

基于电气量特征的变压器绕组变形监测技术现状与展望

李 朋¹, 张保会¹, 郝治国¹, 褚云龙²

(1. 西安交通大学 电气学院, 陕西 西安 710049;

2. 西北电网有限公司, 陕西 西安 710048)

摘要: 介绍电力变压器绕组变形产生的原因及表现形式, 着重分析和总结现有的基于电气量特征的电力变压器绕组变形传统的离线检测技术和在线监测理论的特点及应用, 并分析现有方法存在的主要问题和原因。结合变压器绕组变形与漏电感参数的变化关系, 指出变压器绕组漏电感参数的准确实时计算将成为绕组变形监测, 尤其是从离线到在线监测技术发展的关键问题。

关键词: 变压器绕组变形; 短路阻抗; 漏电感; 在线监测

中图分类号: TM 403 ; TM 93

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)02-0028-05

电力变压器是电力系统最重要也是最昂贵的电气设备之一。随着电网容量的扩大, 电力变压器的功率传输容量和电压变换等级也在不断提高, 其性能的好坏直接影响着电力系统的安全稳定运行, 因此, 对长期运行的电力变压器而言, 可靠性问题至关重要。

目前, 国内外对运行变压器的状态监测越来越重视。研究发现, 变压器绕组变形已经成为变压器状态监测中健康隐患和故障的重要表现形式, 特别是大型变压器因外部短路造成的绕组变形直至损坏故障更为多见, 已上升到事故率的首位^[1], 对电网的安全运行影响极大。因此, 通过对变压器绕组进行监测并判断其健康状况, 以此进行变压器的预知性维修, 从而避免因绕组变形导致的变压器故障, 提高了变压器安全运行水平。变压器绕组故障率的降低也将为电网安全运行带来重要保证。

变压器绕组发生变形后, 其物理尺寸及几何形状将发生变化, 由此导致绕组漏感、匝间电容、匝地电容等电气参数值发生改变。本文在介绍当前基于电气特征量的变压器绕组变形诊断技术中常用方法的基础上, 着重分析其诊断技术的特点及存在的问题, 并提出变压器绕组变形监测可能的发展方向。

1 变压器绕组变形原因及表现形式

电力变压器绕组变形是指在电动力和机械力作用下, 绕组尺寸和形状发生不可逆的变化, 包括轴向和径向尺寸的变化、器身位移、绕组扭曲、鼓包、匝间短路等。绕组变形是电力系统安全运行的一大隐患。

1.1 绕组变形产生原因

变压器在运行过程中, 健康隐患最重要原因就是各种外部短路故障的冲击, 特别是变压器出口或近距

离短路故障, 巨大的短路电流将使变压器绕组在电动力作用下发生变形甚至损坏, 这种变形是故障发展的不可恢复的过程。经观察和分析认为, 绕组变形可能与以下 4 个因素相关。

a. 随着电网容量增加, 单台变压器容量越来越大, 其内阻抗值随之减小, 直接导致故障时短路电流的增大, 变压器短路冲击负担加重; 另外由于负载容量增加, 出入线路回数必然增多, 使系统阻抗减小、短路电流增大, 增大了变压器承受短路电流的冲击力。

b. 在具有高、中压侧电源系统中的三绕组降压变压器中, 低压绕组出现故障时, 短路电流将由中、高压侧同时供给, 此时将使低压绕组承受短路冲击的能力降低; 而目前变压器出厂短路试验并没有考虑另两侧同时施加短路电流的试验方案。

c. 从变压器使用寿命看, 现有的变压器更新速度远远跟不上电网的发展, 因此投入使用的变压器, 在机械强度上已经难于满足电网短路电流冲击力, 这是当前绕组变形及故障损坏较多的重要原因。

d. 变压器在长途运输、安装及常规检修过程当中由于人为因素发生碰撞、误操作等, 可能会导致意外的冲撞、颠簸、振动等。

1.2 绕组变形的表现形式及危害

变压器发生绕组变形后, 对变压器本体及电网安全的危害也很大。有的立即发生损坏事故, 有的则可以继续运行, 运行时间的长短取决于变形的严重程度。其主要表现在以下 2 个方面。

