

振动频响法与传统频响法在 变压器绕组变形检测中的比较

徐剑¹, 邵宇鹰², 王丰华¹, 姜益民³, 金之俭¹, 饶柱石², 傅坚³

(1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海市 闵行区 200240; 2. 机械系统与振动国家重点实验室(上海交通大学), 上海市 闵行区 200240; 3. 上海市电力公司, 上海市 浦东区 200122)

Comparative Research on Behavior of Vibration Frequency Response Analysis and Frequency Response Analysis in Detection of Transformer Winding Deformation

XU Jian¹, SHAO Yuying², WANG Fenghua¹, JIANG Yimin³, JIN Zhijian¹, RAO Zhushi², FU Jian³

(1. School of Electronic, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Minhang District, Shanghai 200240, China; 2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration (Shanghai Jiaotong University), Minhang District, Shanghai 200240, China; 3. Shanghai Municipal Electric Power Company, Pudong District, Shanghai 200122, China)

ABSTRACT: To seek a more accurate method to judge the mechanical condition of transformer windings, firstly, the detection principle of vibration frequency response analysis (VFRA) are presented in detail and compared with that of frequency response analysis (FRA). By means of setting multi man-made faults to a 220kV power transformer, comparative detection of transformer winding deformation caused by these man-made faults is performed by VERA and FRA respectively. Testing results show that for such faults as decrease of pre-tightening force applied to the winding, pad lost and slight winding deformation in radial direction VFRA possesses higher detection sensitivity than RFA.

KEY WORDS: transformer winding deformation; vibration frequency response analysis (VFRA); frequency response analysis (FRA)

摘要: 首先详细介绍了振动频响法(vibration frequency response analysis, VFRA)检测原理, 并与传统频响法(frequency response analysis, FRA)进行了对比。然后对一台220 kV 变压器绕组进行了多种人工故障设定, 并利用振动频响法与传统频响法对所设故障进行对比检测分析。试验结果表明, 振动频响法相比传统频响法对绕组预紧力下降、垫块脱落、幅向轻微变形等故障具有更高的检测灵敏度。

关键词: 变压器绕组变形; 振动频响分析; 频响分析

0 引言

变压器的可靠性影响着整个电网的安全。随着电网规模的增大, 由于变压器抗短路能力不足

而引发的事故逐年增加^[1-2], 迫切需要一种能够准确判断绕组机械状态的方法。目前最为常用的检测方法是短路阻抗法与频响法^[3], 其中频响法灵敏度更高^[4-5]。

近年来, 利用振动法检测绕组机械状态逐渐成为国内外研究的热点。许多文献与试验结果表明, 振动检测法具有比电类检测法更高的抗干扰能力和灵敏度^[6-9]。

近几年, 一种新的离线检测变压器绕组变形的有效方法——振动频响法^[10-11]被提出。本文着重介绍振动频响法检测原理与试验参数设定; 并通过一系列试验, 说明振动频响法在绕组某些变形的检测中较传统频响法具有更高的灵敏度。

1 振动频响法原理

1.1 变压器振动模型

变压器振动主要由铁心、绕组振动2部分构成。本文所提出的振动频响法关注于绕组变形检测。测试过程中, 低压绕组短路, 高压绕组单相施加频率为 ω 的电压, 形成绕组电流, 其电动力(频率为 2ω)引起该相高、低压绕组振动。由于所施励磁电压远远小于变压器额定电压, 铁心磁致伸缩引起的振动十分微弱, 可认为变压器振动信号基本为绕组振动信号。其等效力学模型如图1所示, 其中: m 、 C 、 K 分别为线匝的质量、阻尼与刚度; Y 为线匝轴向位移; F_y 为轴向外力。

