

变压器差动保护的电流分布及灵敏系数计算

广西大学电气工程系 易正民

摘要 本文从同一铁芯上诸线圈的磁势平衡原理写出Y/△—11接法变压器在各种短路下变压器及其差动保护的电流分布,从中引出各不对称短路下,差动保护的起动电流,进入保护的“等效一次短路电流”,进入继电器的“等效二次短路电流”以及与之相应的灵敏系数计算的三种方法。“等效”即为不对称短路下的有关参数,等效为对称短路下的有关参数。从而引出了“等效系数”的概念。揭示了通常所用的所谓“保护接线系数”的实质。进而指出上述“电力工程设计手册”、“水电站机电设计手册”在灵敏系数计算上的错误。并以实例作了进一步的验证。对于正确计算变压器差动保护各种电流,正确整定计算以及消除以往错误计算给电力系统带来的潜在威胁,提高电力系统的安全运行无疑是有价值的。

关键词 变压器、差动保护、灵敏系数

电力系统继电保护灵敏系数的校验,是使保护在其保护范围内短路时,能灵敏反映、可靠动作的重要保证。作为变压器差动保护,灵敏系数的检验,关键在于正确求出各种内部短路下流入保护的一次短路电流和流入继电器的二次短路电流。或者是正确求出各种短路下保护一次起动电流和继电器的二次起动电流。“电力工程设计手册”、“水电站机电设计手册”在变压器差动保护灵敏系数计算上的错误,也就出在这里。

为正确计算变压器差动保护的灵敏系数,现就以下三个问题进行讨论。

1 Y/△—11接法变压器差动保护在各种短路下电流的分布

Y/△—11接法变压器的差动保护,为消除其原、副方电流 30° 的相位差,一般将变压器Y侧的电流互感器接成△形其变比为 n_Y ,而将变压器△侧的电流互感器接成Y形,其变比为 n_Δ 。为消除变压器变比 n_B 及两组电流互感器接法不同带来的不平衡电流,两组互感器的变比应满足: $n_Y = \frac{\sqrt{3}}{n_B} \cdot n_\Delta$ 。变压器线圈的匝数比应满足: $\frac{\omega_Y}{\omega_\Delta} = \frac{n_B}{\sqrt{3}}$ 。在短路电流计算中都是将变压器各侧的阻抗、电流、电压归算到某一侧电压来计算的,这时相当于变比 $n_B = 1$ 。这样: $n_Y = \sqrt{3} \cdot n_\Delta$, $\omega_\Delta = \sqrt{3} \omega_Y$ 。在此情况下,变压器差动保护接线如图1所示。