a. 绕组的几何尺寸直接发生变化, 绝缘距离发生改变或绝缘纸发生损坏, 当遇到雷电等过电压时变压器将发生匝间、饼间击穿, 变压器损坏。变压器绕组的许多故障均是由于绝缘的最初机械损伤造成的。

b. 发生不至于影响变压器正常运行的绕组轻微变形, 机械性能下降, 抗短路能力降低, 当再次或多次遭受短路事故冲击时, 将难以承受巨大的机械力而

发生损坏事故。

变压器一旦发生故障,将导致其供电区域电力系统崩溃或瘫痪,且由于电力变压器结构的复杂性,修复时间较长,停产检修所造成的损失往往很大,影响严重。绕组变形作为一种潜伏性的亚健康状态的积累,其故障的发展性和不确定性必会给电力系统运行带来不可预知的重大隐患。因此,研究变压器绕组变形诊断技术,了解目前技术现状及主要问题,对减少变压器事故的发生和今后的技术研究有重要意义。

2 传统的变压器绕组变形监测技术

近年来,应用于现场的绕组变形监测技术尚处在离线测量阶段,国内外提出的可用于检测变压器绕组变形的方法主要有 3 种:短路阻抗法(SCR)、频率响应法(FRA)和低压脉冲法(LVI)。

2.1 短路阻抗法

变压器短路阻抗是当负载为零时,变压器内部的等效阻抗。短路阻抗可分为电阻分量和电抗分量,而对于 110 kV 及以上的大型变压器而言,电阻分量在短路阻抗中所占比例非常小,短路阻抗值主要是电抗分量的数值。短路电抗又叫漏电抗,其值是由绕组的几何尺寸及相互位置所决定的。对于一台变压器而言,当绕组的几何尺寸及分布位置发生变化时,其短路电抗值也会变化^[2]。如文献[3]中提到的圆筒型双绕组变压器,假设绕组高度等于轴向配置高度,安匝数分布均匀,忽略铁芯临近效应和绕组直流电阻,则短路阻抗可用下式表示:

$$Z_k \approx X_k = 2 \pi f \mu_0 \delta \omega^2 Q_1 D_{cp} / h \quad (1)$$

式中 $\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7}$; ω 为绕组匝数; Q_1 为罗果夫系数; h 为绕组高度; δ 为主泄漏通道的有效宽度; D_{cp} 为主泄漏通道的平均直径。

由式(1)可见,短路阻抗 Z_k 的变化实际上只取决于绕组与铁芯间的几何尺寸的变化。

短路阻抗法测量绕组变形,是基于变压器短路试验原理而应用于现场的。在测量过程中,三相变压器短路阻抗测量方法与联结组别有关。比如常见的 Y/△接法的三相变压器,先将二次侧的 a,b,c 短接,当二次侧电流达到额定值时,分别测量一次侧 AO, BO, CO 各相的短路电压,通过测得的短路电压和短路电流就可计算得到短路阻抗。

短路阻抗作为变压器重要参数,不但在变压器投入运行前要测量,而且在运行过程中也要定期或不定期的测量,作为监测变压器绕组状态的重要手段之一。该方法测试程序较简单,有确定的判断标准,IEC 和国家标准规定了较为可行的建议性判据,但是由于试验电源容量大、试验设备沉重、试验花费时间较长等因素影响,短路阻抗法在现场使用中受到了限制。

2.2 频率响应法

1978 年, E.P.Dick 和 C.C.Erven 提出在测量变压器绕组变形中应用频率响应分析法^[4]。该分析方法的基本原理是在频率域中对激励信号和响应信号进

行分析,将一稳定的正弦扫描电压信号施加到被试变压器绕组一端,同时记录该端子和其他端子上的电压幅值及相位,从而得到该被试绕组的一组频响特性。由于变压器绕组等效网络参数变化将导致网络频响特性变化,由此分析判断绕组的状态,这就是频率响应法。频响分析法通过不同测量时段的频谱图加以比较分析,图 1,2 是较为典型的某低压绕组变形前、后频率响应图(图中 A 为幅值, f 为频率)。

