

# 用归一化等效瞬时电感分布特性识别 励磁涌流的新算法

郑涛<sup>1</sup>, 刘万顺<sup>1</sup>, 庄恒建<sup>2</sup>, 李肖博<sup>1</sup>

- (1. 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室(华北电力大学), 北京市昌平区 102206;  
2. 国电龙源环保工程有限公司, 北京市宣武区 100761)

## A NEW ALGORITHM BASED ON THE DISTRIBUTION OF THE NORMALIZED EQUIVALENT INSTANTANEOUS INDUCTANCE FOR THE DISCRIMINATION OF INRUSH

ZHENG Tao<sup>1</sup>, LIU Wan-shun<sup>1</sup>, Zhuang Heng-jian<sup>2</sup>, LI Xiao-bo<sup>1</sup>

- (1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control (North China Electric Power University), Ministry of Education, Changping District, Beijing 102206, China;  
2. SP Longyuan Environment Engineer, Xuanwu District, Beijing 100761, China)

**ABSTRACT:** Oriented to wye-delta connected three phase transformer, a new configuration of current transformer (CT) in transformer differential protection is proposed. In this configuration, only one single phase CT connected in any phase of the delta side is more needed than the traditional scheme. Worked with line currents measured by other current transformers connected in both sides of the transformer, any phase current in the delta side can be calculated based on the Kirchhoff's Current Law. This new scheme ensures the accurate calculation of the equivalent instantaneous inductance, which is immune to the loop current existed in the delta side of transformer, as well as no dead zone in transformer differential protection. A new algorithm based on the distribution of the normalized equivalent instantaneous inductance for the discrimination between inrush current and fault current is proposed. The normalization of equivalent instantaneous inductance makes the setting-value have little relation with the parameter of transformers, which has more universal meaning in the determination of setting values. Utilizing the distributive characteristic of the normalized equivalent instantaneous inductance, the variety of the normalized equivalent instantaneous inductance is effectively revealed. At last, experiment data obtained from HYBRISIM (Hybrid Simulator) validates the reliability and sensitivity of this algorithm. This algorithm has good prospect of engineering application in the EHV transformer protection.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50277012).

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50277012).

**KEY WORDS:** Power system; Equivalent instantaneous inductance; Inrush currents; Transformer differential protection; Distribution

**摘要:** 针对具有 Y/Δ 接线方式的三相变压器, 提出了一种新的变压器差动保护 TA 配置方案: 该方案是在传统变压器差动保护接线基础上, 在变压器 Δ 侧接入一相绕组 TA, 然后与所测得的线电流结合, 利用 KCL 定律可以容易地求解出 Δ 侧各相绕组电流。该方案既保证了等效瞬时电感的准确计算, 使其不受 Δ 侧绕组内部环流的影响, 又不会使差动保护存在“死区”。在此基础上, 文中提出一种基于归一化等效瞬时电感分布特性的励磁涌流识别新算法: 对等效瞬时电感进行归一化处理, 使判据定值的选取更具有普遍性, 与具体变压器参数、类型无关; 利用分布特性更好地反映了等效瞬时电感的变化特征和规律。新算法识别灵敏可靠, HYBRISIM (Hybrid Simulator) 实验数据也验证了新算法的准确性和有效性, 其在超高压大容量变压器保护方面具有较好的工程应用前景。

**关键词:** 电力系统; 等效瞬时电感; 励磁涌流; 变压器差动保护; 分布特性

## 1 引言

变压器磁化曲线具有非线性特性, 变压器正常运行时, 工作点位于磁化曲线的线性段, 此时励磁电感较大。在变压器空载合闸产生励磁涌流时, 由于磁通不能突变, 磁通中除了具有正弦性质的强制

分量外,还叠加了一个衰减的非周期分量,再考虑到剩磁的影响,变压器铁心有可能发生饱和,此时变压器铁心交替工作在磁化曲线的线性段和饱和段上,相应的励磁电感将经历一个由大变小,再由小变大的变化过程<sup>[1-9]</sup>。当变压器绕组发生匝间短路时,相当于在励磁支路并联一个短路的第3绕组(对双绕组变压器而言),此时的励磁电感比正常运行时的数值要小,而且基本不变。根据上述特征,在引入电压量后可利用计算出的励磁电感大小和变化规律来识别励磁涌流和内部故障<sup>[10]</sup>。

本文针对 Y/Δ 接线方式的三相变压器提出一种新的变压器差动保护 TA 配置方案,该方案既保证了等效瞬时电感的准确计算,又能保证差动保护不会存在“死区”。在此基础上提出了一种基于归一化等效瞬时电感分布特性的励磁涌流识别新算法,该算法利用变压器发生励磁涌流和内部故障时励磁支路所表现出的不同变化特征,从本质上反映了二者的不同。将等效瞬时电感进行归一化处理,使得判据定值选取与变压器具体参数、类型无关,更具有普遍性,且利用分布特性更好地反映了等效瞬时电感的变化特征和规律。新算法具有识别灵敏可靠等优点, HYBRISIM(Hybrid Simulator)实验数据也验证了新算法的准确性和有效性。

