

变压器和应涌流的理论探讨

毕大强¹, 王祥珩¹, 李德佳², 余高旺³, 王赞基¹, 王维俭¹

(1. 清华大学电机系, 北京市 100084; 2. 核电秦山联营有限公司, 浙江省海盐县 314300)

(3. 许继电气保护及自动化事业部, 河南省许昌市 461000)

摘要:在线性化简化的基础上,建立了两台单相变压器并联和级联运行模型,推导了当一台变压器正常运行,另外一台并联或级联变压器空投充电时,两台变压器的磁链解析表达形式,定性分析了正在运行的变压器可能发生饱和现象以及和应涌流产生及影响的机理。同时,在利用分段线性特性考虑磁化特性的情况下,通过数值仿真进一步分析了空投充电变压器的剩磁与合闸角、系统阻抗参数对运行变压器和应涌流幅值及饱和速度的影响,仿真结果验证了分析结论,为和应涌流导致变压器差动保护误动的分析以及认识和应涌流的本质奠定了基础。

关键词:变压器; 饱和; 起始涌流; 和应涌流

中图分类号: TM401.1; TM772

0 引言

电力系统中变压器保护的正确动作率较低^[1],其中励磁涌流是引起变压器差动保护误动的主要原因之一。过去和现在有关变压器励磁涌流的研究主要集中在如何防止空投变压器本身励磁涌流引起差动保护误动的问题上,大量的研究工作已揭示了单台变压器励磁涌流的产生机理、波形特征和变化特点,同时提出多种防止励磁涌流引起误动的措施^[2~6]。

近些年来,有一种运行操作过程引起的多次变压器差动保护误动情况值得注意。这就是当一台变压器空投充电时,在另外一台并联或级联运行的变压器之间产生和应作用,运行变压器中会产生和应涌流,从而引起差动保护误动^[7~11]。因为运行变压器本身没有故障,并且误动发生在相邻变压器空投完成一段时间之后,误动原因更具有隐蔽性,因此对和应涌流的机理深入分析就显得很重要。

国内对和应涌流的认识主要是根据波形对其特征进行描述^[12],并没有对其发生和发展过程给出较好的解释。文献[13]有关“励磁电压受到影响,励磁电流就会随之发生变化”的论述有助于和应涌流产

生机理的理解。国外早在 1941 年通过现场波形记录、试验测试和电流表达式的数学推导对和应涌流现象进行了深入的分析^[14],并讨论了和应涌流对变压器差动保护及过流保护的影响。文献[15]通过数值仿真一台变压器空投充电而另外一台空载、负载或有并联电容器的变压器正在并联运行时,两台变压器的电流、磁链和公共联接点的电压变化,分析了影响和应涌流的部分因素。文献[16,17]通过仿真分析并联和级联变压器两种系统结构形式,指出空投一台变压器时,励磁涌流在系统与变压器之间电阻上产生的不对称电压,这在变压器之间产生了一种暂态和应作用,不但使空投变压器的励磁涌流的幅值和持续时间发生变化,而且在运行变压器中将产生和应涌流,结果导致运行变压器差动保护误动和长时间的谐波过电压。

本文通过合理简化两台变压器并联和级联结构的模型,解析推导了两台变压器的磁链形式,从磁链变化的角度分析了运行变压器中和应涌流的发生、发展的过程以及影响因素,并辅以考虑变压器饱和特性的数值仿真结果进一步分析说明。

1 变压器和应涌流模型

1.1 并联和应涌流模型

两台双绕组变压器并联,当变压器 T1 正在空载运行,变压器 T2 空投时的电气联接如图 1 所示,它们的时域简化电路如图 2(a)所示(不计运行变压器负荷)。取 $R_1 = R_{11\sigma} + R_{1m}$, $L_1 = L_{11\sigma} + L_{1m}$, $R_2 = R_{21\sigma} + R_{2m}$, $L_2 = L_{21\sigma} + L_{2m}$, 时域简化电路可进一步表示为图 2(b)。

收稿日期: 2004-10-20; 修回日期: 2004-12-23。

许继电力科技基金资助项目。

[编者按]近年来,出现了多起空投变压器导致相邻并联或级联变压器及发电机差动保护误动的实例。这种现象与和应涌流密切相关。本刊就变压器和应涌流产生的物理机理、数学模型、对差动保护的影响、典型的实际事故录波数据等方面组织了系列论文,在此发表,希望广大研究人员积极参与交流和讨论,进而能够提出可行的解决措施。

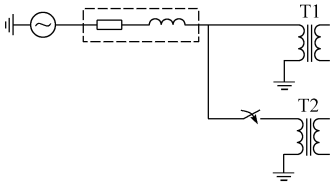
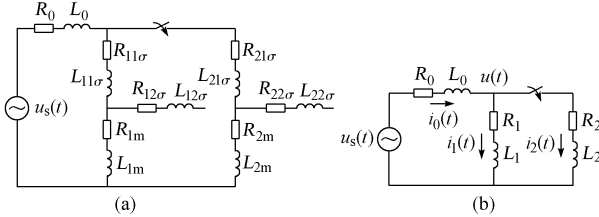


图1 两台单相变压器发生并联和应涌流的电气联接示意图

Fig.1 Electrical configuration used to analyze sympathetic inrush for transformers in parallel



R_0 和 L_0 分别是系统与变压器之间联接线路的电阻和电感; $R_{11\sigma}$ 和 $L_{11\sigma}$, $R_{12\sigma}$ 和 $L_{12\sigma}$, $R_{21\sigma}$ 和 $L_{21\sigma}$, $R_{22\sigma}$ 和 $L_{22\sigma}$ 分别是变压器 T1 的一次和二次绕组的电阻和漏电感、励磁电阻和励磁电感; $R_{21\sigma}$ 和 $L_{21\sigma}$, $R_{22\sigma}$ 和 $L_{22\sigma}$, R_{2m} 和 L_{2m} 分别是变压器 T2 的一次和二次绕组的电阻和漏电感、励磁电阻和励磁电感; $u_s(t)$ 为系统电源电压; $i_0(t)$ 为系统的电流; $i_1(t)$ 为流过变压器 T1 的励磁电流; $i_2(t)$ 为流过变压器 T2 的励磁电流; $u(t)$ 为两台变压器并联公共点处的电压 (原边电压)