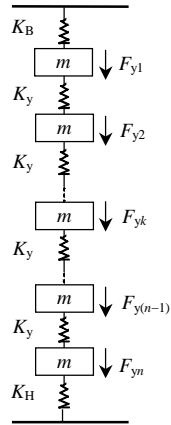


图 1 绕组等效力学模型

Fig. 1 Equivalent mechanical model of winding

设变压器负载电流为

$$i = I_m \cos \omega t \quad (1)$$

由此可得轴向电力为

$$F_y = b_y I_m^2 (1/2 + \cos 2\omega t / 2) \quad (2)$$

式中 b_y 为系数。

根据等效机械结构模型，建立各线匝质量的轴向运动方程如下

$$\begin{cases} m \frac{d^2 Y_1}{dt^2} + C_y \frac{dY_1}{dt} + K_B Y_1 + K_y (Y_1 - Y_2) = F_{y1} + mg \\ m \frac{d^2 Y_2}{dt^2} + C_y \frac{dY_2}{dt} - K_y (Y_1 - Y_2) + K_y (Y_2 - Y_3) = F_{y2} + mg \\ \dots \\ m \frac{d^2 Y_n}{dt^2} + C_y \frac{dY_n}{dt} - K_y (Y_{n-1} - Y_n) + K_H Y_n = F_{yn} + mg \end{cases} \quad (3)$$

做如下化简

$$\begin{cases} C'_y = \sum_1^n C_y = nC_y \\ K'_y = K_B + K_H \\ M = \sum_1^n m = nm \\ F_y = \sum_1^n F_{yn} \end{cases} \quad (4)$$

带入式(2)(3)，可求得绕组振动加速度表达式为

$$a_y = -\omega_0^2 J_y e^{-C'_y t / (2M)} \sin(\omega_0 t + \alpha) - 4\omega^2 G_y \sin(2\omega t + \beta) \quad (5)$$

其中，

$$\omega_0 = \sqrt{K'_y / M - [C'_y / (2M)]^2} \approx \sqrt{K'_y / M}$$

$$J_y = -\frac{(Mg + 0.5b_y I_m^2 + GK'_y \cos \beta) \sqrt{\tan^2 \alpha + 1}}{K'_y \tan \alpha}$$

$$G_y = \frac{b_y I_m^2}{2 \times \sqrt{(K'_y - 4M\omega^2)^2 + 4(C'_y)^2 \omega^2}}$$

可见绕组振动加速度包含 2 项，分别是与绕组

固有频率 ω_0 相关的衰减分量以及频率为负载电流 2 倍频的稳态分量。由此建立了振动频响法测试中，任意频率电流输入与绕组振动信号中 2 倍频稳态分量的对应关系为

$$|a_{2\omega}| = |4\omega^2 G_y| \quad (6)$$

1.2 振动频响法检测原理

振动频响法检测本质属于机械结构损伤检测，可将绕组振动方程(3)简化表达如下

$$M\dot{Y} + C\dot{Y} + KY = F(t) \quad (7)$$

式中： M 为线匝的质量； Y 为线匝轴向位移； $F(t)$ 为轴向外力。

对式(7)做傅氏变换可得

$$Y(j\omega) = H_d(j\omega)F(j\omega) \quad (8)$$

其中，绕组位移频响函数

$$H_d(j\omega) = (-\omega^2 M + j\omega C + K)^{-1} \quad (9)$$

同理，绕组加速度频响函数为

$$H_a(j\omega) = (M - jC/\omega - K/\omega^2)^{-1} \quad (10)$$

由式(10)可见，当绕组质量、阻尼、刚度发生改变时，加速度频响函数 $H_a(j\omega)$ 将会发生改变。

振动频响法由贴附于油箱壁的加速度传感器，接收经过铁心、结构件和冷却油等途径传递到箱壁上的振动加速度信号，并由此得到加速频响函数 $H_a(j\omega)$ 。不同的测点传递路径不同，所得频响函数不同，因此，振动频响法检测绕组变形时必须对同测点、不同时期的频响函数进行历史对比分析。振动频响法测试系统如图 2 所示。测试时将低压侧短路，高压侧单相接入正弦激励电流。通过计算机、程控信号源、功率放大器控制激励电流大小与频率；通过加速度传感器、信号采集器、计算机采集并分析信号。

