

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2025.01.021

变压器振动特征值分类算法优化研究

黄建业¹, 杜厚贤², 林爽¹, 刘冰倩¹, 杨彦¹, 马国明²

(1. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福州 350007; 2. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 在基于振动特征值法的电力变压器故障检测领域, 目前广泛采用基频占比、总谐波畸变率等诊断指标, 然而变压器在正常运行时, 由于激励源的非线性特性和机械部件共振的影响, 将产生200、300 Hz等倍频振动信号, 降低了特征值对正常、故障工况的区分度。为解决上述问题, 文中搜集了各电压等级变压器正常、故障工况的56组振动数据, 检验了传统特征值的分类效果; 搭建了3种电压等级的三相电力变压器有限元仿真模型, 分析了油箱表面振动分布特征和倍频分量成因; 优化了基频占比、总谐波畸变率特征值的计算式, 提升了两特征值的分类效果。检验结果表明, 优化后两特征值的分类效果分别提升了47%、28%。

关键词: 变压器; 振动; 倍频; 特征值; 优化

Research on Classification Algorithm Optimization of Transformer Vibration Eigenvalues

HUANG Jianye¹, DU Houxian², LIN Shuang¹, LIU Bingqian¹, YANG Yan¹, MA Guoming²

(1. State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou 350007, China; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In the field of fault detection of power transformer based on the vibration signal eigenvalues, such diagnostic indexes as fundamental frequency ratio and total harmonics distortion are widely used at present. However, in case of normal operation of transformer, the multi-frequency signals such as 200 Hz or 300 Hz will be generated due to nonlinear effect of vibration source and resonance of mechanical parts, which reduces the classification of eigenvalues to the normal and faulty conditions. For solving above problem, 56 sets of vibration data of transformers at different voltage levels and at normal and fault conditions are collected, and the classification effect of traditional eigenvalues is tested. Moreover, the finite element simulation model of three-phase power transformers with three voltage levels is set up, the vibration distribution characteristics on the oil tank surface and the causes of multi-frequency components are analyzed. The calculation formula of the fundamental frequency ratio and total harmonics distortion is optimized, the classification effect of the two eigenvalues is improved. The Test results show that the classification effect of the two eigenvalues after optimization is improved by 47% and 28%, respectively.

Key words: transformer; vibration; multi-frequency; eigenvalue; optimization

0 引言

在电力变压器故障检测的诸多方法中, 振动法以其检测快速、在线检测、检测成本低等诸多优点, 得到了专家学者广泛的研究^[1-5]。其中使用振动特征值进行故障识别是振动法的重要组成部分, 此法首先使用布置于油箱表面的加速度或位移传感器

实时采集振动信号; 其次以变压器正常、故障工况下振动的特点为理论基础, 人为构造诊断特征值; 最后计算待测变压器特征值大小, 与阈值进行对比, 即可实现工况的快速判断。

特征值的选择对诊断结果起着决定性的作用。吴晓文等人在测试62台110 kV主变振动信号的基础上, 提出了基频比重、主频比重等特征值, 分

收稿日期: 2024-08-22; 修回日期: 2024-11-07

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(5700-202121258A-0-0-00)。

Project Supported by Science and Technology Foundation of State Grid Corporation of China(5700-202121258A-0-0-00).

析了运行年限对变压器振动特征的影响^[6];河海大学马宏忠等人以振动信号各频段能量比值构造了3个诊断特征值,实现了对故障类型的判别^[7];李鹏程在分析换流变压器振动特点的基础上,提出了基频幅值、振动功率谱密度等特征值,分析了不同因素影响下特征值的变化情况^[8];余长厅等人在频域范围内提出了基频、主频等7个特征值,通过划定阈值实现了变压器工况诊断^[9];西安交通大学汲胜昌等人对振动信号进行小波包分解,以分解后各分量的能量构造特征矢量,分析了正常、故障工况下特征矢量的变化情况^[10];华北电力大学刘云鹏课题组实地测量了162台超、特高压变压器振动信号,构造了基频比重、总谐波畸变率(total harmonics distortion, THD)等特征值,通过划定预警阈值实现了变压器故障诊断和故障类型判别^[11]。

尽管上述研究取得了很大进展,但在实际应用中仍存在一个难以解决的问题:变压器正常运行时除100 Hz基频外,还将产生200、300 Hz等倍频振动信号,而常用的基频占比、THD等特征值仅以100 Hz作为变压器正常工况的分类依据,振动倍频的存在将严重影响这些特征值的诊断效果。

