

变压器漏电感参数在线辨识方法研究

高晶, 王建华, 张保会, 郝治国, 邵博
(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 利用变压器等值回路平衡方程原理, 提出了利用加权递推最小二乘法的变压器漏电感参数辨识方法, 给出了变压器漏电感参数辨识的等效模型, 对变压器模型参数辨识的可行性进行研究, 针对不同的情况, 分别提出了归算到一次侧的变压器绕组参数辨识方法及变压器原副边漏电感参数辨识方法. 利用动模实验数据对变压器漏电感参数辨识的结果表明, 参数辨识算法稳定, 不受负荷波动以及功率因数变化的影响, 辨识结果具有较高的精度.

关键词: 漏电感; 参数辨识; 变压器保护; 最小二乘法; 等值方程

中图分类号: TM771 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)02-0199-05

On-Line Identification Algorithm for Transformer Leakage Inductance

GAO Jing, WANG Jianhua, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, SHAO Bo
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Leakage inductance is one of the primary parameters in transformer relay protection and on-line monitoring technology. An online identification algorithm for transformer leakage inductance is proposed with recursive weighted least-square algorithm. The equivalent circuit equation of the transformer is achieved to derive the model identifying the leakage inductance. Through analyzing the identifiability of transformer model, two different methods are presented for the identification of resistance and leakage inductance parameters. The experimental transformer circuit model is designed to verify the online identification algorithm. The dynamic test shows that this algorithm is stable and imperious to the fluctuation of loads or power factor, and the identification results have a higher accuracy.

Keywords: leakage inductance; parameter identification; transformer protection; least-square algorithm; equivalent equation

电力变压器在电能传输中起着枢纽作用, 其故障会对电力系统供电可靠性和系统运行稳定性带来严重影响. 现代电力系统的发展要求提高电力设备的安全运行水平, 不仅要求提高电力系统继电保护动作的可靠性和灵敏度, 还要求能够监测电力设备的运行状态, 实现预知性检修, 进而避免设备的故障. 漏电感参数是变压器保护及状态监测中关键的参数之一, 它作为研究绕组状态的一个重要的参数, 由于其不随运行中状态电气量改变的特性, 因此不管是对绕组变形的研究还是对基于绕组的保护原理的研究, 它都起着非常重要的作用.

本文对变压器漏电感参数在线辨识方法进行了研究, 利用变压器等值回路平衡方程原理, 对变压器绕组建模, 给出了变压器漏电感参数辨识算法的等效模型, 提出了利用加权递推最小二乘法的变压器漏电感参数辨识方法. 动模实验数据验证了该方法的可行性.

1 变压器模型方程

1.1 变压器模型回路平衡方程原理

对于双绕组单相变压器, 如图1所示, 只要变压器本身没有内部短路, 不管变压器是正常负荷状态,

还是外部短路、过励磁或空载合闸情况,对于变压器的每一绕组回路,基尔霍夫的回路电压方程永远成立^[1-2].

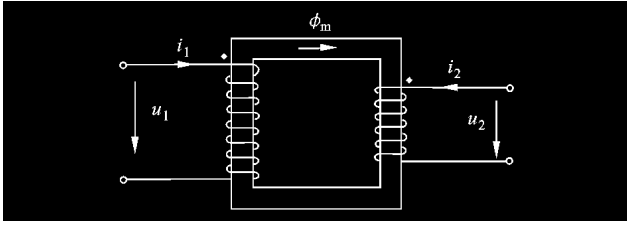


图1 双绕组单相变压器模型

无论变压器铁芯是否饱和,利用原、副边电路的电压、电流瞬时值都可得到下面的回路方程关系式

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

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

式中: u_1 和 u_2 为原、副边绕组的电压; i_1 和 i_2 为原、副边绕组的电流; L_1 和 L_2 为原、副边绕组的漏电感; N_1 和 N_2 为原、副边绕组的匝数; ϕ_m 为原、副边绕组的互感磁通(包括流经铁芯的主磁通及与原副边绕组都匝链的等效互感磁通)。

