

磁通制动原理在变压器差动保护中应用

孙志杰¹, 曾献华¹, 汤汉松¹, 吉 晨²

(1. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210003;

2. 南京供电公司, 江苏 南京 210008)

摘要: 变压器差动保护的关键问题是判别变压器差动电流是励磁涌流还是故障电流。介绍了一种新型的利用变压器励磁特性的励磁涌流判别方法——磁通原理算法, 该算法只用差流的上升沿或下降沿计算, 且用采样值直接进行计算, 因此计算量小, 简单可靠, 解决了差动保护动作速度上的问题。将其应用到工程实践中, 证实了其可行性。

关键词: 磁通制动; 变压器; 励磁涌流; 差动保护

中图分类号: TM 772

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)01-0079-03

0 引言

随着越来越多超高压远距离输电系统在我国建设和运行, 系统中的大容量超高压变压器日益增多, 这不仅对变压器差动保护的可靠性, 而且对其快速性也提出了更高的要求。变压器差动保护的关键问题仍然是判别变压器差动电流是励磁涌流还是故障电流。当前应用的变压器差动保护是励磁涌流闭锁的纵联比率差动保护, 而励磁涌流闭锁方式都是根据变压器差动电流的特征判别的^[1]。为可靠区别励磁涌流和故障电流, 算法上有一个完整的周期或更长的数据窗以取得足够的信息量, 因此, 整组出口时间必然超过 20 ms。为了提高变压器快速主保护的性能, 早在 20 世纪 80 年代, 全世界有十几个科研小组对利用变压器磁通特性的差动保护作了一系列的研究和实验, 并提出了几种方案, 但实现效果并不理想, 至今未在工程中批量使用。本文在前人的研究基础上提出对磁通特性进行深入研究, 提出了励磁涌流判别的数字模型算法, 实现了具有高性能的变压器快速主保护。文章对其动作性能和工程实用性作了详细描述。

1 变压器励磁涌流的特点

变压器利用电磁变换的原理, 在不同电压等级的电力系统中传输能量, 维系电气间的联系, 就整个电力系统而言实际是个电磁系统, 见图 1。

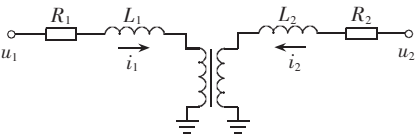


图 1 双绕组单相变压器模型
Fig.1 The model of two-winding single-phase transformer

功率的传输模式是电能 → 磁能量 → 电能, 变压器就是按照一定的要求实现电磁能量转换的元件, 在能量转换过程中由于磁路的存在, 就其本质而言, 变压器既不是基尔霍夫接点也不是功率守恒接点, 变压器差动保护在物理概念上是存在问题的。过去因为没有更好的办法解决变压器的全范围内速动保护, 只好将变压器近似处理为基尔霍夫节点使用差动保护, 同时对差动保护存在的问题进行弥补。

变压器的励磁特性曲线(如图 2 所示)是非线性的, 当工作点由线性段进入非线性段后, 励磁电流急剧增大, 这种较大的励磁电流称为励磁涌流; 当变压器有剩磁时, 工作范围会整体上移或下移使工作范围深度进入非线性区, 造成励磁涌流非常巨大, 励磁涌流特征如图 3 所示。

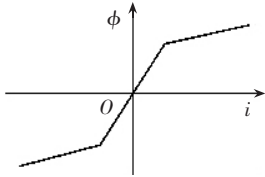


图 2 励磁特性曲线
Fig.2 The excitation characteristic curve

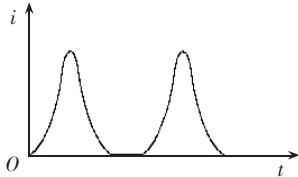


图 3 励磁涌流特征曲线
Fig.3 The characteristics of excitation inrush current

出现励磁涌流, 对变压器和系统而言是一种正常的暂态运行方式。差动保护必须安全地躲过这种过程。

目前, 在差动保护中使用的励磁涌流判别原理, 都是用电流的特征进行判别, 如二次谐波原理、间断角原理、波形对称原理。这三种原理都是采用励磁涌流的某一个数学特征量区分涌流和故障电流, 其特点是不能全面反映励磁涌流的物理特征, 只反映了一种表象而不是本质。

从理论上分析影响励磁涌流的因素是: 磁化特性曲线非线性、剩磁、合闸角、系统电压和阻抗。同时另外 4 个因素也会影响装置感受的涌流的特征: 变

压器严重饱和后,铁损增加;电流互感器(TA)传变涌流达到饱和后,传输特性的改变;磁回滞特性的影响,和应涌流。

根据多年的现场经验分析,认为造成差动保护躲避涌流失败的因素往往是后几个因素。由于判据在某一个或几个因素的影响下不能全面反映涌流特征,对利用传统原理的差动保护就可能是致命的。

