



# 变压器绕组变形测试仪选频滤波特性校验技术研究

刘勇<sup>1</sup>, 彭倩<sup>1</sup>, 王剑<sup>1,2</sup>, 王鹏<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610039; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 为开展针对变压器绕组变形测试仪选频滤波特性的校准工作, 提出一种基于增益误差值的判定方法。通过研究变压器绕组变形测试仪的选频滤波特性, 理论推导其判定指标。研究发现, 在干扰幅值倍数  $\alpha=1$  且滤波器衰减倍数  $\beta \leq 0.5$  时进行选频滤波校验, 测试仪最大的增益绝对误差应小于 0.969 1 dB, 此时选频滤波特性符合测试仪 -6 dB 带宽应小于扫描频率的 2% 的要求。提出的判定方法高效、可靠, 可支撑测试仪选频滤波校准工作的开展, 用于提高测试仪选频滤波性能。

**关键词:** 校准; 变压器; 绕组变形测试仪; 频率响应分析; 选频滤波特性

**文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-5124(2018)06-0006-05

## Research on calibration technology of selective filtering characteristics for transformer winding deformation tester

LIU Yong<sup>1</sup>, PENG Qian<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>1,2</sup>, WANG Peng<sup>2</sup>

(1. State Grid Sichuan Province Electric Power Research Institute, Chengdu 610039, China;  
2. College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** In order to calibrate the selective filtering characteristics of transformer winding deformation tester (TWDT), a determination method based on gain error value is proposed. By researching the selective filtering characteristics of transformer winding deformation tester, determination indexes are deduced theoretically. The research shows that when the disturbance amplitude time  $\alpha$  is 1 and filter attenuation time  $\beta$  is lower than 0.5, the maximum gain absolute error of tester is less than 0.969 1 dB, and at this time, selective filtering characteristics should meet the requirements that the -6 dB bandwidth of tester should be less than 2% of the scanning frequency. This method is efficient and reliable, and it can support the implementation of selective filtering calibration, so as to improve the selective filtering performance of tester.

**Keywords:** calibration; transformer; winding deformation tester; frequency response analysis; selective filtering characteristics

## 0 引言

变压器是电网的核心设备, 绕组变形是电力变

压器最常见的内部故障之一。在电动力和机械力的作用下, 绕组的尺寸或形状发生不可逆的变化, 绕

收稿日期: 2017-09-11; 收到修改稿日期: 2017-11-03

基金项目: 四川省电力公司科技项目(52199713506F)

作者简介: 刘勇(1968-), 男, 四川自贡市人, 高级工程师, 硕士, 主要从事电网运行维护检修管理及技术工作。

组发生局部变形后,即使没有立即损坏,也有可能留下严重的故障隐患<sup>[1-3]</sup>。《防止电力生产重大事故的二十五项重点要求》<sup>[4]</sup>和《国家电网公司十八项电网重大反事故措施》<sup>[5]</sup>把变压器绕组变形试验放在十分重要的位置,规定频响法测试绕组变形为110(66)kV及以上变压器必须进行的试验项目。

对变压器绕组变形进行测试,通常采用基于频率响应分析法(frequency response analysis, FRA)的变压器绕组变形测试仪<sup>[6-8]</sup>(以下简称测试仪)。频率响应分析法将变压器的等值电路当作是共地的二端口网络,当绕组变形后,内部参数变化将导致传递函数发生变化,通过分析和比较变压器的频率响应特性曲线,可发现变压器绕组是否发生变形<sup>[9-10]</sup>。

测试仪具备一个正弦波激励信号输出接口和两个独立的信号检测接口<sup>[11]</sup>,作为一种测试仪器,其通用技术部分应符合GB/T 6587—2012《电子测量仪器通用规范》<sup>[12]</sup>的要求。为满足现场测试,减小其他频率信号对测试结果的影响,其抗干扰能力,即选频滤波性能(滤掉除扫频信号以外的干扰信号的能力),作为测试仪的基本功能要求。在电力行业标准DL/T 911—2016《电力变压器绕组变形的频率响应分析方法》<sup>[13]</sup>中虽然已经提及,但缺乏对应的校准方法对该性能指标进行科学的评估和判定。为判定测试仪选频滤波性能,一般采用频谱分析仪进行测试。然而,测试仪扫频信号输出和响应信号检测均集成在仪器内部,响应信号检测端的滤波器性能测试需要拆解或破坏测试仪<sup>[14-15]</sup>。因此需要研究一种更有效、直接的判定方法,便于测试仪校准时对选频滤波特性进行判定。