为解决上述问题,文中提出了一种对变压器振动信号基频占比、THD特征值分类算法的优化方法,首先分析了倍频信号对传统特征值分类效果的影响,构造了考虑倍频的优化特征值计算式;其次建立了35、220、500 kV 3种电压等级电力变压器的有限元仿真模型,分析了油箱的模态特征,对比了铁心表面和油箱壁表面的振动信号差异,分析了油箱壁表面振动信号的分布特点,验证了特征值优化计算式的合理性;最后随机选取56组测试数据进行检测,结果表明相比于原特征值,优化后两特征值的分类效果分别提升了47%、28%。

1 振动特征值的优化

变压器的振动主要由铁心磁致伸缩、绕组受到周期性安培力而产生,二者的振动基频均为100 Hz^[12],当变压器发生铁心松动、绕组变形等故障时,于油箱壁表面测得的振动信号将发生改变,具体表现为:基频占比下降、奇次谐波占比增大、频谱能量分布趋于分散等。因此目前常用基频占比、THD等特征值作为变压器健康状态的诊断依据^[8-9, 11],其计算式分别见式(1)、(2):

$$T_1 = \frac{A_{100}^2}{\sum_{f=50}^{f_{\max}} A_f^2} \quad (1)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^N A_i^2}}{A_{100}} \quad (2)$$

式(1)、(2)中: A_{100} 为频谱中100 Hz幅值; A_f 为 f Hz幅值; A_i 为第 i 次谐波幅值; A_{100} 、 A_f 、 A_i 的单位为 m/s^2 或 V ; $f_{\max}$ 为所考虑的频率区间上限,一般在2 000 Hz以内,文中取 $f_{\max}$ 为1 500 Hz; N 为谐波总次数。

但变压器在正常运行时由于铁心磁致伸缩的非线性、绕组绝缘垫块具有非线性力学特性^[13]和机电耦合^[14]的影响,其振动信号除100 Hz基频外,还将包含200、300 Hz等倍频分量,且由于箱体等机械部件的共振,导致倍频信号分布具有很大的随机性,将严重影响两特征值的分类效果。

为降低倍频分量对特征值分类效果的影响,在原基频占比、THD的计算式上加以修正,将一些较低频率的倍频作为正常工况的分类指标,由此得到修正后的计算式为:

$$T'_1 = \frac{\sum_{f_1=100}^{f_k} A_{f_1}^2}{\sum_{f_2=50}^{f_{\max}} A_{f_2}^2} \quad (3)$$

$$T'_2 = \frac{\sqrt{\left(\sum_{f_1=50}^{f_{\max}} A_{f_1}^2 \right) - \left(\sum_{f_2=100}^{f_k} A_{f_2}^2 \right)}}{\sum_{f_2=100}^{f_k} A_{f_2}} \quad (4)$$

式(3)、(4)中, f_k 为表征正常工况的谐波频率上限,例如 $f_k=300$ Hz代表100、200、300 Hz均为正常工况的频率特征,大于300 Hz的倍频为故障工况的特征。分别将式(3)、(4)称为“有效谐波占比(effective harmonic ratio, EHR)”、“有效谐波畸变率(effective harmonic distortion, EHD)”。

为评价特征值对于正常、故障变压器的分类效果,构造了区间重合度这一评判指标,其计算流程如下,原理图见图1。

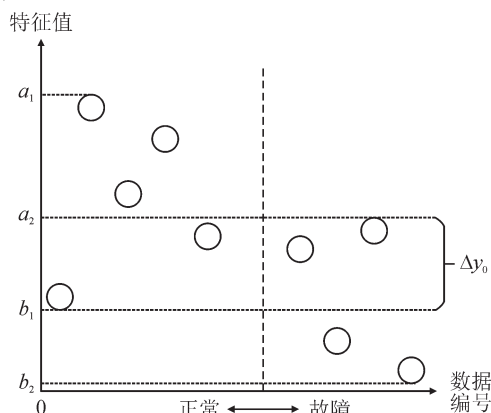


图1 区间重合度原理图

Fig. 1 Schematic diagram of interval coincidence degree

- 1) 分别提取正常工况数据与故障工况数据特征值的最大值 a_1 、 a_2 与最小值 b_1 、 b_2 ;
- 2) 计算重合区间长度 Δy_0 ;
- 3) 计算落入 Δy_0 内的数据量 Y ;
- 4) 计算区间重合度, 其中 M 为总数据量

$$L = Y/M \quad (5)$$

分类结果的区间重合度越大表明特征值的区分能力越差。

2 有限元仿真模型的建立

为进一步分析变压器正常运行时的振动特点, 探究倍频分量在频谱中的所占比例, 进而对式(3)、(4)中 f_k 的取值进行估计, 建立了 500 kV 三相变压器多物理场仿真模型, 其型号为 SSP-360000/500, 见图 2。模型包含铁心、绕组、变压器油、油箱壁、支撑底座等部件, 其详细参数见表 1。

