

变压器可听声信号特征分析

马春雷¹, 谢荣斌¹, 赵莉华², 李钟萍¹, 徐舒蓉²

(1、贵阳供电局, 贵州 贵阳 550001; 2、四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 振动与可听声的变压器诊断技术凭借与被监测设备无电气连接、抗干扰能力强和灵敏度高优点成为研究热点。针对变压器可听声信号特征, 分析了变压器可听声产生机理及其影响因素。运用分层阈值消噪法对信号进行消噪, 采用快速傅里叶变换和小波分解法对不同运行年限、不同电压等级、不同采集位置、不同负载率情况下的在运变压器可听声信号进行分析, 得到信号的频谱和小波能量特征向量。结果表明, 理论上变压器可听声信号主频为 100 Hz, 并存在 200 Hz、300 Hz 等高次谐波分量。但是, 随着变压器运行年限、电压等级的升高, 主频增大为 200 Hz, 高次谐波占比及高频段能量特征值增大, 信号频谱与能量特征值受采集位置影响, 检测时应根据变压器结构等实际情况选取合适的采集位置。

关键词: 变压器; 可听声信号; 频谱; 能量谱

文章编号: 2096-4633(2018)02-0018-09 **中图分类号:** TM7 **文献标志码:** B

电力系统中变压器数量大、持续运行时间长, 故障概率较高, 所以对变压器运行情况进行监测及故障诊断, 提前发现故障隐患并消除^[1], 对于保证变压器可靠运行具有重要意义。

目前, 变压器故障诊断方法中运用最成熟的是油色谱诊断法, 文献[2]指出我国电网中 50% 以上变压器故障是通过油色谱分析结果检出的。虽然油色谱检测结果准确, 但需要变压器停运并吊芯取油, 在线监测困难。振动检测法是近年故障诊断的研究热点^[3], 其监测设备与被监测设备没有电气连接, 具有较强的抗干扰能力和灵敏度; 但是在采集振动信号时, 需将传感器与变压器接触, 传感器的安装与维护不方便。因此, 基于可听声的变压器故障诊断技术应运而生。

20 世纪 80 年代, 声学分析开始应用于发动机、内燃机等机械设备故障诊断, 取得了良好的效果^[6,9]。近年来, 华北电力大学赵书涛、清华大学马宏彬等对变压器可听声诊断技术进行了研究^[7-8,10], 主要是声波信号消噪、奇异性检测、小波包特征提取及发展趋势预测算法等, 提出了基于声测法和区间能量提取的变压器故障诊断方法, 并进行了试验验证, 为可听声诊断技术的应用奠定了基础。但是, 变压器可听声信号特征随变压器运行条件的变化而变化, 目前对这方面研究还较少。

在对变压器可听声产生机理分析的基础上, 得到可听声信号频率特性的特征; 通过对不同运行年限、不同电压等级、不同采集位置、不同负载率的在运变压器进行可听声信号采集, 采用分层阈值法对信号进行消噪, 运用傅里叶变换与小波分解得到其频谱分布特性、能量特征向量, 找出其频谱及能量特征变化规律。

1 变压器可听声产生机理

变压器可听声信号指变压器振动噪声中频率为 20 Hz ~ 20 kHz 的声波信号, 变压器可听声信号主要来自绕组、铁心、油箱(包括磁屏蔽等)及冷却风扇的振动^[7,11]。由于冷却装置的振动可听声信号占比较小, 可忽略。重点分析铁心及绕组振动的发声。

1.1 铁心振动发声

铁心振动包括电动力引起的铁心振动和硅钢片磁致伸缩引起的铁心振动。随着铁心加工工艺的改进, 铁心压紧力和硅钢片堆叠紧密度得到了保证, 电动力引起的铁心振动大幅减小。硅钢片磁致伸缩是引起铁心振动发声的主要原因^[7,13-14]。

所谓磁致伸缩, 指交变磁场作用下铁心沿磁力线方向硅钢片尺寸扩大而垂直于磁力线方向硅钢片尺寸缩小的现象。磁致伸缩大小与磁致伸缩力相

关。根据简化励磁模型,磁致伸缩力 F_c 为^[7]:

$$F_c = \frac{1}{2} \nabla (H^2 \tau \frac{\partial \mu}{\partial \tau}) = F_{cmax} \sin 2\omega t \quad (1)$$

