

变 压 器 和 应 涌 流 分 析

束洪春, 贺 勋, 李立新

(昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650051)

摘要: 以 2 台单相变压器并联运行为例, 利用励磁涌流偏向时间轴一侧的特点, 解释了和应涌流的产生机理及其变化特点, 指出和应涌流产生的本质原因是由于合闸变压器励磁涌流流过系统电阻使得其他变压器工作母线电压偏移, 导致铁芯饱和造成的。初步分析了系统电阻、线路阻抗、空投变压器不同剩磁以及运行变压器二次侧负载对和应涌流的影响, 讨论了和应涌流对变压器差动保护和后备保护的危害, 其非周期分量长期作用引起的电流互感器局部暂态饱和以及差流中二次谐波含量降低是造成差动保护误动的主要原因。提出了相应的防范措施: 在条件允许的情况下将电流互感器从 P 级更换为 TP 级以防止其暂态饱和; 在满足灵敏度要求的前提下适当提高发电机及变压器差动保护的定值; 尽量避免可能产生和应涌流的运行操作; 正确整定变压器电流距离保护的各段定值; 利用二次谐波分量构成零序二次谐波制动判据防止差动保护误动; 寻求更可靠的主保护原理或完善纵差保护原理。

关键词: 变压器; 和应涌流; 差动保护; 应对措施

中图分类号: TM 41

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)10-0007-06

0 引言

电力变压器是发电厂和变电站中的主要电气设备, 它的安全运行与否直接关系到电力系统能否连续稳定地工作。由于变压器本身造价昂贵, 一旦因故障而遭到破坏, 其检修难度大, 检修时间长, 经济损失也相当惨重。因此, 寻求一个安全、可靠、灵敏的变压器保护方案, 一直是国内外电力系统学者们研究的热点问题。长期以来, 差动保护一直是变压器电量保护中的主保护。变压器差动保护的关键问题是如何鉴别励磁涌流和内部故障, 国内外许多专家和学者对此进行了大量的研究, 取得了很多有益的成果。但这些研究主要是针对空载合闸或外部故障切除后电压恢复时变压器本身励磁涌流的产生机理、波形特征和变化特点进行的, 而未考虑并联或级联运行中变压器的和应涌流对变压器差动保护的影响。近年来, 出现了多起和应涌流引起变压器差动保护及发电机差动保护误动的事故^[1-3], 和应涌流问题越来越引起人们的关注。

和应涌流是当电网中空投一台变压器时, 在相邻的并联或级联运行变压器中产生的。和应涌流在合闸变压器涌流持续一段时间后产生, 该涌流波形特征不明显且持续时间很长, 容易导致变压器的涌流闭锁环节失效, 造成运行变压器保护误动作。由于运行变压器本身没有故障, 并且误动是发生在相

邻变压器空投完成较长的一段时间之后, 所以很难查明误动原因, 误动原因更具有隐蔽性。因此, 有必要对这种现象进行更为深入的研究, 揭示其本质, 分析其产生的机理和特点, 并提出有效的应对措施防止其对保护产生影响。

1 产生机理和特点

理论分析和实验研究表明^[4-5], 变压器励磁涌流产生的根本原因是当变压器空载合闸时, 由于其磁链不能突变, 从而产生非周期磁链, 使得变压器铁芯饱和所致。下面从磁链变化的角度出发, 对单台变压器空载合闸过程进行分析, 然后在此基础上研究和应涌流的产生机理和特点。

图 1 为空载合闸变压器等效电路。

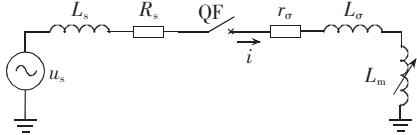


图 1 单相变压器空载合闸等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of single-phase transformer no-load closing

其参数假定如下: 系统侧为一个正弦电压源, 且 $u_s = U_m \sin(\omega t + \alpha)$; R_s 为系统电阻; L_s 为系统电感; r_σ 为变压器电阻; L_σ 为变压器漏电感; L_m 为励磁电感。

