



中华人民共和国电力行业标准

DL/T 911 — 2004

电力变压器绕组变形的 频率响应分析法

Frequency response analysis on winding deformation
of power transformers

2004-12-14 发布

2005-06-01 实施

中华人民共和国国家发展和改革委员会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 检测原理	2
5 检测仪器的要求	2
6 检测方法	3
7 绕组变形的分析判断	3
附录 A (规范性附录) 用相关系数 R 辅助判断变压器绕组变形	6
附录 B (资料性附录) 变压器绕组变形的典型幅频响应特性曲线	7

前 言

本标准是根据原国家经贸委《关于确认 1999 年度电力行业标准制、修订计划项目的通知》（国经贸电力〔1999〕40 号）安排制定的，目的是规范和指导电力变压器绕组变形频率响应分析法（不包括低压脉冲法）的现场应用。

用频率响应分析法检测变压器绕组变形具有检测灵敏度高、现场使用方便、可在变压器不吊罩的情况下判断变压器绕组变形等优点，现已在电力行业广泛应用。

本标准的附录 A 为规范性附录，附录 B 为资料性附录。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业高压试验技术标准化技术委员会归口并负责解释。

本标准起草单位：中国电力科学研究院、广东省电力试验研究所、福建省电力试验研究院、安徽省电力科学研究院、华北电力科学研究院、武汉高压研究所。

本标准起草人：王圣、高克利、林春耀、欧阳旭东、张孔林、余国钢、何宏明、马继先、梅刚。

电力变压器绕组变形的频率响应分析法

1 范围

本标准规定了用频率响应分析法检测变压器绕组变形的基本要求。

本标准适用于 6kV 及以上电压等级电力变压器及其他特殊用途的变压器。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB1094.1 电力变压器 第一部分 总则 (eqv IEC 60076-1: 1993)

GB1094.5 电力变压器 第五部分 承受短路的能力 (neq IEC 60076-5: 1976)

DL/T596 电力设备预防性试验规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

绕组变形 winding deformation

指电力变压器绕组在机械力或电动力作用下发生的轴向或径向尺寸变化，通常表现为绕组局部扭曲、鼓包或移位等特征。变压器在遭受短路电流冲击或在运输过程中遭受冲撞时，均有可能发生绕组变形现象，它将直接影响变压器的安全运行。

3.2

双口网络 bilateral network

指具备一对输入端口和一对输出端口的网络。如果网络是由线性的电阻、电感（包括互感）和电容元件组成，且内部不含任何独立电源，则称之为无源线性双口网络。当频率较高时，变压器绕组可视为无源线性双口网络。

3.3

传递函数 transfer function

用拉普拉斯变换形式表示的无源双口网络的输出与输入之比。传递函数极点和零点的分布与双口网络的内部元件参数、连接方式以及端口连接的阻抗密切相关。

3.4

频率响应 frequency response

指正弦稳态情况下，网络的传递函数 $H(j\omega)$ 与角频率 ω 的关系。通常把 $H(j\omega)$ 幅值随 ω 的变化关系称为幅频响应， $H(j\omega)$ 相位随 ω 变化的关系称为相频响应。

3.5

频率扫描 frequency sweep

连续改变外施正弦波激励信号源的频率，测量网络在不同频率下的输出信号与输入信号之比，并绘制出相应的幅频响应或相频响应曲线。

4 检测原理

在较高频率的电压作用下, 变压器的每个绕组均可视为一个由线性电阻、电感(互感)、电容等分布参数构成的无源线性双口网络, 其内部特性可通过传递函数 $H(j\omega)$ 描述, 如图 1 所示。如果绕组发生变形, 绕组内部的分布电感、电容等参数必然改变, 导致其等效网络传递函数 $H(j\omega)$ 的零点和极点发生变化, 使网络的频率响应特性发生变化。

用频率响应分析法检测变压器绕组变形, 是通过检测变压器各个绕组的幅频响应特性, 并对检测结果进行纵向或横向比较, 根据幅频响应特性的差异, 判断变压器可能发生的绕组变形。

