

# 变压器复杂电磁暂态下涌流特征 及其对差动保护影响分析

李舟<sup>1</sup>, 何安阳<sup>2</sup>, 王辉<sup>1</sup>, 师琛<sup>1</sup>, 谈震<sup>1</sup>, 王琨<sup>1</sup>, 李宗博<sup>2</sup>, 焦在滨<sup>2</sup>

(1. 国网陕西省电力公司西安供电公司 陕西 西安 710032;

2. 西安交通大学电气工程学院 陕西 西安 710049)

**摘要:**近年来变压器差动保护误动拒动现象时有发生,现场数据表明差动保护事故多发生于比典型空载合闸复杂的场景。针对以上问题,基于电磁暂态仿真计算,研究了电力变压器在剩磁、直流偏磁、CT饱和以及复杂谐波等工况下的励磁涌流特性,深入分析了复杂电磁暂态环境下主保护的動作性能,并针对变压器保护的拒动和误动问题,提出了切实可行的措施,以提高复杂电磁暂态工况下变压器主保护的性能力,减少不正确动作的发生,保证电力系统的安全运行。

**关键词:**差动保护;剩磁;直流偏磁;CT饱和;复杂谐波

中图分类号:TM774 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2020)04-0009-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.04.003

## Analysis on Characteristics of Inrush Current in Complex Electromagnetic Transient of Transformer and Its Influence on Differential Protection

Li Zhou<sup>1</sup>, He Anyang<sup>2</sup>, Wang Hui<sup>1</sup>, Shi Chen<sup>1</sup>, Tan Zhen<sup>1</sup>, Wang Kun<sup>1</sup>, Li Zongbo<sup>2</sup>, Jiao Zaibin<sup>2</sup>

(1. State Grid Xi'an Electric Power Supply Company, Xi'an 710032, Shaanxi, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

**Abstract:** The maloperation and refuse operation of transformer differential protection often occur in recent years. The field data show that the fault of differential protection often occurs in the situation which is more complex than the typical no-load energizing of transformer. It is necessary to study the action of transformer differential protection in the complex electromagnetic transient environment. Aiming at those problems, the mechanism and characteristics of inrush current in the case of remanence, DC bias and CT saturation of transformer are studied, the causes of maloperation and refuse operation of differential protection in the above cases are analyzed, the factors leading to maloperation and refuse operation of transformer are summarized, and the corresponding measures to improve the correct operation rate of differential protection in complex electromagnetic transient are put forward in order to guarantee the safe operation of power system.

**Key words:** differential protection; remanence; DC bias; CT saturation; complex harmonic

## 0 引言

随着高压直流输电、新能源、电动汽车等以电力电子设备为接口的电源和负荷的大量涌现,现代电力系统表现出越来越明显的电力电子化特征。在系统故障的暂态过程中,电源和负荷非线性导致故障波形畸变越来越严重,非整数次谐波、衰减直流分量等现象越来越明显。同时,受高压直流输电运行方式、地磁暴以及高空电磁脉冲等因素的影响,变压器

的直流偏磁现象也越来越多地在实际运行中出现,若再考虑到变压器剩磁工况及CT饱和等问题,现代电力系统中的变压器经常处于复杂的电磁暂态工况之中,其主保护的性能力越来越受到人们的关注和重视。目前的电力变压器的主保护是电流差动保护,为保证在空载合闸等工况下保护的可靠性,配置了以二次谐波制动/闭锁为代表的励磁涌流识别判据。有关电力变压器差动保护运行情况的统计数据表明,差动保护的正确动作率一直较低,远落后于线路保护,在复杂电磁暂态过程中出现了大量的不明