根据基尔霍夫定律和回路方程, 可得:

$$u_s = U_m \sin(\omega t + \alpha) = R_i + \frac{d\Psi}{dt} \quad (1)$$

$$\Psi = (L_s + L_\sigma + L_m) i = L_i$$

$$R = R_s + r_\sigma$$

收稿日期: 2006-08-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50347026, 50467002); 云南省科技攻关项目 (2003GG10); 云南省自然科学基金项目 (2005F0005Z, 2004E0020M, 2002E0025M)

励磁电感 L_m 是一个非线性电感, 在这里将 L_m 取为变压器励磁回路的平均电感, 这样就可以将式 (1) 表示为以磁链 Ψ 为状态变量的常系数线性微分方程:

$$U_m \sin(\omega t + \alpha) = \frac{R}{L} \Psi + \frac{d\Psi}{dt} \quad (2)$$

解此微分方程并化简后得:

$$\Psi(t) = -\Psi_m \cos(\omega t + \alpha) + (\Psi_{sy} + \Psi_m \cos \alpha) e^{-t/\tau} \quad (3)$$

式中 $\Psi_m = LU_m / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$; Ψ_{sy} 为剩磁; $\tau = L/R$ 为变压器一次侧合闸回路的时间常数。

对式 (1) 的两边在 1 个周期内进行积分, 则可得:

$$\int_t^{t+T} u_s dt = \int_t^{t+T} (R_s + r_\sigma) i dt + \Delta\Psi \quad (4)$$

由于电源电压为正弦波, 所以其在 1 个周期内的积分为 0, 则上式简化为

$$\Delta\Psi = -\int_t^{t+T} R_i dt \quad (5)$$

以上对变压器空载合闸电路中的磁链 Ψ 进行了解析分析, 得到了变压器暂态磁链表达式 (3) 和每个周期合闸回路总磁链的增量表达式 (5), 从中可以看出: 变压器暂态磁链中含有衰减的非周期磁链, 正是由于它的存在导致了变压器铁芯饱和。同时可以看出, 变压器合闸回路总磁链每个周期的衰减量是励磁涌流在系统电阻和变压器漏电阻上总电压降的积分。

在对单台变压器励磁涌流进行分析之后, 下面以 2 台单相变压器并联运行为例说明和应涌流的产生过程, 等效电路如图 2 所示。

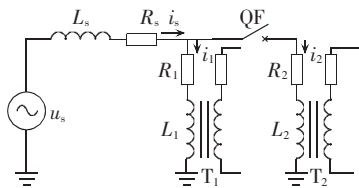


图 2 并联运行变压器和应涌流等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of parallel transformer sympathetic inrush

在图 2 所示等值电路中, 设系统电源电压为 u_s , 系统电阻为 R_s , 系统电感为 L_s ; 变压器 T_1 的原边等效电阻为 R_1 , 电感为 L_1 ; 变压器 T_2 的原边等效电阻为 R_2 , 电感为 L_2 ; i_s 为系统电流, i_1 为流过变压器 T_1 的电流, i_2 为流过变压器 T_2 的电流。

根据以上对单台变压器励磁涌流的分析, 可以得到变压器 T_1 、 T_2 每周期磁通变化量为

$$\begin{aligned} \Delta\Psi_1 = & -\int_t^{t+T} R_s i_s dt - \int_t^{t+T} R_1 i_1 dt = \\ & -\int_t^{t+T} (R_s + R_1) i_1 dt - \int_t^{t+T} R_s i_2 dt \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta\Psi_2 = & -\int_t^{t+T} R_s i_s dt - \int_t^{t+T} R_2 i_2 dt = \\ & -\int_t^{t+T} (R_s + R_2) i_2 dt - \int_t^{t+T} R_s i_1 dt \end{aligned} \quad (7)$$

即

$$\begin{bmatrix} \Delta\Psi_1 \\ \Delta\Psi_2 \end{bmatrix} = -\int_t^{t+T} \begin{bmatrix} R_s + R_1 & R_s \\ R_s & R_s + R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} dt \quad (8)$$

