

# 变压器振动特性频域分析与检测

王 钢<sup>1</sup>,陈晓寒<sup>2</sup>,石 磊<sup>3</sup>

(1.国网四川省电力公司成都供电公司,四川 成都 610041;2.四川东祥工程项目管理有限公司,四川 成都 610041;  
3.国网四川省电力公司内江供电公司,四川 内江 641100)

**摘 要:**变压器振动信号是评估其工作状态的重要参数之一,与绕组松动或变形等隐患密切相关。为揭示变压器振动信号的变化趋势,文中对40台110 kV变压器进行振动数据采集,通过傅里叶变换方法对其进行频域分析,采用基于决策树ID3算法计算增益熵对不同故障下振动特性进行分类,根据振动特性区分变压器厂家和振动采样位置,该措施为变压器绕组运行状态的振动监测技术提供重要参考。

**关键词:**变压器振动;频域分析;采样位置;检测技术

**中图分类号:**TM 41   **文献标志码:**B   **文章编号:**1006-348X(2025)04-0034-05

## 0 引言

变压器是电力系统的重要纽带,被誉为电力系统的“心脏”,它具有电压转换的关键功能,并负责电能的分配。若其发生故障,将严重威胁电网的安全运行,造成巨大的社会经济损失,甚至对人员造成伤害。据统计,绕组变形或松动一直是变压器占比最高的故障,且故障率居高不下<sup>[1-2]</sup>;同时,老旧变压器数量的增长给电网安全稳定运行带来了较多的不确定因素。因此,主动推进变压器的状态监测工作,及时发现潜在的隐患,对提升变压器运维的精细化水平,助推“碳达峰、碳中和”战略意义重大。

振动信号是极易从运行中变压器获取的信息之一,其与绕组和铁心的机械状态密切相关。相关学者已经意识到振动信号在变压器运行状态监测中的重要性,并从变压器振动特性的理论计算<sup>[3-5]</sup>、变压器振动信号的特征提取<sup>[6-11]</sup>、基于数据驱动的变压器振动分析模型的构建及应用<sup>[12-15]</sup>等诸多方面、多个角度进行了相关研究。

文中针对在四川运行的18台220 kV变压器、22台110 kV变压器开展了振动测量,并结合振动采集数据进行分析。测量的变压器来自17个不同厂家,

操作依照《油浸式交流电抗器(变压器)运行振动测量方法》(DL/T 1540—2016)<sup>[15]</sup>进行。

数据分析方法包括时域、频域分析,采用基于迭代二叉树3代(iterative dichotomiser 3, ID3)算法进行分类。ID3是一种经典的机器学习算法,用于分类处理,这个算法的基本思想是通过递归将数据集划分成小的子集,然后在每个子集上应用一定的条件来构建决策树。在决策树构建过程中, ID3算法使用信息增益来选择最佳的划分特征。信息增益就是通过某个特征对数据集进行划分,随着获得的信息量的增加,选择信息增益最大的特征作为划分特征。

在现有的研究中,已有大量文献论述了振动分析法对检测铁芯或绕组等内部机械故障检测的有效性<sup>[16-17]</sup>,分析方式包括使用经验模态分解<sup>[18]</sup>、向量机<sup>[19]</sup>等。文中采用决策树方式进行分析,不仅可以实现分类,还可以实现对不同影响因子的分离和排序。

## 1 分析方式

将加速度传感器放置在设备测量点上,进行周期为3 s的加速度数据测量,采样率为20 000次/秒。监测点分为四个面,在每个的面上部、下部分别设置监

收稿日期:2024-12-20

作者简介:王钢(1983),男,本科,工程师,高级技师,主要从事电气试验相关工作。

测点,如图1所示。



图1 箱子端面采样点

### 1.1 时域分析

将每个测试点的测试结果按时间绘制成时域图,确保数据无因传感器、放置方式、干扰等问题导致的明显错误。此次某台变压器其中一个监测点的测试数据时域图如图2左侧所示,右侧图为放大波形图,每10 ms内有200个采样点。

