

现代变压器的励磁涌流及过励磁电流 对差动保护的影响

电力部南京自动化研究所 王祖光

内 容 提 要

电力变压器在空载投入时流入差动保护的电流可为对称性的, 这样的涌流对带速饱和变流器的机电型差动保护和间断角原理的晶体管差动保护而言, 是整定动作电流或闭锁角的主要判据。本文对于涌流特别是对称性涌流对此二种原理差动保护的影响进行了分析计算。

变压器在过电压或低频率下运行时, 励磁电流将增大, 即所谓过励磁电流。本文分析了过励磁电流对两种原理差动保护的影响。

一、引 言

带速饱和变流器的差动保护至今仍在我国大量采用。其躲过变压器励磁涌流的原理为利用涌流中的非周期分量。但是在某些条件下流入差动继电器的涌流可能为完全对称性的, 这就要靠动作电流本身来躲过。在现场变压器空载投入时, 差动保护误动作的情况时有发生, 对称性涌流可能是引起误动的主要原因。

我国自己研制成功的间断角原理晶体管差动保护已投入正式生产, 正被日益广泛采用。分析指出(文献1), 变压器空载投入时, 继电器电流的最小间断角也发生在对称性涌流的情况下。

变压器在过电压或低频率下运行时, 由于铁芯饱和, 励磁电流增大, 间断角减小。这样的过励磁电流也可能使差动保护动作。

近年来, 我国生产的高压, 大容量变压器(包括500千伏的变压器)采用了晶粒取向的冷轧硅钢片, 设计工作磁通密度高达17000高斯。这就使得励磁涌流和过励磁电流更易引起差动保护动作。

下面将对励磁涌流及过励磁电流对两种原理差动保护的影响进行分析计算。

二、对称性励磁涌流的间断角和有效值

三相变压器一般都采用Y/△结线, 而差动保护用的电流互感器则相应地为△/Y结

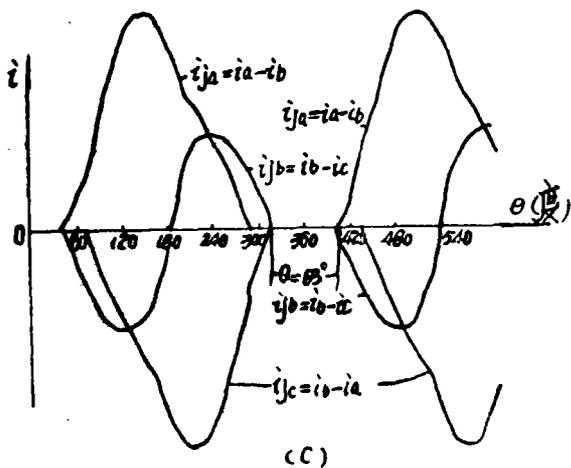
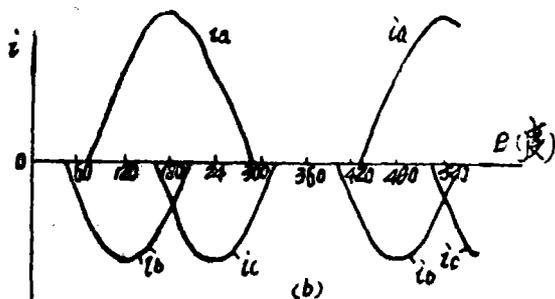
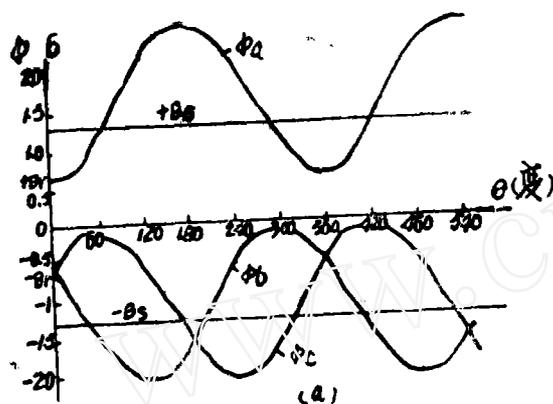