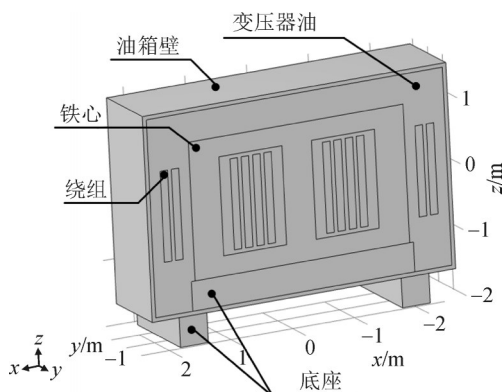


图 2 500 kV 三相变压器多物理场仿真模型

Fig. 2 Multiphysics simulation model of a 500 kV three-phase power transformer

表 1 500 kV 仿真模型对应的变压器参数

Table 1 Transformer parameters corresponding to the 500 kV simulation model

参数	数值
型号	SSP-360000/500
额定电压/kV	500.00/15.75
额定容量/MVA	360
额定电流/A	395.9/13 196.6
额定频率/Hz	50
连接组别	YNd11

仿真模型以电流源为激励, 得到振动分布的过程如下: 变压器的振动本质上由交变的磁场与绕组中的交流电流、铁心中的磁畴相互作用引起, 因此首先在电磁场仿真模块下对变压器的电磁过程进行仿真, 得到主磁通、漏磁通的分布情况; 其次添加固体力学模块, 仿真绕组线匝中的交流电流在漏磁

场的作用下产生的周期性安培力, 进而得到绕组在此安培力作用下的振动情况; 最后添加磁致伸缩仿真模块, 仿真由交变主磁通导致的铁心磁致伸缩进而引起的振动情况。上述绕组、铁心的振动机械波通过与底座的刚体连接和变压器油传导至油箱壁, 由此得到了变压器油箱壁表面的振动分布情况。

在油箱壁表面对应三相位置处设置 9 个振动测点, 其布置位置见图 3。为缩短计算时间, 节约资源占用, 由对称性将模型切分为 1/2, 考虑到外界空气的存在对油箱壁表面的振动几乎无影响, 因此省略了空气部分。

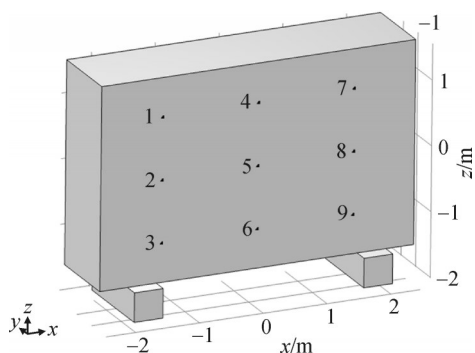


图 3 油箱壁测点布置示意图

Fig. 3 Arrangement of measuring points on the tank

为充分利用铁磁材料, 变压器在额定工况下通常工作于主磁通近饱和点附近^[15], 由此产生的奇次谐波电流将使铁心、绕组所受的合力中倍频分量增加。通过调节仿真模型输入电流大小, 控制铁心处于轻微饱和状态, 得到油箱壁表面振动位移分布云图见图 4, 测点 5 垂直于油箱壁表面方向加速度波形见图 5。由图 4、5 可以看出, 在变压器处于轻微饱和条件下, 油箱壁振动位移最大的位置出现在 A、C 两相下部, 整体的振动极大值位置呈现“五点式”分布; 于油箱壁测得的振动信号并非理论上的 100 Hz 周期信号, 而是以周期性出现的 400 Hz 振动频率为主。

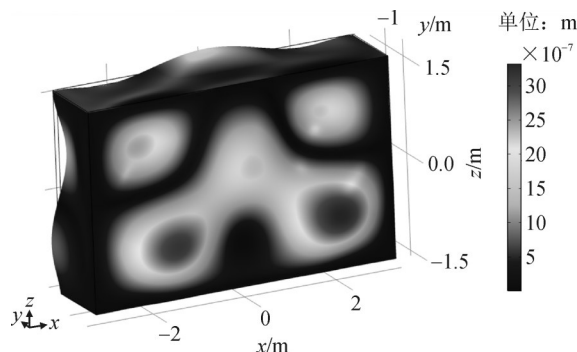


图 4 油箱壁表面振动分布云图

Fig. 4 Vibration distribution on the tank surface

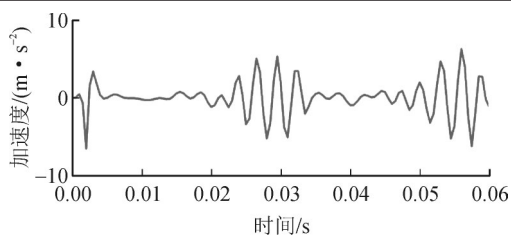


图5 500 kV变压器仿真模型测点5垂直于油箱壁表面方向加速度波形

Fig. 5 Acceleration waveform of measuring point 5 perpendicular to the surface of the tank of a 500 kV transformer