式中: F_{cmax} 为磁致伸缩力幅值; ω 为交变电磁场的角频率; H 为磁场强度; μ 为铁磁介质磁导率; τ 为介质的体积密度。

由式(1)可知,磁致伸缩力变化周期是磁场交变周期的一半,因此磁致伸缩引起的铁心振动发声的频率为电源基频的两倍。电源基频为 50 Hz 时,铁心振动发声基频为 100 Hz。由于铁心的饱和非线性,磁致伸缩特性也为非线性,存在高次谐波分量,所以铁心振动发声频率存在基频的倍频,如 200 Hz、300 Hz、400 Hz 等,超过 1 000 Hz 的高频分量很小^[11]。

1.2 绕组振动发声

变压器绕组在电流与漏磁场作用下产生电动势^[4],同一线圈匝流过大小和方向相同的电流,各线匝之间产生相互吸引的轴向作用力,轴向力导致绕组轴向振动;一次和二次线圈的电流方向相反,产生相互排斥的辐向作用力,辐向力导致绕组辐向振动。绕组的电动势与加速度成正比,绕组振动加速度如式(2)所示。

$$a(t) = KI^2 \cos(2\omega t + 2\theta) \quad (2)$$

式中: $a(t)$ 为绕组振动加速度; K 为常数; ω 为交变电磁场的角频率; θ 为电流初相位。

从式(2)可知,绕组振动加速度与电流的平方成正比,电动势与电流平方也成正比,所以绕组发射的声功率近似与负载电流的平方成正比^[12],则绕组振动发声信号的基频是负载电流频率的两倍,即 100 Hz。另外,绕组自身的绝缘材料具有非线性将导致振动发声信号呈现非线性,出现 200 Hz、300 Hz 等高次谐波。

2 声音信号特征量提取

运用快速傅里叶变换与小波分解算法分别提取可听声信号的频谱及能量特征向量,结合二者分布特征,分析变压器不同运行条件下的特性。

快速傅里叶变换(FFT)是信号频谱分析的重要工具。根据 FFT 变换将声信号的时域图转化成频谱图,可判别声信号的频谱分布。

小波分析的基本原理是通过改变小波基的变换研究信号各尺度层次上的特征。小波分析在低频部

分的频率分辨率较高,时间分辨率较低;在高频部分则相反。这种特性与可听声信号低频变化慢,高频变化快的特点相符,因此适用于分析可听声信号能量特征。

用 Daubechies 小波函数对声信号进行 9 层分解与重构^[9]。其分解过程如图 1 所示。

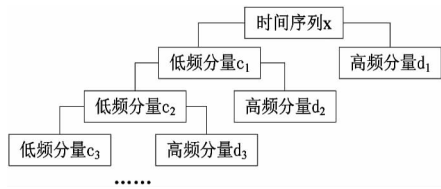


图 1 时间序列 n 层分解过程

Fig. 1 Time series n layer decomposition process

第一层分解把信号分为低频部分 c_1 、高频部分 d_1 ,然后保留 d_1 ;继续对 c_1 分解,得到低频 c_2 、高频 d_2 ,保留 d_2 ;对 c_2 继续分解,依次类推…。分解后取 $d_1 \sim d_9$ 进行小波重构。

$d_1 \sim d_9$ 各频段包含的频率范围如表 1 所示。

表 1 频段划分

Tab. 1 Frequency domains of intervals

频段号	频段范围/Hz	频段号	频段范围/Hz
d_1	12.8 k ~ 25.6 k	d_6	400 ~ 800
d_2	6.4 k ~ 12.8 k	d_7	200 ~ 400
d_3	3.2 k ~ 6.4 k	d_8	100 ~ 200
d_4	1.6 k ~ 3.2 k	d_9	50 ~ 100
d_5	800 ~ 1 600		

(1)提取第 1 至 9 层从低频到高频 9 个频段($d_1 \sim d_9$)信号进行特征分析。将小波分解得到的 9 个高、低频系数命名为 $X_k(t)$ ($k=1,2,\dots,9$),然后对小波分解系数进行重构,用 $S_k(t)$ 表示 $X_k(t)$ 的重构信号,则总信号 $S(t)$ 为:

$$S(t) = S_1(t) + S_2(t) + \dots + S_9(t) \quad (3)$$

(2)求各频带信号的总能量。

$S_k(t)$ 所对应的能量用 E_k (其中 $k=1,2,\dots,9$) 表示,则有:

$$E_k = \int |S_k(t)|^2 dt = \sum_{k=1}^n |x_k|^2 \quad (4)$$

式中: $x_k(j=1,2,\dots,9)$ 表示重构信号 $S_k(t)$ 的离散点的幅值。

(3)特征量:以能量为元素构造特征向量,用 T

表示。

$$T = [E_1, E_2, \cdots, E_9]$$

(5)

为计算和分析方便。对特征向量 T 归一化处理,得:

$$T' = \left[\frac{E_1}{E}, \cdots, \frac{E_8}{E}, \frac{E_9}{E} \right]$$

(6)