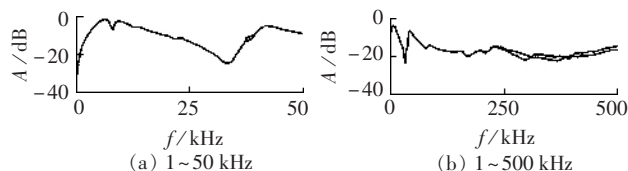


图 1 某变压器绕组变形前频响曲线

Fig.1 The frequency response curve before transformer winding deformation

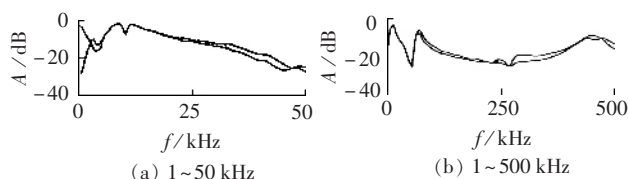


图 2 绕组变形后频响曲线

Fig.2 The frequency response curve after transformer winding deformation

由频响图可以初步判断绕组变形与否。目前,频率响应法因其检测灵敏度高、设备轻便、适合于现场测试,在国内外已经得到了较广泛的现场应用,但由于频率特性受干扰因素很多,其诊断的不确定性还相当明显,使用方法不当会使结果严重失真^[5],有关的测试和判断方法尚无统一的标准可依。

由于频率响应法是基于网络端口的传递函数原理,因此在测量方法受到局限后,为了提高测量精度,保证分析结果的可靠性,研究人员开始关注网络传递函数的优化方法和一些新数学工具的应用,以此来尝试解决频响法所遇到的困难。

传递函数拟合算法应用于绕组变形测量上最早是由 R.Malewski 和 B.Poulin 提出^[6],但由于变压器本身的非线性,测量结果往往不容易收敛。文献[7-8]在频域分段的基础上对此进行了改进,利用测量频率点数的简单变换,降低了方程的条件数和计算量;但其所提出的拟合算法往往只适应三相对称的变压器,随着测量点数和测试频率的增加,方程将出现严重的病态情况,局限性较大。文献[9-10]又相继提出利用正交拟合多项式进行传递函数的最小二乘拟合,克服了普通多项式拟合传递函数所带来的方程病态问题,不受测量点数和测试频率的影响,方法简单,易于编程实现。

文献[11-12]把人工神经网络的模式识别理论合理地应用到变压器绕组变形诊断上,利用人工神经网络的可学习性和自诊断能力,能够做到对不同类型

和不同变形部位的识别;这种方法需要对变压器绕组变形进行大量的模拟试验已得到尽可能多的统计数据,才能满足人工神经网络对丰富的学习样本的要求;而研究发现,由于变压器绕组故障的类型、程度、位置各不相同,网络的识别结果分散性较大,将严重影响识别正确率,同时,现场测试环境影响较大,获取经验数据较为困难,这也是频率响应法面临的难点。

2.3 低压脉冲法

低压脉冲法^[13]主要用于变压器出厂的短路试验。变压器绕组可看作由电阻、电感及电容组成的无源线性网络,其变形必然导致绕组上相应部分的分布参数发生变化,使得其单位冲击响应也随之变化。如果将一相同的低压脉冲信号施加于变压器绕组上,则响应信号在变压器绕组变形前、后的变化也能反映出绕组变形的信息,这就是低压脉冲法。

该方法在试验测试过程中,测量方法较为复杂,2次测量时间间隔较长,抗电磁干扰影响能力很差,且对绕组首端部位的变形响应不灵敏,很难判定绕组变形的部位^[14-15],而现场运行环境中电磁干扰相当大,屏蔽测试系统将会带来很大困难,再加上仪器笨重,测试电压很高,因此未受到广泛关注和推广。

