

电力变压器绕组变形诊断分析

姚森敬, 欧阳旭东, 林春耀

(广东省电力试验研究所, 广东省广州市 510600)

摘要:应用频率响应分析法判断变压器绕组在遭受短路冲击后是否发生严重变形具有重要的意义。介绍了频率响应法的基本原理并在大量实例的基础上,提出了横向比较分析法,即通过比较变压器三相绕组频率响应特性曲线的一致性及与同厂同型变压器绕组频率响应曲线对比来分析判断绕组变形程度;提出了定量表示 2 条曲线一致性的相关系数的概念,得出相关系数大小与曲线一致性的关系;提出了测试接线方法及测试过程中应注意的主要事项。

关键词:变压器;绕组变形;故障诊断;比较法

中图分类号: TM406

0 引言

应用频率响应法(FRA)来测量受短路冲击后的变压器内部是否存在绕组变形,已得到广泛的应用。广东省电力试验研究所从 1996 年开始,对 110 kV 及以上电压等级的变压器进行绕组变形测试,1999 年又通过广电集团公司科研立项进一步研究判据。至 2002 年底,所测量的 110 kV 及以上电压等级的变压器总数已超过 2 000 台次,积累了丰富的经验,在国内率先编制了《电力变压器绕组变形测试导则(频率响应法)》,目前该导则已成为广东省电网公司的企业标准。在此基础上,与中国电力科学研究院合作,已将该导则修编为电力行业标准(DL/T911—2004)。该导则对绕组变形工作的推广起到了较好的指导作用,应用该导则提供的方法在广东省共发现了 47 台变压器存在严重绕组变形,并通过吊检全部得到了确认,使变压器得到及时的维修,避免了变压器在运行中发生事故。据估算,仅东莞分公司因避免事故而创造的直接经济效益就高达 2.2 亿元,广州分公司因避免事故而创造的直接经济效益就高达 2.6 亿元,效益十分可观。

《电力变压器绕组变形测试导则(频率响应法)》对变压器绕组变形的诊断分析方法主要有相关系数比较法、纵向比较法和横向比较法。本文通过实例重点对横向比较法进行介绍。

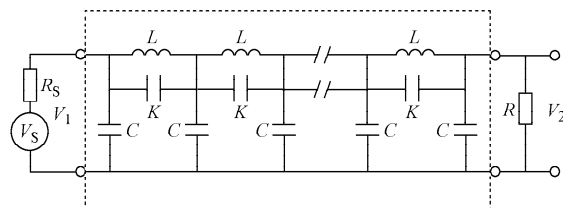
1 频率响应法的基本原理

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。若绕组发生变形,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。连续改变外加正弦波激励源 V_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 V_2 和激励端电压 V_1 的信号幅值比,获得指定激励端和响应端情况下绕组的幅频响应曲线。



L, K, C 分别为绕组单位长度的分布电感、分布电容及对地分布电容;
 V_1, V_2 分别为等效网络的激励端电压和响应端电压; V_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
Fig. 1 Circuit of frequency response analysis method

测得的幅频响应曲线常用对数形式表示,即对电压幅值比进行如下处理:

$$H(f) = 20 \lg \frac{V_2(f)}{V_1(f)}$$

式中: $H(f)$ 为频率 f 时传递函数的模 $|H(j\omega)|$; $V_2(f), V_1(f)$ 分别为频率为 f 时响应端和激励端电压的峰值或有效值 $|V_2(j\omega)|, |V_1(j\omega)|$ 。

2 诊断分析方法

频率响应分析法诊断变压器绕组变形的主要原理是建立在比较绕组频率响应特性变化的基础上的,即相当于比较变压器绕组的结构特征“指纹”图。具体而言,是通过对不同曲线的谐振点的个数、位置、幅值、趋势等来判断曲线间的相似程度,即一致性。为了定量表示曲线的相近程度,引入了相关系数 R 作为量化结果来表示所比较特性曲线的相近程度, R 值越大,表示曲线的相似程度越好。

相关系数 R 可按照下列公式计算。设有 2 个长度为 N 的传递函数幅度序列 $X(k)$ 和 $Y(k)$, $k=0,1,\cdots,N-1$,且 $X(k)$ 和 $Y(k)$ 为实数。

1)计算 2 个序列的标准方差:

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

2)计算 2 个序列的协方差:

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

3)计算 2 个序列的归一化协方差系数:

$$L_{R_{xy}} = \frac{C_{xy}}{\sqrt{D_x D_y}}$$

4)按照如下公式计算出符合工程需要的相关系数 R_{xy} :

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

通过大量测试分析及结合变压器吊检结果,得出相关系数与曲线相似的关系如下:一般而言, $R>1.0$,则认为曲线相似程度好; $R<0.6$,则认为曲线相异很大; $0.6<R<1.0$,则认为曲线轻度相异。

对同一台变压器的同一相前后 2 次测试图谱进行比较,特别是与投运前新变压器所测的特征图谱进行比较,来判断变压器是否存在绕组变形,称为纵向比较法;以同一台变压器的 A,B,C 三相图谱进行比较,或同型号变压器的同一相图谱进行比较,以此判断其是否存在绕组变形,则称为横向比较法。对于大部分缺乏原始特征图谱的变压器,在实际工作中需要更多地使用横向比较法。

以 A,B,C 三相图谱的差异来判断绕组是否变形,其理由是对于制造工艺良好的变压器,其三相绕组的结构基本是一致的,因此三相图谱也是一致的。以同厂同型变压器的图谱进行比较,其理由是同厂家同型号的产品,其设计水平和制造工艺是相对固

定的,绕组的结构也是相似的,因此其特征图谱具有一致性。在现场工作中,往往同一个变电站的几台变压器采用的是同厂同型的产品,通过测量和比较这些变压器的图谱,则可以避免或减少误判。前期的变压器绕组变形测试工作由于缺乏变压器的原始“指纹”图,因此应采用横向比较法作为分析的主要手段。

3 实例

3.1 统计数据

在某电力分公司进行变压器绕组变形普查时,发现有多台某厂生产的 SFZ8-40000/110 型变压器三相图谱差别很大,可能存在较为严重的绕组变形。由于该批产品自 1993 年投运以来,大多数在运行中均遭受过不同程度的短路冲击,部分变压器绕组内部可能存在绕组变形的累积效应。这种变形不但会使绕组机械强度严重降低,而且还可能造成匝间绝缘损伤导致发生匝间短路,或减小了局部的绝缘距离造成局部电场集中,因而成为事故的隐患。为了准确判断绕组是否有变形,对所测的该变压器厂同型的 14 台变压器进行了比较,结果如表 1 所示。

表 1 14 台 SFZ8-40000/110 型变压器绕组变形测量结果
Table 1 Winding deformation test results of 14 transformers of type SFZ8-40000/110

变压器 序号	高压				低压			
	一致性	R_{12}	R_{23}	R_{31}	一致性	R_{12}	R_{23}	R_{31}
1	好	1.8	1.7	2.2	好	1.6	1.2	1.8
2	好	1.7	2.2	1.8	好	1.2	1.2	1.1
3	好	2.0	2.3	2.2	好	1.7	1.5	1.4
4	好	1.3	2.3	1.4	好	1.8	1.6	1.8
5	好	2.2	2.3	2.6	好	1.7	1.2	1.4
6	好	2.4	2.1	2.1	好	1.8	1.3	1.3
7	好	2.2	2.6	2.3	好	1.5	1.6	1.4
8	好	2.2	2.3	2.3	好	1.3	4.6	1.3
9	好	1.6	1.8	1.9	差	0.7	1.6	0.6
10	好	2.2	2.1	2.3	差	1.7	0.8	0.7
11	好	1.1	1.1	1.9	差	0.5	1.0	0.9
12	好	2.0	2.4	2.1	差	0.5	1.2	0.6
13	好	2.2	1.7	1.6	差	0.7	0.5	0.9
14	好	2.1	2.0	2.0	差	0.4	0.9	0.7

注: R_{12} 为曲线 1 和 2 的相关系数, R_{23} 为曲线 2 和 3 的相关系数, R_{31} 为曲线 3 和 1 的相关系数;对于高压,1 为 OA 相,2 为 OB 相,3 为 OC 相;对于低压,1 为 AB 相,2 为 BC 相,3 为 CA 相。

3.2 结果分析

应用横向比较法,先对测量结果进行三相图谱比较,当三相一致性较好且相关系数 R 都大于 1 时,可以判断绕组特性良好,变压器没有变形;当三相一致性不好及相关系数 $R<1$ 时,必须进行同厂