图 2 中设变压器 T_1 已处于稳态运行, 此时变压器 T_2 空载投入。当断路器 QF 合闸时, 变压器 T_2 中会产生励磁涌流 i_2 , i_2 完全偏于时间轴一侧, 含有很大的非周期分量, 而此时变压器 T_1 中电流 i_1 所含的非周期分量很小, 因此 i_1 在 1 个周期的积分值约为零, 假设 i_2 中的非周期分量值为正, 则由式 (8) 可见, 此时 $\Delta\Psi_1$ 和 $\Delta\Psi_2$ 均为负值, 即每个周期磁链都在向负方向偏移。其结果是使得 T_1 磁链 Ψ_1 中的非周期分量反方向增加, 并逐渐达到饱和点。同时, 在 $\Delta\Psi_2$ 的作用下, 变压器 T_2 中的磁链 Ψ_2 在逐渐减小, 从而使得 i_2 的幅值逐渐减小。经过一段时间之后, T_1 进入饱和区, 产生涌流, 即和应涌流。

由于变压器 T_1 磁链是在负方向进入饱和, 所以 T_1 中产生的和应涌流与 T_2 中的励磁涌流 i_2 方向相反, 是负向的。变压器 T_1 中产生和应涌流之后, 由于 i_1 和应涌流的逐渐增大, i_1 在 1 个周期的积分值也在逐渐增大, 因为 i_1 与 i_2 方向相反, 由式 (8) 可知, 随着 i_1 和应涌流的增大, 最终将导致 $\Delta\Psi_1$ 为零, 此时 i_1 和应涌流达到最大值, 之后, T_1 、 T_2 中的磁链开始衰减。由于在和应涌流产生之后, 随着 i_1 幅值的增大和 i_2 幅值的减小, 系统电流 $i_s = i_1 + i_2$ 中的非周期分量将迅速减小到 0 附近, 由式 (6) (7) 可知, 系统电阻 R_s 对 T_1 、 T_2 磁链的衰减作用几乎消失, 使得 2 台变压器只能靠各自的原边等效电阻衰减偏磁, 因此, 涌流的衰减速度要比单个变压器发生涌流时缓慢得多。

以上从磁链变化的角度分析了运行变压器中和应涌流产生的机理, 从中可以看出, 正是由于系统电阻的存在, 使得 2 台变压器的磁链相互耦合, 空投变压器的励磁涌流使公共母线上电压产生非周期波动, 从而使得运行变压器中产生和应涌流。

根据和应涌流的产生机理, 利用 Matlab 软件按图 2 建立仿真模型, 得到和应涌流的仿真波形如图 3 所示。

从图 3 中可以看出, 和应涌流有 4 个主要特点。

a. T_1 中的和应涌流在合闸变压器 T_2 励磁涌流持续一段时间后才产生, 2 台变压器的涌流交替出现, 方向相反, 且不会重叠。

b. 励磁涌流的最大值发生在合闸后的很短时间内, 而和应涌流的幅值是随时间逐步增大到最大值, 随后又不断衰减。

c. 出现和应涌流时, 2 台变压器的相互作用使得涌流的衰减过程较单个变压器合闸时要慢得多。

d. 当空载合闸变压器 T_2 励磁涌流处于峰值附近时, 母线电压的瞬时值较低, 此时不产生和应涌流; 当励磁涌流处于间断期间, 母线电压瞬时值较高。运行变压器在母线电压的直流分量和高电压的共同作用下, 将产生和应涌流。

