

# 基于等效瞬时电感参数辨识的变压器励磁涌流判别方法

朱可<sup>1</sup>, 姜杰<sup>1,2</sup>, 张太勤<sup>2</sup>

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044; 2. 重庆新世纪电气有限公司, 重庆 400030)

**摘要:** 利用变压器空投后 5 ms 的原边数据对变压器等效瞬时电感进行参数辨识, 根据空投时正常变压器磁通未饱和前等效瞬时电感较大而故障变压器等效瞬时电感较小这一特征构成变压器保护原理, 并提出了保护判据, 即等效瞬时电感辨识值小于整定值时判定为变压器空投于内部故障, 否则判定为正常空投。该方法无需知道空投变压器副边电压数据, 充分考虑了现场运行中变压器空投时副边数据不易获取的实际情况。EMTP 数字仿真与动模试验结果表明了该方法的正确性与有效性。

**关键词:** 变压器; 等效瞬时电感; 参数辨识; 内部故障; 励磁涌流

## Distinguishing magnetizing inrush based on characteristic of equivalent instantaneous inductance

ZHU Ke<sup>1</sup>, JIANG Jie<sup>1,2</sup>, ZHANG Tai-qin<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipments & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing New Century Electrical CO.LTD, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** Utilizing the primary-side data in 5 ms after no-load transformer is closed to identify the parameter of equivalent instantaneous inductances. The transformer protection principle is formed according to the characteristic that when no-load transformer is closed, the equivalent instantaneous inductance of normal transformer is comparatively large before flux being saturation while the fault transformer's equivalent instantaneous inductance is comparatively small, and a novel transformer protection criterion is proposed, that is when the value of equivalent instantaneous inductances is smaller than the setting value, it's judged as a transformer with fault, otherwise as a normal transformer. This method does not need the secondary voltage data of the no-load transformer and fully considers the difficulties of obtaining the data in field operation. Simulation results and experimental results of real transformer verify validity and effectivity of the method.

**Key words:** transformer; equivalent instantaneous inductances; parameter identification; internal fault; inrush current

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)20-0012-05

## 0 引言

目前, 变压器保护的主流配置都是以基尔霍夫电流定律为依据的纵联差动保护。由于变压器自身的特点, 使用差动保护时如何区分励磁涌流和故障电流是一个固有的、不可回避的问题, 多年来一直成为研究的热点。现在实际工程中主要使用基于电流波形特征的二次谐波制动、间断角制动等方法来判别励磁涌流。随着电力系统的复杂性增加, 无功补偿用的并联电容器和超高压长输电线分布电容的存在, 使得变压器发生内部故障时也会产生很大的二次谐波, 而且大型变压器铁芯采用冷轧硅钢片后,

励磁涌流的二次谐波含量有时会低至 10% 以下, 这样二次谐波制动比很难选取; 而基于间断角原理的励磁涌流识别方案也存在受 CT 传变影响等问题。实际上, 三相变压器励磁涌流波形特征受系统电压、合闸初相角, 剩磁大小等诸多因素的影响, 因而以波形特征为依据来防止涌流引起误动的措施均难以保证变压器差动保护不误动<sup>[1]</sup>。

针对上述问题国内外学者进行了深入的研究, 涌现出许多判别励磁涌流的新方法。近来, 基于等效瞬时电感的方法取得了一定的突破。文献[2-3]提出了等效瞬时电感的概念, 根据其涌流时大小交替变化, 内部故障时恒定不变的特点来实现励磁涌流和内部故障的判定。文献[4]以非饱和区内等效瞬时电感大小作为依据来区分励磁涌流和短路故障。这

基金项目: 国家“111”计划项目(B08036)

两种方法都能避开励磁涌流的干扰,有效实现对变压器的保护,但计算等效瞬时电感时需要利用到变压器原副边电流,而Y/△联接变压器由于环流的影响△侧的相电流一般无法获取。文献[5]提出了一种计算变压器△侧绕组内部环流的方法,该方法在处理环流影响时用到了变压器副边的电压数据。在实际电力系统中,电压互感器一般都装设在母线上,变压器空投时二次侧的电压数据是无法获取的,因而空投变压器时保护会因不能获得所需的数据而无法进行工作。文献[6]在分析变压器△侧三相环流相等的特点基础上,利用任意两相电路方程相减,消去环流,求得励磁电感。此方法主要适用于求取一段时间内变压器励磁电感的变化趋势,而难以准确求取暂态过程中的等效瞬时电感值。而且以上方法都是利用至少一个周波的数据窗来分析等效瞬时电感的变化情况,动作时间一般均超过20 ms,在提高动作速度方面潜力有限<sup>[7]</sup>。