原因的不正确动作。据文献报道,近年来出现的多起变压器差动保护不正确动作情况,严重地影响了电力系统的安全运行。文献[1]报道了浙江某抽水蓄能电站主变压器因二次谐波定值设置不适应实际运行复杂电磁暂态工况导致误动的案例。文献[2]报道了江苏常州三井变电站主变压器正常运行时差动保护误动事故,事故分析表明主变压器110 kV回路上某发电厂变压器空投产生穿越性涌流,穿越性涌流的直流特性引发和应涌流现象导致主变压器误动。文献[3]报道了东北铁岭清河变电站三次误动事故,事故均发生在附近炼钢厂炼钢炉投入使用时,电力电子设备造成的谐波污染是保护不正确动作的主要原因。文献[4]报道了云南某电厂主变压器在外部某相接地故障时零差保护误动事故,事故分析表明其CT性能参数与设计要求的CT饱和,而在谐波、频繁操作、偏磁以及存在衰减直流分量等情况下CT更容易发生饱和。可见,在复杂的电磁暂态情况下,以励磁涌流理论特性为依据的识别判据的性能遇到了巨大的挑战,进而导致闭锁失败从而引发保护的拒动,或者由于误闭锁导致内部故障切除时间延长,威胁设备及系统的运行安全。因此,有必要研究复杂电磁暂态下涌流机理和特征,分析变压器差动保护异常动作的原因,并提出针对性的解决方案。

根据对电力电子化电力系统故障暂态过程的分析可知,复杂电磁暂态过程对变压器保护的影响主要体现在铁芯严重剩磁、直流偏磁、非线性负荷投入引发的谐波环境以及复杂工况导致的CT饱和。下面在分析了变压器剩磁、偏磁工况、复杂谐波环境以及CT饱和等因素对励磁涌流特性影响的基础上,基于PSCAD电磁暂态仿真,系统地分析研究了在以上复杂电磁暂态工况下的变压器差动保护,特别是励磁涌流识别判据不正确动作的原因,并从现场实际出发,提出了切实可行的提高变压器保护性能的措施,旨在推进复杂电磁暂态下变压器差动保护动作正确率的提升。

## 1 剩磁

变压器在进行直流电阻测量、空载试验、电压比测量和断路器分闸等操作后<sup>[5]</sup>,由于铁芯铁磁材料

的磁滞效应,铁芯中会留有残留磁通,称为剩磁。剩磁产生后,如果不采取特定的消磁手段,不会自动消失。变压器空载合闸时,如果铁芯中存在剩磁,将加剧铁芯饱和程度,产生很大的励磁涌流。设加载在变压器上的电压为  $u = U_m \sin(\omega t + \alpha)$ ,电压和磁通关系满足  $u = N \frac{d\Phi}{dt}$ ,求解可得变压器磁通为

$$\begin{aligned} \Phi(t) &= -\frac{U_m}{N\omega} \cos(\omega t + \theta) + \Phi' \\ &= -\Phi_m \cos(\omega t + \theta) + \Phi' e^{-\frac{t}{\tau}} \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $-\Phi_m \cos(\omega t + \theta)$  为铁芯磁通稳态分量;  $\Phi'$  为铁芯磁通暂态分量。

考虑到铁芯磁通不能突变,将  $t = 0$ ,  $\Phi(t) = \Phi_{rem}$  代入式(1)可求得

$$\Phi' = \Phi_m \cos \theta + \Phi_{rem} \quad (2)$$

式中,  $\Phi_{rem}$  为变压器铁芯剩磁。式(2)表明存在剩磁时,在铁芯剩磁和励磁磁通同向的半个周期内,变压器铁芯更快更容易进入饱和;且剩磁越大,铁芯饱和程度越大,饱和时间越长,励磁涌流越严重。

为进一步探究剩磁对差动电流特征及差动保护的影响,基于PSCAD电磁暂态仿真软件搭建了变压器运行模型。其中变压器为3台230/11 kV-120 MVA的单相变压器连接组成的三相双绕组变压器组,采用Y/Δ-11方式连接。每台变压器铁耗标么值为0.07 pu,铜耗标么值为0.005 pu,漏抗标么值为0.1 pu;采样频率为10 kHz。二次谐波制动采用15%的整定值。下面若无特殊说明则仿真采用相同参数配置。图1给出变压器合闸角60°,在具有不同程度剩磁时空载合闸的差动电流初始基波有效值和初始二次谐波占比。由图可知随剩磁程度增大,差动电流基波有效值增加,励磁涌流越严重。但随着励磁涌流程度增加,差动电流间断角减小,当间断角减小到一定程度时,二次谐波占比将开始下降,因此图中差动电流初始二次谐波占比呈现先增后降的趋势。可见存在剩磁时基于差动电流二次谐波含量的差动保护将无法有效识别励磁涌流,可能造成差动保护错误动作。