## 2 等效瞬时电感的概念及计算方法

图 1 给出了单相变压器 T 型等值电路,根据 KVL 列写原边绕组的回路方程如式(1)所示。

$$u_1 = r_1 i_1 + L_{1d} \frac{di_1}{dt} + r_m i_m + \frac{dy}{dt} \quad (1)$$

式中  $y$  为原副边绕组的互感磁链。

$$\frac{dy}{dt} = \frac{dy}{di_m} \times \frac{di_m}{dt} = L_m \frac{di_m}{dt} \quad (2)$$

由式(2)可定义瞬时励磁电感为  $L_m = dy/di_m$ ,文献[10]提出了等效瞬时电感的概念,即从原边绕组端口看进去的等效瞬时励磁电感。当变压器空载

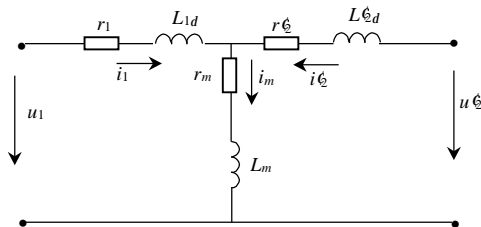


图 1 单相变压器 T 型等值电路  
Fig. 1 The equivalent circuit of T mode for single phase transformer

合闸发生涌流时,等效瞬时电感为瞬时励磁电感与原边漏电感之和;当变压器内部发生匝间故障时,等效瞬时电感由两部分构成,其中一部分为瞬时励磁电感与短路绕组漏感的并联,另一部分为原边绕组的漏感,二者之和即为等效瞬时电感。在计及变压器绕组电阻、磁滞及涡流损耗、变压器发生励磁涌流与内部匝间故障时,将有如下的统一方程式<sup>[10]</sup>:

$$u_1 = r_k i_d + L_k \frac{di_d}{dt} \quad (3)$$

式中  $u_1$  为变压器原边绕组的端口电压,  $r_k$  为等效电阻,  $L_k$  为等效瞬时电感,  $i_d$  为变压器原副边绕组电流之差,即差流。

为提高计算精度,在计算等效瞬时电感时考虑电阻的影响,消去等效电阻  $r_k$ ,可求得等效瞬时电感如下(为简单记,省略各物理量的下标)<sup>[10]</sup>:

$$L_{(k)} = 2T_s \frac{u_{(k)} i_{(k+1)} - u_{(k+1)} i_{(k)}}{i_{(k)}^2 + i_{(k+1)}^2 - i_{(k-1)} i_{(k+1)} - i_{(k)} i_{(k+2)}} \quad (4)$$

式中 小括号内的  $k$  表示第  $k$  个采样点的值,  $T_s$  表示采样间隔。  $i$  即  $i_d$ , 为变压器原副边绕组电流之差。

## 3 Y/D 接线变压器差动保护 TA 配置新方案

式(4)以单相变压器为模型给出了等效瞬时电感的计算公式,原则上可以推广到三相变压器的情况,但三相变压器接线复杂,尤其是对具有 Y/Δ 接线方式的变压器而言,在构成变压器纵差保护时,由于变压器两侧电流相位不一致,必须采取一定的转角方式来进行差流平衡调整。文献[9]详细分析了变压器 Δ 侧绕组内部环流的性质及其对等效瞬时电感计算的影响,认为等效瞬电感受 Δ 侧环流影响大,必须计及环流的影响能保证等效瞬时电感的计算精度。然而 Δ 侧绕组内部环流难以通过线电流计算得到,文献[10]提出的方案是将 Δ 侧 TA 接于每相绕组内部,由此构成的变压器差动保护虽能保护匝间短路和相间故障(故障点在 TA 内侧),但对于变压器 Δ 侧 TA 外侧(在绕组内部)的相间故障,因其存在保护“死区”,致使该差动保护无法反映,这是该方案的一个严重缺陷。为此,本文将提出一种新的变压器差动保护 TA 配置方案。如图 2 所示。需要说明的是:该方案同文献[10]提出的方案一样,适用于三相分体式变压器。对于三相一体式变压器,由于从一次的角度较难在绕组内安装 TA,所以该方案不容易实现。

该方案中变压器差动保护接线由 TA<sub>1</sub> 和 TA<sub>3</sub> 构

成，与传统方式一致，差别仅在于变压器Δ侧接入一相绕组 TA，如图 2 中的 TA<sub>2</sub> 所示。TA<sub>2</sub> 是用来测量变压器Δ侧的某相绕组电流，然后与Δ侧 TA<sub>3</sub> 所测得的线电流结合，利用 KCL 定律可以很容易地求解出Δ侧各相的绕组电流<sup>[9]</sup>。这样既保证了等效瞬时电感的正确计算，使其不受Δ侧绕组内部环流的影响，同时又不会使变压器差动保护存在死区。