本文在分析双绕组三相 Y/△联接变压器原理的基础上,引入等效瞬时电感的概念,根据正常变压器空投时,变压器铁芯磁通饱和前的等效瞬时电感较大,故障变压器空投时瞬时电感较小的特点,提出了一种基于等效瞬时电感参数辨识的方法来判别变压器空投时是否带有故障。该方法采用变压器空投后 5 ms 内的原边电压、电流数据进行等效瞬时电感参数辨识,能够实现故障变压器空投时快速的切除。数字仿真与动模试验验证了该保护原理的可行性和有效性。

## 1 基本原理

文献[2]明确给出了变压器副边空载时的等效瞬时电感概念,即从原边绕组看进去的基于原边电压及原副边差流的瞬时电感,并由定义得出了以下结论:

1) 正常变压器等效瞬时电感为瞬时励磁电感与原边漏电感之和。

2) 带内部故障变压器的瞬时电感由两部分组成,其一是瞬时励磁电感与故障线圈漏感的并联,其二是原边绕组的漏感,两者之和构成了变压器内部故障时的等效瞬时电感。

根据上述结论可得到单相双绕组变压器的等效瞬时电感分析电路<sup>[4]</sup>,忽略所有支路的电阻。如图 1 所示。图 1 中  $L_{A1}$ 、 $i_A$ 、 $U_A$  为原边绕组的漏感、电流以及端电压;  $L_{A2}$ 、 $i_a$  为副边折算到原边的漏感和电流;  $L_m$ 、 $i_m$  为励磁电感与励磁电流;  $L_{A3}$  为折算后的短路绕组漏感。

当开关 K 闭合时,相当于变压器发生匝间短路故障,此时的等效瞬时电感为:

$$L_A = L_{A1} + \frac{L_m L_{A3}}{L_m + L_{A3}} \quad (1)$$

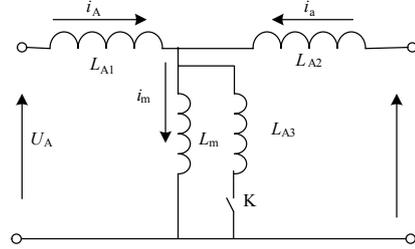


图 1 单相变压器等效瞬时电感分析电路

Fig.1 Analysis circuit for equivalent instantaneous inductance

从式(1)可以看出,故障变压器的等效瞬时电感在数量级上与绕组漏感相当。

当开关 K 断开时,变压器正常运行,此时的等效瞬时电感为:

$$L_A = L_{A1} + L_m \quad (2)$$

空载合闸时,变压器磁通从非饱和到饱和需要经历一段时间。在这段时间内,正常变压器等效瞬时电感很大,故障变压器等效瞬时电感很小,因而可根据空载合闸后短时间内的等效瞬时电感大小来区分涌流与故障。

## 2 等效瞬时电感的辨识

若将图 1 所示的三个单相变压器 Y/△-11 联接,Y 侧用 A、B、C 表示,△侧用 a、b、c 表示。当副边空载的时候变压器副边仅有环流流过,且副边三相环流是相等的,用  $i_0$  表示环流,如图 2 所示。

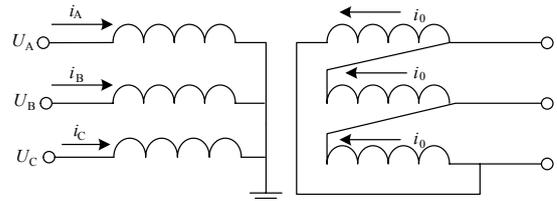


图 2 Y/△三相双绕组变压器简化模型

Fig.2 Two winding three-phase transformer with Y/△ connection

当开关 K 断开时,即正常变压器空载合闸时,由图 1 以及图 2 的电压、电流相互之间的关系可以得到以下等式:

$$U_A = L_{A1} \frac{di_A}{dt} + L_{mA} \frac{d(i_A + i_0)}{dt} \quad (3)$$

$$U_B = L_{B1} \frac{di_B}{dt} + L_{mB} \frac{d(i_B + i_0)}{dt} \quad (4)$$

$$U_C = L_{C1} \frac{di_C}{dt} + L_{mC} \frac{d(i_C + i_0)}{dt} \quad (5)$$

将式 (3)、(4) 结合消去含  $i_0$  的微分项可得:

$$U_A = \frac{L_{A1}}{L_{B1}} U_B + (L_{A1} + L_{mA}) \frac{di_A}{dt} - \frac{L_{mA}}{L_{mB}} (L_{B1} + L_{mB}) \frac{di_B}{dt} \quad (6)$$

