

DOI: 10.7667/PSPC160883

不同负载电流下变压器表面三维振动信号特征分析

李中, 宋天慧, 郭通, 张卫华

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 变压器表面振动信号与绕组及铁芯运行状态密切相关。采集正常运行中变压器表面三维振动信号, 结合负载电流和运行电压数据, 分析总结不同方向变压器表面振动信号的时域峰值特征和频域能量特征。提出能量—电流灵敏度指标 EC-S, 用于定量描述变压器表面振动信号各频点能量受负载电流变化的影响, 基于该指标分析了可表征变压器绕组振动状态的特征频点。结果表明同一位置不同方向的变压器表面振动信号差异显著, 三维振动信号较单一方向振动信号能更全面地反映变压器绕组振动变化。

关键词: 变压器; 振动信号; 能量; 负载电流; 灵敏度

Characteristics analysis on three-dimensional surface vibration signals of transformer under different load current

LI Zhong, SONG Tianhui, GUO Tong, ZHANG Weihua

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Vibration signal on the surface of transformer is closely related to the running condition of winding and core. Three-dimensional vibration signals on the surface of normal running transformer are measured. Combined with the data of load current and operating voltage, the peak characteristics in time domain and the energy characteristics in frequency domain of vibration signals on the surface of transformer in different directions are analyzed and summarized. In order to quantify the energy at each frequency influenced by the change of load current, the index of energy-load current sensitivity (EC-S) is proposed, and the characteristic frequencies representing the vibration state of the winding are analyzed. The results show that the vibration signals on the surface of transformer have significant differences in different directions on the same position, and three-dimensional vibration signals are more comprehensive than single direction vibration signal in reflecting the vibration changes of the transformer winding.

Key words: transformer; vibration signal; energy; load current; sensitivity

0 引言

变压器是电力系统的关键设备之一, 其运行的可靠性影响着电网的运行安全^[1-2]。2004 年统计结果表明, 我国 110 kV 及以上电压等级的变压器事故中由绕组故障引起的占 69.8%^[3], 绕组故障已经成为变压器故障的重要组成部分, 对电网的安全运行影响极大^[4]。

传统的绕组检测方法主要有低压脉冲法、频率响应法及短路阻抗法^[5-6], 但这些方法可操作性较差、测量精度不高, 且无法进行在线检测。近年来, 振动法分析变压器运行状态得到诸多学者的重视。文献[7-8]理论分析了负载电流与绕组振动以及运行电压与铁芯振动的关系, 实验分析了正常和故障状

态下的振动信号, 基于小波包分解给出了特征矢量和变压器铁芯运行状态的对应关系; 文献[9]仿真分析变压器运行过程中由电动力激励到绕组振动响应, 得到了变压器绕组在电磁力激励下正常与松动状态下的振动特性; 文献[10]综合有限元计算和实验测得的空载振动噪声值, 分析了直流偏磁对变压器振动噪声的影响; 文献[11]模拟绕组短路故障, 提出一种基于包络谱能量特征判定绕组匝间短路故障的方法; 文献[12]基于驱动机电流信号和切换振动信号, 分析判断 OLTC 运行状态及其变化趋势; 文献[13]基于小波包分解和支持向量机, 分析处理绕组不同状态下的机械及电气参量数据, 提出一种基于振动法的变压器绕组机械状态诊断方法。

基于振动法的变压器绕组状态监测和故障诊

断研究已取得许多成果,但存在两个问题:一是大多研究在实验条件下进行,对在运变压器的研究分析很少,相关成果亟待实践的检验和证实;二是考虑变压器振动产生机理,绕组和铁芯不同位置、不同方向的振动理应不同,García、Burgos等对此进行了较详尽的分析,证实了绕组轴向和径向振动存在显著的差异^[14-15],但在运变压器表面不同位置、不同方向的振动信号特征及其差异如何,有待进一步分析研究。

针对以上问题,本文采集正常运行状态下变压器表面的三维振动信号,结合变压器负载电流和运行电压数据,分析对比不同方向振动信号的时频特征,为振动法分析评判变压器运行状态提供参考。