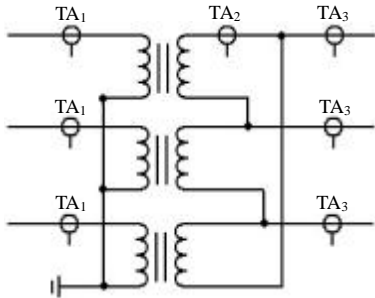


图 2 新型变压器差动保护 TA 配置方案  
Fig. 2 A novel CT configuration of transformer differential protection

#### 4 对基于等效瞬时电感变化量识别涌流判据的分析

等效瞬时电感在发生涌流时是剧烈变化的，而在内部故障时基本不变<sup>[1-6,10]</sup>。对等效瞬时电感变化量的识别，可以从时域和频域 2 个角度予以考虑，二者本质上是一样的。采用时域分析的方法对等效瞬时电感变化量的识别如式(5)、(6)所示<sup>[10]</sup>。

$$L_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_{(i)} \quad (5)$$

$$s(L) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (L_{(i)} - L_{ave})^2} \quad (6)$$

式中  $N$  为 1 个周波的采样点数； $L_{ave}$  为 1 个周波内  $N$  个等效瞬时电感的平均值； $s(L)$  表示根据 1 个周波内等效瞬时电感的变化量。

为进一步考察该方案的有效性，笔者利用 HYBRISIM(Hybrid Simulator)实验数据和 EMTP 仿真数据对其进行了分析。表 1 给出了在这 2 种数据源下，应用式(5)和(6)对 A 相绕组进行计算的结果。从表 1 可以看出：对于 HYBRISIM 或 EMTP 的实验数据，可根据等效瞬时电感变化量  $s(L)$  区分励磁涌流和内部故障。但进一步观察发现：HYBRISIM 与 EMTP 的实验数据在励磁涌流情况下等效瞬时电感的变化量  $s(L)$  差别很大，在一种数据源下设定的  $s(L)$  阈值，未必适用于另一种数据源。例如：对于 EMTP 数据，若设定  $s(L)$  的阈值为 50，虽可有效地

表 1 基于时域分析的等效瞬时电感变化量计算结果

Tab. 1 Calculation results of the variation of the equivalent instantaneous inductance in time domain

模型	实验项目	$L_{ave}/H$	$s(L)/H$	$s(L)$
HYBRISIM	涌流 1	14.96	19.22	1.28
	涌流 2	19.13	31.93	1.67
	涌流 3	23.26	35.99	1.55
物理变压器模型	匝间故障 1	0.18	0.056	0.31
	匝间故障 2	0.205	0.039	0.19
EMTP 仿真	涌流 1	104.7	191.9	1.83
	涌流 2	122.8	212.2	1.73
	涌流 3	169.54	236.33	1.36
数字变压器模型	匝间故障 1	0.39	0.032	0.082
	匝间故障 2	0.92	0.063	0.068

区分 EMTP 仿真数据下的涌流和匝间故障，并有足够大的判别余度，但该阈值对 HYBRISIM 实验数据却并不适用。有此现象可用下面的分析加以解释：

对式(6)做变换，提取出  $L_{ave}$  可得到

$$s(L) = L_{ave} \times \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{L_{(i)}}{L_{ave}} - 1\right)^2} \quad (7)$$

$$\overline{s(L)} = \frac{s(L)}{L_{ave}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{L_{(i)}}{L_{ave}} - 1\right)^2} \quad (8)$$

$$\text{则 } s(L) = L_{ave} \times \overline{s(L)} \quad (9)$$

由表 1 中的数据并结合式(7)可以看出：对于励磁涌流情况，由于不同数据源的励磁电感均值  $L_{ave}$  相差很大，从而导致了 2 种数据源下的  $s(L)$  差异很大；而在匝间故障时励磁电感的均值  $L_{ave}$  基本是同一个数量级，因而此时 2 种数据源下的  $s(L)$  相差不大。式(8)的  $\overline{s(L)}$  将  $s(L)$  中的  $L_{ave}$  除去，反映了等效瞬时电感在  $L_{ave}$  上下变化的相对幅度，减小了  $L_{ave}$  对  $s(L)$  的影响。从表 1 可以看到，采用  $\overline{s(L)}$  后 2 种数据源在涌流情况下计算结果近似一致。但  $\overline{s(L)}$  将  $s(L)$  中的  $L_{ave}$  除去，也带来了负面影响：一方面由于发生励磁涌流和匝间故障时  $L_{ave}$  值本身就存在较大的差异， $\overline{s(L)}$  将  $s(L)$  中的  $L_{ave}$  除去，近似于不考虑  $L_{ave}$  的影响，缩小了涌流和内部故障的差别；另一方面，一般情况下匝间故障的  $L_{ave}$  较小， $s(L)$  的微弱变化可能导致  $\overline{s(L)}$  的明显变化，甚至出现涌流情况下的  $\overline{s(L)}$  值或更高，导致励磁涌流和内部故障的边界模糊甚至无法区分。