图2 产生最小间断角和最大对称性继电器电流的磁通和涌流
a) 磁通
b) 相电流
c) 继电器电流

线, 也就是说, 流入一相继电器的电流为变压器两相电流之差, 如图1示。分析指出(文献1), 在以下条件下继电器电流将有最小间断角: 变压器a相剩磁为 B_r , b、c相剩磁为 $-B_r$, 在a相电压瞬时值为零 ($\alpha = 0$) 时投入系统。这也是产生最大周期性继电器电流的条件。此情况下的磁通和涌流波形示于图2。

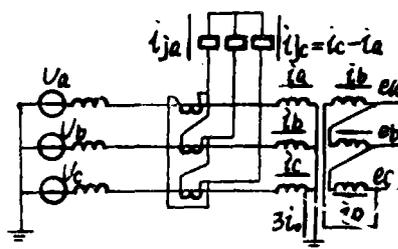


图1 流入差动继电器的涌流

变压器b相和c相的涌流分别为:

$$\left. \begin{aligned} i_b &= \frac{\sqrt{2}U}{x} \left[A_b - \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ i_c &= \frac{\sqrt{2}U}{x} \left[A_c - \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \end{aligned} \right\} (1)$$

式中: U —— 系统电压有效值;
 x —— 空载投入回路的总阻抗, 包括系统阻抗和变压器阻抗;

$$A_b = A_c = -0.5 - \frac{B_r - B_m}{B_m} \quad (2)$$

B_r —— 饱和磁通密度;

B_m —— 工作磁通密度。

对称性继电器电流 i_{jb} 的间断角可由下式算出:

$$\theta_{i0} = \frac{\pi}{3} + 2\sin^{-1} A_1 \quad (3)$$

变压器铁芯的工作磁通密度和剩余磁通密度是确定涌流间断角和数值的主要因素。关于剩余磁通的数值，众说不一。一些文献提到它可能达到工作磁通密度的0.6~0.9倍（文献2、3、4）。但是，这与现场试验结果是不相符合的。事实上，上述剩磁密度只不过是理论上的推测或通过不合实际情况的试验（断开直流励磁）得到的。分析及现场试验都证明，在变压器由系统渐开时总有储存在变压器的电感及各种设备的分布电容中的能量产生的振荡，其去磁作用使剩磁大大减小。苏联对330~750千伏变压器进行了大量的现场测试，所得的最大剩磁仅为0.36 B_m ，并证实了上述去磁作用的存在，因此，推荐对于冷轧硅钢片取 $B_r = 0.36 B_m$ ，对热轧硅钢片取 $B_r = 0.2 B_m$ （文献5）。根据我们在现场录得的大量的涌流波形的分析计算，我们认为文献5所推荐的数值是比较切合实际的，因此下面将采用它作为分析计算的依据。