文献[16]较为详细地分析了低压脉冲法的具体应用,重点研究脉冲波形参数的选择、数字记录设备分辨率要求、测试接线方式的选择等方面的问题;但其中存在许多技术实现上的困难,对测试仪器的要求很高,只是在理论上加以分析。文献[17]尝试利用小波分析原理解决低压脉冲法遇到的干扰问题。小波变换最显著的特点是同时具有时域和频域局部化性质,将小波变换用于低压脉冲法中,利用模极大值等作为故障特征量,可剔除信号中的噪声,改善测量重复性。但是,涉及到频带分离、模式识别、图像处理等很多环节,在具体应用中也仍然不能有所突破。

3 变压器绕组变形在线监测技术研究

3.1 绕组变形在线监测意义

现代电力系统安全稳定运行需要变压器连续不断的正常工作,而运行中的变压器不可避免的会遭受各种各样的内外部故障冲击,绕组状态正是在这些冲击下发生变化并导致发展性或者突发性变压器故障。传统的监测方法都属于离线测试,即使是较成熟的诊断仪器在测量分析后仍需要对变压器进行吊罩解体确认;同时,判断是否进行绕组变形诊断也是

由于变压器遭受了严重的突发性短路电流冲击或者变压器处于检修周期时才进行,是一种变压器故障或者故障隐患相当严重以后的被动检测行为,不能随时监测绕组状态并及时发现故障。而状态监测对电力设备不停电的要求日益提高,实时正确的变压器绕组变形监测必然能够保证变压器故障的预防和故障元件的及时更换,延长变压器的实际使用寿命,并给电力系统安全可靠运行带来重要保证。因此,变压器绕组变形在线监测越来越受到重视。

3.2 绕组变形在线监测方法

3.2.1 基于短路阻抗法的在线监测

20世纪90年代初,在短路阻抗法原理基础上,通过在线监测变压器短路电抗变化分析判断绕组状况的设想被提出^[18-19]。变压器短路阻抗测量采用伏安法,测试前将变压器二次侧短接,在一次侧施加试验电压,从而产生流经阻抗的电流,同时测量加在阻抗上的电流、电压,此电压、电流基波分量的比值就是被试变压器的短路阻抗。

文献[20-21]从理论上探讨了短路阻抗法绕组变形在线监测的原理及方法,所给出的变压器绕组测量参数模型和理论公式也被广泛采用。单相双绕组变压器在线测量短路电抗的原理如图3所示。

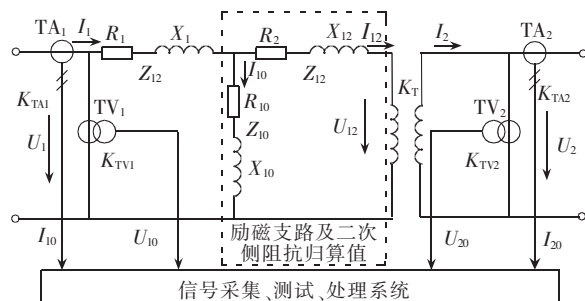


图3 变压器短路电抗在线测量原理图

Fig.3 The equivalent circuit of on-line short-circuit reactance measurement for transformer

图3中, K_T 为变压器变比; K_{TV1} , K_{TV2} , K_{TA1} , K_{TA2} 分别为电压、电流互感器的变比; Z_1 为一次侧短路阻抗; Z_{12} 为二次侧短路阻抗归算到一次侧的值; Z_{10} 为激磁阻抗;虚线框中表示变压器励磁支路及二次侧电压、电流、阻抗归算到一次侧的值。由图3可得到下列关系:

$$\Delta u = u_1 - u_{12} = Z_1 I_1 + Z_{12} I_{12} = Z_1 I_{10} + (Z_1 + Z_{12}) I_{12} \quad (2)$$

