

基于回路平衡方程的变压器 绕组变形在线监测研究

李 朋¹, 张保会¹, 郝治国¹, 褚云龙², 施明会³

(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 710073; 3. 石嘴山市供电局, 宁夏 石嘴山 753000)

摘要: 电力变压器运行过程中发生绕组变形将会导致绕组漏感参数发生变化, 提出用变压器等值回路平衡方程进行绕组参数辨识的方法。以双绕组单相及三相变压器绕组回路平衡方程为基础, 采用最小二乘算法估算原副边绕组电阻、漏电感参数, 进而实现变压器绕组变形的在线监测, 并针对变压器稳态回路方程模型的不可辨识性提出新的解决方法。仿真和动模试验表明该方法的合理性和有效性。

关键词: 绕组变形; 回路平衡方程; 参数辨识; 漏电感; 在线监测

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)05-0011-04

0 引言

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等级也在不断提高, 其性能好坏直接影响电力系统的安全稳定运行。研究发现, 电力变压器在运行过程中不可避免地要遭受各种故障短路电流的冲击, 特别是大型变压器因外部短路电流引起电动力造成的绕组损坏故障更为多见, 因绕组变形导致的变压器事故占较大的比例^[1]。

电力变压器绕组变形是指在电动力和机械力的作用下, 绕组的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。究其原因, 主要有电网容量的增加, 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, 现有的变压器更新速度远远跟不上电网的发展, 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; 也有变压器在长途运输、安装及常规检修过程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, 使绕组损伤。

变压器发生绕组变形后, 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, 对变压器本体及电网安全的危害很大。一旦变压器绕组发生严重变形而未被及时发现, 很有可能导致事故的发生。因此, 实时准确地监测变压器绕组状态, 及早预知变压器健康隐患, 对故障的早期预防、延长变压器使用寿命和电网安全运

行能够带来重要保证。

近年来, 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^[2]: 通过施加低压脉冲信号并比较响应变化的低压脉冲法; 测量比较变压器等效参数网络频率响应特性的频率响应法; 测量变压器短路阻抗与原始数据比较的短路阻抗法。上述应用于现场的绕组变形诊断方法尚处在离线测量阶段, 只能做到事故后或者正常检修周期的离线检测, 而不能实现在线监测。20 世纪 90 年代初, 在短路阻抗法原理的基础上, 提出了通过在线监测变压器短路电抗变化来分析判断绕组状况的设想^[3], 文献[4-5]从理论上探讨了应用短路阻抗法在线监测绕组变形的原理及方法。

本文在分析变压器正常运行状态时绕组回路平衡方程的基础上, 利用递推最小二乘算法实时辨识绕组的电阻、漏感参数, 从而实现变压器绕组在线监测。动模实验数据验证了该方案的正确性和可行性。

1 基于回路平衡方程的变压器绕组变形监测原理

1.1 变压器回路平衡方程

对于图 1 所示的单相双绕组变压器模型, 有下列原、副边回路方程成立:

$$u_1 = r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + N_1 \frac{d\phi_m}{dt} \quad (1)$$

$$u_2 = r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + N_2 \frac{d\phi_m}{dt} \quad (2)$$

式中 u_1, u_2 和 i_1, i_2 分别为原、副边绕组的电压和电流, 可以实时测量; r_1, r_2 和 L_1, L_2 分别为原、副边绕组的电阻和漏电感; N_1, N_2 为原、副边绕组的匝数; ϕ_m 为原、副边绕组间的互感磁通。

式(1)(2)中的 $d\phi_m/dt$ 项包含了 $B-H$ 曲线的

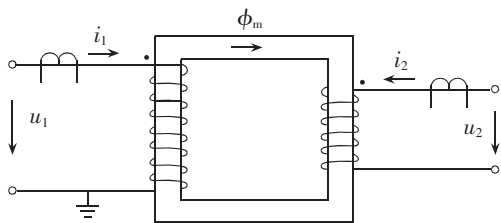


图1 单相双绕组变压器

Fig.1 Dual winding single-phase transformer

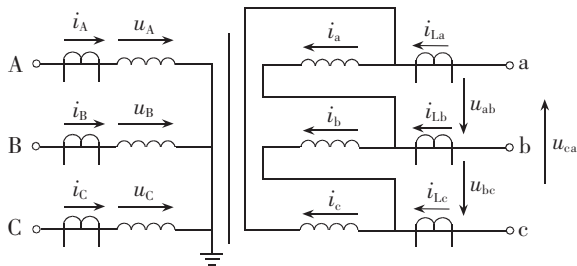
非线性关系,很难直接获得。消去 $d\phi_m/dt$ 得到回路平衡方程为

$$(u_1 - r_1 i_1 - L_1 \frac{di_1}{dt}) - n_B(u_2 - r_2 i_2 - L_2 \frac{di_2}{dt}) = 0 \quad (3)$$

