# 脉冲响应法在变压器绕组变形检测中的应用

师一卿[1]，刘 伟[1]，韩彦华[2]，王 荆[2]，赵仲勇[3]

（1. 国网陕西省电力公司，陕西 西安 710048；2. 国网陕西省电力公司电力科学研究院，陕西 西安 710199；
3. 西南大学工程技术学院，重庆 400715）

**摘要：绕组变形是诱发变压器事故的主要原因之一，及时检测和排除绕组故障意义重大。研究了脉冲响应法在变压器绕组变形故障离线检测中的应用，为了克服该方法固有的重复性不高的缺陷，提出了仅分析频率响应曲线的低频段信息。健康变压器实验证实了频率响应的低频段重复性较好，故障变压器实验证实了该方法能够有效诊断出绕组匝间短路故障。综合来看，脉冲响应法虽然舍去了频率响应部分信息，但依然具有一定的工程应用价值。**

**关键词：脉冲响应法；变压器；频率响应；短路电动力**

## Application of pulse response method on detecting transformer winding deformation

(SHI Yiqing[1], LIU Wei[1], HAN Yanhua[2], WANG Jing[2], ZHAO Zhongyong[3]

(1. State Grid Shanxi Electric Power Company, Xi'an 710048, China; 2. Academy of Electric Power Sciences, State Grid Shanxi Electric Power Company, Xi'an 710199, China; 3. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** Winding deformation is one of the main reasons to induce the transformer failure, it is important to timely detect and remove the winding faults. The application of pulse response method on offline transformer winding deformation detection is studied. In order to overcome the intrinsic imperfection of low repeatability of this method, to just analyze the low frequency band of frequency response curve is proposed. Test result of the healthy transformer demonstrates that the repeatability of frequency response within the low frequency band is enough high, faulty transformer experiment shows that the proposed method is capable of effectively diagnosing the winding inter-turn short circuit fault. In general, although the pulse response method leaves out some information of frequency response, it still has application value in engineering.

**Key words:** pulse response method; transformer; frequency response; short circuit electrodynamic force

## 0 引言

变压器是输变电系统中关键的基础设施，因故障导致的变压器停运和计划外的维修，不仅要花费大量的人力、物力和时间成本，还降低了变压器自身的经济效益和社会效益[1]。随着社会经济快速发展，电网的容量日益增加，变压器故障呈现增长的趋势。统计资料表明，绕

国家电网公司科技项目 (SGSNKY00SPJS1800664)；中央高校基本科研业务费 (SWU118031)

组变形是变压器最为主要的故障因素之一[2-3]。因此，进行变压器绕组变形故障测试技术的研究十分必要。

频率响应分析法[4-5]，简称FRA法，是一种可外部检测变压器内部绕组机械和电气问题的测试技术，具有简单、精确和可靠等优点，被广泛应用。脉冲响应法是近年来兴起的一种新型的绕组故障检测技术，其使用脉冲信号作为绕组的励磁电源，同样也利用到FRA法分析绕组频率响应特性的原理，但与FRA法相比，具有更快的检测速度和更低的制造成本等优势[6]。然而，据文献报道，离线的脉冲响应法在引线不固定时的重复性不高，主要体现在频率响应曲线在高频段受到测试引线、仪器布置方式和外界扰动等因素影响，可重复性较差[7]。

如果只分析频率响应曲线在中低频段的信息，脉冲响应法也可以被用来检测部分类型的绕组变形故障，如绕组匝间短路等。本文即对脉冲响应法在变压器绕组变形检测中的应用进行说明，首先对其机理进行分析，接着阐述了实际变压器的测试案例，最后提出使用该方法检测需要注意的事项。

## 1 机理分析

### 1.1 漏磁通与短路电动力分布

变压器内部漏磁密度与绕组电动力分布如图1所示。

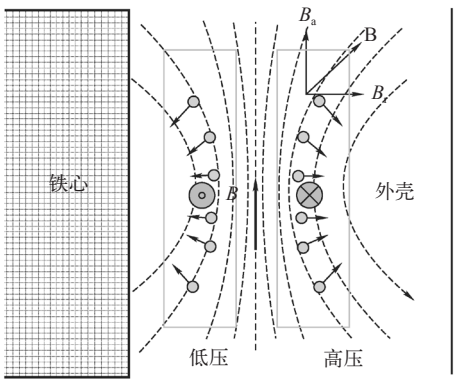


图1 变压器内部漏磁密度与绕组电动力分布

Fig. 1 Distribution of leakage flux density and winding's electrodynamic force within the transformer

