

# 变压器绕组频响指纹的特征差异指数分析法

刘有为, 高克利, 许渊

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

## Feature Difference Index Analysis on Frequency Response Fingerprint of Transformer Windings

LIU Youwei, GAO Keli, XU Yuan

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** Frequency response analysis is an important method to detect transformer winding deformation. Experienced professionals can judge the winding deformation accurately by analyzing feature differences of transformer winding frequency response fingerprint. Based on main points of experience, a new method to quantitatively analyze feature differences of frequency response fingerprint is proposed. Firstly, the amplitude difference is represented by amplitude difference index and the frequency difference is represented by frequency difference index; secondly, the feature difference indices are calculated by amplitude difference index and frequency difference index respectively; finally, transformer winding deformation can be judged through the feature difference indices. Verification results of more than 500 sets of diagnostic data show that the proposed method is evidently better than existing quantitative analysis method, and high judging accuracy can be attained.

**KEY WORDS:** winding deformation; frequency response fingerprint; feature points; difference index

**摘要:** 频率响应分析法是诊断电力变压器绕组变形的重要方法, 通过对频率响应指纹特征差异的分析可以较准确地判断绕组变形。根据经验分析的要点, 提出了一种频率响应指纹特征差异量化分析方法。首先用幅值差异系数表征频率响应指纹特征点的幅值变化、用频率差异系数表征频率响应指纹特征点的频率变化, 然后根据幅值差异系数和频率差异系数计算频率响应指纹间的特征差异指数, 最后依据特征差异指数的大小判断绕组是否变形。经 500 多组数据验证, 该方法优于已有的量化分析法, 具有较高的判断准确率。

**关键词:** 绕组变形; 频率响应指纹; 特征点; 差异系数

## 0 引言

变压器是电力系统输变电的关键设备, 其安全稳定运行对保障电力系统的可靠性具有重要意义。变压器在遭受近区突发短路后, 绕组可能发生形变<sup>[1-5]</sup>,

需做绕组变形试验, 判断变压器无故障后方可投运<sup>[6]</sup>。用频率响应分析法检测变压器绕组变形具有灵敏度高、现场使用方便等优点, 在电力行业得到了普遍应用<sup>[7-9]</sup>。但长期以来, 用频率响应分析法诊断变压器绕组变形还主要建立在通过经验比较频响指纹的基础上, 缺乏深层次的数据分析手段<sup>[10]</sup>。

绕组的一端施加频率可变的正弦波电压  $U_1$ , 绕组的另一端串接电阻后接地, 在电压源的激励下电阻上会产生电压  $U_2$ 。把  $H(f) = 20\ln(U_2/U_1)$  随频率(通常为 1 kHz~1 MHz)变化的曲线称为频率响应指纹(简称频响指纹)。频响指纹是频率响应分析法判断绕组变形的依据, 目前频响指纹的分析方法主要有 3 种: 1) 经验判断法; 2) 相关系数法; 3) 差值法。3 种方法都是通过分析频响指纹间的差异判断绕组变形。

经验判断法是变压器专业人员依据以往经验, 根据频响指纹极值点频率和幅值的变化判断绕组是否变形的方<sup>[11-12]</sup>。对于经验丰富的专业人员, 能够较准确地判断出绕组是否变形。但这种纯经验方法存在明显的不足: 1) 对分析人员的经验要求较高, 没有经验或者经验不足便难以胜任; 2) 由于经验的分散性和不确定性, 很难规范和推广, 不同的分析人员可能得出不同的分析结论, 给检修决策带来一定困难。

相关系数法通过 2 个频响指纹数据序列的相关系数判断绕组是否变形, 相关系数  $R_{xy}$  的计算公式<sup>[13]</sup>为

$$R_{xy} = \begin{cases} 10, & 1 - \sigma_{xy} < 10^{-10} \\ -\lg(1 - \sigma_{xy}), & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\sigma_{xy}$  为 2 个序列的归一化协方差。

差值法则是通过计算 2 个数据序列的差值判断

绕组是否发生变形。其中差值的计算公式<sup>[14]</sup>为

$$E_{12} = \sqrt{\frac{(U_{11} - U_{21})^2 + (U_{12} - U_{22})^2 + \dots + (U_{1n} - U_{2n})^2}{n}} \quad (2)$$

式中： $E_{12}$  为 2 个频响指纹数据序列之间差值； $n$  为采样点数； $U_{1n}$ 、 $U_{2n}$  为 2 个序列在第  $n$  点处的幅值。