1 变压器振动机理

变压器振动主要由本体(绕组和铁芯等的统称)振动和冷却系统(如风扇和油泵等)振动构成。绕组振动由线圈中电流相互作用产生的电动力引起,所受的电动力随负载电流变化,且与负载电流存在平方关系,即

$$F_w \propto i^2 \quad (1)$$

式中: F_w 为绕组中通入负载电流引起的电动力; i 为负载电流^[16]。

铁芯振动由硅钢片的磁致伸缩作用产生,加载电压和磁通密度之间是线性关系,铁芯所受的振动力取决于加载电压的平方,即

$$F_c \propto U^2 \quad (2)$$

式中: F_c 为铁芯受磁致伸缩引起的振动力; U 为加载电压^[17]。

本体振动和冷却系统振动经不同途径传递到变压器表面:绕组振动主要经绝缘油、铁芯振动主要通过绝缘油以及支撑单元向变压器表面传递,而冷却系统振动主要通过支撑单元传递,其振动频率集中在 100 Hz 以内易于区分^[18]。

2 变压器表面三维振动信号的采集

采集某变电站一台正常运行的变压器表面三维振动信号,测试变压器型号为 SFZ9-50000/110,有关参数见表 1。

表 1 测试变压器参数

Table 1 Parameter of the test transformer

额定容量	额定电压	高压侧	低压侧	频率
		额定电流	额定电流	
50 000 kVA	110 kV/10.5 kV	262 A	2 749 A	50 Hz

振动数据采集过程中,将型号为 ULT2061 的三维振动加速度传感器通过高能磁铁吸附在测试变压器高压 A 相、距离变压器底端 $\frac{1}{3}$ 处,其中 X 方向表示水平方向; Y 方向表示垂直方向; Z 方向表示垂直于变压器表面的方向(见图 1)。设置采样频率为 10 kHz,每次采样时长为 1 s,采样间隔为 5 min,同时记录下相应时刻的负载电流和运行电压,图 2 和图 3 分别显示了采集期间测试变压器高压 A 相的负载电流和运行电压。

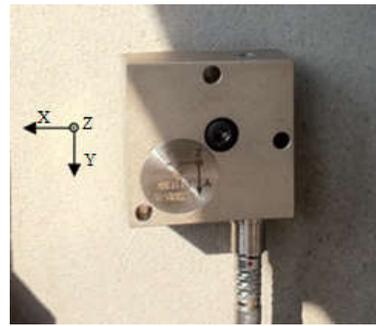


图 1 吸附在测试变压器表面的加速度传感器

Fig. 1 Acceleration sensor installed on test transformer surface

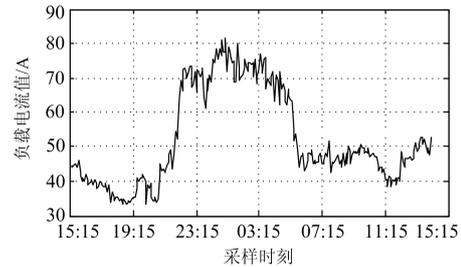


图 2 测试变压器高压 A 相负载电流走势

Fig. 2 Load current trend of high voltage A phase of test transformer

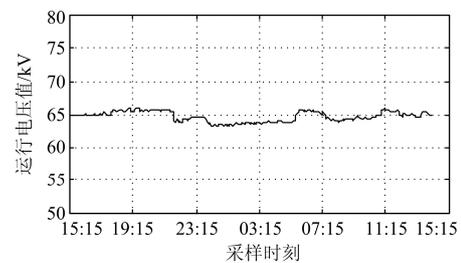


图 3 测试变压器高压 A 相运行电压走势

Fig. 3 Operating voltage trend of high voltage A phase of test transformer

观察图 2,测试变压器高压 A 相负载电流先升后降、变化较大,最大与最小值相差近 3 倍,运行电压则相对恒定,最大与最小值之差约为最小值的 0.4%,其简单统计结果列于表 2。

表 2 负载电流和运行电压相关数据统计

Table 2 Statistics of load current and operating voltage

统计值	负载电流/A	运行电压/kV
最大值	81.21	65.87
最小值	33.05	63.23
均值	52.26	64.60
标准差	13.92	0.75

3 三维振动信号分析

正常状态下的变压器运行电压稳定不变, 由铁芯振动机理可推知铁芯振动也基本保持不变, 就此可近似认为: 在运行电压稳定的条件下, 变压器表面振动信号变化主要由不同负载电流作用下的绕组振动变化引起。基于这一前提, 本文忽略铁芯振动变化影响, 分析在不同负载电流作用下的变压器表面振动信号时频域特征。