短路电动力往往是造成绕组变形最关键的因素之一[8]，以故障最为严重的变压器三相短路为例，短路后绕组中的电流将会达到额定电流的25倍以上，在绕组上产生巨大的电动力，瞬时短路电流计算公式为

$$I(t)=I_0\mathrm{e}^{-\frac{R}{L}t}+\frac{V_\mathrm{m}}{\sqrt{R^2+X^2}}\sin(\omega t-\theta) \quad (1)$$

式中，$I_0$为稳态短路电流；$R$、$L$和$X$分别为变压器等效的电阻、电感和电抗；$V_\mathrm{m}$为电压源的峰值；$\omega$为额定角频率；$\theta$为电压源的初相角。

当变压器二次侧发生短路后，由于电流暂态分量的存在，变压器内的磁通主要为漏磁通。漏磁通按方向可分为轴向漏磁通和辐向漏磁通，漏磁通在柱坐标体系下的计算公式为

$$B_r=-\frac{\partial A_\phi}{\partial z},\ B_\phi=0,\ B_z=\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial rA_\phi}{\partial z} \quad (2)$$

式中，$B_r$、$B_\phi$和$B_z$分别为$r$、$\phi$和$z$方向漏磁密度的分量。

绕组上的短路电动力为洛伦兹力，其随时间变化的关系式为

$$\vec{F}(t)=F_\mathrm{m}[\frac{1}{2}+\mathrm{e}^{-\frac{2R}{L}t}-2\mathrm{e}^{-\frac{R}{L}t}\cos\omega t+\frac{1}{2}\cos 2\omega t] \quad (3)$$

图1表示了变压器内部漏磁通密度和绕组短路电动力的分布。高低压绕组受到轴向力作用，轴向力由辐向漏磁通和短路电流形成，会引起绕组从两端向中部挤压的效应。高低压绕组也会受到辐向力作用，辐向力由轴向漏磁通和短路电流形成，低压绕组所受辐向力有向内压缩的作用，使得绕组缩小；而高压绕组所受的辐向力为向外扩张的作用力，具有使绕组直径扩张并拉伸绕组的效应。绕组在短路电动力的作用下，会发生机械性变形，匝间、饼间绝缘会受到破坏，综合作用又会进一步地加深故障的严重程度。

### 1.2 绕组高频等效电路模型

绕组集总参数等效电路模型如图2所示。

如上文所述，脉冲响应法同样利用绕组的频率响应信息诊断绕组故障，而绕组的等效电

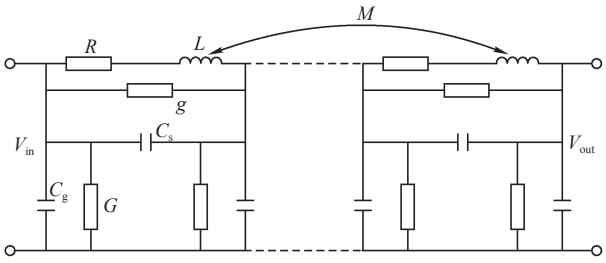


图2 绕组集总参数等效电路模型

Fig. 2 Lumped parameter equivalent electrical model of transformer winding

路模型是常用来分析频率响应的辅助手段[9]。由图2可知，绕组集总参数电路模型由若干相同结构的单元构成，主要包括绕组自电阻$R$、自电感$L$、电导$g$、饼/匝间电容$C_s$、对地电容$C_g$、对地电导$G$以及绕组单元间的互感$M$。$V_{in}$和$V_{out}$分别表示绕组电路模型的端口输入输出电压，两者可用来构造绕组的频率响应。当绕组发生变形故障时，等效电路模型的参数发生改变，整个二端口网络的频率响应发生改变。因此，通过外部端口测量变压器的频率响应，可以反推绕组内部状态，实现故障诊断分析。