与经验判断不同，相关系数法和差值法是频响指纹的量化分析方法，用某个量化值表征频响指纹间的差异，并根据该量化值的大小判断绕组是否变形，具有无需经验、诊断结果唯一的优点。但在工程应用中，这 2 种方法的认可度都不高，主要原因是：1) 判断准确率低；2) 不能准确反映频响指纹极值点频率和幅值的具体变化。

## 1 指纹特征差异的量化分析

### 1.1 指纹特征及特征点

频响指纹的指纹特征是由全部有效极值点的幅值及频率共同表征。所谓有效极值点是指略去干扰、噪声等影响之后的极值点，为叙述方便简称特征点。变压器绕组发生变形后，其频响指纹的指纹特征将发生变化，对特征点频率和幅值变化的分析是经验判断绕组变形的要点，因此可依据将待诊断绕组的频响指纹与其原始频响指纹(绕组没有发生变形时的频响指纹，如出厂试验的频响指纹)进行特征差异性分析，来判断绕组是否变形，如果没有原始频响指纹，也可用其他状态良好的同型号变压器同电压侧、同相别绕组的频响指纹代替。

量化分析时，把相邻幅值变化很小的极值点视为噪声或干扰。如图 1 所示，若极值点  $a$  与相邻的下一个极值点  $b$  之间的幅值差  $\Delta R$  大于  $0.01R$  ( $R$  为该条频响指纹最大值与最小值之差)，则极值点  $a$  是有效极值点，即特征点；否则  $a$  和  $b$  都略去不计，然后再从  $b$  之后与  $b$  相邻的下一个极值点重复前面的判断。以此原则从低频到高频依次分析所有的极值点，从而遴选出所有特征点。

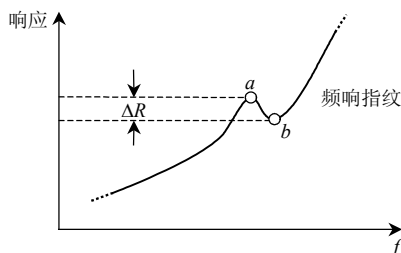


图 1 特征点的判断

Fig. 1 Choice of feature points

### 1.2 幅值差异的量化分析

指纹特征的幅值差异由原始频响指纹特征点

的幅值差异系数表征。设待诊断绕组频响指纹为  $Y$ ，其原始频响指纹为  $X$ ， $X$  上共有 1、2、3、...、 $k$  个特征点，2 条频响指纹  $X$ 、 $Y$  中最大值与最小值的差为  $d$  (见图 2)。设  $X$  上与第  $i$  个特征点  $X_i$  前后相邻的两个特征点分别为  $X_{i-1}$  和  $X_{i+1}$  (见图 3)，对应的频率为  $f_{i-1}$  和  $f_{i+1}$ ，区间  $(f_{i-1}, f_{i+1})$  内 2 个频响指纹间的面积为  $s_i$ ，则  $s_i$  与  $d$  比值的平方根即为特征点  $X_i$  与频响指纹  $Y$  的幅值差异系数，用  $\hat{S}_i$  表示，计算公式为

$$\hat{S}_i = \sqrt{s_i / d} \quad (3)$$

其中

$$s_i = \int_{f_{i-1}}^{f_{i+1}} |x(f) - y(f)| df \quad (4)$$

式中： $x(f)$  表示  $X$  的曲线函数； $y(f)$  表示  $Y$  的曲线函数； $f$  为频率。实际计算时，可根据区间  $(f_{i-1}, f_{i+1})$  内  $X$  与  $Y$  的原始离散数据序列对 2 个频响指纹间的面积进行梯形分割，然后通过计算分割后所有梯形的面积求  $s_i$ 。

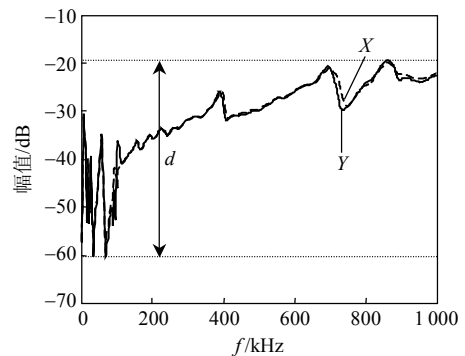


图 2  $d$  值示意图

Fig. 2 Diagram of parameter  $d$

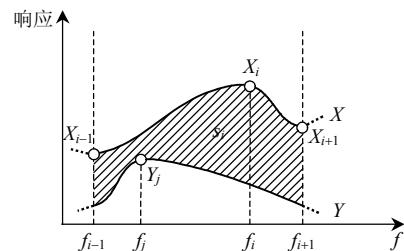


图 3 特征差异量化分析

Fig. 3 Quantitative analysis for feature difference

### 1.3 频率差异的量化分析

指纹特征的频率差异由原始频响指纹特征点的频率差异系数表征。如图 3 所示，若在区间  $(f_{i-1}, f_{i+1})$  内，待诊断绕组频响指纹  $Y$  上只有 1 个与  $X_i$  同类(同为极大值点或同为极小值点)的特征点  $Y_j$ ，其对应的频率为  $f_j$ ，则特征点  $X_i$  与频响指纹  $Y$  的频率差异系数  $K_i$  为