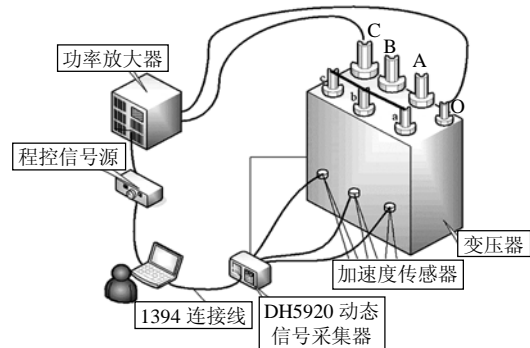


图 2 振动频响法测试系统示意图

Fig. 2 The VFRA testing system

2 振动频响法与传统频响法原理对比

2.1 传统频响法原理

绕组可看作是一个由电阻、电感、电容元件组

成的线性无源二端口网络^[5], 其特性可在频域上用频响函数 $H(j\omega)$ 描述。如果绕组发生变形, 其电气、几何尺寸发生改变, 则等值电路中相应的分布电感、电容等参数将发生变化, 导致电路频响函数 $H(j\omega)$ 发生一定程度的变化。频响法检测即是通过检测变压器各个绕组的幅频响应特性, 对检测结果进行纵向或横向比较, 根据其差异, 判断绕组是否发生变形。

2.2 振动频响法与传统频响法原理对比

振动频响法与传统频响法均是通过频响函数判断绕组状态的。但频响法通过电气参数改变间接判断机械状态改变, 具有一定局限性, 如无法判断绕组的单一扭转变形等^[12]。另外, 频响法电流频率高达 1MHz, 由于分布参数的影响, 产生了诸多接线方式以及周围环境干扰的问题^[13]。

而振动频响法在检测时, 将绕组视作机械元件二端口网络, 绕组各单元质量、阻尼、刚度的改变都可以通过振动频响函数得到反映。同时, 由于激励电流频率较低(目前设定小于 350 Hz), 也避免了电气接线的干扰。

3 对比试验与结果分析

3.1 前期验证与试验参数确定

本次对比试验对象为上海电力公司退役的 220 kV 实体变压器, 型号为 SFP7-120000/220, 联结组号 YNd11。为验证式(6), 并确定试验激励电流大小, 首先对 A 相绕组进行定频变电流试验, 即固定电流频率, 通过改变电流大小从而获得 2 倍频振动响应与激励电流的关系。

图 3 为定频(165 Hz)变电流试验所获得的 2 倍频(330 Hz)振动响应幅值与电流幅值平方(归算至与振动信号同量级)的关系图。可见 2 倍频振动响应幅值与激励电流幅值平方成正比, 验证了上文的分

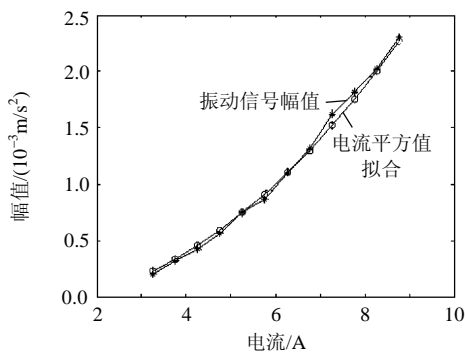


图3 振动响应信号幅值与激励电流幅值平方的关系
Fig. 3 The relation between the vibration response signal and the square of current

析。其他频率试验结果相同, 不再列出。

试验中, 振动响应信号与噪声的比值, 影响着频响曲线的可靠性与故障分辨能力。因此, 本文定义信噪比如下

$$S_{\omega} = 10 \times \lg[A_{2\omega}^2 / (\sum_{i=0}^{1000 \text{ Hz}} \frac{A_i}{N})^2] \quad (11)$$