图2 两台单相变压器并联和应涌流的时域简化电路

Fig.2 Time domain simplified circuit used to analyze sympathetic inrush for transformers in parallel

设系统电源电压为 $u_s(t) = U_m \sin(\omega t + \theta)$, 由基尔霍夫电压定律和电流定律得:

$$\begin{cases} R_0 i_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} + R_1 i_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} = U_m \sin(\omega t + \theta) \\ R_1 i_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} = R_2 i_2 + \frac{d\Psi_2}{dt} \\ i_0 = i_1 + i_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Psi_1(t) = & \frac{L_1 \sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}}{A \sqrt{(b_1^2 + \omega^2)(b_2^2 + \omega^2)}} U_m \sin(\omega t + \theta + \beta_2 - \alpha_1 - \alpha_2) + \frac{L_1}{A(b_1 - b_2)} \left\{ -\frac{R_2 - b_2 L_2}{\sqrt{b_2^2 + \omega^2}} U_m \sin(\theta - \alpha_2) + \right. \\ & \left. \left[\frac{L_0 + L_1}{L_1} \Psi_1(0) + \frac{L_0}{L_2} \Psi_2(0) \right] (R_2 - b_2 L_2) + [\Psi_1(0) - \Psi_2(0)] (R_0 - b_2 L_0) \right\} e^{-b_2 t} + \\ & \frac{L_1}{A(b_1 - b_2)} \left\{ \frac{R_2 - b_1 L_2}{\sqrt{b_1^2 + \omega^2}} U_m \sin(\theta - \alpha_2) - \left[\frac{L_0 + L_1}{L_1} \Psi_1(0) + \frac{L_0}{L_2} \Psi_2(0) \right] (R_2 - b_1 L_2) - \right. \\ & \left. [\Psi_1(0) - \Psi_2(0)] (R_0 - b_1 L_0) \right\} e^{-b_1 t} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Psi_2(t) = & \frac{L_2 \sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}}{A \sqrt{(b_1^2 + \omega^2)(b_2^2 + \omega^2)}} U_m \sin(\omega t + \theta + \beta_1 - \alpha_1 - \alpha_2) + \frac{L_2}{A(b_1 - b_2)} \left\{ -\frac{R_1 - b_2 L_1}{\sqrt{b_2^2 + \omega^2}} U_m \sin(\theta - \alpha_2) + \right. \\ & \left. \left[\frac{L_0 + L_1}{L_1} \Psi_1(0) + \frac{L_0}{L_2} \Psi_2(0) \right] (R_1 - b_2 L_1) - [\Psi_1(0) - \Psi_2(0)] [R_0 + R_1 - b_2 (L_0 + L_1)] \right\} e^{-b_2 t} + \\ & \frac{L_2}{A(b_1 - b_2)} \left\{ \frac{R_1 - b_1 L_1}{\sqrt{b_1^2 + \omega^2}} U_m \sin(\theta - \alpha_1) - \left[\frac{L_0 + L_1}{L_1} \Psi_1(0) + \frac{L_0}{L_2} \Psi_2(0) \right] (R_1 - b_1 L_1) + \right. \\ & \left. [\Psi_1(0) - \Psi_2(0)] [R_0 + R_1 - b_1 (L_0 + L_1)] \right\} e^{-b_1 t} \end{aligned} \quad (5)$$

由于变压器磁化特性是非线性的,且分散性较大,式(1)描述的非线性方程不可能得到解析表达式。为了定性描述互联变压器空载合闸引起的电磁暂态过程,即两台变压器之间表现在磁链上的相互作用(和应作用),暂且采用近似直线法,把非线性方程简化成常系数线性方程来求解^[18]。设静态电感 $L = \Psi/i$, 则 $i_1 = \Psi_1/L_1$, $i_2 = \Psi_2/L_2$, 代入式(1)得:

$$\begin{cases} R_0 \left(\frac{\Psi_1}{L_1} + \frac{\Psi_2}{L_2} \right) + L_0 \left(\frac{1}{L_1} \frac{d\Psi_1}{dt} + \frac{1}{L_2} \frac{d\Psi_2}{dt} \right) + \\ R_1 \frac{\Psi_1}{L_1} + \frac{d\Psi_1}{dt} = U_m \sin(\omega t + \theta) \\ R_1 \frac{\Psi_1}{L_1} + \frac{d\Psi_1}{dt} = R_2 \frac{\Psi_2}{L_2} + \frac{d\Psi_2}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)是以 Ψ_1, Ψ_2 为未知函数的常系数线性微分方程。在变压器 T2 空投时,设 T2 初始剩磁为 $\Psi_2(0)$, 运行变压器 T1 初始磁链为 $\Psi_1(0)$, 利用拉普拉斯变换方法进行分析^[19]。方程(2)化为:

$$\begin{cases} \frac{R_0}{L_1} \Psi_1(s) + \frac{R_0}{L_2} \Psi_2(s) + \frac{L_0}{L_1} [s\Psi_1(s) - \Psi_1(0)] + \\ \frac{L_0}{L_2} [s\Psi_2(s) - \Psi_2(0)] + \frac{R_1}{L_1} \Psi_1(s) + \\ s\Psi_1(s) - \Psi_1(0) = U_m \frac{\omega \cos \theta + s \sin \theta}{s^2 + \omega^2} \\ \frac{R_1}{L_1} \Psi_1(s) + s\Psi_1(s) - \Psi_1(0) = \frac{R_2}{L_2} \Psi_2(s) + \\ s\Psi_2(s) - \Psi_2(0) \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)解得 $\Psi_1(s)$ 和 $\Psi_2(s)$, 再经拉普拉斯反变换求得两台变压器的磁链时域表达形式:

式中: $\beta_1 = \arctan \frac{\omega L_1}{R_1}$; $\beta_2 = \arctan \frac{\omega L_2}{R_2}$; $\alpha_1 = \arctan \frac{\omega}{b_1}$; $\alpha_2 = \arctan \frac{\omega}{b_2}$; $b_1 = \frac{B}{2A} - \sqrt{\left(\frac{B}{2A}\right)^2 - \frac{C}{A}}$; $b_2 = \frac{B}{2A} + \sqrt{\left(\frac{B}{2A}\right)^2 - \frac{C}{A}}$; $A = L_0 L_1 + L_1 L_2 + L_2 L_0$; $C = R_0 R_1 + R_1 R_2 + R_2 R_0$; $B = R_0 L_1 + R_0 L_2 + R_1 L_2 + R_1 L_0 + R_2 L_0 + R_2 L_1$ 。

以上磁链的表达式比较繁琐,为使分析更加清晰明了,假设两台变压器 $R_1 = R_2 = R$, $L_1 = L_2 = L$, 有 $b_1 = \frac{R}{L}$, $b_2 = \frac{R+2R_0}{L+2L_0}$, $\beta_1 = \beta_2 = \alpha_1 = \arctan \frac{\omega L}{R}$, $\alpha_2 = \arctan \frac{\omega(L+2L_0)}{R+2R_0}$, $Z_2 = [(R+2R_0)^2 + (L+2L_0)^2]^{\frac{1}{2}}$ 。式(4)、式(5)可简化为:

$$\Psi_1(t) = \frac{L}{Z_2} U_m \sin(\omega t + \theta - \alpha_2) + \frac{1}{2} \left[-\frac{2L}{Z_2} U_m \sin(\theta - \alpha_2) + \Psi_1(0) + \Psi_2(0) \right] e^{-\frac{R+2R_0}{L+2L_0}t} + \frac{1}{2} [\Psi_1(0) - \Psi_2(0)] e^{-\frac{R}{L}t} \quad (6)$$

$$\Psi_2(t) = \frac{L}{Z_2} U_m \sin(\omega t + \theta - \alpha_2) + \frac{1}{2} \left[-\frac{2L}{Z_2} U_m \sin(\theta - \alpha_2) + \Psi_1(0) + \Psi_2(0) \right] e^{-\frac{R+2R_0}{L+2L_0}t} - \frac{1}{2} [\Psi_1(0) - \Psi_2(0)] e^{-\frac{R}{L}t} \quad (7)$$

对比当只有一台变压器 T 空载合闸过程时,有 $R_0 i + L_0 \frac{di}{dt} + Ri + \frac{d\Psi}{dt} = U_m \sin(\omega t + \theta)$ (8)

设变压器 T 充电空投时的剩磁是 $\Psi(0)$, 同样按上面的线性化方法处理,利用拉普拉斯变换方法解得:

$$\Psi(t) = \frac{L}{Z} U_m \sin(\omega t + \theta - \alpha) + \left[-\frac{L}{Z} U_m \sin(\theta - \alpha) + \Psi(0) \right] e^{\frac{R+R_0}{L+L_0}t} \quad (9)$$

式中: $Z = \sqrt{(R+R_0)^2 + (L+L_0)^2}$
 $\alpha = \arctan \frac{\omega(L+L_0)}{R+R_0}$

稳态时 $\Psi(t) = \frac{L}{Z} U_m \sin(\omega t + \theta - \alpha)$, 这样对于 T2 空投时刻只有 T1 正常运行, T1 的初始磁链为 $\Psi_1(0) = \frac{L}{Z} U_m \sin(\theta - \alpha)$, 由于变压器激磁阻抗远大于线路阻抗, $L \gg L_0$, $R \gg R_0$, 所以 $Z_2 \approx Z$, $\alpha_2 \approx \alpha$,

$\Psi_1(0) = \frac{L}{Z} U_m \sin(\theta - \alpha) \approx \frac{L}{Z_2} U_m \sin(\theta - \alpha_2)$, 这样式(6)、式(7)可进一步简化为:

$$\Psi_1(t) = \frac{L}{Z_2} U_m \sin(\omega t + \theta - \alpha_2) - \frac{1}{2} [\Psi_1(0) - \Psi_2(0)] e^{-\frac{R+2R_0}{L+2L_0}t} + \frac{1}{2} [\Psi_1(0) - \Psi_2(0)] e^{-\frac{R}{L}t} \quad (10)$$

$$\Psi_2(t) = \frac{L}{Z_2} U_m \sin(\omega t + \theta - \alpha_2) - \frac{1}{2} [\Psi_1(0) - \Psi_2(0)] e^{-\frac{R+2R_0}{L+2L_0}t} - \frac{1}{2} [\Psi_1(0) - \Psi_2(0)] e^{-\frac{R}{L}t} \quad (11)$$

1.2 级联和应涌流模型

两台变压器级联,当 T1 正在空载运行, T2 空投时的电气联接如图 3 所示,它们的时域简化电路如图 4 所示。取 $R_s = R_0 + R_{11\sigma}$, $L_s = L_0 + L_{11\sigma}$, $R_1 = R_{1m}$, $L_1 = L_{1m}$, $R_2 = R_{12\sigma} + R_{21\sigma} + R_{2m}$, $L_2 = L_{12\sigma} + L_{21\sigma} + L_{2m}$, 级联和应涌流的时域简化电路可进一步表示为与并联和应涌流图 2(b)相同的电路。发生级联和应涌流时,两台变压器的磁链变化形式与并联和应涌流时相同。