考虑到油箱壁、底座的加入使振动趋于复杂,同时为研究油箱壁对振动信号的影响,建立去除了箱壁、底座的检验模型见图6,为保留底座对铁心的约束作用,设置铁心底面为固定。

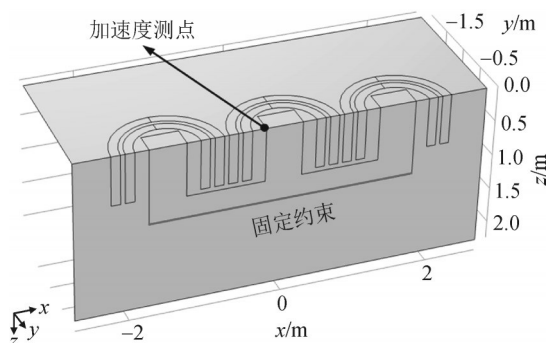


图6 去除油箱壁与底座的检验模型

Fig. 6 Test model without transformer tank and basement

控制施加激励电流的大小,使得铁心饱和情况不变,得到铁心振动位移云图和B相加速度测点的z方向加速度时频谱分别见图7、8。对比图5与图8可以发现,铁心作为激励源,其加速度幅值理应大于油箱,但仿真结果显示二者的加速度幅值相差较小,都约为 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;在频率上,铁心的加速度频率仿真值与理论分析相符,即以100 Hz为基频,含有100 Hz倍频分量,随频率的升高,倍频分量幅值逐渐下降,400 Hz分量在铁心振动频谱中所占比例很小,而油箱壁的振动规律与铁心相差较大,因此可以确定,箱壁、底座的加入使得变压器整体的振动规律发生了改变。

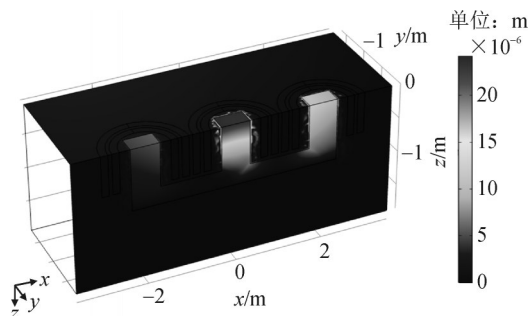


图7 铁心振动分布云图

Fig. 7 Vibration distribution on the core

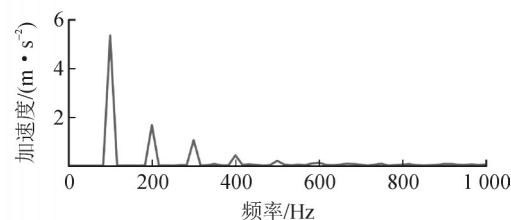
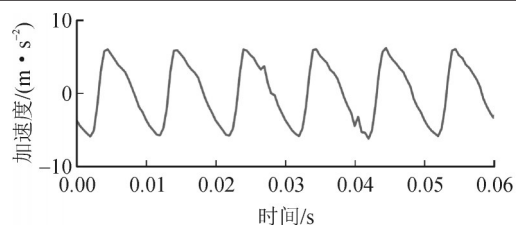


图8 500 kV变压器仿真模型铁心z方向加速度波形与频谱
Fig. 8 z-direction acceleration waveform and spectrum of the core of a 500 kV transformer

为进一步分析图5中400 Hz分量的成因,对油箱壁—底座系统进行模态分析,其中433.57 Hz的模态振型见图9,油箱的此阶固有模态与图4的振动分布云图相符,因此可以确定本模型400 Hz分量来自油箱壁的共振。

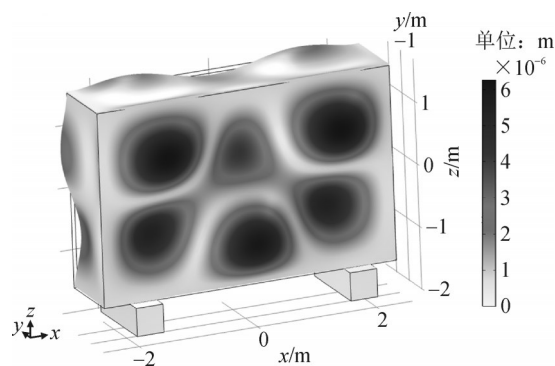


图9 油箱模态振型

Fig. 9 Tank modal vibration pattern

为探究其他电压等级变压器的振动是否存在共振和倍频现象,对一台35 kV和一台220 kV变压器进行了仿真,两变压器的参数见表2。得到了油箱壁表面5号测点y方向的振动情况和图6中测点位置的铁心z方向振动情况,分别见图10、11。

