

变压器差动保护误动原因分析及对策综述

袁宇波, 李 鹏, 黄浩声

(江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘 要:从理论联系实际的角度综述分析了引起变压器差动保护误动的一些主要原因,包括变压器空载合闸励磁涌流、相邻变压器空投引起的和应涌流、外部故障切除恢复性涌流;电流互感器(TA)暂态饱和、局部暂态饱和;变压器零序涌流助增对变压器差动保护的影响等,根据这些误动原因提出了相应的解决对策。正确地认识和理解这些问题,有助于引起研发、设计、调试、运行等部门的重视,并通过适当的措施来避免这些原因引起的误动,提高变压器保护在现场运行的动作准确率。

关键词:变压器差动保护;励磁涌流;和应涌流;零序环流

中图分类号:TM772

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2013)06-0008-04

变压器作为电力系统中的重要元件,在电网中的地位非常重要,因此需要给变压器安装可靠的保护装置,随着微机保护的不断应用,数字变压器保护在电力系统中的应用日益广泛,但也暴露出来一些问题。近年来,变压器差动保护引起的保护误动频频出现,据统计,2000年至2004年全国220 kV及以上变压器差动保护共动作1126次,而其中误动就有246次,误动率高达22.2%^[1],有些误动原因没有进行详细分析就再次将变压器投入运行了,未具体查出原因,给电网的安全运行造成了一定的隐患。因此需要充分地调研引起变压器差动保护误动的一些主要原因,对事故原因进行深层次的理论分析、建模并提出避免这些误动建议,引起研发、设计、调试、运行等部门的重视,有助于提高变压器保护动作准确率。

1 二次回路原因引起差动保护误动

多年运行统计表明,变压器差动保护误动,经常是由于二次回路接线错误或二次设备性能欠佳而导致变压器差动保护误动。由于变压器差动保护二次接线复杂,牵涉到Y/Δ变换问题,现场安装调试人员一旦疏忽就容易将二次接线接错,通常表现为电流互感器(TA)极性接反、TA接线组别错误、TA接线相别错误。数字变压器保护不要求在TA的二次侧进行转角,由数字保护可以自动完成转角,如对于Y₀/Δ-11的变压器,变压器各侧TA均采用Y接线,这种接线在数字变压器保护中是允许的,但是在选择软件处理模式时,没有选择消除零序这一项,在发生区外故障时就会引起变压器差动保护误动^[2]。另外TA断线也会引起变压器差动保护误动,如何进行TA断线闭锁也是一个很关键的问题。

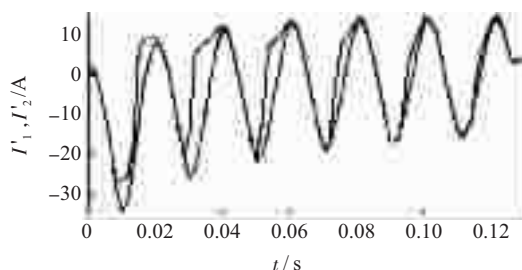
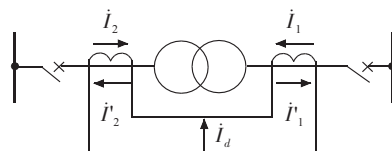
解决上述问题,根本之策在于加强对继电保护安

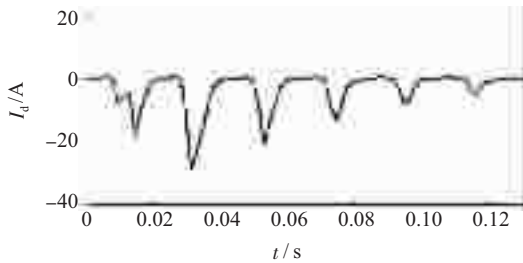
装人员和运行人员的培训,提高其业务水平,对在保护运行与调试过程中的一些关键注意事项进行重点的检查,其次保护厂商要严把保护产品质量关。