3.1 三维振动信号时域分析

峰值信息是振动信号时域分析的一个重要参数, 在我国变压器振动测试相关技术规范中, 峰值大小也是一个重要的评价指标^[19]。分析提取测试变压器表面三维振动信号峰值数据, 结合负载电流数据, 绘制其正峰值和负峰值折线图如图 4 和图 5。

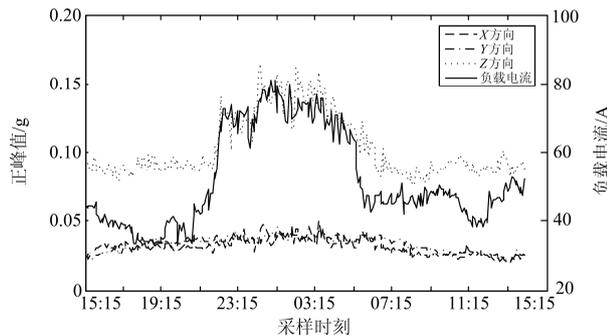


图 4 不同方向振动信号正峰值图

Fig. 4 Positive peaks of vibration signal in different directions

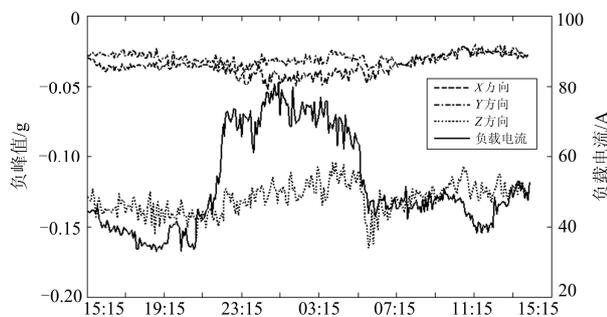


图 5 不同方向振动信号负峰值图

Fig. 5 Negative peaks of vibration signal in different directions

观察图 4, X 方向、 Y 方向和 Z 方向振动信号的

正峰值均随负载电流变化, 且 Z 方向正峰值变化趋势与负载电流高度近似, 表明其受负载电流影响显著。从不同方向的绝对值大小看, 同时刻的 X 方向和 Y 方向正峰值大小近似相等, 而 Z 方向正峰值则远大于 X 方向和 Y 方向, 约为前两者的 4 倍。

观察图 5, X 方向、 Y 方向和 Z 方向振动信号的负峰值也随负载电流变化, 但整体波幅不大, 其中 Z 方向负峰值较正峰值而言随负载电流变化而增减的幅度较小。与正峰值类似, Z 方向负峰值最大, 约为 X 方向和 Y 方向的 4 倍。

总体看, 测试变压器表面各方向振动信号峰值均跟随负载电流大小变化, 特别是 Z 方向峰值受负载电流变化影响显著, 且其正峰值所受影响更甚, Z 方向峰值远大于同期 X 方向和 Y 方向。

3.2 三维振动信号频域分析

频域能量分析是振动法监测变压器状态的有效方法之一, 马宏忠教授依据振动基频(工频的 2 倍)能量分析, 建立了一种绕组变形故障诊断模型用于诊断变压器绕组故障^[18], 颜秋容教授基于小波频段—能量分布提出相应的变压器绕组故障诊断方法^[20]。

便于分析负载电流对变压器表面振动的影响, 选取不同负载电流条件下的三组变压器表面三维振动信号, 进行频域能量谱对比, 三组信号的采样时间及其负载电流值记录如表 3。

表 3 三组数据采样时间和负载电流

Table 3 Sampling time and load current of the three sets of data

编组	采样时间	负载电流/A	本组均值/A
1	18:10	34.28	34.70
	18:15	35.16	
	18:20	35.33	
	18:25	34.28	
	18:30	34.45	
2	21:50	49.04	51.75
	22:00	48.17	
	22:10	54.32	
	22:15	52.03	
	22:20	55.20	
3	02:55	71.90	73.94
	03:00	74.71	
	03:05	74.53	
	03:10	74.01	
	03:15	74.53	

参照文献[20-21]分析方法, 计算求取三组变压器表面振动信号的能量谱, 并将 X 方向、 Y 方向和 Z 方向信号能量谱数据依次绘制图 6、图 7 和图 8。