由式(2)知合闸角接近0°时,励磁涌流最严重,此时若存在剩磁,差动电流二次谐波占比将进一步下降。图2、图3具体给出了合闸角0°且存在80%剩磁时,变压器空载合闸的差动电流仿真波形和对应的二次谐波占比。由图可以看出,差动电流存在

严重励磁涌流, 间断角明显减小, 二次谐波含量低于15%的整定值, 差动保护发生误动。

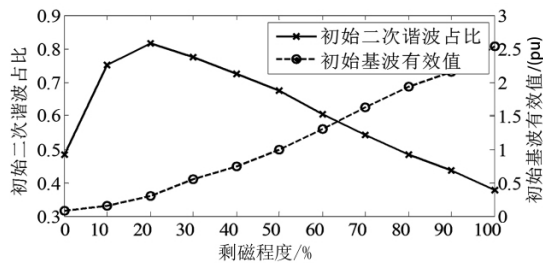


图1 不同剩磁条件下空载合闸时差动电流基波有效值及其二次谐波占比

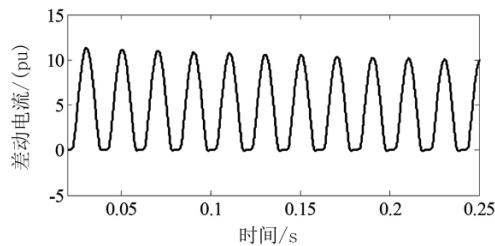


图2 严重剩磁条件下空载合闸时差动电流

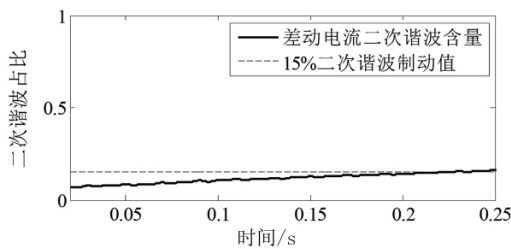


图3 严重剩磁条件下空载合闸时差动电流二次谐波占比

## 2 直流偏磁

直流偏磁是指变压器绕组中出现直流电流, 从而使变压器工作在非正常状态的现象。太阳表面活动旺盛产生太阳磁暴时, 会在地球表面形成地磁感应电流, 并通过变压器中性点注入变压器形成直流偏磁<sup>[5]</sup>。随着直流输电系统的发展, 直流偏磁的影响更加明显。当直流输电系统采用单极大地运行方式, 或采用双极大地运行方式但一极出现故障或停运检修时, 直流电流将通过接地极注入大地, 并在大地中形成明显的直流电位差。对于接地极附近的中性点接地变压器, 在不同的直流电位差作用下, 将有较大的直流电流通过中性点注入变压器, 产生直流偏磁现象。

变压器中性点注入直流电流后, 变压器磁通  $\Phi(t)$  可由式(3)描述。

$$\Phi(t) = \Phi(t) + \Phi_{DC} \quad (3)$$

式中:  $\Phi(t)$  为无直流偏磁时变压器磁通;  $\Phi_{DC}$  为直流偏磁导致的直流磁通。直流磁通的存在使变压器铁芯工作点偏移, 铁芯饱和, 产生和铁芯存在剩磁时类似的结果, 使变压器出现明显的涌流。此外相比合闸后会逐渐衰减的剩磁, 直流偏磁可能存在较长时间, 一方面导致变压器损耗增加、温度升高、振动加剧, 威胁变压器安全及寿命; 另一方面使变压器电流发生畸变, 导致变压器保护的不正确动作。

