跟踪式二次谐波涌流制动改进方法

徐　健，王　翔
（南京南瑞继保电气有限公司，江苏省南京市 211100）

摘要：针对二次谐波制动原理存在的问题，提出一种新的二次谐波制动原理。通过判断变压器的开关位置和差流大小来改变涌流闭锁二次谐波门槛值，在空载合闸和故障切除恢复电压的过程中监视变压器内部故障和励磁涌流，达到在不会拒动的情况下更准确地判断励磁涌流、防止保护误动的目的。该方法具有实时跟踪的功能，克服了单一定值不能实现可靠制动的缺点。验证表明新方法具有较高的可靠性和灵敏性，可以克服传统制动方法的缺点，实现对励磁涌流现象的可靠制动。

关键词：差动保护；励磁涌流；二次谐波；变压器

中图分类号：TM772

0　引言

变压器励磁涌流制动问题是影响变压器差动保护动作可靠性的主要因素。主保护纵差保护的理论依据是基尔霍夫定律，对于纯电流的问题，其动作性能无懈可击，在发电机和线路保护的应用中，“九五”期间发电机保护的正确动作率为98.2%，系统保护的正确动作率达99.33%。但对于变压器，由于其磁路不能满足基尔霍夫电流定律，发生励磁涌流时可能导致差动保护误动。目前国内变压器差动保护大多采用二次谐波制动为励磁涌流的闭锁方法。随着电力变压器工作磁通密度的提高，励磁涌流中二次谐波含量越来越少，最近国内变压器空投时因涌流原因误动的情况时有发生，很多现场的动作情况中二次谐波含量都在10%以下。二次谐波闭锁定值不容易确定，太低容易引起保护拒动，太高则不能很快地发现励磁涌流。其他判别方法也有很多，但除了在实现难度上有所区别外，波形判别都只从电流波形的表面出发来研究，而二次谐波制动方法从波形的内涵和根本来分析，因此相对于其他判据有一定优势，反映了磁路的非线性特性，比较可靠。

本文在传统二次谐波制动方法的基础上进行了一些改进，在空载合闸和外部故障切除后电压恢复时，根据差流和二次谐波含量的特性合理调节制动比的大小，在保证故障时可靠动作的前提下达到在涌流时准确制动的目的[1]。

1　新方法的提出

变压器空载合闸和外部故障切除后电压恢复时，由于变压器铁心饱和的原因，在暂态过程中出现很大的暂态励磁涌流，励磁涌流流入差动回路就形成了很大的差流，如何可靠制动涌流成为影响变压器纵差保护可靠性的问题所在。二次谐波制动方法是最常用的涌流制动方法，如果有合理的门槛值，可以很好地发现励磁涌流，使得差动保护躲过励磁涌流可能导致的误动。但二次谐波制动方法存在定值不易确定的问题，随着变压器工作磁通密度的提高，涌流中二次谐波的含量会减小，其大小难以估计。

1.1　二次谐波制动原理

二次谐波制动法是计算差流中的二次谐波分量，若其值较大则判定为涌流，常用的判别式为：

$$\frac{I_{d2}}{I_{d1}} > K \tag{1}$$

式中：I_{d1} 和 I_{d2} 分别为差流中的二次谐波和基波幅值；K 为二次谐波制动比。

二次谐波制动原理简单明了，有多年的运行经验，目前国内外实际投入运行的微机变压器保护大多采用该原理。但是，采用二次谐波制动原理的变压器保护，面临以下几个问题：

1）励磁涌流是暂态电流，不适合用傅里叶级数的谐波分析方法。因为对于暂态信号而言，傅里叶级数的周期延拓将导致错误的结果。

2）很难选择适当的制动比 K。美国西屋公司的制动比为7.0%～7.5%，但ABB公司取10%，包括中国在内大部分国家则取15%～20%。

3）现代变压器磁特性的变化，使得涌流时二次谐波含量低，导致误动；而大容量变压器和远距离输电的发展，使得内部故障时暂态电流产生较大的二次谐波，导致拒动[1-7]。

收稿日期：2007-03-27；修回日期：2007-04-30。

1.2 二次谐波制动新原理的提出

针对二次谐波制动原理存在的问题，提出一种新的二次谐波制动原理，该原理保留了二次谐波制动方法的优点，并能更好地识别变压器励磁涌流。

分析某电厂励磁涌流时主变差动保护误动的一次事故，变压器微机保护动作时的录波图见附录A。由于变压器励磁涌流导致电流不能正确传变引起了较大的差流，所用的变压器保护采用的二次谐波制动原理没有能够可靠制动，在合开关的2个周期后跳闸出口，导致了一次由励磁涌流引起的误动。

