

# 变压器绕组变形的扫频短路阻抗法研究

薛亮红<sup>1</sup> 刘之方<sup>2</sup> 武康凯<sup>1</sup> 李忠晶<sup>1</sup> 周 玮<sup>2</sup>

(1. 北京国网普瑞特高压输电技术有限公司 北京 102200; 2. 中国电力科学研究院 北京 100192)

**摘要:**针对变压器因绕组变形而产生故障问题,分析了现有短路阻抗法和频响法检测绕组变形手段的特点和不足,研究了扫频短路阻抗法的基本原理和测试接线方式,在模型变压器上进行了绕组层间短路、绕组匝间短路等不同情况的试验测试,初步验证了该方法的有效性。以某 220 kV 变压器为测试对象,采用扫频短路阻抗法进行了变电站现场测试工作。该方法测试结果能够提供更多的测量参量,为绕组变形的研判提供了更多的参考依据,是一种很有价值的变压器绕组变形测试方法。

**关键词:**绕组变形;扫频短路阻抗法;变压器

**中图分类号:** TM93 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

## Study on sweep frequency short-circuit impedance analysis for winding deformation detection of transformers

Xue Lianghong<sup>1</sup> Liu Zhifang<sup>2</sup> Wu Kangkai<sup>1</sup> Li Zhongjing<sup>1</sup> Zhou Wei<sup>2</sup>

(1. Beijing SG-EPRI UHV Transmission Technology Co. Ltd., Beijing 102200, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** Focusing on the detection of winding deformations within power transformers, this paper analyzed the characteristics and disadvantages of current short circuit impedance method and frequency response method for winding deformation detection. It was studied the fundamental and the wire connection method for sweep frequency short-circuit impedance analysis (SFSCIA). Interlayer short circuit tests and interturn short circuit tests were conducted on a model transformer under different conditions to verify the validity of the SFSCIA. As a further validation, field tests were carried out on a 220 kV transformer at the substation based on SFSCIA. The SFSCIA method is a valuable testing scheme providing with more measurement data as assessment evidence of winding deformation.

**Keywords:** winding deformation; sweep frequency short-circuit impedance analysis; transformer

### 1 引言

电力变压器在电力系统中起着能量转换与运输的作用<sup>[1]</sup>,变压器故障直接威胁着整个电力系统的安全稳定运行。变压器绕组因外部短路等原因造成的变形甚至损坏故障较为多见,对电网的稳定与安全运行影响重大<sup>[2-4]</sup>。对变压器绕组进行试验检查,分析并诊断其是否存在变形,已成为变压器运维检修中的一项重要工作。

在变压器绕组变形诊断方法中,有两种方法得到广泛的应用。其中之一是短路阻抗法,该方法是应用当绕组发生形变后,其短路阻抗值也将发生变化这一特性来判断的。而另一种频响法是应用当绕组发生形变后,其绕组幅频响应特性也将发生变化这一特性来判断的<sup>[5-7]</sup>。上述两种方法标准也已经颁布,并且在实际应用中也有一定的成

效。但两者在判断不同类别绕组变形上敏捷程度不同。在实际应用中发现,同时利用两种方法测量,能有效的减少采用一种方法测量带来的错误判断<sup>[8]</sup>,但采用两种方法测量,需要现场工作人员进行两次测试,给现场测试工作带来了极大不便,甚至可能因此延长变压器的停电时间,影响电网的运行。

针对上述问题,变压器绕组变形检测的研究工作仍在开展,扫频短路阻抗法便是近几年来这方面研究的热点之一。

### 2 基本原理

变压器绕组的机械变形必然会引起其内部电气参数的变化,通过对这些电气参数变化的测量和分析,可以诊断绕组是否存在变形。

收稿日期:2017-03

扫频短路阻抗法是把一定频段的扫频电压加在原边绕组上,测量原边绕组在该激励下的响应值<sup>[9-12]</sup>,图1所示为其接线方式,测试过程中副边绕组要短接。