2 磁通原理算法^[2,3]

磁通原理算法依然是在纵差保护的基础上,利用计算变压器的磁通特性,判断变压器是励磁涌流状态还是内部故障状态。

变压器等值电路如图 1 所示(图中 L_1, L_2 和 R_1, R_2 分别为原副边绕组电感和电阻)。设变压器绕组端电压 u_1 , 流进绕组的电流 i_1 与该变压器互感链之间的关系为

$$u_1 - R_1 i_1 - L \frac{di_1}{dt} = \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

在互感磁链中 i_1 和 i_2 进行抵消,其差流部分看作是励磁涌流,对图 1 作进一步简化如图 4 所示。

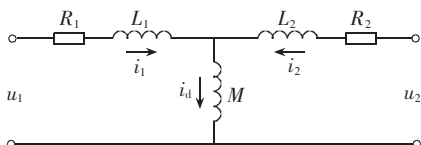


图 4 双绕组单相变压器的简化等值电路
Fig.4 The simplified equivalent circuit of two-winding single-phase transformer

图中, i_d 是差动电流即励磁涌流, M 为变压器的励磁感抗。

$$u_1 - R_1 i_1 - L \frac{di_1}{dt} = \frac{di_d}{dt} \quad (2)$$

实际变压器参数是 R_1, R_2, L_1, L_2 与 M 差两个数量级以上,为了便于分析,简化计算,忽略 R_1, L_1, R_2, L_2 , 式(2)可简化为

$$u_1 = M \frac{di_d}{dt} \quad (3)$$

下面主要分析励磁感抗和电流电压的关系,因为励磁感抗反映变压器磁化工作点。励磁涌流出现是由于变压器工作点进入磁化曲线的非线性区,同时 M 值因此而变小,所以 M 值从本质上反映出变压器磁化情况,结合波形识别法将电压波形分成上升沿和下降沿不同的区段,以上升沿为例计算 M 值,将式(3)进行变化计算:

$$M = \frac{u_1}{di_d/dt} \quad (4)$$

微机保护采集的是电压和电流,因此将式(4)变化为差分形式:

$$M_n = \frac{u_n}{[i_{d(n+1)} - i_{d(n-1)}] / dt} \quad (5)$$

其中采样周期 dt 为常数,若保护装置每周期采样

48 点, $1/4$ 周期可计算 12 次 M 值,若有连续 3 次满足

$$M_n - M_{n+6} \geq k \quad (6)$$

则判为励磁涌流,否则判为故障电流,整个计算过程只需 $1/4$ 周期的时间。下降沿的计算方法和上升沿的完全一样。上升沿是从过零点至最大绝对值,下降沿是从最大绝对值至过零点。图 5 和图 6 分别示意了涌流和故障情况下差流和 M 的变化规律。

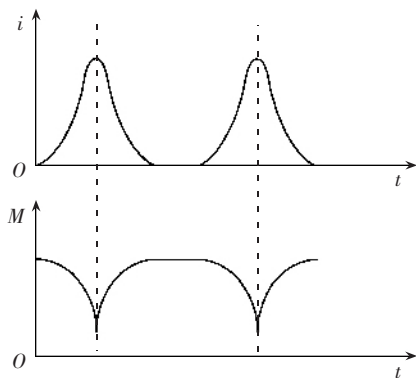


图 5 励磁涌流与励磁电感的关系

Fig.5 Relationship between excitation inrush current and excitation inductance

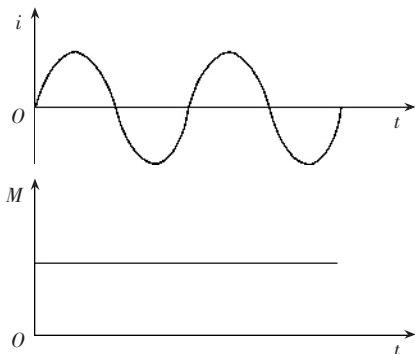


图 6 故障电流与励磁电感的关系

Fig.6 Relationship between fault current and excitation inductance

以上励磁感抗算法只用差流的上升沿或下降沿计算,并且用采样值直接进行计算,计算量小、数据窗短,因此可准确地判断励磁涌流和故障电流,并作到 $1/4$ 基波的时间出口(继电器动作除外),突破了传统变压器保护动作需一完整基波的时间瓶颈。