对比分析图 6、图 7 和图 8, 发现不同方向振动信号能量分布有以下特点。

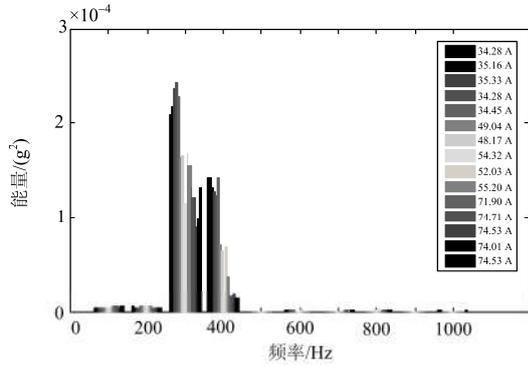


图 6 不同负载电流下振动信号 X 方向能量谱

Fig. 6 Energy spectrum of X direction vibration signal under different load current

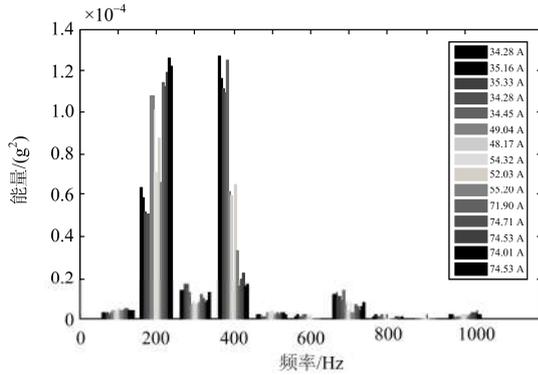


图 7 不同负载电流下振动信号 Y 方向能量谱

Fig. 7 Energy spectrum of Y direction vibration signal under different load current

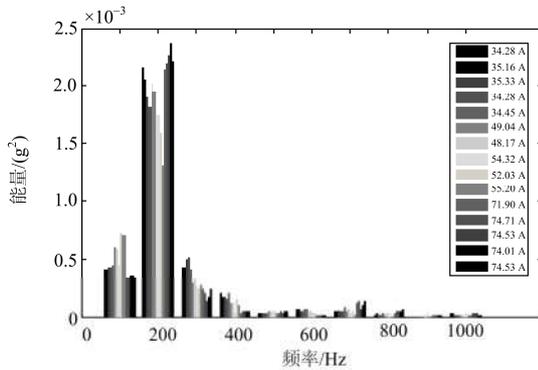


图 8 不同负载电流下振动信号 Z 方向能量谱

Fig. 8 Energy spectrum of Z direction vibration signal under different load current

1) 从总能量来看, Z 方向总能量远大于 X 方向和 Y 方向总能量。

2) 从能量集中度看, X 方向能量集中分布在 300 Hz 和 400 Hz, Y 方向能量集中分布在 200 Hz 和 400 Hz, 而 Z 方向能量集中在 200 Hz, 表明各方向振动信号基频(100 Hz)能量不大, 而其高次谐波

能量较大。

3) 从各频点能量与负载电流之间的关系看, X 方向和 Y 方向基频能量总体上随负载电流增大而增大, 但 Z 方向基频能量却先增后减; 部分高次谐波能量(如 X 方向的 300 Hz 和 400 Hz、Y 方向的 200 Hz 和 400 Hz)相比同方向基频能量受负载电流变化影响更大。

以上分析可见, X 方向、Y 方向和 Z 方向不同频点能量受负载电流变化(也即绕组振动变化)影响不同, 呈现出不同的特点。特别值得注意的是, Z 方向基频能量变化未见随负载电流增大而增大的趋势, 这与理论分析和实验室测试结果不符, 本文认为其原因有二: 一是测试变压器运行期间负载电流波动较小, 其最大值不到额定电流的三分之一, 未能完全体现基频幅值与负载电流变化的规律; 二是以上分析忽略了运行期间铁芯振动变化及其他因素的影响。

为进一步分析运行中变压器表面振动信号与负载电流引起的绕组振动之间的关系, 基于前向差分法, 本文提出能量—电流灵敏度指标(Energy-Current Sensitivity, EC-S), 用来定量计算某方向振动信号不同频点能量受负载电流变化的影响程度。

先将该方向振动信号能量进行归一化处理, 用以消除信号能量绝对值大小对灵敏度计算结果的影响, EC-S 的具体计算方法为

$$E_{i,j} = \frac{e_{i,j}}{\sum_j e_{i,j}} \quad (3)$$

$$EC-S(j) = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^{m-1} \left| \frac{E_{i+1,j} - E_{i,j}}{I_{i+1} - I_i} \right| \quad (4)$$