图4给出了存在直流偏磁时的变压器差动电流仿真波形。由图可见, 直流偏磁导致变压器差动电流逐渐出现偏向时间轴一侧涌流。相比空载合闸时衰减的励磁涌流, 由于直流电流一直没有消除, 直流磁通积累, 涌流逐渐增大直至稳定。图5给出了由正常运行的变压器中性点注入不同程度直流电流, 涌流稳定后, 二次谐波含量。变压器两侧额定电流为0.30 kA/6.30 kA。随着注入直流电流增大, 直流偏磁越严重, 差动电流二次谐波含量越高。由图可知注入高压侧额定电流3%的直流电流时, 变压器差动电流已出现明显的涌流并含有大量二次谐波, 对基于二次谐波制动的差动保护造成严重影响。

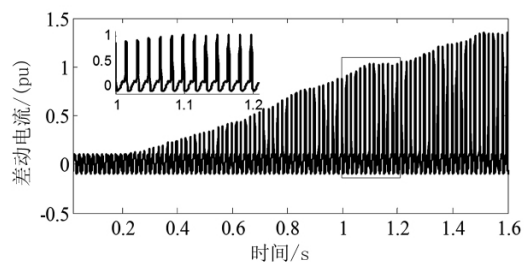


图4 直流偏磁时差动电流

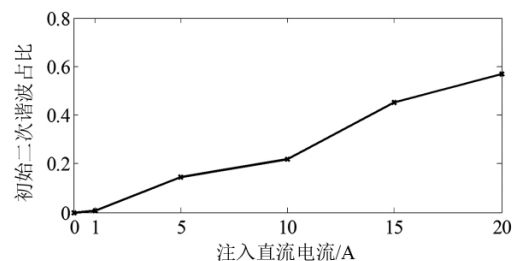


图5 不同直流偏磁程度时差动电流二次谐波占比

图6、图7具体给出了存在直流偏磁且发生内部故障后的故障相差动电流波形及二次谐波占比。由图可见, 由于直流偏磁导致变压器饱和, 差动电流二次谐波占比明显增加, 差动保护无法快速动作切除故障。

此外, 需要特别说明的是, 对于多个变压器存在耦合的情况, 复杂电磁暂态过程可能导致并联或串联的和应涌流现象, 其本质与直流偏磁的工况具有

高度的相似性。因此对于变压器保护而言,直流偏磁的分析可以描述复杂电磁暂态过程中变压器发生和应涌流的工况。

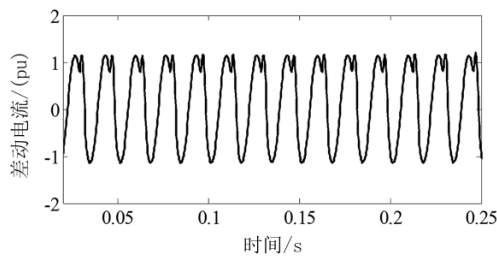


图6 直流偏磁且内部故障时差动电流

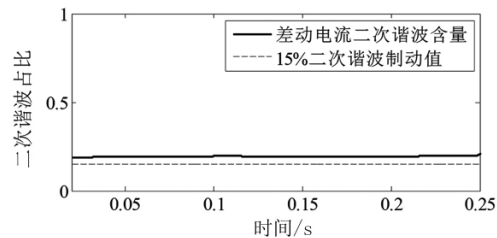


图7 直流偏磁且内部故障时差动电流二次谐波占比

### 3 系统谐波环境

随着电力系统的发展,其规模不断增大、结构日益复杂,大量非线性元件及负荷投入使用,使变压器的工作环境也更加复杂。典型的电力系统非线性元件及负荷包括铁磁饱和型、电子开关型、电弧型三类。铁磁饱和型指变压器、电抗器等铁磁设备,其具有非线性的磁化特性。电子开关型主要包括交直流系统中整流器、逆变器、换流设备以及基于晶闸管可控开关、变频器等电力电子设备。电弧型主要指工业电弧炉、电焊机等设备,这些设备使用时具有高度波动性、不对称性等非线性特征。此外近年来快速发展的新能源发电及储能也具有明显的非线性特征,可能导致系统谐波含量增加。非线性的元件或负荷具有非线性伏安特性,当其接入电力系统后,导致电力系统的正弦波形畸变,谐波含量增加,电能质量下降。以图8简化的铁磁型非线性元件伏安特性为例,给元件施加工频正弦电压后将产生非正弦的电流,给电力系统注入高次谐波。