为便于书写,以下公式中忽略矢量标记。引入空载调节系数 K_{Tj} 补偿 I_{10} 在一次侧阻抗的压降:

$$\begin{aligned} \frac{u_1}{K_{TV1} K_{Tj}} - \frac{u_2}{K_{TV2}} &= \frac{u_1}{K_{TV1} K_{Tj}} - \frac{u_{12}}{K_{TV2} K_T} = \frac{u_1}{K_{TV1} K_{Tj}} - \frac{u_1}{K_{TV2} K_T} + \frac{u_1}{K_{TV2} K_T} - \frac{u_{12}}{K_{TV2} K_T} = \\ &= u_1 \left(\frac{1}{K_{TV1} K_{Tj}} - \frac{1}{K_{TV2} K_T} \right) + \frac{1}{K_{TV2} K_T} (u_1 - u_2) = u_1 \left(\frac{1}{K_{TV1} K_{Tj}} - \frac{1}{K_{TV2} K_T} \right) + \frac{1}{K_{TV2} K_T} \times \\ &\quad \left[(Z_1 + Z_{12}) I_{12} + Z_1 I_{10} \right] = \frac{(Z_1 + Z_{12}) I_{12}}{K_{TV2} K_T} + \left[u_1 \left(\frac{1}{K_{TV1} K_{Tj}} - \frac{1}{K_{TV2} K_T} \right) + \frac{Z_1 I_{10}}{K_{TV2} K_T} \right] \quad (3) \end{aligned}$$

变压器空载时, $I_{12}=0$, 调节 K_{Tj} 使 $u_1/(K_{TV1}K_{Tj})-u_2/K_{TV2}=0$, 则有

$$u_1\left(\frac{1}{K_{TV2}K_T}-\frac{1}{K_{TV1}K_{Tj}}\right)=\frac{Z_1I_{10}}{K_{TV2}K_T} \quad (4)$$

式(4)表明 K_{Tj} 补偿了 I_{10} 在一次侧阻抗上的压降, 则空载状态下 K_{Tj} 的计算式为

$$K_{Tj}=\frac{u_1}{u_2}\frac{K_{TV1}}{K_{TV2}}=\frac{u_{10}}{u_{20}} \quad (5)$$

考虑到在电压变化有限的情况下, 激磁电流 I_{10} 正比于 u_1 , 那么变压器负载时仍有式(4)成立, 则由式(3)(4)可得出:

$$\frac{u_1}{K_{TV1}K_{Tj}}-\frac{u_2}{K_{TV2}}=\frac{(Z_1+Z_{12})I_{12}}{K_{TV2}K_T} \quad (6)$$

从而计算得到短路阻抗 Z_1+Z_{12} 。

但是, 文献中所提到的参数模型是建立在 2 个重要的基本假定基础上, 即认为变压器运行过程中激磁电流不变化和忽略电压、电流互感器的二次误差, 而对于变压器本身和测量要求而言, 这 2 项内容也是非常重要的; 此原理由于引入空载调节系数, 在变压器调整分接头或一次侧电压变化时都需要空载调零。

3.2.2 基于漏感参数法的在线监测

随着工程技术手段的发展, 一些新的数学分析方法的应用也大大促进了绕组变形在线监测原理的发展。为了解决测量精度问题、尽可能减小误差, 文献[22]引入了参数辨识方法估算变压器绕组漏电感参数, 以图 4 所示双绕组三相 Y/△ 变压器为例。

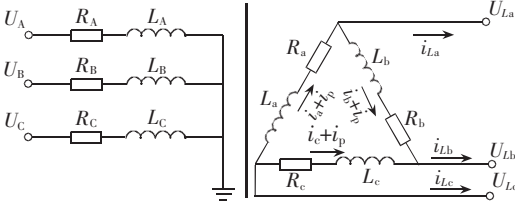


图 4 Y/△ 接法的变压器模型

Fig.4 Two winding three-phase transformer with Y/△ connection

由图 4 可以列出两侧三相绕组的微分方程, 对于 Y 侧绕组有

$$\begin{aligned} N_1 \frac{d\Phi_{mAa}}{dt} + L_{A\sigma} \frac{di_A}{dt} + R_A i_A &= u_A \\ N_1 \frac{d\Phi_{mBb}}{dt} + L_{B\sigma} \frac{di_B}{dt} + R_B i_B &= u_B \\ N_1 \frac{d\Phi_{mCc}}{dt} + L_{C\sigma} \frac{di_C}{dt} + R_C i_C &= u_C \end{aligned} \quad (7)$$