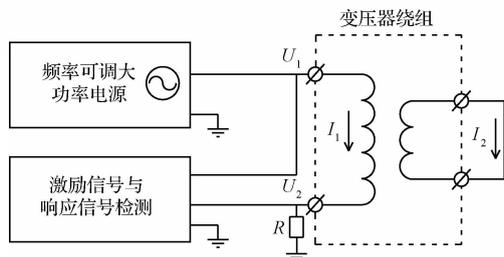


图1 测试接线原理

通过测量和计算原边绕组两端的激励和响应值,就可以得出反应原边绕组的频响特性的幅频响应值和短路阻抗特性的短路阻抗值。

绕组的幅频响应值计算公式如下<sup>[13]</sup>:

$$H(f) = 20\log(U_2(f)/U_1(f)) \quad (1)$$

式中: $H(f)$ 表示频率为 $f$ 时传递函数的模 $|H(j\omega)|$ , $U_1(f)$ 、 $U_2(f)$ 表示频率为 $f$ 时测试系统输出端和输入端的电压值。

短路阻抗的计算方法为:

$$\vec{Z}_k(f) = \left( \frac{\vec{U}_1(f) - \vec{U}_2(f)}{I_1(f)} \right) = R(f) + jX(f) \quad (2)$$

式中:阻抗 $|Z_k| = |R + jX|$ 或 $Z_k = \sqrt{R^2 + X^2}$ , $Z_k(f)$ 表示频率为 $f$ 时的阻抗, $R(f)$ 表示频率为 $f$ 时绕组电阻, $X(f)$ 表示频率为 $f$ 时绕组电抗。

式(2)中,电流 $I_1$ 可以通过测得的 $U_2$ 与 $R$ (匹配阻抗,50 $\Omega$ )换算获得。式(2)中实部即为电阻,虚部即为电抗,通过式(3)、(4)可以计算各测量频率点下的电阻值、电抗值<sup>[14]</sup>,通过比较全频段内的电阻- $f$ 、电抗- $f$ 特性曲线的变化趋势,来分析和判断绕组变形的状况。

$$\text{Re}(\vec{Z}_k(f)) = R \quad (3)$$

$$\text{Im}(\vec{Z}_k(f)) = X \quad (4)$$

应用扫频短路阻抗法的诊断方法,对采样的数据进行计算分析,就能获得绕组的工频短路阻抗值,这个数据与铭牌上面数据的对比关系,可以为诊断绕组变形方面提供参考。

### 3 物理仿真测试

#### 3.1 试验系统及接线

在对扫频短路阻抗法的诊断机理有了一定的研究后,在实验室通过对模型变压器进行的物理仿真试验,测试原理的正确性得到了验证,并且经过对数据分析得到,低频段的测量数据主要反应了绕组的阻抗特性,而高频段测量数据反应了绕组的幅频特性。

试验是在根据扫频短路阻抗法诊断机理搭建的测试系统上进行的,接线方式采用如图2所示。利用该系统可以获得分析和判断需要的数据<sup>[15]</sup>。

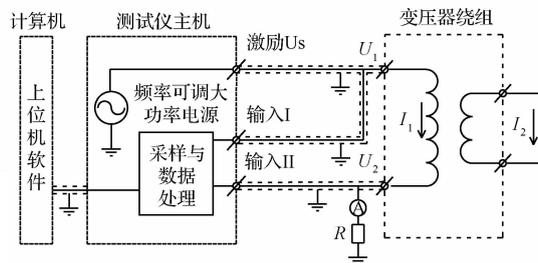


图2 测试接线原理

#### 3.2 测试系统的主要技术指标

表1为测试系统的主要技术参数。

表1 主要技术参数

技术指标	性能
扫频检测范围	30~1 MHz
检测方式	线性扫频
频率精确度	≤0.01%
扫描频率间隔	1 kHz
动态检测范围	-100~-20 dB
检测精确度	≤±1 dB
通信方式	USB2.0 接口