同型变压器图谱的比较,以得到进一步确认。

从测试结果可看到,所测 14 台变压器高压绕组 A,B,C 三相频谱曲线间相关系数 R 全部大于 1,波形一致性都很好,因此,从三相的横向比较可以判断全部变压器高压绕组没有变形。低压绕组中,前 8 台变压器一致性较好,且相关系数 R 全部大于 1;后 6 台一致性较差,且相关系数 R 全部小于 1,其中包括有 4 台变压器 $R < 0.6$ 。

从波形分析上看,14 台同型号的变压器图谱曲线谐振峰谷的个数、位置、幅值、趋势基本上是相似的,但序号 1~序号 8 的变压器的特性明显优于序号 9~序号 14 的变压器。由于有 8 台变压器三相一致性较好,说明并非由于变压器结构本身影响了图谱的差异,从而证明了一致性差且相关系数 $R < 1$ 的 6 台变压器(序号 9~序号 14)可能存在绕组变形,其中相关系数 $R < 0.6$ 且一致性差的序号 11~序号 14 的变压器变形最为严重,而序号 10 和序号 9 则可能有轻度变形。图 2 是序号 8 变压器的图谱,可以看到其三相一致性较好。图 3、图 4 分别是序号 13、序号 14 这 2 台三相一致性较差的变压器图谱,其余图谱省略。比较各图谱,可以看到图 3、图 4 图谱与图 2 图谱相比在频率为 100 kHz~300 kHz 时有较大差异。

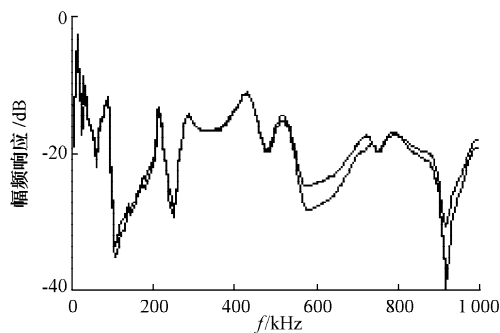


图 2 序号 8 变压器低压频谱

Fig. 2 Frequency response curves of LV side of No. 8 transformer

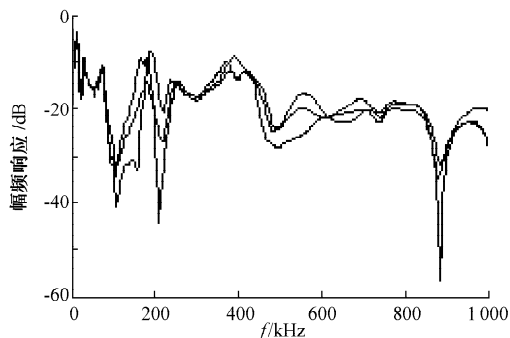


图 3 序号 14 变压器低压频谱

Fig. 3 Frequency response curves of LV side of No. 14 transformer

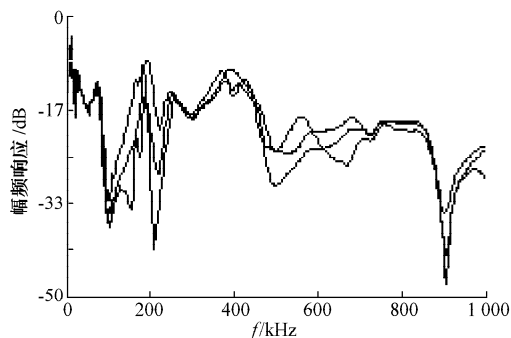
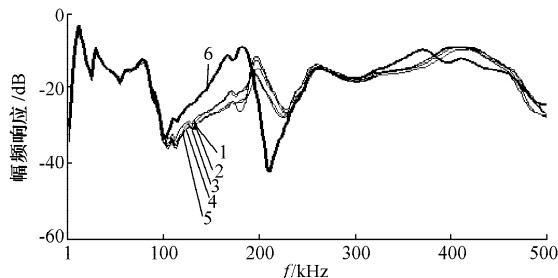


图 4 序号 13 变压器低压频谱

Fig. 4 Frequency response curves of LV side of No. 13 transformer

为进一步准确判断,还可将同型变压器的同相进行横向比较。如图 5 所示,将 6 台变压器的低压 BC 相图谱进行对比,曲线 1~曲线 5 分别来自序号 3~序号 7 的变压器,这些变压器通过三相横向对比已证明特性良好;而曲线 6 来自序号 13 的变压器,怀疑有绕组变形。可以看到,前 5 条曲线呈现较良好的一致性,而频谱曲线 6 在频率 $f = 200$ kHz 的第 4 个谐振峰明显提前至 150 kHz 附近,频率 $f = 400$ kHz 的第 6 个谐振峰则提前至 370 kHz 附近,因此可判断出序号 13 的变压器低压绕组存在较严重的变形。用同样方法可以判断其他变压器的绕组变形情况。



