

# 励磁涌流鉴别方法在变压器保护中的应用

宋芸<sup>1</sup>, 乐秀璠<sup>1</sup>, 钱峰<sup>2</sup>, 李稚鹏<sup>1</sup>

(1. 河海大学电气工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 徐州供电局, 江苏 徐州 221000)

**摘要:** 励磁涌流的鉴别一直是变压器保护中的一个关键问题,文中针对目前国内外学者提出的励磁涌流识别原理和方法进行了分析和综述。并对目前现场采用的方法和一些现代智能理论鉴别中的应用进行了比较,指出了变压器励磁涌流在鉴别方法的研究和应用动向。

**关键词:** 电力变压器; 励磁涌流; 继电保护

**中图分类号:** TM772 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2002)10-0085-05

## 1 引言

随着输电电压的不断提高,输电距离和输电容量的不断增长,大容量变压器的应用日益广泛,对变压器保护的可靠性与速动性提出了更高的要求。无论是常规模拟保护,还是微机保护,励磁涌流判别仍然是变压器差动保护中的关键问题。近十几年来,国内外学者提出了许多判别励磁涌流的新原理和方法。为了能尽早地将它们应用到变压器微机保护中,有必要进行深入的综合研究。

本文选出一些已应用过的和新近提出的识别方法,根据鉴别原理的不同特点,将它们分成以下几类:(1)谐波识别法;(2)波形特征识别法;(3)基于智能理论的识别法;(4)基于电气模型识别法;(5)磁通特性识别法;(6)功率差动原理识别法。

文章在介绍每种方法的基本原理的基础上,着重分析了原理的性能、特点、局限性,讨论了用微机实现的可能性。

## 2 基于谐波制动原理的鉴别方法

### 2.1 二次谐波电流制动原理

方案一<sup>[1]</sup>:

与短路电流相比,励磁涌流中含有很高的二次谐波成分。二次谐波电流制动原理正是利用差动电流中的二次谐波与基波模值比来判断是否存在励磁涌流的。

该方法判据简单,已在电力系统保护配置中得到普遍应用。但是随着电网电压等级的提高、大容量变压器的大量使用,当变压器发生内部故障时,谐振也会使短路电流中的二次谐波成分增加,保护延迟动作。有时空载合闸后的二次谐波不明显也会造成误动。若能加上合适的加速判据,基于二次谐波

的比率差动微机保护还是可以满足系统要求的。

方案二:

文献[2]中提出的新算法是在传统的二次谐波电流制动原理的基础上,增加相角关系,用二次谐波复数比定义基波与二次谐波之间的相位关系,并将它作为识别励磁涌流的判别量。作者经模拟实验及结果分析,绘制出该决定量的运行特性区域,它能有效地区分励磁涌流和内部短路故障。

该方法已成功应用在通用继电器的平台上,辨识能力强,能提高在励磁涌流情况下继电器的稳定性,同时还能保持在内部故障时继电器的最优性能。但是该决定信号必须在适当的运行区域内才能保证保护正确动作。

### 2.2 电压谐波制动原理

文献[3]中识别方法的基本思想是:当变压器因励磁涌流出现严重饱和时,端电压会发生严重畸变,其中包含较大的谐波含量,用它来鉴别励磁涌流。

与二次谐波电流制动相比,它能可靠鉴别涌流,闭锁保护。对大多数内部故障来说,它的保护动作速度要快。但是应该考虑到电压制动原理的应用与电源阻抗的大小密切相关,若系统阻抗非常小,保护可能拒动,同时还要防止TV断线。

## 3 基于波形特征的识别方法

### 3.1 间断角原理<sup>[4]</sup>

间断角原理是利用短路电流波形连续变化,而励磁涌流波形有明显的间断角特征作为鉴别判据。该方法简单直接,但是以精确测量间断角为基础的。如果CT饱和会使传变后的二次侧涌流间断角发生畸变,有时会消失,要采取某些措施恢复间断角,从而增加了保护硬件的复杂性。同时还要受到采样率、采样精度的影响及硬件的限制,因此该原理在实

际微机差动保护的应用效果并不十分的理想。

### 3.2 波形叠加原理

文献[5]作者推导出的半波叠加制动方法是把文献[1]中涌流表达式  $i$  求导后,将所得波形的前后半波叠加。若令  $A = \int_0^T |i_t + i_{t+T}| dt$  及  $D = \int_0^T |i_t| dt$ ,  $K = A/D$  作为识别特征量。经计算后可知,故障时  $K=0$ ,而在励磁涌流间断角大于  $180^\circ$  时  $K$  的最大值为 1。若能选择适当的整定值  $K$  就可以简单方便地区分涌流和故障电流。

