

基于基波幅值增量的变压器和应涌流识别方法

邵德军, 尹项根, 张哲, 陈德树, 金明亮

(电力安全与高效湖北省重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074)

Method to Identify Transformer Sympathetic Inrush Based on the Fundamental Component Increment

SHAO De-jun, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, CHEN De-shu, JIN Ming-liang

(Electric Power Security and High Efficiency Lab (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: The analysis of some field mal-operation cases indicates that mal-operations of the transformer differential protection caused by sympathetic inrush usually occur under the combined action of sympathetic inrush and current transformer (CT) saturation. The process and characteristics of the mal-operation caused by sympathetic inrush are analyzed. According to the wave characteristics of sympathetic inrush that firstly increases to maximum gradually and then decays slowly, a new sympathetic inrush identification method is proposed, based on the calculation of the fundamental component increment of transformer differential current. The new method can identify sympathetic inrush quickly and reliably and adopt effective measures accordingly before sympathetic inrush makes CT saturated. The simulation and dynamic simulation experiment verifies the validity and feasibility of the method.

KEY WORDS: transformer differential protection; current transformer (CT) saturation; sympathetic inrush; magnetizing inrush; second harmonic restraint

摘要: 在分析多起和应涌流引起变压器差动保护误动的现场实例的基础上, 指出和应涌流引起差动保护误动一般是在和应涌流和电流互感器(current transformer, CT)暂态饱和的综合作用下发生的, 并进一步分析了和应涌流引起差动保护误动的过程和特点。利用和应涌流先逐渐增大后缓慢衰减的波形特征, 提出了基于判断差动电流基波幅值变化过程的和应涌流识别新方法。所提方法充分考虑了和应涌流的波形特征和误动原因, 能在和应涌流引起 CT 暂态饱和之前快速可靠地对其加以识别, 并采取有效闭锁措施来防止差动保护误动。仿真和动模试验验证了该方法的有效性和可行性。

关键词: 变压器差动保护; 电流互感器饱和; 和应涌流; 励磁涌流; 二次谐波制动

0 引言

近年来, 国内发生了多起空投变压器导致相邻变压器或发电机差动保护以及相关后备保护误动的事故^[1-6], 该现象与变压器和应涌流有关。目前, 和应涌流以其产生的隐蔽性、复杂性、危害性而逐渐成为变压器保护研究的热点问题之一。

在研究和应涌流产生机制方面, 文献[7-10]通过对变压器回路方程的推导, 从磁链变化量的角度分析和应涌流的产生机制和影响因素; 文献[11]采用简化模型推导了变压器磁链的数学表达形式来分析和应涌流的产生机制和影响因素。在研究和应涌流对继电保护的影响方面, 文献[12]分析和应涌流对变压器差动保护和其他后备保护的影响; 文献[13]的动模试验数据分析结果表明, 和应涌流本身的二次谐波含量较高, 二次谐波制动方法理论上是有效的; 文献[10,14]分析说明了和应涌流中衰减缓慢的非周期分量容易引起电流互感器(current transformer, CT)局部暂态饱和才是导致差动保护误动的真正原因; 文献[4]通过对现场误动实例的分析, 说明了现有的 CT 饱和判据并不能有效防止和应涌流引起的差动保护误动。

目前, 变压器差动保护仍然没有专门针对和应涌流的有效识别判据, 而是笼统地采用传统的励磁涌流识别方法来识别和应涌流, 但由于它们的波形特点有所区别, 特别是在实际运行中受 CT 饱和的影响, 可能使得励磁涌流识别判据失效而引起差动保护误动^[4]。本文分析和应涌流引起变压器差动

基金项目: 国家自然科学基金项目(50877031)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50877031).

保护误动的原因和特点,并根据和应涌流的波形特征,提出了一种通过判断差动电流的基波幅值变化过程的和应涌流识别方法,该方法计算简单,能快速可靠地识别和应涌流并采取相应闭锁措施,仿真和动模试验验证了该方法的有效性和可行性。

1 和应涌流的特点分析

变压器空载合闸时产生励磁涌流(为了与和应涌流区别,文中称其为空投涌流),同时与之相连的运行变压器可能发生饱和而产生和应涌流。和应涌流、空投涌流具有以下关系和特点^[10]:

1) 和应涌流的产生分为暂态增大阶段和稳定衰减阶段,其峰值先增大,然后缓慢衰减,同时和应作用使空投涌流衰减变得缓慢,持续时间增长。

2) 运行变压器和空投变压器的磁链在各自衰减直流分量的作用下周期性地交替进入饱和,因此和应涌流与空投涌流偏向于不同时间轴侧且交替出现。

3) 影响和应涌流的因素包括系统侧阻抗、变压器剩磁与合闸角、运行变压器负荷,这些因素影响着和应涌流的大小和出现时间。

2 和应涌流引起差动保护误动的原因分析

和应涌流与空投涌流的产生机制相同,均是由于空载合闸的暂态过程导致变压器铁心饱和而产生的,因此两者的波形特征大致相同,存在明显的间断角,区别仅在于和应涌流的衰减速度变得缓慢而已。另外,当运行变压器产生和应涌流时,其铁心饱和程度是逐渐加深的,且饱和程度要明显低于空投变压器,相应地,和应涌流波形的间断角要大于空投涌流,其涌流波形特征也更加明显。

仿真和动模试验结果分析表明^[9,13],和应涌流本身的二次谐波含量也较高,二次谐波制动方法应该可以有效制动差动保护,但事实上,和应涌流引起了多起差动保护误动事故。下文根据文献中的几起典型现场误动实例,分析和应涌流引起变压器差动保护误动的原因。

误动实例 1^[1,4]:某发电厂 2 台变压器的接线如图 1(a)所示,电锅炉变压器 T_2 空投时引起运行的辅助变压器 T_1 的差动保护误动,波形记录分析发现, T_2 空投后约 20 周波时 T_1 低压侧的三相 CT 出现不同程度的饱和,使得变压器 T_1 的差流逐渐趋于对称,其二次谐波比下降,空投后约 30 周波时差动保护动作跳闸。

误动实例 2^[2]:某发电厂 2 台变压器的接线如图 1(b)所示,变压器 T_2 空投时,引起带负荷运行变压器 T_1 的差动保护误动,波形记录显示变压器 T_1 的差动保护误动发生在 T_2 空投后约 50 周波。

误动实例 3^[3-4]:某发电厂主接线如图 1(c)所示,主变 T_2 和 T_4 中性点接地,其他为不接地方式, T_2 连接的发电机检修完工未开机,其他发电机和变压器正常运行。当 T_2 空投时,合闸后约 13 个周波时主变 T_4 的差动保护动作,其他变压器的差动保护均未动作。波形记录分析发现 T_4 的 110 kV 侧 CT 出现一定程度的饱和,使得差流较大且接近于正弦波,引起差动保护误动。

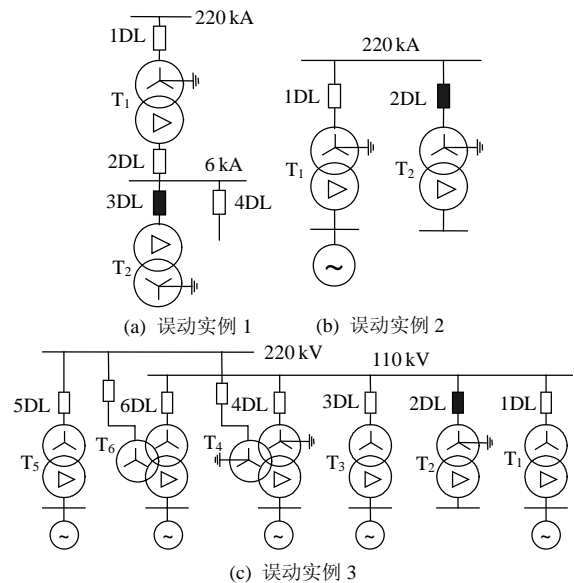
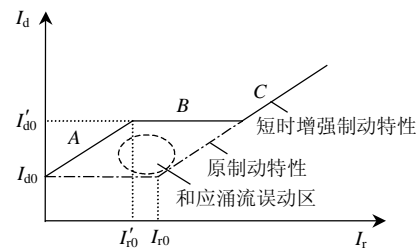


图 1 和应涌流现场误动实例的主接线图

Fig. 1 Connection figure of mal-operation accidents

由上述 3 次误动实例的分析可以得出结论:

1) 现场误动的都是二次谐波制动的比率差动保护,且误动均发生在空投较长时间之后,此时差流的二次谐波比很低,保护误动发生在比率制动特性的第 1 个拐点附近的动作区,如图 2 所示。其原因是,和应涌流含有衰减缓慢的非周期分量,长时