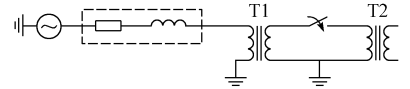


图 3 两台单相变压器发生级联和应涌流的电气联接示意图

Fig. 3 Electrical configuration used to analyze sympathetic inrush for transformers in cascade

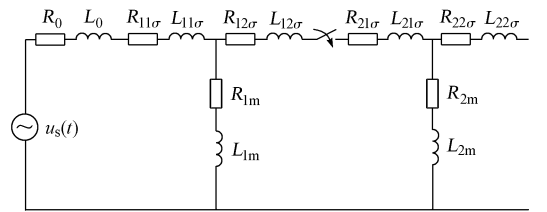


图 4 两台单相变压器级联和应涌流时域简化电路
 Fig. 4 Time domain simplified circuit used to analyze sympathetic current for transformers in cascade

2 和应作用下变压器励磁涌流的特点

2.1 和应涌流产生的机理和特点

为与运行变压器 T1 中产生的和应涌流相区别,将空投变压器 T2 本身产生的励磁涌流称为起始涌流(initial inrush)。从 T1 磁链 $\Psi_1(t)$ 的表达式(式(4)、式(6)与式(10))可以看出,它包含两个直流衰减分量,正是这两个直流衰减分量使 T1 在 T2 空

投后发生偏磁,进而使变压器发生饱和现象,产生和应涌流。对比式(6)与式(7)或式(10)与式(11)可以看出,它们都包括一个正弦稳态分量、两个直流衰减分量。 $\Psi_1(t)$ 与 $\Psi_2(t)$ 的第1项直流衰减分量符号相同,而第2项直流衰减分量符号相反,再与相同的稳态分量相加,根据衰减时间常数 $\frac{L+2L_0}{R+2R_0} < \frac{L}{R}$,这一方面可知 $\Psi_1(t)$ 与 $\Psi_2(t)$ 偏向于时间轴的方向相反,交替达到方向相反的最大值,这就是说,两台变压器交替进入饱和状态,起始涌流与和应涌流亦即交替出现,间隔半个周期,偏向于不同的时间轴侧;另一方面可知,空投变压器的磁链最大值在合闸后的很短时间内达到,而运行变压器的磁链要经过一段时间才能达到,这就是说,起始涌流的最大值发生在合闸后的很短时间内,而和应涌流的最大值则是逐渐达到的,之后再逐渐衰减。

图5是利用MATLAB仿真的并联和应涌流波形,各量为标么值,仿真参数见第3节,仿真中用两段直线模拟变压器的饱和特性。

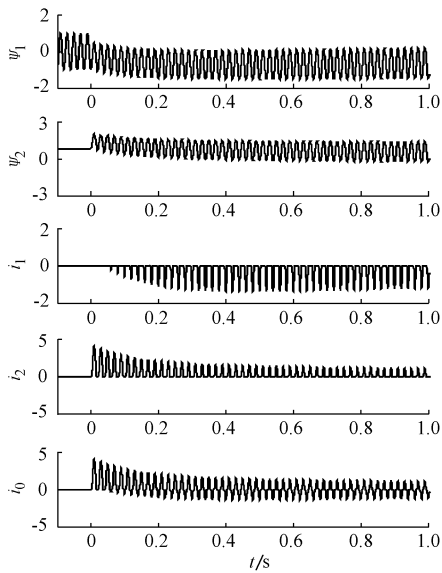


图5 并联和应涌流的变化特点

Fig. 5 Characteristics of sympathetic inrush for transformers in parallel

从图5中可以看出,两台变压器的磁链和电流偏向于时间轴的不同侧,电流交替出现,这些变化过程验证了上面的解析分析。级联和应涌流与并联和应涌流的变化特点相同,但需要注意,在运行变压器空载条件下,并联时,流过运行变压器一次绕组的电流与其励磁电流相同;而级联时,流过运行变压器一次绕组的电流则与系统电流相同,是运行变压器的和应涌流与空投变压器的起始涌流之和。

特殊情况下,当线路阻抗为0时,即 $R_0=0$,

$L_0=0$,由式(6)、式(7)可得:

$$\Psi_1(t) = \frac{L}{Z_2} U_m \sin(\omega t + \theta - \alpha_2) \quad (12)$$

$$\Psi_2(t) = \frac{L}{Z_2} U_m \sin(\omega t + \theta - \alpha_2) + \left[-\frac{L}{Z_2} U_m \sin(\theta - \alpha_2) + \Psi_2(0) \right] e^{-\frac{R}{L}t} \quad (13)$$

根据式(12)、式(13)可知,这时运行变压器的磁链还保持稳态正弦,所以不会产生和应涌流;而空投变压器由于依旧存在衰减的直流分量,所以还可能产生起始涌流,这时与空投单台变压器的性质一致。

2.2 和应作用下起始涌流的变化特点

对比式(11)和式(9),按照通常变压器和系统的参数大小,有衰减时间常数 $\frac{L+2L_0}{R+2R_0} < \frac{L+L_0}{R+R_0} < \frac{L}{R}$ 。所以,当一台变压器空载合闸,而另外一台变压器正在运行时,空投变压器的磁链 $\Psi_2(t)$ 开始衰减趋势由 $\frac{L+2L_0}{R+2R_0}$ 和 $\frac{L}{R}$ 共同决定,比只有一台变压器空载合闸时的磁链 $\Psi(t)$ 按 $\frac{L+L_0}{R+R_0}$ 衰减得稍快点或接近。