$$K_i = \begin{cases} \frac{f_i - f_j}{f_i - f_{i-1}}, & f_j < f_i \\ 0, & f_j = f_i \\ \frac{f_j - f_i}{f_{i+1} - f_i}, & f_j > f_i \end{cases} \quad (5)$$

式中  $f_i$  为特征点  $X_i$  的频率。

若在区间  $(f_{i-1}, f_{i+1}]$  内，待诊断绕组频响指纹  $Y$  上与  $X_i$  同类的特征点不止 1 个(见图 4(a))或不存在与  $X_i$  同类的特征点(见图 4(b))，则特征点  $X_i$  与频响指纹  $Y$  的频率差异系数  $K_i = 1$ 。

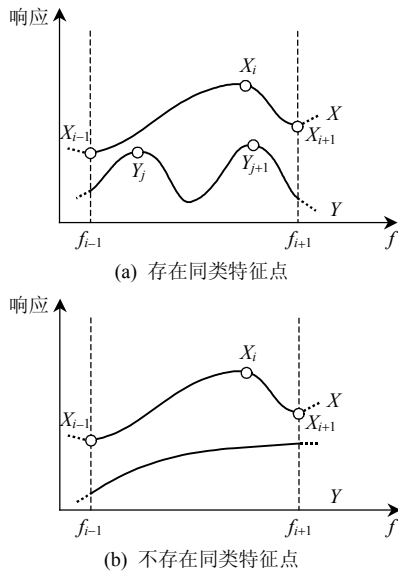


图 4 频率差异量化分析

Fig. 4 Quantitative analysis for frequency difference

### 1.4 特征差异指数

原始频响指纹  $X$  与待诊断绕组频响指纹  $Y$  总的特征差异由特征差异指数表征。以 1.2 节中待诊断绕组频响指纹  $Y$  及其原始频响指纹  $X$  为例，特征差异指数  $T$  的计算公式为

$$T = \sum_{i=1}^k t_X(i) \quad (6)$$

其中

$$t_X(i) = \begin{cases} K_i \hat{S}_i, & f_i \in (1 \text{ kHz}, 600 \text{ kHz}] \\ 0.3K_i \hat{S}_i, & f_i \in (600 \text{ kHz}, 1000 \text{ kHz}] \end{cases} \quad (7)$$

式中  $t_X(i)$  为中间变量，其大小取决于原始频响指纹  $X$  上第  $i$  个特征点  $X_i$  的幅值差异系数  $\hat{S}_i$ 、频率差异系数  $K_i$  以及  $X_i$  所在频率  $f_i$ 。

## 2 诊断标准及诊断程序

### 2.1 诊断标准

若待诊断绕组频响指纹与其原始频响指纹间的特征差异指数  $T < 9$ ，则待诊断绕组可诊断为“基

本正常” (变形可能性较小); 若  $9 \leq T \leq 12$ ，则待诊断绕组可诊断为“注意” (绕组可能变形或轻微变形须引起注意); 若  $T > 12$ ，则待诊断绕组可诊断为“明显变形” (绕组很可能变形)，如表 1 所示。

表 1 绕组变形的诊断标准

Tab. 1 The diagnosis criterion

绕组状态	特征差异指数 $T$
基本正常	$< 9$
注意	9-12
明显变形	$> 12$

### 2.2 诊断程序

根据频响指纹特征差异指数判断绕组变形的诊断程序为：

1) 同电压侧 A、B、C 3 相绕组频响指纹互比，若特征差异指数  $T$  均小于 9，则 A、B、C 3 相绕组一般没有变形，若需确认此诊断或并非所有特征差异指数  $T$  均小于 9，则进行 2) 项。