对于 △ 侧绕组有

$$\begin{aligned} N_2 \frac{d\Phi_{mAa}}{dt} - L_{a\sigma} \frac{d(i_a+i_p)}{dt} - R_a(i_a+i_p) &= u_a \\ N_2 \frac{d\Phi_{mBb}}{dt} - L_{b\sigma} \frac{d(i_b+i_p)}{dt} - R_b(i_b+i_p) &= u_b \\ N_2 \frac{d\Phi_{mCc}}{dt} - L_{c\sigma} \frac{d(i_c+i_p)}{dt} - R_c(i_c+i_p) &= u_c \end{aligned} \quad (8)$$

该方法有一个基本假定, 即认为 Y/d 接法变压器每相绕组的电阻、电感相等, 绕组间漏互感为零:

$$L_{A\sigma}=L_{B\sigma}=L_{C\sigma}=L_1, \quad L_{\sigma a}=L_{\sigma b}=L_{\sigma c}=L_2$$

$$R_A=R_B=R_C=R_1, \quad R_a=R_b=R_c=R_2$$

为消掉方程组中的 Φ_m 和环流 i_p , 令 $N_1=kN_2$, 将方程组(7)(8)一一对减可得到:

$$\begin{aligned} u_A-u_B-k(u_a-u_b) &= L_1 \left(\frac{di_A}{dt} - \frac{di_B}{dt} \right) + R_1(i_A-i_B) + \\ & k \left[L_2 \left(\frac{di_a}{dt} - \frac{di_b}{dt} \right) + R_2(i_a-i_b) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

同理, 可得到其他 2 个等式。这里, △ 接线绕组相电流 i_a, i_b 和 i_c 不可直接测量, 利用其和线电流之间的关系:

$$i_a=\frac{(i_{La}-i_{Lc})}{3}, \quad i_b=\frac{(i_{Lb}-i_{La})}{3}, \quad i_c=\frac{(i_{Lc}-i_{Lb})}{3}$$

可得到新的变压器绕组模型:

$$\begin{aligned} u_A-u_B-k(u_a-u_b) &= L_1 \left(\frac{di_A}{dt} - \frac{di_B}{dt} \right) + R_1(i_A-i_B) + \\ & k \left[L_2 \frac{d(2i_{La}-i_{Lc}-i_{Lb})/3}{dt} \right] + \\ & R_2[(2i_{La}-i_{Lc}-i_{Lb})/3] \end{aligned} \quad (10)$$

其中, 电压 u 和电流 i 可以实时测量, 那么, 待辨识的参数就是 R_1, L_1, R_2, L_2 。将实时测量辨识的参数与变压器出厂时的历史参数比较, 当参数值偏离较大时, 认为绕组发生了变形。

3.3 在线监测方法需要研究的问题

由于短路电抗值本身较小, 绕组变形造成的短路电抗值的变化量就更小, 上述的绕组变形在线监测原理在测量精度和结果稳定性上并不十分理想, 准确的定量测量还有待于进一步研究。目前, 绕组变形在线监测也只是停留在理论研究的初期阶段。应用于现场的在线监测技术, 可能会面临下列问题:

- 健康变压器的短路阻抗或漏电感参数的精确获取;
- 如何减小或避免测量中各种干扰和误差, 利用现有的变压器模型及现场可测量信息量, 准确计算漏电感参数;
- 实时计算得来的漏电感值与历史值比较, 偏离值大小与绕组变形程度的定量关系。