#### 3.3 测试结果及分析

##### 1) 模拟绕组层间故障测试曲线

变压器绕组层间短路主要影响其内部电感量,把模型变压器的副边绕组短接,模拟绕组层间短路前后的测试曲线如图3所示。

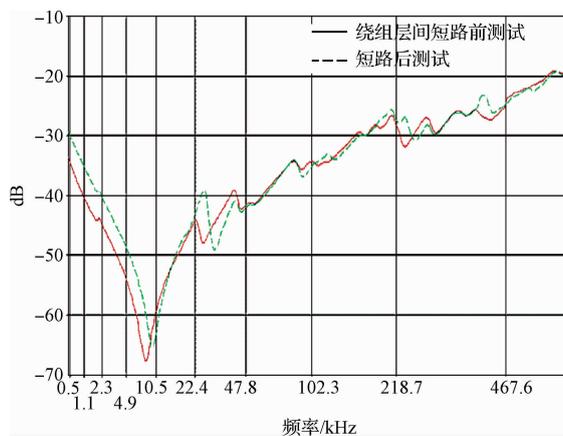


图3 模拟绕组层间故障测试曲线

从图3可以看出,数据在低频段有显著的水平位置移动,并且移动幅度与频率之间有一定的正比关系,该段主要反应了绕组的阻抗值;曲线在高频段有明显的波峰、波谷移位和反向,该段主要反应了绕组的幅值- $f$ 特性。

##### 2) 模拟绕组匝间故障测试曲线

绕组匝间短路主要影响其内部的匝间电容,把模型变

压器的副边绕组短接,模拟变压器原边绕组匝间短路的测试曲线如图4所示。

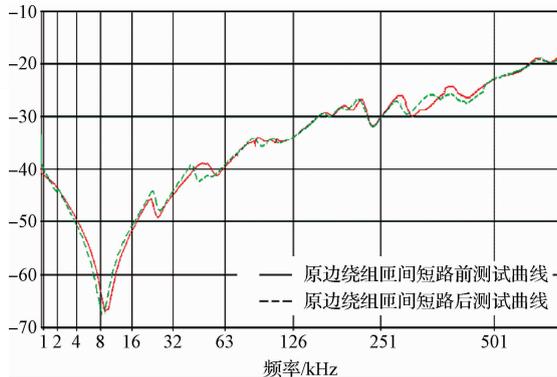


图4 模拟匝间故障测试曲线

从图4可以看出,曲线在低频段没有出现明显的水平移动,表明阻抗基本没有发生变化。在高频段频率响应曲线有显著的变化。

经过以上的应用发现,扫频短路阻抗法单次检测既可以取到反应绕组的幅频响应曲线,同时也能得到反应绕组的阻抗特性曲线,并且短路阻抗值也可以方便的通过计算得到,说明该方法有效的把两种传统的诊断方法结合在了一起,同时也说明了仿真结果的正确性。

### 3.4 测量重复性

频响法是经过对变压器绕组频响曲线纵向、横向对比判断绕组变形的,有时也会比较三相绕组曲线的一致性,测试系统的测试重复性显得尤为重要。为了检验扫频短路阻抗测试仪的测量重复性,对某变电站一台主变的三相绕组进行了测试,测试结果如图5所示。

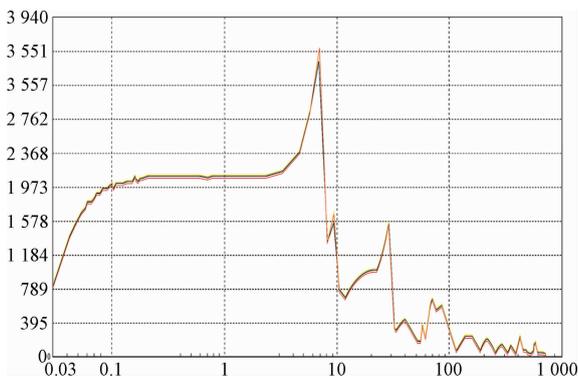


图5 某主变中一低压侧  $Z_k/\omega f$  曲线

图5中曲线分别为A相、B相、C相曲线,从图中可以看出,扫频短路阻抗法的测量重复性较好,可以很好的满足纵向和横向比较法对测试曲线重复性的要求,可通过对三绕组阻抗-f频率曲线来分析和判断变压器各相绕组之间的差异。