电力系统谐波含量的增加一方面将增大系统损耗,导致系统谐振,缩短变压器、发电机等电力设备的使用寿命,威胁电力系统的安全稳定运行;另一方面当系统谐波含量增大时,基于变压器两侧电流计算的差动电流中将注入一定的谐波,对基于谐波制动的变压器闭锁方式产生不良影响。

图9给出了电力系统中存在大量谐波的环境下,变压器发生不同程度内部故障时故障相差动电流二次谐波初始值。由图可知,内部故障越严重差动电流受系统谐波影响越轻。严重内部故障时差动保护能够正确动作,但对于轻微内部故障,系统谐波将导致保护长期误闭锁使故障程度恶化,进而对电力系统安全性与稳定性造成严重影响。图10、图11

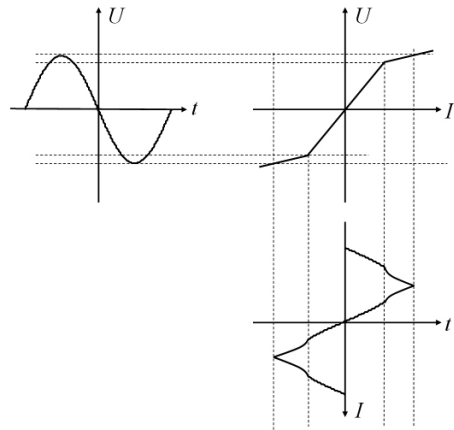


图8 铁磁型非线性元件伏安特性

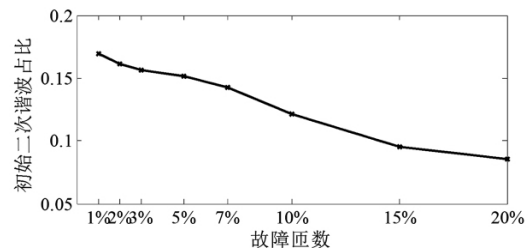


图9 电力系统存在谐波且发生不同内部故障时差动电流二次谐波占比

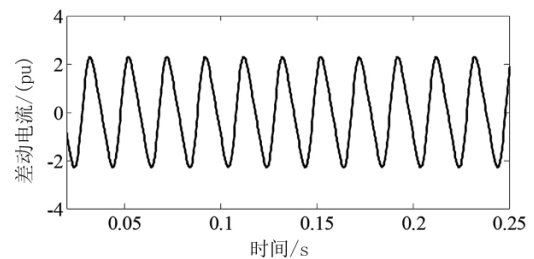


图10 电力系统存在谐波且5%内部故障时差动电流

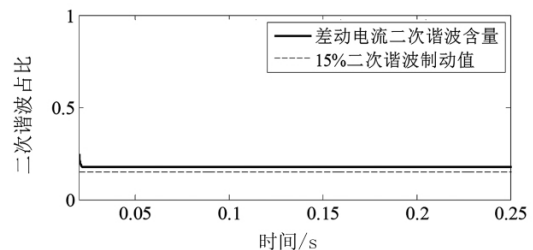


图11 电力系统存在谐波且5%内部故障时差动电流二次谐波占比

具体给出电力系统中存在大量谐波且变压器发生5%匝间短路时的差动电流及其二次谐波占比。系统谐波导致差动电流含有大于15%整定值的二次谐波时,差动保护无法快速动作切除故障。

### 4 CT饱和

变压器差动保护装置需要通过电流互感器CT测量一次侧的电流信息。但由于CT也是基于电磁感应定律的传变元件,其非线性特性导致CT存在饱和的可能性。当系统发生故障时,流经CT的电流可能高达额定电流的数倍甚至数十倍,且含有衰减的直流分量,从而导致CT饱和。文献[7]指出,多次重合闸可能导致CT中含有较高剩磁,实际变压器空载合闸时,为确保设备无故障会进行多次合闸,也可能导致CT剩磁含量较高从而发生饱和。CT饱和后,CT二次侧电流将发生畸变,无法准确地反映一次侧信息。