根据式 (6), 利用最小二乘法识别的矩阵为:

$$\mathbf{A}_{n \times 3} \mathbf{X}_{3 \times 1} = \mathbf{B}_{n \times 1} \quad (7)$$

其中:

$$\mathbf{A}_{n \times 3} = \begin{bmatrix} U_B|_{t1} & \left. \frac{di_A}{dt} \right|_{t1} & \left. \frac{di_B}{dt} \right|_{t1} \\ U_B|_{t2} & \left. \frac{di_A}{dt} \right|_{t2} & \left. \frac{di_B}{dt} \right|_{t2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ U_B|_{tm} & \left. \frac{di_A}{dt} \right|_{tm} & \left. \frac{di_B}{dt} \right|_{tm} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_{n \times 1} = [U_A|_{t1} \quad U_A|_{t2} \quad \cdots \quad U_A|_{tm}]^T;$$

$$\mathbf{X}_{3 \times 1} = \left[ \frac{L_{A1}}{L_{B1}} \quad L_{A1} + L_{mA} \quad \frac{L_{mA}}{L_{mB}} (L_{B1} + L_{mB}) \right]^T.$$

对于式 (7),  $n < 3$  时  $\mathbf{X}$  的解由通解和特解组成, 解的数目为无穷多个;  $n = 3$  时  $\mathbf{X}$  有唯一解;  $n > 3$  时可以利用式 (8) 求得  $\mathbf{X}$  在最小二乘意义下的近似解。

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B} \quad (8)$$

利用式 (6)、(8) 分别将  $\frac{L_{A1}}{L_{B1}}$ 、 $L_{A1} + L_{mA}$ 、

$\frac{L_{mA}}{L_{mB}} (L_{B1} + L_{mB})$  作为未知参数辨识得到  $L_{A1} + L_{mA}$ , 即变压器 A 相的等效瞬时电感  $L_A$ 。同理可以得到 B 相、C 相的等效瞬时电感  $L_B$ 、 $L_C$ 。

稳态运行时, 输入的信号过于单一, 式 (6) 待辨识参数的系数矩阵可能因出现不可逆的情况而难以被准确辨识<sup>[8]</sup>, 但实际上变压器空载合闸时刻是一个暂态过程, 其电压、电流含有丰富的 2 次、3 次、5 次等谐波分量和非周期分量, 因而此时的参数是具有可辨识性的。值得说明的是, 变压器空载合闸时励磁电感进入饱和状态的时间难以确定。特别是速饱和变压器的非饱和时间非常短, 如果采样时间过短就有可能因采样数据线性化而使得等效瞬时电感无法辨识, 因而可以适当地采用磁通轻微饱和时的数据进行辨识。这样虽然会使等效瞬时电感

辨识值略小于实际值, 但是不会因数据窗过短而产生辨识结果发散的情况, 多次试验的经验表明采用空载合闸后 5 ms 内的数据进行参数辨识比较合适。

### 3 保护判据

根据前面分析可知, 正常变压器空投时, 利用合闸后 5 ms 的数据得到的等效瞬时电感辨识值等于或略小于等效瞬时电感设定值; 故障变压器空投时, 故障相的等效瞬时电感辨识值会远远小于等效瞬时电感设定值。令:

$$K_{dz} = \frac{L_k}{L_{set}} \quad (9)$$

定义保护判据为:

$$K_{dz} < k_{th} \quad (10)$$

式中:  $L_k$  为变压器等效电感的辨识值;  $L_{set}$  为变压器等效瞬时电感的设定值, 是由变压器铭牌数据计算出的原边漏感与励磁电感之和;  $k_{th}$  为保护动作门槛值, 根据多次实验经验,  $k_{th} = 0.1 \sim 0.2$  较为合适。

### 4 仿真实证

利用 EMTF 建立如图 3 所示的仿真系统。

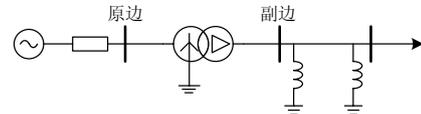


图 3 Y/Δ接线变压器运行仿真系统

Fig.3 System of transformer with wye-delta connection

三相变压器为 Y/Δ-11 联接, 由 3 个单相变压器连接而成。单相变压器额定容量为 20 MVA, 额定电压  $U_1 : U_2 = 220 / \sqrt{3} \text{ kV} : 110 \text{ kV}$ , 短路电压百分比为 7.2%, 空载电流为 7.45%, 变压器的等效瞬时励磁电感设定值为  $L_A = L_B = L_C = 10.23 \text{ H}$ 。仿真中的采样频率为 10 kHz。