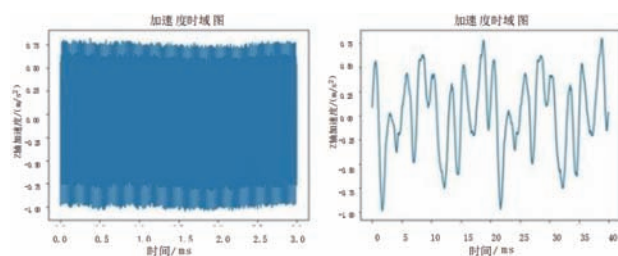


图2 主变端子箱背面6号监测点时域图

由于加速度传感器本身存在固有误差,在对监测点的相对位移进行基于加速度信号的积分运算过程中,随着采样持续进行,误差会通过积分操作不断累积,其累积量将随时间推移呈现逐渐增大的趋势。因此可按100Hz计算,变压器每10 ms会完成一个振动周期,相对位移会回到原点。通过这种方法,计算出校正后的相对位移。图3为一个监测点的相对位移随时间变化的波形图。

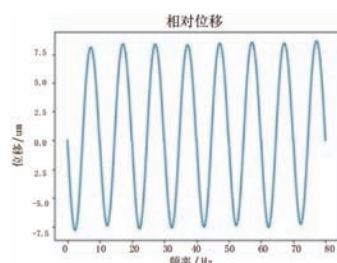


图3 主变端子箱背面6号监测点相对位移波形图

### 1.2 频域分析和过滤

根据《油浸式交流电抗器(变压器)运行振动测量

方法》(DL/T 1540—2016)要求,传感器的振动频率响应范围应为50~3 000 Hz。因此,在进行频谱分析时,截取的频率上限也为3 000 Hz。在加速度信号的频域分析中,频率越高表示振动发生得越快,而在同等幅值情况下,能量随频率增加而减小。根据图4频谱分析图和能量分布图可明显看到频率越高,加速度越小,能量越小。因此,后续频谱分析仅截取50~1 000 Hz的频率,以方便观察。

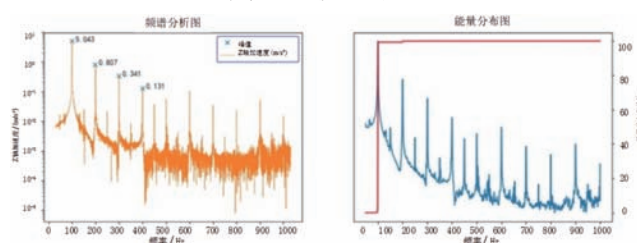


图4 主变端子箱背面6号监测点频域分析图

测量结果表明,变压器的振动主要以100 Hz为基波的多频率波组成。频谱分析时,使用了快速傅里叶变换,且未使用加窗函数,因此在主要分量附近会有较大的频谱泄漏;图5为一台主变端子箱背面2号监测点的时频图,可以看出100 Hz附近频谱泄漏较为明显。

由图5可见,时间变化不大(横向观察变化不大),纵向变化与图4所示能量分布曲线一致。200 Hz是振动强度最大的分量,其次是100 Hz、300 Hz。因此,变压器振动频率特性不随时间变化,对其进行分析意义不大,后续仅对频谱进行分析。

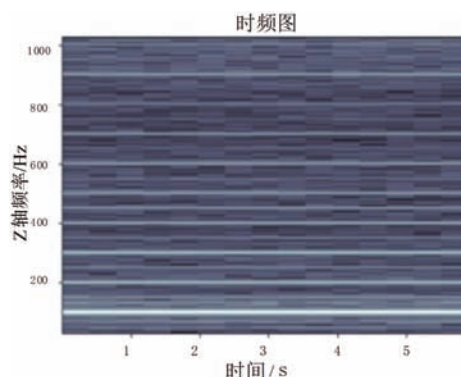


图5 主变端子箱背面2号监测点时频图

由图4可知,大部分背景噪声幅值在 $10^{-2} \text{ m/s}^2$ 及以下,而振动数据的主要频率分量是以100 Hz为基波的高次谐波。为进一步提高信噪比,使数据处理更加清晰,仅保留1 000 Hz及以下的、以50 Hz为基数的高次谐波分量幅值数据,每个监测点可得到在50 Hz~1000

Hz 的 21 个频率点的数据,频率点的幅值数据转换为分贝表示,具体转换公式为: $L=20\log_{10}(x)$ 。

### 1.3 单台变压器的振动特性分析

根据时域和频域数据,进行单台设备的振动特性分析。分析参数包括:最大位移(峰-峰值)、波形畸变率、奇偶谐波能量比。

最大位移(峰-峰值)是指在振动信号中,振动的最大振幅,即信号的最高点与最低点之间的距离。在时域数据中,可以直接通过观察振动信号的波形来测量;在频域数据中,可以通过傅里叶变换将时域信号转换为频谱,然后找到频谱中振幅最大的成分来确定最大位移(峰-峰值)。