### 1.3 脉冲响应法基本原理

图3为脉冲响应法的基本接线图，脉冲响应法在绕组首端注入脉冲电压信号作为励磁，在绕组末端可通过宽频带电压探头采集电压响应信号或电流传感器采集电流响应信号。图3所示为通过穿心式电流互感器采集电流信号的方式。在绕组首末端采集的电压电流信号可按式（4）～式（6）求取变压器的频率响应曲线[10]，即

$$V_{in}(k)=\sum_{n=0}^{N-1}V_{in}(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (4)$$

$$R_{out}(k)=\sum_{n=0}^{N-1}R_{out}(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (5)$$

$$H(f)=20\lg\frac{|R_{out}(f)|}{|V_{in}(f)|} \quad (6)$$

式中，$V_{in}(n)$为绕组励磁电压的$N$点时域采样信号；$V_{in}(k)$为$V_{in}(n)$的快速傅里叶变换；$R_{out}(n)$为绕组响应电压/电流的$N$点时域采样信号；$R_{out}(k)$为$R_{out}(n)$的快速傅里叶变换；$H(f)$为绕组频率响应曲线。

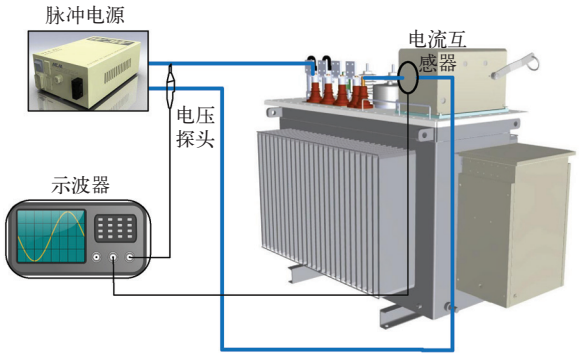


图3 脉冲响应法基本接线图

Fig. 3 Basic wring of pulse response method

## 2 测试案例

### 2.1 重复性测试

脉冲响应法重复性测试结果如图4所示。

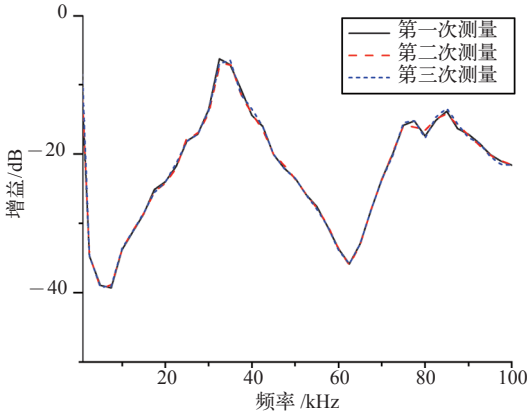


图4 脉冲响应法重复性测试结果

Fig. 4 Result of repeated test of pulse response method

在本文所提的脉冲响应法中，虽仅需要分析频率响应曲线的中低频段信息，同样也需保证测试的重复性。为此，按照图3的接线，针对一台10 kV变压器的高压A相绕组开展测试，测试电源使用群脉冲发生器，脉冲电压幅值500 V，波形前沿/脉宽参数为50/500 ns；在完成首次测量后，分别间隔2周和4周的时间再次对该绕组进行测量，测试使用脉冲电源、示波器、电压探头和引线电缆等设备以及励磁脉冲参数保持不变。三次测量所得结果均呈现在图4中，图4仅分析频率响应在100 kHz频段以内的信息，可知三次测量频率响应曲线的吻合度较高，基本没有出现较大偏差。

利用电力行业标准DL/T 911—2004推荐的相关系数法评判脉冲响应法重复性测试的效果[11]，两个长度为$N$的传递函数幅度序列$X(k)$和$Y(k)$为实数，相关系数可按照式（7）～式（11）计算，序列的标准方差定义为

$$D_x=\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}[X(k)-\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}X(k)]^2 \tag{7}$$

$$D_y=\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}[Y(k)-\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}Y(k)]^2 \tag{8}$$

序列的协方差$C_{xy}$计算公式为

$$C_{xy}=\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}[X(k)-\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}X(k)][(Y(k)-\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}Y(k)] \tag{9}$$