式中 n_B 为变压器原、副边的变比, $n_B = N_1/N_2$ 。

由单相变压器回路方程模型可直接推广到对称的三相 Y/Y 型变压器。而对于 Y_0/Δ 接法的变压器,由于副边侧相电流难于直接获得,需要进行特殊处理。对于如图2所示的 Y_0/Δ 接法的三相双绕组变压器, u_{ab}, u_{bc}, u_{ca} 为 Δ 侧绕组相电压, i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc} 为 Δ 侧绕组线电流,流过 Δ 侧绕组的相电流为 i_a, i_b, i_c 。原边 Y 侧回路方程为

$$\begin{aligned} u_A &= r_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} + N_1 \frac{d\phi_A}{dt} \\ u_B &= r_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt} + N_1 \frac{d\phi_B}{dt} \\ u_C &= r_C i_C + L_C \frac{di_C}{dt} + N_1 \frac{d\phi_C}{dt} \end{aligned} \quad (4)$$

图2 三相 Y_0/Δ 接法变压器模型Fig.2 Three-phase transformer with Y_0/Δ connection

副边 Δ 侧绕组的回路方程为

$$\begin{aligned} u_a &= r_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + N_2 \frac{d\phi_a}{dt} \\ u_b &= r_b i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + N_2 \frac{d\phi_b}{dt} \\ u_c &= r_c i_c + L_c \frac{di_c}{dt} + N_2 \frac{d\phi_c}{dt} \end{aligned} \quad (5)$$

由于回路平衡方程是以绕组中的电压、电流为基础建立的,对于 TA 接在 Δ 侧绕组出线上的情况,绕组的相电流不能直接测量得到。根据 Δ 侧线电流与相电流的关系 $i_{ab} - i_{ca} = i_{La}$, $i_{bc} - i_{ab} = i_{Lb}$, $i_{ca} - i_{bc} = i_{Lc}$, 以及三相变压器绕组对称的特点有:

$$\begin{aligned} L_A &= L_B = L_C = L_1, & L_{ab} &= L_{bc} = L_{ca} = L_2 \\ r_A &= r_B = r_C = r_1, & r_{ab} &= r_{bc} = r_{ca} = r_2 \end{aligned} \quad (6)$$

Y_0/Δ 三相变压器的回路方程可以变换为

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_a}{dt} - \frac{d\phi_c}{dt} &= \frac{1}{N_2} \left[(u_{ab} - u_{ca}) - r_2 i_{La} - L_2 \frac{di_{La}}{dt} \right] \\ \frac{d\phi_b}{dt} - \frac{d\phi_a}{dt} &= \frac{1}{N_2} \left[(u_{bc} - u_{ab}) - r_2 i_{Lb} - L_2 \frac{di_{Lb}}{dt} \right] \\ \frac{d\phi_c}{dt} - \frac{d\phi_b}{dt} &= \frac{1}{N_2} \left[(u_{ca} - u_{bc}) - r_2 i_{Lc} - L_2 \frac{di_{Lc}}{dt} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

同理,原边侧 Y_0 接法绕组回路方程可以变化为

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_A}{dt} - \frac{d\phi_C}{dt} &= \frac{1}{N_1} \left[u_A - u_C - r_1(i_A - i_C) - L_1 \frac{d(i_A - i_C)}{dt} \right] \\ \frac{d\phi_B}{dt} - \frac{d\phi_A}{dt} &= \frac{1}{N_1} \left[u_B - u_A - r_1(i_B - i_A) - L_1 \frac{d(i_B - i_A)}{dt} \right] \\ \frac{d\phi_C}{dt} - \frac{d\phi_B}{dt} &= \frac{1}{N_1} \left[u_C - u_B - r_1(i_C - i_B) - L_1 \frac{d(i_C - i_B)}{dt} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