式中: $e_{i,j}$ 为第 i 次采样的振动信号频点 j 处能量;

$E_{i,j}$ 为第 i 次采样的振动信号频点 j 处归一化能量;

I_i 为第 i 次采样的负载电流值; $i=1,2,\dots,m-1$; m 为振动信号采样总数; j 为振动信号频点, 如 100 Hz, 200 Hz 等。

振动信号某频点的 EC-S 值是该频点相对负载电流单位变化的平均能量值, 某频点 EC-S 值越大说明该频点受绕组振动影响越显著。计算求取测试变压器表面三维振动信号的 EC-S, 计算结果绘制如图 9, 观察图 9 可知:

1) Z 方向变压器表面振动信号基频的 EC-S 远大于 X 和 Y 方向, 比较而言, Z 方向基频能更好的反映绕组振动变化情况。

2) X 方向振动信号的三倍频和四倍频和 Y 方向的四倍频的 EC-S 远大于 Z 方向, 表明 X 和 Y 方向

的部分频点也能很好体现绕组振动变化。

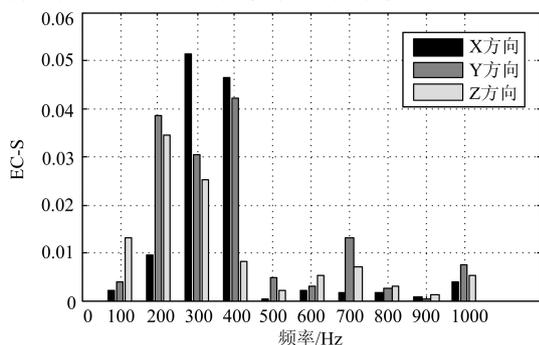


图9 不同方向振动信号的EC-S分布

Fig. 9 Energy-current sensitivity distribution of vibration signal in different directions

4 结论

本文采集并分析了一台正常运行的变压器表面三维振动信号, 结果表明变压器表面同一位置不同方向的振动信号具有不同的时频特征, 所做工作小结如下:

1) 针对变压器表面振动信号分析需求, 提出一种能量—电流灵敏度指标(EC-S), 用于定量描述振动信号不同频点反映绕组振动变化的能力。

2) 正常运行中的测试变压器表面三维振动信号 EC-S 分析表明, 除 Z 方向振动信号基频外, X 和 Y 方向的部分高次谐波也能很好地反映绕组振动变化, 可作为分析评判绕组工作状态的参考。

3) 各方向实测振动信号的基频能量远小于部分高次谐波, 且 Z 方向基频能量与负载电流之间不满足严格的正相关关系。

4) 实测信号 Z 方向峰值受负载电流变化影响显著, 其中正峰值受影响更加明显, 并且 Z 方向峰值远大于同时刻的 X 和 Y 方向。

5) 文中分析方法和结果可为变压器表面振动信号的特征提取和振动分析提供参考, 如何有效提取变压器振动特征来监测变压器运行状态, 是本文的下一步研究工作。

参考文献

[1] 薛浩然, 张珂珩, 李斌, 等. 基于布谷鸟算法和支持向量机的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 8-13.
XUE Haoran, ZHANG Keheng, LI Bin, et al. Fault diagnosis of transformer based on the cuckoo search and support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 8-13.

[2] 张桦, 魏本刚, 李可军, 等. 基于变压器马尔可夫状态评估模型和熵权模糊评价方法的风险评估技术研究[J].

电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 134-140.