2) 将待诊断绕组频响指纹与其原始频响指纹进行比较，根据表 1 给出的判据判断绕组是否变形；若需确认此诊断或无原始频响指纹时，进行 3) 项。

3) 将待诊断绕组频响指纹与状态良好的同型号变压器同电压侧、同相别绕组的频响指纹比较，根据表 1 给出的判据判断绕组是否变形。

另外结合变压器的具体运行情况和其他试验结果可使结论的可信度更高。

## 3 方法验证

### 3.1 $T$ 值的分布

选取 456 组未变形绕组频响指纹和 61 组变形绕组频响指纹对新方法的应用效果进行验证。首先分析特征差异指数数值的分布情况，如图 5 所示。

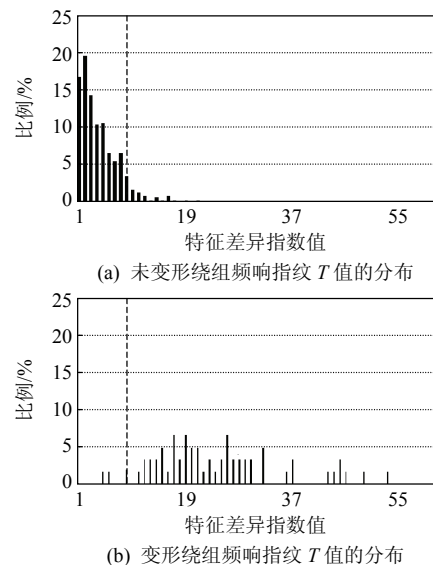


图 5  $T$  值的分布

Fig. 5 Distribution of parameter  $T$

由图5可知,未变形绕组频响指纹的 $T$ 值基本都在9以下,而变形绕组频响指纹的 $T$ 值基本都在9以上,两者在分布上存在明显不同,因此通过特征差异指数 $T$ 可将未变形绕组和变形绕组区分开。

### 3.2 与已有方法的比较

分别用经验判断、相关系数法、差值法和特征差异指数对50组较难判断的频响指纹进行分析,评价各种方法的判断准确率,评价原则及分析结果见表2、3,其中经验判断采用了3名多年从事绕组变形诊断工作的专家的分析结果。

表2 对判断结果的评价原则  
Tab.2 Evaluation for diagnosis

实际情况	诊断结果	评分
无变形	无变形	100
无变形	轻度变形	0
无变形	明显变形	0
轻度变形	无变形	20
轻度变形	轻度变形	100
轻度变形	明显变形	50
明显变形	无变形	0
明显变形	轻度变形	40
明显变形	明显变形	100

表3 各种方法诊断准确率的比较  
Tab.3 The comparison of accurate rate for several methods

诊断方法	准确率/%
专家1	72.0
专家2	66.8
专家3	81.2
相关系数法	70.2
差值法	69.4
新方法	86.8

根据表3,对于50组较难判断的频响指纹,新方法要明显优于已有方法。

将新方法同同类量化分析方法作进一步比较。依照表2的评价原则分别用相关系数法、差值法和特征差异指数对3.1节中的456组未变形绕组频响指纹和61组变形绕组频响指纹进行分析,比较3种量化分析法的判断准确率,分析结果见表4、5。

表4 456组未变形绕组频响指纹分析结果  
Tab.4 The accuracy of 456 sets normal windings

分析方法	相关系数法/%
准确率	57.5
差值法	97.4
特征差异指数	93.4

表5 61组变形绕组频响指纹分析结果  
Tab.5 The accuracy of 61 sets deformed windings

分析方法	相关系数法/%
准确率	82.0
差值法	50.8
特征差异指数	90.0

根据表4、5,新方法对未变形绕组和变形绕组的判断准确率均达到了90%,明显优于相关系数法的82.0%和57.5%。

表4中,虽然差值法对456组未变形频响指纹的判断准确率达到97.4%,高于新方法的93.4%,但表5中差值法对61组变形频响指纹的判断准确率仅为50.8%,远低于新方法的90%。为使这2种方法具有可比性,调整新方法的诊断判据,使新方法对456组未变形频响指纹的判断准确率达到98%,同时计算其对61组变形频响指纹的判断准确率,发现仍可达到84%以上,远高于差值法的50.8%,由此可见新方法明显优于差值法。

## 4 应用实例

某站主变因重瓦斯动作停运,变压器的型号为SF7-31500/110,进行故障检测试验后发现高压B相短路阻抗值和直流电阻值超标,油色谱分析显示变压器内部有放电发生。怀疑高压B相绕组可能发生变形,应用频率响应分析法诊断绕组变形<sup>[15]</sup>。检测高压侧A、B、C3相绕组的频响指纹,分别将A、C相频响指纹设为原始指纹、B相频响指纹设为待诊断频响指纹,计算特征差异指数,其中BA相为18.4、BC相为14.5,依照诊断程序,此时应将各相频响指纹与其原始频响指纹进行比较并计算特征差异指数如表6所示。