表2 35 kV和220 kV变压器仿真模型参数

Table 2 35 kV and 220 kV transformer simulation

model parameters		
参数	数值	
型号	SFZ11-31500/35	SZ11-100000/220
额定电压/kV	35.0/10.5	220.0/35.0
额定容量/MVA	31.5	100.0
额定电流/A	519.63/1 732.10	251.00/1 649.60
额定频率/Hz	50	50
连接组别	YNd11	YNd11

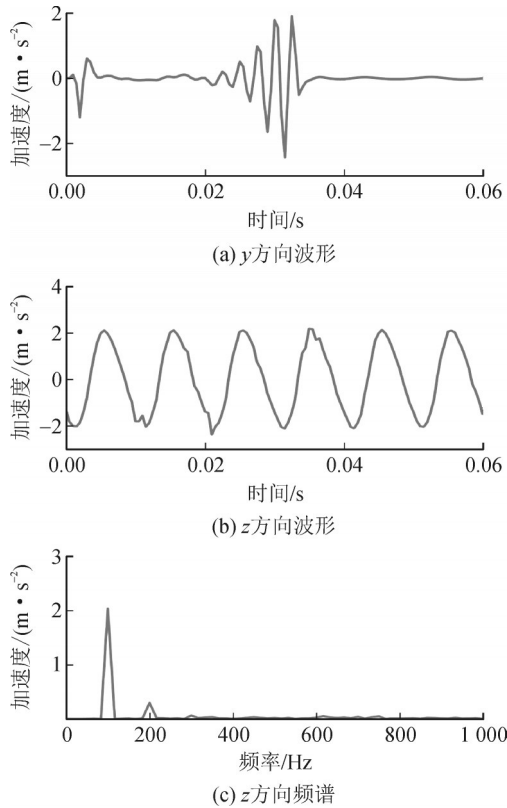


图10 35 kV变压器模型的振动情况

Fig. 10 Vibration situation of the 35 kV transformer simulation model

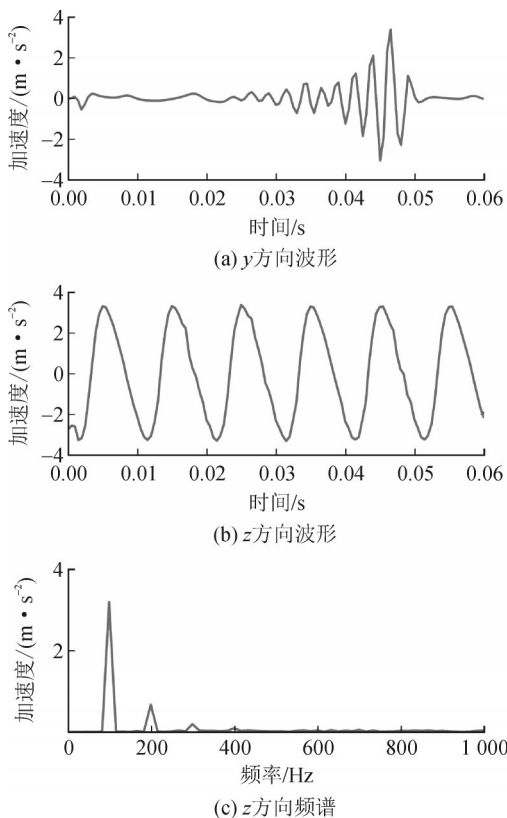


图11 220 kV变压器模型振动情况

Fig. 11 Vibration situation of the 220 kV transformer simulation model

图10(a)为油箱壁表面5号测点 y 方向振动加速度波形;图10(b)为铁心B相测点 z 方向振动加速度波形;图10(c)为铁心B相测点 z 方向振动加速度频谱。图11(a)为油箱壁表面5号测点 y 方向振动加速度波形;图11(b)为铁心B相测点 z 方向振动加速度波形;图11(c)为铁心B相测点 z 方向振动加速度频谱。

提取了3类变压器仿真结果的波形、频谱特点,见表3。

表3 35、220、500 kV变压器仿真结果的波形频谱特征
Table 3 Waveform spectral characteristics of simulation results of 35 kV, 220 kV, 500 kV transformers

参数	35 kV 变压器	220 kV 变压器	500 kV 变压器
铁心振动峰值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	4.223	6.638	11.919
箱体振动峰值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	4.350	6.462	12.532
加速度频谱			
100 Hz 占比/%	81.5	74.2	59.2
加速度频谱			
200 Hz 占比/%	11.8	15.6	18.5
加速度频谱			
300 Hz 占比/%	2.4	4.4	11.6
加速度频谱			
400 Hz 占比/%	0.2	2.1	4.7

