

基于振动特征的变压器绕组与铁心故障诊断方法

变压器运行状态与变压器油箱表面振动特征密切相关。应用变压器绕组与铁心信号分离技术,提出一种基于振动特征的变压器绕组与铁心故障诊断方法。通过计算变压器绕组与铁心实时振动信号与原始振动信号相关系数与幅值系数,实现对变压器运行状态的实时监测。试验结果显示,该方法能对绕组及铁心的运行状况作出有效判断,为变压器运行故障诊断提供重要理论依据。

赵 林^{1,2,3} 王纪强^{1,2,3} 袁 帅⁴ 刘统玉^{1,2,3} 毕建刚⁴/1.山东省光纤传感技术重点实验室 2.山东省科学院激光研究所 3.山东微感光电子有限公司 4.中国电力科学研究院



赵 林/助理研究员

电力变压器是电力系统中最重要设备之一,它的可靠运行对于维护电力系统的稳定性具有重要意义。随着变压器负载容量的增加,变压器出口短路造成流过绕组线圈的冲击电流增大,严重的导致绕组变形;另外,变压器长期运行,铁心压紧力减弱,硅钢片松动事故频发,严重的导致铁心弯曲变形,破坏变压器的机械稳定性,给变压器的稳定运行造成潜在安全隐患^[1-2]。

目前变压器绕组及铁心的故障诊断方法包括:短路阻抗法、频率响应法、低压脉冲法、以溶解气体分析为基础与遗传算法、粗糙集理论和BP神经网络相结合的综合诊断方法^[3-5]。但这些方法都在不同程度上存在灵敏度低、抗干扰能力差、重复性不强和计算复杂等缺陷。文献[6]通过计算振动信号傅里叶频谱、峰度值及时间尺度采样熵的和等参数,对变压器绕组的特殊振动状态、轻度松

动、中度松动和严重松动作出判断。但该方法只是针对变压器的特定故障松动状况下的振动参数分析,未对绕组及铁心振动信号进行有效分离,也就无法对绕组变形及铁心接地等其他具体故障状态进行有效监测,其状态监测的准确性、有效性和实用性都存在一定的局限。

本文通过对变压器在空载与负载条件下振动信号的提取,实现了变压器绕组与铁心振动信号的分离,通过对绕组与铁心实时振动信号与原始振动信号相关系数与幅值系数的计算,实现对变压器铁心硅钢片松动、弯曲变形、接地及变压器绕组松动、扭曲变形和变压器短路等多种不同故障状态的实时在线监测。由于信号分析过程实现了绕组与铁心信号的分离,状态监测的准确性、有效性和实用性都得到进一步提高。

理论依据

变压器运行时产生的振动主要包括绕组振动和铁心振动^[7]。空载条件下,变压器负载电流为零,绕组的振动可忽略不计,器身振动主要是励磁电流作用下铁心振动引起的。在负载条件下,线圈中有负载电流流过,除了铁心振动之外,变压器器身振动还包括负载电流作用下绕组线圈的振动。因此,利用振动传感器,在空载及负载条件下分别测量变压器器身的振动信号,空载时测得的就是变压器铁心振动信号,负载时是铁心和绕组振动信号的叠加。从负载时振动信号中分离出空载时振动信号,便可

关键词/Keywords

变压器·
振动·
绕组·
铁心·

国家电网公司科技项目(应用于变电设备内部缺陷监测的光纤传感技术评估与标准化技术研究)。

以得到绕组的振动信号^[8-9]。

另外,由理论分析可知,变压器绕组振动信号基本上集中在基频100 Hz处,且振动信号的大小与负载电流 I 成正比;铁心振动信号主要集中在100~400 Hz,1 000 Hz后基本衰减到0^[10-11]。变压器绕组与铁心存在故障隐患时,其振动能量曲线、幅度特征参量将发生变化,具体表现在振动信号上的特征为:振动频率中增加了更高次的谐波成分,且振动幅值变大。

以此为依据,通过对绕组与铁心振动信号的分离,然后分别计算变压器待诊断振动频域序列与原始振动数据频域序列两条曲线的相关系数与幅值系数,参照量化诊断评判标准判断变压器绕组与铁心是否存在故障。系统结构组成如图1所示。

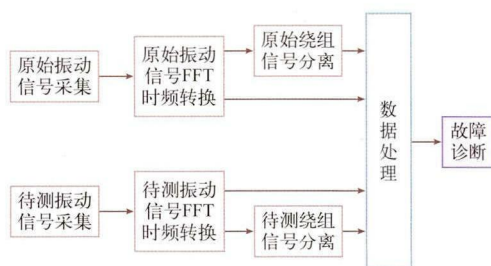


图1 系统结构组成图

故障诊断方法及步骤

故障诊断方法及步骤如下:

1) 在变压器投运前,现场安装调试完毕后,在变压器空载状态下,测取变压器油箱表面固定部位的振动数据,并将该数据定义为变压器原始空载振动数据。

2) 在变压器投运后,在变压器额定负载状态下,再测取变压器油箱表面固定部位的振动数据,并将该数据定义为原始负载振动数据。

3) FFT变换,计算步骤1)中变压器原始空载振动数据频域序列 $X(k)$ 。

4) FFT变换,计算步骤2)中变压器原始负载振动数据频域序列 $Y(k)$ 。

5) 计算变压器原始负载与空载条件下频域序列差值,并将差值序列定义为 $Z(k)$,其计算方法为

$$Z(k) = Y(k) - X(k) \quad k = 1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

6) 变压器运行一段时间后需要诊断变压器是否存在故障时,在变压器空载状态下,在与步骤1)相同的测试条件下,测取变压器的振动数据,并通过FFT变换计算该振动数据的频域序列 $A(k)$ 。

7) 在变压器负载状态下,在与步骤2)相同的测试条件下,测取变压器的振动数据,并通过FFT变换计算该振动数据的频域序列 $B(k)$ 。

8) 计算变压器待诊断负载与待诊断空载条件下频域序列差值,并将差值序列定义为 $C(k)$ 。

9) 计算变压器待诊断空载序列 $A(k)$ 与原始空载序列 $X(k)$ 的相关系数 C_1 与幅值系数 F_1 ,判断变压器铁心是否存在故障。其中相关系数 C_1 的计算方法如下。

设 N 为数据序列的长度,则序列 $A(k)$ 与 $X(k)$ 的方差为

$$\begin{cases} D_a = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[A(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N A(k) \right]^2 \\ D_x = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[X(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X(k) \right]^2 \end{cases} \quad (2)$$

两个序列 $A(k)$ 与 $X(k)$ 的协方差为

$$COV_{ax} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[A(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N A(k) \right] \times \left[X(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X(k) \right] \quad (3)$$

由式(2)和式(3)得两个序列的相关系数 C_1 为

$$C_1 = \frac{COV_{ax}}{\sqrt{D_a} \sqrt{D_x}} \quad (4)$$

幅值系数 F_1 的计算方法为

$$F_1 = \frac{\sum_{k=1}^N [A(k) - X(k)]}{\sum_{k=1}^N X(k)} \quad (5)$$

10) 同理,计算变压器待诊断差值序列 $C(k)$ 与原始差值序列 $Z(k)$ 的相关系数 C_2 与幅值系数 F_2 ,判断变压器绕组是否存在故障。

11) 通过相关系数 C_1 、 C_2 和幅值系数 F_1 、 F_2 值的大小,根据量化诊断评判标准判断变压器铁心与绕组是否存在故障,得到最终诊断结论。

试验数据分析

以中国电科院110 kV特高压试验基地变压器为试验对象，按照本文步骤和诊断方法进行试验，在进行诊断时，为了便于不失真地连续获取不同频率幅值的振动信号，将振动传感器固定在变压器油箱表面侧壁上，尽量选择远离变压器加强筋结构且振动强度大的位置作为测点。传感器采用强磁吸附方式固定。振动信号采样频率设置为1 024 Hz。传感器采集铁心及绕组状态良好时原始振动频谱如图2所示。

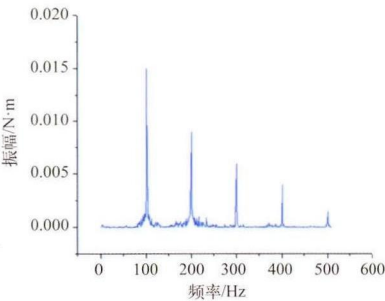


图2 铁心及绕组状态良好时原始振动频谱

另外，试验中分别采集变压器油箱表面固定位置10组运行状态振动数据，具体包括：①铁心状态良好；②铁心硅钢片轻微松动；③铁心硅钢片严重松动；④铁心弯曲变形；⑤铁心接地；⑥绕组状态良好；⑦绕组轻微松动；⑧绕组严重松动；⑨绕组扭曲变形；⑩变压器短路。其中铁心硅钢片轻微松动试验频谱如图3所示。

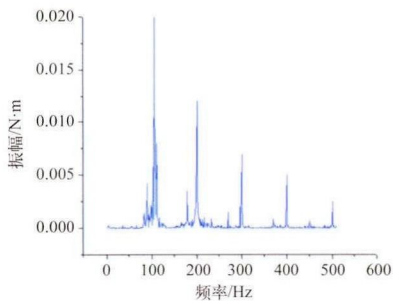


图3 铁心硅钢片发生轻微松动试验频谱

由试验数据分析可知，变压器运行状态良好时，振动信号主要集中于基频100 Hz处，基频信号振动幅值0.015 N·m；在200 Hz、300 Hz、400 Hz和500 Hz处有不同程度的倍频信号产生，振动能量依次减弱，500 Hz后基本衰减到0；各对应频率

下振动信号单一且基本无噪声信号。当变压器铁心硅钢片发生轻微松动时，基频信号振动幅值增至0.02 N·m，且各频率振动信号对应振幅相应增大；同时振动频谱不同频段中增加了更高次的谐波成分，对应的振动噪声信号增加。具体表现为变压器状态良好与铁心发生轻微松动的振动频谱曲线二者的相关系数减小，幅值系数增加。试验证明，变压器其他几种状态振动频谱与此类似，区别在于根据变压器故障严重程度的不同，相关系数与幅值系数的值有所变化。