作者为了消除经  $Y/\Delta$  变换后出现的对称涌流对半波叠加原理的变压器差动保护的影响,在分相差流制动的基础上增加了高压侧相电流制动条件。通过动模实验和现场运行表明,用该原理制成的微机差动保护在空载合闸于内部故障时具有较高的灵敏度,在 1.25% 匝间短路时,可在 40 ms 内切除故障,具有良好的抗涌流能力。

### 3.3 波形对称原理

该原理利用流入继电器差流导数的前后半波对应点的对称性比较来区别励磁涌流与短路电流。

文献[6]应用单片机实现了微机变压器保护装置,已在 110 kV 变压器上投入运行,经受了合闸涌流考验,各项指标符合要求,运行情况良好。该保护具有如下特点:当变压器空载合闸于内部故障或外部故障切除后发生内部故障,保护均能瞬时动作;对剩磁的适应能力强,当变压器有 0.9 倍最大剩余磁通时,不需要附加判据,保护就能完全正确动作。

### 3.4 积分型波形对称原理

文献[7]介绍的这种方法是将信号波形旋转、平移变换后,用积分方式处理,提取变压器内部故障时短路电流的波形对称特征,在此基础上建立基于模糊集理论的数学模型和判据。

经过对变压器不同状态下的 EMTP 仿真表明,该原理简单实用,效果理想。缺点是在 TA 饱和情况下,经变换后的电流波形间断角有可能会消失,除非采取有效的措施,否则此方法将失去实用价值。

### 3.5 基于波形相关性分析方法

文献[8]提出的这种方法是利用数字信号处理中的相关函数的基本概念,对采样数据进行分析,计算采样数据在不同时段上的自相关系数大小来区分变压器的励磁涌流和内部故障的新方法。由于波形自相关性的定义中不仅包含波形的幅值大小、波形的信息,而且还包含波形的相位信息,因此文中所提

到的波形相关性分析方法,不是单纯地利用涌流或故障电流单方面的特征,而是对波形进行有机综合的分析。

经过理论分析和 EMTP 仿真,结果表明:此原理使用的特征明显,能正确识别励磁涌流,不受非周期分量和电流互感器保护状态的影响。

### 3.6 小波原理的励磁涌流判别方法

Fourier 分析能将信号的时域特性变换为频域特性,是一种纯频域分析方法。它无法反映局部时域信号在局部频域中的对应特性,而小波分析作为 Fourier 分析的深入,近年来在电力系统变压器差动保护中成为关注的热点。

#### 3.6.1 基于小波变换原理

小波变换同时具有时频局部化特性,可以精确地提取信号的变化特征,文献[9]正是利用它在信号特征分析中明显的优越性来鉴别励磁涌流和短路电流。文中运用二次中心 B 样条小波作为分析小波,对离散信号进行二次小波分解后,将一个周期内第二尺度上的小波系数波形的后半波前移  $180^\circ$ 。可以直观看出,在内部故障时波形比较平滑,且大多数采样时刻总有当前时刻与半周前对应时刻的小波系数符号相反,大小大致相等,而励磁涌流的小波系数绝大部分时刻不满足这一点。

通过对 EMTP 仿真数据和重点实验室实测数据的分析,从理论上论证了该判据的可行性。当变压器发生内部出口故障或空载合闸于匝间短路时动作时间不超过 1 个周期,还可以减少反向电流对保护性能的影响。缺点是采样率较高,因而对硬件要求高。若进行高尺度分解又将引起数据和计算量增大。

#### 3.6.2 基于小波包变换原理

由于小波具有良好的时域和频域特性,而且对高频部分采用逐步精确的采样步长,可聚焦到分析对象的任意细节,总结小波变换和多分辨分析的研究,文献[10]构造了正交小波变换基础上的小波包波形识别算法,并把它应用到变压器差动保护的励磁涌流的识别过程。作者进行动模实验后发现,用正交小波分析的涌流和故障电流得不到明显的区分特征,涌流的奇异度稍大,但不足以与故障分开。然而,在经过小波包变换之后,励磁涌流表现出明显的奇异性。该方法不仅能准确区分励磁涌流和各种典型内部故障电流,而且还能正确识别空载合闸于内部故障情况。