以上分析了并联变压器和应涌流的产生机理及特点, 串联变压器和应涌流的机理与并联变压器相同。事实上, 变压器的和应涌流不仅发生在 2 台变

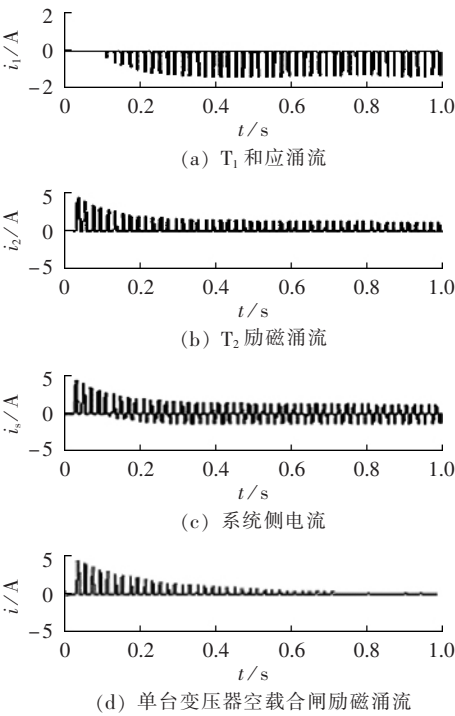


图 3 并联和应涌流仿真

Fig.3 Simulation of parallel transformer sympathetic inrush

压器之间,只要变压器附近有其他铁芯元件充电时,就有可能引起该变压器产生和应涌流现象^[6-7]。通过分析可知,和应涌流与合闸励磁涌流特征不完全相同,且持续时间长,这将影响到系统中保护的正确动作率。

2 影响和应涌流的因素

和应涌流的产生及衰减过程受多方面因素的影响。

2.1 系统电阻的影响

通过以上分析可知,系统电阻对和应涌流的产生和衰减都有影响,影响的大小取决于系统电阻与变压器电阻的比值。比值越大,越容易产生和应涌流,且涌流的衰减也越慢。由于低电压等级的小系统中系统电阻较大,所以更容易产生和应涌流,而且和应涌流衰减很慢,应给予重视。

图 4 给出了图 2 电路中其他条件不变的情况

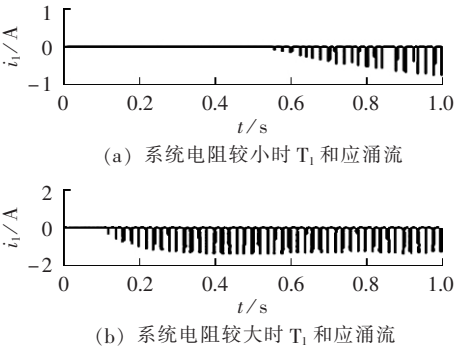


图 4 系统电阻参数变化对和应涌流的影响

Fig.4 Effect of system resistance on sympathetic inrush

下,只改变系统电阻,使其值由小到大变化时对变压器 T_1 和应涌流影响的仿真结果。可以看出, T_1 和应涌流的变化规律符合以上分析。

2.2 线路阻抗的影响

线路阻抗与系统阻抗的作用基本一致。当系统与变压器之间的线路较短、阻抗较小时,将不利于和应涌流的产生。相比较之下,若系统与变压器之间的线路较长、阻抗较大时,将有利于和应涌流的产生。但线路较长、阻抗较大,线路压降必然较大,致使变压器原边电压降低,变压器磁链的稳态分量减小,即工作点远离饱和区,将会降低和应涌流的大小,起始涌流也将降低。

2.3 空投变压器不同剩磁的影响

空投变压器励磁涌流的大小与变压器剩磁大小有关,同样空投变压器的不同剩磁对和应涌流也将产生影响。利用 Matlab 软件在不改变其他条件的情况下,分别使变压器 T_2 的剩磁由小到大变化时,得到的仿真结果如图 5 所示。可以看出,在其他条件不变时,空投变压器的剩磁越大,合闸励磁涌流将越大,同时和应涌流也将越大,并且和应涌流出现及达到最大值的速度也越快。

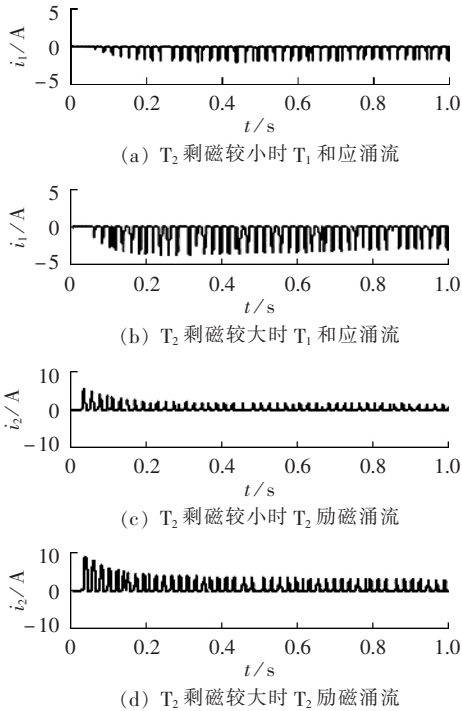


图 5 空投变压器不同剩磁对和应涌流的影响

Fig.5 Effect of residual flux of no-load closing transformer on sympathetic inrush