虚线为原比率制动特性;实线为短时增强制动特性。

图 2 变压器差动保护短时增强制动特性

Fig. 2 Enhanced restraint characteristics of transformer differential protection

间作用下容易引起 CT 暂态饱和而可能导致差流二次谐波比降低，因此在和应涌流出现后一段时间内二次谐波制动方法可以有效闭锁差动保护，误动一般发生在 CT 暂态饱和之后。

2) 空投变压器的差动保护并未发生误动作。空投涌流的最大值大于和应涌流的最大值，且同样衰减缓慢，更容易引起 CT 暂态饱和，但并未引起空投变压器的保护误动。其原因在于，空投变压器的合闸侧电流实际上就是空投涌流，并未叠加负荷电流，波形具有较明显的间断角，长期作用于 CT 时，也可能导致 CT 暂态饱和，处于饱和的 CT 将会使得涌流更多地从 CT 励磁支路通过，该 CT 二次侧的电流将是间断角更大的波形，其二次谐波比也较大，能有效闭锁差动保护^[15]。

3) 和应涌流引起变压器差动保护误动存在一定的随机性，与变压器中性点接线方式、变压器励磁特性、CT 传变特性等因素有关。从误动实例 3 可以看到，并联运行的 5 台变压器中只有 1 台变压器发生误动。

上述分析表明，运行变压器差动保护误动一般是在和应涌流和 CT 暂态饱和的综合作用下发生的，在和应涌流出现后一段时间内二次谐波制动方法可以有效闭锁差动保护，引起差动保护误动的真正原因是衰减缓慢的非周期分量引起 CT 暂态饱和而导致差流的二次谐波比降低。下文以图 3 所示的并联和应涌流情况为例，分析和应涌流引起 CT 饱和的过程。

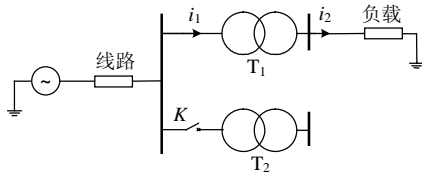


图 3 并联和应涌流模型示意图

Fig. 3 Circuit of tow transformers in parallel

变压器 T₁ 带负荷正常运行时，两侧 CT 正常工作在其励磁特性的线性区，CT 能正确传变。当变压器 T₂ 空投时，引起 T₁ 励磁支路饱和，产生的和应涌流 i_{μ} 波形如图 4(a) 所示，其波形特征与空投涌流相似，有明显的间断角。与空投情况不同的是：在一次系统中，变压器 T₁ 与 T₂ 相邻侧电流 i_1 是和应涌流和负荷电流的叠加(下文中简称叠加电流)；而另一侧电流 i_2 近似为负荷电流，差流等于和应涌流 i_{μ} 。当和应涌流与负荷电流的幅值可比时，叠加电流 i_1 将不存在明显间断，只是波形上发生一定的畸变，如图 4(b) 所示。因为和应涌流的存在，叠加

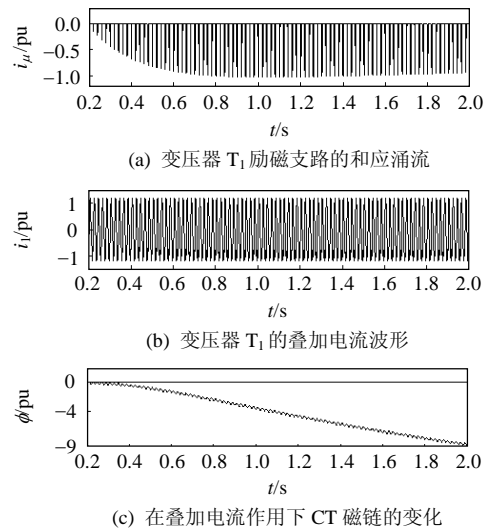


图 4 CT 对叠加电流的传变

Fig. 4 CT's transfer characteristic for primary current

电流含有先逐渐增大后衰减缓慢的非周期分量，如果 CT 的剩磁系数较大，此非周期分量的长期作用会给 CT 造成较大的偏磁积累。如图 4(c) 所示，虽然叠加电流的负荷分量具有去磁作用，但每周期内叠加电流都使得 CT 产生一定的负向偏磁，即使在和应涌流的稳态衰减阶段(约 $t=1$ s 后)，负向偏磁依然逐渐增大，一段时间后很可能导致偏磁达到 CT 的饱和点而发生暂态饱和^[16-17]。