本文开展对变压器绕组变形测试仪的选频滤波性能测试研究,提出相应的判定方法,并对HR 1000、TDT6U变压器绕组变形测试仪选频滤波性能进行测试。通过开展四川电力生产单位变压器绕组变形测试仪器现场判定试验和性能评价工作,证实了提出的方法可靠,符合测试仪实际的工作情况。最后对提高测试仪的选频滤波性能提出建议。

## 1 频率响应分析法

绕组局部变形后,绕组的相对电阻、电感、电容等参数都会发生变化,这是测量绕组变形的基础。自1966年Lech和Tyminski提出了低压脉冲法(LVI)确定变压器是否通过短路测试后,一系列的

变压器绕组变形检测方法已在国内外发展,例如低电压短路阻抗、频率响应分析法(FRA)、扫频阻抗法、振动检测法等。

变压器绕组在一定频率范围可等效成二端口电路网络。它由有限的部分组成,每一部分可看作由串联电容 $C_s$ 、并联电容 $C_g$ 、电感 $L_j$ 、互感 $M_n$ 和电阻 $R$ 构成的 $\pi$ 型电路<sup>[16]</sup>,图1为变压器绕组的等效电路。

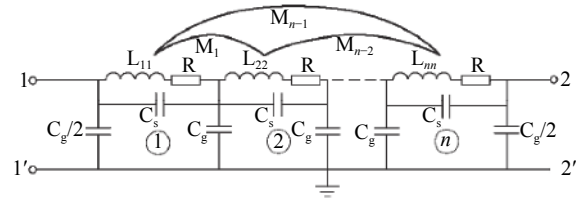


图1 变压器绕组等效电路图

图2为变压器绕组变形测试仪(transformer winding deformation tester, TWDT)测试接线图。正弦激励信号 $V_s(\omega)$ 注入绕组的一端,通过激励信号检测端口测得的 $V_s(\omega)$ 用 $V_1(\omega)$ 表示,响应信号 $V_2(\omega)$ 由响应检测端口在绕组的另一端测得。通常用 $V_1(\omega)$ 和 $V_2(\omega)$ 这两个信号的均方根值计算电压比,结果以对数刻度上的频率和振幅的形式给出,其表达式为

$$H(\omega) = 20 \log_{10} \frac{V_2(\omega)}{V_1(\omega)} \quad (1)$$

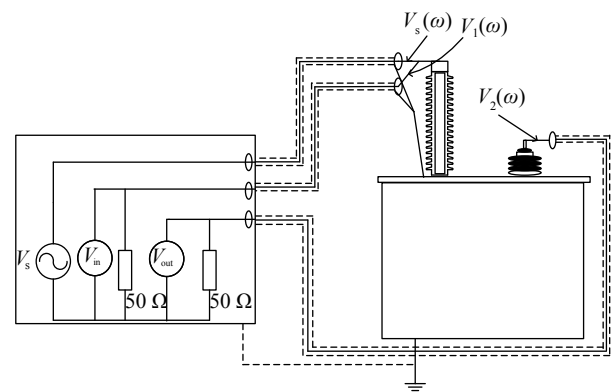


图2 TWDT测试接线图

## 2 选频滤波判定方法

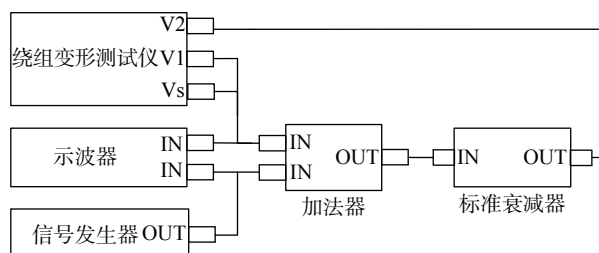
### 2.1 判定原理

根据DL/T 911—2016对选频滤波性能的要求,其-6 dB带宽应小于扫描频率的2%,即测试仪的选频滤波功能对检测到的位于输出正弦频率

值 $\pm 2\%$ 处的信号,应至少衰减为该信号原幅值的二分之一。干扰信号对测试仪的影响主要是对激励信号输出的幅值造成干扰,使响应信号检测端口的正弦信号有效值发生变化,影响增益检测的准确度。