2.4 运行变压器二次侧负载的影响

文献[8]给出了并联运行变压器二次侧带负载时的等效电路,并初步分析了负载大小对和应涌流的影响。下面利用 Matlab 软件在图 2 电路中分别仿真变压器 T_1 二次侧不带及带有不同负载时的情况。仿真结果如图 6 所示。

可以看出,在其他条件不变时,负载的存在将使

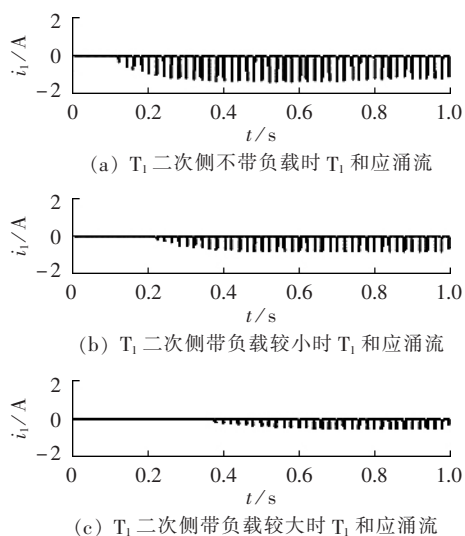


图 6 运行变压器二次侧负载对和应涌流的影响

Fig.6 Effect of secondary load of operating transformer on sympathetic inrush

和应涌流的出现时间延后且幅值变小,而且负载越大和应涌流越小。

3 和应涌流对变压器保护的影响

当 1 台或多台变压器合闸时,与其并联或串联的正常运行变压器中会出现和应涌流。虽然和应涌流本身具有与单台变压器励磁涌流相似的涌流特征,但由于其衰减速度非常缓慢以及其他一些自身的特点,使得和应涌流的出现给变压器的各种保护带来影响,引起保护误动作。下面进行具体分析。

3.1 对变压器差动保护影响

变压器的励磁涌流只流入变压器接通电源一侧的绕组。对差动保护回路而言,励磁涌流的存在就相当于变压器内部故障时的短路电流。因此,必须采取措施防止励磁涌流引起保护误动,在实际应用中主要利用二次谐波制动判据、间断角原理判据和波形对称判据闭锁变压器差动保护。实践证明,这些方法对于单台变压器励磁涌流是行之有效的,但是对于和应涌流则不同。

文献[9]通过变压器空投合闸试验的方法说明,和应涌流中的二次谐波成份并不是在和应涌流最大的时候达到最大,而是随着和应涌流的衰减而增大,这样,在一定的条件(合闸角及变压器的剩磁)下,差流中的基波分量可能大于差动继电器的整定值,而二次谐波分量可能小于谐波比制动系数,所以变压器差动保护有误动的可能。另一方面,理论分析和实验研究表明,和应涌流中的非周期分量衰减非常缓慢,而非周期分量的长时间作用,将有可能引起电流互感器的暂态饱和,使两侧电流产生相位差,形成差流,导致差动保护误动。对于二次谐波制动的变压器差动保护,当发生并联和应涌流时,根据以上分析可知,此时和应涌流只流过运行变压器的一次绕组,差流中的二次谐波含量较大,保护误动的可能性