当叠加电流经过一段时间引起 CT 暂态饱和后，其非周期分量已经衰减到较小，而且由于负荷电流具有反向去磁作用，所以叠加电流不可能进一步使 CT 深度饱和，而是工作范围在其励磁特性的饱和点附近区域，CT 处于轻度饱和状态^[17]。在这种状态下，CT 的动态励磁电感相对减小且在小范围内动态变化，因此 CT 的励磁电流增大，造成 CT 两侧电流呈现一定的相位误差和幅值误差，但其二次电流波形并不会出现严重畸变^[18]。此时，运行变压器 T₁ 的差动电流等于其励磁电流(即和应涌流)与饱和 CT 的励磁电流的叠加，这种差流的特性表现出较大的随机性，很有可能出现差流较大且二次谐波比较小的情况，从而引起差动保护误动作。

对于级联和应涌流情况，运行变压器系统侧电流的非周期分量衰减很快，不会引起 CT 饱和，而与空投变压器相邻侧的电流为空投涌流和负荷电流的叠加，此叠加电流同样含有衰减缓慢的非周期分量而容易引起 CT 暂态饱和，两侧 CT 传变不一致同样可能导致差流的二次谐波比降低而引起误动。在实际电网中，变压器通常是在多电源供电方式下运行，因此当其附近的变压器空投时，往往是

各种形式的和应涌流交织在一起,加剧了变压器各侧CT的传变不一致性。

综上所述,和应涌流引起变压器差动保护误动一般发生在CT暂态饱和之后,如果在和应涌流引起CT暂态饱和之前就能加以识别,并采取有效制动措施,则可以避免差动保护误动作。

3 基于基波幅值增量的和应涌流识别方法

3.1 基本原理

和应涌流的产生可分为暂态增大阶段和稳定衰减阶段,相应地,其幅值先逐渐增大到最大值,然后再缓慢衰减。通过对和应涌流的频谱进行分析不难发现,和应涌流的基波分量也是先逐渐增大而后减小的。如图5(a)和(b)所示,在和应涌流的初始增大阶段,其基波分量逐渐增大,相比而言,图5(c)和(d)中空投涌流是持续衰减的,相应地其基波分量也是持续减小的,图5(e)和(f)中变压器发生内部故障时,差动电流含有较大非周期分量,但其基波分量近似保持不变。

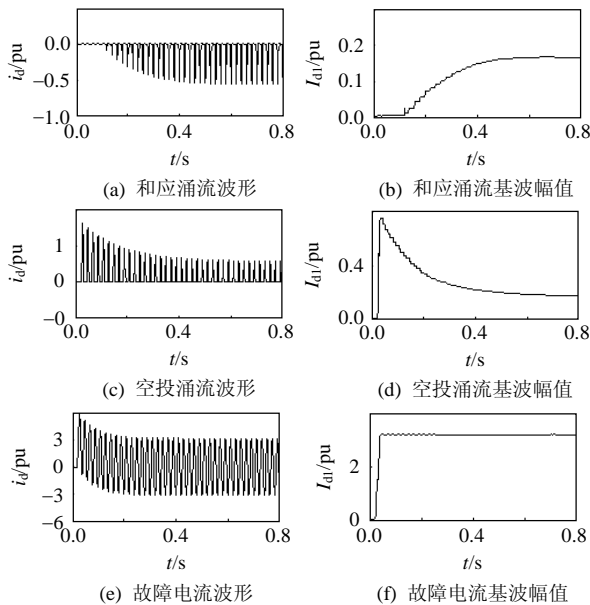


图5 各种情况下的差动电流及其基波幅值分析

Fig. 5 Simulation analysis of transformer differential current and its fundamental amplitude

基于上述规律,通过判断变压器差动电流的基波分量变化过程可以有效识别和应涌流。定义差动电流的基波幅值增量 $S(n)$:

$$S(n) = \frac{I_d(n) - I_d(n-N)}{I_d(n-N)} \quad (1)$$

式中 $I_d(n)$ 、 $I_d(n-N)$ 分别为第 n 点、 $n-N$ 点的差动电流基波幅值($n \geq N$, N 为每周波采样点数)。为了尽量消除衰减直流分量的影响,采用差分全周傅氏算法