2 区外故障引起差动保护误动

通常变压器各侧电压等级是不一致的,因此差动保护所用的各侧TA的型号也有所差异。当变压器发生区外短路故障时,穿越性故障电流比正常运行时要大的多,尤其短路电流中含有较大的非周期分量,如果有一侧TA严重饱和或两侧TA饱和程度不一样,就可能产生较大的不平衡电流,容易引起差动保护误动。变压器差动保护二次接线如图1(a)所示,图1(b)、图1(c)为变压器高压侧发生区外故障时某次误动的变压器各侧电流及差流录波,可以看出高压侧TA已经严重暂态饱和,高压侧电流发生严重畸变,导致两侧差电流很大,差流峰值几乎与两侧电流峰值接近。

为防止区外故障时变压器差动保护误动,建议采取以下措施:(1)选取TA时,尽量使变压器各侧TA型号一致,宜均采用TPY级TA。(2)测试TA伏安特性、二次负载、绘制10%误差曲线,保证在最大外部短路电





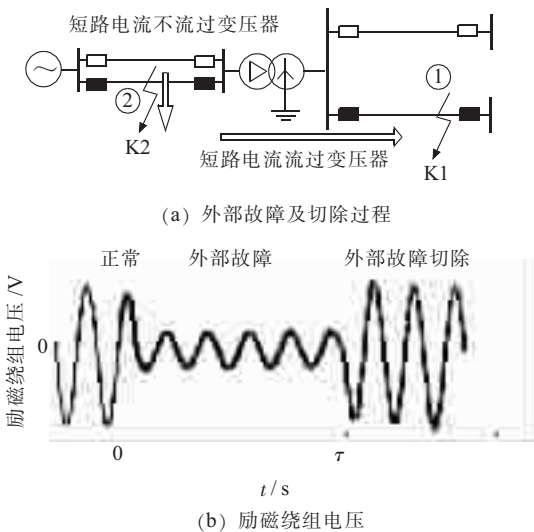
(c) 变压器差动电流

图1 区外故障变压器两侧电流及差流录波图

流时误差不超过 10%，如果超过，可加大二次电缆截面，采用较大的变比的 TA 或者两组 TA 串联使用。(3) 在保证灵敏度的前提下，适当提高制动系数。(4) 采用新型抗 TA 暂态饱和的差动保护原理。

3 恢复性励磁涌流

变压器差动保护也出现区外故障切除后误动的事件，主要和恢复性涌流相关，变压器经历外部故障切除扰动可以按故障电流是否流经变压器来划分成 2 种情况：一种是短路时故障电流不流过变压器；另一种是故障电流流过变压器^[3]。图 2(a)为变压器发生外部故障的系统接线示意图，假设在 $t=0$ 时刻故障点 K 发生三相短路故障，在 $t=\tau$ 时刻故障被切除，此时励磁绕组电压变化如图 2(b)所示。可见，外部故障的切除，变压器铁心经历类似合闸过的过程，会形成恢复性涌流，可能导致铁心饱和。



(b) 励磁绕组电压

图2 外部故障切除示意图及此过程中励磁绕组的电压

恢复性涌流是否能够导致变压器差动保护误动，研究表明：故障切除越快，恢复涌流产生的可能性越小；故障切除越慢，恢复涌流产生的越大。

对于超高压电网，故障切除快，电压支撑强，恢复涌流一般较难产生；考虑到故障电流流过变压器的情况下，变压器在外部故障切除时受到电流自然过零切除的约束，同时受外部故障的严重程度（主要指变压器

励磁支路电压的降低程度)的影响，因此变压器区外故障切除后的电压恢复过程被认为与变压器的空载合闸过程存在一定的差别，变压器外部故障切除后形成的恢复性涌流与故障传递剩磁有较大关系，恢复性涌流的峰值与典型的空载合闸涌流峰值相比明显较小，但是二次谐波含量并不低，难以引起差动保护的误动。

4 TA 局部暂态饱和引起的差动保护误动

TA 局部暂态饱和与 TA 暂态不一致应该来说本质上是一致的^[4]。分析表明，TA 暂态特性不一致形成的差电流很可能是造成变压器差动保护区外故障切除后误动的原因。因为变压器在外部故障扰动期间，TA 暂态特性的不一致将形成差电流，且随着外部故障的切除逐渐消失，此时差动保护呈现出以下几个特征：