根据变压器、电流互感器的极性及同一铁芯上各线圈产生的磁势平衡的原理,(这里忽

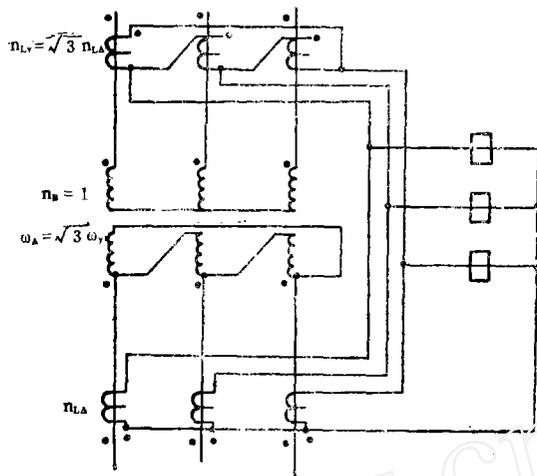


图 1

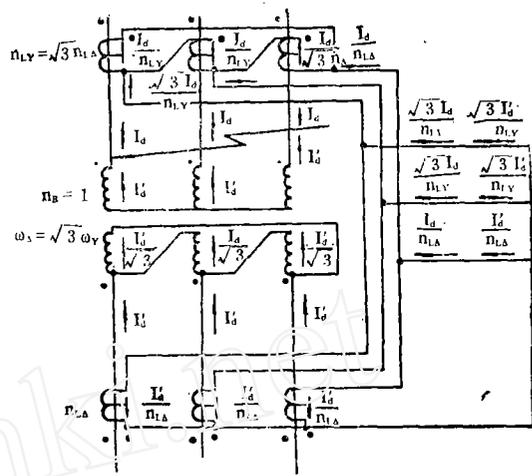


图 2

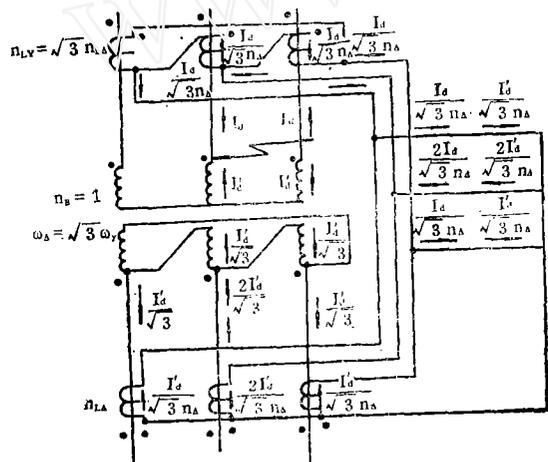


图 3

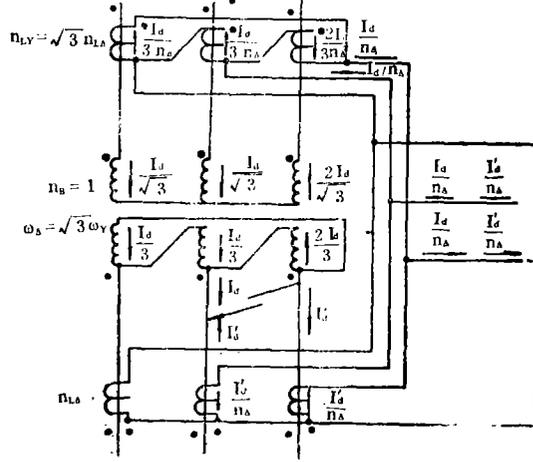


图 4

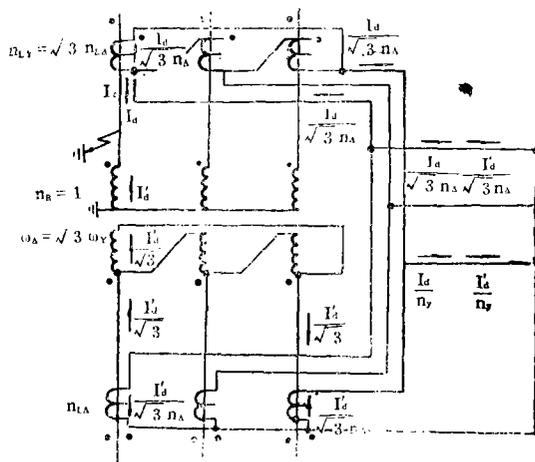


图 5

略励磁磁势),很简便地得出各种短路下的电流分布如图 2、3、4、5 所示。(图中的电流均为相量,且对三相短路省略了 B 相的 a^2 、C 相的 a) 由电流分布图可看出:

a.1 无论短路类型或短路地点在那一侧,各侧进入差动回路的电流与其对应侧短路电流之比值是相同的。因

此，进入差动回路的总电流，可看成是总的短路电流集中从其中任一侧供给时，在差动回路产生的电流。如图 2 所示，三相短路时流入差动回路的总电流：

$$\begin{aligned} I_{j \cdot \Sigma} &= \frac{1}{n_{\Delta}} I_d + \frac{1}{n_{\Delta}} \cdot I_d' = \frac{1}{n_{\Delta}} (I_d + I_d') \\ &= \frac{1}{n_{\Delta}} \cdot I_{d \cdot \Sigma} = \frac{\sqrt{3}}{n_Y} \cdot I_{d \cdot \Sigma} \end{aligned}$$

b. 各种短路下，进入差动回路的总电流 $I_{j \cdot \Sigma}$ 与短路电流 $I_{d \cdot \Sigma}$ 之比列于表 1：

表 1

	$I_{j \cdot \Sigma} / I_{d \cdot \Sigma}$	
	以 Δ 侧电压为基础	以 Y 侧电压为基础
Y 侧 (Δ 侧) 三相电路	$\frac{1}{n_{\Delta}}$	$\frac{\sqrt{3}}{n_Y}$
Y 侧两相短路	$\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{n_{\Delta}}$	$\frac{2}{n_Y}$
Δ 侧两相短	$\frac{1}{n_{\Delta}}$	$\frac{\sqrt{3}}{n_Y}$
Y ₀ 侧单相接地短路	$\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{n_{\Delta}}$	$\frac{1}{n_Y}$