波形畸变率是用来描述振动信号波形非正弦度的参数。正常情况下,振动信号应该是正弦或近似正弦的,但在实际情况中,由于各种因素的影响(如故障、摩擦等),振动信号的波形会发生畸变。波形畸变率可以通过比较振动信号的实际波形与理想正弦波形的相似度来计算。通常使用峰均比或峰因数来表示波形畸变率。波形畸变率公式为:

$$\text{波形畸变率} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{30} E_n^2}{E_1}} \quad (1)$$

式中: $E_n$ 是 $n$ 次谐波的能量,基波为 100 Hz,即 $E_1$ 为 100 Hz 振动能量值。

奇偶谐波能量比是用来描述振动信号中奇数谐波与偶数谐波的能量比值。正常情况下,振动信号中应该是主要由基波(即频率等于振动源的频率)组成的,而谐波则是基波的整数倍频率的成分。奇偶谐波能量比的大小可以反映振动信号的非线性程度。通常情况下,偶数谐波比奇数谐波更容易受到非线性因素的影响。因此,奇偶谐波能量比的值大于 1 时表示信号存在非线性特性。

奇偶谐波能量比公式如式(2),该能量能反应直流偏磁<sup>[20]</sup>:

$$\text{奇偶谐波能量比} = \log_{10} \frac{\sum_{i=1}^{15} E_{2i-1}}{\sum_{i=1}^{15} E_{2i}} \quad (2)$$

其中:涉及能量的部分是通过加速度积分一个 10 ms 周期,根据动能公式 $E=1/2 mv^2$ ,计算出不同频率下的能量比率(如图 4 右图红色线,显示能量分布情况)。

通过分析最大位移(峰-峰值)、波形畸变率和奇

偶谐波能量比等参数,可以帮助了解单台设备的振动特性,从而进行故障诊断、性能评估工作。

所有监测点的奇偶谐波能量比与波形畸变率成负相关特性,但与变压器的生产厂家关联度不大。图 6 为不同变压器制造厂商生产的变压器的波形畸变率与奇偶谐波能量比变化图。

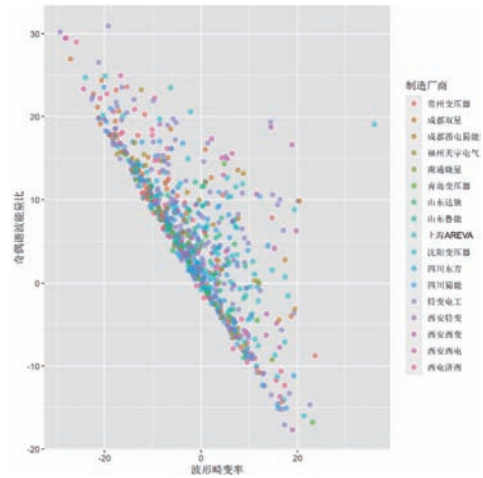


图 6 波形畸变率与奇偶谐波能量比变化图

## 2 基于机器学习的关联性分析

### 2.1 决策树 ID3

采用决策树 ID3 算法,该算法是 Quinlan 于 1986 年提出的<sup>[21]</sup>,其具体方法是:检测所有信息属性,选择信息增益最大的属性产生决策树结点,由该属性的不同取值建立分支,再对各分支的子集递归调用该方法建立决策树节点和分支,直到某一子集中的所有信息属于同一类<sup>[22]</sup>。

信息增益的计算方法为:

将 $s$ 个样本数据集合为一个 $S$ ,取 $m$ 个不同的值对应 $m$ 个 $C_i, i \in \{1, 2, \dots, m\}$ 。以 $S_i$ 为样本数据 $C_i$ 中的样本个数,对给定数据对象进行分类所需要的信息量为:

$$I(s_1, s_2, \dots, s_m) = \sum_{i=1}^m -p_i \log_{10}(p_i) \quad (3)$$

式中: $p_i$ 为任意样本属于类别 $C_i$ 的概率。

由 $A$ 划分为子集的熵:

$$E(A) = \sum_{j=1}^v \frac{S_{1j} + S_{2j} + \dots + S_{mj}}{S} I(S_{1j}, S_{2j}, \dots, S_{mj}) = - \sum_{j=1}^v \sum_{i=1}^m \frac{S_{ij} + S_{2j} + \dots + S_{mj}}{S} p_{ij} \log_{10}(p_{ij}) \quad (4)$$