图 4 为正常变压器空载合闸时一次侧的三相电流波形, 合闸时间为 0.01 s。

正常变压器空载合闸时励磁涌流因直流分量的影响而偏向于时间轴的一侧, 且有明显的衰减分量<sup>[9]</sup>。在合闸 5 ms 内变压器没有明显的涌流特征, 这说明这段时间内磁通还未饱和或者饱和程度很轻微, 因而这段时间内变压器的等效瞬时电感辨识值应该等于或者略小于设定值  $L_{set}$ 。取合闸后 5 ms 内的电压、电流数据进行参数辨识。

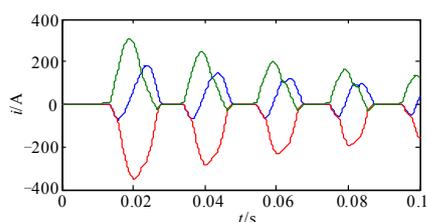


图4 正常变压器空载合闸电流波形

Fig.4 The inrush when no-load transformer is energized

图5为带A相5%匝间故障变压器空载合闸时一次侧的三相电流波形,此时由于变压器A相发生故障出现了很大的故障电流,非故障相B、C将通过三角形绕组向A相输送功率,此时三角形绕组中的环流对故障相而言起励磁作用。也就是说,定义电流流入同名端为正方向时,环流方向与故障相原边电流相同,而非故障相原边电流相反。因而,变压器原边两个非故障相的电流与故障相电流相反。

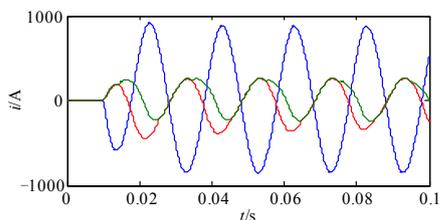


图5 Y侧A相匝间短路变压器空载合闸电流波形

Fig.5 The current when no-load transformer with internal fault is energized

与等效瞬时电感设定值相比,正常变压器空投时等效瞬时电感的辨识值要略小,这是因为变压器空投5ms时励磁电感已出现轻微饱和的情况,因而有部分电压、电流采样数据对应的是变压器磁通轻微饱和励磁电感变小后的情况。由于变压器三相磁通进入饱和区的时间不一定相同,各相励磁电感的饱和程度是有区别的。当带故障变压器空投时,等效瞬时电感值在数量级和变压器漏感相当,其辨识值远小于设定值。按式(10)计算的 $K_{dz}$ 值如表1所示,取 $k_{th}=0.2$ 。

表1 仿真计算各种运行状态下的 $K_{dz}$ 值

运行状态	$K_{dz}$	结果	序号
正常空投	0.487 9	正常	1
空投于故障	匝间 1%	0.088 6	故障 2
	匝间 2%	0.051 7	故障 3
	匝间 3%	0.026 5	故障 4
	匝间 5%	0.025 4	故障 5
	匝间 10%	0.015 0	故障 6

由表1可以看出,文中所提方法能够清晰识别空投变压器1%以上的匝间故障,且故障特征十分清晰。

## 5 动模试验

本文通过动模试验获得了变压器在各种运行状态下的大量真实数据,用这些数据对上述保护原理及判据进行了验证。动模试验系统接线如图6所示。

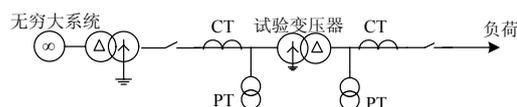


图6 动模试验系统图

Fig.6 Dynamic analog testing system

试验变压器为三单相变压器组Y/Δ-11连接。单相变压器参数分别为:额定容量2kVA,额定电压 $U_1:U_2=1040V/220V$ ,空载电流为1.32%,空载损耗为1%;短路电压为13%~20%,短路损耗0.55%~0.6%。测量工具为DF1024便携式录波仪,采样频率50kHz。用动模试验数据进行瞬时等效电感辨识后得到的 $K_{dz}$ 如表2所示,取 $k_{th}=0.2$ 。由表2可以看出,正常变压器空投时,其等效瞬时电感辨识值略小于设定值,其原因主要是辨识过程中采用了一定数量的铁心饱和时数据所致。而故障变压器空投时,其等效瞬时电感的数量级降至变压器漏感等级,远远小于设定值,故障特征十分明显。