变压器绕组的幅频响应特性采用图 1 所示的频率扫描方式获得。连续改变外施正弦波激励源 U_s 的频率 f (角频率 $\omega=2\pi f$), 测量在不同频率下的响应端电压 U_2 和激励端电压 U_1 的信号幅值之比, 获得指定激励端和响应端情况下绕组的幅频响应曲线。图中: L 、 K 及 C 分别代表绕组单位长度的分布电感、分布电容及对地分布电容, U_1 、 U_2 分别为等效网络的激励端电压和响应端电压, U_s 为正弦波激励信号源电压, R_s 为信号源输出阻抗, R 为匹配电阻。

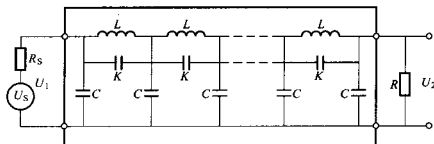


图 1 频率响应分析法的基本检测回路

测得的幅频响应曲线常用对数形式表示, 即对电压幅值之比进行如下处理

$$H(f) = 20 \log [U_2(f) / U_1(f)]$$

式中:

$H(f)$ —— 频率为 f 时传递函数的模 $|H(j\omega)|$;

$U_2(f)$, $U_1(f)$ —— 频率为 f 时响应端和激励端电压的峰值或有效值 $|U_2(j\omega)|$ 和 $|U_1(j\omega)|$ 。

5 检测仪器的要求

5.1 扫频检测范围

扫频检测范围应为 1kHz~1MHz, 可分成若干个频段分别检测。

5.2 扫频检测方式

采用线性分布的扫频检测方式。

5.3 扫描频率精确度

信号源输出正弦波信号的频率精确度应不大于 0.01%。

5.4 扫描频率间隔

扫描频率的间隔应小于 2kHz。

5.5 阻抗匹配方式

检测仪器应具备一个正弦波激励信号输出端和两个独立的信号检测端。其中, 正弦波信号源 U_s 的输出阻抗 R_s 应为 50Ω , 且输出端应通过同轴屏蔽电缆直接与被测变压器绕组的激励端连接; 两个独立信号检测端的输入阻抗不应低于 $1M\Omega$, 且应通过同轴屏蔽电缆分别连接到被测变压器绕组的激励端和响应端, 并在被测绕组的响应端连接 50Ω 的匹配电阻 R 。

所使用的同轴屏蔽电缆的波阻抗应为 50Ω , 电缆长度宜为 15m~20m。

5.6 检测精确度

检测仪器应具备 $-100\text{dB} \sim 20\text{dB}$ 的动态检测范围，且在 $-80\text{dB} \sim 20\text{dB}$ 范围内的检测精确度应小于 $\pm 1\text{dB}$ 。

5.7 选频滤波特性

检测仪器应具备选频滤波功能，通频带的宽度应小于选频滤波器中心频率的5%。

5.8 数据存储格式

应采用纯文本格式保存检测数据，以便数据的传递和比较。

6 检测方法

6.1 变压器绕组变形检测应在所有直流试验项目之前或者在绕组充分放电以后进行。应根据接线要求和接线方式，逐一对变压器的各个绕组进行检测，分别记录幅频响应特性曲线。

6.2 接线要求

6.2.1 检测前应拆除与变压器套管端子相连的所有引线，并使拆除的引线尽可能远离被测变压器套管。对于套管引线无法拆除的变压器，可利用套管末屏抽头作为响应端进行检测，但应注明，并与同样条件下的检测结果作比较。

6.2.2 变压器绕组的幅频响应特性与分接开关的位置有关，宜在最高分接位置下检测，或者应保证每次检测时分接开关均处于相同的位置。

6.2.3 因检测信号较弱，所有接线均应稳定、可靠，减小接触电阻。

6.2.4 两个信号检测端的接地线均应可靠连接在变压器外壳上的明显接地端（如铁芯接地端），接地线应尽可能短且不应缠绕。

6.3 接线方式

应按图 2 所示的方式选定信号的激励（输入）端和响应（检测）端，以便日后对检测结果进行标准化管理。

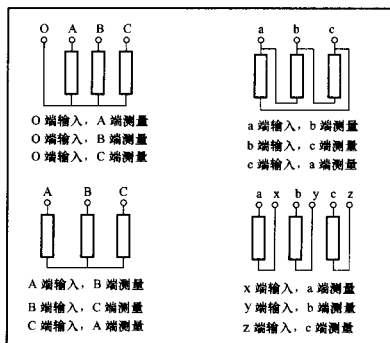


图 2 变压器的几种常用检测接线方式

7 绕组变形的分析判断

7.1 用频率响应分析法判断变压器绕组变形，主要是对绕组的幅频响应特性进行纵向或横向比较，并综合考虑变压器遭受短路冲击的情况、变压器结构、电气试验及油中溶解气体分析等因素。根据相关系数的大小，可较直观地反映出变压器绕组幅频响应特性的变化，通常可作为判断变压器绕组变形的

