

文章编号:1001-1609(2006)01-0066-04

## 正确应用频率响应相关系数分析和判断绕组变形

程 盛

(湖北省宜昌供电公司, 湖北 宜昌 443003)

Analysis and Judgement of the Winding Deformation Based on the  
Frequency Response Relevant Factor

CHENG Sheng

(Hubei Yichang Power Supply Company, Yichang 443003, China)

**摘要:** 介绍了某电网利用频率响应测试变压器绕组变形的情况,分析总结了其特点和影响因素,提出了绕组变形的基本诊断方法,并举出实例阐述实际应用过程中如何避免误判断。

**关键词:** 变压器; 绕组; 变形; 频率响应分析; 短路阻抗

**中图分类号:** TM51

**文献标识码:** B

**Abstract:** The paper introduces the development situation of the assay of transformer winding deformation based on the frequency response in Yichang power network. The character and influence factor are analyzed, and the basic diagnosis method about the winding deformation is put forward. Examples are given to explain how to avoid making wrong judgment during practical process.

**Key words:** transformer; winding; deformation; frequency response analysis; short circuit impedance

## 1 前言

变压器在运行中不可避免地要受到短路电流的冲击,如果短路故障发生在变压器出口附近,变压器将承受巨大的、不均匀的轴向和径向应力作用,变压器绕组可能失去稳定性,导致局部扭曲、鼓包或移位等永久变形现象,严重时将直接造成突发性损坏。

变压器绕组发生局部变形后,有的会立即发生损坏事故,更多的仍能继续运行一段时间,运行时间长短取决于变形程度和部位。绝缘距离发生改变或绝缘受到损伤会导致局部放电发生,遇到过电压作用时,有可能发生匝间、饼间击穿,导致突发性绝缘事故,甚至在正常运行电压下,因局部放电的长期作用造成绝缘击穿;绕组机械性能下降,抗短路能力降低,再次遭受故障短路电流冲击时,绕组的变形现象加剧,甚至因承受不住巨大的电动力作用而发生损坏。

## 2 频率响应法原理

变压器绕组在较高频率的电压作用下,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。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,导致其等效网络的传递函数  $H(j\omega)$  的零点和极点发生变化,从而使网络的频率响应特性发生变化。

变压器绕组的幅频响应特性采用扫频检测方式获得,见图 1。连续改变外施正弦波激励源  $U_1$  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的绕组幅频响应特性。测得的幅频响应特性曲线常用对数形式表示,即对电压幅值之比进行如下处理:  $H(f)=20\text{Log}[U_2(f)/U_1(f)]$  式中;  $H(f)$  为频率  $f$  时,传递函数的模为  $|H(j\omega)|$ ;  $U_2(f)$  和  $U_1(f)$  的频率为  $f$  时,响应端和激励端电压的峰值或有效值为  $|U_2(j\omega)|$  和  $|U_1(j\omega)|$ 。

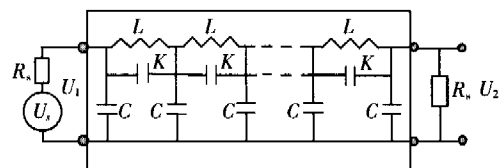


图 1 频率响应分析法的基本检测回路

图中;  $L, K$  及  $C$  分别为绕组单位长度的电感、电容及对地电容,  $U_1, U_2$  分别为等效网络的激励端电压和响应端电压,  $U_1$  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。

当变压器发生变形或位移等现象时,其变形位置所在的线匝对地电容或对其它线匝的电容以及自身的电感也会发生变化,其频率响应特性也随之改变,即频率响应发生幅度变化和谐振频率发生改变。

收稿日期:2005-09-16; 修回日期:2005-11-11

作者简介:程 盛(1971-),男,湖北宜昌人,高级工程师,从事电气试验技术管理。

因此,可以通过比较变压器绕组的频响特性来诊断变压器绕组是否变形。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程度的重要依据。扫描频率由低向高变化时,感抗和容抗起的作用也不相同,由电感起主要作用逐渐向电容起主要作用过渡。幅频响应特性曲线低频段(1~100 kHz)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情况。幅频响应特性曲线中频段(100~600 kHz)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。幅频响应特性曲线高频段(>600 kHz)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,可能在线圈整体移位或引线位移等情况<sup>[1]</sup>。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。