由式(7)(8)得到 Y_0/Δ 接法变压器的回路平衡方程为

$$\begin{aligned} u_A - u_C - r_1(i_A - i_C) - L_1 \left(\frac{di_A}{dt} - \frac{di_C}{dt} \right) &= \\ n_B \left[(u_{ab} - u_{ca}) + r_2 i_{La} + L_2 \frac{di_{La}}{dt} \right] \\ u_B - u_A - r_1(i_B - i_A) - L_1 \left(\frac{di_B}{dt} - \frac{di_A}{dt} \right) &= \\ n_B \left[(u_{bc} - u_{ab}) + r_2 i_{Lb} + L_2 \frac{di_{Lb}}{dt} \right] \\ u_C - u_B - r_1(i_C - i_B) - L_1 \left(\frac{di_C}{dt} - \frac{di_B}{dt} \right) &= \\ n_B \left[(u_{ca} - u_{bc}) + r_2 i_{Lc} + L_2 \frac{di_{Lc}}{dt} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

1.2 变压器漏感分析

由于铁磁材料存在饱和现象,主磁通与建立它的电流之间的关系是非线性的,即 ϕ_m 与绕组电流不是正比关系;但是漏磁通主要沿非铁磁材料闭合,它与绕组电流保持线性关系,且漏感可用下式表示^[6],即

$$L = \frac{\phi_\delta}{i} = \frac{N(Ni\Lambda_\delta)}{i} = N^2\Lambda_\delta \quad (10)$$

式中 N 为线圈的匝数; Λ_δ 为漏感磁通所经过磁路的磁导,即磁阻 R_m 的倒数,所以 L 与漏磁通所经过磁路的磁导 Λ_δ 成正比。

由于漏磁通是通过非磁性物质闭合的,磁路不会饱和, Λ_δ 是常数,其大小与绕组尺寸、形状及布置方式等物理外形因素有关。正常运行状态下变压器绕组的匝数和漏磁通所经过磁路的磁导均未发生变化,则变压器绕组的漏感亦不会发生变化,且漏感的大小不受铁芯饱和程度的影响^[7]。而当变压器绕组发生变形时,绕组的物理结构及相对位置发生了改变,漏电感参数也将发生变化。而相对于漏电感而言,变压器绕组的电阻值对温度更为敏感,受绕组形变量影响较小。

因此,变压器绕组电阻和漏感参数与绕组结构和相对位置密切相关,因此可以通过对上述绕组回路平衡方程中电阻和漏感值进行监测,以实现绕组变形的在线诊断。

2 参数辨识在绕组变形在线监测中的应用

绕组的漏感是由绕组结构所决定的,对于一台变压器而言,当绕组发生变形,几何尺寸随之发生变化时,其漏感值也要变化。因此,本文采用正常运行状态下原、副边回路平衡方程,即式(3)等于零的关系,选用递推最小二乘算法对变压器绕组各侧漏感值进行在线实时辨识,达到绕组变形在线监测的目的。

2.1 最小二乘法^[8]

最小二乘法是以选用误差平方和为准则,来最佳拟合出符合实验数据的最优参数估计的数学方法。

假定变量 y 与一组 n 维变量 $\mathbf{X}=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 有如下线性关系,即

$$y(t)=a_1x_1(t)+a_2x_2(t)+\dots+a_nx_n(t) \quad (11)$$

式中, $\{a_i, i=1, 2, \dots, n\}$ 是一组未知的定常参数,且 n 已知。通过观测不同时刻的输入、输出数 $\{y(j), x_1(j), x_2(j), \dots, x_n(j)\}$ 估计这些未知的待定参数 a_i 。根据不同时刻的输入、输出数据由式(11)可得 m 个线性方程:

$$y(j)=a_1x_1(j)+a_2x_2(j)+\dots+a_nx_n(j) \quad (12)$$

$$j=1, 2, \dots, m \quad m \geq n$$

即

$$\mathbf{Y}=\mathbf{X}\boldsymbol{\theta}+\mathbf{E} \quad (13)$$

式中 $\mathbf{Y}$ 为系统输出向量; $\mathbf{X}$ 为系统变换矩阵; $\boldsymbol{\theta}$ 为待辨识参数向量; $\mathbf{E}$ 为测量误差。