DL/T 911 — 2004

辅助手段。用相关系数辅助判断变压器绕组变形的方法见附录 A。

7.2 纵向比较法

纵向比较法是指对同一台变压器、同一绕组、同一分接开关位置、不同时期的幅频响应特性进行比较,根据幅频响应特性的变化判断变压器的绕组变形。该方法具有较高的检测灵敏度和判断准确性,但需要预先获得变压器原始的幅频响应特性,并应排除因检测条件及检测方式变化所造成的影响。

图 3 是某台变压器在遭受突发性短路电流冲击前后测得的低压绕组幅频响应特性曲线。遭受短路电流冲击以后的幅频响应特性曲线(LaLx02)与冲击前的曲线(LaLx01)相比较,部分波峰及波谷的频率分布位置明显向右移动,可判定变压器绕组发生变形。

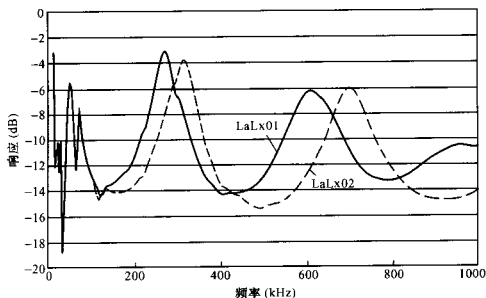


图 3 某台变压器在遭受短路电流冲击前后的幅频响应特性曲线

7.3 横向比较法

横向比较法是指对变压器同一电压等级的三相绕组幅频响应特性进行比较,必要时借鉴同一制造厂在同一时期制造的同型号变压器的幅频响应特性,来判断变压器绕组是否变形。该方法不需要变压器原始的幅频响应特性,现场应用较为方便,但应排除变压器的三相绕组发生相似程度的变形或者正常变压器三相绕组的幅频响应特性本身存在差异的可能性。

图 4 是某台三相变压器在遭受短路电流冲击以后测得的低压绕组幅频响应特性。曲线 LcLa 与曲线 LaLb、LbLc 相比,波峰和波谷的频率分布位置以及分布数量均存在差异,即三相绕组的幅频响应特性一致性较差。而同一制造厂在同一时期制造的同型号变压器的三相绕组的幅频响应特性一致性却较好(图 5 所示),故可判定变压器在遭受突发性短路电流冲击后绕组变形。

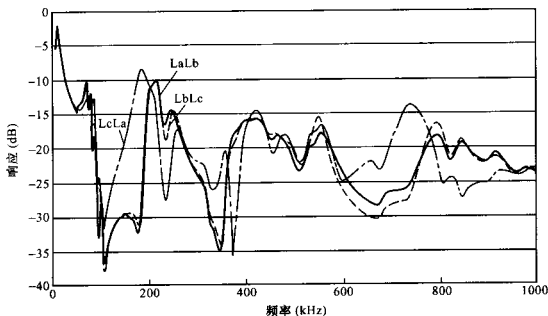


图 4 某台变压器遭受突发短路后三相低压绕组的幅频响应特性曲线

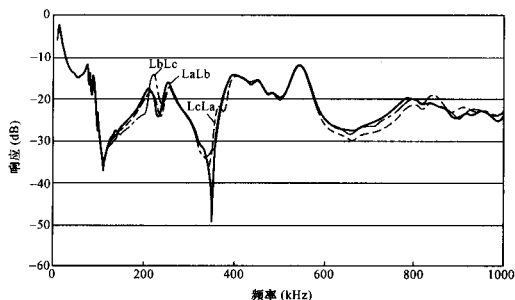


图5 与图4同型号变压器的三相低压绕组幅频响应特性曲线

7.4 绕组变形分析

7.4.1 典型的变压器绕组幅频响应特性曲线，通常包含多个明显的波峰和波谷。经验及理论分析表明，幅频响应特性曲线中的波峰或波谷分布位置及分布数量的变化，是分析变压器绕组变形的重要依据。变压器绕组变形的典型幅频响应特性曲线参见附录B。