因此,可通过增益检测值来判断选频滤波性能是否满足要求。基本思路是将 DL/T 911—2016 提出的频带衰减要求转换成增益要求,利用测试仪的增益检测结果对选频滤波特性进行间接判定,利用增益检测的误差值表示测试仪选频滤波特性优劣程度。

选频滤波判定试验接线图如图 3 所示。设置测试仪为单频点检测模式,输出固定频率的正弦信号,信号发生器输出已知频率和幅值的正弦干扰信号;加法器将测试仪输出的信号和信号发生器输出的信号同相相加后用标准衰减器进行衰减;计算测试仪检测的增益值与已知的标准衰减器的误差,若误差小于判定值 $|\Delta\delta|$ ,即可认为选频滤波性能满足要求。



Vs. 正弦信号输出接口; V1. 激励信号检测接口; V2. 响应信号检测接口。

图 3 试验接线图

## 2.2 判定指标推导

设测试仪输出正弦信号  $V_1(t)$  的频率为  $f_0$ , 幅值为  $A$ , 相位为  $\varphi_0$ ; 信号源输出正弦信号  $V_2(t)$  作为干扰信号, 频率为  $k$  倍信号  $V_1(t)$  的频率, 即  $kf_0$ , 幅值为  $\alpha$  倍信号  $V_1(t)$  的幅值, 即  $\alpha A$ , 相位设为  $\varphi_1$ , 则有:

$$\begin{cases} V_1(t) = A \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0) \\ V_2(t) = \alpha A \sin(2\pi k f_0 t + \varphi_1) \end{cases} \quad (2)$$

加法器为同相比例相加, 设比例系数为 1, 经过加法器后的信号  $V(t)$  表达式为

$$V(t) = V_1(t) + V_2(t) \quad (3)$$

设衰减器的衰减量为  $\delta$  dB, 即信号幅值衰减输入信号的  $10^{\delta/20}$  倍, 则通过标准衰减器后的信号  $V_s(t)$  表达式为

$$V_s(t) = A \times 10^{\frac{\delta}{20}} \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0) + \alpha A \times 10^{\frac{\delta}{20}} \sin(2\pi k f_0 t + \varphi_1) \quad (4)$$

测试仪内部对输入信号在频率  $f_0$  处具有选频滤波功能, 会对除  $f_0$  以外信号幅值衰减。测试仪响应信号检测端口的输入信号为  $V_s(t)$ , 设测试仪选频滤波器对频率为  $k$  倍  $f_0$  输入的干扰信号幅值衰减为  $\beta$  倍, 则经过测试仪选频滤波后的信号  $V_{out}(t)$  为

$$V_{out}(t) = A \times 10^{\frac{\delta}{20}} \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0) + \alpha \beta A \times 10^{\frac{\delta}{20}} \sin(2\pi k f_0 t + \varphi_1 + \varphi_2) \quad (5)$$

式中  $\varphi_2$  为滤波器对干扰信号的移相角。

测试仪按照下式计算扫频增益  $A_m$ , 其表达式为

$$A_m = 20 \log_{10} \left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right) \text{dB} \quad (6)$$

其中  $V_{out}$  和  $V_{in}$  为正弦信号的均方根值。

$V_{out}(t)$  的信号均方根值  $V_{out\_rms}$  由下式给出:

$$V_{out\_rms} = \sqrt{\frac{\left(A \times 10^{\frac{\delta}{20}}\right)^2}{2} + \frac{\left(\alpha \beta A \times 10^{\frac{\delta}{20}}\right)^2}{2}} \quad (7)$$

测试仪激励信号检测端测得输入的激励信号均方根值  $V_{in\_rms}$  由下式给出:

$$V_{in\_rms} = \frac{A}{\sqrt{2}} \quad (8)$$

测试仪输出正弦信号频率下的理论增益  $\delta_0$  为

$$\delta_0 = 20 \log_{10} \left( \frac{\sqrt{\frac{\left(A \times 10^{\frac{\delta}{20}}\right)^2}{2} + \frac{\left(\alpha \beta A \times 10^{\frac{\delta}{20}}\right)^2}{2}}}{\frac{A}{\sqrt{2}}} \right) = \quad (9)$$

$$20 \log_{10} \left( \sqrt{1 + \alpha^2 \beta^2} \times 10^{\frac{\delta}{20}} \right) =$$

$$\delta + 20 \log_{10} \sqrt{1 + \alpha^2 \beta^2}$$

选频滤波判定时可用绝对误差来表示, 由于外接的标准衰减器衰减量  $\delta$  已知, 所以, 不同参数对选频滤波校准的影响可用下式来表示:

$$\Delta\delta = \left| \delta - (\delta + 20 \log_{10} \sqrt{1 + \alpha^2 \beta^2}) \right| = \left| 20 \log_{10} \sqrt{1 + \alpha^2 \beta^2} \right| \quad (10)$$