式(6)中:

$$E = \left[\sum_{j=1}^9 |E_j|^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

(7)

通过式(6)可以得到不同运行情况下变压器可听声信号能量特征向量,通过分析对比该特征,进而得到各运行情况下可听声信号的变化规律。

3 变压器可听声信号采集及分析

选取不同运行年限、不同电压等级的变压器在不同位置以及不同负载率情况下进行可听声信号采集,通过 FFT 频谱分析及小波分解,找出不同运行条件下变压器可听声信号特征分布规律。

3.1 可听声信号采集

采用 CRY333 自由场测量型传声器及 NI9234 数据采集仪对某电力局在运变压器进行可听声信号

采集,信号采集原理图及现场测试位置如图 2、图 3 所示。

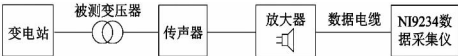


图 2 信号采集接线图

Fig. 2 Wiring diagram of signal acquisition



图 3 信号现场采集图

Fig. 3 The scene acquisition map of signal

由图 2、图 3 可知,可听声信号采用近场测量,从两个方位采集,传声器悬挂在变压器油箱两侧,距变压器油箱壁约 10cm,通过数据电缆将信号传递至数据采集仪进行分析。被测变压器型号及参数如表 2 所示。

表 2 被测变压器型号、参数

Tab. 2 The model and parameters of the transformer are tested

变压器编号	型 号	电压等级/kV	容量/MVA	运行年限/年	负载率/%
1 号	SZ10 - 40000/110	110	40	9	41. 95
2 号	SZ10 - 50000/110	110	50	8	51. 25
3 号	SFZ10 - 50000/110	110	50	2	43. 75
4 号	SFSZ9 - 180000/220	220	180	17	60. 33
5 号	SFPSZ10 - 180000/220	220	180	12	41. 7
6 号	ODFPS - 250000/500	500	250	3	72. 54
7 号	ODFPS - 250000/500	500	250	8	90. 83
8 号	ODFPS - 250000/500	500	250	17	95. 12

3.2 信号消噪措施

变压器运行时发出的声信号通常是一维信号且一般表现为较平稳的低频信号;而噪声信号主要是一些近似于脉冲状高频不稳定信号,当可听声信号中干扰噪声特征和有用信号特征相似时,必须选取合适的消噪方法。目前主要方法有:传统阈值法、小波法、分层阈值法等。其中分层阈值消噪法是在非线性小波变换阈值法基础上的改进,实际工程中的信号大多数可能存在不连续点和奇点,噪声信号也

可能是非平稳的白噪声,因此用分层消噪可以克服这些缺陷。其计算式如公式(8)所示^[9]:

$$T_0 = \frac{\log_2(1 + 2/\sqrt{N})}{J + Z} A$$

(8)

其中 N 为预设的噪声功率, J 是所取的最大尺度,取为常数 2, A 为最大的极值点幅度。每一级尺度量级均视为相互独立存在,可设定一个与之最佳匹配的阈值进行降噪,此阈值的 N 仍为预设噪声功率, J 为本级尺度, Z 不变, A 为在本级尺度上找到的

极值点幅度。根据降噪后各级尺度上保留的模极大值点进行信号重构。分层阈值消噪算法可以实现较低尺度上保留有用信号,在最大尺度上消除部分噪声信号。

采用分层阈值法对可听声信号进行消噪。以1号为例,运用分层阈值法对信号进行消噪,结果如图4所示。

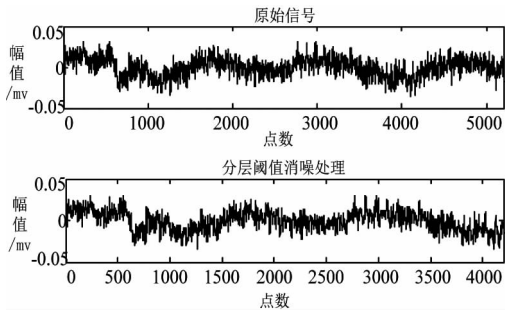


图4 信号消噪波形图

Fig. 4 Signal denoising waveform

由图4可见,分层阈值消噪法不但滤除了信号中的噪声而且保留了其突变特征,在变压器声波信号处理中是一种很好的消噪方法。因此本文的信号均使用该方法进行消噪处理。

3.3 不同运行年限变压器可听声信号特征分析

选取8台不同运行年限的变压器进行测试,根据其运行年限的长短分为短期(运行时间<5年)、中期(运行时间5至10年)、长期(运行时间>10年)运行变压器。其中3号与6号为短期运行的变压器;1号、2号、7号为中期运行变压器;4号、5号、8号为长期运行变压器。