式中: S_{ω} 为激励电流频率为 ω 时的信噪比; $A_{2\omega}$ 与 A_i 分别是频率为 2ω 和 i 的振动信号幅值; N 为分析频点数。

定频变电流试验所得振动响应信号幅值与信噪比如表 1 所示。由表 1 可见, 振动响应信号幅值、信噪比与激励电流成正比, 增大激励电流可以增加频响曲线的可靠性与故障分辨能力。但变压器短路阻抗正比于电流频率, 高频大电流需要更大功率的输出电源; 另外, 高频大电流意味着励磁电压的升高, 引起铁心振动加剧, 因此试验电流不可无限取高。本次试验考虑信号大小与功放功率, 取电流恒定为 5 A, 保证信噪比大于 20, 且励磁电压小于变压器额定电压的 1%。

表 1 振动响应信号幅值与信噪比表

Tab. 1 The signal amplitude and signal noise ratio

I/A	3	4	5	6	7	8
$A_{165}/(10^{-3} \text{ m/s}^2)$	0.26	0.47	0.80	1.14	1.65	2.05
S_{165}/dB	19.09	21.59	26.49	28.71	29.17	29.60

另外, 前期众多试验证明, 绕组振动信号频率为 0~1 000 Hz, 故障特征大多体现在 300~600 Hz。因此, 本次试验激励电流扫频范围选择 115~310 Hz, 所得频响曲线频率范围为 230~620 Hz。

3.2 对比试验

对比试验步骤如下:

1) 对初始状态下的三相高压绕组进行传统频响法和振动频响法检测, 取得原始状态频响函数, 并绘制频响曲线。

2) 进行绕组故障设定。A 相绕组所有压钉放松 1 cm, 模拟轴向预紧力下降; B 相绕组高低压绕组围屏中嵌入木条, 模拟幅向受力改变; C 相高压绕组端部垫块抽出 4 档, 同时线饼幅向敲击变形, 变形区域长约 20 cm, 宽约 3 cm, 向内凹陷约 0.5 cm, 模拟轴向垫块脱落与幅向变形。

3) 对故障状态下的绕组进行传统频响法和振动频响法检测, 取得故障后频响函数, 并绘制频响曲线进行分析比较。

3.3 传统频响法高压绕组检测结果与分析

传统频响法检测所得故障前后的高压绕组频

响曲线如图 4、5 所示。故障前后，同相频响法频响曲线相关系数计算如表 2 所示。表中 $R_{A-A'}$ 、 $R_{B-B'}$ 、 $R_{C-C'}$ 分别为 A、B、C 相绕组故障前后相关系数。相关系数计算分为如下 4 段：1) 低频，0.5~10kHz，频点密度 20Hz/点；2) 中频，10~100kHz，频点密度 200 Hz/点；3) 高频，100~500 kHz，频点密度 800 Hz/点；4) 超高频，500~1 000 kHz，频点密度 1 kHz/点。

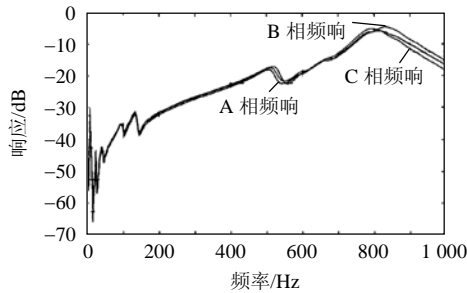


图 4 绕组故障前传统频响法频响曲线
Fig. 4 The FRA graph of windings without faults

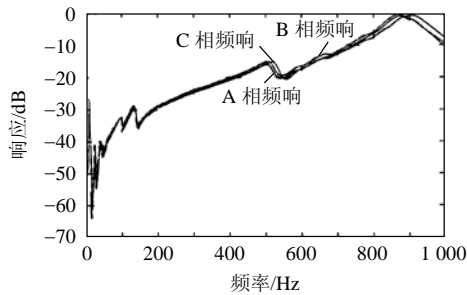


图 5 绕组故障后传统频响法频响曲线
Fig. 5 The FRA graph of windings with faults

由图 4、5 可见，传统频响法频响曲线在故障前后均具有较好的三相一致性，仅在 800~1 000 kHz 段出现少许差异，这是由于杂散电容的影响，与本次试验故障设定不符。由表 2 可见，故障前后同相频响曲线相关系数较高，表明故障前后绕组电气参数变化微弱，未能体现本次试验中人为设定的故障。