但当 $\frac{L+2L_0}{R+2R_0}$ 衰减到较小时, $\Psi_2(t)$ 的衰减趋势由 $\frac{L}{R}$ 决定,将比仅按 $\frac{L+L_0}{R+R_0}$ 衰减的 $\Psi(t)$ 衰减得慢。即当一台变压器空载合闸,而另外一台变压器正在运行时,空投变压器中产生的起始涌流将比只有一台变压器空载合闸时的起始涌流持续时间长,加剧了起始涌流的危害。

图6(a,b)分别是有、无T1运行时,空投变压器起始涌流的变化仿真波形,各量为标么值。可以看出起始涌流的衰减过程遵循上述变化规律。

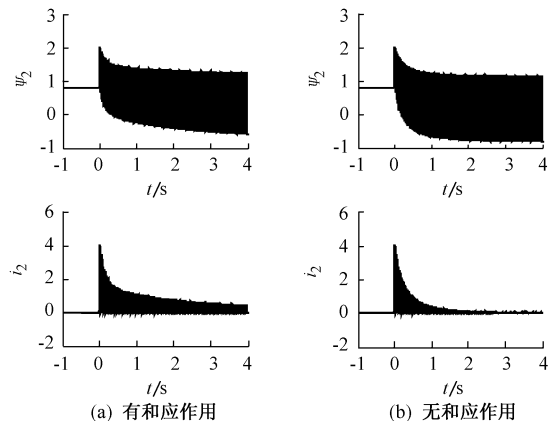


图6 和应作用对空投变压器磁链及涌流的影响仿真
Fig. 6 Simulation results of effect of sympathetic interaction on linkage and inrush variation of switched transformer

3 变压器和应涌流的影响因素分析

按图 1 的并联结构利用 MATLAB 中 Power System Block 建立仿真模型,进行并联和应涌流的仿真分析。变压器 T1 的参数为:容量 150 MVA,频率 50 Hz,额定电压 $(500/\sqrt{3})\text{kV}/(220/\sqrt{3})\text{kV}$,高压和低压绕组的电阻和漏电感相同,分别为 0.002 和 0.06,激磁电阻为 500(标么值),用两段直线模拟饱和特性 $i-\Psi$:0,0;0,1.2;1.0,1.52。变压器 T2 的参数为:容量 150 MVA,频率 50 Hz,额定电压 $(500/\sqrt{3})\text{kV}/(220/\sqrt{3})\text{kV}$,高压和低压绕组的电阻和漏电感相同,分别为 0.004 和 0.08,激磁电阻为 450(标么值),用两段直线模拟饱和特性 $i-\Psi$:0,0;0,1.15;1.0,1.45。以下仿真结果均为标么值,其中, $\Psi_{1\max}$ 为运行变压器的最大磁链, $i_{1\max}$ 为和应涌流的最大值, $t_{1\max}$ 为和应涌流达到最大值的时间, $t_{1\text{sat}}$ 为 T1 开始饱和的时间。

3.1 T2 不同剩磁对和应涌流产生的影响

固定 T2 的合闸时刻,使 T1 的初始磁链 $\Psi_1(0)=0$,改变 T2 的不同剩磁 $\Psi_2(0)$,由式(10)和式(11)可以看出,随着剩磁 $\Psi_2(0)$ 正向逐渐增加, $\Psi_2(t)$ 也正向增加, $\Psi_1(t)$ 则负向增加,相应起始涌流正向增大,和应涌流负向增大;反之,随着剩磁 $\Psi_2(0)$ 负向逐渐增加, $\Psi_2(t)$ 也负向增加, $\Psi_1(t)$ 则正向增加,相应起始涌流负向增大,和应涌流正向增大;剩磁 $\Psi_2(0)$ 越大, $\Psi_1(t)$ 也将越大,T1 饱和的速度越快;这就是说,当合闸角一定时,空投变压器的剩磁越大,起始涌流将越大,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越快。

在原边公共点处电压最大,即 T2 的合闸角为 90° ,T1 的初始磁链 $\Psi_1(0)=0$ 时,改变不同剩磁 $\Psi_2(0)$,通过仿真进一步考察 T2 不同剩磁对 T1 和应涌流产生的影响,图 7 是仿真结果。

可以看出, $\Psi_{1\max}$ 、 $i_{1\max}$ 、 $t_{1\max}$ 以及 $t_{1\text{sat}}$ 的变化规律与以上解析分析的性质相同。当 T2 的剩磁在 $-0.4\sim+0.4$ 变化时,T1 的磁链在 $-1.2\sim+1.2$ 变化,根据饱和特性,低于饱和值,T1 不会产生和应涌流。

3.2 T2 不同合闸角对和应涌流产生的影响

考察剩磁一定的 T2 在不同时刻空投对 T1 和应涌流产生的影响。由式(10)和式(11)的两个直流衰减分量的幅值可以看出,T2 剩磁的方向与合闸时 T1 的初始磁链的方向相反时,有助于起始涌流与和应涌流的产生及增大。

图 8 是 T2 的剩磁 $\Psi_2(0)=0.8$ 不变时,改变不同的合闸时刻(角)的仿真结果。可以看出,它们的变化规律与以上解析分析的性质相同。根据仿真变压器的饱和特性,当运行变压器的磁链绝对值小于

1.2 时,不会饱和,不产生和应涌流。

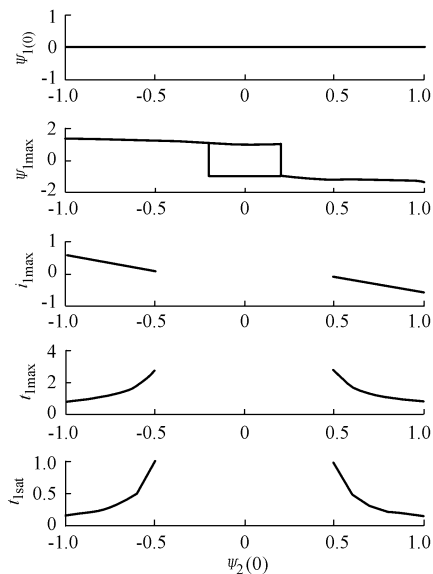


图 7 空投变压器不同剩磁对和应涌流产生的影响

Fig. 7 Effects of residual flux linkage in switched transformer on sympathetic inrush