计算差流的基波幅值^[19-20]。

$S(n)$ 反映了差动电流基波分量的变化规律,给定一个适当的阈值 S_{th} ,对于和应涌流,在其暂态增大阶段时 $S(n) > S_{th}$,稳定衰减阶段时 $S(n) < 0$;而对于空投涌流满足 $S(n) < 0$,故障电流满足 $S(n) \approx 0$ 。据此提出了基波幅值增量判据:

$$S(n) > S_{th} \quad (2)$$

式(2)可准确识别和应涌流、空投涌流、故障电流,而阈值 S_{th} 需要考虑实际变压器的情况以及该判据的具体应用情况。

3.2 和应涌流识别方案与逻辑框图

基波幅值增量判据需要与差动保护判据、涌流制动判据相配合来构成和应涌流识别方案。当差动保护判据和涌流制动判据(本文采用二次谐波制动方法)同时满足时,可判断差流为空投涌流或和应涌流,然后采用基波幅值增量判据来鉴别和应涌流与空投涌流。在这种情况下,基波幅值增量判据只用于鉴别和应涌流与空投涌流,不需要考虑故障电流的情况,因为和应涌流在暂态增大阶段满足 $S(n) > 0$,而空投涌流满足 $S(n) < 0$,所以阈值 S_{th} 只需取较小的正值就可以灵敏地识别和应涌流。该方案的原理框图如图6所示,解释说明如下:

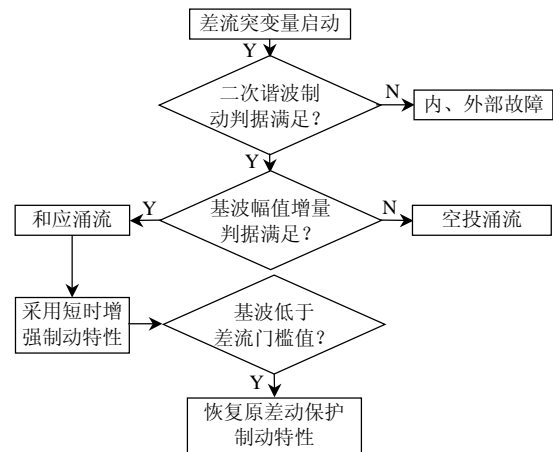


图6 基于基波幅值增量的和应涌流识别方案框图

Fig. 6 Flowchart of the sympathetic inrush restraint method based on fundamental harmonic increment

1) 首先,当差流突变启动元件动作后,采用二次谐波制动方法可以正确识别涌流(包括和应涌流、空投涌流)和故障电流,当二次谐波制动判据满足时差动保护被正确闭锁。

2) 同时计算差流的基波幅值增量 $S(n)$,当 $S(n) > S_{th}$ 且持续一段时间 t_1 时判为和应涌流,否则判为空投涌流。需要说明的是,由于全周傅氏算法数据窗的影响,突变量启动后第1个周波会因跨数

据窗的影响而导致基波幅值计算不正确,相应地前 2 个周波内计算的 $S(n)$ 是不正确的,因此基波幅值增量判据的判断区间应至少从第 3 个周波开始,因为和应涌流的暂态增大过程较长,所以并不会影响判据的可靠性。为了进一步保证可靠性, t_1 可取 1~2 个周波。

3) 判断差流为和应涌流后,要采取有效措施制动差动保护,同时还要保证内部故障的动作速度。因为和应涌流引起的误动一般发生在比率差动保护的拐点附近区域,所以可采取短时增强制动特性躲过此区域。如图 2 所示,首先将原制动特性斜线段左移得到斜线段 A(即减小拐点制动电流 I_{r0} ,图中 I_{r0} 减小为 0),再将原制动特性的直线上移得到线段 B(即增大差流门槛值 I_{d0} ,图中取 $I'_{d0} = 2I_{d0}$),线段 C 不变,这样线段 A, B, C 就构成了短时增强制动特性。短时增强制动特性在和应涌流的出现阶段,通过缩小保护动作区来躲过和应涌流误动区,同时还能保证此过程中变压器发生内部故障时能快速可靠切除。

4) 采用短时增强制动特性后,当检测到差流低于门槛值 I_{d0} 时,说明涌流已衰减到较小值,短时增强制动特性自动返回,恢复原始差动保护特性。

4 仿真与动模试验验证

4.1 仿真验证

为了验证和应涌流识别新方法的有效性,下文利用仿真得到的和应涌流、空投涌流波形进行分析。利用 Matlab/Simulink 建立图 3 所示的变压器并联和应涌流仿真模型,变压器 T_1 和 T_2 参数相同,容量为 250 MVA,变比为 500 kV/220 kV,高、低压绕组电阻为 0.002 pu,漏电感为 0.08 pu,饱和励磁特性为: 0, 0; 0.002 4, 1.2; 1, 1.5, 单位为 pu。系统侧阻抗按照 500 kV 系统典型参数取 $r_s=10 \Omega$, $L_s=0.3 \text{ H}$ 。