由图10、11和表3可见,不同电压等级的变压器均存在振动倍频信号和共振现象,随着电压等级的提高铁心、箱体的振动幅度增大,频谱中100 Hz基频占比减小,200、300 Hz等倍频占比增大,且不同变压器振动倍频的比例不同。

经过对振动的仿真分析,得到结论如下:

1)变压器油箱壁的振动位移呈现“五点式”分布,其成因为油箱—底座系统的共振;

2)不同电压等级变压器铁心的振动均包含一定比例的200、300 Hz等倍频分量,且振动倍频在频谱中的占比不同;

3)变压器正常运行时于油箱壁位置的测点将检测到明显的倍频分量,将倍频纳入正常的范围具有合理性。

3 振动特征值分类效果测试

由仿真结果可知,变压器正常运行时铁心、箱体均为倍频信号的产生源头,且不同电压等级变压器箱体—底座系统的固有频率不同,将导致频谱中倍频的比例产生差异。

为研究倍频信号对两特征值分类效果的影响,

搜集了文[7, 16–27]中的56组振动数据, 包含39组正常工况数据^[7, 16–20, 22, 24–26]和17组故障工况数据^[7, 20–23, 25–27], 涵盖电压等级10.5~500 kV。首先按式(1)、(2)绘制传统的基频占比、THD分类效果, 分别见图12、13。图12、13中虚线左侧代表正常工况数据, 右侧为故障工况的数据, 可见, 两特征值的分类效果均不理想, 正常与故障工况的计算结果存在很大的重合区间。

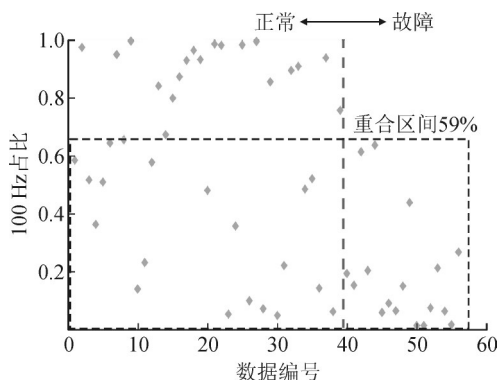


图12 100 Hz 占比分类效果

Fig. 12 Classification effect of 100 Hz ratio

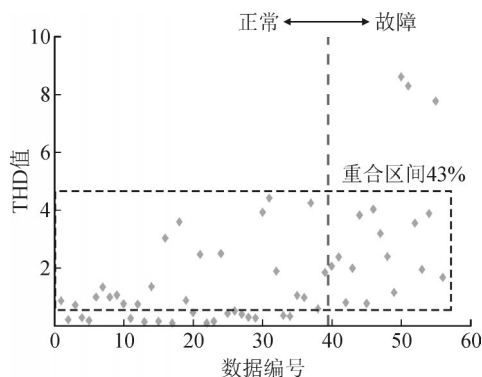


图13 THD 分类效果

Fig. 13 Classification effect of THD

按式(5)分别计算100 Hz占比与THD的区间重合度, 结果为0.59、0.43。可见, 由于振动倍频信号的影响, 两特征值分类结果中正常、故障两类别的重合区间均在40%以上, 分类效果不佳。

使用优化特征值进行分类前首先要确定式(3)、(4)中 f_k 最优值, 由第2节中的仿真结果可知, 变压器在正常运行下也会存在200~400 Hz的振动倍频分量, 因此分别取 $f_k=200, 300, 400, 500$ Hz, 对这些频率下的两优化特征值分类结果分别计算区间重合度, 结果见图14。可见, $f_k=300$ Hz时两特征值具有最好的分类效果, 分别见图15、16, 对应区间重合度分别为0.27(EHR)、0.31(EHD), 相比于原特征值, 优化后两特征值分类效果分别提升了47%、28%。