序列的归一化协方差系数$L_{xy}$定义为

$$L_{xy}=C_{xy}/\sqrt{D_xD_y} \tag{10}$$

符合工程需要的相关系数$R_{xy}$定义为

$$R_{xy}=\begin{cases}10 & 1-L_{xy}<10^{-10}\\ -\lg(1-L_{xy}) & \text{其他}\end{cases} \tag{11}$$

以第一次测量结果为基准，后两次测试所得频率响应曲线与基准曲线的相关系数分别为3.065 3和2.46，均大于DL/T 911—2004推荐的判定正常绕组的界限值2，证实本文所提的脉冲响应法如果仅分析频率响应低频段的信息，其重复性较好，完全满足工程实际需要。

### 2.2 故障变压器测试

将脉冲响应法应用于测量大型电力变压器的绕组状态，对一台110 kV电力变压器开展连续测试，在其停运后，按照图3所示的接线方式，获得了c相低压绕组的离线频率响应曲线，如图5所示。该曲线为健康绕组的频率响应。在该变压器发生近区短路故障而停运后，继续对该相绕组进行测试，获得了故障变压器的频率响应曲线，结果也呈现在图5中。

图5中，两条频率响应曲线在100 kHz以内存在明显差异，各波峰波谷对应谐振频率和增益的信息如表1和表2所示。在第一个波谷处，故障变压器频率响应的波谷相比健康频率响应的波谷向高频方向有较为明显的偏移。另外，在65～75 kHz区间内，两条频率响应的波峰波谷对应频率和增益均存在较为显著的差异。根据2.1节相关系数的计算公式，求得频率响应曲线的相关系数为1.65，综合分析频率响应曲线的波峰波谷情况、波形形态变化情况以及相关系数值，推断该相绕组可能存在故障。在该变压器解体与吊罩后，取出c相低压绕组，如图6所示。绕组从上至下的第17～26饼出现烧毁现象，这可能是由于匝间、线饼间绝缘受损引起的短路故障所致。实验结果证实了脉冲响应法能够有效地检测出绕组匝间短路故障。

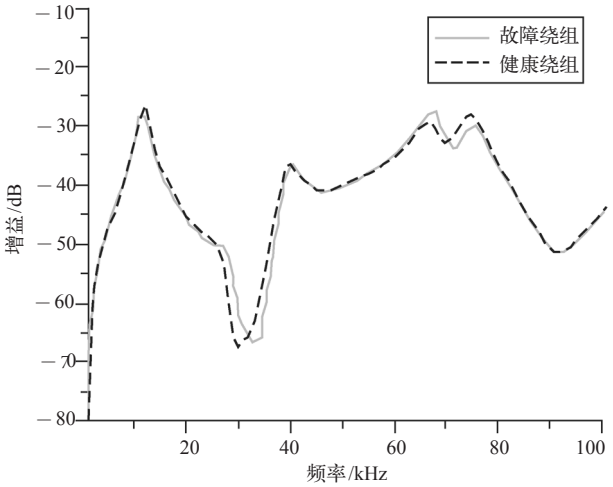


图5 变压器故障前后的频率响应曲线

Fig. 5 Frequency response curves of power transformer before and after the fault

表1 频率响应曲线的波峰波谷频率信息

Tab. 1 Frequency information of peaks and valleys of frequency response

（单位：kHz）

| 频率 | 波峰 | | | | 波谷 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 健康绕组 | 12 | 40 | 67 | 75 | 30 | 46 | 70 | 92 |
| 故障绕组 | 11 | 40 | 68 | 75 | 33 | 46 | 72 | 92 |

表2 频率响应曲线的波峰波谷增益信息

Tab. 2 Gain information of peaks and valleys of frequency response

（单位：dB）

| 增益 | 波峰 | | | | 波谷 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 健康绕组 | −26.5 | −36.4 | −29.4 | −28.1 | −67.4 | −41 | −32.8 | −51.5 |
| 故障绕组 | −28.1 | −37 | −27.6 | −30.1 | −66.8 | −41 | −33.8 | −51.5 |