表6 某主变绕组特征差异指数  
Tab.6 Features difference index of windings

绕组	特征差异指数 $T$
A相	5.4
B相	16.5
C相	3.6

结合2.1节中的诊断标准,诊断结论为高压B相绕组发生变形,高压A相、高压C相绕组没有变形。对该主变调罩检查后发现高压B相绕组自下数第6饼线圈发生匝间短路,致使1匝线圈断股并散开,绕组发生变形,高压A相、高压C相绕组正常,与诊断结论一致。

## 5 结论

本文基于频响指纹经验分析的要点,提出了一种绕组频响指纹量化分析的新方法,通过计算绕组频响指纹间的特征差异指数判断绕组是否变形。经500多组数据验证,新方法明显优于已有量化分析法。

## 参考文献

- [1] 许渊. 变压器绕组频率响应特征及诊断技术的研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2009.
- [2] 程养春, 李成榕, 王伟. 发电机局部放电脉冲沿定子绕组传播规律的研究[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 65-70.  
Cheng Yangchun, Li Chengrong, Wang Wei. Research on propagation rule of partial discharge pulses inside generator along stator windings [J]. Power System Technology, 2005, 29(8): 65-70(in Chinese).
- [3] 卢明. 发电机定子绕组击穿后的处理分析[J]. 电网技术, 2000, 24(10): 63-65.  
Lu Ming. Repair and analysis of breaking down of stator winding of generator[J]. Power System Technology, 2000, 24(10): 63-65(in Chinese).
- [4] 王洪方, 王乃庆. 大型电力变压器绕组轴向稳定性问题的研究状况[J]. 电网技术, 1999, 23(4): 8-10.  
Wang Hongfang, Wang Naiqing. Achievement on axial stability problem of electric power transformer windings[J]. Power System Technology, 1999, 23(4): 8-10(in Chinese).
- [5] 王洪方, 王乃庆. 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. Influence of axial precompression level on axial vibrations in transformer windings[J]. Power System Technology, 1999, 23(9): 8-11(in Chinese).
- [6] 国家电力公司发电运营部. 《防止电力生产重大事故的二十五项重点要求》辅导教材[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001: 204-205.
- [7] 周渠, 蔡振华. 变压器绕组扭动变形的故障诊断[J]. 电网技术, 2004, 28(12): 70-72.  
Zhou Qu, Cai Zhenhua. Fault diagnosis of transformer winding twist deformation[J]. Power System Technology, 2004, 28(12): 70-72(in Chinese).
- [8] 岳章华, 杨卫东, 江健武. 频率响应分析法检出变压器绕组变形实例分析[J]. 高电压技术, 2001, 27(4): 74-75.  
Yue Zhanghua, Yang Weidong, Jiang Jianwu. Diagnosis example of transformer winding deformation using frequency response analysis [J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(4): 74-75(in Chinese).
- [9] 杨利水, 杨旭, 徐岩. 电力变压器内部故障的非线性仿真模型[J]. 电网技术, 2009, 33(20): 183-188.  
Yang Lishui, Yang Xu, Xu Yan. A nonlinear model to calculate post-internal fault parameters of power transformer[J]. Power System Technology, 2009, 33(20): 183-188(in Chinese).
- [10] 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).
- [11] Q/GDW 168—2008 输变电设备状态检修试验规程[S].
- [12] 冯复生. 关于发电机定子绕组绝缘电阻测量及最低允许值的分析[J]. 电网技术, 2000, 24(2): 5-9.  
Feng Fusheng. Insulation resistance measurement of generator stator winding and analysis of its minimum allowable value[J]. Power System Technology, 2000, 24(2): 5-9(in Chinese).
- [13] DL/T 911—2004 电力变压器绕组变形的频率响应分析法[S].
- [14] 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(3): 35-39.  
Liu Lianrui, Ma Jixian, Guo Dongsheng. Diagnosis of transformer winding deformation with frequency response analysis[J]. Power System Technology, 1999, 23(3): 35-39(in Chinese).
- [15] 岂小梅. 变压器绕组变形的综合判断及经验总结[J]. 电网技术, 2006, 30(25): 220-222.  
Qi Xiaomei. Synthetic diagnosis and experience about winding deformation of transformer[J]. Power System Technology, 2006, 30(25): 220-222(in Chinese).



刘有为

收稿日期: 2010-01-08.

作者简介:

刘有为(1962), 男, 教授级高级工程师, 主要从事高电压绝缘、高压电气设备状态检测与诊断技术、检修优化策略等方面的研究, E-mail: liuyw@epri.sgcc.com.cn。

(实习编辑 张磊)