众所周知，继电器的起动电流是与短路类型无关的，总是等于整定的继电器的起动电流 $I_{d2 \cdot J}$ 。即： $I_{d2 \cdot J}^{(3)} = I_{d2 \cdot J}^{(2)} \cdot Y = I_{d2 \cdot J}^{(2)} \cdot \Delta = I_{d2 \cdot J}^{(1)} \cdot Y = I_{d2 \cdot J}$ (1)

整定计算是按对称下进行的，保护的起动电流 I_{d2} ，实际上是三相对称下的一次起动电流或者说是三相短路下的一次起动电流 $I_{d2}^{(3)}$ ，即 $I_{d2} = I_{d2}^{(3)}$ ，它与继电器起动电流有如下关系：

$$I_{d2 \cdot J} = \frac{K_{j \cdot \Sigma}}{n_L} \cdot I_{d2}$$

$K_{j \cdot \Sigma}$, n_L ——分别为计算侧电流互感器的接线系数和变比。

根据上述各种短路下，进入继电器的电流 I_j 与一次短路电流 I_d 之间的关系以及保护起动与继电器起动相对应的原则，由 (1) 式有下面关系：

$$\begin{aligned} \frac{\sqrt{3}}{n_Y} \cdot I_{d2}^{(3)} &= \frac{2}{n_Y} \cdot I_{d2}^{(2)} \cdot Y = \frac{\sqrt{3}}{n_Y} \cdot I_{d2}^{(2)} \cdot \Delta \\ &= \frac{1}{n_Y} \cdot I_{d2}^{(1)} \cdot Y = \frac{K_{j \cdot \Sigma} \cdot Y}{n_Y} I_{d2} \\ &= \frac{\sqrt{3}}{n_Y} I_{d2}^{(3)} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{或：} \frac{1}{n_{\Delta}} I_{d2}^{(3)} &= \frac{2}{\sqrt{3} n_{\Delta}} \cdot I_{d2}^{(2)} \cdot Y = \frac{1}{n_{\Delta}} \cdot I_{d2}^{(2)} \cdot \Delta = \frac{1}{\sqrt{3} n_{\Delta}} \cdot I_{d2}^{(1)} \cdot Y \\ &= \frac{K_{j \cdot \Sigma} \cdot \Delta}{n_{\Delta}} \cdot I_{d2} = \frac{1}{n_{\Delta}} \cdot I_{d2}^{(3)} \end{aligned} \quad (3)$$

由 (2), (3) 式均可得：

$$I_{d2}^{(3)} = \frac{2}{\sqrt{3}} I_{d2}^{(2)} \cdot Y = I_{d2}^{(2)} \cdot \Delta = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{d2}^{(1)} \cdot Y = I_{d2} \quad (4)$$

$$\text{即: } I_{d2}^{(2)} \cdot Y = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{d2}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{d2}$$

$$I_{d2}^{(2)} \cdot \Delta = I_{d2}^{(3)} = I_{d2}$$

$$I_{d2}^{(1)} \cdot Y = \sqrt{3} I_{d2}^{(3)} = \sqrt{3} I_{d2}$$

$I_{d2}^{(3)}$, $I_{d2}^{(2)} \cdot Y$, $I_{d2}^{(2)} \cdot \Delta$, $I_{d2}^{(1)} \cdot Y$ ——分别为差动保护三相短路, Y侧两相短路, Δ 侧两相短路, Y侧单相接地短路时保护的一次起动电流。即各种短路下, 当其短路电流达到其相应的一次起动电流时, 保护即动作。

由此可知, 在不同短路下, 继电器的起动电流是相同的, 而保护的一次起动电流则与短路类型和发生在那一侧有关。

2 灵敏系数校验

灵敏系数的校验, 按原理有三种: 一是一次短路电流与保护起动电流之比, 二是进入继电器的电流与继电器起动电流之比; 三是进入继电器的电流产生的磁势(安匝)与继电器动作磁势(安匝)之比。

2.1 短路电流与保护起动电流之比:

三相电路:

$$K_{Lm}^{(3)} = \frac{I_{d \cdot \Sigma}^{(3)}}{I_{d2}^{(3)}} = \frac{K_{dx} \cdot I_{d \cdot \Sigma}^{(3)}}{I_{d2}^{(3)}} = \frac{I_{bh \cdot \Sigma}^{(3)}}{I_{d2}^{(3)}} \quad (5)$$