图3为变压器铁芯冷轧硅钢片 Z_{10} 的磁化特性曲线。曲线可用两段直线构成的理想

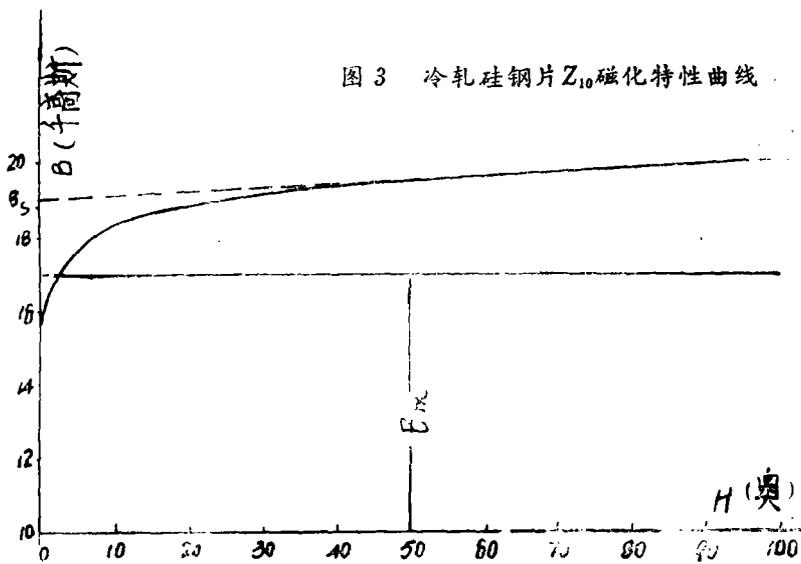


图3 冷轧硅钢片 Z_{10} 磁化特性曲线

特性代表。第一段为未饱和区，以座标纵轴代表；第二段为代表饱和区的直线（虚线），其斜度同深饱和处的斜度相差不超过3~5%（文献6）。两段直线的交点即为饱和磁通密度 B_s 。这里实际 $B_s = 19000$ 高斯，即 $B_s \approx 1.12 B_m$ 。在以上 B_m ，

B_r 和 B_r 下，由(3)式可得最小间断角 $\theta_{i0} = 91.3^\circ$ 。我们对约20台不同容量的变压器的现场空载投入试验所得的对称性涌流最小间断角为 127° 。这一方面说明理论计算所根据的不利条件在现场是很难碰到的，另一方面也说明所采用的剩磁密度并不偏低。

现有保护装置的闭锁角整定在 65° 左右，并采取了躲过对称性涌流的措施，在上述间断角下不会误动作。

在我国500千伏变压器的某些设计中，在变压器的 Δ 结线绕组每相端部装设了电流互感器并相互接成Y形，与其他侧Y形结线的电流互感器构成差动回路。应当指出，这样的结线对间断角原理差动保护是很有利的，因继电器仅流过一相绕组的涌流，其间断角 θ_i 为：

$$\theta_i = \pi - 2\sin^{-1} A \quad (4)$$

在前述条件下， a 相涌流最小间断角 $\theta_j = 153.4^\circ$ 。“助增”作用可使间断角稍减小，但对继电器的闭锁角 65° 而言，裕度是很大的。

对于带速饱和变流器的差动保护，采用上述接线则可以大大提高灵敏度，因整定其动作电流时不需考虑对称性涌流。由于有“直流助磁特性”，为躲过偏于时间轴一侧的涌流，其整定值可以小于变压器的额定电流。