用递推最小二乘算法辨识参数 $\boldsymbol{\theta}$, 步骤如下:

$$\boldsymbol{\theta}(k+1)=\boldsymbol{\theta}(k)+\mathbf{F}(k)[\mathbf{y}(k)-\mathbf{x}^T(k)\boldsymbol{\theta}(k)]$$

$$\mathbf{P}(k)=[\mathbf{I}-\mathbf{F}(k)\mathbf{x}^T(k)]\mathbf{P}(k-1) \quad (14)$$

$$\mathbf{F}(k+1)=\mathbf{P}(k)\mathbf{x}(k)[\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)+\mathbf{I}]^{-1}$$

2.2 变压器绕组参数辨识

变压器绕组参数的求取就是对式(5)中原、副边电阻、漏电感参数的求解,因此本文采用递推最小二乘方法估算。式(5)可以重新改写为

$$u_1-n_Bu_2=L_1\frac{di_1}{dt}-n_BL_2\frac{di_2}{dt}+r_1i_1-n_Br_2i_2 \quad (15)$$

为了进行递推最小二乘运算,将上式进行离散化处理,可以得到下式:

$$\left[\frac{u_1(n+1)+u_1(n)}{2}-n_B\frac{u_2(n+1)+u_2(n)}{2}\right]=\left[r_1\frac{i_1(n+1)+i_1(n)}{2}+r_2n_B\frac{i_2(n+1)+i_2(n)}{2}\right]+L_1\frac{[i_1(n+1)-i_1(n)]}{\Delta T}+n_BL_2\frac{[i_2(n+1)-i_2(n)]}{\Delta T} \quad (16)$$

在离散式中,变压器绕组双端电压、电流量可以直接测量获取作为模型的输入、输出,两端绕组的电阻和漏感值作为待辨识的参数,即构成系统辨识模型。待辨识的参数相量为 $\boldsymbol{\theta}=[r_1, L_1, r_2, L_2]^T$ 。

2.3 参数估算存在问题及解决方法

最小二乘的一次完成算法要求 $(\mathbf{X}^T\mathbf{X})$ 必须是正则矩阵(即可逆矩阵),其充分必要条件是过程的输入信号必须是 $2n$ 阶持续激励信号。辨识所用的输入

信号不能随意选择,否则可能造成不可辨识。

电力变压器在运行过程中达到稳定状态时,电力系统中稳态电压、电流都是单一频率 50 Hz 的正弦波。在上述变压器辨识模型中,输入信号是原、副边的电流量,输出信号是原、副边电压量。输入信号过于单一,此时变压器模型不可能被充分激励,势必造成不可辨识性^[9-10],对于参数向量 $\boldsymbol{\theta}=[r_1, L_1, r_2, L_2]^T$ 的求解造成困难。正常稳态运行状态下,变压器励磁电流很小,忽略励磁电流影响,即原、副边侧电流关系为 $i_2=n_BL_1$,式(16)可以变化为

$$\left[\frac{u_1(n+1)+u_1(n)}{2}-n_B\frac{u_2(n+1)+u_2(n)}{2}\right]=\left[(r_1+n_B^2r_2)\frac{i_1(n+1)+i_1(n)}{2}+(L_1+n_B^2L_2)\frac{i_1(n+1)-i_1(n)}{\Delta T}\right] \quad (17)$$

式中待辨识参数降为 2 个,即 $r_1+n_B^2r_2, L_1+n_B^2L_2$,利用原、副边电压及原边侧电流数据可实现在线辨识。

3 试验仿真及结果分析

为了验证基于回路平衡方程变压器绕组变形在线监测算法,首先利用电磁暂态仿真程序(EMTP)中提供的三相变压器模型对变压器正常运行状态下对该原理中变压器参数辨识方法进行可行性仿真分析。模型变压器的好处是:根据对变压器参数的设定,可以准确了解参数数值大小。因此,可以利用 EMTP 中变压器产生的数据,即双端电压、电流量作为输入,验证递推最小二乘算法的可行性。

由于数字仿真是一种相对理想化的理论验证,因此在模型仿真中作了如下设定。电力变压器模型参数:额定容量 250 MV·A,额定电压 400/132 kV,空载电流 0.2%,空载损耗 140 kW,接线组别为 Y_0/Δ 。其中,外加第 3 绕组为三角形接法,用来构成励磁回路,仿真变压器空载合闸的励磁涌流过程。

