由式(7)可以看出,硅钢片的磁致伸缩率与变压器加载电压的平方成正比,频率为电压频率的2倍。

2 变压器箱体振动辨识模型

2.1 振动辨识模型

由之前的分析知,传播至变压器表面的振动主要由绕组和铁心两部分产生,实际变压器中,绕组多由A、B、C三相构成。变压器油箱上的振动是由三相绕组和铁心同时产生^[8]:

$$v_{100} = K_A I_A^2 \cos(2\omega t + \varphi_A) + K_B I_B^2 \cos(2\omega t + \varphi_B) + K_C I_C^2 \cos(2\omega t + \varphi_C) + K_{\text{core}} U^2 \cos(2\omega t + \varphi_{\text{core}}) \quad (8)$$

式中: K_{core} , φ_{core} 分别为铁心的传递系数; K_A , K_B , K_C , φ_A , φ_B 和 φ_C 分别为各相绕组振动的传递系数。式(8)即为变压器油箱表面测得振动加速度信号基频分量的模型。式中前3项分别反映的是A、B、C三相绕组的振动,第4项为铁心产生的振动。

2.2 模型参数识别

由于模型是针对加速度信号中的基频信号,即100 Hz频段的信号,因此首先需要将采集到的信号滤波,去除100 Hz以外的分量。文中使用带通滤波器,滤除0到60 Hz,以及130 Hz以上部分

为了确定模型参数,同时保证模型参数可以准确刻画振动输出与输入变量之间的依赖关系,选取变压器在不同加载电压和电流条件下测得的振动信号。算法中参数取值人工鱼数目为100只,最多迭代次数为100次,最多试探次数为200次,感知距离为1,拥挤度因子为0.618,步长取为0.1。取:

$$Y = |K_A I_A^2 \cos(2\omega t + \varphi_A) + K_B I_B^2 \cos(2\omega t + \varphi_B) + K_C I_C^2 \cos(2\omega t + \varphi_C) + K_{\text{core}} U^2 \cos(2\omega t + \varphi_{\text{core}}) - V_{\text{real}}| \quad (9)$$

式中: Y 为适应度函数; V_{real} 为100 Hz频段振动信号的实测值。以适应度函数值最小为目标,辨识 K 和 φ 等参数。

当模型参数确定之后,该变压器箱体振动模型用于计算任意加载电压和电流下箱体振动信号的基频分量幅值大小。通过比较同等加载电压和电流下实测值

和模型计算值的大小和误差,发现实测值和计算值有较好的吻合度,且相对误差在可接受的范围(5%)内,因此文中所提出的模型可以用于对不同的变压器负载和加载电压预测变压器箱体表面振动的基频分量。

2.3 振动特征量

2.3.1 绕组变形

考虑到电力变压器故障征兆与故障原因之间的关系错综复杂,仅将单一频率分量的变化作为诊断依据,往往很难满足故障诊断的要求。经过大量实验研究,并结合绕组变形故障后各频带的变化规律,建立由3个诊断特征构成的绕组变形诊断综合判据如下:

$$\begin{cases} E_{T50} + E_{T150} = C_1 \\ q(E_{T50} + E_{T150}) / (E_{T100} + E_{T200}) = C_2 \\ E_{F100} / E_{T100} = C_3 \end{cases} \quad (10)$$

式中: E_{T50} , E_{T100} , E_{T150} , E_{T200} 分别为变压器油箱顶面振动信号 50 Hz, 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz 分量的能量值; E_{F100} 为变压器油箱正面中部振动信号 100 Hz 分量的能量值; C_1 , C_2 , C_3 分别为特征一、特征二、特征三的特征值。

要从监测的变压器油箱表面振动信号确定绕组的状况,则首先确定在正常与故障状态下特征向量 T 的特征值:

$$T = [C_1 \ C_2 \ C_3] \quad (11)$$

当高、低压绕组之一出现变形后,原频率处幅值出现变化。变压器表面的振动与变压器绕组的压紧状况、位移及变形密切相关,它们的变化将引起作为标准特征向量的正常状态变压器振动特征向量的变化,一旦变压器发生故障,将当前特征向量 T_x 与标准特征向量 T_N 作比较就可以迅速判断变形故障。