此算法最全面、真实地反映变压器励磁涌流物理特性的本质,简单可靠。在抗变压器铁损增加,TA 饱和、和应涌流等不良情况方面有明显优势。理论上,变压器过励磁电流对磁通制动原理没有影响。系统的静止补偿电容、超高压线路和电缆的分布电容对磁通制动原理的差动保护也没有影响。

在数学模型中忽略的铜耗 R 和漏感 L 对计算结果的影响作一分析。

a. 铜耗 R : 铜耗 R 造成的误差与电流 i_1 的大小有关,相对于励磁感抗,变压器的铜耗很小,忽略对 M 值几乎没有影响。

b. 漏感 L : L 是一恒定的值,对 M 值略有影响,

但对不同点间 M 的变化值没有大的影响,故不影响最终结果正确性。

以上两类误差,可以通过提高 k 值抵消对计算的影响。整个推导过程都是以单相变压器为模型,上述结果对于由 3 个单相变压器组成的三相电力变压器完全适用。

因为整个算法不考虑转角,对于低压侧接成三角形的一次接线形式,需在三角联结线内接一组 TA 测量低压侧各相绕组内电流。

磁通制动原理的变压器差动保护的保护区与传统的变压器纵联差动保护有所不同。传统的变压器纵联差动保护对变压器 TA 回路内的所有范围有保护作用;磁通制动原理只反应变压器的磁通特性,磁通制动原理的变压器差动保护不能反应低压侧的角型连接外部的故障,对变压器内部及高中压引线的故障能起到准确快速的保护作用。

对于三相一体化的电力变压器,此算法需作进一步改进,三相一体化变压器各相之间不但有磁的联系,也有电的联系,此种算法经改进后,仍是可行的。

3 实际应用及实验结果

上述磁通制动原理在变压器差动保护上的应用,对保护装置的采样速率要求比较高,因为要求在 $1/4$ 周期内区别涌流与故障电流,为了保证判断的准确性则必须有足够多的采样点,每周期至少采样 48 点以上。针对以上情况,在 SGT750 系列保护平台上开发了磁通制动原理的差动保护装置 SGT752 数字式变压器保护装置实现变压器快速差动保护。并分别与 2003 年 7 月在华中科技大学、2004 年 6 月在北京电科院 750 kV 变压器动模模型上做了动态模拟实验,在变压器区内各种类型故障动作时间基本小于 10 ms(包括继电器动作时间);外部故障、TA 饱和和可靠制动,变压器各侧的空冲涌流、和应涌流均可靠制动,匝间故障大于 1.5% 时可靠动作,尤其对于空合于变压器区内故障时,相对于其他保护原理的差动保护具有明显的优越性,动作速度仍可稳定于 10 ms 以内。

4 结论

磁通制动原理的变压器差动保护灵敏度高、动作迅速,对系统的异常运行工况有完全的适应能力,能够从本质上反映变压器绕组的故障情况,可作为超高压和特高压分相式大型变压器的差动保护。

参考文献:

- [1] 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.
TANG Yue-zhong, LIU Yong, GUO Yong, et al. Analysis of some typical methods for checking magnetizing surge in transformer[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1995, 19(9):53-59.
- [2] 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.
SUN Zhi-jie, CHEN Yun-lun. Transformer differential protection based on the characteristic analysis of the first and second half cycle of the magnetizing inrush current [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1996, 20(4):42-46.
- [3] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京:中国电力出版社, 1996.
WANG Wei-jian. Theory and application of electrical main equipment relay protection[M]. Beijing:China Electric Power Press, 1996.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

孙志杰(1962-),男,河北邢台人,高级工程师,主要从事电力系统自动化方面的开发及研究工作 (E-mail:szj@sac-china.com);

曾献华(1973-),男,江苏淮阴人,工程师,主要从事电力系统继电保护工作;

汤汉松(1974-),男,安徽马鞍山人,工程师,主要从事电力系统继电保护装置的开发工作;

吉晨(1969-),男,江苏南京人,工程师,主要从事电力系统继电保护运行及管理工作。

Application of flux restraint theory in transformer differential protection

SUN Zhi-jie¹, ZENG Xian-hua¹, TANG Han-song¹, JI Chen²

(1. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 210003, China;

2. Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210008, China)

Abstract: It is essential to distinguish excitation inrush from fault current in transformer differential protection. Flux theory algorithm, a new method based on transformer excitation characteristics, is introduced. It applies directly the sample data to calculate only the rising edge or falling edge. Therefore, the method is simple with less calculation, which increases the action speed of differential protection. The practice in project shows its feasibility.

Key words: flux restraint; transformer; excitation inrush current; differential protection