Y侧两相短路:

$$\begin{aligned} K_{Lm}^{(2)} \cdot Y &= \frac{I_{d \cdot \Sigma \cdot Y}^{(2)}}{I_{d2 \cdot Y}} = \frac{I_{d \cdot \Sigma \cdot Y}^{(2)}}{\frac{\sqrt{3}}{2} I_{d2}^{(3)}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{I_{d \cdot \Sigma \cdot Y}^{(2)}}{I_{d2}^{(3)}} \\ &= \frac{K_{dx} \cdot I_{d \cdot \Sigma \cdot Y}^{(2)}}{I_{d2}^{(3)}} = \frac{I_{bh \cdot Y}^{(2)}}{I_{d2}^{(3)}} \end{aligned} \quad (6)$$

Δ 侧两相短路:

$$K_{Lm}^{(2)} \cdot \Delta = \frac{I_{d \cdot \Sigma \cdot \Delta}^{(2)}}{I_{d2 \cdot \Delta}} = \frac{I_{d \cdot \Sigma \cdot \Delta}^{(2)}}{I_{d2}^{(3)}} = \frac{K_{dx} \cdot I_{d \cdot \Sigma \cdot \Delta}^{(2)}}{I_{d2}^{(3)}} = \frac{I_{bh \cdot \Delta}^{(2)}}{I_{d2}^{(3)}} \quad (7)$$

Y侧单相接地短路:

$$\begin{aligned} K_{Lm}^{(1)} \cdot Y &= \frac{I_{d \cdot \Sigma \cdot Y}^{(1)}}{I_{d2 \cdot Y}^{(1)}} = \frac{I_{d \cdot \Sigma \cdot Y}^{(1)}}{\frac{1}{\sqrt{3}} I_{d2}^{(3)}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{I_{d \cdot \Sigma \cdot Y}^{(1)}}{I_{d2}^{(3)}} \\ &= \frac{K_{dx} \cdot I_{d \cdot \Sigma \cdot Y}^{(1)}}{I_{d2}^{(3)}} = \frac{I_{bh \cdot Y}^{(1)}}{I_{d2}^{(3)}} \end{aligned} \quad (8)$$

由(5), (6), (7), (8)式可看出, 灵敏系数可为短路电路与该短路下保护的起动电流之比, 也可表示为各种短路电流等效为三相对称的流入保护的电流 I_{bh} 与三相对称下保护的起动电流 $I_{d2}^{(3)}$ (即为整定的起动电流 I_{d2})之比。前者需求出各种短路电流等效为三相对称下流入保护的电流 I_{bh} 。因各种短路下继电器的起动电流是不变的, 为了使保护的起动电流与继电器的起动电流, 用保护起动电流计算灵敏系数与用继电器起动电流计算灵敏系数以及与其它保护的整定计算尽量使其有相似的形式, 便于计算和记忆。现有的灵敏系数的一次电流比较法均采用了后者。

$I_{b.k}$ ——各种短路的短路电流等效为三相对称下流入保护的短路电流。

$K_{d.x}$ ——各种短路的短路电流等效为三相对称下流入保护的短路电流的等效系数，也可叫对称系数。它与电流互感器的接法，短路的类型以及短路发生在那一侧有关，与以那一侧为计算侧无关，对Y/△—11接法变压器的差动保护，从(5)、(6)、(7)、(8)式可得各种短路下的等效系数(或对称系数)列表于2，以往称为“保护的接线系数”，“两手册”则将它乘以电流互感器的接线系数后，才称为保护的接线系数，以 $K_{j.x.b.k}$ 表示。当然，这样它就与计算侧有关。当计算侧为变压器△侧时，因 $K_{j.x}=1$ ，所以， $K_{j.x.b.k}=K_{d.x}$ ；当计算侧为变压器Y侧时，因 $K_{j.x}=\sqrt{3}$ ，所以， $K_{j.x.b.k}=\sqrt{3}K_{d.x}$ 。引入等效系数(对称)后，各短路下保护的起动电流为：