表 2 频响法频响曲线相关系数

Tab. 2 The correlation coefficients of FRA graph

情况	$R_{A-A'}$	$R_{B-B'}$	$R_{C-C'}$
低频	2.94	2.34	2.30
中频	3.13	2.85	2.56
高频	2.66	2.56	2.61
超高频	2.48	2.22	2.44

3.4 振动频响法绕组检测结果与分析

振动频响法测点受箱壁模态与传递路径影响较大，为此需要进行较多布点综合比较。试验中测点布置如图 6 所示。各测点所得振动频响曲线有所不同，但整体特点相近。限于篇幅，以下仅列出 7 号测点所得频响曲线。

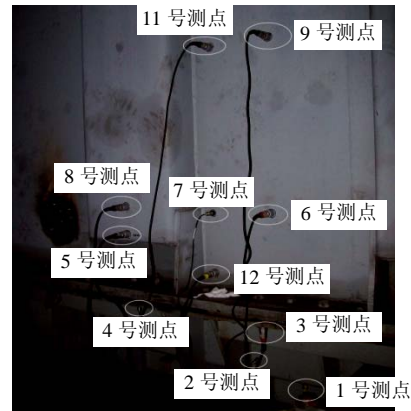


图 6 测点布置示意图
Fig. 6 The location of vibration probes

由图 7 分析可得，A 相绕组预紧力下降，振动频响曲线出现较大偏移。具体表现为：部分频段 (400~500 Hz) 幅值增加；部分频段峰值点出现偏移。这与文献[14-15]中，绕组预紧力下降、共振频率下降、幅值增加的结论相符。

由图 8 分析可得，B 相绕组幅向受力改变，振动频响曲线变化较小。但在部分频段，如 400~500 Hz，出现明显闭合差异。

由图 9 分析可得，C 相绕组端部垫块脱落以及幅向轻微变形，频响曲线变化显著，表现为幅值整体大幅下降，峰值点偏移。

故障前后，同相振动频响曲线相关系数计算如

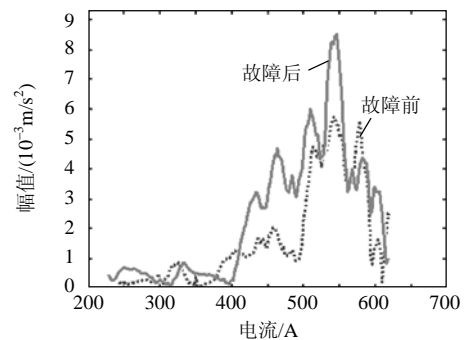


图 7 A 相故障前后振动频响曲线
Fig. 7 The VFRA graph of winding A

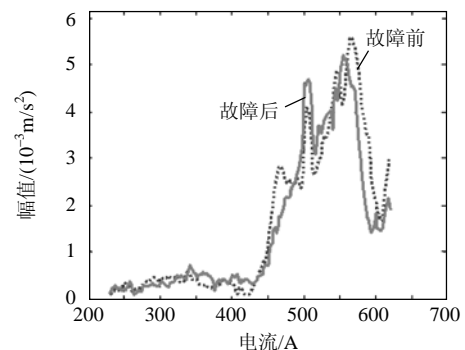


图 8 B 相故障前后振动频响曲线
Fig. 8 The VFRA graph of winding B

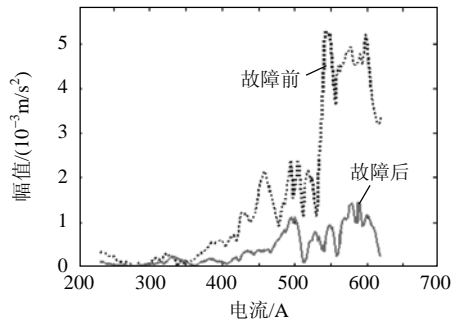


图9 C相故障前后振动频响曲线

Fig. 9 The VFRA graph of winding C

表3所示。依据响应幅值、绕组固有频率等特点,将整个频段分为3段,分别是低频230~400Hz,中频400~500Hz,高频500~620Hz,其频点密度均为1Hz/点。