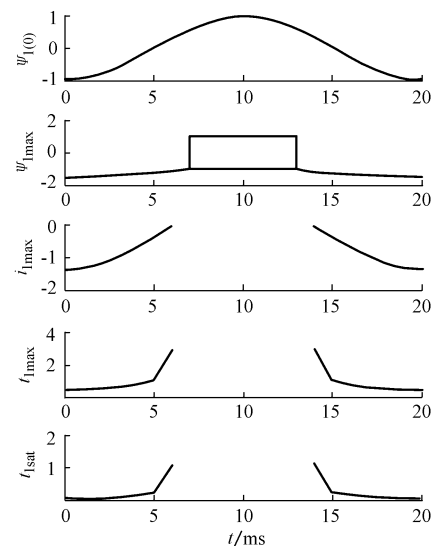


图 8 空投变压器不同合闸时刻对和应涌流产生的影响

Fig. 8 Effects of switching time on sympathetic inrush

3.3 不同线路阻抗对 T1 和应涌流产生的影响

由式(10)可以看出,磁链 $\Psi_1(t)$ 的两个直流分量的符号相反,衰减时间常数为 $\frac{L+2L_0}{R+2R_0}$ 和 $\frac{L}{R}$,当电源与变压器之间的线路很短, L_0 、 R_0 参数很小(近似为 0)时,两个时间常数近似相同,磁链 $\Psi_1(t)$ 只有稳态分量,没有直流衰减分量,T1 不会产生和应涌流。

当电源与变压器之间的线路较长,线路电阻较大时, $\Psi_1(t)$ 的两个直流分量的衰减时间常数不同, R_0 越大时, $\frac{L+2L_0}{R+2R_0}$ 相比 $\frac{L}{R}$ 越小,第 1 项衰减分量衰

减得越快, T1 达到饱和的速度越快, 亦即和应涌流产生及达到最大值的速度越快。当 L_0 越大时, 衰减时间常数 $\frac{L+2L_0}{R+2R_0}$ 越大, 第 1 项衰减得越慢, T1 达到饱和的速度越慢, 亦即和应涌流产生及达到最大值的速度越慢。但如果线路较长阻抗较大, 线路压降较大, 变压器原边的电压降低, 变压器磁链的稳态分量减小, 即工作点远离饱和区, 将降低和应涌流的大小, 起始涌流也将降低。

图 9~图 11 是在 T2 的剩磁为 0.8, 电压过零时合闸, T1 的初始磁链为 $\Psi_1(0) = -1.0$ 的条件下, 分别改变线路长度、只改变线路的电阻参数和只改变线路的电感参数时, 对和应涌流产生的影响仿真结果。可以看出, $\Psi_{1\max}$, $i_{1\max}$, $t_{1\max}$ 以及 $t_{1\text{sat}}$ 的变化规律与以上解析分析的性质相同。