式中: $p_{ij}$ 即为子集 $S_j$ 中任一数据样本属于类别 $C_i$ 的

概率。

信息增益:这样利用属性A对当前分支结点进行相应样本集合划分所获得的信息增益是:

$$\text{gain}(A) = I(s_1, s_2, \dots, s_m) - E(A) \quad (5)$$

采用决策树ID3算法进行频域数据与设备参数的关联性分析,找到可以最大程度上区分各生产厂家变压器振动特性的两个频率分量。频率为300 Hz和400 Hz时,可以最大程度做出区分,如图7所示。

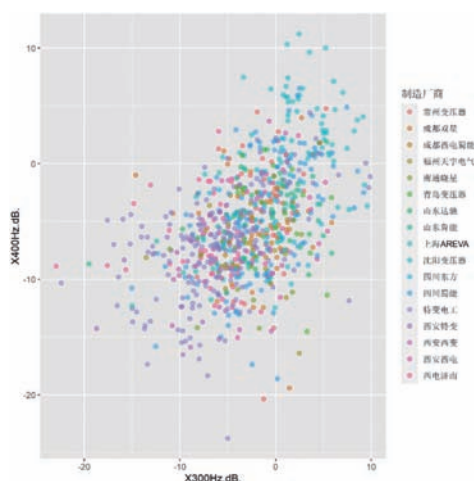


图7 不同制造厂商变压器振动的关联性图

变压器振动特性与上部、下部采集位置有显著关联。振动特性主要集中在频率为100 Hz、300 Hz处,如图8所示。

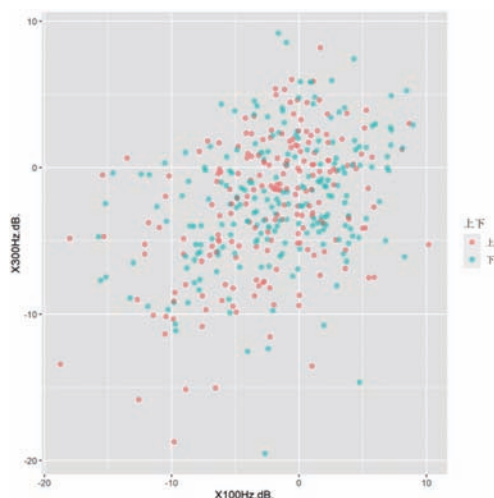


图8 变压器振动特性与设备监测点分布关系图

## 2.2 频率分析

本次数据采集涉及上百个监测点位置、17个生产厂家、不同设备型号和监测点位置等信息。

本次对每台变压器分别完成了16-28个监测点的测量,共计816个监测数据。

本次对40台变压器的振动测试数据进行分析后,发现频域主要分量集中在100 Hz、200 Hz、300 Hz和400 Hz处。此外,变压器的振动特性与设备型号也有一定的关联性,图9为变压器振动特性与设备型号关系图。

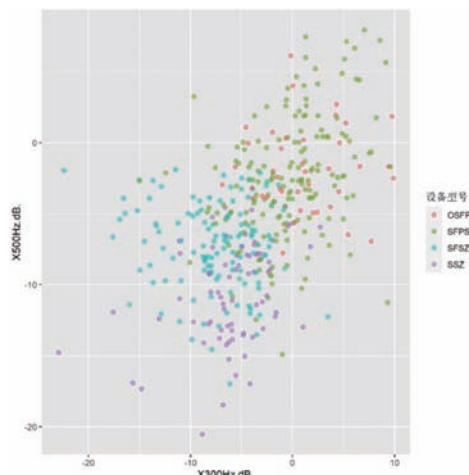


图9 变压器振动特性与设备型号关系图

本次监测发现不同电压等级的变电站振动特性在50 Hz和800 Hz频率分量下有着不同的表现,图10为不同电压等级变电站设备的振动特性。

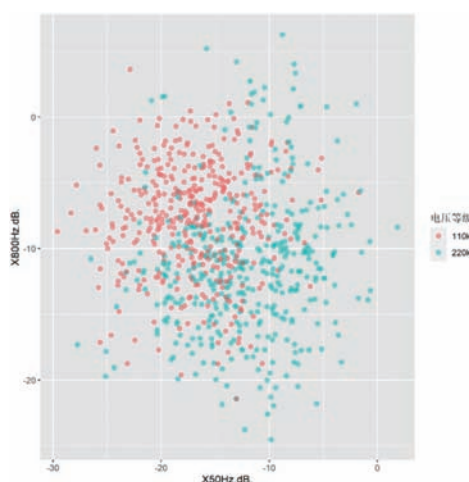


图10 不同类型变电站设备的振动特性图

针对50 Hz和800 Hz两个频率分量,不同电压等级变压器的振动特性有着较为明显的区别。

## 3 结语

根据《国家电网公司变电检测管理规定(试行)第11分册 机械振动检测细则》<sup>[23]</sup>要求,油箱壁振动优良值不大于60 μm(峰-峰值),最大值不超过100 μm