当变压器 T_1 正常运行,变压器 T_2 在 $t=0.02 \text{ s}$ 空载合闸时,2 台变压器的涌流及计算的基波幅值增量 S 如图 7 所示,每周波采样 20 点,仿真结果均采用标幺值表示。如图 7(a)所示,变压器 T_1 在 T_2 空投后一段时间才逐渐进入饱和,且峰值逐渐增大,计算的基波幅值增量 S 在和应涌流出现后的一段时间内($t=0.16\sim 0.26 \text{ s}$,为 5 个周波)均大于 10%。相对而言,图 7(b)中空投涌流的基波幅值增量 S 始终小于 0。实际上,单台变压器的空投涌流比和应作用下的空投涌流衰减速度更快,其基波幅值增量

更小,所以基波幅值增量判据可以有效识别和应涌流与空投涌流。

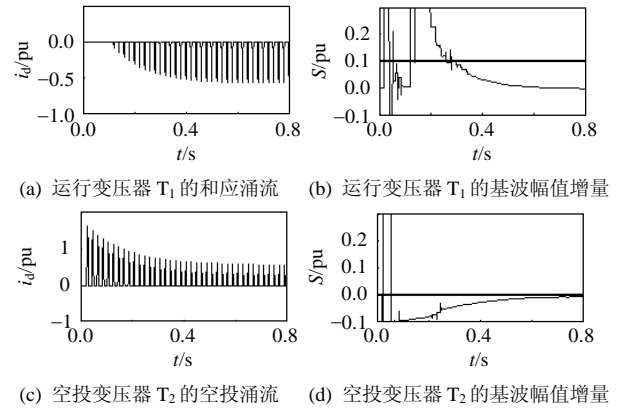


图 7 变压器并联和应涌流仿真分析

Fig. 7 Simulation analysis of sympathetic inrush

4.2 动模试验结果

下文通过动模试验获得变压器在各种状态下的试验数据,以进一步对保护判据的正确性和有效性进行验证。动模试验系统接线如图 8 所示。

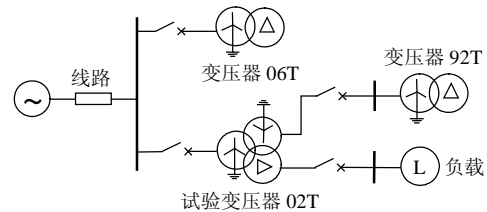


图 8 动模试验系统接线示意图

Fig. 8 Dynamic simulation experiment system

图 8 中试验变压器 02T 为 YN,yn,d11 接线的三相单相变压器组(15 kVA, 800:800:220 V),变压器 06T (31 kVA, 800:220 V)空投时试验变压器 02T 会产生并联和应涌流,变压器 92T(2 kVA, 800:220 V)空投时变压器 02T 会产生串联和应涌流。空投、空投于故障、内部故障试验均在试验变压器 02T 单台运行时进行。试验波形每个周波采样 20 点。

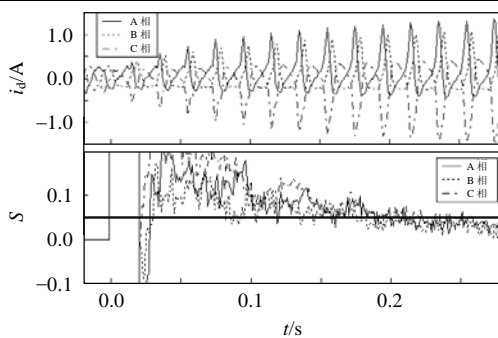
表 1 中列出了各种运行情况下动模试验的基波幅值增量判据结果,表中的 S 数值为判断区间内最小值或最大值的百分数。从表中可以看出,在各种情况下和应涌流均满足 $S > 5\%$,而单台变压器空投或空投于故障时 $S < 0$,在各种内部故障时 $S \approx 0$ 。因此基波幅值增量判据不仅可以有效识别和应涌流和空投涌流,同时还可以作为识别内部故障和涌流的判据。当该判据只用于判别和应涌流与空投涌流时,门槛定值 S_{th} 可整定得较小($S_{th} \leq 5\%$)。