4 结语

传统的变压器绕组变形监测都是离线测量, 现场测试环境复杂、干扰因素很多, 测量周期及测试耗时很长, 硬件成本和测试费用很高, 由于测量方法和技术手段的局限, 测量精度往往达不到要求, 人为因素的影响也很大。在绕组变形监测技术中, 最突出的问题是如何实现准确的在线实时测量。因此, 更新更为有效的变压器绕组健康状态在线监测手段亟待研究。本文提到的在线监测方法中, 漏电感作为

变压器的重要参数,其与绕组变形程度间存在的关系已经得到验证。很多研究也在尝试通过测量变压器漏电感判断绕组的变形程度,并力图实现在线监测。

现今,如果研究能够解决变压器绕组变形程度与漏电感值变化的关系,运行中变压器漏电感值的精确测量等问题,可以大大拓宽变压器健康状态评估中绕组变形监测问题的研究思路,这也将成为变压器绕组变形在线监测能够真正实现并有效的应用于现场的重要研究发展方向。

参考文献:

- [1] 赵剑雄,郭云霞. 大型变压器绕组变形诊断与应用[J]. 华东电力,2004,32(12):63-64.
ZHAO Jian-xiong, GUO Yun-xia. The diagnosis and application for winding deformation of the great transformer [J]. **East China Electric Power**, 2004, 32(12): 63-64.
- [2] 曾刚远. 测量短路电抗是判断绕组变形的有效方法[J]. 变压器,1998,35(8):13-17.
ZENG Gang-yuan. Measuring the short-circuit reactance — an effective method for judging the deformation of transformer windings[J]. **Transformer**, 1998, 35(8): 13-17.
- [3] 吴亚冬. 变压器绕组变形测试诊断技术研究及开发[D]. 武汉:武汉大学,2004.
WU Ya-dong. Research and development of the diagnosis of deformation of power transformer windings[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.
- [4] DICK E P, ERVEN C C. Transformer diagnostic testing by frequency response analysis[J]. **IEEE Trans. on PAS**, 1978, 97(6): 2144 - 2153.
- [5] BENGTSSON C. Status and trends in transformer monitoring[J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**, 1996, 11(3): 1379-1384.
- [6] MALEWSKI R, POULIN B. Impulse testing of power transformers using the transfer function method[J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**, 1988, 3(2): 476 - 489.
- [7] SOYSAI A O, SEM I A. Practical transfer function estimation wide frequency range representation of transformers [J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**, 1993, 8(3): 1627-1637.
- [8] 王钰,李彦明,邱毓昌. 传递函数拟合算法及其在变压器绕组变形诊断中的应用[J]. 西安交通大学学报,1997,31(11):50-54,76.
WANG Yu, LI Yan-ming, QIU Yu-chang. Transfer function estimation and its application to the detection of the transformer winding deformation[J]. **Journal of Xi'an Jiaotong University**, 1997, 31(11): 50-54, 76.
- [9] ROLAIN Y, PINTELON R, XU K Q, et al. Best conditioned parametric identification of transfer function models in the frequency domain[J]. **IEEE Trans. on Automatic Control**, 1995, 40(11): 1954 - 1960.
- [10] 武剑利,舒乃秋,彭凌烟. 变压器绕组传递函数的拟合原理及绕组变形诊断应用[J]. 电力自动化设备,2004,24(6):88-90.
WU Jian-li, SHU Nai-qiu, PENG Ling-yan. Fit theory of transformer winding's transfer function and its application to diagnose winding deformation [J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2004, 24(6): 88-90.
- [11] JIN Zhi-jian, LI Jing-tao, ZHU Zi-shu. Diagnosis of transformer winding deformation on the basis of artificial neural network [C] // **Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials**. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2000: 173-176.
- [12] XU D K, FU C Z, LI Y M. Application of artificial neural network to the detection of the transformer winding deformation [C] // **The 11th High Voltage Engineering International Symposium**. London, UK: [s.n.], 1999: 220-223.
- [13] LECH W, TYMINSKI L. Detecting transformer winding damage—the low voltage impulse method[J]. **Electrical Review**, 1966, 176(21): 768-772.
- [14] VAESSEN P T M, HANIQUE E. A new frequency response analysis method for power transformer[J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**, 1992, 7(1): 384-391.
- [15] DROBIASHEVSKY A, LEVITZKAYA E, FILATOVA M. Application of LV impulses for diagnostics of transformers during tests and in service [C] // **8th Int. Symp. on High Voltage Eng.** Yokonama, Japan: [s.n.], 1993: 189-192.
- [16] 王钰,徐大可,李彦明. 检测变压器绕组变形的低压脉冲法测试系统研究[J]. 高电压技术,1998,24(3):24-28.
WANG Yu, XU Da-ke, LI Yan-ming. A study on instrumentation techniques in LVI method for detecting transformer winding [J]. **High Voltage Engineering**, 1998, 24(3): 24-28.
- [17] 王钰,徐大可,李彦明. 小波分析在变压器绕组变形诊断中的应用[J]. 高电压技术. 1997, 23(4): 15-18.
WANG Yu, XU Da-ke, LI Yan-ming. Application of wavelet analysis to the detection of the transformer winding deformation [J]. **High Voltage Engineering**, 1997, 23(4): 15-18.
- [18] ARRI E, MOCCI F, TOSI M. On-line monitoring of electrodynamic effects on power transformers windings [C] // **Instrumentation and Measurement Technology Conference**. New York: IEEE, 1992: 466-469.
- [19] ARRI E, Carta A, MOCCI F, et al. Diagnosis of the state of power transformer windings via on-line measurement of stray reactance [J]. **IEEE Trans. on Instrum. Meas. Special Issue**, 1993, 42(2): 312-378.
- [20] 徐大可,汲胜昌,李彦明. 变压器绕组变形在线监测的理论研究[J]. 高电压技术,2000,26(3):16-18.
XU Da-ke, JI Sheng-chang, LI Yan-ming. A theoretical research on on-line monitoring of winding deformation of power transformer [J]. **High Voltage Engineering**, 2000, 26(3): 16-18.
- [21] 徐大可,张言苍,李彦明. 变压器绕组变形在线监测研究[J]. 电力自动化设备,2002,22(8):8-11.