EMTP 中设定变压器参数为

$$r_A=r_B=r_C=r_1=0.94\ \Omega, r_a=r_b=r_c=r_2=0.2848\ \Omega$$

$$L_A=L_B=L_C=L_1=0.154\ \text{H}, L_a=L_b=L_c=L_2=0.051\ \text{H}$$

同时,在辨识算法中采用短路阻抗原理中近似分离变压器各个绕组电阻和电抗的假设: $r_1=n_B^2r_2, L_1=n_B^2L_2$ (与本文所提利用估算 $r_1+n_B^2r_2$ 和 $L_1+n_B^2L_2$ 解决模型不可辨识问题的原理有差别)。

在正常运行状态,双端电压、电流波形由 EMTP 模型变压器仿真产生,将电压、电流作为输入量代入递推最小二乘算法中来估计变压器原、副边绕组参数。采样频率为每周期 200 个采样点,选取 40 ms 长度的数据。得到图 3,4 的估计结果。

算法可以在 100 个采样点数内收敛于实际真值附近,估计的误差范围 $<1\%$,且参数的估计值收敛后较为稳定,算法收敛速度和准确性能够满足一定的要求。因此,利用最小二乘参数辨识方法对变压器绕组参数进行实时估算是可行的。

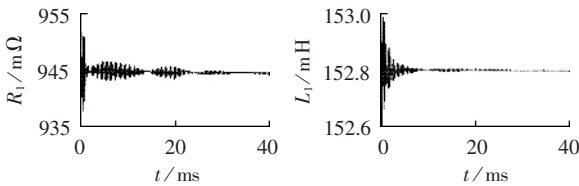


图 3 正常运行的仿真变压器原边电阻、漏感估计

Fig.3 Estimation of primary resistance and leakage inductance for ordinary simulative transformer

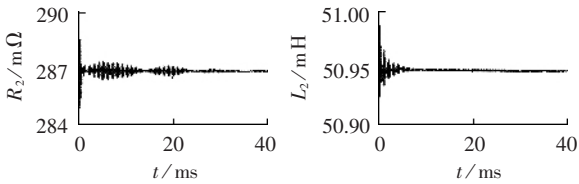


图 4 正常运行的仿真变压器副边电阻、漏感仿真估计

Fig.4 Estimation of secondary resistance and leakage inductance for ordinary simulative transformer

另外,采用西安交通大学动模实验变压器试验数据对本文提出的参数模型的估算方法进行了原理验证。试验变压器为三单相变压器组,联结方式为 Y_0/Δ 接法。单相变压器参数为:额定容量 $2\text{ kV}\cdot\text{A}$,额定电压 $u_1/u_2=1\,000\text{ V}/220\text{ V}$,试验中变压器变比接为 $1:1$ 。测得空载电流 1.2% ,空载损耗 0.9% ;短路电压 13.6% ,短路损耗 1% 。每周周期采样 100 个点。

根据空载短路试验计算得变压器绕组的参数为: $r_1+n_B^2r_2=0.24(\Omega)$, $L_1+n_B^2L_2=0.009\,5(\text{H})$ 。

对于 Y/Δ 接法的变压器,利用正常运行状态下变压器原、副边侧采集到的电压、电流数据,用递推最小二乘算法能实时辨识绕组参数,结果见图 5。

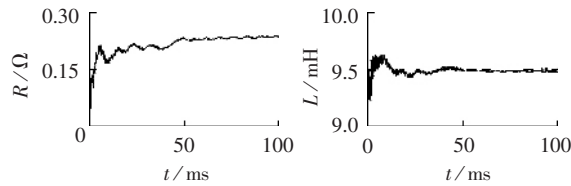


图 5 动模变压器绕组参数辨识曲线

Fig.5 Transformer winding parameter identification curve

经过 $2\sim 3$ 个周期数据的辨识,参数值趋于稳定,得到 $r_1+n_B^2r_2=0.27(\Omega)$, $L_1+n_B^2L_2=0.009\,38(\text{H})$,辨识结果与测量所得的结果相近。

动模试验变压器原、副边侧都有很多抽头,通过匝间抽头短接模拟绕组不同部位故障引起的绕组电阻、漏电感的变化,电阻、漏电感参数辨识结果如表 1 所示。从表 1 可见:正常运行状态下的漏感参数辨识值与测量值变化量为 1.26% ;当小匝数短接绕组抽头改变绕组漏感时,如原边 2.27% 匝短接时辨识值变化量为 5.42% ,副边辨识值变化量为 3.84% ,漏感参数辨识结果有明显变化。IEC 26007625 中以电力变压器短路耐受试验前后的短路电抗的变化不超过某一限值作为变压器耐受短路能力的判据,如对于普遍使用的同心式绕组,短路电抗的变化不能超过 2% ,箔式和短路电抗超过 3% 以上者不能超