表3 振动频响曲线相关系数

Tab. 3 The VFRA graph correlation coefficient

情况	$R_{A-A'}$	$R_{B-B'}$	$R_{C-C'}$
低频	0.30	0.30	0.30
中频	0.24	0.99	0.44
高频	0.55	0.63	0.33

由表3可见,振动频响曲线相关系数远远低于同相频响法所得。即从故障前后频响曲线差异来看,振动频响法对于绕组机械状态的改变比传统频响法更敏感,且所得振动频响曲线特征各不相同,这为进一步研究不同故障与振动频响曲线对应关系奠定了基础。

振动频响法频响函数与曲线的进一步分析判定,可以参照传统频响法的相关系数、数学方差、加权归一化差值^[16]、波谱偏移值^[17]、特征差异指数^[18]等判断指标,并在后期采用模糊识别等方法进行智能化判断^[19]。

4 结论

1) 传统频响法与振动频响法均通过频响函数判断绕组状态。传统频响法通过电路频响函数间接判断绕组机械状态,对于绕组轻微故障灵敏度不高;而振动频响法采用机械频响函数直接判断绕组机械状态,理论上更为灵敏,且避免了试验现场电磁环境对试验的影响,具有较高的电气抗干扰能力。

2) 传统频响法接线简单,其频响函数既可进行同相历史对比也可进行相间横向对比。振动频响法由于受振动传递路径限制,不同绕组间的频响曲线不具备可比性,需要有历史数据进行同相对比。

3) 在较低的励磁电压下,变压器绕组振动幅值与激励电流幅值平方成正比。

4) 对于本次试验中所涉及的绕组预紧力下降、垫块脱落、幅向轻微变形等故障,振动频响法比传统频响法具有更高的灵敏度。

参考文献

- [1] 金文龙, 陈建华, 李光范, 等. 全国110kV及以上等级电力变压器短路损坏事故统计分析[J]. 电网技术, 1999, 23(6): 70-74.
Jin Wenlong, Chen Jianhua, Li Guangfan, et al. Statistics and analysis on power transformer damages caused by short-circuit fault in 110kV and higher voltage classes[J]. Power System Technology, 1999, 23(6): 70-74(in Chinese).
- [2] 王梦云. 110kV及以上变压器事故与缺陷统计分析[J]. 供用电, 2007, 24(1): 1-5.
Wang Mengyun. Analysis of the fault statistics of transformers 110 kV and over[J]. Distribution & Utilization, 2007, 24(1): 1-5(in Chinese).
- [3] 刘连睿, 马继先, 郭东升. 应用频响法诊断变压器绕组变形的应用研究[J]. 电网技术, 1999, 23(5): 35-39.
Liu Lianrui, Ma Jixian, Guo Dongsheng. Diagnosis of transformer winding deformation with frequency response analysis[J]. Power System Technology, 1999, 23(5): 35-39 (in Chinese).
- [4] 黄华, 周建国, 姜益民, 等. 阻抗法和频响法诊断电力变压器绕组变形[J]. 高电压技术, 1999, 25(2): 70-73.
Huang Hua, Zhou Jianguo, Jiang Yimin, et al. Diagnosis of winding deformation of transformer by impedance method and FRA[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(2): 70-73(in Chinese).
- [5] 何平, 文习山. 变压器绕组变形的频率响应分析法综述[J]. 高电压技术, 2006, 32(5): 37-41.
He Ping, Wen Xishan. Survey of frequency response analysis on winding deformation of transformers[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(5): 37-41(in Chinese).
- [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] 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.
- [8] 王洪方, 王乃庆, 李同生. 变压器绕组轴向预紧力对绕组轴向振动特性的影响[J]. 电网技术, 1999, 23(9): 8-11.
Wang Hongfang, Wang Naiqing, Li Tongsheng. Influence of axial precompression level on axial vibrations in transformer windings[J]. Power System Technology, 1999, 23(9): 8-11(in Chinese).
- [9] 傅坚, 徐剑, 陈柯良, 等. 基于振动分析法的变压器在线检测[J]. 华东电力, 2009, 26(5): 16-18.
Fu Jian, Xu Jian, Chen Keliang, et al. On-line transformer monitoring based on vibration analysis[J]. East China Electric Power, 2009, 26(5): 16-18(in Chinese).
- [10] 傅坚, 邵宇鹰. 用机械振动频响法诊断大型变压器绕组松动[J]. 华东电力, 2006, 34(4): 28-29.
Fu Jian, Shao Yuying. The experiment of diagnosing large-scale transformer winding looseness by frequency response analysis[J]. East China Electric Power, 2006, 34(4): 28-29(in Chinese).
- [11] 徐剑, 邵宇鹰, 金之俭, 等. 基于振动频响法的变压器绕组变形