分别运用FFT对被测变压器可听声信号进行频谱分析,信号频谱如图5至7所示。

对图中各频率点的幅值进行提取分析得100 Hz及其倍频分量幅值占比值,结果如表3所示。

采用db3小波函数,对信号进行小波分解,从频谱图4至6可以看出 $\geq 1\,000\text{ Hz}$ 幅值很小,因此本文只取低频段的5个特征值(d_9 、 d_8 、 d_7 、 d_6 、 d_5)构成特征向量,小波分解的能量特征值如表4所示。

从图4至6及表3可知,随着变压器运行年限的增加,可听声信号频谱中大于100 Hz的高次谐波分量占比逐渐增大,其中短期运行的变压器高频部分占比为30%~40%左右,中期运行的变压器高频部分占比为60%以上,长期运行的变压器高频部分占比大于75%。并且中期、长期运行变压器可听声信号

频谱的主频增大为200 Hz。

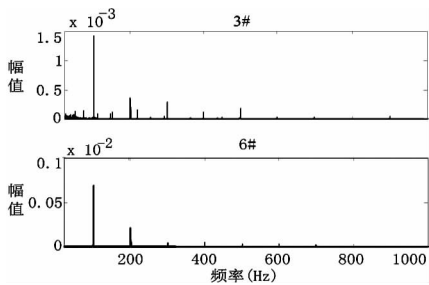


图5 短期运行变压器可听声信号频谱(3号、6号)

Fig. 5 The audible acoustic signal spectrum of short-term operation transformer (NO. 3, NO. 6)

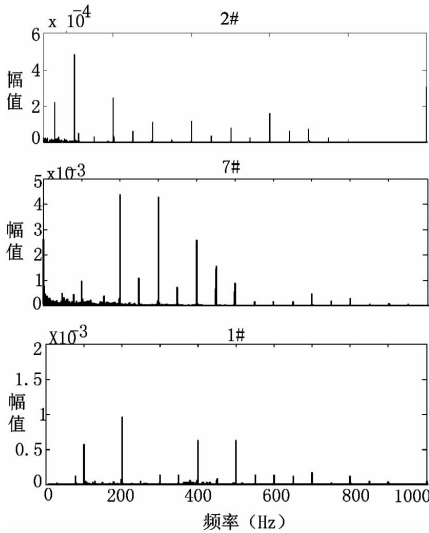


图6 中期运行变压器可听声信号频谱(2号、7号、1号)

Fig. 6 The audible acoustic signal spectrum of mid-term operation transformer (NO. 2, NO. 7, NO. 1)

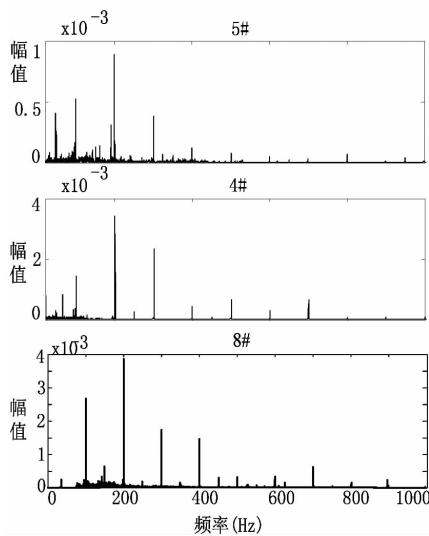


图7 长期运行变压器可听声信号频谱(5号、4号、8号)

Fig. 7 The audible acoustic signal spectrum of long-term operation transformer (NO. 5, NO. 4, NO. 8)

表 3 被测变压器可听声频谱幅值占比百分数

Tab. 3 The audible acoustic signal spectrum amplitude ratio of measured transformers

%

类型	短期变压器		中期变压器			长期变压器		
频率/Hz	3 号	6 号	2 号	7 号	1 号	5 号	4 号	8 号
100	58.1	69.8	36.4	14.9	17.8	24.1	15.0	24.4
200	15.6	22.2	19.4	27.4	33.0	40.7	35.8	35.4
300	6.70	2.02	8.25	23.5	29.4	18.1	24.7	16.0
400	5.59	2.32	8.22	20.7	10.0	6.02	4.98	12.7
500	7.45	1.52	6.67	6.80	13.0	3.70	7.26	1.83
600	1.86	1.42	14.1	1.33	4.71	2.32	3.63	1.79
700	0.75	0.31	6.30	3.32	4.48	1.39	7.05	5.23
800	0.56	0.11	0.37	0.99	12.4	2.78	0.52	0.87
900	1.12	0.11	0.22	0.66	1.18	0.46	0.52	1.74
1 000	0.75	0.10	0.15	0.33	0.59	0.46	0.31	0.02
主要高次谐波 总占比	40.4	30.2	63.6	85.1	82.2	75.9	85	75.6