7.4.2 幅频响应特性曲线低频段（1kHz~100kHz）的波峰或波谷位置发生明显变化，通常预示着绕组的电感改变，可能存在匝间或饼间短路的情况。频率较低时，绕组的对地电容及饼间电容所形成的容抗较大，而感抗较小，如果绕组的电感发生变化，会导致其频响特性曲线低频部分的波峰或波谷位置发生明显移动。对于绝大多数变压器，其三相绕组低频段的响应特性曲线应非常相似，如果存在差异则应及时查明原因。

7.4.3 幅频响应特性曲线中频段（100kHz~600kHz）的波峰或波谷位置发生明显变化，通常预示着绕组发生扭曲和鼓包等局部变形现象。在该频率范围内的幅频响应特性曲线具有较多的波峰和波谷，能够灵敏地反映出绕组分布电感、电容的变化。

7.4.4 幅频响应特性曲线高频段（>600kHz）的波峰或波谷位置发生明显变化，通常预示着绕组的对地电容改变，可能存在绕圈整体移位或引线位移等情况。频率较高时，绕组的感抗较大，容抗较小，由于绕组的饼间电容远大于对地电容，波峰和波谷分布位置主要以对地电容的影响为主。

附录 A

(规范性附录)

用相关系数 R 辅助判断变压器绕组变形

通过相关系数可以定量描述出两条波形曲线之间的相似程度，通常可作为辅助手段用于分析变压器的绕组变形情况，具体结果还应根据变压器的运行情况及其他信息综合判断。

设有两个长度为 N 的传递函数幅度序列 $X(k)$ 、 $Y(k)$ ， $k=0, 1, \dots, N-1$ ，且 $X(k)$ 、 $Y(k)$ 为实数，相关系数 R 可按照下列公式计算。

A.1 计算两个序列的标准方差

$$D_x = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[X(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \right]^2 \quad D_y = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[Y(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Y(k) \right]^2$$

A.2 计算两个序列的协方差

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

A.3 计算两个序列的归一化协方差系数

$$LR_{xy} = C_{xy} / \sqrt{D_x D_y}$$

A.4 按照如下公式计算出符合工程需要的相关系数 R_{xy}

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

A.5 根据表 A.1 判断变压器绕组的变形程度

表 A.1 相关系数与变压器绕组变形程度的关系 (仅供参考)

绕组变形程度	相关系数 R
严重变形	$R_{LF} < 0.6$
明显变形	$1.0 > R_{LF} \geq 0.6$ 或 $R_{MF} < 0.6$
轻度变形	$2.0 > R_{LF} \geq 1.0$ 或 $0.6 \leq R_{MF} < 1.0$
正常绕组	$R_{LF} \geq 2.0$ 和 $R_{MF} \geq 1.0$ 和 $R_{HF} \geq 0.6$

注： R_{LF} 为曲线在低频段（1kHz～100kHz）内的相关系数；
 R_{MF} 为曲线在中频段（100kHz～600kHz）内的相关系数；
 R_{HF} 为曲线在高频段（600kHz～1000kHz）内的相关系数。

附录 B
(资料性附录)