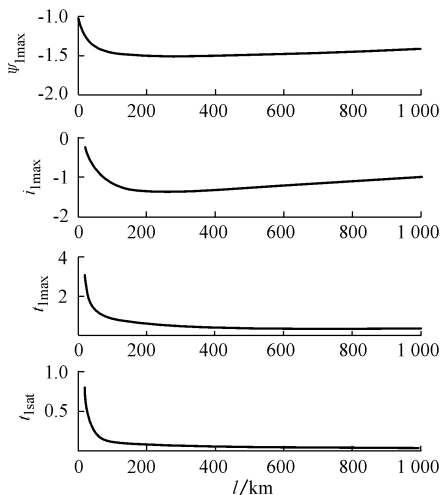


图 9 线路长度变化对和应涌流产生的影响
Fig. 9 Effects of line length on sympathetic inrush

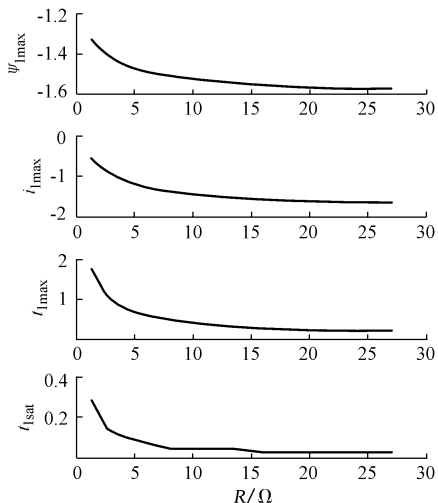


图 10 线路电阻参数变化对和应涌流产生的影响
Fig. 10 Effects of line resistance on sympathetic inrush

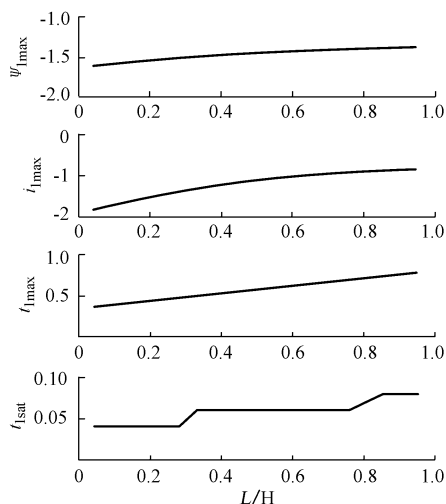


图 11 线路电感参数变化对和应涌流产生的影响
Fig. 11 Effects of line inductance on sympathetic inrush

4 和应涌流引起差动保护误动的原因

仿真和试验结果分析表明, 与起始涌流不同, 和应涌流中二次谐波与基波的比值相对较小, 并且不是在和应涌流最大时最大, 所以采用通常的二次谐波闭锁条件不能完全使保护不误动, 在实际现场中发生过二次谐波没能闭锁保护的误动事例^[9,10]。另一方面, 和应涌流中含有较大的直流衰减分量, 可能使变压器两侧的电流互感器发生暂态饱和, 产生差流, 导致保护误动。在这种情况下, 对于采用二次谐波制动的差动保护, 并联和应涌流与级联和应涌流的危害程度不同。当发生并联和应涌流时, 和应涌流只流过运行变压器的一次绕组, 尽管电流互感器发生暂态饱和, 差流中的二次谐波含量也将较大, 闭锁判据容易满足, 危害较小。但对于级联和应涌流情况, 由于运行变压器的一次绕组流过的是和应涌流与起始涌流之和, 而二次绕组流过的是空投变压器的起始涌流, 当两侧的电流互感器传递特性相同时, 两侧的差流就是和应涌流; 而当涌流中直流衰减分量使电流互感器发生暂态饱和时 (无论哪侧的电流互感器发生暂态饱和), 两侧电流产生相位差, 形成差流, 但由于和应涌流与起始涌流是间隔半个周期交替出现的, 产生的差流将是趋向对称的, 其中二次谐波的含量将比只有和应涌流时低得多, 更易造成差动保护的误动。限于篇幅, 这部分内容将另文给出详细的仿真和试验分析结果。

在实际中, 变压器通常是在多个电源供电方式下运行, 因此当其附近的变压器空投时, 往往是并联和应涌流与级联和应涌流交织在一起, 加剧了变压器两侧电流互感器的传变不一致性和饱和。如图 12 所示, 当 T1 正常运行, T2 空投时, 对于系统电源

在 T1 中将产生并联和应涌流,而对于发电机电源,将产生级联和应涌流。两种涌流共同作用,一方面可能使运行变压器误动,另一方面也可能导致发电机或发变组差动保护误动。

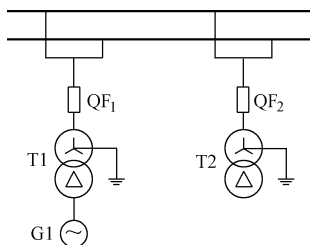


图 12 多电源作用下和应涌流的形式

Fig. 12 Sympathetic inrush under the multi-power supply

5 结论

通过线性化的解析分析和非线性的数值仿真分析两种方法相结合,分析了变压器组并联与级联和应涌流的变化特点及影响因素,得到以下结论:

1)在相同初始合闸条件下,有和应作用较无和应作用时,变压器空载合闸的起始涌流衰减速度衰减得慢。

2)运行变压器和空投变压器的磁链在各自直流衰减分量的作用下,交替达到最大值,它们交替饱和,和应涌流与起始涌流是交替产生的,间隔半个周期。

3)运行变压器磁链中的两个直流衰减分量的符号相反,运行变压器逐渐达到饱和,再逐渐退出饱和,和应涌流是逐渐增大,之后逐渐减小。

4)空投变压器的剩磁越大,越有利于运行变压器和应涌流的产生;空投变压器的剩磁方向与合闸时运行变压器的初始磁链方向相反时,有利于起始涌流与和应涌流的产生及增大。

5)系统电源与变压器之间的线路阻抗越大,越有利于和应涌流的产生,电阻越大,运行变压器达到饱和的速度越快,和应涌流越大;电感越大,运行变压器达到饱和的速度越慢,和应涌流越小。

6)和应涌流中的二次谐波含量低,受和应涌流影响,变压器两侧电流互感器的传递特性不一致,两侧电流产生相位差和差流,差流中的二次谐波含量降低是引起差动保护误动的主要原因。

7)实际现场变压器多电源供电方式下,并联和应涌流与级联和应涌流多交织在一起。

参考文献

[1] 周玉兰,王俊永,舒治淮,等. 2002 年全国继电保护与安全自动装置运行情况. 电网技术, 2003, 27(9): 55—60.
ZHOU Yu-lan, WANG Jun-yong, SHU Zhi-huai et al.

Statistics and Analysis of Operation Situation of Protective Relaying and Automation Devices of Power Systems in China. Power System Technology, 2003, 27(9): 55—60.

[2] 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): 53—59.
TANG Yue-zhong, LIU Yong, GUO Yong et al. Analysis of Some Typical Method for Checking Magnetizing Surge in Transformer. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(9): 53—59.

[3] 朱亚明,郑玉平,叶锋,等. 间断角原理的变压器差动保护的性能特点及微机实现. 电力系统自动化, 1996, 20(11): 36—40.
ZHU Ya-ming, ZHENG Yu-ping, YE Feng et al. Performance and Digital Realization of Transformer Differential Relay Based on Dead Angle Philosophy. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(11): 36—40.

[4] 葛宝明,于学海,王祥珩,等. 基于等效瞬时电感判别变压器励磁涌流的新算法. 电力系统自动化, 2004, 28(7): 44—48.
GE Bao-ming, YU Xue-hai, WANG Xiang-heng et al. A Novel Equivalent Instantaneous Inductance Based Algorithm Used to Distinguish Inrush Currents for Transformer. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(7): 44—48.

[5] 孙志杰,陈云仑. 波形对称原理的变压器差动保护. 电力系统自动化, 1996, 20(4).
SUN Zhi-jie, CHEN Yun-lun. Transformer Differential Protection Based on the Characteristic Analysis of the First and Second Half Cycle of the Magnetizing Inrush Current. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(4).

[6] 王祖光. 间断角原理变压器差动保护. 电力系统自动化, 1979, 3(1).
WANG Zu-guang. Transformer Differential Protection Based on Dead Angle Philosophy. Automation of Electric Power Systems, 1979, 3(1).