相关系数是表明两条曲线波峰或波谷分布位置及分布数量变化的量化参数,直观地描述了频响曲线之间的相似程度。数值越大表明两条曲线重合度越好,越小表明重合度越差,它是判断绕组是否变形的主要数值判据。TDT5型变压器绕组变形测试仪对相关系数的规定见表1,在实际应用中发现,其高频段相关系数受外界影响较大,其相关系数仅供参考。

表1 绕组变形相关系数注意值表

绕组变形程度	相关系数		
	低频段 $R_{lf}$	中频段 $R_{mf}$	高频段 $R_{hf}$
严重变形	<0.6		
明显变形	$1.0 > R_{lf} > 0.6$	<0.6	
轻度变形	$2.0 > R_{lf} > 1.0$	$0.6 < R_{mf} < 1.0$	<0.6
正常绕组	>2.0	>1.0	>0.6

### 3 测试情况

近年来,频率响应分析技术在对遭受短路冲击、突发事故和碰撞的变压器绕组变形测试方面得到了广泛应用,并取得了良好效果。鉴于目前尚无统一的判据和标准,在判断绕组是否变形时,与历史曲线比较就显得尤为重要。因此,对新安装和已运行变压器普查建立原始的绕组变形频率响应特性档案对以后判断结论的准确性有极大的帮助。

某供电公司于2002年5月开始进行原始频响曲线的建档工作,到目前为止,使用TDT5型变压器绕组变形测试仪测试了110 kV及以上电压等级80台次变压器,Y绕组接线方式是:中性点激励,绕组线端分别响应;D绕组接线方式是:a,b,c激励,b,c,a分别响应。对组别为YN,yn0,d11的变压器原始“指纹”曲线进行分析,其特点和结论如下:

(1)中低频部分(10~600 kHz)的频响曲线具有

较丰富的谐振点,这些谐振点的变化可以灵敏地反映变压器绕组断股、鼓包、扭曲、饼间错位等变形情况,而高频部分(600 kHz以上)虽能反映出变压器绕组位移,但受杂散电容影响和干扰较大<sup>[1]</sup>。在分析判断时,应重点注意中、低频部分,高频部分仅作参考。

(2)电压等级越高,匝数越多,频响曲线吻合得越好。在网改造无载调压改为有载调压中,有许多老变压器加装了调压变,调压变的三相频响曲线差别较大。

(3)频响曲线波峰波谷的位置取决于分布电感与分布电容,绕组电阻影响较小,绕组三相电阻不平衡对相关系数影响不大。直流电阻测试前后,磁路中的剩磁对频响曲线有一定的影响,但影响不大。

(4)对原始频响曲线相关系数进行分析,发现有一部分110 kV变压器三相频响曲线并不完全吻合,三相频响曲线存在差异的原因主要有:①绕组本身固有分布参数的差异,每相绕组电抗值一定,但分布电容值不一定相同(如绕组与相邻绕组距离不等,与油箱壁距离不等,杂散电容不等),导致无源线性双口网络不一致;②绕组变形测试时变电站电磁场干扰,三相套管端子处感应电幅值和相位不同,感应电压值远大于仪器输出电压值,使得三相绕组频响曲线不一致。如果按正常变压器低频相关系数应大于2,中频相关系数应大于1的频响曲线相关系数的判据来衡量,有许多110 kV电压等级的新变压器都要得出已变形的结论,所以在实际运用中不能以横向比较来判定变压器已经变形。

(5)套管端子上的测试线夹与激励(响应)元件之间的引线长短对测试影响较大<sup>[2]</sup>,引线长短是影响分析结果的关键所在。为了保证测试环境的一致性,有必要对试验引线的布置方式和信号源的位置做出约定,规定激励(响应)元件盒应悬于套管第3片(从上往下数)瓷裙处,这样保证了每次测试时引线长度的一致性。测试中还发现,变电站电源谐波分量太高,试验电压不稳,地网零序电流干扰,变电站强电晕,仪器附近有高谐振荡(电焊机等)等也会对曲线产生影响。笔者曾做过一次试验,30 m内如有电焊机工作,得出的频响曲线是一条有许多毛刺的直线,没有明显的波峰和波谷。