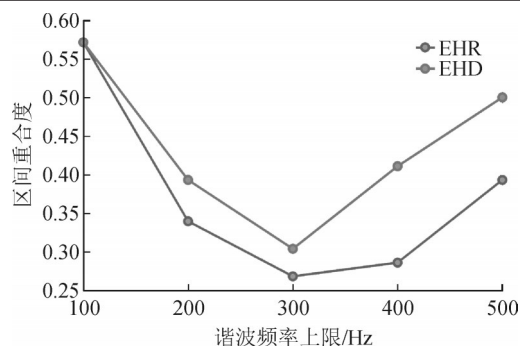


图14 两特征值区间重合度随 f_k 的变化曲线

Fig. 14 The curve of interval overlap with f_k

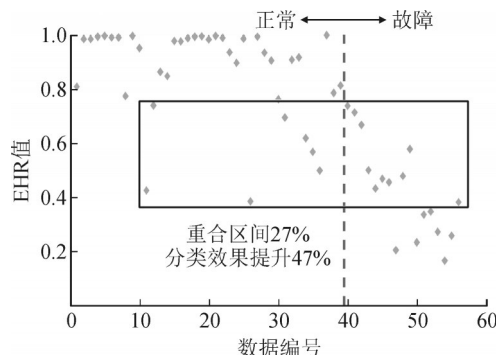


图15 EHR 分类效果

Fig. 15 Classification effect of EHR

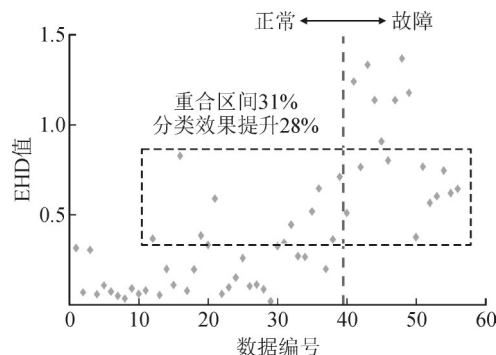


图16 EHD 分类效果

Fig. 16 Classification effect of EHD

将200、300 Hz谐波纳入正常工况范围后, 正常变压器的EHR指标抬高, 故障变压器的EHD指标抬高, 均实现了分类效果的优化。

4 结论

文中在分析变压器振动倍频信号产生原因与分布情况的基础上, 提出了对基频占比、THD特征值分类算法的优化方法。主要结论如下:

1) 搜集了56组不同电压等级变压器正常、故障工况下的振动信号, 以区间重合度为评判标准对基频占比、THD两特征值的分类效果进行检验, 结果表明由于倍频信号的干扰, 两特征值的分类效果均不理想, 其区间重合度均大于40%。

2)为研究倍频信号成因与振动在油箱壁表面的分布情况,建立了35、220、500 kV 3个电压等级变压器的多物理场仿真模型,结果表明,油箱壁—底座系统的共振将使得频谱倍频分量增大,将倍频纳入正常工况范围具有合理性。

3)为减小振动倍频对特征值分类效果的影响,将200、300 Hz纳入正常工况特征,结果表明,相比于原特征值,优化后两特征值的分类效果分别提升了47%、28%。

参考文献:

- [1] 张九思,马宏忠,李勇,等.基于VMD的变压器绕组松动故障分析与诊断[J].高压电器,2021,57(8):198-208.
ZHANG Jiusi, MA Hongzhong, LI Yong, et al. Analysis and diagnosis on looseness of transformer winding based on VMD[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(8): 198-208.
- [2] 杜厚贤,刘昊,雷龙武,等.基于振动信号多特征值的电力变压器故障检测研究[J].电工技术学报,2023,38(1):83-94.
DU Houxian, LIU Hao, LEI Longwu, et al. Power transformer fault detection based on multi-eigenvalues of vibration signal[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(1): 83-94.
- [3] 刘道生,李泽帅,李鹏,等.变压器振动特性分析及其降噪技术研究综述[J].变压器,2023,60(7):18-27.
LIU Daosheng, LI Zeshuai, LI Peng, et al. Review of characteristics analysis on vibration and technology research on reducing noise of transformers[J]. Transformer, 2023, 60(7): 18-27.
- [4] 朱梓倩,刘蓉,付瑜,等.基于振动云图HOG和SVM的变压器绕组松动故障诊断方法[J].高压电器,2019,55(11):227-231.
ZHU Ziqian, LIU Rong, FU Yu, et al. Diagnostic method for transformer winding looseness based on HOG of vibration cloud picture and SVM[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 227-231.
- [5] 律方成,汪鑫宇,王平,等.基于振动偏离及加权熵的多次短路冲击下变压器绕组机械形变辨识[J].电工技术学报,2023,38(11):3022-3032.
LYU Fangcheng, WANG Xinyu, WANG Ping, et al. Mechanical deformation identification of transformer winding under multiple short-circuit impacts based on vibration deviation and weighted entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(11): 3022-3032.
- [6] 吴晓文,周年光,彭继文,等.110 kV变压器现场振动特征与相关因素分析[J].高压电器,2020,56(1):210-215.
WU Xiaowen, ZHOU Nianguang, PENG Jiwen, et al. Field vibration feature and related factors analysis of 110 kV transformers[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 210-215.
- [7] 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. A new fault diagnosis method for power transformer winding deformation based on vibration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 89-95.
- [8] 李鹏程.基于振动信号分析法的换流变压器振动特性及其影响因素研究[J].高压电器,2018,54(4):142-151.
LI Pengcheng. Vibration characteristics and influential factors of converter transformer based on vibration signal analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(4): 142-151.
- [9] 余长厅,黎大健,陈梁远,等.基于声纹及振动的变压器故障诊断技术研究[J].高压电器,2019,55(11):248-254.
YU Changting, LI Dajian, CHEN Liangyuan, et al. Transformer fault diagnosis technique based on voiceprint and vibration[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 248-254.
- [10] 汲胜昌,刘味果,单平,等.小波包分析在振动法监测变压器铁心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.
- [11] 刘云鹏,王博闻,周旭东,等.基于162台超、特高压变压器的声纹特征预警阈值划定研究[J].华北电力大学学报,2021,48(5):45-53.
LIU Yunpeng, WANG Bowen, ZHOU Xudong, et al. Threshold delineation research for early warning of voiceprint eigenvalues based on 162 sets of EHV and UHV transformers[J]. Journal of North China Electric Power University, 2021, 48(5): 45-53.
- [12] 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.
- [13] 王洪方,王乃庆,李同生.短路条件下电力变压器绕组轴向振动等效单自由度分析[J].电工技术学报,2000,15(5):39-41.
WANG Hongfang, WANG Naiqing, LI Tongsheng. Axial vibration equivalent one-degree analysis of power transformer winding under short-circuit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(5): 39-41.