表2 动模试验各种运行状态下的 $K_{dz}$ 值

运行状态	$K_{dz}$	结果	序号
正常空投	0.497 9	正常	1
空投于故障	匝间 2.27%	0.037 8	故障 2
	匝间 4.54%	0.028 6	故障 3
	匝间 9.08%	0.020 9	故障 4

## 6 结论

本文提出了一种基于等效瞬时电感辨识的方法来判断空投变压器是否带有故障。该方法只需要变压器空载合闸后一次侧5ms的电压、电流数据就可辨识出变压器各相的等效瞬时电感,辨识所得的故障变压器等效瞬时电感与正常变压器等效瞬时电感在数值上有很大差异,因而可利用等效瞬时励磁电感的辨识值来判别空投变压器是否带有故障。

试验结果表明,本文所述的原理和算法能够正确地判别空投变压器是否带有故障。虽然电阻的忽

略、系统不稳定等因素会使励磁电感的辨识存在一定的偏差，但是故障特征仍然十分明显。该方法原理简单，可靠性高，具有较好的应用前景。

参考文献

[1] 王维俭. 变压器保护运行不良的反思[J]. 电力自动化设备, 2001, 21 (10): 1-3.  
WANG Wei-jian. Consideration on the improper operation of the transformer protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21 (10): 1-3.

[2] 葛宝明, 苏鹏声, 王祥珩, 等. 基于瞬时励磁电感频率特性判别变压器励磁涌流[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (17): 35-39.  
GE Bao-ming, SU Peng-sheng, WANG Xiang-heng, et al. Distinguish inrush currents for transformers using frequency characteristic of instantaneous excitation inductance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (17): 35-39.

[3] 葛宝明, 于学海, 王祥珩. 基于等效瞬时电感判别变压器涌流励磁涌流的新算法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (7): 44-48.  
GE Bao-ming, YU Xue-hai, WANG Xiang-heng. A novel equivalent instantaneous inductance based algorithm used to distinguish inrush currents for transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (7): 44-48.

[4] 毕大强, 王祥珩, 王剑, 等. 基于非饱和区等效瞬时电感的变压器励磁涌流鉴别方法[J]. 电力自动化设备, 2005, 25 (10): 1-6.  
BI Da-qiang, WANG Xiang-heng, WANG Jian, et al. Identification of transformer magnetizing inrush based on equivalent instantaneous inductance in nonsaturation zone[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25 (10): 1-6.

[5] 康小宁, 何璐, 焦在滨, 等. 基于励磁电感参数辨识的变压器涌流判别方法[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41 (10): 1216-1218.  
KANG Xiao-ning, HE Lu, JIAO Zai-bin, et al. Distinguishing magnetizing inrush based on characteristic

of excitation inductance[J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2007, 41 (10): 1216-1218.

[6] 索南加乐, 焦在滨, 宋国兵, 等. 一种适于 Y/Δ接线变压器的励磁电感计算方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (9): 32-36.  
SUONAN Jia-le, JIAO Zai-bin, SONG Guo-bing, et al. An algorithm to calculate the eExcitation inductance of power transformer with Y-Delta connection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (9): 32-36.

[7] 宗洪良, 金华烽, 朱振飞, 等. 基于励磁阻抗变化的变压器励磁涌流判别方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (7): 91-94.  
ZONG Hong-liang, JIN Hua-feng, ZHU Zhen-fei, et al. Transformer inrush detected by the variation of magnetizing impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (7): 91-94.

[8] 杨浩, 曾鑫, 罗建. 基于约束最小二乘法的变压器三相漏感辨识算法[J]. 电力系统自化, 2009, 33 (13): 68-72.  
YANG Hao, ZENG Xin, LUO Jian. A three-phase transformer leakage inductances parameter identification algorithm based on the constrained least squares method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (13): 68-72.

[9] 王雪, 王增平. 变压器内部故障仿真模型的设计[J]. 电网技术, 2004, 28 (12): 50-52.  
WANG Xue, WANG Zeng-ping. Study of simulation of transformer with internal faults[J]. Power System Technology, 2004, 28 (12): 50-52.

收稿日期: 2009-11-12; 修回日期: 2010-04-05

作者简介:

朱可(1982-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统继电保护的研究; E-mail: zhuf64@163.com

姜杰(1960-), 男, 副教授, 从事电力系统保护与控制、信息系统及安全的研究;

张太勤(1966-), 男, 高级工程师, 从事电力系统继电保护及自动化产品研发。