1: 序号 3 变压器低压 BC 相; 2: 序号 4 变压器低压 BC 相
3: 序号 5 变压器低压 BC 相; 4: 序号 6 变压器低压 BC 相
5: 序号 7 变压器低压 BC 相; 6: 序号 13 变压器低压 BC 相

图 5 SFZ8-40000/110 型变压器低压 BC 频谱对比

Fig. 5 Frequency response curves of LV side BC-phase of six transformers with a same type

4 吊检情况

根据绕组变形诊断结论,对绕组变形最严重的序号 11~序号 14 变压器分别进行了吊检,吊检结果很好地验证了判断结论。4 台变压器吊检情况类似,表现为:①调压线圈、高压线圈及引线基本完好,未发现变形或整体移位;②低压绕组严重变形,如序号 11 变压器 A,B,C 三相(A 相变形程度略轻),序号 12 变压器低压 B 相,序号 13 变压器低压 B,C

相,序号 14 变压器 B,C 相,绕组均产生幅向变形,出现整体鼓包突起,局部地方由于变形严重已出现散匝。

5 测试注意事项

绕组变形测试是比较灵敏的试验,易受各种偶然因素的影响。为了保证得到可靠的结果,测试中应注意如下事项:

1) 应按照图 6 所示的方式选定信号的输入(激励)端和测量(响应)端,以便日后对检测结果进行标准化管理。

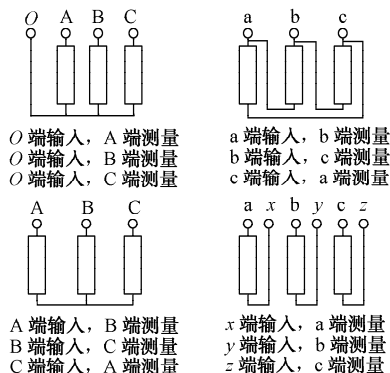


图 6 变压器几种常用检测接线方式

Fig. 6 General test methods of winding connection

2) 检测前应拆除与变压器套管端部相连的所有引线,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,并应与同样条

件下的检测结果进行比较。

3) 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。

4) 因检测信号较弱,所有接线均应稳定、可靠,减小接触电阻。

5) 2 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(如铁心接地端),接地线应尽可能短且不应缠绕。

6 结语

绕组变形测量作为一种变压器状态诊断的新方法,开展几年来取得了显著的成绩,广东省电力试验研究所在国内率先编制了《电力变压器绕组变形测试导则(频率响应法)》,并在此基础上形成了电力行业标准 DL/T 911—2004《电力变压器绕组变形的频率响应分析法》。本文以横向比较法为例,介绍如何应用该标准对测试图谱进行诊断分析,并准确地判断出多台变压器的绕组变形,避免了变压器重大事故的发生。实践证明,该分析方法可作为绕组变形试验的主要判断手段。

姚森敬(1969—),男,高级工程师,主要从事变压器试验研究工作。E-mail: sankyyao@163.com

欧阳旭东(1972—),男,硕士,高级工程师,主要从事变压器试验研究工作。

林春耀(1965—),男,硕士,高级工程师,主要从事变压器试验研究工作。

Analysis on Winding Deformation Diagnosing of Power Transformers

YAO Sen-jing, OUYANG Xu-dong, LIN Chun-yao

(Guangdong Power Test Research Institute, Guangzhou 510600, China)

Abstract: It's significant to use frequency response analysis (FRA) to determine whether the windings of power transformers have serious deformation after short-circuit current shock. In terms of the fundamental principle of FRA and a great deal of field experiences, a horizontal comparing approach is presented, that is, to analyze the windings' deformation in terms of comparing the coherence of the windings' frequency response characteristic curve of one phase with those of other two phases as well as in comparison with other same type transformers' curves manufactured by the same factory. Furthermore, a pertinence coefficient is presented to quantify the coherence of two curves. And the relationship between the pertinence values and the curves' coherence is obtained. In particular, the test method and main cares needing careful attentions are also described in this paper.

Key words: power transformer; winding deformation; fault diagnosis; comparison methods