表 1 动模变压器绕组漏感参数辨识结果
Tab.1 Results of transformer winding leakage inductance identification

状 态	$r_1+n_B^2r_2/\Omega$	$L_1+n_B^2L_2/\text{mH}$
离线测量值	0.240	9.50
正常运行	0.270	9.38
原边 2.27% 匝间故障	0.251	8.87
副边 2.27% 匝间故障	0.258	9.02
原边 4.54% 匝间故障	0.182	8.12
副边 4.54% 匝间故障	0.193	8.30
原边 9.08% 匝间故障	0.099	7.42
副边 9.08% 匝间故障	0.132	7.66

过 4% ,此判据也可考虑作为在线监测运行中变压器绕组变形程度的一个参考指标,而绕组漏感参数值的在线辨识正可提供这样一种手段。

本文提出的绕组变形在线监测算法灵敏度很大程度上取决于对变压器原、副边绕组参数的准确估计。由于试验条件限制,绕组变形只能用小匝数匝间短路近似模拟,算法精度及变形监测能力的验证还存在一定困难。因此,如何准确估计变压器原、副边参数成为关键问题,也是今后研究工作重点。

4 结论

本文提出一种基于变压器等值回路平衡方程进行变压器绕组参数辨识从而实现绕组变形在线监测的方法,EMTP 仿真和动模试验结果表明:

a. 绕组参数结果正确,参数辨识算法可以识别出参数变化,从而验证了通过绕组漏感参数辨识实现绕组变形在线监测方法的正确性;

b. 基于回路平衡方程原理的变压器绕组变形在线监测灵敏度的高低取决于变压器参数估计的准确性,递推最小二乘算法可以满足实时估计变压器参数的要求,且收敛速度比较快,能够为绕组变形在线监测手段的研究提供参考。

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] 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.
[3] 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.
[4] 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.

(上接第14页 continued from page 14)

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.

[5] 高仕斌,王果. 变压器绕组变形在线监测方法的改进[J]. 高电压技术,2002,28(9):31-33.

GAO Shi-bin,WANG Guo. Research on on-line monitoring of winding deformation of power transformer[J]. **High Voltage Engineering**,2002,28(9):31-33.

[6] 谢毓城. 电力变压器手册[M].北京:机械工业出版社,2003.

[7] 王正茂,阎治安,崔新艺. 电机学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2000.

[8] 方崇智,箫德云. 过程辨识[M]. 清华大学出版社,2003.

[9] 边肇祺,张学工. 模式识别[M]. 北京:清华大学出版社,

2004.

[10] 刘浩,刘玉田. 模糊数学在状态估计不良数据检测辨识中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报,1996,12(3):50-55.

LIU Hao,LIU Yu-tian. The application of fuzzy mathematics at bad data detection and identification of state estimation [J]. **Proceedings of the EPSA**,1996,12(3):50-55.

(责任编辑:李 玲)

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。

Study on on-line monitoring of the transformer winding deformation based on equivalent circuit equilibrium equation

LI Peng¹,ZHANG Bao-hui¹,HAO Zhi-guo¹,CHU Yun-long²

(1. Xi'an Jiaotong Univesity,Xi'an 710049,
2. Northwest China Grid Company,Xi'an,Shanxi Province,China)

Abstract: Transformer winding deformation occurred during operation may cause the change of leak inductance. A transformer winding deformation idetification method is proposed,which is baded on the equivalent circuit equation and applies the least square algorithm for parameter estimation. With the dual-winding single-phase and three-phase transformer equivalent circuit equations as the foundation,the winding parameters including the resistance and leak inductance of the primary and secondary windings are estimated for online transformer wingding deformation monitoring. A new solution is put forward for the irrecognizability of transformer stable state circuit equation model. Simulation and test indicate the method rational and effective.

The project is supported by National Science Foundation of China(NSFC,No.50577050)

Key words: winding deformation; equivalent circuit equilibrium equation; parameter identification; leak inductance; on-line monitoring