[7] 周云波,曹良. 一起主变压器差动保护误动事故及防止对策. 电网技术, 2001, 25(12): 71—74.
ZHOU Yun-bo, CAO Liang. Inspection and Analysis of a Maloperation of Transformer Differential Protection and Its Preventive Measures. Power Systems Technology, 2001, 25(12): 71—74.

[8] 陈学珍. 变压器差动保护误动分析. 电气开关, 2002, (4): 11—12.
CHEN Xue-zhen. Malfunction Analysis of Differential Protection of a Transformer. Electric Switchgear, 2002, (4): 11—12.

[9] 孙虎,高丽杰. 两台三绕组变压器并列运行的差动保护. 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. Sci/Tech Information Development & Economy, 2003, 13(4): 127—128.

[10] 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 Huai-zhi, SUN Xian-chu, CHANG Lin. Test and Study on the Effect of Surge Current on Differential Protection for Transformer. Relay, 2001, 29(7): 52—54.

[11] 李德佳. 微机型变压器差动保护误动原因分析与对策. 继电器, 2004, 32(5): 56—59.
LI De-jia. Analysis and Countermeasure of Maloperation of the Microprocessor Based Transformer Differential Protection. Relay, 2004, 32(5): 56—59.

- [12] 王维俭. 发电机变压器继电保护应用. 北京: 中国电力出版社, 1998.
WANG Wei-jian. Application of Generator and Transformer Protection. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [13] 李宏任. 实用继电保护. 北京: 机械工业出版社, 2002.
LI Hong-ren. Practical Relay Protection. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [14] HAYWARD C D. Prolonged Inrush Current with Parallel Transformers Affect Differential Relaying. AIEE Trans, 1941, 60: 1096—1101.
- [15] SAIED M M. A Study on the Inrush Current Phenomena in Transformer Substations. In: Proceedings of Industry Applications Conference & Thirty-sixth IAS Annual Meeting, Vol. 2. Piscataway (NJ): IEEE, 2001. 1180—1187.
- [16] BRONZEADO H S, BROGAN P B, YACAMINI R. Harmonic Analysis of Transient Currents During Sympathetic Interaction. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 2051—2056.
- [17] BRONZEADO H S, YACAMINI R. Phenomenon of Sympathetic Interaction Between Transformers Caused by

Inrush Transients. IEE Proceedings—Science, Measurement and Technology, 1995, 142(4): 323—329.

- [18] 陈曾田. 电力变压器保护. 北京: 电力工业出版社, 1981.
CHEN Zeng-tian. Power Transformer Protection. Beijing: Electric Power Industry Press, 1981.
- [19] 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. 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. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(19): 57—60.

毕大强(1973—), 男, 博士, 主要从事电气主设备继电保护研究. E-mail: bidaqiang@mail.tsinghua.edu.cn

王祥珩(1940—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电机分析和控制、电机故障及保护的研究。

李德佳(1964—), 男, 高级工程师, 主要从事继电保护的调试和运行工作。

Theory Analysis of the Sympathetic Inrush in Operating Transformers

BI Da-qiang¹, WANG Xiang-heng¹, LI De-jia², YU Gao-wang³, WANG Zan-ji¹, WANG Wei-jian¹

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2. Nuclear Power Qinshan Joint Venture Company Limited, Haiyan 314300, China)

(3. Protection & Automation Business Dept of XJ Electric Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: A mathematical model is developed for two transformers in parallel and cascade operation to analyze the variation of their flux linkages based on the linearized magnetic circuit. The mathematical representations of flux linkage in the operating and energized transformer are deduced and it is analytically explained that the operating transformer may be saturated and the sympathetic inrush is produced and affected in it, after another adjacent transformer is energized in parallel or in cascade. At the same time, by adopting the piecewise linearized magnetization characteristics, the influences of such factors as the residual flux linkage, switching time, parameters of the connected power line on the amplitude of sympathetic inrush and the time of transformer saturation are further analyzed by numerical simulation. The analytic conclusions are verified by the results obtained. These analyses provide a theoretical basis to the investigation on the mal-operation of transformer differential protection and an understanding of the sympathetic inrush itself.

This work is supported by Electrical Power Science and Technology Foundation of XUJI.

Key words: transformer; saturation; initial inrush; sympathetic inrush

第十届全国保护和控制学术研讨会征文通知

中国电机工程学会继电保护专委会定于2005年四季度召开第十届全国保护和控制学术研讨会,特向全国征集学术论文,现将征文有关事项通知如下。

1. 征文内容:①1 000 kV交流特高压和800 kV直流输电的保护和控制技术研究;②保护和控制新理论、新技术的发展和应用;③高压直流输电保护和控制技术及应用;④电网安全稳定控制技术;⑤保护信息管理及故障信息处理;⑥厂站自动化系统(变电站自动化系统、火电厂自动化系统);⑦电子式互感器理论及应用技术;⑧保护和控制通信技术;⑨一次设备智能化技术和应用;⑩保护装置、厂站自动化系统运行经验及事故分析;⑪保护和控制设备结构及电磁兼容;⑫其他。

2. 征文办法:论文必须未在全国性学术会议或公开发行的刊物上发表过;论文格式参照《电力系统自动化》杂志标准格式,图表清晰、规范;论文篇幅不超过6 000字(含空格,图表);来稿请务必写明:作者简介、地址、单位、邮编、联系电话、电子邮件;请用电子邮件投稿并使用回执确认收到投稿;征文截止日期为2005年8月30日,经专家评审后,发论文录用通知,出版论文集;开会具体时间及地点另行通知。

3. 联系方式:南京江宁开发区胜太路29号中国电机工程学会继电保护专委会 黄健、王中元;邮编:211100;联系电话:(025)52102449,52108783;E-mail:2005RPTC@nari-relays.com。