为了计算涌流的有效值，还必须知道(1)式中的感抗 x ：

$$X = X_c + X_T \quad (5)$$

式中： X_c ——变压器空载投入侧的系统感抗；

X_T ——变压器空载投入绕组的感抗。为便于计算，可把铁芯饱和后的绕组看成空心的电感线圈，如下计算：

$$X_T = \frac{w_{*0} w^2 s}{l} \quad (6)$$

式中： w ——绕组匝数；

s ——绕组的平均截面；

l ——绕组长度。

无绕组尺寸时可近似取

$$X_T = X_{T_{in}} + X_s \quad (7)$$

式中： $X_{T_{in}} = 10 \sim 14\%$ ——变压器内层绕组的感抗，小值对应于 6KV ，电压愈高其值愈大；

X_s ——空载投入绕组对内层绕组间的短路阻抗。

当变压器涌流 i_b 同 i_c 有重叠区时(图4, a)， i_{jb} 的有效值可由下式计算：

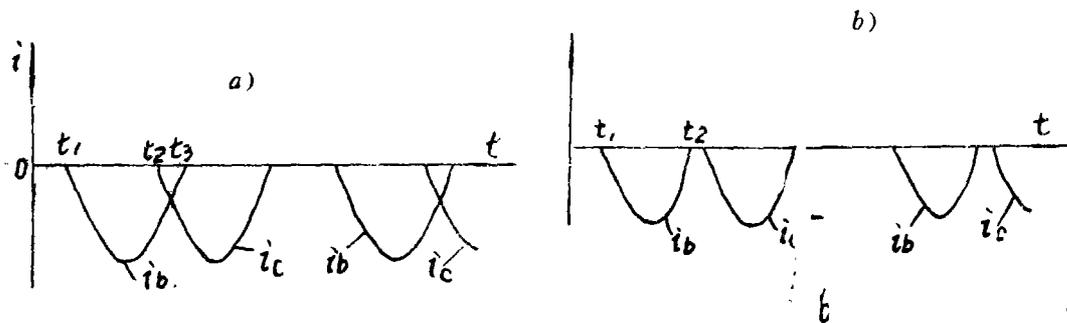


图4 产生对称性继电器电流的变压器 b 、 c 相涌流

a) i_b 、 i_c 有重叠区 b) i_b 、 i_c 无重叠区

$$I_j = \sqrt{\frac{2}{T} \left[\int_{t_1}^{t_2} i_b^2 dt + \int_{t_2}^{t_3} (i_b - i_c)^2 dt \right]}$$

以(1)式代入，得：

$$I_j = \sqrt{\frac{2I_m^2}{T} \left\{ \int_{t_1}^{t_2} \left[A - \cos\left(wt - \frac{2}{3} \pi \right) \right]^2 dt + \int_{t_2}^{t_3} \left[\cos\left(wt - \frac{2}{3} \pi \right) \right]^2 dt \right\}}$$

$$\begin{aligned}
 & -\cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)]^2 dt \\
 = & I_m \sqrt{\frac{2}{T}} \left\{ \left[\left(A^2 + \frac{1}{2} \right) t - \frac{2A}{\omega} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) + \frac{1}{4\omega} \sin 2\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \right]_{t_1}^{t_2} \right. \\
 & \left. + 3 \left[\frac{t}{2} - \frac{1}{4\omega} \sin 2\omega t \right]_{t_2}^{t_3} \right\} \quad (8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{式中: } I_m &= \frac{\sqrt{2}U}{\lambda} \\
 t_1 &= \frac{2\pi}{3\omega} - \frac{\cos^{-1}A}{\omega} \\
 t_2 &= \frac{2\pi}{3\omega} + t_1 \\
 t_3 &= \frac{\pi}{\omega} = 0.01''
 \end{aligned} \quad (9)$$

$$A = A_b = A_c$$

如 i_b 、 i_c 无重叠区 (图 4、b), 则 i_{jb} 的有效值为:

$$I_j = I_m \sqrt{\frac{2}{T} \left[\left(A^2 + \frac{1}{2} \right) t - \frac{2A}{\omega} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) + \frac{1}{4\omega} \sin 2\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \right]_{t_1}^{t_2}} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 \text{式中: } t_1 &= \frac{2\pi}{3\omega} - \frac{\cos^{-1}A}{\omega} \\
 t_2 &= \frac{4\pi}{3\omega} - t_1
 \end{aligned} \quad (11)$$

对于采用冷轧硅钢片的现代大容量变压器, $B_s = 1.12 B_m$, $B_r = 0.35$, 由 (2) 式可得 $A = 0.27$ (注意在计算时 B_s 、 B_r 取负值)。由于 $\theta_{jb} = 91.3^\circ < 120^\circ$, 故 b 、 c 相涌流有重叠区, i_{jb} 的有效值应采用 (8) 式计算。以上数据代入 (9) 及 (8) 式, 可得 $I_j = 0.47 I_m$ 。如以变压器额定电流的倍数表示, 并考虑电流互感器或变压器三角形结线的结线系数, 可得:

$$\frac{I_j}{I_n} = 0.47 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}(X_c + X_T)} \quad (12)$$

(12) 式可作为采用冷轧硅钢片的变压器的机电型差动保护整定计算时的参考。对于大容量的高压变压器, 如取标么值 $X_T = 0.225$, 在不同的系统阻抗 X_c (标么值) 下, 由 (12) 式得到继电器电流对变压器额定电流的倍数如下表:

表 1. 不同 X_c 时的 I_j/I_n

x_c	0	0.05	0.1	0.2
$\frac{I_j}{I_n}$	1.7	1.39	1.18	0.9

如通过现场变压器空载投入试验，已录得对称性涌流的波形（继电器电流），也可由波形的间断角 θ_i 和峰值 I_i ，计算 A 及 I_m ，再计算电流有效值：

$$\left. \begin{aligned} A &= \sin\left(\frac{\theta_i}{2} - \frac{\pi}{6}\right) \\ I_m &= \frac{I_i}{1-A} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

一般情况下， $\theta_i \geq 120^\circ$ ，利用(10)式计算，积分区间为由 $t_1 = \frac{\theta_i}{2\omega}$ 至 $t_2 = \frac{4\pi}{3\omega} - t_1$ 。例如我们在现场所进行的大量空载投入试验所得的最大对称性继电器电流为 $I_i = 3.5I_n$ ， $\theta_i = 127^\circ$ （7.5MVA变压器，35/10.5KV，10.5KV侧投入）。由(13)式得 $A = 0.55$ ， $I_m = 7.77I_n$ ，并有 $t_1 = 0.0035''$ ， $t_2 = 0.0098''$ 。代入(10)式，得 $I_j = 1.38I_n$ 。

由以上分析计算可知，为使带速饱和变流器的差动保护躲过涌流，一般情况下可整定其动作电流为1.3~1.5倍变压器额定电流。个别情况下，当采用冷轧硅钢片的中、低压，中小容量变压器投入大系统中时，差动继电器的动作电流不应小于1.5~1.7倍变压器额定电流。

三、过励磁电流的间断角和有效值

变压器过励磁时的磁通及励磁电流示于图5。曲线1为正常运行磁通，曲线2为过励磁磁通。可以认为，在磁通密度超过饱和磁通密度部分，变压器绕组相当于一个空心线圈，因而有较大的励磁电流；而在未达到饱和磁通密度时励磁电流可以忽略，这段时间即为间断角 θ_i 。

根据图5，变压器过励磁电流的间断角 θ_i 可由下式算出：

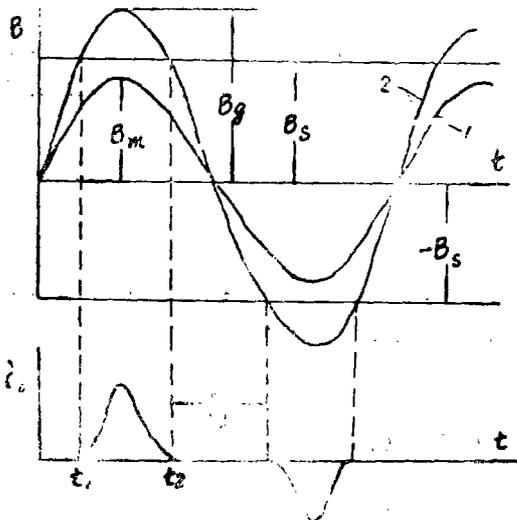


图5 变压器过励磁时的磁通和电流

$$\begin{aligned} \theta_i &= 2\sin^{-1} \frac{B_i}{B_s} \\ &= 2\sin^{-1} \frac{k_s}{k_s} \end{aligned} \quad (14)$$

式中： k_s ——饱和磁通密度对工作磁通密度的倍数；

k_s ——过励磁倍数。

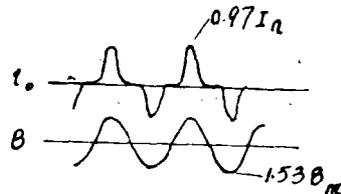


图6 500千伏变压器过励磁电流录波图

图6为500千伏，206000千伏安单相变压器在过励磁试验时拍摄的过励磁电流录波图(文献6)。变压器铁芯为冷轧硅钢片M6X, $k_t = 1.2$, $Z_t = 0.126$, 过励磁倍数 $k_e = 1.53$ 。实际间断角约为 92° 。