由表 4 可知,随变压器运行年限的增加,100 ~ 200 Hz 频段的特征值 d_8 呈递减趋势,高频部分特征值增大。短期运行变压器能量最大特征值为 d_8 ,即主频在 100 ~ 200 Hz 频段;中期运行的变压器能量最大特征值仍为 d_8 ,但是 200 ~ 400 Hz 频段的特征

值 d_7 明显增大;长期运行的变压器的能量特征最大值出现在 d_7 频段;可见,随年限的增加,能量特征最大值逐渐增大,反映了可听声高频成分的增加,与频谱分析结果一致。

表 4 被测变压器可听声信号小波能量特征值

Tab. 4 The audible acoustic signal energy characteristic value of measured transformers

		d_9	d_8	d_7	d_6	d_5
短期	3 号	0.080	0.993	0.080	0.034	0.006
	6 号	0.118	0.660	0.668	0.316	0.070
	2 号	0.441	0.879	0.101	0.149	0.038
中期	7 号	0.210	0.717	0.564	0.352	0.023
	1 号	0.227	0.543	0.749	0.295	0.070
	5 号	0.133	0.678	0.978	0.047	0.006
长期	4 号	0.127	0.540	0.812	0.178	0.025
	8 号	0.250	0.581	0.613	0.122	0.015

随运行年限的增大,变压器硅钢片的紧密程度有所下降,变压器铁心松动,铁心的磁致伸缩现象越加明显^[16],从而加剧铁心振动;绕组的绝缘材料本身具有非线性,随运行时间增大,其绝缘特性有所下降,非线性情况更加明显。从而导致变压器振动发声信号中高次谐波幅值增大,占比增加。

3.4 不同电压等级的变压器可听声信号特征分析

被测变压器有 110 kV、220 kV、500 kV 三个电

压等级。现以 110 kV 电压等级的 2 号、3 号为例,分析相同电压等级变压器的可听声信号频谱分布、能量特征向量情况;以 2 号、4 号、8 号为例,分析三个不同电压等级下变压器可听声信号频谱、能量特征向量分布规律。根据表 3 分别画出相同电压等级、不同电压等级变压器可听声的频谱占比曲线,分别如图 8、9 所示。其他变压器分布规律与这四台一致。

从图7可知电压为110 kV的2号、3号变压器频谱分布走势基本一致,主频为100 Hz,其他高次谐波成分占比基本一致;图8表明,随着电压等级升高,其主频明显增大,110 kV电压等级主频为100 Hz,占比为36.4%;220 kV与500 kV主频为200 Hz,占比分别为35.4%、35.8%。三者高频部分总占比分别为63.6%、85%、75.6%。可见,随着变压器电压等级升高,高频分量200~600 Hz的占比呈指数形式上升,并且随着电压等级的增大,可听声信号主频增大为200 Hz。

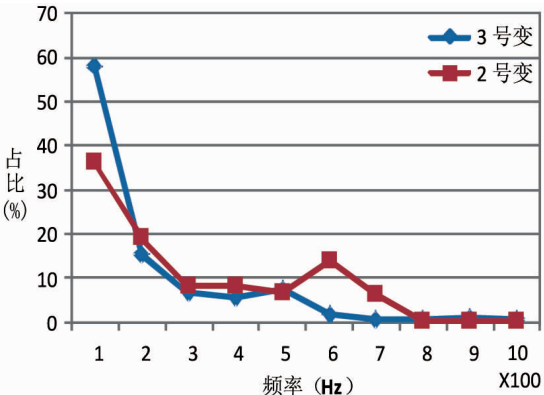


图8 相同电压等级下频谱占比曲线(2号、3号)

Fig. 8 The spectrum amplitude percent curve at the same voltage class(NO. 2, NO. 3)

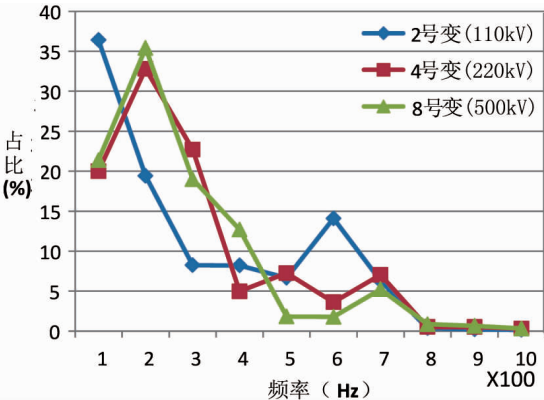


图9 不同电压等级下频谱占比曲线(2号、4号、8号)