XU Da-ke,ZHANG Yan-cang,LI Yan-ming. Research on on-line winding deformation monitoring of power transformer[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2002,22(8):8-11.

[22] 李邦云,丁晓群,李娟. 变压器绕组变形在线监测方法的研究[J]. 变压器,2003,40(10):37-40.

LI Bang-yun,DING Xiao-qun,LI Juan. Research on on-line monitoring method for transformer winding deformation[J]. **Transformer**,2003,40(10):37-40.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

李 朋(1979-),男,吉林磐石人,硕士研究生,从事电力系统继电保护方面的研究(E-mail: lpspeed@stu.xjtu.edu.cn);

张保会(1953-),男,河北魏县人,教授,博士研究生导师,长期从事电力系统安全自动化装置、继电保护、电力通信、电力系统稳定性方面的研究;

郝治国(1976-),男,内蒙古鄂尔多斯人,博士研究生,从事电力系统继电保护方面的研究;

褚云龙(1979-),男,辽宁营口人,硕士,从事继电保护、电力网络通信等方面的研究工作。

Actuality and prospect of transformer winding deformation monitoring based on electric characteristic

LI Peng¹,ZHANG Bao-hui¹,HAO Zhi-guo¹,CHU Yun-long²
 (1. Xi'an Jiaotong University,Xi'an 710049,China;
 2. Northwest China Grid Company,Xi'an 710048,China)

Abstract: The cause and behaving of transformer winding deformation are introduced. The characteristics and applications of existing off-line and on-line monitoring techniques for winding deformation are emphasized,and their unsolved problems are analyzed and summarized. Depending on the relation between winding deformation and leak inductance,it is pointed that the exact and real-time calculation of leak inductance is the key factor of winding deformation monitoring,especially of the technique development from off-line monitoring to on-line monitoring.

The project is supported by National Natural Science Foundation of China(50277027).

Key words: transformer winding deformation; short impedance; leak inductance; on-line monitoring