值得指出的是,现有的基于小波变换的各种仿

真算法都是将输入数据一次性作为滤波器的输入,不具备实时性。而该算法引入短数据窗对采样数据进行分析,它不是将所有的数据一并输入滤波器组进行小波包变换,并且每计算一个小波包系数只需有限次乘法和加法。因此,它具有良好的实时应用前景。

## 4 基于智能理论的识别方法

### 4.1 模糊贴近度原理

在波形对称原理的基础上,文献[11]提出用模糊贴近度识别变压器故障电流和励磁涌流。因为将两种电流波形经差分滤波后,励磁涌流前后半波波形明显不对称,而短路电流基本上对称。该方法关键在于选择电流在一个周期内前后半波对应点对称程度的隶属函数及模糊贴近度。作者对一台模拟的三相变压器进行数字仿真和实验。结果证明,文中采用的隶属函数及贴近度公式是可取的。它可以准确识别故障电流和励磁涌流。即使在空载合闸于内部短路故障时,继电保护也能迅速可靠动作,避免了采用二次谐波制动导致的拒动问题。同时具有计算量少,对芯片运算速度要求不高,还能提高采集频率等优点。

### 4.2 基于模糊多判据原理的鉴别方案

文献[12]在分析现有四种识别算法的基础上,综合各判据的优点,利用模糊集合理论将各判据模糊化后进行多判据的综合模糊化,即:

$$\mu = \bar{\mu}_1 \mu_1 + \bar{\mu}_2 \mu_2 + \bar{\mu}_3 \mu_3 + \bar{\mu}_4 \mu_4$$

式中:  $\bar{\mu}_i$  是  $\mu_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 对应判据的权重,并且满足  $\sum_{i=1}^4 \bar{\mu}_i = 1$ 。当  $\mu > \mu_{th}$  时,判为内部故障,保护将出口动作,否则认为是涌流情况。

这种方法兼顾了各方面的优点,既能做到可靠动作,又能提高变压器保护的動作速度,同时利用微机保护技术可以实现上述多判据算法,具有普遍推广的价值。

### 4.3 基于人工神经网络的判别原理

该方法是用由短路电流仿真模型和涌流仿真模型得到的频域及时域数据样本训练按照系统判别励磁涌流的实际要求而设计的频域和时域神经网络模块。作者将训练好的神经模块接到励磁涌流和短路电流的仿真模型中进行仿真,得出:如果学习样本选取适当,一般在 20 ms 左右即可作出正确的判断。

由于文献[13]中的方法所需样本是经过仿真得到的,不是变压器在实际运行情况下的采样数据,因

此它的精确性、实用性受到一定的影响,要想在实际中应用还须作许多后备工作。

## 5 基于电气模型的识别方法

### 5.1 逆电感等效电路原理

文献[14]作者认为不论变压器内部有无故障,它总能用逆电感(电感倒数)构成的通用等效电路表示,如文献中图 2 所示的三绕组变压器。在不计电阻成分的前提下,利用变压器每个端子处电压和电流采样值及多端口网络方程:  $[I] = [Y][Udt]$ , 可得到系数矩阵中的各元素值。定义非对角线元素  $Y_{ij}$  为转移逆电感,  $Y_{i0}$  为并联逆电感。通过分析 UHV 型变压器在稳定状态、励磁涌流及内部故障情况下的转移逆电感和并联逆电感的计算结果,可以看出转移逆电感大小与变压器线圈的磁通密度、短路匝数比无关,为一个恒值,而并联逆电感的大小与变压器内部运行情况有关。因此,可以用并联逆电感作为区别励磁涌流和短路电流的判据。对 UHV 型变压器进行数字模拟,对实际变压器模型进行试验,研究结果表明,该方法能快速地判别励磁涌流和内部故障,保护能在半个工频周期内正确动作。适合多绕组变压器。但是它必须装设主变高压侧 TV;要求测量各侧绕组电流,对于 Y 接线,只适用于单相变压器(三相容量 750 MVA 及更大)。

### 5.2 励磁阻抗变化原理

文献[15]提到的励磁阻抗变化原理是从磁化曲线的非线性出发,利用涌流时变压器励磁阻抗急剧变化,而在正常运行或内部故障时励磁阻抗基本不变这一特性来区分励磁涌流和短路电流的。它不需要知道变压器参数和系统参数。当均方误差  $Z(t) = \sqrt{E\{[Z(t) - E(Z)]^2\}}$  大于门槛值  $Z_{zd}$  时,判为涌流,否则为短路电流。其中:  $Z(t)$ ,  $E(Z)$  分别表示测量阻抗  $Z(t)$  的变化程度和数学期望。