(6)电抗变化对相关系数的影响:笔者曾做过一次试验,夜明珠1号变,型号为SFZ9-20000/110±8×1.25%/11,表2为分接开关处于1,2,3档时的A相频响曲线相关系数。

由表2可以看出:对于绕组短路类型的变形,中频段反映最为灵敏。当短路匝数大于1.25%时(相差一档),中频段频响曲线变化明显;短路匝数大于2.5%(差两档)低频段才能明显反映。判断绕组是否存在匝间或饼间短路类型的变形时,应以中频段相

表 2 不同挡位时相关系数

	1,2 挡	2,3 挡	1,3 挡
低频段 $R_L$	2.26	2.42	1.75
中频段 $R_M$	0.53	0.43	0.26
高频段 $R_H$	0	0.72	0

关系数为主要依据,若当前曲线与原始指纹曲线相比,低频段相关系数小于 2 时,往往绕组存在 2.5% 及以上的匝间或饼间短路。同时还可看出:1 台变压器的三相绕组频响曲线在低频段一致性应相当好,若不一致要查找原因进行分析。

表 3 同型号同厂家变压器频响曲线相关系数表

序号	型号	出厂时间	高压绕组相关系数		中压绕组相关系数		低压绕组相关系数				
			低频	中频	低频	中频	低频	中频			
1	SFSZ7-12500/110	1988-04	A	0.76	1.81	Am	2.72	1.52	ab	3.29	2.21
			B	0.74	1.70	Bm	3.15	1.49	bc	3.20	2.34
			C	0.80	1.82	Cm	3.18	1.20	ca	2.87	1.90
2	SFSZ9-31500/110	2000-08	A	0.38	1.03	Am	1.05	0.82	ab	2.56	2.07
			B	0.42	0.97	Bm	1.20	0.78	bc	2.18	1.97
			C	0.43	0.95	Cm	0.96	0.86	ca	2.96	2.04
3	SFZ9-31500/110	2000-01	A	0.76	1.81	Am	2.72	1.52	ab	3.29	2.21
			B	0.74	1.70	Bm	3.15	1.49	bc	3.20	2.34
			C	0.80	1.82	Cm	3.18	1.20	ca	2.87	1.90
4	SFZ9-20000/110	2004-11	A	1.08	1.78	-	-	-	ab	1.55	1.53
			B	0.87	0.37	-	-	-	bc	1.59	1.58
			C	1.04	1.59	-	-	-	ca	1.59	2.52
5	SFPSZ1-120000/220	1983-06	A	1.96	1.73	Am	2.26	1.58	ab	2.46	2.00
		1984-01	B	2.03	1.78	Bm	2.35	1.42	bc	2.33	1.56
			C	1.97	1.82	Cm	2.40	1.90	ca	2.38	2.11

曲线仅有参考价值。

#### 4 绕组变形的分析和判断

根据测试数据对变压器绕组变形进行判断时一定要慎重,应反复多次在相同的条件下进行比较,并与原始频率响应曲线比较的结果为主要依据。没有原始数据时,若三相频响曲线一致性好,可认为绕组没有变形;若三相频响曲线一致性不好,不能轻易认为绕组发生了变形,变压器是否存在变形则须作进一步分析。因为绕组本身固有分布参数的差异也会造成相间频率响应曲线一定程度的不一致。

应用频响分析法判断变压器的变形状况是一门新技术,实际应用需积累更多的经验,是否变形应结合相关测试手段并参考相关信息进行分析。相关测试手段包括电气试验、短路阻抗测量、空载损耗、油质色谱分析等,必要时吊罩进行检查。相关信息包括变压器短路电流的大小、继电保护是否灵敏动作、故障录波图分析。

频响法可快速测量短路阻抗 0.2%~0.3% 的变化,但如何从量值上判断结果并与短路阻抗的变化统一起来,需积累经验。频响法进行变形分析判断目

(7)同型号同厂家变压器频响曲线相关系数分析:对宜昌电网中 5 种型号的 10 台变压器(其中 220 kV 变压器 2 台,110 kV 变压器 8 台)相关系数分析发现,同型号变压器低压侧对应绕组频响曲线一致性明显好于中高压侧绕组,高压侧一致性最差。具体数据见表 3,其原因:①高压套管位置较高,受感应电压影响较大。②引线及套管之间的杂散电容的影响。因此在实际判断绕组有无变形时,若无原始曲线需要与同厂同型同期变压器测试结果相比较时,应对高中低三侧绕组区别对待,高压侧绕组频响