2.3.2 铁心松动

虽然铁心松动会引起 100 Hz 分量的改变,但因 100 Hz 分量影响因素多,故不把 100 Hz 作为主特征。以 300 Hz, 50 Hz, 150 Hz, 100 Hz 振动分量为共同特征进行诊断;以振动信号中 300 Hz 分量为第一特征;50+150 Hz 分量之和为第二特征;100 Hz 分量为第三特征。

2.4 基于辨识模型的故障诊断流程

基于辨识模型的故障诊断流程如图 3 所示。

3 算例分析

以实际算例验证绕组变形故障,铁心松动故障验证过程类似。所选变压器型号为 S9-M-100/10,电压比为 10/0.4 kV。3 个加速度振动传感器通过磁铁吸附方式分别固定于 A、B、C 三相铁心的正上方,通过尼高力数据采集仪采集,采样频率为 10 kHz,并传输至 PC 机进行分析并判定故障。

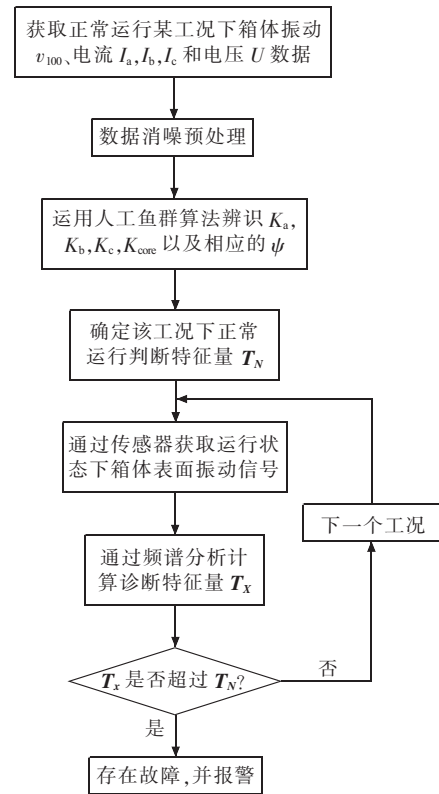


图 3 基于辨识模型的故障诊断流程

变压器设置绕组变形故障前后频谱如图 4、图 5 所示。当紧固螺杆松动时,硅钢片接缝处电磁力和磁致伸缩效应会增大。同时,硅钢片松散程度增大会增大硅钢片间的间隙,改变铁心整体的刚度和片间阻尼,导致片间振动加剧。这是 100 Hz 以及 300~600 Hz 处幅值变大的主要原因。

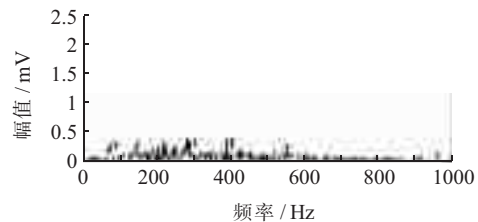


图 4 正常时频谱

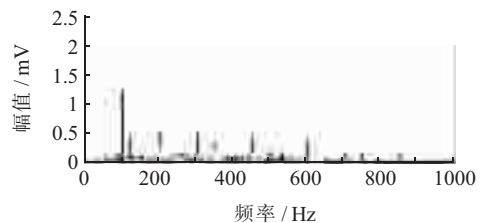


图 5 绕组变形后频谱

由表 1 分别计算测点 1、2、3 处的 $\Delta T = T_x - T_N = [\Delta C_1 \ \Delta C_2 \ \Delta C_3]$, 结果如表 2 所示。由此可见变压器 3 个测点处的 ΔC_1 、 ΔC_2 、 ΔC_3 均为正值。则初步认为绕组内部存在变形。

根据表 1 可得变压器的顶面基频能量 E_{T100} 增加

表1 监测点的特征向量

测点	标准特征向量 T_N	当前特征向量 T_X
1	[0.3125 0.2404 1.055]	[6.132 3.627 1.361]
2	[0.2554 0.2343 1.277]	[5.785 3.443 1.563]
3	[0.2512 0.2156 1.118]	[5.955 3.514 1.516]

表2 特征向量的对比

测点	ΔC_1	ΔC_2	ΔC_3
1	5.8195	3.3866	0.3060
2	5.5296	3.2087	0.2860
3	5.7038	3.2984	0.3980