从式(10)可知, 影响选频滤波性能指标的因素为外部干扰信号对激励信号的幅值倍数  $\alpha$  和滤波器自身对干扰信号的衰减倍数  $\beta$ 。

根据要求, 测试仪对检测到的位于  $(1 \pm 2\%)$  倍输出正弦频率值处的信号应至少衰减为该信号原幅值的二分之一, 即  $\beta \leq 0.5$ 。试验时设输入干扰信号

的幅值与测试信号的相同,即 $\alpha=1$ ,可以得出判定的指标为

$$\Delta\delta = |20\log_{10} \sqrt{1+\alpha^2\beta^2}| \leq 20\log_{10} \sqrt{1+0.25} = 0.9691 \quad (11)$$

因此,在这种情况下选频滤波校准的指标为

$$|\Delta\delta| \leq 0.9691 \text{ dB} \quad (12)$$

表1给出了不同选频滤波衰减指标下的校准理论要求( $\alpha=1$ )。

表1 不同衰减下的判定指标

$\beta$	衰减分贝/dB	$\Delta\delta$
1/2	-6.0206	0.9691
1/3	-9.5424	0.4576
1/4	-12.0412	0.2633
1/5	-13.9794	0.1703

### 3 试验验证

为验证提出的选频滤波性能判定方法的正确性,选用目前国内各电力企业普遍配备的两种变压器绕组变形测试仪 HR1000 和 TDT6U 进行验证,两种 TWDT 的参数如表2所示。

表2 TWDT 仪器参数

型号	频率误差	幅值误差	频率范围	动态范围
HR1000	<0.01%	$\pm 0.5$ dB	10 Hz~2 MHz	-100 ~20 dB
TDT6U	0.005%	$\pm 0.5$ dB	100 Hz~2 MHz	-100 ~20 dB

选频滤波判定试验的接线按图3进行连接,试验步骤为:

- 1) 测试仪设置为单频点扫描检测模式,扫描频率 $F_0$ 分别设置为1, 10, 100, 500, 1000 kHz;
- 2) 数字示波器同时测量加法运算器两个输入端的信号幅度及频率;
- 3) 信号发生器输出正弦信号,频率分别设置为 $0.98 F_0$ 和 $1.02 F_0$ ,设置输出幅值与测试仪输出正弦波信号幅值相同;
- 4) 加法器由宽带运算放大器搭建而成,幅值运算线性度宜优于1%,用于把测试仪和信号发生器输出的正弦波信号进行同相比例相加,比例系数取为1;
- 5) 选择标准衰减器的衰减量为-20 dB。  
在测试仪以频率 $F_0$ 进行单频点扫描检测过程

中,分别记录施加频率为 $0.98 F_0$ 和 $1.02 F_0$ 正弦波信号时的扫频增益检测数据,试验结果记录如表3所示,试验数据绘制折线图如图4所示。

表3 实验结果

$(1\pm 2\%)F_0$ 干扰信号/kHz	A 测试仪测试值/dB	B 测试仪测试值/dB
0.98	-19.967	-19.962
1.02	-19.984	-19.976
9.8	-19.968	-19.964
10.2	19.972	-19.968
98	-19.960	-19.962
102	-19.962	-19.959
490	-19.859	-19.962
510	-19.885	-19.998
980	-19.362	-19.887
1020	-20.053	-19.518