#### 5 基于归一化等效瞬时电感分布特性的识别涌流新方法

##### 5.1 概述

根据前面的分析可以看出：基于等效瞬时电感变化量  $s(L)$  来区分涌流和内部故障的方法，对某个

具体参数的模型或变压器而言具有很好的效果,但需要通过仿真或实验确定合适的阈值,遗憾的是:该阈值并不能推广到其它参数的模型或变压器,给实际应用带来不便;若采用基于等效瞬时电感相对变化量 $\overline{s(L)}$ 的方法,虽然受变压器本身磁特性参数的影响不大,但涌流和内部故障的区分边界不明显,阈值难以确定。由此可见,基于等效瞬时电感变化量识别涌流和内部故障的方法还不完善,有待做进一步的改进。

### 5.2 等效瞬时电感的归一化

图3和图4分别给出了由HYBRISIM实验得到的涌流和匝间故障情况下的电压、电流波形。设1个周波内的采样点数为 $N$ ,利用式(4)求得 $N$ 个等效瞬时电感值 $L_i, i=1,2,\dots,N$ ,并利用式求得 $L_{ave}$ 。图5和图6分别给出了对应图3和图4的等效瞬时电感,其均值 $L_{ave}$ 在图中用点划线标出。定义归一化等效瞬时电感为

$$\bar{L}_i = \begin{cases} 2, & L_i / L_{ave} > 2 \\ L_i / L_{ave}, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

归一化是指:将1个周波内的 $N$ 个等效瞬时电感除以平均值,得到新的 $N$ 个等效瞬时电感,并将大于2倍均值的等效瞬时电感削为2倍均值。归一化后的等效瞬时电感 $\bar{L}_i$ 与归一化前的等效瞬时电感 $L_i$ 具有相同的变化规律。图7和图8分别给出了对应图5和图6的归一化等效瞬时电感。由图7和图8可以看出,涌流和匝间故障情况下的归一化等

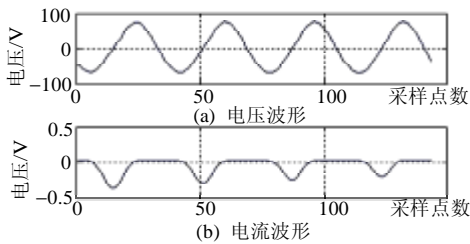


图3 励磁涌流情况下的电压和电流波形  
Fig. 3 The waveform of voltage and current when inrush occurred

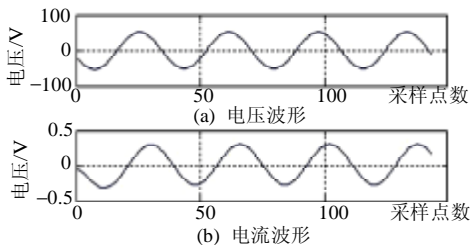


图4 匝间故障情况下的电压和电流波形  
Fig. 4 The waveform of voltage and current when internal fault occurred

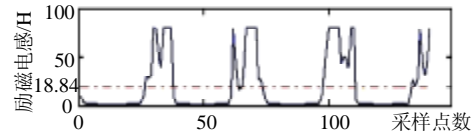


图5 励磁涌流情况下的等效瞬时电感  
Fig. 5 The equivalent instantaneous inductance under inrush

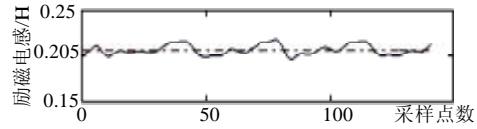


图6 匝间故障情况下的等效瞬时电感  
Fig. 6 The equivalent instantaneous inductance under internal faults

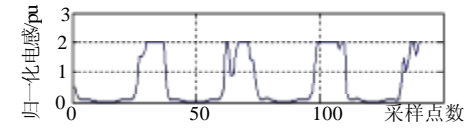


图7 励磁涌流情况下的归一化等效瞬时电感  
Fig. 7 The equivalent instantaneous inductance under inrush

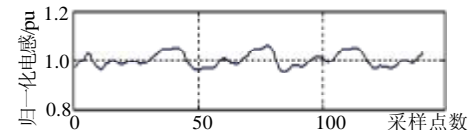


图8 匝间故障情况下的归一化等效瞬时电感  
Fig. 8 The equivalent instantaneous inductance under inrush

效瞬时电感在坐标平面内的分布特性具有明显区别。所谓分布特性是指按照式(10)定义的归一化等效瞬时电感,在纵坐标为0~2范围内的分布规律。励磁涌流时的归一化等效瞬时电感在纵坐标0~2范围内呈分散分布状态;而匝间故障时的归一化等效瞬时电感集中在纵坐标1值附近。