经过计算，变压器在不同状态下相关系数及幅值系数如表1、表2所示。

表1 变压器铁心各种状态下系数

状态	相关系数 C_1	幅值系数 F_1
铁心状态良好	0.95	0.05
铁心硅钢片轻微松动	0.88	0.1
铁心硅钢片严重松动	0.82	0.15
铁心弯曲变形	0.77	0.16
铁心接地	0.7	0.26

表2 变压器绕组各种状态下系数

状态	相关系数 C_2	幅值系数 F_2
绕组状态良好	0.93	0.07
绕组轻微松动	0.87	0.1
绕组严重松动	0.79	0.16
绕组扭曲变形	0.75	0.21
变压器短路	0.65	0.31

鉴于上述特征，通过试验分别计算变压器待诊断振动频域序列与原始振动数据频域序列两条曲线的相关系数与幅值系数，通过对变压器在10种不同运行状态下的试验数据可以得出：在变压器铁心与绕组状态良好时，通过该方法计算两者所得相关系数趋于1，幅值系数趋于0。从振动信号的频谱角度分析说明待测振动信号频谱序列与变压器正常运行状态下频谱相比较，峰值频率及高次谐波成分基本一致，同时待测振动信号中振幅未出现明显的增减，二者对应的曲线基本一致。在变压器铁心硅钢片与绕组发生轻微松动、严重松动甚至发生严重的弯曲变形时，相关系数显著递减，同时幅值系数递增。说明此时待测振

动信号频谱序列与变压器正常运行状态下频谱相比误差较大,可能有新的谐波产生,并且各频率对应的振动幅值增大,最后导致相关系数递减,幅值系数递增。据此可通过两个系数的大小判断变压器绕组及铁心故障严重程度。

最后,得变压器量化诊断评判标准如表3、表4所示。

表3 变压器铁心故障诊断评判标准

状态	相关系数 C_1	幅值系数 F_1
铁心状态良好	$C > 0.92$	$F < 0.07$
铁心硅钢片轻微松动	$0.88 < C < 0.92$	$0.07 < F < 0.11$
铁心硅钢片严重松动	$0.81 < C < 0.88$	$0.11 < F < 0.16$
铁心弯曲变形	$0.75 < C < 0.81$	$0.16 < F < 0.2$
铁心接地	$C < 0.75$	$0.2 < F$

表4 变压器绕组故障诊断评判标准

状态	相关系数 C_2	幅值系数 F_2
绕组状态良好	$C > 0.9$	$F < 0.09$
绕组轻微松动	$0.85 < C < 0.9$	$0.09 < F < 0.14$
绕组严重松动	$0.77 < C < 0.85$	$0.14 < F < 0.2$
绕组扭曲变形	$0.7 < C < 0.77$	$0.2 < F < 0.25$
变压器短路	$C < 0.7$	$0.25 < F$

结束语

在分析变压器油箱表面振动特性的基础上,提出一种基于振动特征的变压器绕组与铁心故障诊断方法。应用变压器绕组与铁心信号分离技术,通过计算变压器绕组与铁心实时振动信号与原始振动信号相关系数与幅值系数,实现对变压器运行状态的实时监测。试验结果表明,该方法可实现对变压器绕组及铁心实时运行状况的有效监测。同时,由于不同型号变压器的物理结构、负载程度不同,其所反映的振动特征也不同。因此,对变压器铁心及绕组故障诊断标准也只是针对特定的变压器有效。寻求更加实用、数据依赖性更低的方法将是下一步工作的目标。

参考文献

[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]. 西安: 西安理工大学, 2010.

[2] 吴书有. 基于振动信号分析方法的电力变压器状态监测与故障诊断研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.

[3] 董其国. 电力变压器故障与诊断 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

[4] 潘羽, 陈伟跟, 云玉新, 等. 基于遗传算法进化小波神经网络的电力变压器故障诊断 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (13): 88-92.

[5] 莫娟, 王雪, 董明, 等. 基于粗糙集理论的电力变压器故障诊断方法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (7): 162-167.

[6] 黄海, 郭洁, 陈祥献. 电力变压器绕组松动故障振动检测方法: 中国, 101782426 A [P]. 2010.

[7] Shengchang J, Ping S, Yanming L. The vibration measuring system for monitoring core and winding condition of power transformer [C]. Proceedings of 2001 International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2001: 849-853.

[8] Beltle M and Tenbohlen S. Usability of vibration measurement for power transformer diagnosis and monitoring [C]. IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 2012: 281-284.

[9] Buyung Sofiarto M, Smit J. Evaluation of various transformations to extract characteristic parameters from vibration signal monitoring of power transformer [C]. Electrical Insulation Conference, 2011: 289-293.

[10] 汲胜昌, 程锦, 李彦明. 油浸式电力变压器绕组与铁心振动特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2005, 39 (6): 616-619.

[11] 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.

(收稿日期: 2014-09-25) EA