图6 变压器解体吊罩结果

Fig. 6 Result of disassembling and hanging cover the transformer

## 3 测试注意事项

在使用脉冲响应法进行变压器绕组故障测试时，需要注意以下一些事项：

1）每次测试过程尽量保证使用的测试引线、电缆的型号和长度等参数一致，并且尽量采用长度较短的线缆，减小因测试引线差异以及线缆引入电路的杂散参数对测量结果的影响[12]。

2）现场测试应适当调节脉冲电源的幅值参数，保证测量响应信号具备较高的信噪比。另外，由于输出脉冲信号存在一定的扰动，建议在绕组的同一状态下进行多次测量，以多组数据的平均值作为分析数据，可有效提高检测信号的信噪比和重复性，提升频率响应曲线的清晰度。

3）在测试过程中，如检测信号具有较高的工频背景噪声，还需要在输出端加装高通滤波器进行噪声抑制。另外，也可设计数字滤波器，从软件上提取有用的信号分量。

## 4 结束语

本文介绍了脉冲响应法在变压器绕组变形故障离线检测中的应用。针对脉冲响应法进行离线测试的不足，提出只分析频率响应曲线的低频段信息，减小测试重复性和扰动对结果判定的影响。从电磁和电路角度介绍了绕组变形的机理，并给出了脉冲响应法的基本原理和接线方式。

在10 kV健康变压器上开展重复性实验，结果表明脉冲响应法所得频率响应曲线的重复性较好；进而对一台110 kV变压器进行连续测试，获得了变压器处于健康与故障两种状态的频率响应，解体吊罩的结果证实了脉冲响应法能够有效检测出绕组的匝间短路故障。虽然仅分析频率响应曲线的低频段丢失了部分信息，但仍然能检测出某些类型的故障，如匝间短路等电感性故障，脉冲响应法具有一定的工程应用价值。

### 参考文献


[1] 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．

[2] 王雄博，刘文里，李航，等．基于MagNet的短路阻抗法分析变压器绕组变形的仿真研究[J]．变压器，2016，53(11)：24-28．

[3] 郑含博，李予全，王晓辉，等．变压器绕组变形的低电压阻抗诊断方法及实例研究[J]．绝缘材料，2016，49(1)：66-70．

[4] 卢旻．110 kV电力变压器绕组变形综合分析[J]．变压器，2015，52(3)：56-59．

[5] 王珊珊，文正其，鄢小虎，等．接线方式对配电变压器绕组频率响应影响[J]．高压电器，2017，53(1)：186-191．

[6] YAO Chenguo，ZHAO Zhongyong，CHEN Yu，et al．Transformer winding deformation diagnostic system using online high frequency signal injection by capacitive coupling[J]．IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation，2014，21(4)：1486-1492．

[7] GOMEZ-Luna E，MAYOR G A，GONZALEZ-GARCIA C，et al．Current status and future trends in frequency-response analysis with a transformer in service[J]．IEEE Transactions on Power Delivery，2013，28(2)：1024-1031．

[8] 杜玮，杨慧峰，车俊禄，等．快速开关型变阻抗节能变压器绕组变形状态分析[J]．高压电器，2017，53(1)：64-70．

[9] 刘勇，汲胜昌，梁笑尘，等．检测变压器绕组变形的扫频阻抗法原理及应用[J]．绝缘材料，2014(3)：85-88．

[10] 赵仲勇，姚陈果，李成祥，等．基于短时Fourier变换的变压器绕组变形脉冲频率响应曲线获取方法[J]．高电压技术，2016，42(1)：241-247．

[11] 电力变压器绕组变形的频率响应分析法：DL/T 911—2004[S]．

[12] WANG M，VANDERMAAR A J，VALDIVIA K D．Condition monitoring of transformers in service by the low voltage impulse test method[C]．Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)，London，1999：45-48．

作者简介

师一卿

师一卿（1986－），男，研究生，高级工程师，主要研究方向为高压电气设备智能化检测技术。

刘伟（1977－），男，研究生，高级工程师，主要研究方向为高压电气设备智能化检测技术。

韩彦华（1974－），男，教授级高工，主要研究方向为电气设备状态评估及故障诊断技术研究工作。

(收稿日期：2019－06－17)EA