式(1)、式(2)中的 $d\phi_m/dt$ 项包含了 $B-H$ 曲线的非线性关系,很难直接获得。消去 $d\phi_m/dt$ 得到回路平衡方程为

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

式中: n_B 为变压器原、副边的变比, $n_B = \frac{N_1}{N_2}$ 。

由单相变压器回路方程模型可以直接推广到对称的三相 Y/Y 型变压器,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。

1.2 三相 Y_0/Δ 接法变压器模型方程

对于如图2所示的 Y_0/Δ 接法的三相变压器,其一次侧绕组等值方程式与二次侧绕组磁通方程分别如下

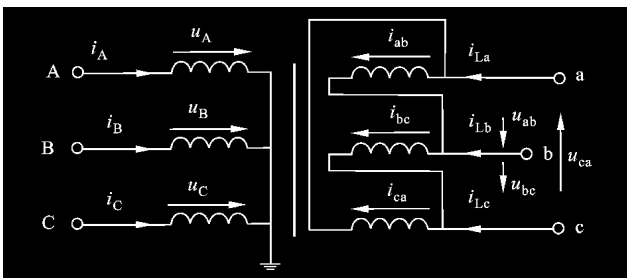


图2 Y_0/Δ 接线的三相变压器模型

$$\left. \begin{aligned} u_A &= r_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} + N_1 \frac{d\phi_{m1}}{dt} \\ u_B &= r_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt} + N_1 \frac{d\phi_{m2}}{dt} \\ u_C &= r_C i_C + L_C \frac{di_C}{dt} + N_1 \frac{d\phi_{m3}}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} u_{ab} &= r_{ab} i_{ab} + L_{ab} \frac{di_{ab}}{dt} + N_2 \frac{d\phi_{m1}}{dt} \\ u_{bc} &= r_{bc} i_{bc} + L_{bc} \frac{di_{bc}}{dt} + N_2 \frac{d\phi_{m2}}{dt} \\ u_{ca} &= r_{ca} i_{ca} + L_{ca} \frac{di_{ca}}{dt} + N_2 \frac{d\phi_{m3}}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

消去磁通,可得到变压器模型方程如下

$$\left. \begin{aligned} \left(u_A - r_A i_A - L_A \frac{di_A}{dt}\right) - \\ n_B \left(u_{ab} - r_{ab} i_{ab} - L_{ab} \frac{di_{ab}}{dt}\right) &= 0 \\ \left(u_B - r_B i_B - L_B \frac{di_B}{dt}\right) - \\ n_B \left(u_{bc} - r_{bc} i_{bc} - L_{bc} \frac{di_{bc}}{dt}\right) &= 0 \\ \left(u_C - r_C i_C - L_C \frac{di_C}{dt}\right) - \\ n_B \left(u_{ca} - r_{ca} i_{ca} - L_{ca} \frac{di_{ca}}{dt}\right) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

在一般情况下,△侧的电流互感器测量的是线电流的值,得不到绕组内部的电流值,此时可以采用一种“角变星”的转角方式来获得△侧绕组电流。对于△侧绕组,由于利用线电流直接计算得到绕组电流不包含零序电流,零序电流需要利用 Y_0 侧绕组的电流计算获得

$$\left. \begin{aligned} i_0 &= n_B (i_A + i_B + i_C) / 3 \\ i_{ab} &= (i_{1a} - i_{1b}) / 3 + i_0 \\ i_{bc} &= (i_{1b} - i_{1c}) / 3 + i_0 \\ i_{ca} &= (i_{1c} - i_{1a}) / 3 + i_0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