短 路 情 况	$K_{d.x}$ 等 效 系 数
变压器Y侧或△侧三相短路	1
变压器Y侧两相短路	$2/\sqrt{3}$
变压器△侧两相短路	1
变压器Y侧单相接地短路	$1/\sqrt{3}$

$$I_{d2}^{(n)} = \frac{1}{K_{d.x}^{(n)}} \cdot I_{d2} = \frac{1}{K_{j.x}^{(n)}} \cdot I_{d2}^{(n)}$$

n——短路类型的代号，n=3为三相短路，n=2为两相短路，n=1为单相接地短路。

2.2 灵敏系数为进入继电器的电流与继电器起动电流之比。

表2示出的各种短路下，进入继电器的电流 $I_{d2}^{(n)}$ 与短路电流 $I_{d2}^{(n)}$ 之比，引入等效系数 $K_{d.x}$ 和接线系数 $K_{j.x}$ 后，进入继电器的电流可表示为：

$$\begin{aligned} I_{d2}^{(n)} &= \frac{K_{j.x.Y} \cdot K_{d.x}^{(n)}}{n_{L.Y}} I_{d2}^{(n)} \quad \left[\text{或} = \frac{K_{j.x.\Delta} \cdot K_{d.x}^{(n)}}{n_{L.\Delta}} I_{d2}^{(n)} \right] \\ &= \frac{K_{j.x.Y}}{n_{L.Y}} (K_{d.x}^{(n)} \cdot I_{d2}^{(n)}) \quad \left[\text{或} = \frac{K_{j.x.\Delta}}{n_{L.\Delta}} (K_{d.x}^{(n)} \cdot I_{d2}^{(n)}) \right] \\ &= \frac{K_{j.x.Y}}{n_{L.Y}} \cdot I_{d2}^{(n)} \quad \left[\text{或} = \frac{K_{j.x.\Delta}}{n_{L.\Delta}} \cdot I_{d2}^{(n)} \right] \end{aligned}$$

灵敏系数：

$$\begin{aligned} K_{Lm} &= \frac{I_{d2}^{(n)}}{I_{d2.J}} = \frac{K_{j.x} (K_{d.x}^{(n)} \cdot I_{d2}^{(n)})}{I_{d2.J}} = \frac{K_{j.x} \cdot I_{b.k}^{(n).Z}}{I_{d2.J}} \\ &= \frac{K_{j.x.Y} \cdot I_{b.k}^{(n).Z}}{n_{L.Y} \cdot I_{d2}^{(n)}} \quad \left[\text{或} = \frac{K_{j.x.\Delta} \cdot I_{b.k}^{(n).Z}}{n_{L.\Delta} \cdot I_{d2}^{(n)}} \right] \\ &= \frac{I_{b.k}^{(n).Z}}{I_{d2}^{(n)}} \end{aligned}$$

由此看出，一次电流比较法与二次电流比较法所得结果是一样的。

2.3 进入继电器的电流产生的磁势（安匝）与继电器起动安匝之比：

$$\begin{aligned}
 K_{Lm} &= \frac{I_{j \cdot Y} \cdot W_{gY} + I_{j \cdot \Delta} \cdot W_{g\Delta}}{A \cdot W_{g \cdot O}} \\
 &= \frac{\frac{K_{jx \cdot Y} (K_{dx} \cdot I_{d \cdot Y})}{n_{L \cdot Y}} \cdot W_{gY} + \frac{K_{jx \cdot \Delta} (K_{dx} \cdot I_{d \cdot \Delta})}{n_{L \cdot \Delta}} \cdot W_{g\Delta}}{A \cdot W_{g \cdot O}} \\
 &= \frac{\frac{K_{jx \cdot Y} (K_{dx} \cdot I_{d \cdot Y})}{n_{LY}} \cdot W_{g \cdot Y} + \frac{K_{jx \cdot Y}}{n_{LY} \cdot n_B} (K_{dx} \cdot n_B \cdot I'_{d \cdot \Delta}) W_{g\Delta}}{A \cdot W_{g \cdot O}}
 \end{aligned}$$

$$\because I_{c \cdot 2 \cdot Y} \cdot W_{gY} = I_{c \cdot 2 \cdot \Delta} \cdot W_{g\Delta}$$

$$\text{而 } I_{c \cdot 2 \cdot Y} \cdot W_{gY} = \frac{K_{jx \cdot Y} \cdot I_{c \cdot Y} \cdot W_{g \cdot Y}}{n_{L \cdot Y}}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{K_{jx \cdot Y} \cdot \frac{I_{c \cdot \Delta}}{n_B}}{\sqrt{3} \cdot n_{L \cdot \Delta}} \cdot W_{g \cdot Y} \\
 &= \frac{K_{jx \cdot \Delta} \cdot I_{c \cdot \Delta}}{n_{L \cdot \Delta}} \cdot W_{gY}
 \end{aligned}$$

$$I_{c \cdot 2 \cdot \Delta} \cdot W_{g\Delta} = \frac{K_{jx \cdot \Delta} \cdot I_{c \cdot \Delta}}{n_{L \cdot \Delta}} \cdot W_{g \cdot \Delta}$$