通过滤波发现，差流中的二次谐波含量在合开关2个周期后降低到很小，最低时只有11%。而定制中的制动比$K=15\%$，因此保护装置不能可靠制动。进一步分析滤波发现，在刚合开关的1个～2个周期内差流的二次谐波含量非常高，有些点的含量甚至超过了100%。之后二次谐波含量逐渐下降，同时伴随着一些波动。如果主变保护不误动，因为没有任何故障存在，几个周期后差流会减小至0。主变保护在由励磁涌流引起的差流减小到保护启动值以下之前就已经动作，动作点在合开关的2个周期以后。在动作点处，差流没有来得及下降，二次谐波含量却降到了制动比K以下，主变保护因为不能正确判断实际情况而误动。

在合开关后的几个周期内，每相差流最大时的二次谐波含量值统计如表1所示。

表1 波形数据统计
Table 1 Analysis of the wave of accident

周期	差流 I_e			二次谐波含量/(%)		
	A相	B相	C相	A相	B相	C相
1	0.879	0.900	0.969	0.491	0.507	0.434
2	0.874	0.862	0.626	0.883	0.549	0.197
3	0.632	0.668	0.307	0.110	0.111	0.159
4	0.505	0.634	0.255	0.408	0.262	0.546
5	0.369	0.557	0.205	0.739	0.460	0.716

从表1中可以看出，在变压器高压侧开关闭合以后三相差流呈下降趋势；差流中的二次谐波含量在1个～2个周期内会较高，这与变压器线圈的磁滞特性相符，谐波含量在2个～5个周期内会有一些波动，没有明显的变化规律。

从表1中可以看出，在第3个周期时BC两相差流的大小分别为$0.668I_e$和$0.307I_e$，差流中的二次谐波含量分别为0.110和0.111。电厂的变压器保护的制动比定值是0.15，所以BC两相都不能被可靠制动，此时B相的差流已超过动作值，C相的差流也已超过主变差动保护的启动值，因此差动保护误动。如果此时能有低于0.11的制动比，则可以避免一次不必要的误动。

本文提出一种新的二次谐波制动方法，将二次谐波制动过程分为2个过程。第1个过程为合闸后的1个～2个周期内，制动方法与现有的二次谐波制动方法相同，设制动比$K=K_1$，当$I_{d1}/I_{d2}>K_1$时认为发生了励磁涌流。因为在合闸后的1个～2个周期内二次谐波含量都会突然升得较高，若这个环节能够可靠制动，则在故障时也能够可靠动作。第1个过程存在的主要目的是防止变压器开关合闸于故障状态，高制动比可以在闭锁励磁涌流误动的同时让内部故障可靠跳闸。第2个过程为一个跟踪过程，制动比K的变化范围为$K_2 \sim K_3$，$K_2<K_3\leqslant K_1$，K_2的值较小，略小于涌流时出现的差流二次谐波含量的最小值，略大于正常运行时每相电流中的二次谐波含量最大值，可以通过变压器的出厂试验得到一个合适的K_2值。在差流逐渐减小到0的过程中，K的大小随差流的减小而增大，当差流为0时K值增大到并维持为K_3。第2个过程存在的主要目的是在确定第1个过程中没有出现内部故障后，防止励磁涌流产生的差流引起差动保护的误动。同时，K值的不断升高使得第2个过程也具有防止在这个过程中出现内部故障时保护被制动的能力。如果在变压器的运行过程中变压器保护装置检测到开关的断开操作，则再把K值重新调整为K_1，准备在开关再次合闸时重复以上过程，新方案的工作流程由开关的断开和闭合位置来触发。

图1是一个完整的制动过程。

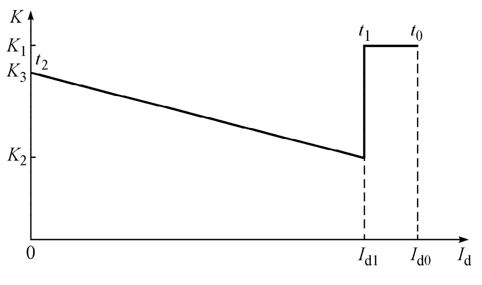

图1 制动过程
Fig.1 Processes of restraint

图1中，K为制动比，I_d为变压器差动电流。在t_0时刻开关合闸，$t_0 \sim t_1$的时间间隔为1个～2个周期，$K=K_1$，作为制动的第1个过程，此过程可以在变压器合闸于故障时正确动作，防止变压器内部故障时跳闸被闭锁；$t_1 \sim t_2$的时间间隔为制动的第2个过程，t_1时刻K降为K_2，与二次谐波含量的变化情况相似，然后再从K_2升为K_3。因为在此过程中差动电流会逐渐变小，合理选择K_2和K_3，适当抬高K值不会造成差动保护的误动。K值逐渐升高还可以躲过在第2个过程中可能出现的内部故障跳闸被制动的可能，尽管经过第1个过程后在几