当 Y_0/Δ 三相变压器的三相绕组完全对称,或者不对称的部分可忽略不计时,变压器原、副边 A、B、C 三相的电阻、电感可分别表示为 r_1, r_2, L_1, L_2 , 利用 A、B、C 三相两两相减的方式消去磁通,可得到 Y_0/Δ 接法的三相变压器模型方程为

$$\left[(u_A - u_C) - r_1 (i_A - i_C) - L_1 \left(\frac{di_A}{dt} - \frac{di_C}{dt} \right) \right] - \\ n_B \left[(u_{ab} - u_{ca}) - r_2 i_{1a} - L_2 \frac{di_{1a}}{dt} \right] = 0 \quad (8a)$$

$$\left[(u_B - u_A) - r_1 (i_B - i_A) - L_1 \left(\frac{di_B}{dt} - \frac{di_A}{dt} \right) \right] - \\ n_B \left[(u_{bc} - u_{ab}) - r_2 i_{1b} - L_2 \frac{di_{1b}}{dt} \right] = 0 \quad (8b)$$

$$\left[(u_C - u_B) - r_1(i_C - i_B) - L_1 \left(\frac{di_C}{dt} - \frac{di_B}{dt} \right) \right] - n_B \left[(u_{ca} - u_{bc}) - r_2 i_{1c} - L_2 \frac{di_{1c}}{dt} \right] = 0 \quad (8c)$$

三绕组变压器同样可以根据不同等级电压方程消磁通的方法,来分别列出高-中侧、高-低侧或是中-低侧的变压器模型方程。如果三绕组变压器含有△侧接法,可按与Y₀/△接法变压器相同的处理方法来列写△侧接法的电流方程。

2 最小二乘算法

2.1 最小二乘算法的基本原理

最小二乘技术提供一个估算方法,通过估算能得到一个在最小方差意义上与实验数据最好拟合的数学模型^[3]。为提高辨识参数的估计精度,减小内存量,提高计算速度以适应在线计算,本文采用最小二乘参数估计的递推算法(RLS)对变压器参数进行估计。另外,为了解决最小二乘算法中的数据饱和问题^[4-5],在递推算法中引入遗忘因子 μ ($\mu=0.997$),辨识算法可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \hat{\boldsymbol{\theta}}(k) &= \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1) + \mathbf{K}(k) [z(k) - \mathbf{h}^T(k) \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)] \\ \mathbf{K}(k) &= \mathbf{P}(k-1) \mathbf{h}(k) [\mathbf{h}^T(k) \mathbf{P}(k-1) \mathbf{h}(k) + \mu]^{-1} \\ \mathbf{P}(k) &= \frac{1}{\mu} [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k) \mathbf{h}^T(k)] \mathbf{P}(k-1) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

2.2 算法的可辨识性及初值的选取

对于给定的 $m \times 1$ 数据矩阵 $\mathbf{z}$,利用最小二乘法求解矩阵方程 $\mathbf{z} = \mathbf{H}\boldsymbol{\theta}$,当矩阵 $\mathbf{H}$ 的秩大于或等于未知数个数 n 时,未知参数 $\boldsymbol{\theta}$ 是可辨识的^[6]。变压器正常运行状态下模型方程中数据矩阵 $\mathbf{H}$ 的秩为2,方程只能辨识2个独立的参数。为了解决参数可辨识性问题,本文的参数辨识方法分两步进行,首先辨识绕组归算到一次侧的等值参数,然后将等值电阻或等值漏电感作为已知量,根据实际需要辨识变压器原副边的绕组参数。

递推算法需要事先选择初始状态 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(0)$ 和 $\mathbf{P}(0)$ 。取

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{P}(0) &= \alpha \mathbf{I} \\ \hat{\boldsymbol{\theta}}(0) &= \boldsymbol{\varepsilon} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: α 为充分大的实数; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为充分小的实向量。经一定次数递推后,即可得到满意的结果。