较小。但是,当发生串联和应涌流时,情况将有所不同。图 7 是 2 台单相变压器发生串联和应涌流的等效电路。

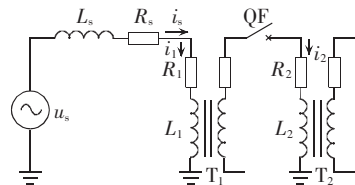


图 7 串联运行变压器和应涌流等效电路

Fig.7 Equivalent circuit of serial operating transformer sympathetic inrush

按图 7 的串联结构同样利用 Matlab 中的 PSB 建立仿真模型,进行串联和应涌流的仿真分析。仿真结果如图 8 所示。

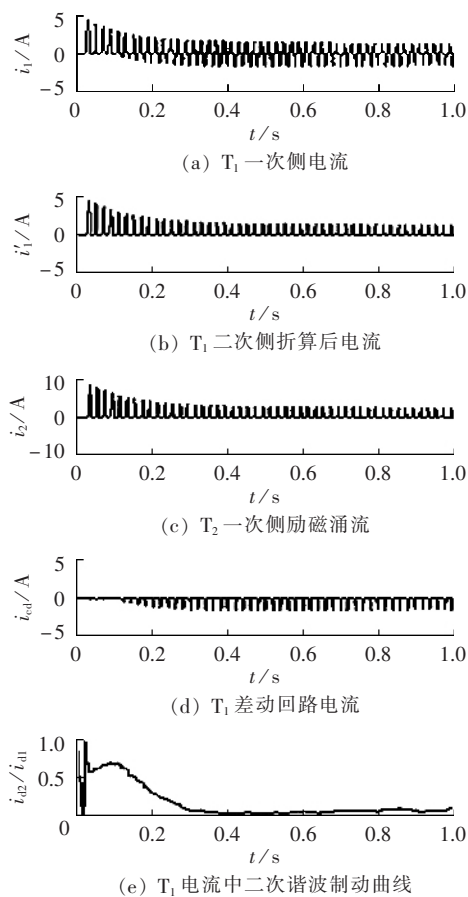


图 8 串联和应涌流仿真

Fig.8 Simulation of serial transformer sympathetic inrush

从图 8 中可以看出,此时变压器 T_1 的一次绕组流过的是和应涌流与励磁涌流之和,而二次绕组流过的是空载合闸变压器 T_2 的励磁涌流。假设变压器 T_1 两侧的电流互感器暂态特性相同且无传递误差,则 T_1 两侧的差流就是和应涌流。但实际上由于和应涌流中非周期分量的长时间作用,将导致电流互感器发生暂态饱和,使两侧电流互感器的传变特性不再相同,这样在 T_1 差动回路中将同时存在励磁涌流与和应涌流,而由于励磁涌流与和应涌流是交

替出现,所以产生的差流是趋于对称的,因而其中所含的二次谐波含量很小,将使二次谐波制动判据失效,导致差动保护误动作。由此可见,在电流互感器发生暂态饱和时,串联和应涌流的危害要比并联和应涌流大。

由于和应涌流中的非周期分量衰减非常缓慢,而且其中二次谐波成分是随着和应涌流的衰减而增大,如果考虑到在此过程中运行变压器发生了不对称内部故障,则变压器差动保护将会因为二次谐波制动而拒动。

3.2 对变压器后备保护影响

文献[10]指出,变压器过电流保护在外部故障切除后电压恢复时引起变压器产生励磁涌流的情况下会发生越级误动。为了防止此种情况的发生,针对励磁涌流衰减快的特点,文中采用延长过电流保护动作时间的方法来躲过励磁涌流的影响。从和应涌流的产生机理中,可以发现,和应涌流的出现并不会使合闸变压器励磁涌流增大,也不会使电源线路的总电流增大,但会使涌流的衰减速度降低,同时使得电源线路的电流波形发生变化从而失去涌流的不对称特性。显然,和应涌流的这种特点,使得靠延时来躲过涌流影响的方法不再适用。

另外,当系统中某台变压器空载合闸时,空载合闸变压器产生的励磁涌流中的零序分量通过 2 台变压器中性点和大地进入运行变压器,并在其中产生和应涌流,而和应涌流中零序分量的存在同样使变压器中零序电流的持续时间较长,将会引起运行变压器零序过电流保护无法靠延时躲过涌流而误动作。