(峰-峰值), 油箱底部不超过  $30\text{ }\mu\text{m}$  (峰-峰值)。

1) 在监测的 40 台变压器共计 816 个监测点中, 最大值全部小于优良值上限的  $60\text{ }\mu\text{m}$ , 振动检测中, 所有变压器机械振动特性符合标准要求。

2) 监测发现, 不同电压等级的变压器振动特性在 50 Hz 和 800 Hz 频率分量下, 有着较为明显的区别。

3) 测试时所有设备均为运行状态, 但运行的负载没有在决策树模型中反映。变压器振动强度与负载率有关, 在以后的机器学习计算中, 可以将负载因素加入到决策树模型构建和计算中, 以提高模型的有效性。

## 参考文献:

- [1] 罗竣匀, 刘君, 胡晓, 等. 基于有限元的电力变压器抗短路能力校核方法研究[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(02): 78-87.
- [2] 钱国超, 王丰华, 王劭菁, 等. 大型变压器绕组振动频响特性的试验研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(03): 821-826.
- [3] 王丰华, 杨毅, 何苗忠, 等. 应用有限元法分析变压器绕组固有振动特性[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(04): 51-57.
- [4] 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(09): 2555-2562.
- [5] 杨贤, 王丰华, 何苗忠, 等. 基于 PSCAD-ANSYS 的变压器绕组振动特性仿真研究[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(11): 51-56.
- [6] 陈沛龙, 刘君, 马晓红, 等. 基于振动信号统计特性的变压器绕组状态监测[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(09): 74-80.
- [7] 李中, 宋天慧, 郭通, 等. 不同负载电流下变压器表面三维振动信号特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 29-34.
- [8] 赵莉华, 张振东, 张建功, 等. 运行工况波动下基于振动信号的变压器故障诊断方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3925-3933.
- [9] 周宇, 马宏忠, 李凯, 等. 基于相空间重构的大型变压器绕组松动的振动特征识别[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(12): 169-175.
- [10] K.Hong, M.Jin, H.Huang. Transformer winding fault diagnosis using vibration image and deep learning[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, pp(99): 1-1.
- [11] Y.Shi, S.Ji, F.Zhang, et al. Application of Operating Deflection Shapes to the Vibration-Based Mechanical Condition Monitoring of Power Transformer Windings[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(04): 2164-2173.
- [12] B. Garcia, J. C. Burgos, A. M. Alons, Transformer tank vibration modeling as a method of detecting winding deformations-part I: theoretical foundation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 21(01): 157-163.
- [13] 张凡, 汲胜昌, 师愉航, 等. 电力变压器绕组振动及传播特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(09): 2790-2798, 2849.
- [14] 李中, 张卫华, 孙娜, 等. 基于广义回归神经网络的变压器表面振动基频幅值计算[J]. 高电压技术, 2017, 43(07): 2287-2293.
- [15] 国家能源局. 油浸式交流电抗器(变压器)运行振动测量方法: DL/T 1540—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [16] 周利军, 周祥宇, 吴振宇, 等. 变压器绕组振荡波建模及轴向移位故障分析[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(03): 157-163, 188.
- [17] 周利军, 周猛, 李沃阳, 等. 基于振荡波多特征融合的变压器绕组故障诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(12): 191-196, 203.
- [18] 谢荣斌, 张丽娟, 靳斌, 等. 基于经验模态分解的变压器振动信号盲源分离[J]. 广东电力, 2018, 31(02): 119-124.
- [19] 臧旭, 张甜瑾, 邵心悦, 等. 基于时变滤波经验模态分解和 SSA-LSSVM 的变压器内部机械故障诊断方法[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(09): 49-56.
- [20] 何良, 吴天宝, 李荣, 等. 直流偏磁对 500 kV 变压器振动特性的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(02): 133-138.
- [21] Quinlan J R. Induction of decision trees[J]. Machine Learning, 1986, 1(01): 81-106.
- [22] 张凤莲, 林健良. 新的决策树构造方法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(10): 141-143.
- [23] 国家电网公司. 国家电网公司变电检测管理规定(试行)第 11 分册 机械振动检测细则 [Z]. 2017.