Fig. 9 The spectrum amplitude percent curve at the different voltage classes(NO. 2, NO. 4, NO. 8)

据表4可知,相同电压等级的2号、3号小波能量谱最大特征值为 d_8 (100~200 Hz)频段;而不同电压等级下的2号、4号、8号小波能量谱最大特征值随电压等级升高而增大,4号、8号出现在 d_7 频段,即200~400 Hz,可见随电压等级升高,可听声信号主频增大、高次谐波占比增加,与频谱分布规律一致。由此可知,电压等级对变压器可听声频谱的

分布影响较大。

变压器铁心与绕组振动加速度均与额定电压的平方成正比,因此铁心、绕组振动发声也与电压的平方成正比,随着额定电压的升高,铁心振动越剧烈,从而导致振动可听声主频升高,高次谐波分量增大。

3.5 不同负载率的变压器可听声特征

所测变压器的负载率集中在40%~90%之间,现以2号、3号、4号、7号为例分析负载率对变压器可听声信号特征的影响,其负载率分别为43.75%、51.25%、60.33%、90.83%。这4台变压器频谱占比曲线如图10所示。

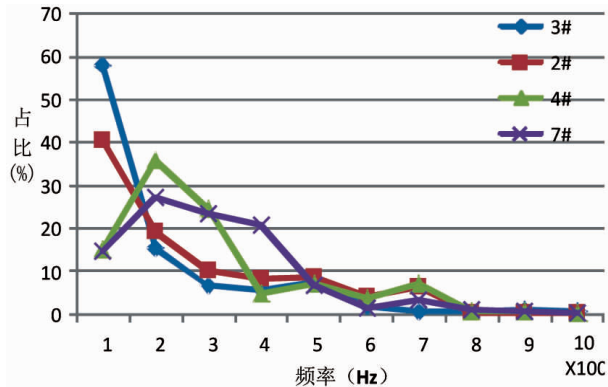


图10 不同负载率下频谱占比曲线(3号、2号、4号、7号)

Fig. 10 Spectrum amplitude percent at different load(NO. 3, NO. 2, NO. 4, NO. 7)

从图10可知,随着负载率的增大,可听声信号频谱中基频100 Hz的占比减小,200~500 Hz的占比明显增大,并且随着负载率的增大,4号、7号的主频升高为200 Hz。从小波能量特征值表4可知,负载率较低的3号、2号最大特征值出现在100~200 Hz频段,随负载率的升高,4号、7号的最大能量特征值出现在400~800 Hz,与频谱分布规律一致。

实际运行中负载率较高的变压器,其负载电流也较大,导致绕组振动更剧烈,进而使变压器振动频率高,使可听声频谱主频大于100 Hz。漏磁通分量也相应增加,使高次谐波分量占比变大。

3.6 不同采集位置变压器可听声特征

声音采集时分别从变压器两侧位置采集信号,通过两个通道(通道1、通道2)收集信号。这里以1号变与6号变为例进行详细分析,其他台次情况类似。各分量占比如表5所示,其频谱如图11所示。

表 5 6 号、1 号可听声频谱幅值占比百分数

Tab. 5 The audible acoustic signal spectrum amplitude ratio of transformer (NO. 1,NO. 6) %

频率/Hz	6 号		1 号	
	通道 1	通道 2	通道 1	通道 2
100	16. 1	7. 74	21. 4	10. 0
200	30. 1	25. 2	32. 1	16. 7
300	12. 9	4. 19	2. 67	3. 33
400	13. 3	5. 12	13. 4	8. 33
500	13. 4	39. 2	16. 0	20. 0
600	4. 30	3. 74	2. 67	36. 7
700	2. 15	3. 10	3. 21	1. 67
800	4. 30	3. 10	5. 35	2. 67
900	2. 15	3. 10	2. 67	0. 33
1 000	1. 08	1. 55	0. 535	0. 33

小波能量特征值如表 6 所示。

表 6 6 号、1 号可听声信号小波能量特征值

Tab. 6 The audible acoustic signal energy characteristic value(NO. 1,NO. 6)

		d_9	d_8	d_7	d_6	d_5
1 号	通道 1	0. 227	0. 543	0. 749	0. 295	0. 070
	通道 2	0. 058	0. 220	0. 212	0. 930	0. 195
6 号	通道 1	0. 210	0. 717	0. 564	0. 352	0. 023
	通道 2	0. 118	0. 660	0. 868	0. 070	0. 019