## 4 现场应用测试

实验室模拟测试工作完成后,在某220 kV变电站分

别用扫频短路阻抗法和频率响应法对1台主变进行了测试,利用扫频短路阻抗法测量可以生成  $Z/\omega f$  曲线、 $R-f$  曲线  $X-f$  曲线等多条曲线,其中利用  $Z/\omega f$  曲线可以提取50 Hz的短路阻抗值,还可以转换成频响曲线。图6、7所示分别为对该220 kV变压器A相高压-低压测试的  $Z/\omega f$  曲线和  $X-f$  曲线。

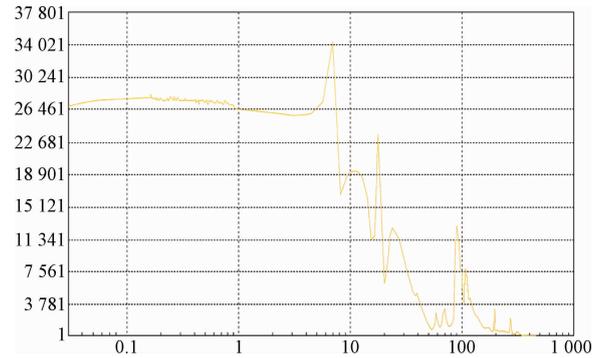


图6 主变高-低压侧  $Z_k/\omega f$  曲线(副边接地)

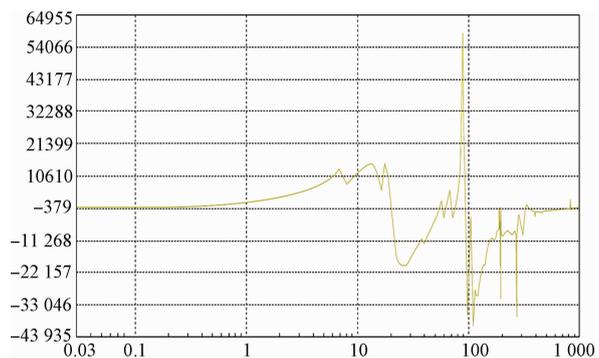


图7 主变高-低压侧  $X_k-f$  曲线(副边接地)

在低频段(30~1 kHz),变压器绕组的短路阻抗值与频率基本成正比例关系,阻抗-f曲线还可以计算出的工频下变压器的短路阻抗值,表2所示为计算值与铭牌值的数据。

表2 测量值与铭牌值的对比

被测绕组	铭牌值/%	阻抗值/ $\Omega$	50 Hz 阻抗提取值/ $\Omega$	阻抗百分比/%	误差/%
A相	23.28	86.81	86.44	23.79	0.42
高压-低压					