流入差动继电器的电流为两相过励磁电流之差, $i_{j0} = i_a - i_b$ (图7)。故继电器电流间断角为:

$$\theta_{j0} = \theta_i - \frac{\pi}{3} \quad (15)$$

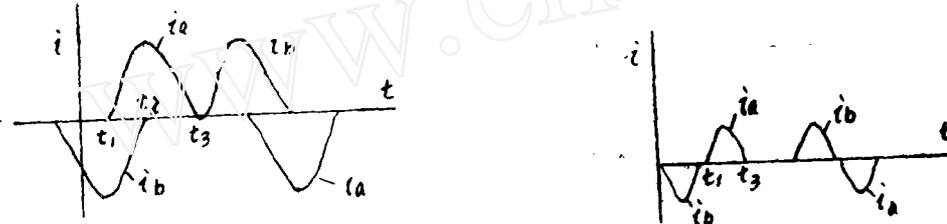


图7 a、b相过励磁电流波形图

a) i_a 、 i_b 有重叠区; b) i_a 、 i_b 无重叠区

图8为 $k_t = 1.12$ 情况下, 根据(14)、(15)式计算得到继电器电流间断角对过励磁倍数的关系曲线。在所述条件下, 当过励磁达1.26倍时, 间断角原理差动保护在原理上可能动作。实际上由于继电器在构成原理上采取了一些措施(文献1), 其动作时的过励磁倍数将大于上述理论值。

应当指出, 如在变压器 Δ 结线的绕组引出端装设电流互感器, 而且各侧电流互感器采用Y/Y结线, 则继电器电流在过励磁时的间断角将较(15)式大 60° 。由图

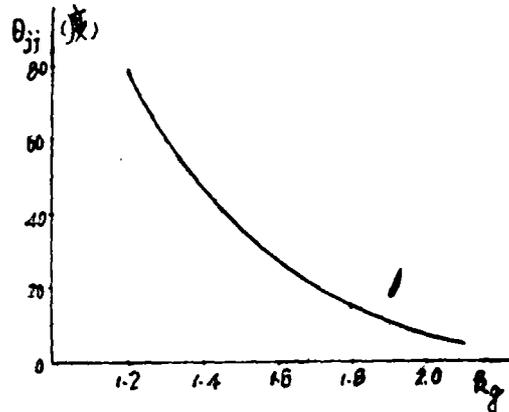


图8 变压器过励磁时的继电器电流间断角8可知, 此时使继电器动作的过励磁倍数约为2.1倍, 即实际上不会动作。

下面计算过励磁时继电器电流的有效值。在 i_a 、 i_b 有重叠区时(图7, a), a相继电器电流有效值为:

$$\begin{aligned} I_{j0} &= \sqrt{\frac{1}{T} \left[2 \int_{t_1}^{t_2} (i_a - i_b)^2 dt + 4 \int_{t_2}^{t_3} i_a^2 dt \right]} \\ &= \sqrt{\frac{1}{T} \left\{ 2 \int_{t_1}^{t_2} \left[I_m \sin \omega t - I_m \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) - \frac{2k_e I_m}{k_e} \right]^2 dt \right.} \\ &\quad \left. + 4 \int_{t_2}^{t_3} \left(I_m \sin \omega t - k_e \frac{I_m}{k_e} \right)^2 dt \right\}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= I_m \sqrt{\frac{1}{T} \left\{ 2 \left[\left(\frac{3}{2} + \frac{4k_i^2}{k_s^2} \right) t - \frac{3}{4\omega} \sin 2 \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) + \frac{4\sqrt{3}k_s}{\omega k_s} \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) \right] \right\}_{t_1}^{t_2}} \\
 &\quad + 4 \left[\left(\frac{1}{2} + \frac{k_i^2}{k_s^2} \right) t - \frac{1}{4\omega} \sin 2\omega t + \frac{2k_s}{\omega k_s} \cos \omega t \right]_{t_2}^{t_3} \Bigg\} \quad (16)
 \end{aligned}$$

在 $\theta_i < \frac{2\pi}{3}$ 时, i_a 、 i_b 无重叠区 (图7, 6), 继电器电流为:

$$I_{i_a} = I_m \sqrt{\frac{4}{T} \left[\left(\frac{1}{2} + \frac{k_i^2}{k_s^2} \right) t - \frac{1}{4\omega} \sin 2\omega t + \frac{2k_s}{\omega k_s} \cos \omega t \right]_{t_1}^{t_3}} \quad (17)$$