个周期内出现变压器内部故障的情况已较少。如果主变保护装置检测到主变的开关位置打开,就再次回到 t_0 状态,一旦开关再次闭合,则重复上面的过程。

制动的第 2 个过程 $t_1 \sim t_2$ 的直线变化的斜率 k 与 I_{d1}, K_2, K_3 有关,即

$$k = \frac{K_3 - K_2}{I_{d1}}$$

$t_1 \sim t_2$ 的直线上在差动保护启动值 I_{qd} 之前的点应尽可能在涌流时变压器实际特性曲线 K_r-I_d(K_r 为涌流时实际的二次谐波含量)以下,同时要求尽量逼近,如果不能满足要求,则可以用两折线代替直线。当第 2 个过程的直线在 K_r-I_d 以下时可以保证变压器保护在涌流时的可靠制动功能。接近 t_2 时差流已经非常小,制动与否影响不大。各条曲线的关系如图 2 所示。

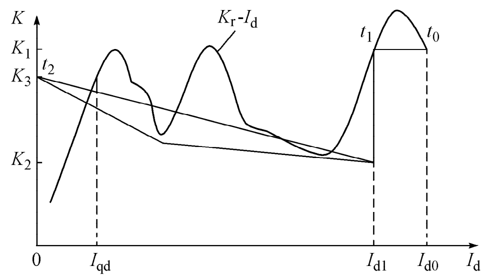

图 2 曲线关系
Fig. 2 Relationship of curves

从表 1 中还可以看出,在发生励磁涌流时三相的差流大小与差流中二次谐波含量都不相同,如果采用一相制动三相的方法也能防止这次误动,因为 A 相差流中二次谐波含量一直很高,如果是一相制动三相,则 A 相的谐波含量值使得变压器差动保护不能误动。但在某些情况下,三相差流的二次谐波含量可能降到制动比定值以下,所以单用一相制动三相的方法并不能从根本上实现可靠的制动,可以用一相制动三相的方法配合二次谐波制动方法来减小误动的可能性。

2 可行性和性能分析

新的二次谐波制动方法同样具有现有的二次谐波制动方法的优点,简单、直接、可靠,其实现方法也与现有方法基本相同,只增加了制动比的跟踪特性,制动比 K 的改变由时间和开关位置触发,实现起来也较容易。

新方法弥补了现有二次谐波制动方法的 3 个主要缺点,在现有方法的优点之上增加的性能有:

1)励磁涌流是暂态电流,不适合用傅里叶级数的谐波分析方法。新方案充分考虑了励磁涌流的暂态特性,以合开关后的几个周期为研究范围,以研究几个周期内的暂态特性为基础,实时性很强。

2)对于现有的二次谐波制动方法很难适当选择制动比 K。新方法可以设 3 个制动比,根据时间和变压器励磁特性灵活分配 3 个制动比值,整定方法灵活,从而适应各种情况的变压器要求。带有跟踪特性的制动比相对于单一的制动比更加科学可靠。

3)现代变压器磁特性的变化,使得涌流时二次谐波含量低,现有的制动方法可能误动;而大容量变压器和远距离输电的发展,使得内部故障时暂态电流产生较大的二次谐波,现有的制动方法可能会拒动。新方案可以根据变压器的特性灵活整定 3 个制动比,低定值 K_2 可以防止保护装置在涌流时的误动,高定值 K_1 和中定值 K_3 可以防止在内部故障时保护的拒动。

3 定值整定

新的二次谐波制动方案在定值整定方面需要给出 3 个制动比定值 K_1, K_2, K_3,其中,K_1 为制动比高值,K_2 为制动比低值,K_3 为制动比中值。合理整定 3 个制动比,充分利用变压器出厂试验的数据,保证高定值和中定值时保护不会误动,低值时保护不会拒动。变压器保护得到这些定值后代入程序,程序中 $t_0 \sim t_1$ 的时间间隔应能保证变压器在合闸于故障的情况下可靠、快速动作,同时要保证 $t_1 \sim t_2$ 的时间间隔能够提供给 $K_2 \sim K_3$ 变化的比较合理的斜率。t_0 为合闸时刻,t_2 为涌流消失差流减小到 0 的时刻,所以 $t_0 \sim t_2$ 的时间总长度大体固定,需要在程序中合理确定 t_1 的值,达到合理分配 2 个过程时间的目的。t_1 不能太大也不能太小,太大会给误动带来更大的可能,太小则不能让合闸于变压器内部故障时可靠跳闸,可以考虑在差流值达到 I_{d1} 时确定一个对应的 t_1。如果把 t_1 放在程序中不易设定,也可以放在定值单中经计算和分析给出一个定值。

4 结语

新的励磁涌流二次谐波制动方案继承了现在广泛使用的二次谐波制动方法的优点,同时弥补了现有方法的缺点。具有跟踪能力的二次谐波制动门槛值的调节功能可以在变压器开关合闸于变压器内部故障时可靠动作,在励磁涌流时可靠制动。新方法实现方便,增强了制动的可靠性,可以更好地改进变压器差动保护的动作性能。

附录见本刊网络版(http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx)。

参考文献

[1] 葛宝明,王祥珩,苏鹏声,等.电力变压器的励磁涌流判据及其发展方向.电力系统自动化,2006,27(22):1-5.