考虑CT传变时,变压器差动电流可表示为

$$i_d = i_1' + i_2' = i_1 + i_2 - (i_{\mu 1} + i_{\mu 2}) \quad (4)$$

式中:  $i_1'$ 、 $i_2'$  分别为变压器原、副边CT二次侧电流;  $i_{\mu 1}$ 、 $i_{\mu 2}$  为CT励磁支路电流;  $i_1$ 、 $i_2$  为CT一次侧电流。可见CT饱和后,由CT二次侧计算的差动电流将具有不同的特征。传统的差动保护原理未考虑CT饱和后差动电流的特征,在CT饱和后可能异常动作。

图12给出了变压器空载合闸时的差动电流仿真波形,由图可以看出CT饱和后,差动电流波形畸变,相比未饱和时的单侧涌流,出现了偏向时间轴两侧的对称性涌流。尽管在该例中差动电流二次谐波没有明显下降,但间断角显著减小,对称性发生变化,差动保护可能误动。

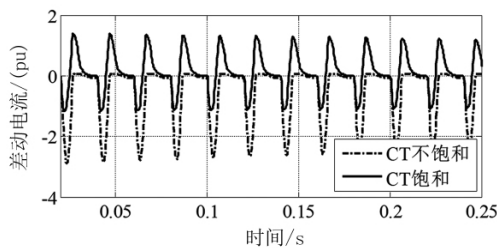


图12 变压器空载合闸且CT饱和时差动电流

图13给出了变压器发生5%内部故障、CT发生不同程度饱和时故障相差动电流二次谐波初始含量。由于CT未饱和时其励磁电流趋近于0,当CT

饱和后会产生峰值较高的涌流,因此图13选择CT励磁电流峰值反映CT饱和程度。由图可见随着CT饱和程度增大,由CT二次侧电流计算的差动电流二次谐波增加,可能导致保护误闭锁。图14、图15具体给出了变压器差动电流仿真波形和CT饱和时差动电流对应的二次谐波占比。由图可以看出,CT饱和时差动电流发生畸变,导致保护启动后差动电流二次谐波含量大于15%的整定值而保护闭锁,无法快速切除内部故障,威胁到电力系统的安全运行。

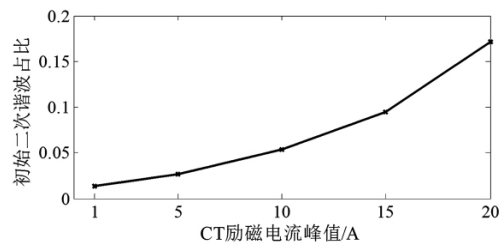


图13 变压器5%内部故障CT不同程度饱和时差动电流二次谐波占比

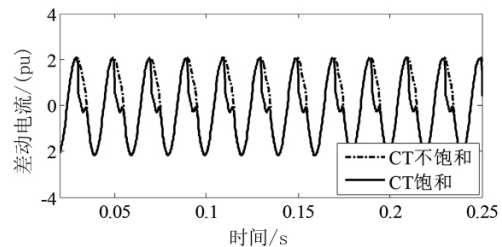


图14 变压器内部故障且CT饱和时差动电流

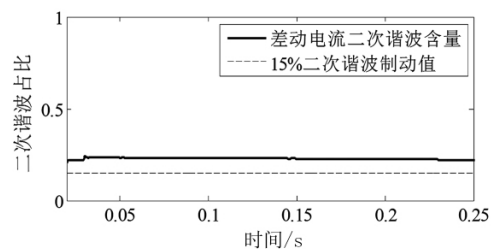


图15 变压器内部故障且CT饱和时差动电流二次谐波占比

### 5 针对性措施

以上理论分析和仿真结果说明剩磁、直流偏磁、CT饱和等情况将会导致变压器差动保护的异常动作,影响电力系统的安全运行。因此对于可能发生以上情况的变压器,需要采取针对性的措施。