4 应对措施

通过以上分析可以看到,和应涌流中非周期分量的长期作用引起的电流互感器局部暂态饱和以及差流中二次谐波含量降低是造成差动保护误动的主要原因。和应涌流除了会对差动保护产生影响外,还会引起变压器的电流距离保护误动,因此应当采取相应的防范措施。

a. 为了防止电流互感器的暂态饱和,可在条件允许情况下将电流互感器从 P 级更换为 TP 级。但由于受到现场条件的制约,实现非常困难。此外,也可以在保护装置中增加非周期分量衰减较慢引起的电流互感器局部暂态饱和判据。

b. 在满足灵敏度要求的前提下,适当提高发电机及变压器差动保护的定值,也是防止和应涌流引起差动保护误动的重要方法。我国宁夏大坝发电厂就是采取这一措施,实践证明效果良好。井冈山华能电厂针对和应涌流引起的机组非计划停运也提出了同样的防范措施。

c. 尽量避免可能产生和应涌流的运行操作,在变压器空载合闸时,可将运行中的变压器中性点拉开,减少 2 台变压器通过公共母线的电压耦合,以避

免或减少出现和应涌流的机会,防止保护的误动作。但采用这一方法要考虑采取措施防止过电压对变压器造成的损坏。

d. 由于和应涌流的出现并不会使合闸变压器励磁涌流增大,也不会使电源线路的总电流增大,因此那些在电流定值或阻抗定值上能躲过多台变压器励磁涌流的保护,也完全能躲过和应涌流。因此,应当正确整定变压器电流距离保护的各段定值,防止和应涌流引起变压器电流距离保护的误动作。

e. 文献[11]通过一现场具体实例表明,发生和应涌流时,运行变压器 Y_0 侧中性点会出现和应零序涌流,并且其中含有大量的二次谐波分量,因此可以利用此二次谐波分量构成零序二次谐波制动判据,防止和应涌流引起差动保护误动。这种方式在变压器发生内部单相接地故障或相间故障的情况下,由于零序电流中二次谐波含量较少,因而不会将差动保护误闭锁。但这种方法会在和应涌流伴随内部故障的情况下发生误闭锁。

f. 要从根本上解决和应涌流引起差动保护误动的问题,有 2 种途径:一种是抛开差动保护的思路,寻求一种更为可靠的主保护原理,从而避开涌流问题,例如基于变压器模型的保护原理,既考虑了变压器的励磁特性,又避免了变压器铁芯复杂的非线性铁磁性质的影响,从根本上摆脱了涌流和过励磁电流的影响;另一种就是从完善纵差保护原理方面入手,使其具有识别和应涌流的能力,例如基于等效瞬时电感识别涌流的方法能够细致反映变压器饱和程度的变化,有望从根本上解决和应涌流引起差动保护误动的问题。

5 结语

本文通过解析推导和非线性数值仿真相结合的方法,分析了变压器和应涌流的产生机理、影响因素及其对变压器保护的危害,分析表明,和应涌流的形成与许多因素有关,其本质原因是由于合闸变压器励磁涌流流过系统电阻使得其他变压器工作母线电压偏移,导致铁芯饱和造成的。同时,和应涌流自身的特点使得和应涌流对变压器保护的影响具有隐蔽性和广泛性,由其所引起的保护误动问题正逐渐引起人们的重视。文章在对此认真分析的基础上提出了相应的防范措施,希望对变压器保护的可靠运行有所帮助。

参考文献:

- [1] 孙虎,高丽杰. 两台三绕组变压器并列运行的差动保护[J]. 科技情报开发与经济,2003,13(4):127-128.
SUN Hu,GAO Li-jie. Differential protection of parallel operation of two set of three-winding transformer[J]. Sci / Tech Information Development & Economy,2003,13(4):127-128.
- [2] 李德佳. 微机型变压器差动保护误动原因分析与对策[J]. 继电器,2004,32(5):56-59.