### 5.3 归一化等效瞬时电感的直方图

直方图技术是数字图像处理中的一种常用方法,它能提供非常有用的图像信息统计资料。对于某个灰度图像,假设其灰度级为 $[0, L]$ ,图像总像素个数为 $n$ ,定义灰度直方图为离散函数 $h(r)=n_r$ ,其中 $r$ 表示某个灰度级( $0 \leq r \leq L$ ), $n_r$ 表示图像中灰度级为 $r$ 的像素个数<sup>[11]</sup>。根据前述归一化等效瞬时电感的分布特性,并借鉴直方图处理技术,设想将图7和图8的纵轴区间0~2等分为10段,每段小区间的长度为0.2,取故障后1个周波内的 $N$ 个数据,然后统计位于每段小区间内的采样点个数,定义分布系数为

$$C_{DIS}(\bar{L}_i) = \frac{K_{(\bar{L}_i)}}{N} \quad (11)$$

式中 $\bar{L}_i$ 表示归一化等效瞬时电感,步长为0.2, $K_{(\bar{L}_i)}$ 表示1个周波内处于某一区段的归一化等效

瞬时电感的个数，如  $K_{(1,0)}$  表示 1 个周波内处于 0.8~1.0 之间的归一化等效瞬时电感个数。

将分布系数作为纵坐标，规定横坐标为归一化等效瞬时电感（区间为 0~2，并将其 10 等分），由此得到对应归一化等效瞬时电感的直方图，如图 9 和图 10 所示。由图 9 和图 10 可以看出：变压器内部故障时，归一化等效瞬时电感 1 值附近的分布系数较大，而离 1 值较远处的分布系数很小或者为零；变压器励磁涌流时的情况正好相反，离 1 值较远处的归一化等效瞬时电感的分布系数远大于 1 值附近的分布系数。通过对归一化等效瞬时电感分布系数的合理提取和适当的处理，可以有效地区分励磁涌流和内部故障<sup>[12-21]</sup>。

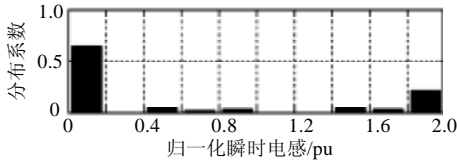


图 9 励磁涌流下归一化等效瞬时电感的直方图  
Fig. 9 The histogram of equivalent instantaneous inductance under inrush currents

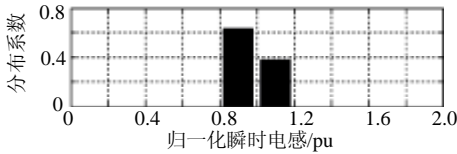


图 10 匝间故障下归一化等效瞬时电感的直方图  
Fig. 10 The histogram of equivalent instantaneous inductance under internal fault currents

### 5.4 新判据的提出

以归一化等效瞬时电感  $\bar{L}_i$  为论域，引入故障隶属函数  $m_f(\bar{L}_i)$  如下：

$$m_f(\bar{L}_i) = \begin{cases} 2.5\bar{L}_i - 1, & 0.4 < \bar{L}_i < 0.8 \\ 1, & 0.8 < \bar{L}_i < 1.2 \\ 4 - 2.5\bar{L}_i, & 1.2 < \bar{L}_i < 1.6 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)对应的故障隶属函数如图 11 所示。

引入故障隶属函数后，相当于对每一个归一化等效瞬时电感  $\bar{L}_i$  都赋予了一个特定权值。在此基础上，定义故障分布系数为

$$C_{FD}(\bar{L}_i) = \frac{K(\bar{L}_i)}{N} \times m_f(\bar{L}_i) = C_{DIS}(\bar{L}_i) \times m_f(\bar{L}_i) \quad (13)$$

对故障分布系数  $C_{FD}(\bar{L}_i)$  求和，定义故障系数为

$$C_F = \sum_{\bar{L}_i=0.2}^2 C_{FD}(\bar{L}_i) \quad (14)$$

由式(14)可以看出： $C_F \in [0, 1]$ ， $C_F$  越接近 1，表明

发生故障的可能性越大； $C_F$  越接近 0，表明发生故障的可能性越小。与故障隶属函数  $m_f(\bar{L}_i)$  相对应，

以  $\bar{L}_i$  为论域，引入涌流隶属函数  $m_{irr}(\bar{L}_i)$ ，如图 12 所示。在此基础上，定义涌流分布系数为

$$C_{inrD}(\bar{L}_i) = \frac{K(\bar{L}_i)}{N} \times m_{irr}(\bar{L}_i) = C_{DIS}(\bar{L}_i) \times m_{irr}(\bar{L}_i) \quad (15)$$