1) 针对变压器直流电阻实验后可能存在较大

剩磁时,可以采用直流交变衰减电流法或交流衰减电流法等对变压器绕组施加极性交替变化的衰减电流,使铁芯磁滞回线轨迹逐渐收缩,从而将铁芯剩磁降至较低水平。

2) 针对直流偏磁,一方面在直流输电系统规划设计时,需要合理选取接地极,减小对周边设备的影响;另一方面可以通过变压器中性点串联电阻、串联电容以减小流入变压器的直流电流,也可以设置动态电压源,通过中性点检测并注入反向电流以抵消直流偏磁电流。

3) 针对电力系统谐波,一方面应研究先进的控制技术改善谐波源特性,减少非线性元件谐波的产生,如采用多相整流技术、有源功率因数校正技术等;另一方面可安装专门的谐波治理设备,在谐波检测分析的基础上,采用无源滤波器或有源电力滤波器等,对注入系统的谐波进行抑制和消除。

4) 针对CT饱和,在选择CT时应综合保护安装处可能出现的最大短路电流、CT负载能力及饱和倍数,选择型号、特性及变比合适的CT,以减小CT饱和的可能性;同时有必要针对CT饱和时差动电流特点,研究和采用抗CT饱和的差动保护原理,一些厂家的变压器保护设备已经开始采用时差法或附加制动法<sup>[8]</sup>来识别CT饱和,并在区外故障且CT饱和后闭锁差动保护。

此外,从变压器保护技术的角度,可以在构造保护判据时引入电压量,从而通过励磁支路特性反应变压器铁芯饱和的状态,避免二次谐波闭锁等仅采用电流波形特性的识别判据不正确动作,提升保护的正确动作率。

## 6 结 论

针对传统变压器差动保护在复杂电磁暂态下误动、拒动的问题,分析了变压器存在剩磁、直流偏磁及CT饱和时变压器差动电流涌流的产生机理及特征,并通过PSCAD电磁暂态仿真研究了以上情况下差动保护不正确动作的原因。研究表明:

1) 变压器铁芯剩磁越大,空载合闸时励磁涌流越严重。当励磁涌流饱和时间超过半个工频周期时,其二次谐波含量将减小,可能导致差动保护误动。

2) 变压器存在直流偏磁且发生内部故障时,变压器铁芯因偏磁电流饱和,差动电流出现涌流特征。随着注入变压器直流电流增大,因直流偏磁导致的差动电流二次谐波含量增大,差动保护无法快速动作。

3) 电力系统由于非线性元件及负荷存在大量谐波时,由变压器两侧电流计算得到的变压器差动电流谐波含量也会上升。变压器轻微内部故障时差动电流二次谐波含量受系统谐波影响较大,差动保护无法快速动作,可能发展为更严重故障。

4) 变压器各侧CT饱和时,由CT二次侧电流计算的差动电流波形畸变,空载合闸时可能出现对称性涌流,导致差动保护误动;发生内部故障时,差动电流二次谐波含量增大,差动保护可能拒动。

以上因素都可能导致变压器差动保护的异常动作,有必要采取对应措施以提高变压器差动保护正确动作率。

### 参考文献

- [1] 王立大,段周朝. 变压器励磁涌流引起保护误动分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 138-140.
- [2] 周云波,曹良. 一起主变压器差动保护误动事故及防止对策[J]. 电网技术, 2001, 25(12): 71-74.
- [3] 翁汉翔,林湘宁. 变压器差动保护误动的复杂电磁暂态分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 65-71.
- [4] 宋忧乐. CT饱和引起保护误动故障分析[J]. 云南电力技术, 2015, 43(2): 30-31.
- [5] 李景丽,贺鹏威,邱再森,等. 电力变压器铁心剩磁测量方法研究综述[J]. 高压电器, 2018, 54(7): 98-105.
- [6] 董霞. 变压器直流偏磁研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [7] 郝后堂,史泽兵,江卫良. 重合于故障时TA饱和对差动保护的影响及对策[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 167-170.
- [8] 林湘宁,刘沛,高艳. 基于数学形态学的电流互感器饱和和识别判据[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 46-50.

作者简介:

李舟(1984),博士,高级工程师,研究方向为电力系统继电保护;

何安阳(1997),硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护;

师琛(1988),硕士,工程师,研究方向为电力系统继电保护。

(收稿日期: 2020-03-20)