- (1) 变压器两侧差流包含 TA 引起的差电流和恢复性涌流两部分，差动保护动作量较大；
- (2) 恢复性涌流二次谐波含量因为 TA 引起的差电流的存在而降低，二次谐波制动判据可能失效；
- (3) 差动保护制动量因为电流从故障电流恢复成正常的负荷电流，明显减小。

因此，建议保护厂商和运行人员为变压器差动保护选择暂态性能良好的 TA，调整 TA 的负载使得变压器两侧的 TA 的饱和特性趋向一致，同时选择具有抗 TA 保护的保护装置。

5 空载合闸引起差动保护误动

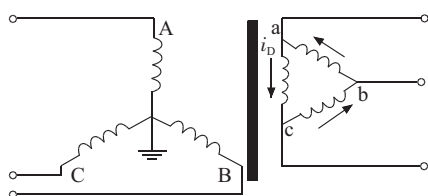
关于变压器空载合闸励磁涌流问题。长期以来，变压器空载合闸励磁涌流引起的变压器差动保护误动一直困扰着继电保护工作者，为此国内外学者作了大量的研究工作，根据励磁涌流区别于变压器内部故障电流的特征，提出了许多识别励磁涌流的方法。目前我国通常采取二次谐波制动和波形对称原理来防止励磁涌流引起差动保护误动^[5]。由于二次谐波制动原理中的二次谐波制动系数取值无法从理论上得到推导，只是靠一些经验值（目前我国通常取二次谐波制动系数为 15%~20%），对于现代大型变压器，铁心饱和点提前，空载合闸时励磁涌流二次谐波含量可能低至 10% 以下，在这种情况下，差动保护很可能会误动。另外二次制动系数应该怎么取，也是一个问题，目前常用的算法有以下几种^[6]：(1) 谐波比最大相制动；(2) 分相制动；(3) 按故障相制动；(4) 综合相制动。

谐波比最大相制动即是三相或门制动，它防止误动性能较好，但是它的最大缺点是故障时空投变压器可能会误闭锁导致延时切除故障甚至拒动。分相制动恰恰与谐波比最大相制动相反，它是三相与门制动，防拒动性能较好，但如果空投时出现某一相二次谐波含

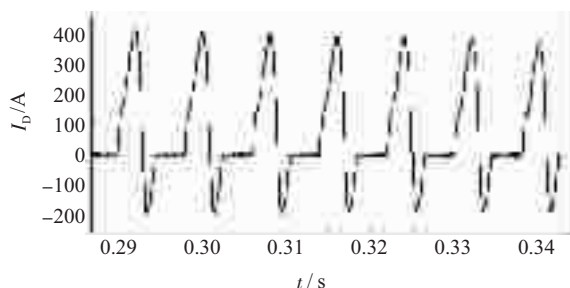
量较低或对称性涌流就会误动。按故障相制动是利用三相中差流基波值最大的那一相来制动,而综合相制动采用差流最大二次谐波值与最大基波值得比值作为制动比。按故障相制动和综合相制动通过提高制动比的分子值(基波电流),一定程度上提高了带故障空载合闸时差动保护的速动性,但是二者在某些情况下仍可能会误动或延时动作。

6 变压器空载合闸零序环流的助增问题

现场在空载合闸时,出现一些原因不明的误动。对于图3(a)所示Y/△接线变压器,在空载合闸时,由于三相铁心饱和情况的不平衡,会引起变压器三角形侧的环流,如图3(b)所示。



(a) 变压器接线图



(b) 变压器三角形侧环流

图3 环流助增引起的对称性涌流

误动的原因是否与该现象有关,不同的变压器转角方式是否也有影响,很有必要研究励磁涌流的助增现象。从目前报道变压器空载合闸误动的涌流波形来看,出现了一些新的现象,空充变压器时某一相出现了和内部故障短路电流相似的波形特征,该相差流中二次谐波的含量很小且初始波形对称性极好,导致变压器差动保护误动^[7]。