- LI De-jia. Analysis and countermeasure of maloperation of the microprocessor based transformer differential protection[J]. Relay, 2004,32(5):56-59.
- [3] HAYWARD C D. Prolonged inrush current with parallel transformers affect differential relaying [J]. AIEE Transactions,1991,60(3):1096-1101.
- [4] 王广延,吕继绍. 电力系统继电保护原理与运行分析[M]. 北京:水利电力出版社,1995.
- [5] 王维俭. 发电机变压器继电保护应用[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [6] PUENT H R,BURGESS M L,LASEN E V,et al. Energization of large shunt reactors near static var compensators and HVDC converters [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 629-636.
- [7] WANG X,IRAVANI M R. Energization transients of shunt reactors [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(4): 1626-1631.
- [8] 张雪松,何奔腾,张建松. 变压器和应涌流的产生机理及其影响因素研究[J]. 电力系统自动化,2005,29(6):15-19.
- ZHANG Xue-song,HE Ben-teng,ZHANG Jian-song. Principle and influencing factors of the transformer sympathetic inrush[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(6):15-19.
- [9] 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.
- WANG Huai-zhi,SUN Xian-chu,CHANG Lin. Test and study on the effect of surge current on differential protection for transformer[J]. Relay,2001,29(7):52-54.
- [10] 吕高幸. 变压器过电流保护的整定必须考虑励磁涌流的影响[J]. 农村电气化,2000(1):41.
- LÜ Gao-xing. Considering the effect of excitation inrush in transformer over current protection setting[J]. Rural Electrification,2000(1):41.
- [11] 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.
- LI De-jia,WANG Wei-jian,BI Da-qiang. Analysis of transient saturation and sympathetic inrush of transformers [J]. High Voltage Apparatus,2005,41(1):12-15.
- [12] 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 Da-qiang,WANG Xiang-heng,LI De-jia,et al. Theory analysis of the sympathetic inrush in operating transformers [J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(6):1-8.
- [13] 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 method for checking magnetizing surge in transformer [J]. Automation of Electric Power Systems,1995,19(9):53-59.
- [14] 林湘宁,刘沛. 变压器外部故障切除后差动保护误动的机理分析[J]. 电力系统自动化,2003,27(19):57-60.
- LIN Xiang-ning,LIU Pei. Mechanism analysis of the maloperation of transformer differential protection after external fault clearance[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(19):57-60.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

束洪春(1961-),男,江苏丹阳人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为新型继电保护与故障测距、分布式求解方法在电力系统中的应用(E-mail:kmshe@sina.com.cn);

贺勋(1977-),男,内蒙古呼和浩特人,硕士,主要研究方向为新型继电保护;

李立新(1979-),女,内蒙古呼和浩特人,硕士研究生,主要研究方向为新型继电保护。

Research on sympathetic inrush in operating transformer

SHU Hong-chun, HE Xun, LI Li-xin

(Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

Abstract: Taking two single-phase transformers in parallel as example, the principle and characteristics of sympathetic inrush are explained according to the fact that the inrush current leans to time axis. The sympathetic inrush is essentially caused by the deviation of bus voltage and the consequent core saturation of adjacent transformer during the inrush current of the energized transformer running across the system resistance. The influence of system resistance, line impedance, different residual fluxes of no-load transformer and secondary load of operating transformer on sympathetic inrush are analyzed and the harm of sympathetic inrush to transformer differential protection and back-up protection are discussed. The local transient saturation of current transducer caused by the permanent effect of nonperiodic component of sympathetic inrush and the decrease of secondary harmonic in differential current are main factors resulting in the misoperation of differential protection, and corresponding countermeasures are proposed: change current transducer from P rank to TP rank to prevent its saturation if possible; increase settings of generator and transformer differential protection while the sensitivity is satisfied; try to avoid the operation causing sympathetic inrush; correctly set sect settings of transformer current distance protection; apply secondary harmonic to form the zero-sequence secondary harmonic triggering criterion to avoid the misoperation of differential protection; find out more reliable main protection principle or improve the principle of longitudinal differential protection.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China(50347026, 50467002), Yunnan Province Science and Technology Key Project(2003GG10) and Natural Science Foundation of Yunnan Province(2005F0005Z, 2004E0020M, 2002E0025M).

Key words: transformer; sympathetic inrush; differential protection; countermeasure