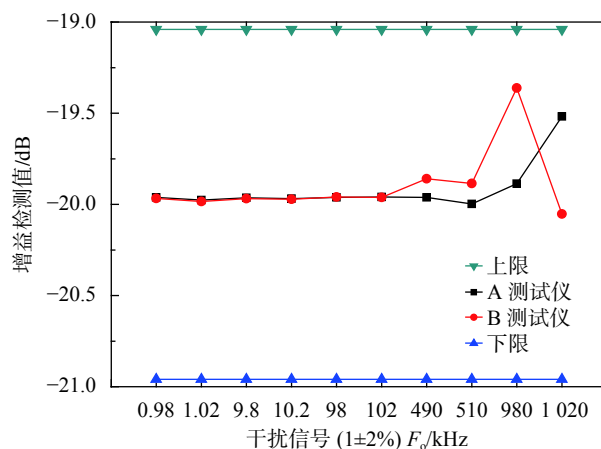


图4 选频滤波性能

图4表明了不同中心频率处外加干扰信号的检测增益值。可以看出,在低频段(1~100 kHz)选频滤波性能最好,干扰信号对测试仪的增益检测影响最小;在中频段(100~600 kHz),干扰信号对测试仪增益检测准确度的影响开始凸显,检测结果在一个较小范围内波动;在高频段(>600 kHz),干扰信号对增益检测准确度的影响最大,出现最大0.6 dB的检测误差,但是仍然满足<0.9691 dB的选频滤波指标。因此,从表3和图4可以判定,试验采用的两个测试仪选频滤波性能均符合DL/T 911—2004的要求。

按照中心频率 $\pm 2\%$ 的选频范围,随着频率增加,选频滤波的中心频率频带增大。扫频为1 kHz时,选频带宽为0.98~1.02 kHz,测试结果受0.04 kHz、较窄带宽的干扰信号影响;扫频信号1 000 kHz时,选频带宽为980~1 020 kHz,测试结果受40 kHz、较大带宽的干扰信号影响。因此,为提高测试仪选频滤波性能,模拟滤波时应在高频段设计具有较好滤波性能的滤波器,数字滤波时应提高高频段采样精度和增加采样点数。

#### 4 结束语

针对基于频率响应分析法的变压器绕组变形测试仪选频滤波性能要求,本文提出了一种新的选频滤波性能判定方法,即外接干扰信号的情况下进行增益检测。当检测的增益绝对误差小于给定值时,判定选频滤波性能满足要求,并给出了详细的推导过程和判定依据。研究发现:

1) 由于采用检测增益的绝对误差值判定,因此,判定指标与试验时标准衰减器具体值无关,在试验时无需选择特定的衰减器,但应知其衰减量。

2) 本方法属于综合判定法,将DL/T 911——2016提出的频带衰减要求转换成增益要求,采用增益绝对误差值间接表示,利用测试仪的检测结果对选频滤波特性进行综合判定,无需拆卸测试仪内部的选频滤波器,符合现场测试和校准以及仪器的工作原理。

3) 测试仪工作在低频段(1~100 kHz)、中频段(100~600 kHz)时,仪器选频滤波性能较好,干扰信号对增益检测影响较小;处于高频段(>600 kHz)时,增益检测值误差增大,但仍然能满足选频滤波的指标要求。为了分析测试仪的选频滤波性能,可在高频区间设定更多频率点进行试验判定。

#### 参考文献

- [1] 严玉婷,江健武. 变压器绕组变形的理论与试验研究[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 55-59.
- [2] 何文林,陈金法. 频响分析法测试变压器绕组变形的研究[J]. 中国电力, 2000, 33(12): 39-42.
- [3] 刘利鹏,乔玉良,朱永利,等. 电流源法检测变压器绕组变形[J]. 电测与仪表, 2014, 51(8): 56-59.
- [4] 国家电网公司. 防止电力生产重大事故的二十五项重点要求[Z]. 2000.
- [5] 国家电网公司. 国家电网公司十八项电网重大反事故措施[M]. 北京:中国电力出版社, 2007.
- [6] 程文锋,喇元. 变压器绕组频响测试法相关问题的研究[J]. 电测与仪表, 2013, 50(6): 41-43.
- [7] 龙坤,陈亚军,唐俊. 频响法在诊断绕组变形中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 12(6): 91-94.
- [8] 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(S1):226-228.
- [9] 孙翔,何文林,詹江杨,等. 电力变压器绕组变形检测与诊断技术的现状与发展[J]. 高电压技术, 2016, 42(4):1207-1220.
- [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.
- [11] RYDER S A. Diagnosing transformer faults using frequency response analysis [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2003, 19(2):16-22.
- [12] 电子测量仪器通用规范:GB/T 6587-2012[S].北京:中国质检出版社, 2013.
- [13] 电力变压器绕组变形的频率响应分析法:DL/T 911-2016[S]. 北京:中国电力出版社, 2016.
- [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, 1993, 23(3): 35-39.
- [15] 曹小龙,胡春梅,曹小虎,等. 变压器频率响应法测试结果的影响因素分析及改善[J]. 高压电器, 2012, 48(7):81-87.
- [16] OGUZ S A. A method for wide frequency range modeling of power transformers and rotating machines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(4):1802-1810.

(编辑:商丹丹)