- ZHANG Hua, WEI Bengang, LI Kejun, et al. Research on risk assessment technology based on Markov state evaluation model for power transformer and entropy-weighted fuzzy comprehensive evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 134-140.
- [3] 朱叶叶, 汲胜昌, 张凡, 等. 电力变压器振动产生机理及影响因素研究[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(6): 115-125.
ZHU Yeye, JI Shengchang, ZHANG Fan, et al. Vibration mechanism and influence factors in power transformers[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(6): 115-125.
- [4] 李朋, 张保会, 郝治国, 等. 基于电气量特征的变压器绕组变形监测技术现状与展望[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(2): 28-32.
LI Peng, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, et al. Actuality and prospect of transformer winding deformation monitoring based on electric characteristic[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(2): 28-32.
- [5] 刘兴平, 陈民铀. 一种配电变压器绕组变形故障的在线监测新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 20-26.
LIU Xingping, CHEN Minyou. A novel method on on-line monitoring of winding deformation of transformers[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 20-26.
- [6] 刘勇, 杨帆, 张凡, 等. 检测电力变压器绕组变形的扫频阻抗法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4505-4516.
LIU Yong, YANG Fan, ZHANG Fan, et al. Study on sweep frequency impedance to detect winding deformation within power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4505-4516.
- [7] 汲胜昌, 刘味果, 单平, 等. 小波包分析在振动法监测变压器铁芯及绕组状况中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 24-27.
JI Shengchang, LIU Weiguo, SHAN Ping, et al. The application of the wavelet packet to the monitoring of the core and winding condition of transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 24-27.
- [8] 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.
JI Shengchang, CHENG Jin, LI Yanming. Research on vibration characteristics of windings and core of oil-filled transformer[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(6): 616-619.

- [9] 王丰华, 段若晨, 耿超, 等. 基于“磁-机械”耦合场理论的电力变压器绕组振动特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2555-2562.
WANG Fenghua, DUAN Ruochen, GENG Chao, et al. Research of vibration characteristics of power transformer winding based on magnetic-mechanical coupling field theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2555-2562.
- [10] 王佳音, 白保东, 刘宏亮, 等. 直流偏磁对变压器振动噪声的影响[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 56-61.
WANG Jiayin, BAI Baodong, LIU Hongliang, et al. Research on vibration and noise of transformers under DC bias[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 56-61.
- [11] 王春宁, 张赢, 陈楷, 等. 变压器绕组短路振动信号的高低频能量分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(2): 77-82.
WANG Chuning, ZHANG Ying, CHEN Kai, et al. Analysis on high and low frequency energy distribution of transformer winding short-circuit fault vibration signal[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(2): 77-82.
- [12] 王开明, 束洪春, 曹立平, 等. 基于相关性分析的OLTC运行状态评价方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 54-59.
WANG Kaiming, SHU Hongchun, CAO Liping, et al. Study of OLTC running state evaluation method based on correlation analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 54-59.
- [13] 张彬, 徐建源, 陈江波, 等. 基于电力变压器振动信息的绕组形变诊断方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2341-2349.
ZHANG Bin, XU Jianyuan, CHEN Jiangbo, et al. Diagnosis method of winding deformation based on power transformer vibration information[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2341-2349.
- [14] GARCÍA B, BURGOS J C, ALONSO Á 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.
- [15] GARCÍA B, BURGOS J C, ALONSO Á 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.
- [16] JI S, LUO Y, LI Y. Research on extraction technique of transformer core fundamental frequency vibration based on OLCM[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(4): 1981-1988.
- [17] 马宏忠, 赵宏飞, 陈楷, 等. 基于振动的变压器铁芯松动判定方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(14): 101-106.
MA Hongzhong, ZHAO Hongfei, CHEN Kai, et al. Determine method for transformer core looseness based on vibration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(14): 101-106.
- [18] 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.
MA Hongzhong, GENG Zhihui, CHEN Kai, et al. New fault diagnosis method for power transformer winding deformation based on vibration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 89-95.
- [19] 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.
FENG Yongxin, DENG Xiaowen, FAN Lili, et al. Vibration method for large power transformer fault diagnosis and its trend[J]. Transformer, 2009, 46(10): 69-73.
- [20] 颜秋容, 刘欣, 尹建国. 基于小波理论的电力变压器振动信号特征研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 165-168.
YAN Qiurong, LIU Xin, YIN Jianguo. Features of vibration signal of power transformer using the wavelet theory[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 165-168.
- [21] 程锦, 李延沐, 汲胜昌, 等. 振动法在线监测变压器绕组及铁心状况[J]. 高电压技术, 2005, 31(4): 43-45.
CHENG Jin, LI Yanmu, JI Shengchang, et al. Application of vibration method on monitoring the winding and core condition of transformer[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(4): 43-45.

收稿日期: 2016-06-16; 修回日期: 2016-08-01

作者简介:

李中(1970—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为智能信息处理、电气设备故障诊断; E-mail: ncepulz@126.com

宋天慧(1991—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为智能信息处理。E-mail: sth19920919@163.com

(编辑 魏小丽)