对涌流分布系数  $C_{inrD}(\bar{L}_i)$  求和，定义涌流系数为

$$C_{inr} = \sum_{\bar{L}_i=0.2}^2 C_{inrD}(\bar{L}_i) \quad (16)$$

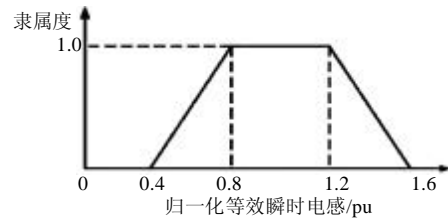


图 11 故障隶属函数  
Fig. 11 The histogram of equivalent instantaneous inductance under internal fault currents

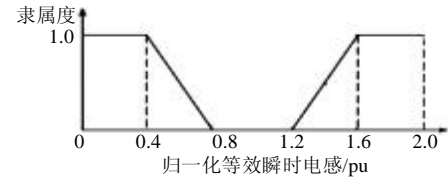


图 12 涌流隶属函数  
Fig. 12 The histogram of equivalent instantaneous inductance under internal fault currents

由式(10)可以看出： $C_{inr} \in [0, 1]$ ， $C_{inr}$  越接近 1，表明发生涌流的可能性越大； $C_{inr}$  越接近 0，表明发生涌流的可能性越小。综合故障系数  $C_F$  和涌流系数  $C_{inr}$  的特点，定义识别系数为

$$C_D = C_F / C_{inr} \quad (17)$$

对图 7 所示励磁涌流的情况，故障系数  $C_F = 0.064$ ，涌流系数  $C_{inr} = 0.94$ ，识别系数  $C_D = 0.068$ 。对图 8 的匝间故障情况，故障系数  $C_F = 1$ ，涌流系数  $C_{inr} = 0$ ，理论上识别系数  $C_D = \infty$ 。在实际应用中，为避免除零运算，可对涌流系数  $C_{inr}$  设置一个小门槛值  $e$ ，当  $C_{inr} < e$  时，令  $C_{inr} = e$ 。由此可见，依据  $C_D$  在涌流和内部故障情况下的差异构造识别判据为

$$C_D = C_F / C_{inr} \begin{cases} < C_{ZD}, & \text{判为涌流} \\ > C_{ZD}, & \text{判为故障} \end{cases} \quad (18)$$

式中  $C_{ZD}$  为识别系数  $C_D$  的阈值。

根据前面的分析和实验数据对比可以看到：涌流时  $C_F \ll C_{inr}$ ，从而  $C_D \ll 1$ ；而内部故障时  $C_F \gg C_{inr}$ ，故  $C_D \gg 1$ 。 $C_{ZD}$  可整定为 1，为进一步提高保护的可靠性，在实际整定时，可以适当抬高

定值，例如取  $C_{ZD}$  为 2，以确保保护不误动。

### 6 仿真验证

为考查基于归一化等效瞬时电感分布特性识别励磁涌流判据的性能，利用 HYBRISIM 实验数据对其进行了验证，以 A 相绕组为例，表 2 给出了部分实验数据的仿真计算结果，其中  $C_{ZD}$  整定为 2。仿真实验中当  $C_D > 100$  时， $C_D$  取为 100。由表 2 可以看出：基于归一化等效瞬时电感分布特性的判据在励磁涌流情况下能够可靠地闭锁，余度范围很大，保证不误动；在变压器空投到匝间故障情况下能够准确地识别出故障，保证保护的可靠动作，即使在变压器空投到小匝间故障情况下依然能够正确动作；对变压器运行中发生的大部分匝间故障，该判据能够可靠识别，并有较大的识别灵敏度，只是对轻微匝间故障（短路匝比  $< 3\%$ ），识别灵敏度低或无法识别。

经分析可认为，该判据之所以对轻微匝间故障识别灵敏度低，并不是归一化等效瞬时电感分布特性分析方法的问题，而是在轻微匝间故障情况下等

表 2 基于归一化等效瞬时电感分布特性的计算结果

Tab. 2 Calculation results of the distribution of the normalized equivalent instantaneous inductance