了14.94%，其能量值增加不明显，而正面基频能量 E_{F100} 增加了57.87%，其能量增加幅度较大，故可确定该变压器的绕组故障即为绕组变形故障。

4 结束语

文中提出了一种基于辨识模型的电力变压器绕组变形和铁心松动的故障检测方法。该方法根据变压器的运行特点，结合其正常状态和故障状态下不同的振动特性，利用安装在变压器表面的振动传感器监测振动信号，通过频谱分析，比较同一工况下正常和异常的特征向量，判定变压器中是否存在绕组变形和铁心松动故障，并总结了绕组变形和铁心松动故障的特征判据。同时该方法避免了传统理论模型参数多，原始参数困难等难题，实例验证了方法的正确性。

Research on Transformer Fault Detection Based on Identification Model

WANG Feng, WANG Chunling

(Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China)

Abstract: A fault detection method for winding deformation and loosening of stator core based on identification model is proposed. According to operational characteristic of transformer, and combining with different vibration characters of normal and abnormal states, the spectrum of vibration signal is analyzed through the sensor installed on the surface of transformer. Based on the result of spectrum analysis, whether winding deformation and loosening of stator core occurs to transformer can be judged. Finally, a case study validates the proposed method.

Key words: transformer; fault detection; identification model; winding deformation; loosening of stator core

参考文献:

- [1] 黄明华,李红,伏祥运,等.参数不同变压器并列运行时负荷分配计算[J].江苏电机工程,2012,31(1):52-55.
- [2] 陆志平.一起110kV主变差动保护误动作原因分析[J].江苏电机工程,2013,32(1):13-14,17.
- [3] 孙颖.色谱分析方法在变压器故障诊断中的应用[J].广州化工,2010(8):89-90.
- [4] BERLER Z, GOLUBEV A, ROSOV V, et al. Vibro-acoustic Method of Transformer Clamping Pressure Monitoring[C]//Conference Record of 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Anaheim, CA, USA, 2000:263-266.
- [5] GARCIA B, BURGOS J C, ALONSO A M. Transformer Tank Vibration Modeling as a Method of Detecting Winding Deformations :Part I experimental verification[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(1):157-163.
- [6] 马宏忠,耿志慧,陈楷,等.基于振动的电力变压器绕组变形故障诊断新方法[J].电力系统自动化,2013,37(8):89-95.
- [7] 马宏忠,赵宏飞,陈楷,等.基于振动的变压器铁心松动判定方法[J].电力系统自动化,2013,37(13):72-76.
- [8] BARTOLETTI C, DESIDERIO M, DICARLO D, et al. Vibro-acoustic Techniques to Diagnose Power Transformers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(1):221-229.

作者简介:

王峰(1984),男,浙江丽水人,工程师,从事变压器故障在线诊断研究;

王春宁(1966),男,江苏南京人,高级工程师,从事电力企业科技管理工作。

江苏全社会用电量跃居全国第一

2014年1月7日,来自国网江苏省电力公司的数据显示,2013年江苏省全社会用电量实现历史性突破,较上年增长8.20%,达4957亿千瓦时,超过广东省4830.13亿千瓦时的全社会用电量,跃居全国第一。

江苏是经济大省,经济发展和人民生活水平快速提高,对电力的需求持续增长。江苏也是资源小省,电力供求长期处于紧平衡状态。同时,江苏新能源产业正在兴起。面对这一省情,江苏省政府提出“区外来电和省内电源建设并举,大力发展新能源”的电力发展方略。为增加省内电力供应,国网江苏电力加快推进电源点配套输变电工程建设,积极服务火电机组上大压小和燃气、新能源机组并网发电。配电网是供电的“毛细血管”和“末梢神经”。2013年,江苏城乡配电网建设加快推进,新增配电容量674.16万千瓦伏安。

发挥电网优势、增加区外来电,是保障电力供需平衡的又一法宝。2013年夏季用电高峰时,江苏区外来电达1515万千瓦,全年从区外净输入电量551.7亿千瓦时,占全社会用电量的11%,其中通过锦苏特高压工程受入电量213亿千瓦时。

摘自《江苏电力信息网》