通过动模实验和 EMTP 故障仿真实验表明,此方法可以很快地区分励磁涌流和短路电流。即使在合闸于轻微匝间故障情况下,动作延时也不超过 30 ms。

## 6 基于磁通特性识别方法

针对以往几种磁制动方案存在只适用单相变压器的缺陷,文献[16]作者建立了变压器新磁路模型。在引入假想电流及  $\theta = 0, NI = Hdl$  等磁路定

律的基础上建立了一个非线性方程  $[A][X] = [b]$ , 经迭代求解  $\mu$  值(利用磁化曲线确定)。然后, 判断磁路是否饱和, 并按文中采用的规则条件, 将各相所设立的计数器  $k_{oi}$  的数值(以文中方法确定)与门限值  $k_{o,max}$  进行比较, 判断是否为励磁涌流。作者用实际的涌流波形对该算法进行测试。测试结果表明, 它适合各种类型的变压器; 如果采样率足够高, 收敛的速度将会很快; 若取消二次谐波判据, 检测内部故障的速度仍然较快。并且当变压器空载合闸于内部故障时, 动作速度快。

文献[17]还介绍了其他二种用磁特性制动的办法, 各有其优缺点。但从实用化方面讲, 后两种相对成熟些。基于磁特性的励磁涌流鉴别法不但可以克服二次谐波制动原理的不足, 而且适宜用微机实现, 将是一种有前景的方法。

## 7 功率差动原理的识别方法<sup>[19]</sup>

它是利用由变压器每个端口处的电压和电流计算的平均功率来鉴别励磁涌流。为了能用数字继电器实现该方法, 以双绕组变压器为例, 每个周期取 12 个采样点, 采用以下判据:

$$W(t) = \frac{1}{T} \sum_{n=0}^N \{ P(t - \frac{n}{N} T) \}$$

若此值超过设定的门限值时, 则判为内部故障。该方法同样适用于三绕组变压器, 不受带负荷的抽头接换开关状态的影响。

与传统的辨识方式相比, 它能提高继电器的灵敏度, 使保护跳闸时间平均为 80 ms(4 个周期), 其中包括断路器运行时间 40 ms, 并能有效地区分励磁涌流和短路电流。但在进行 EMPT 模拟试验时并没有用到变压器模型, 这样使测量的波形与实际情况有一些区别。当频率发生变化时, 在涌流状态下的测定情况也会受到影响。

## 8 结论

通过以上的介绍和分析发现, 为满足电力系统不断发展的要求, 近十多年国内外学者对变压器保护的原理从各方面进行了深入的研究和试验, 提出了许多不同的方案。其中大多数进行的动模实验和仿真证明具有较高的灵敏度和可靠性, 但离微机保护的实现还有一段距离。而原来已用于实际的一些方法随着电力系统的发展也面临着新的考验。因此, 为适应未来电力系统的要求, 尽快研制出新原理的微机变压器保护已成为一个非常现实和迫切的要

求。

## 参考文献:

- [1] 王维俭, 侯炳蕴. 大型机组继电保护理论基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1982.
- [2] Kulidjian A, Kaszenny B, Campbell B. New Magnetizing Inrush Restraining Algorithm for Power Transformer Protection [A]. Developments in Power System Protection [C], Conference Publication No. 479 IEE 2001: 181 - 18.
- [3] Thorp J S, Phadke A G. A Microprocessor Based Voltage Restrained Three Phase Transformer Differential Relay [J]. Proceeding of the South Eastern Symposium on System Theory, 1982, 4: 312-316.
- [4] 王祖光. 间断角原理的变压器差动保护[J]. 电力系统自动化, 1979, (1).
- [5] 董洁, 于莉萍, 焦志先, 等. 变压器差动保护涌流制动原理的研究[J]. 电力系统自动化, 1997, 2(12): 30 - 33.
- [6] 孙志杰, 陈云仑. 波形对称原理的变压器差动保护[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(4): 42 - 46.
- [7] 焦邵华, 刘万顺. 区分变压器励磁涌流和短路电流的积分型波形对称原理[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(8): 35 - 38.
- [8] 李贵存, 刘万顺, 滕林, 郑涛. 基于波形相关性分析的变压器励磁涌流识别算法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(9): 25 - 28.
- [9] 操丰梅, 苏沛浦. 小波变换在变压器差动保护中的应用[J]. 中国电力, 1998, 31(11): 21 - 24.
- [10] 林湘宁, 刘沛, 程时杰. 基于小波包变换的变压器励磁涌流识别新方法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(8): 15 - 19.
- [11] 梁国坚, 梁冠安. 用模糊贴近展识别变压器故障电流和励磁涌流的研究[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(9): 310 - 314.
- [12] 黄登峰, 郁惟镛, 赵亮, 王慧芬. 基于模糊多判别的变压器励磁涌流识别新算法[J]. 继电器, 2000, 28(12): 4 ~ 7.
- [13] 袁宇波. 基于人工神经网络的变压器励磁涌流识别[D]. 河海大学硕士生毕业论文, 2000, 3
- [14] Inagaki K, Higaki M, Matsui Y, et al. Digital Protection Method For Power Transformers Based on an Equivalent Circuit Composed of Inverse Inductance [J], IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(4): 1501-1508.
- [15] 华烽, 朱振飞, 张绍纯. 基于励磁阻抗变化的变压器励磁涌流判别方法[J]. 中国电机学报, 2001, 21(7): 91 - 94.
- [16] 金明, 蓝娟, 刘远龙. 基于变压器磁特性的励磁涌流鉴别方案[J]. 青岛大学学报, 1996, 9(12): 89 - 93.
- [17] 唐跃中, 刘勇, 郭勇, 等. 几种变压器励磁涌流判别方