故障类型	实验项目	$C_F$	$C_{inr}$	$C_F/C_{inr}$	判断结果	
励磁涌流	1	0.065	0.935	0.069	$\ll 2$ 涌流	
	2	0.056	0.944	0.059	$\ll 2$ 涌流	
	3	0.056	0.944	0.059	$\ll 2$ 涌流	
	4	0.106	0.893	0.119	$\ll 2$ 涌流	
	5	0.088	0.912	0.096	$\ll 2$ 涌流	
空载合闸于内部故障	Δ侧 A 相绕组匝间短路匝数比/%	3.5	0.844	0.156	5.410	$> 2$ 故障
	7.0	1.000	0.001	100.000	$\gg 2$ 故障	
	10.5	1.000	0.001	100.000	$\gg 2$ 故障	
	14.0	1.000	0.001	100.000	$\gg 2$ 故障	
	17.5	1.000	0.001	100.000	$\gg 2$ 故障	
	Y 侧 A 相绕组匝间短路匝数比/%	1.7	0.753	0.247	3.045	$> 2$ 故障
	2.6	0.828	0.172	4.814	$> 2$ 故障	
	14.0	1.000	0.010	100.000	$\gg 2$ 故障	
	15.7	1.000	0.010	100.000	$\gg 2$ 故障	
	16.6	1.000	0.010	100.000	$\gg 2$ 故障	
内部故障	Δ侧 A 相绕组匝间短路匝数比/%	1.7	0.346	0.654	0.529	$< 2$ 涌流
	3.5	0.867	0.133	6.518	$> 2$ 故障	
	7.0	1.000	0.010	100.000	$\gg 2$ 故障	
	10.5	1.000	0.010	100.000	$\gg 2$ 故障	
	14.0	1.000	0.010	100.000	$\gg 2$ 故障	
	17.5	1.000	0.010	100.000	$\gg 2$ 故障	
	Y 侧 A 相绕组匝间短路匝数比/%	1.7	0.482	0.518	0.931	$< 2$ 涌流
	2.6	0.672	0.328	2.049	$> 2$ 故障	
	14.0	1.000	0.010	100.000	$\gg 2$ 故障	
	15.7	1.000	0.010	100.000	$\gg 2$ 故障	
16.6	1.000	0.010	100.000	$\gg 2$ 故障		

效瞬时电感的计算存在一定误差。对其解释如下：变压器发生匝间短路时，一般可以将短路部分看作是第 3 绕组，其效果相当于 1 台 3 绕组变压器在第 3 绕组发生短路，其等效电路如图 13 所示。图中忽略了励磁支路电阻和短路绕组电阻，各参数均为折算后的值。原边回路方程为

$$u_1 = r_1 i_1 + L_{1d} \frac{di_1}{dt} + \frac{L_m L_{sd}}{L_m + L_{sd}} \frac{d(i_1 + i_2')}{dt} = r_1 (i_1 + i_2') + (L_{1d} + \frac{L_m L_{sd}}{L_m + L_{sd}}) \frac{d(i_1 + i_2')}{dt} - r_1 i_2' - L_{1d} \frac{di_2'}{dt} \quad (19)$$

式中  $i_1 + i_2'$  为原副边绕组的差流。

文献[10]中提到，由于原边绕组电阻与漏感非常小，副边的负载电流在其上的压降相对较小，所以若将它们忽略，式(19)可近似表示为

$$u_1 = r_1 (i_1 + i_2') + (L_{1d} + \frac{L_m L_{sd}}{L_m + L_{sd}}) \frac{d(i_1 + i_2')}{dt} \quad (20)$$

由此可得到文献[10]中提出的基于等效瞬时电感的变压器统一方程式如式(3)所示。由(19)式得到式(20)的前提条件是：忽略副边负载电流在原边绕组电阻和漏感上的压降。然而在轻微匝间故障情况下，由于原副边绕组的差流  $i_1 + i_2'$  较小，此时副边负载电流的影响不能忽略，采用式(20)来计算等效瞬时电感必然会引入较大的误差，从而在一定程度上影响了等效瞬时电感的分布特性及其后续的判断。更准确地求取瞬时励磁电感或等效瞬时电感，则能较好地解决这一问题，这有待进一步深入研究。

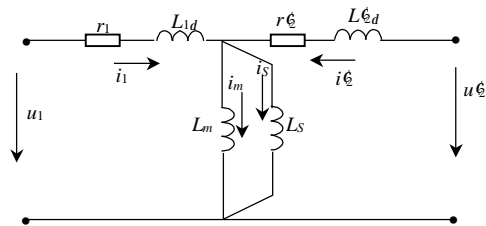


图 13 变压器匝间故障的等效电路  
Fig. 13 The equivalent circuit of turn-to-turn fault occurred in transformer

### 7 结论

本文提出了一种新的变压器差动保护 TA 配置方案，较好地解决了 Y/Δ接线方式下三相变压器的等效瞬时电感计算问题。在此基础上，还提出一种基于归一化等效瞬时电感分布特性的励磁涌流识别新算法。对等效瞬时电感进行归一化处理，能使判

据的定值选取更具有普遍性,且与具体变压器参数、类型无关;利用分布特性更好地反映了等效瞬时电感的变化特征和规律。新算法的识别灵敏可靠, HYBRISIM (Hybrid Simulator) 实验数据验证了新算法的准确性和有效性。