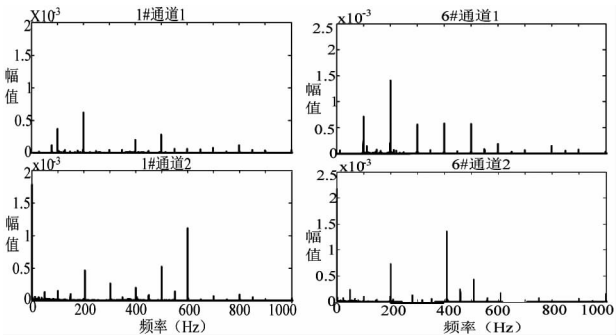


图 11 1 号、6 号通道 1、2 频谱图

Fig. 11 The spectrum from channel 1,2(NO. 1,NO. 6)

根据图 10 及表 5 可知,1 号变压器通道 1 采集到的信号主频为 200 Hz,占比为 30.1%;而通道 2 的信号主频为 600 Hz 占比高达 36.7%。从表 6 可知 1 号变压器通道 1 能量特征最大值出现在 d_8 (100 ~ 200 Hz) 频段,而通道 2 信号的能量特征最大值出现在 d_6 (400 ~ 800 Hz) 频段,即主频升高,与频谱分析结果一致。

根据图 10 及表 5 可知,6 号变压器两个位置采

集到的信号频谱差异也较大,通道 1 频谱主频为 200 Hz,且 200 ~ 500 Hz 成分丰富占比较大;而通道 2 的基频占比很小,主频为 400 Hz,其他频次占比较小。由表 6 可知,6 号变压器通道 1 的小波能量特征最大值出现在 d_8 (100 ~ 200 Hz) 频段,通道 2 信号的能量特征值最大在 d_7 (400 ~ 800 Hz) 频段,主频比通道 1 的高,与频谱分布一致。

综上所述,不同变压器的结构、外壳构造有区别,声音信号的传播路径多,如通过固体结构器件、绝缘油、空气等路径传播,不同的路径对可听声信号的影响复杂多变,导致不同方位采集到的信号频谱、能量分布有较大差异。因此实际测试时应根据实际情况选取合适的位置安装采集装置^[17-18]。

4 结论

通过分析变压器的发声机理,即铁心振动、绕组振动、箱体振动发声。理论分析得出铁心与绕组振动发声的基频为 100 Hz,并且存在 200 Hz、

300 Hz、400 Hz 等高次谐波成分。通过对某供电局若干变压器进行数据采集,运用快速傅里叶变换(FFT)以及小波分解算法,并按不同运行条件分类分析变压器可听声信号的频谱、能量分布规律,得到的结论如下:

(1)运行年限增加,变压器可听声信号高次谐波含量增大,小波分解的高频段能量特征值增大。

(2)电压等级高的变压器振动频率高,可听声信号频谱主频大于 100 Hz,并且高次谐波含量增大。小波分解的最大能量特征值出现在高频段。

(3)随变压器负载率的升高,可听声信号频谱高次谐波分量增大,负载率高到一定值后,主频增大为 200 Hz。小波分解能量特征值与频谱分布一致。

(4)可听声信号的采集位置对信号有较大影响,合适的采集位置利于正确判断变压器状态。实际检测中需要根据变压器结构等实际情况选取合适的采集位置。

参考文献:

- [1] 王梦云. 2004 年度 110 kV 及以上变压器事故统计分析[J]. 电力设备, 2005(11): 35-41.
WANG Mengyun. Statistics and analysis of 110 kV and the above transformer fault in 2004[J]. Electrical Equipment, 2005(11): 35-41.
- [2] 严莉, 王维建, 周东华. 变压器故障诊断的油色谱分析综述[J]. 控制工程, 2003, 10(6): 489-491.
YAN Li, WANG Weijian, ZHOU Donghua. A survey on oil chromatogram analysis for fault diagnosis of transformers[J]. Control Engineering of China, 2003, 10(6): 489-491.
- [3] 汲胜昌, 何义, 李彦明, 等. 电力变压器空载状况下的振动特性研究[J]. 高电压技术, 2001, 27(5): 47-48.
JI Shengchang, HE Yi, LI Yanming, et al. Study on the vibration of transformer under no load condition[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(5): 47-48.
- [4] 马宏忠, 弓杰伟, 李凯, 等. 基于 ANSYS Workbench 的变压器绕组松动分析及判定方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 192-199.
MA Hongzhong, GONG Jiewei, LI Kai, et al. Analysis and determination method for transformer winding looseness based on ANSYS workbench[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 192-199.
- [5] GARCLA B, BURSOS J. C., ALONSO A. M. Transformer tank vibration modeling as a method of detecting winding deformations-part I: theoretical foundation[J]. Electric Power Systems Research, 2005, 74: 129-138.
- [6] 梁国荣, 谷爱昱, 沈训欢. 基于噪声源估计的电机故障诊断研究[J]. 防爆电机, 2013, 48(04): 32-39.
- LIANG Guorong, Gu Aiyu, Shen Xunhuan. Research on motor fault diagnosis based on noise source estimation[J]. Explosion Proof Electric Machine, 2013, 48(04): 32-39.
- [7] 吴松. 基于声学特征的变压器故障诊断研究[D]. 湖北: 华中科技大学, 2012.
- [8] 潘亮亮, 赵书涛, 李宝树. 基于声波信号分析的电气设备故障诊断新方法[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(08): 87-90.
PAN Liangliang, ZHAO Shutao, LI Baoshu. Electrical equipment fault diagnosis based on acoustic wave signal analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(08): 87-90.
- [9] BARTOLETTI C, DESIDERIO M, DI CARLO D, et al. Vibro-acoustic techniques to diagnose power transformers[J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, 2004, 19(1): 221-229.
- [10] 潘庆庆, 赵书涛, 潘亮亮. 基于声波处理的变压器故障诊断与状态发展趋势预测[J]. 变压器, 2009, 46(2): 62-66.
PAN Qingqing, ZHAO Shutao. Transformer fault diagnosis and trend prediction based on acoustic processing[J]. Transformer. 2009, 46(2): 62-66.
- [11] 闫佳文. 基于声波分析的变压器状态监测系统[D]. 河北: 华北电力大学(保定), 2006.
- [12] AGUIAR P R, SERNI P J A, BIANCHI E C, et al. In-process grinding monitoring by acoustic emission: Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2004. Proceedings (ICASSP' 04). IEEE International Conference on, 2004[C]. 17-21 May 2004.
- [13] 符劲松. 基于可听声的变压器内部火花放电故障诊断研究[D]. 湖北: 华中科技大学, 2013.
- [14] 潘亮亮. 基于声波识别的变压器状态诊断系统开发[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
- [15] 杜一明. 基于声信号的变压器故障诊断系统研究[D]. 湖北: 华中科技大学, 2013.
- [16] 林爱弟. 变压器绕组振动特征提取及其状态识别方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [17] 靳斌, 刘波, 李俊文. 远程切换变压器有载分接开关装置研制[J]. 贵州电力技术, 2017(1): 31-32.
JIN Bin, LIU Bo, LI Junwen. Development of on-load tap-changer for remote switching transformer[J]. Guizhou Electric Power Technology, 2017(1): 31-32.
- [18] 李德波, 李冰阳, 刘耀云, 等. 电力变压器振动噪声的多物理场耦合分析[J]. 广东电力, 2017, 30(6): 115-119.
LI Debo, LI Bingyang, LIU Yaoyun, et al. Multi-physical Field Coupling Analysis on Vibration Noise of Power Transformer[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(6): 115-119.

收稿日期: 2017-11-28

作者简介:



马春雷(1965), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统技术研究与管理工作。

(本文责任编辑: 龙海丽)

Characteristic analysis of transformer audible acoustic signals

MA Chunlei¹, XIE Rongbin¹, ZHAO Lihua², LI Zhongping¹, XU Shurong²,

(1. Guiyang Power Supply Bureau, Guiyang 550001 Guizhou, China;

2. College of electrical and information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065 Sichuan, China)

Abstract: Transformer diagnostic technology based on vibration and audible sound has become a research hot topic by virtue of its advantages of no electrical connection with the monitored equipment, strong anti-interference ability and high sensitivity. In this paper, in order to analyze the characteristics of the audible acoustic signal of the transformer, the mechanism of the audible audible generation of the transformer is analyzed theoretically. The fast Fourier transform and wavelet decomposition method are used to analyze the audible acoustic signals of transformers under different operating periods, different voltage levels, different acquisition positions and different load rates. The frequency spectral and wavelet energy eigenvectors of the signals are obtained. The results show that the main frequency of the audible signal is 100 Hz, and there are 200 Hz, 300 Hz and other high Sub-harmonic components; but with the increase of transformer operating life and voltage level, the main frequency increased to 200 Hz, the high Sub-harmonic ratio and high-frequency energy characteristic value increased; The signal spectrum and energy characteristic value are affected by the acquisition position, and the appropriate collection position should be selected according to the actual situation of the transformer structure.

Key words: transformer; audible acoustic signals; spectrum; energy spectrum