法的特点及其内在联系的分析[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(9): 53-59.

- [18] Thorp J S, Phadke AG. A New Computer Based Flux Restrained Current Differential Relay for Power Transformer Protection [J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1983, PAS-102(11): 3624-3629.
- [19] Kuniaki Yabe. Power Differential Method for Discrimination between Fault and Magnetizing Inrush Current in Transformers [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1997, 12(3): 1109-1118.

收稿日期: 2002-01-29

作者简介:

宋芸(1974-),女,硕士研究生,研究方向为电力继电保护及无功控制;

乐秀璠(1956-),男,副教授,研究方向为电力系统遥控及继电保护;

钱锋(1966-),男,工程师,从事微机保护及配网自动化的研究及管理工作。

### The application of inrush current identification method in transformer protection

SONG Yun<sup>1</sup>, LE Xiu-fan<sup>1</sup>, QIAN Feng<sup>2</sup>, LI Zhi-peng<sup>1</sup>

(1. Hehai University, Nanjing 210098, China; 2. Xuzhou Power Supply Bureau, Xuzhou, 221000, China)

**Abstract:** The identification of magnetizing inrush current has always been a vital problem in transformer protection. This paper analyzed and summarized the method of inrush current identification principle presented by lots of scholars, and compared the method used on site with the application of modern intelligent identification theory in inrush current. Then the tendency of its research and application was proposed.

**Key words:** power transformer; magnetizing inrush current; relay protection

(上接第 82 页)

### Analysis in effects to high frequency protection command transmission time in carrier wave channel

LIU Hui<sup>1</sup>, PAN Yong-qi<sup>1</sup>, QU Jing<sup>2</sup>

(1. Chongqing Electric Power Dispatch and Communication Centre, Chongqing 400014, China;

2. Chongqing HIPDC Luohuang Power Plant, Chongqing 400000, China)

**Abstract:** When adopting the blocking scheme in DLP protection equipment, ignoring the effect of high frequency protection's command transmission time in carrier wave channel led to the high frequency protection's maloperation on the fault out of protection region. It is found by analysis that, different from protection we usually adopt, the high frequency protection of the blocking scheme has cooperative relationship with protection command channel transmission time. DLP-DATA fault record program in DLP protection is used to measure the channel transmission time of the high frequency protection, which provides time data for protection setting.

**Key words:** blocking; protection command; transmission time

(上接第 84 页)

作者简介:

冯勇(1972-),男,硕士研究生,工程师,研究方向为电力系统继电保护。

柳焕章(1954-),男,高级工程师,研究方向为电力系统继电保护。

陈学道(1951-),男,硕士研究生,高级工程师,研究方向为电力系统继电保护及运行管理。

### New ways to distinguish the surge of the transformer

FENG Yong, LIU Huan-zhang, CHEN Xue-dao

(Central China Electric Power Dispatching Center, Wuhan 430077, China)

**Abstract:** The paper presents two ways to distinguish the surge of the transformer. They are two-fold derivative method got by analysing the characteristics of current waveform and U method got from the theory of exciting surge. These two methods are more simple and reliable compared with the others.

**Key words:** transformer differential relay; surge