(16)、(17)式中: $t_1 = \left(\sin^{-1} \frac{k_s}{k_i} \right) / \omega$

$$t_2 = \frac{2\pi}{3} - t_1$$

$$t_3 = \frac{\pi}{\omega} - t_1$$

I_m ——同(9)式

在 $X_c = 0$ (无穷大系统), $X_T = 0.225$, $k_i = 1.12$ 条件下, 根据(16)、(17)式算得继电器电流对额定电流 (已考虑电流互感器或变压器三角形结线的结线系数) 的倍数示于图9。曲线的陡峻上升部分为由(17)式至(16)式的过渡部分。在非无穷大系统或 X_T 为其他数值时, 电流倍数按总电抗 $X_c + X_T$ 的反比例变化。

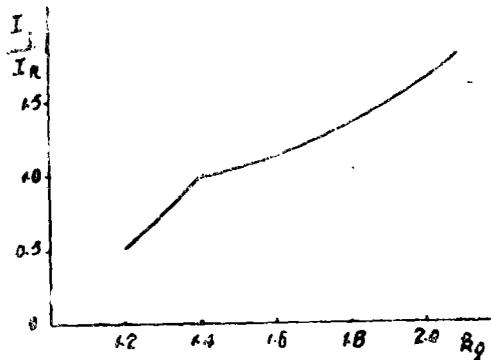


图9 不同过励磁倍数下的继电器电流比较图9%、表1可知, 在电流互感器为Y/△结线时, 如带速饱和变流器的差动保护能可靠躲过对称性励磁涌流, 则在允许的过励磁下不会误动作。

如在变压器的△结线各绕组端部配置电流互感器且差回路电流互感器采用Y/Y结线, 由于继电器电流同图9相比相差不太大, 且不需考虑对称性涌流, 过励磁电流可能成为整定差动保护的条件。此时继电器电流为(17)式值以 $\sqrt{2}$ 除之。

四、结 论

1. 间断角原理差动保护在现用整定值下可以可靠躲过现代变压器的励磁涌流。如保护回路的电流互感器为Y/△结线, 继电器可能在一定的过励磁倍数下动作。

2. 在电流互感器为Y/△结线的差动回路中, 带速饱和变流器的差动保护为躲过现代变压器的对称性励磁涌流, 其动作电流不应小于1.3~1.7倍变压器额定电流。在此整定值下, 一般的过励磁不会引起差动保护动作。

3. 可在变压器的△结线绕组每相端部装设电流互感器, 从而将差动保护的电流互感

器回路接成Y/Y。这样的接线方式对于两种原理的差动保护躲过涌流和过励磁电流都是很有利的。

参 考 文 献

1. 王祖光, “间断角原理变压器差动保护”, “电力系统自动化”, 1979, №, 1.
2. W.K.SONNEMANN, C.L.WAGNER AND G.D.ROCKFELLER. MAGNETISING PHENOMENON IN TRANSFORMER BANKS, AIEE TRANS. VOL, 77. 1958, PT. 3.
3. WULFO SCHMIDT. UBER DEN EINSCHALTSTROM BEI DREHSTRANSFORMAOREN ETZA, BD. 82, N. 15, 1961.
4. А.Д.ДРОЗДОВ, В.А.БОРНСОВ “МЕТОДЫ РАСЧЕТА БРОСКА НАМАГНИЧИВАЮЩЕГО ТОКА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ.” ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, 1968, №.10.
5. М.Х.ЗИЕРМАН, Н.П.КАМНЕВА, “ОБ ОСТАТОЧНОЙ ИНДУКЦИЙ В ТРАНСФАРМАТОРАХ 330~750” КВ ЭЛЕТРИЧЕСТВО, 1972, № 5.
6. М.Х.ЗИХЕРМАН, “ХАРАКТЕРИСТИКИ НАМАГНИЧИВАНИЯ МОШНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ.” ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, 1972, № 3.