GE Baoming, WANG Xiangheng, SU Pengsheng, et al. Criteria and development trend to identify inrush current. Automation of Electric Power Systems, 2006, 27(22): 1-5.
[2] 王维俭.电气主设备继电保护原理与运用.2版.北京:中国电力出版社,2002.
WANG Weijian. Theory and application of power main equipment protection. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
[3] 王祖光,任杰,仇新宏,等.变压器谐波闭锁差动保护新判据.电力系统自动化,2006,30(14):50-53.
WANG Zuguang, REN Jie, QIU Xinhong, et al. New criteria for harmonic blocking differential protection of transformers. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(14): 50-53.
[4] 毕大强,王祥珩,梁武星,等.基于不同区域平均等效瞬时电感比值的励磁涌流鉴别方法.电力系统自动化,2005,29(17):49-53.
BI Daqiang, WANG Xiangheng, LIANG Wuxing, et al. Improved method based on the ratio of average equivalent instantaneous inductance in different zone to identify excitation inrush. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(17): 49-53.
[5] 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.电力系统自动化,1995,19(9):56-59.
TANG Yuezhong, LIU Yong, GUO Yong, et al. Analysis of some typical methods for checking magnetizing surge in transformer. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(9): 56-59.
[6] 王祖光,任杰,仇新宏,等.变压器谐波闭锁差动保护新判据.电力系统自动化,2006,30(14):50-53.
WANG Zuguang, REN Jie, QIU Xinhong, et al. New criteria for harmonic blocking differential protection of transformers. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(14): 50-53.
[7] YABE K. Power differential method for discrimination between fault and magnetizing inrush current in transformers. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(3): 1109-1118.

徐 健(1981—),男,助理工程师,主要从事发变组保护的研究。E-mail: jz20000cn@163.com
王 翔(1973—),男,工程师,主要从事发变组保护的研究。

An Improved Second-order Harmonics Restraint Method for Inrush Currents with Tracking Ability

XU Jian, WANG Xiang
(NARI-Rlays Electric Co Ltd, Nanjing 211100, China)

Abstract: A new second-order harmonics restraint principle is proposed to solve the problems in the existing methods. The threshold values of second-order harmonic blocking inrush current are adjusted according to the breaker positions of transformer and the differential currents. By monitoring internal faults and magnetizing inrush currents during the process of no-load switching and voltage restoring after fault clearances, the magnetizing inrush current can be judged more precisely without causing resistive operations and maloperations of protection. The new method has the function of real-time tracking and overcomes the shortage of single setting point that cannot realize reliable restraints. The reliability and sensibility of the new method are demonstrated by testing results.

Key words: differential protection; magnetizing inrush current; second-order harmonics; transformer

附录 A　实际运行中一次典型的励磁涌流录波图

合主变压器高压侧开关给主变送电发生励磁涌流时的主变高低压侧各相电流和差流的波形如图 A1 所示。

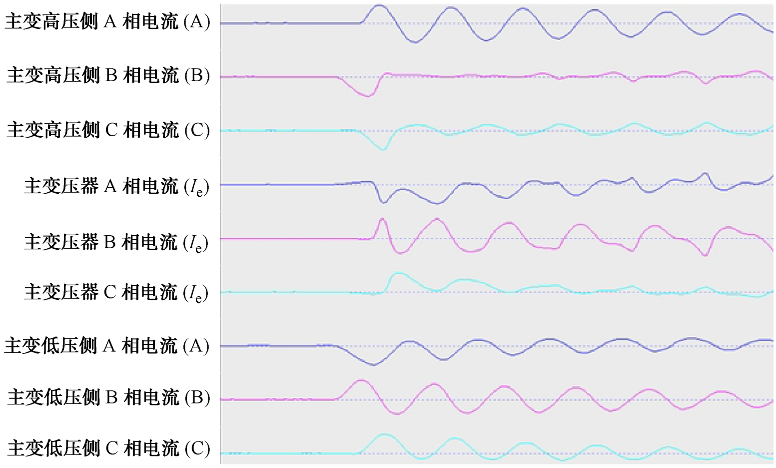

图 A1　励磁涌流录波图

Fig.A1　Wave of an accident of magnetizing surge in transformer