3 变压器绕组参数辨识

3.1 归算到一次侧的变压器绕组参数辨识

正常运行状态下,单相双绕组变压器漏电感方

程可以表示为

$$\begin{aligned} u_1 - n_B u_2 &= \\ r_1 i_1 + n_B^2 r_2 (i_1 - i_m) + L_1 \frac{di_1}{dt} + n_B^2 L_2 \frac{d(i_1 - i_m)}{dt} &= \\ r_k i_1 + L_k \frac{di_1}{dt} - n_B^2 r_2 i_m - n_B^2 L_2 \frac{di_m}{dt} &= \\ r_k i_1 + L_k \frac{di_1}{dt} - f_m & \quad (11) \end{aligned}$$

式中: r_k 和 L_k 为绕组归算到一次侧的等值电阻及漏电感; i_m 为励磁电流; f_m 为励磁电流补偿项。

将二次侧电压电流及绕组参数归算到一次侧, f_m 表示为

$$f_m = r'_2 i_m + L'_2 \frac{di_m}{dt} \quad (12)$$

式中: r'_2 、 L'_2 分别为变压器二次侧绕组参数 r_2 、 L_2 归算到一次侧的归算值。其相量表达式为

$$\begin{aligned} F_m &= (r'_2 + j\omega L'_2) I_m = \frac{r'_2 + j\omega L'_2}{r_m + j\omega L_m} E_1 \approx \\ \frac{r'_2 + j\omega L'_2}{r_m + j\omega L_m} U_1 &= a e^{j\theta} U_1 \end{aligned} \quad (13)$$

式中

$$\begin{aligned} a &= \frac{(r'_2 + (\omega L'_2)^2)^{1/2}}{(r_m^2 + (\omega L_m)^2)^{1/2}} \\ \theta &= \arctg\left(\frac{\omega L'_2}{r'_2}\right) - \arctg\left(\frac{\omega L_m}{r_m}\right) \end{aligned}$$

由式(13)可知,对于参数一定的变压器, f_m 的值只与一次侧电压有关。对于大型电力变压器有 $r'_2 \ll \omega L'_2$ 、 $r_m \ll \omega L_m$,则 $a \approx L'_2/L_m$, $\theta \approx 0$ 。例如,对于测得励磁电流为1%、短路电压为10%的变压器, $a=0.0005$ 。

将式(11)作为变压器绕组等值参数辨识方程,利用递推最小二乘算法可以实现对 r_k 和 L_k 的在线辨识,最小二乘辨识模型可以表示为

$$\left. \begin{aligned} h_1(k) &= i_1(k) \\ h_2(k) &= \frac{i_1(k+1) - i_1(k-1)}{2\Delta T} \\ z(k) &= u_1(k) - n_B u_2(k) + f_m(k) \\ \theta_1 &= r_k \\ \theta_2 &= L_k \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中: ΔT 为采样间隔; $i_1(k)$ 、 $u_1(k)$ 、 $u_2(k)$ 为 k 时刻的采样值。将表达式代入式(9),通过递推运算,即可得到参数的辨识结果。

3.2 变压器原副边漏电感参数辨识

令变压器的绕组电阻 $r_1 = n_B^2 r_2 = r_k/2$,变压器的漏电感辨识模型可以写为

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= L_1 \\ \theta_2 &= L_2 \\ z(k) &= u_1(k) - n_B u_2(k) - r_1 i_1(k) + n_B r_2 i_2(k) \\ h_1(k) &= \frac{i_1(k+1) - i_1(k-1)}{2\Delta T} \\ h_2(k) &= -n_B \frac{i_2(k+1) - i_2(k-1)}{2\Delta T} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

同样,将表达式代入式(9),通过递推运算,即可得到漏电感参数的辨识结果。

4 参数辨识误差分析

4.1 模型误差

考虑到参数的可辨识性问题,本文对于变压器回路平衡方程进行了近似,从而得到了简化的绕组参数辨识模型,由于模型简化带来的模型误差将会引起参数辨识结果存在误差。

对于归算到一次侧的变压器绕组参数辨识,本文采用励磁电流补偿项 f_m 来补偿励磁电流对参数辨识结果的影响。 f_m 与绕组二次侧参数 r'_2 、 L'_2 及励磁电流 i_m 有关,由于 r'_2 、 L'_2 无法直接获取同时绕组变形将会引起其值变化,文中利用变压器短路实验数据进行了估算。励磁电流 i_m 无法直接测量,只能通过变压器空载实验获取的励磁支路参数及运行电压进行估计,因此励磁电流补偿项 f_m 的值必然存在着误差,从而为参数辨识结果带来误差。