限于篇幅,下文仅以并联和应涌流试验情况为例进行说明,如图 9 所示:图 9(a)中运行变压器的和应涌流在初始阶段逐渐增大,其计算的 S 值在判

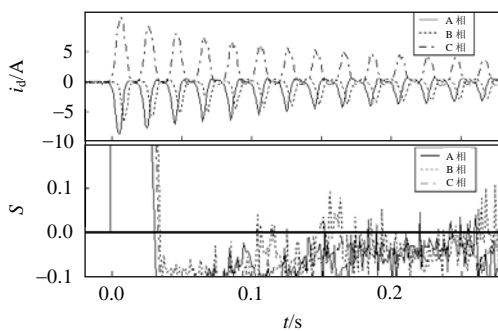
表1 动模试验结果分析

Tab. 1 Result analysis of the dynamic experiment

实验类型	编号	实验项目	基波幅值增量判据 $S/\%$		
			A相	B相	C相
和应涌流	1	并联和应涌流 1	> 8	> 6	> 14
	2	并联和应涌流 2	> 10	> 6	未启动
	3	级联和应涌流 1	> 26	> 20	> 7.5
	4	级联和应涌流 2	> 5.8	> 6.5	未启动
励磁涌流	5	单台变压器空投 1	< -19	< -22	< -16
	6	单台变压器空投 2	< -26	< -15	< -23
空投于故障	7	高压侧 B 相 1.9% 匝间故障	< -10	< -10	< -26
	8	高压侧 B 相接地	< -10	< -10	未启动
内部故障	9	高压侧 A 相接地	< -0.2	未启动	0.1
	10	低压侧 AB 相间	< -1	< -0.01	未启动
	11	低压侧三相短路	< -0.6	< -0.3	< -0.3
	12	低压侧 A 相 1.5% 轻微匝间故障	< -0.1	未启动	< 0.1



(a) 三相和应涌流及其基波幅值增量



(b) 三相空投涌流及其基波幅值增量

图9 变压器并联和应涌流动模试验分析

Fig. 9 Dynamic simulation experiment analysis of sympathetic inrush

断区间内($t=0.04\sim 0.08\text{ s}$)均满足 $S > 5\%$; 图9(b)中空投涌流缓慢衰减, 在判断区间内计算的 S 值均满足 $S < 0$ 。因此, 阈值取 $S_{th} \leq 5\%$ 时, 基波幅值增量判据可以快速可靠地鉴别和应涌流和空投涌流。

5 结论

1) 和应涌流本身的二次谐波含量较高, 二次谐波制动方法应该可以有效制动差动保护, 但由于

和应涌流含有衰减缓慢的非周期分量, 长时间作用下可能引起 CT 暂态饱和而导致差流的二次谐波比降低, 因此变压器差动保护误动一般是在和应涌流和 CT 暂态饱和的综合作用下发生的。如果在和应涌流引起 CT 暂态饱和前能正确加以识别, 并采取有效的制动措施, 就可以避免差动保护误动作。

2) 本文提出了一种基于差流基波幅值增量的和应涌流识别新方法, 该方法利用和应涌流先逐渐增大后缓慢衰减的波形特征, 可以在和应涌流引起 CT 暂态饱和之前加以正确识别, 并采取有效制动措施来避免差动保护误动作。仿真和动模试验验证了该方法的有效性和可行性。

参考文献

- [1] 李德佳. 微机型变压器差动保护误动作原因分析与对策[J]. 继电器, 2004, 32(5): 56-59.
Li Dejia. Analysis and countermeasure of mal-operation of the microprocessor-based transformer differential protection[J]. Relay, 2004, 32(5): 56-59(in Chinese).
- [2] 上官帖, 谌争鸣, 郭军燕. 和应涌流对变压器差动保护的影响及对策[J]. 华中电力, 2004, 17(5): 50-52.
Shangguan Tie, Chen Zhengming, Guo Junyan. The influences and countermeasures of sympathetic inrush current in transformer differential protection[J]. Central China Power Technology, 2004, 17(5): 50-52(in Chinese).
- [3] 武春菊, 张学清, 石凤兰. 励磁涌流引起变压器差动保护误动作分析及对策[J]. 华中电力技术, 2007(3): 51-54.
Wu Chunju, Zhang Xueqing, Shi Fenglan. Analysis and countermeasures about malfunction of transformer differential protection aroused by exciting surge[J]. Central China Power Technology, 2007(3): 51-54(in Chinese).
- [4] 毕大强, 孙叶, 李德佳, 等. 和应涌流导致差动保护误动原因分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(22): 36-40.
Bi Daqiang, Sun Ye, Li Dejia, et al. Analysis on mal-operation of differential protection caused by sympathetic inrush[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(22): 36-40(in Chinese).
- [5] 余高旺, 毕大强, 王志广, 等. 变压器和应涌流现象及实例分析. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 20-23.
Yu Gaowang, Bi Daqiang, Wang Zhiguang, et al. Phenomenon of sympathetic inrush and analysis of an example[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 20-23(in Chinese).
- [6] 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. 继电器, 2001, 29(7): 52-54.
Wang Huaizhi, Sun Xianchu, Chang Lin. Test and study on the effect of surge current on differential protection for transformer[J]. Relay, 2001, 29(7): 52-54(in Chinese).
- [7] Bronzeado H S, Yacimini R. Phenomenon of sympathetic interaction between transformers caused by inrush transients[J]. IEEE Proceedings: Science, Measurement and Technology, 1995, 142(4): 323-329.
- [8] Bronzeado H S, Brogan P B, Yacimini R. Harmonic analysis of transient currents during sympathetic interaction[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1996, 11(4): 2051-2056.