变压器绕组变形的典型幅频响应特性曲线

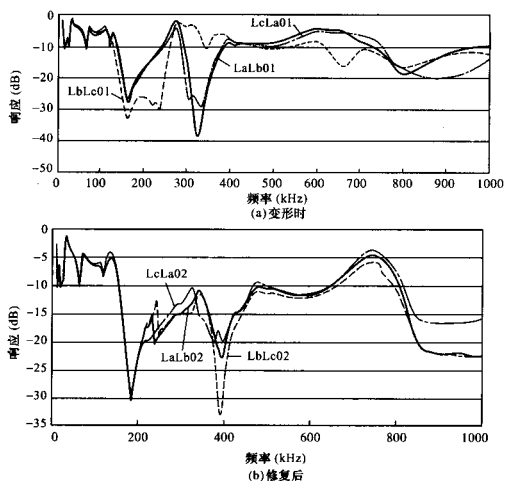


图 B.1 SFPSZ7-120000/220 变压器低压绕组变形时和修复后的幅频响应曲线

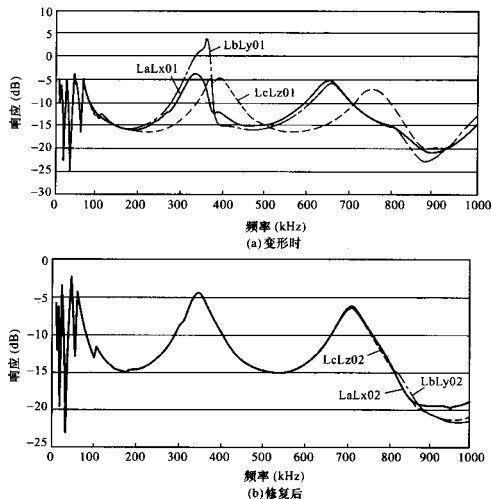


图 B.2 SFPSZ7-150000/220 变压器低压绕组变形时和修复后的幅频响应曲线

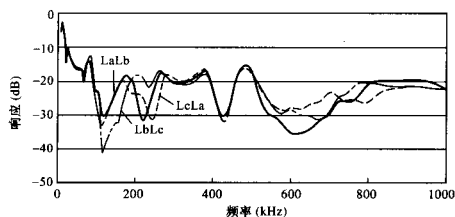


图 B.3 SFPS8-31500/110 变压器低压绕组变形时的幅频响应曲线

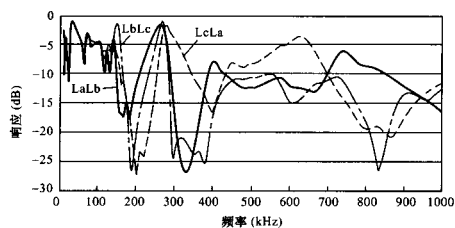


图 B.4 SFPSZ7-150000/220 变压器低压绕组变形时的幅频响应曲线

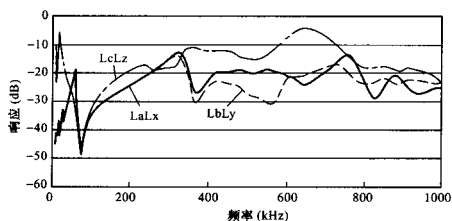


图 B.5 SF9-31500/110 变压器低压绕组变形时的幅频响应曲线

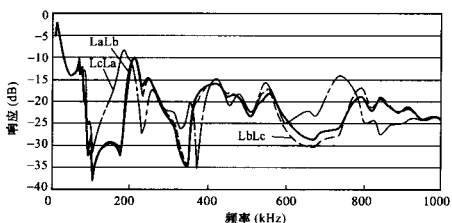


图 B.6 SF7-6300/110 变压器低压绕组变形时的频率响应曲线

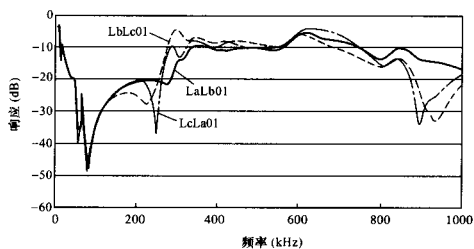


图 B.7 SFZ-31500/110 (H) 变压器低压绕组变形时的幅频响应曲线

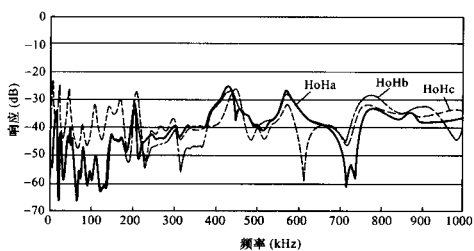


图 B.8 SSPSO3-120000/220 变压器高压绕组变形时的幅频响应曲线

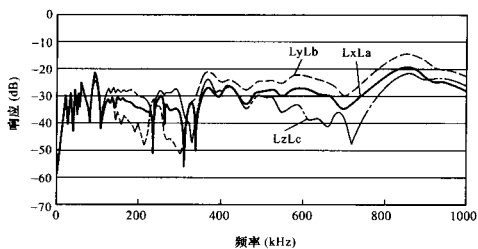


图 B.9 SFSLZ7-50000/110 变压器低压绕组变形时的幅频响应曲线