变压器原、副边绕组漏电感参数的辨识模型是在假设归算到同一侧的原副边绕组电阻相等且运行中不变的情况下得到的,这与实际运行的变压器存在着差别。当绕组电阻值测量不准确或由于焊接点接触不良等因素影响引起绕组电阻变化时,绕组漏电感参数辨识结果将存在误差。

4.2 测量误差

在实际测量过程中,由于变压器原、副边的电压互感器和电流互感器本身均存在误差,将会给参数辨识带来误差。关于互感器测量误差带来的参数辨识误差文献[7]都进行了分析,本文不再赘述。由于采用最小二乘辨识算法,电压电流信号的随机误差不会给参数辨识带来影响。

5 动模实验验证与结果分析

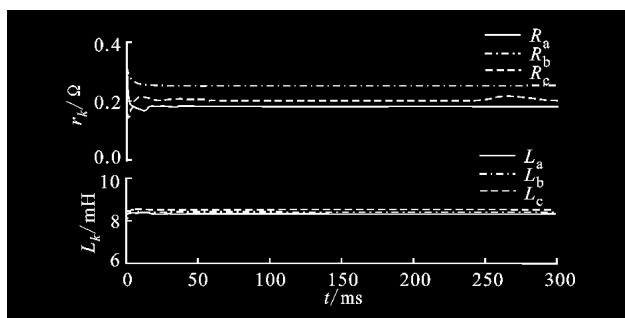
为了验证辨识算法的正确性,本文利用电力系统动态模拟实验室中的模拟变压器进行了物理实验,实验变压器是联结方式为 Y/d-11 的三单相变

压器组,单相变压器的额定容量为 $2 \text{ kV} \cdot \text{A}$,额定电压为 $380 \text{ V}/1\,040 \text{ V}$ 。实验中变比为 $1:1$,实验频率为 50 Hz ,采样速率为每周波 200 点,A/D 转换为 12 位精度,变压器的空载电流为 1.1% ,空载损耗为 0.9% ,计算得 $L_m = 5.64 \text{ H}$,短路实验结果见表 1。

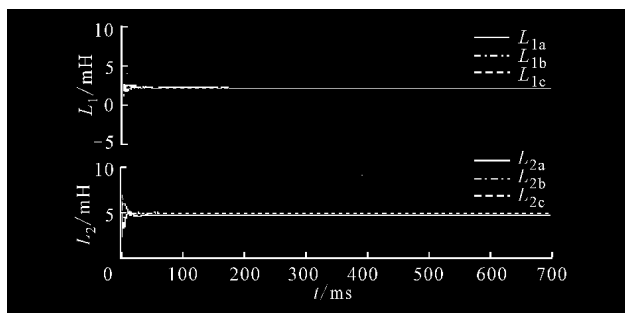
表 1 变压器短路实验结果

相别	短路电压/%	短路损耗/W	r_k/Ω	L_k/mH
A	11.1	18	0.22	8.493
B	11.2	22	0.27	8.582
C	11.3	20	0.24	8.678

实验系统负载率为 100% ,负载功率因数为 0.9 ,辨识波形如图 3 所示。从图中可以看出,辨识结果在 40 ms 左右收敛,并且收敛后辨识结果稳定。



(a)变压器归算到一次侧参数辨识



(b)变压器漏电感参数辨识

图 3 变压器参数辨识曲线

表 2 给出了参数辨识结果,采用递推最小二乘算法对变压器绕组参数进行辨识时,电阻值辨识误差较大,而漏电感值具有较高的精度,漏电感值的误差在 0.5% 左右。但是,由于实验中测量误差及补偿误差的影响,辨识值与测量值之间总是存在着一定的差别。