- [14] 师愉航,汲胜昌,张凡,等. 变压器绕组多倍频振动机理及特性[J]. 高电压技术, 2021, 47(7): 2536-2544.
SHI Yuhang, JI Shengchang, ZHANG Fan, et al. Multi-frequency vibration mechanism and characteristics of transformer windings[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2536-2544.
- [15] 李发海,朱东起. 电机学[M]. 第6版. 北京: 科学出版社, 2019.
LI Fahai, ZHU Dongqi. Electromechanics[M]. 6th ed. Beijing: Science Press, 2019.
- [16] 郭俊,汲胜昌,沈琪,等. 盲源分离技术在振动法检测变压器故障中的应用[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 68-78.
GUO Jun, JI Shengchang, SHEN Qi, et al. Blind source separation technology for the detection of transformer fault based on vibration method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 68-78.
- [17] 郑婧,王婧頔,郭洁,等. 电力变压器铁心振动特性分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(8): 763-768.
ZHENG Jing, WANG Jingdi, GUO Jie, et al. Vibration analysis of power transformer cores[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(8): 763-768.
- [18] 洪凯星,潘再平,黄海. 电力变压器绕组轴向振动的建模与分析[J]. 变压器, 2010, 47(12): 32-36.
HONG Kaixing, PAN Zaiping, HUANG Hai. Modeling and analysis of winding axial vibration of power transformer[J]. Transformer, 2010, 47(12): 32-36.
- [19] 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.
- [20] HONG Kaixing, HUANG Hai, ZHOU Jianping. Winding condition assessment of power transformers based on vibration correlation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 1735-1742.
- [21] 刘胜军,孙志鹏,沈辰,等. 基于振动频谱分析和总谐波畸变率的电力变压器故障诊断方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(3): 86-91.
LIU Shengjun, SUN Zhipeng, SHEN Chen, et al. Research on fault diagnosis of power transformers based on spectral analysis of vibration signals and total harmonic distortion
- [J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(3): 86-91.
- [22] 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.
WU Shuyou. Research on condition monitoring and fault diagnosis of power transformer based on vibration signal analysis[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009.
- [23] 郝震,龙凯华,赵燕坤,等. 引起变压器异常振动的两种缺陷的诊断[J]. 中国电力, 2014, 47(6): 55-60.
HAO Zhen, LONG Kaihua, ZHAO Yankun, et al. Abnormal vibration diagnostic methods of transformers caused by two defects[J]. Electric Power, 2014, 47(6): 55-60.
- [24] 高沛,王丰华,苏磊,等. 直流偏磁下电力变压器的振动特性[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1536-1541.
GAO Pei, WANG Fenghua, SU Lei, et al. Analysis on vibration characteristics of power transformer under DC bias[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1536-1541.
- [25] HAO Yangtian, WEI Peng, MIN Hu, et al. Feature extraction of the transformer core loosening based on variational mode decomposition[C]//2017 1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). China: IEEE, 2017: 598-602.
- [26] HONG Kaixing, JIN Ming, HUANG Hai. Transformer winding fault diagnosis using vibration image and deep learning[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 676-685.
- [27] 王丰华,王邵菁,陈颂,等. 基于改进MFCC和VQ的变压器声纹识别模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1535-1542.
WANG Fenghua, WANG Shaojing, CHEN Song, et al. Voiceprint recognition model of power transformers based on improved MFCC and VQ[J]. Proceedings of the CSEE, 2017 37(5): 1535-1542.

黄建业(1986—),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统及其自动化。

刘冰倩(1991—),女,硕士,高级工程师,研究方向为智慧物联关键技术研究(E-mail: lbq_525@126.com)。

马国明(1984—),男,教授,博士生导师,研究方向为特快速瞬态过电压测量、电气设备状态监测与诊断、光学输电设备状态感知等。