## 参考文献

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [2] 王维俭. 发电机变压器继电保护应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [3] 陈增田. 电力变压器保护(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [4] 汤蕴璆, 史乃, 沈文豹. 电机理论与运行(上册)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [5] 宗洪良, 金华烽, 朱振飞, 等. 张绍纯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 Hongliang, Jin Huafeng, Zhu Zhenfei *et al.* Transformer inrush detected by the variation of magnetizing impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 91-94.
- [6] 孙志杰, 曾献华, 汤汉松, 等. 磁通制动原理在变压器差动保护中应用, 电力自动化设备, 2005, 25(1): 79-81. Sun Zhijie, Zeng Xianhua, Tang Hansong *et al.* Application of flux restraint theory in transformer differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(1): 79-81.
- [7] 袁宇波, 陆于平, 许扬, 等. 切除外部故障时电流互感器局部暂态饱和和对变压器差动保护的影响及对策[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 12-17. Yuan Yubo, Lu Yuping, Xu Yang *et al.* The influence and countermeasure to transformer differential protection of CT partial transient saturation caused by external fault removal[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 12-17.
- [8] 林湘宁, 刘沛, 刘世明, 等. 变压器有载合闸的超饱和现象及对变压器差动保护的影响[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 6-11. Ling Xiangning, Liu Pei, Liu Shiming *et al.* Ultra saturation state during transformer switch in with load and its influence to transformer differential protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 6-11.
- [9] 郑涛. 变压器数字仿真和数字式主保护新原理的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2004.
- [10] 葛宝明, 于学海, 王祥珩, 等. 基于等效瞬时电感判别变压器励磁涌流的新算法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(7): 44-48. Ge Baoming, Yu Xuehai, Wang Xiangheng *et al.* A novel equivalent instantaneous inductance based algorithm used to distinguish inrush currents for transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(7): 44-48.
- [11] 冈萨雷斯, 等. 数字图像处理(第二版)[M]. (阮秋琦 等译), 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [12] 郑涛, 刘万顺, 肖仕武, 等. 一种基于数学形态学提取电流波形特征的变压器保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 18-24. Zheng Tao, Liu Wanshun, Xiao Shiwu *et al.* A new algorithm based on the mathematical morphology for power transformer protection [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 18-24.
- [13] 张雪松, 何奔腾. 基于误差估计的变压器励磁涌流识别原理[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 94-99. Zhang Xuesong, He Benteng. A new method to identify inrush current based error estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 94-99.
- [14] 焦邵华, 刘万顺, 刘建飞, 等. 用小波理论区分变压器的励磁涌流和短路电流的新原理[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(7): 1-5, 76. Jiao Shaohua, Liu Wanshun, Liu Jianfei *et al.* A new principle of discrimination between inrush current and fault current of transformer based on wavelet[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7): 1-5, 76.
- [15] 陈德树, 尹项根, 张哲, 等. 虚拟三次谐波制动式变压器差动保护[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 19-23. Chen Deshu, Yin Xianggen, Zhang Zhe *et al.* Virtual third harmonic restrained transformer differential protection principle and practice [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 19-23.
- [16] 王增平, 徐岩, 王雪, 等. 基于变压器模型的新型变压器保护原理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 54-58. Wang Zengping, Xu Yan, Wang Xue *et al.* Study on the novel transformer protection principle based on the transformer model [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 54-58.
- [17] 何奔腾, 徐习东. 波形比较法变压器差动保护原理[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(6): 395-398, 404. He Benteng, Xu Xidong. Protection based on wave comparison [J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(6): 395-398, 404.
- [18] 韩正庆, 高仕斌, 李群湛. 基于变压器模型的新型变压器保护原理和判据[J]. 电网技术, 2005, 29(5): 67-71. Han Zhengqing, Gao Shibin, Li Qunzhan. A novel transformer model based protective principle for transformer and its criteria[J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 67-71.
- [19] 马静, 王增平, 徐岩. 用相关函数原理识别变压器励磁涌流和短路电流的新方法[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 78-81. Ma Jing, Wang Zengping, Xu Yan. A new method to identify inrush current and short circuit current of transformer based on correlation function[J]. Power System Technology, 2005, 29(6): 78-81.
- [20] 胡玉峰, 陈树德, 尹项根, 等. 新型变压器保护装置的研制[J]. 电网技术, 2001, 25(6): 67-70. Hu Yufeng, Chen Deshu, Yin Xianggen *et al.* Development of a new power transformer protection[J]. Power System Technology, 2001, 25(6): 67-70.
- [21] 陆于平, 吴济安, 袁宇波. 主设备数字式保护技术的讨论[J]. 江苏电机工程, 2003, 22(3): 6-9. Lu Yuping, Wu Jian, Yuan Yubo. Discussion on digital protection technique of main electric apparatus[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2003, 22(3): 6-9.

收稿日期: 2005-09-28。

作者简介:

郑涛(1975-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力变压器保护与仿真等;

刘万顺(1941-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统仿真和微机保护等;

庄恒建(1979-), 男, 硕士, 工程师, 从事变压器保护与电厂自动化研究工作;

李肖博(1980-), 男, 硕士研究生, 研究方向为微机变压器保护。