由表2可见,通过阻抗-f曲线提取出的短路阻抗值与铭牌上面的值相差很小,可以说明通过提取的阻抗值可以判断变压器的绕组变形情况<sup>[15]</sup>。

图8所示为通过对阻抗-频率曲线转化得到的频响曲线。

图9所示为对该绕组采用频响法进行测试生成的频响曲线。

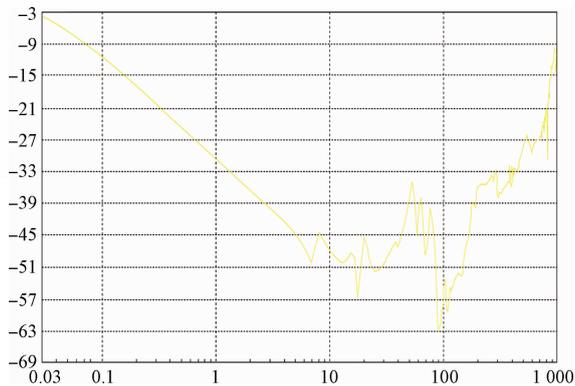


图8 频响曲线1

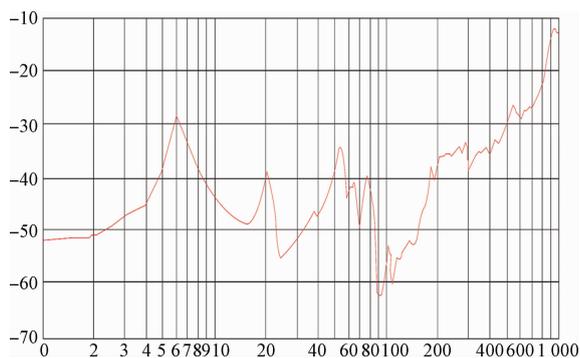


图9 频响曲线2

由图9曲线可以看出,由扫频短路阻抗法提取的频响曲线与用频响法测量采集到的频响曲线在中、高频段,波峰、波谷位置基本一致,所以扫频短路阻抗提取出的频响曲线,也能够用来当作判断绕组是否存在变形的依据。

通过在现场的应用可以发现,扫频短路阻抗法结合了传统测量方法的特性,并且通过单次测试就可以取得扫频范围内的全部短路阻抗值,并且通过提取和转化可以得到50 Hz的短路阻抗值和频响曲线,把生成的数据与铭牌或历史保存的频响曲线进行比较,从而对绕组变形做出有效的判断。

## 5 结论

通过对传统变压器绕组变形诊断的两种方法进行改进,扫频短路阻抗法既保留原有两种诊断方法的特征量,又增加了新的判断参考参量用于绕组变形的判断,利用扫频短路阻抗法单次测试可以取得多条特征曲线,如果对测试数据进一步归算,可以得到更多更有效的特征量来帮组分析判断绕组变形。在实际应用方面,为及时准确的发现绕组存在的问题提供了一种新的手段。

## 参考文献

- [1] 袁志,龙立.论电力变压器运行过程中的检修与维护[J].科技创新与应用,2012(22):177-178.
- [2] 邓祥力,熊小伏,高亮,等.基于参数辨识的变压器绕组变形在线监测方法[J].中国电机工程学报,2014,34(28):4950-4958.
- [3] 刘达,彭敏放,万勋,等.基于行波分析的变压器绕组匝间短路故障定位[J].仪器仪表学报,2015,36(9):2091-2096.
- [4] 黄文婷,郑婧,黄海,等.电力变压器振动信号分离方法研究[J].电子测量与仪器学报,2016,30(1):111-117.
- [5] DL/T 1093-2008 电力变压器绕组变形的电抗法检测判断导则[S].2004.
- [6] Q/GDW 168-2008 输变电设备状态检修试验规程[S].北京:国家电网公司,2008.
- [7] 覃智贤,陈斌,徐兆丹,等.变压器绕组变形的诊断及防范措施[J].广西电力,2014,37(5):65-67,74.
- [8] 朱生鸿,秦睿,杨萍,等.扫频阻抗法检测变压器绕组匝间短路故障[J].绝缘材料,2014,47(4):93-96.
- [9] 杨超,薛静,李治,等.基于扫频短路阻抗法的绕组变形测试研究[J].贵州电力技术,2015,18(9):1-6.
- [10] 刘勇,杨帆,张凡,等.检测电力变压器绕组变形的扫频阻抗法研究[J].中国电机工程学报,2015,35(17):4505-4516.
- [11] 王楠,王伟,马小光,等.基于多融合技术的变压器绕组变形测试与诊断方法[J].绝缘材料,2015,48(11):69-75.
- [12] 张宁,朱永利,李莉.频响阻抗法诊断变压器绕组变形[J].电测与仪表,2016,53(10):69-75.
- [13] DL/T 911-2004 电力变压器绕组变形的频率响应分析法[S].2004.
- [14] 彭海军.基于DDS的信号相位同步设计技术[J].国外电子测量技术,2016,35(4):95-98.
- [15] 弓艳朋.变压器绕组变形的扫频短路阻抗诊断方法研究[J].高压电器,2016,52(5):121-125.

## 作者简介

薛亮红,1978年出生,工学学士,助理工程师,主要研究方向为电力设备的故障诊断技术、变电站现场测试技术、变压器绕组变形诊断等。

E-mail: xuelianghong@sgepri. sgcc. com. cn

刘之方,1977年出生,工学硕士,教授级高级工程师,主要研究方向为串联补偿关键技术、电气设备故障监测等。

E-mail: fangkite@epri. sgcc. com. cn