前尚无一个公认的分析判断指标,再加上测试仪器灵敏度高,受外界因素影响较大,在实际工作中往往易引起误判断。笔者曾多次组织短路后绕组变形的诊断,在这里结合自己的实际工作经验仅举 3 个例子以阐述如何避免误判断。

(1)2003 年 7 月 9 日,雨天,220 kV 白家冲变电所 10 kV 白宝线白 803 开关线路故障,造成白 803 开关柜出线电缆短路,白家冲 2 号主变 10 kV 限流电抗器速断动作,主变三侧开关分闸。高、中、低三侧绕组频响曲线吻合性相当好,波峰、波谷分布相当一致,三侧绕组相关系数满足表 1 正常绕组的规定,可认为该变压器未出现变形。

(2)2004 年 6 月 14 日,雨天,110 kV 伍家岗变电站 10 kV 宜 12 开关线路因树障产生铁磁谐振过电压,造成 2 号主变 10 kV 侧开关相间闪络并发生爆炸,保护正确动作跳 2 号主变三侧开关。该变压器 2003 年 11 月曾做过绕组变形试验,留存了原始频响曲线,因此可以做纵向分析。中、低压绕组低段相关系数都大于 2,中频段都大于 1,认为中低压绕组未出现变形。高压绕组高频部分相关系数大于 2,但中频相关系数小于 1,分别为 0.42,0.44,0.41,图 2(a)

为 A 相频响图。如果仅从相关系数上来判断,就会得出高压绕组已出现明显变形的结论。中频段波分布电感和分布电容的变化都会使波峰和波谷出现位移。为了确认结论,加做了短路阻抗试验,因试验容量不够,未做中压对低压短路阻抗值,高压对低压绕组的三相电抗值和高压对中压绕组的三相电抗值分别相差 0.6%,0.12%,短路阻抗与铭牌值也无大的变化,相差分别为 0.2%,0.99%,短路阻抗的结果显示未出现变形,与频响曲线分析的结果互相矛盾。如果高压绕组出现明显变形,会导致中压绕组的分布电容出现一定的变化,中压绕组的频响曲线也会与原始曲线出现一定的差异,而中压绕组频响曲线吻合性相当好,这也从另一个方面否定了高压绕组明显变形的可能。又对高压三相绕组频响曲线进行横向分析:2003 年 11 月的高压绕组三相频响曲线中频段相关系数分别为 2.08,1.99,1.89,短路后三相绕组中频段相关系数为 1.68,1.75,1.45,一致性也相当好,图 2(b)为三相横向比较频响图,也更加坚信高压绕组未出现变形,毕竟三相同步出现变形的机率太小。通过以上分析认为,高压绕组未出现变形,再考虑到短路后三相差动保护动作,电气试验情况良好,色谱数据正常,因此得出了高压绕组未出现变形的结论。该变压器投运后安全运行至今,多次的色谱追踪也显示该变压器无异常,证明当初的分析和判断是正确的。

(3)2004 年 12 月 8 日,雨天,10 kV 黄磷二回古 21 开关因线路接地,产生过电压,导致 10 kV 母线短路,古老背 2 号主变差动速断动作,2 号主变三侧开关分闸。进行了绕组变形试验,并与历史曲线对比发

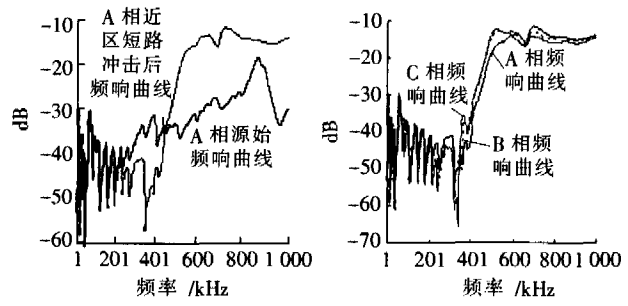


图 2 伍家岗 2 号变绕组频响图

表 4 近区短路后三相绕组频响曲线相关系数横向比较表

站名	型号	高压绕组相关系数		中压绕组相关系数		低压绕组相关系数				
		低频	中频	低频	中频	低频	中频			
伍家岗 2 号	SFZ9-31 500/110	OA	1.39	1.68	OmAm	1.68	1.37	ab	1.98	1.50
		OB	1.28	1.75	OmBm	1.35	1.63	bc	2.92	1.96
		OC	1.20	1.45	OmCm	3.33	1.56	ca	2.10	1.36