表 3 为负载功率因数为 0.9 、负荷率在 $30\% \sim 100\%$ 波动时的参数辨识结果。表 4 为负荷率为 90% 、功率因数从 $1.0 \sim 0.6$ 变化时的参数辨识结果。从表 3、表 4 可以看出,参数辨识结果基本不受负荷变化率及功率因数的影响。

表2 变压器参数辨识结果

相别		A	B	C
RL 辨识	r_k/Ω	0.219 2	0.273 3	0.200 9
	误差/%	-0.36	1.20	16.30
	L_k/mH	8.502 1	8.598 8	8.660 3
	误差/%	0.11	0.20	-0.20
漏 电 感 辨 识	L_1/mH	3.227 4	3.005 7	3.145 9
	L_2/mH	5.295 3	5.562 4	5.584 3
	L_k/mH	8.522 7	8.568 0	8.730 2
	误差/%	0.35	-0.16	0.60

表3 负荷变化率对辨识结果的影响

负荷率/%	100	90	60	30
A	8.488	8.502 1	8.473 5	8.479 2
L_k/mH B	8.595 6	8.598 8	8.577 6	8.582 1
C	8.672 6	8.660 3	8.674 7	8.678 3

表4 功率因数变化对辨识结果的影响

功率因数	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6
A	8.486 5	8.502 1	8.490 5	8.512 5	8.508 9
L_k/mH B	8.606 9	8.598 8	8.571 4	8.577 9	8.601 7
C	8.686 6	8.660 3	8.670 3	8.654 2	8.705 9

6 结 论

本文将变压器漏电感方程作为参数辨识模型,利用加权递推最小二乘算法实现了变压器绕组参数的实时辨识.动模实验结果表明:

(1)以变压器漏电感方程作为参数辨识模型的参数辨识算法可以实现漏电感参数的在线辨识,算法具有较高的精度,增加遗忘因子的加权递推最小二乘算法可以加快辨识算法的收敛性,更快地得到稳定的参数辨识结果;

(2)参数辨识算法稳定,变压器运行条件包括负荷大小和功率因数的变化不会对参数辨识结果产生影响;

(3)参数辨识误差主要由辨识算法存在的励磁电流、三角侧绕组的环流补偿相误差,以及实时读取数据时存在的互感器及数据采集系统的测量误差组成,当辨识参数应用在精确度较高的场合时,可以对误差项进行一定的补偿.

参考文献:

[1] SACHDEV M S, SIDHU T S, WOOD H C. A digital relaying algorithm for detecting transformer winding faults[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4 (3): 1638-1648.

[2] 熊小伏,邓祥力,游波. 基于参数辨识的变压器微机保护[J]. 电力系统自动化,1999,23(11): 18-21. XIONG Xiaofu, DENG Xiangli, YOU Bo. Transformer protection using parameter identification method [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(11): 18-21.

[3] 侯媛彬,汪梅,王立琪. 系统辨识及其 MATLAB 仿真[M]. 北京:科学出版社,2004.

[4] KUMAR R. Simultaneous adaptive control and identification via the weighted least-square algorithm[J]. IEEE Trans on Automat, 1984, 29(3): 259-263.

[5] DING F, CHEN T. Identification of multivariable systems based on finite impulse response models with flexible orders[C]// Proceeding of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation Niagara Falls, Piscataway: IEEE, 2005: 770-775.

[6] 韩崇昭,王月娟,万百五. 随机系统理论[M]. 西安:西安交通大学出版社,1987.

[7] 高仕斌,王果. 变压器绕组变形在线检测方法的改进[J]. 高电压技术, 2002, 28(9): 31-33. GAO Shibin, WANG Guo. Research on on-line monitoring of winding deformation of power transformer [J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(9): 31-33.

(编辑 杜秀杰)