- 检测[J]. 噪声与振动控制, 2009, 29(6): 26-29.
- Xu Jian, Shao Yuying, Jin Zhijian, et al. The detection of transformer windings' deformation based on the method of frequency response analysis[J]. Noise and Vibration Control, 2009, 29(6): 26-29(in Chinese).
- [12] 周渠, 蔡振华. 变压器绕组扭曲变形的故障诊断[J]. 电网技术, 2004, 28(12): 70-72.
- Zhou Qu, Cai Zhenhua. Faults diagnosis of transformer winding twist deformation[J]. Power System Technology, 2004, 28(12): 70-72(in Chinese).
- [13] 吴国跃. 电力变压器绕组变形实测中的影响因素[J]. 高电压技术, 2001, 27(3): 81-84.
- Wu Guoyue. Analysis of influence factors in detecting power transformer winding deformation[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(3): 81-84(in Chinese).
- [14] 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.
- Shao Yuying, Rao Zhushi, Xie Po'an. The influence of pre-compression changing on the natural frequency of electric transformers windings[J]. Noise and Vibration Control, 2006, 26(6): 51-53(in Chinese).
- [15] 桂顺生, 傅坚, 姜益民, 等. 轴向预紧力对变压器绕组振动响应幅值的影响[J]. 电工技术, 2009(2): 12-13.
- Gui Shunsheng, Fu Jian, Jiang Yimin, et al. The impact of axial pre-tightening force on transformer winding vibration response amplitude[J]. Electric Engineering, 2009(2): 12-13(in Chinese).
- [16] Coffeen L B, Rickmann J. A new technique to detect winding displacements in power transformers using frequency response analysis[C]//Power Tech Conference Proceeding. Bologna, Italy: IEEE, 2003: 3762-3768.
- [17] Bak-Jensen J, Bak-Jensen B, Mikkelsen S D. Detection of faults and ageing phenomena in transformers by transfer functions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(1): 308-314.
- [18] 刘有为, 高克利, 许渊. 变压器绕组频响指纹的特征差异指数分析法[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 144-148.
- Liu Youwei, Gao Keli, Xu Yuan. Feature difference index analysis on frequency response fingerprint of transformer windings[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 144-148(in Chinese).
- [19] 周爱华, 张彼德, 方春恩, 等. 基于模糊免疫识别方法的电力变压器故障诊断[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 99-102.
- Zhou Aihua, Zhang Bide, Fang Chunen, et al. Power transformer fault diagnosis based on fuzzy immune recognition approach[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 99-102(in Chinese).



徐剑

收稿日期: 2010-12-30。

作者简介:

徐剑(1984), 男, 硕士研究生, 研究方向为变压器在线监测, E-mail: bkly@163.com。

(责任编辑 褚晓杰)