之所以会出现这种现象,主要是和数字变压器差动保护的转角方式有关。对于目前国内普遍采用的Y₀/△-11接线的变压器,大部分数字变压器差动保护装置对变压器各侧电流进行相位校正的实现方式既可用传统接线校正的方式也可用计算机软件来实现,两种方式可供用户自由选择。考虑到接线的简单性和方便性,对于新投运的变压器,技术人员多采取变压器各侧电流互感器统一Y接线,然后通过软件进行相位校正。利用软件进行相位幅值又通常有2种方式:一种是基于相间差动原理,本质上和传统接线原理是一样的,如SEL,ABB;另一种是基于相电流差动消零序)原理,

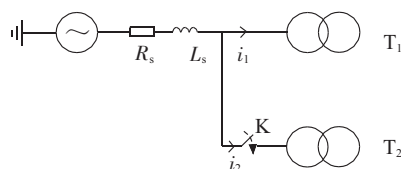
如SIEMENS,这个原理的一个重要环节就是要消除变压器Y₀侧的零序电流,否则区外故障时差动保护会误动^[8]。对于Y₀/△-11变压器经过推导^[9],可得:

$$\begin{cases} i_{Ad} = \frac{2}{3}i_{ma} - \frac{1}{3}(i_{mb} + i_{mc}) \\ i_{Bd} = \frac{2}{3}i_{mb} - \frac{1}{3}(i_{mc} + i_{ma}) \\ i_{Cd} = \frac{2}{3}i_{mc} - \frac{1}{3}(i_{ma} + i_{mb}) \end{cases} \quad (1)$$

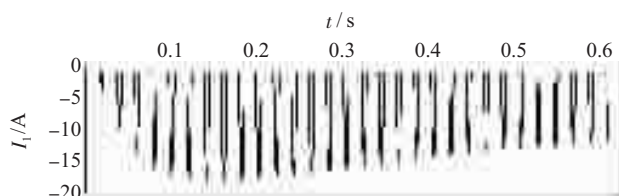
由式(1)可看出变压器空载合闸时,各相差电流是由三相励磁电流构成,因此每相差电流二次谐波含量也是由三相励磁电流决定,在一个平面内的3个相量必然线性相关,总有可能在某些条件下,三相涌流中的二次谐波互相抵消,使得某一相差电流的二次谐波为0或接近于0,而其他两相二次谐波应该比较大,如果采用分相制动就会发生误动。因此对于采用相电流差动原理的数字变压器差动保护,建议不要采用分相制动原理。

7 和应涌流引起差动保护误动

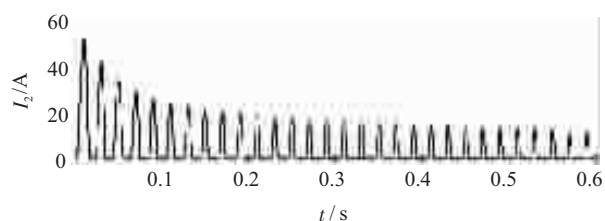
众所周知,当变压器空载合闸时,会出现励磁涌流,与此同时,与之并联或串联的变压器也将出现浪涌电流。对于图4(a)所示系统,变压器T₁正常运行,变压器T₂空载合闸,由于并联运行的2台变压器的合闸磁链之间通过系统侧电阻相互耦合,产生相互影响的,在T₁中产生浪涌电流,称为和应涌流。相应T₂合闸的励磁涌流及T₁产生的励磁涌流波形如图4(b)、图4(c)所示。



(a) 和应涌流产生示意图



(b) 和应涌流 T₁



(c) 空载涌流 T₂

图4 变压器并联型和应涌流

近些年来,关于和应涌流引起变压器差动保护误动的报道时有报道,引起了不少学者的注意,引起和应涌流的主要原因是空投变压器的励磁涌流引起公共接点的电压偏移,普遍认为和应涌流具有以下特点:

(1) 和应涌流与空投变压器的励磁涌流交替产生,且二者偏向于时间轴的不同侧。

(2) 和应涌流先是逐渐增大,之后逐渐减小。

(3) 和应涌流衰减比较慢。

但是目前对于和应涌流引起差动保护误动的原因还不完全清楚,观点也不统一。文献[10]认为和应涌流引起变压器暂态饱和,使得励磁涌流二次谐波分量明显减少,直流分量衰减较快,间断角消失,导致二次谐波制动式差动保护的误动;直流分量衰减较快,将导致速饱和型差动保护的误动;间断角消失会使靠间断角闭锁的差动保护误动。文献[11]认为和应涌流主要成分为零序电流,因此零序差电流是造成和应涌流误动的主要原因。且和应涌流本身并不是导致差动保护误动的原因,和应涌流中衰减很慢的非周期分量导致TA局部暂态饱和才是引起差动保护误动的主要原因。为防止和应涌流引起变压器差动保护误动,建议采取以下措施:

(1) 在满足灵敏度的前提下,适当提高保护动作定值。实践证明,这种方法简单有效^[12];

(2) 当主变开关空载合闸期间,尽量将两台变压器安排到不同的母线分段上进行启动,同时如调度允许,应断开空载合闸的主变中性点接地刀闸,减少两个变压器的通过公共母线的电压耦合,以避免或减小出现和应涌流的机会。

(3) 在保护装置中增加小工频电流非周期分量衰减较慢引起的TA局部暂态饱和判据,如增加角差闭锁,反时限电流差动保护等。

(4) 在条件允许的情况下更换剩磁系数较小的TPY系列TA,减少TA在小工频电流、长非周期分量下传变的误差。

8 穿越性涌流

2台变压器串联,空投下级变压器出现励磁涌流时,上级变压器会流过穿越性涌流。理论上穿越性涌流流过变压器的两侧,不会产生差流,但实际上由于励磁涌流含有较高的非周期分量,极易引起TA饱和,出现与变压器区外故障相类似的情况,TA饱和程度不一样,产生较大的差电流,引起差动保护误动。另外,励磁涌流从上级变压器一侧传到另一侧,也可能造成变压器暂态饱和,使变压器产生较大的励磁电流,全部流入差动回路,从而在继电器中产生较大的暂态差电流,现场实验也证明了这一点^[13]。实际上如果线路差动保

护两侧TA选型不一致,出现穿越性涌流时,保护也可能误动^[14]。要解决穿越性涌流引起的差动保护误动问题,首先保护厂家要提高保护识别励磁涌流的能力,其次要重视TA选型。对于线路差动保护,TA选型尽可能一致,对于变压器差动保护,严格把TA传变控制在10%误差之内,不仅要考虑稳态误差,还要考虑暂态误差。

9 结束语

本文分析了引起变压器差动保护误动的一些主要原因,包括励磁涌流、和应涌流、外部故障切除恢复性涌流、TA饱和、零序环流等一系列因素导致的变压器保护误动,并根据这些原因提出了相应的解决对策。从分析结果来看,变压器差动保护误动原因有的是二次回路因素,有的是保护原理的原因,也有的是TA暂态饱和问题。但实际上,很多变压器差动保护误动不能只简单的归结为上面的某一种原因,往往误动是由于很多方面的不利因素交织在一起造成的,比如空投某一台变压器时,而同在一条线路上相邻的变压器差动保护发生误动,从前面的分析知道,在这种情况下,和应涌流、穿越性涌流、TA饱和这些不利因素均可能出现,因此只简单把保护误动归结为某一种原因是不妥当的。

目前,变压器差动保护所面临的问题主要还是保护能否可靠闭锁以及TA饱和问题,随着光电互感器的不断发展和推广,TA饱和问题必将能够很好地得以解决,变压器差动保护误动也将得以改善。

参考文献:

- [1] 周玉兰. 1999~2003年全国电网元件保护运行情况[J]. 中国电力, 2005, 38(5): 13-19.
- [2] 苏忠阳, 韩宏跃, 黄明辉. 500 kV北郊变电站变压器差动保护误动原因分析[J]. 广东电力, 2002, 15(2).
- [3] 刘中平, 陆于平, 袁宇波. 变压器外部故障切除后恢复性涌流的研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(8).
- [4] 袁宇波. 自适应数字变压器差动保护原理与方法的研究[D]. 南京: 东南大学电气工程系, 2003.
- [5] 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.
- [6] 吕珍, 岳蔚, 刘沛. 变压器差动保护二次谐波制动判据的仿真研究[J]. 继电器, 2003, 31(6).
- [7] 吴奕. 主变空载合闸涌流造成微机差动保护跳闸的分析[J]. 江苏电机工程, 2004, 23(4): 61-63.
- [8] 邓祥力, 刘世明. 变压器保护两种转角方式的比较[J]. 继电器, 2004, 32(16).
- [9] 王维俭, 候炳蕴. 大机组继电保护理论基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989: 144-155.
- [10] 李德佳, 王维俭, 毕大强. 变压器暂态饱和与和应涌流实例分析[J]. 高压电器, 2005, 41(1): 12-15.

- [4] KALYUZHNY A, KUSHNIR G. Analysis of Current Unbalance in Transmission Systems With Short Lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2): 1040-1048.
- [5] 徐建国. 对国外超高压同塔多回送电线路技术的调研分析[J]. 电力建设, 2001, 22(7): 15-18.
- [6] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护实用技术问答[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2004: 142-152.
- [7] 曾耿晖, 黄明辉, 刘之尧, 等. 同杆线路纵联零序保护误动分析及措施[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(20): 103-107.

作者简介:

孙文华(1965), 男, 江苏江都人, 高级工程师, 研究方向为电能质量在线监测、安全管理及继电保护等;

袁宇波(1975), 男, 江苏丹阳人, 高级工程师, 从事电力系统继电保护试验和研究工作;

黄浩声(1979), 男, 浙江温岭人, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护、直流控保系统等。

Analysis on Protection Actions of Zero-sequence Direction Relay for Double-parallel Lines with Different Voltage Level

SUN Wenhua¹, YUAN Yubo², HUANG Haosheng²

(1. Changzhou Power Supply Company, Changzhou 213003, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: This paper analyzes the process of zero-sequence direction relay mal-operation of a double parallel 500 kV and 220kV lines after a fault occurred at the end of the 500 kV line. The mechanism is studied, which shows that the mal-operation is caused by the zero-sequence mutual inductance between multi-transmission lines. In the case of grounding fault occurred at one of parallel line, the existence of zero-sequence mutual inductance would activate the zero-sequence direction relay of the other line. The conclusion of this paper will provide a valuable reference for similar faults analysis.

Key words: different voltage level, double-circuit parallel transmission line, zero-sequence mutual inductance, zero-sequence direction relay

(上接第 11 页)

- [11] 孙恭南, 唐伟, 叶菁. 防止和应涌流误动的方案讨论[J]. 电力系统装备, 2004(5): 70-71.
- [12] 王怀智, 孙显初, 常林. 和应涌流对变压器差动保护影响的试验研究[J]. 继电器, 2001, 29(7): 52-54.
- [13] 周云波, 曹良. 一起主变压器差动保护误动事故及防治对策[J]. 电网技术, 2001, 25(12).
- [14] 李磊, 马杰, 张玮, 等. L90 光纤差动保护误动原因分析[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(4): 97-99.

作者简介:

袁宇波(1975), 男, 江苏丹阳人, 高级工程师, 长期从事继电保护试验和研究工作;

李鹏(1982), 男, 陕西周至人, 博士, 研究方向为电力系统继电保护、直流控保技术等;

黄浩声(1979), 男, 浙江温岭人, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护、直流控保系统等。

Review on Analysis and Strategy for Transformer Differential Protection Malfunction

YUAN Yubo, LI Peng, HUANG Haosheng

(Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: The reasons of some typical transformer differential protection malfunction, such as excitation inrush current of transformer no-load closing, sympathetic inrush of energized transformer, restorative inrush caused by external fault cleared, TA transient saturation, partial transient saturation, and assistant of zero-sequence circulation current are theoretically and practically reviewed in this paper. Based on the analysis, some strategies are proposed to avoid these malfunctions. Understanding these problems correctly is helpful in developing, designing, debugging and operating protection device, which will improve the accuracy of transformer protection during field operation.

Key words: transformer differential protection, excitation inrush current, sympathetic inrush, zero-sequence circulation current

欢迎投稿 欢迎订阅