- [9] 张雪松, 何奔腾, 张建松. 变压器和应涌流的产生机制及其影响因素研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 15-19.
Zhang Xuesong, He Benteng, Zhang Jiansong. Principle and influencing factors of the transformer sympathetic inrush[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 15-19(in Chinese).
- [10] 袁宇波, 李德佳, 陆于平, 等. 变压器和应涌流的物理机制及其对差动保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 9-14.
Yuan Yubo, Li Dejia, Lu Yuping, et al. Physical mechanism of sympathetic inrush of transformer and its influence on differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 9-14(in Chinese).
- [11] 毕大强, 王祥珩, 李德佳, 等. 变压器和应涌流的理论探讨[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 1-8.
Bi Daqiang, Wang Xiangheng, Li Dejia, et al. Theory analysis of the sympathetic inrush in operating transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 1-8(in Chinese).
- [12] 张雪松, 何奔腾. 变压器和应涌流对继电保护影响的分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 12-17.
Zhang Xuesong, He Benteng. Influence of sympathetic interaction between transformers on relay protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 12-17(in Chinese).
- [13] Shao Dejun, Yin Xianggen, Zhang Zhe, et al. Research on sympathetic interaction between transformers[C]. The 42th International Universities Power Engineering Conference, England, 2007.
- [14] 谷君, 郑涛, 肖仕武, 等. 基于时差法的 Y/Δ 接线变压器和应涌流鉴别新方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(13): 6-11.
Gu Jun, Zheng tao, Xiao Shiwu, et al. A new algorithm based on time differential method to identify sympathetic inrush of transformers connected in wye-delta mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(13): 6-11(in Chinese).
- [15] 翁汉琍, 林湘宁, 刘沛. 变压器有载合闸时纵联差动保护误动的分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 27-32.
Weng Hanli, Lin Xiangning, Liu Pei. A novel explanation to the mal-operation of differential protection during the loaded transformer energization[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 27-32(in Chinese).
- [16] 林湘宁, 刘沛. 变压器外部故障切除后差动保护误动的机制分析[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(19): 57-60.
Lin Xiangning, Liu Pei. Mechanism analysis of the mal-operation of transformer differential protection after external fault clearance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(19): 57-60(in Chinese).
- [17] 袁宇波, 陆于平, 许扬, 等. 切除外部故障时电流互感器局部暂态饱和对变压器差动保护的影响及对策[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 12-17.
Yuan Yubo, Lu Yuping, Xu Yang, et al. The influence and countermeasure to transformer differential protection of CT partial transient saturation caused by external fault removal[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 12-17(in Chinese).
- [18] 袁季修, 盛和乐, 吴聚业. 保护用电流互感器应用指南[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 28-51.
Yuan Jixiu, Sheng Hele, Wu Juye. Application guideline of current transformer for protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 28-51(in Chinese).
- [19] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 3 版. 北京: 中国电力出版社, 2005: 288-294.
Zhu Shengshi. Principle and technology of relay protection of high voltage power grid[M]. The 3rd edition. Beijing: China Electric Power Press, 2005: 288-294(in Chinese).
- [20] 陈德树. 计算机继电保护原理与技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992: 66-78.
Chen Deshu. Principle and technology of digital relay protection[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1992: 66-78(in Chinese).



邵德军

收稿日期: 2009-07-22。

作者简介:

邵德军(1981—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护及安全自动控制, shaodjun@163.com;

尹项根(1954—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护及安全自动控制、故障仿真与状态监测等;

张哲(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护及安全自动控制;

陈德树(1930—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护及安全自动控制。

(责任编辑 刘浩芳)