现,中低压侧频响曲线一致性相当好,但高压绕组 A 相高频段相关系数为 1.33,分析频响图谱发现,相关系数不好的原因不是波峰波谷的变化,而是 A 相绕组在 2 k 频率下幅值比历史曲线低。短路阻抗测试结果显示高压对低压三相绕组电抗值相差仅 0.736%,高压对低压绕组短路阻抗与铭牌值相比,相差 1.506%,高压对中压短路阻抗值与铭牌值相差 0.99%,见表 5。直流电阻测量也显示无匝间或饼间短路。该变压器原为无载调压变压器,在城网改造中进行过无载改有载改造,将高压中性点解开,拆分为 X,Y,Z 后外加 3 只套管引出,通过 3 根跳线引至调

表 5 近区短路后短路阻抗数据表

编号	相别	高对低					高对中				
		$Z_k / \Omega$	$\Delta z_{nm} / \%$	铭牌值	$U_k / \%$	$\Delta u_k / \%$	$Z_k / \Omega$	$\Delta z_{nm} / \%$	铭牌值	$U_k / \%$	$\Delta u_k / \%$
伍家岗 2 号	A	71.61					39.24				
	B	71.49					39.21	0.12	10.10	10.20	0.99
	C	71.17					39.19				
古老背 2 号	A	66.76					37.534				
	B	67.25	0.736	17.70	17.437	1.506	37.333	1.22	9.95	9.863	0.99
	C	66.94					37.792				

压变压器。试验时因雨未将架空线与 X,Y,Z 3 只套管解开,而是直接将架空线与调压变的联结解开,这样 A 相绕组尾端未悬空并连有约 2 m 长的跳线。2 k 频率下绕组响应幅值比历史曲线下降的原因在于引线未拆除。引线感应电压的影响(1 号主变仍在运行,相距约 4 m)、引线与高压 A 相套管的接触不良均会造成该现象发生。因此得出高压绕组 A 相无变形的结论,目前该变压器一直安全运行。

## 5 结语

(1)若三相频响曲线横向比较一致性好,可认为

绕组没有变形;若三相频响曲线一致性不好,不能认为绕组发生了变形,变压器是否存在变形则需作进一步分析。

(2)在实际判断绕组有无变形时,若无原始曲线需要与同厂同型同期变压器测试结果相比较时,应对高中低三侧绕组区别对待,高压侧绕组频响曲线仅有参考价值。

(3)在用频率响应法判断绕组是否存在变形时,以频响曲线与历史曲线纵向比较为主要依据,相关系数好(波峰和波谷无位移)说明绕组未变形,如果相关系数不好,必须辅以阻抗电压(下转第 72 页)

考虑到三相电路的对称性,笔者只给出了 a 相的仿真波形:图 4 为传统的三角波脉宽调制电流控制方法,图 5 为改进的三角波脉宽调制电流控制方法的仿真波形。其中上面的图、中间的图和下面的图分别为 a 相负载电流、APF 的 a 相实际补偿电流和补偿后的 a 相电源电流。

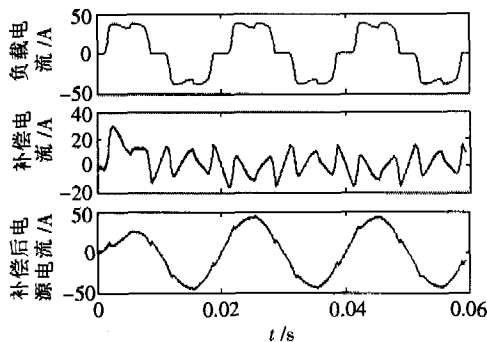


图 4 传统的三角波脉宽调制电流控制方法的仿真波形

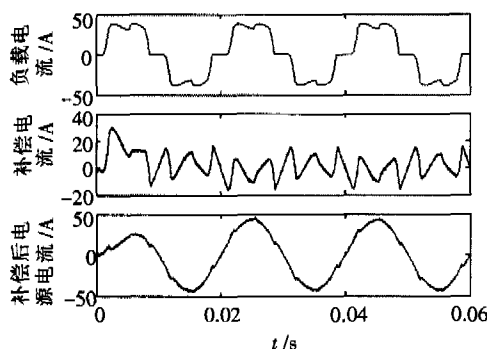


图 5 改进的三角波脉宽调制电流控制方法的仿真波形

从图 4、图 5 可以看出,两种电流控制方法都能有效地滤除负载中的谐波电流分量,达到使电源电流接近正弦的目的。

图 6 和图 7 分别为图 4 和图 5 中补偿后电源电流的 FFT 分析图。

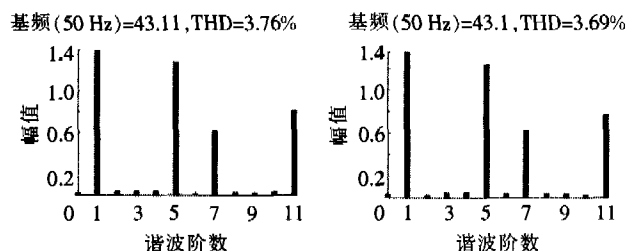


图 6 传统方法补偿后电源电流的 FFT 图

图 7 改进方法补偿后电源电流的 FFT 图

由图 6 和图 7 的 FFT 图分析可以看出,采用传统的三角波控制方法后,补偿后电源电流的基波幅值为 43.11 A,谐波畸变系数 THD=3.76%;而采用改进的三角波控制方法后,电源电流的基波幅值为 43.1 A,谐波畸变系数 THD=3.69%。由此可以得出,改进后电流控制方法的 APF 的滤波效果略优于传统电流控制方法的 APF。而且在补偿后的电源电流的正、负峰处,采用改进的电流控制方法优于采用传统的电流控制方法的补偿效果<sup>[3]</sup>。

由于一般的补偿装置中都有交流电压检测,用于锁相及保护,因此前馈电压的加入几乎不增加装置的成本。

## 6 结语

笔者提出了一种改进的三角波电流控制方法,在这个基础上进行了仿真试验。仿真结果表明,通过加入前馈电压,APF 的滤波效果略优于传统的三角波电流控制方法,而且在补偿后的电源电流的正、负峰处波形具有一定改善。

## 参考文献:

- [1] 王兆安,杨君,刘进军.谐波抑制和无功功率补偿[M].北京:机械工业出版社,1998.
- [2] 颜晓庆,王兆安.并联型电力有源滤波器的仿真研究[J].西安交通大学学报,1997,31(11):88-93.
- [3] 马惠,刘静芳,刘斌帅.改进的有源电力滤波器三角波脉宽调制电流控制方法[J].电力自动化设备,2004,24(11):30-33.
- [4] Young-Gook Jung, Woo-Yong Kim, Young-Cheol Lim, et al. The Algorithm of Expanded Current Synchronous Detection for Active Power Filters Considering Three-phase Unbalanced Power System[J]. IEEE Trans. on Ind Appl, 2003, 21(5): 1 000-1 006.
- [5] Orts S, Segui S. Modelling and Simulation of Three Phase Power Active Compensator with Matlab/Simulink [A]. 35 th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference [C], 2004. 3 182-3 187.
- [6] 任永峰,李含善.基于 MATLAB 的并联型有源电力滤波器的仿真研究[J].电力科学与工程,2003(1):10-13.
- [7] 罗世国,侯振程.有源电力滤波器的参数计算及其控制[J].重庆大学学报,1994,17(2):12-16.
- [8] 赵小英,王平.基于 MATLAB 的并联有源电力滤波器的仿真研究[J].自动化技术与应用,2005,24(3):28-31.

(上接第 69 页)

法加以验证,并参考三相绕组频响曲线进行横向比较。在阻抗电压变化高于 4%时,表明变压器绕组已发生严重变形,应该立即退出运行;当阻抗电压变化高于 2%时,应引起足够的重视。

(4)频响法灵敏度高,易受外界干扰的影响,引线长短、感应电压、杂散电容等因素影响程度较大,

在现场试验时要引起重视,避免误判。

## 参考文献:

- [1] 戴文军.用频率响应法检测变压器绕组的变形[J].高压电器,2004,40(6):464-465.
- [2] 吴国跃.电力变压器绕组变形测试中的影响因素[J].高压技术,2001,27(3):81-82.