$$\therefore W_{g \cdot Y} = W_{g \cdot \Delta}$$

$$\text{所以: } K_L = \frac{\frac{K_{jx \cdot Y} (K_{dx} \cdot I_{d \cdot Y})}{n_{L \cdot Y}} \cdot W_{gY} + \frac{K_{jx \cdot Y} (K_{dx} \cdot I'_{d \cdot \Delta})}{n_{L \cdot Y}} \cdot W_{gY}}{A \cdot W_{g \cdot O}}$$

$$= \frac{K_{jx \cdot Y} [K_{dx} (I_{d \cdot Y} + I'_{d \cdot \Delta})]}{n_{L \cdot Y}} \cdot W_{g \cdot Y} \cdot \frac{1}{A \cdot W_{g \cdot O}}$$

$$= \frac{K_{jx \cdot Y} (K_{dx} \cdot I_{d \cdot Y \cdot \Sigma}) W_{g \cdot Y}}{n_{L \cdot Y} \cdot A \cdot W_{g \cdot O}}$$

$$= \frac{K_{jx \cdot Y} (K_{dx} \cdot I_{d \cdot Y \cdot \Sigma}) W_{g \cdot Y}}{n_{L \cdot Y} \cdot I_{dx \cdot Y} W_{g \cdot Y}}$$

$$= \frac{K_{jx \cdot Y} (K_{dx} \cdot I_{d \cdot Y \cdot \Sigma})}{n_{LY} \cdot I_{d2 \cdot Y}}$$

$$= \frac{K_{jx \cdot Y} \cdot bh \cdot Y \Sigma}{n_{LY} \cdot I_{d2 \cdot Y}}$$

(11)

同理可得：

$$K_{Lm} = \frac{K_{jx \cdot \Delta} (K_{dx} \cdot I_{d \cdot \Delta \cdot \Sigma}) W_{g\Delta}}{A \cdot W_{g \cdot O}}$$

$$= \frac{K_{jx \cdot \Delta} (K_{dx} \cdot I_{d \cdot \Delta \cdot \Sigma})}{n_{L \cdot \Delta} \cdot I_{dx \cdot \Delta}}$$

$$K_{j,x,\Delta} \cdot I_{bh,\Delta,\Sigma} = \frac{K_{j,x,\Delta} \cdot I_{bh,\Delta,\Sigma}}{n_{L,\Delta} \cdot I_{d2,j,\Delta}} \quad (12)$$

由上面推导可看出,上述三种灵敏系数的检验方法是一致的,均可采用。但以第一种方法计算最简单。故现在大多采用此法。对具有制动特性的差动继电器则一般采用类似第二、三种方法。

2.4 引入等效系数后,使进入保护的电流与进入继电器的电流、保护的起动电流与继电器的起动电流、保护灵敏系数的计算等,不管是对称下还是不对称下,它们都具有相同的型式,不同的仅在于等效系数的取值不同。归纳有:各种短路下保护的起动电流:

$$I_{d2}^{(n)} = \frac{1}{K_{d2}^{(n)}} \cdot I_{d2} = K_{j,x}^{(n)} \cdot I_{d2}^{(n)}$$

各种短路下进入保护的电流:

$$I_{bh,\Sigma}^{(n)} = K_{d2}^{(n)} \cdot I_{d2}^{(n)}$$

各种短路下进入继电器的电流:

$$I_{d2}^{(n)} = \frac{K_{j,x} \cdot I_{d2}^{(n)}}{n_{L,\Delta}}$$

各种短路下灵敏系数的校验:

$$\begin{aligned} K_{Lm}^{(n)} &= \frac{I_{bh,\Sigma}^{(n)}}{I_{d2}^{(n)}} = \frac{K_{d2}^{(n)} \cdot I_{d2}^{(n)}}{I_{d2}^{(n)}} = K_{j,x} \cdot \frac{I_{bh,\Sigma}^{(n)}}{n_{L,\Delta} \cdot I_{d2,j}} \\ &= \frac{K_{j,x} \cdot (K_{d2}^{(n)} I_{d2}^{(n)})}{n_{L,\Delta} \cdot I_{d2,j}} \\ &= \frac{K_{j,x,y} \cdot (K_{d2}^{(n)} \cdot I_{d2}^{(n)})}{n_{L,y}} \cdot W_{g,y} + \frac{K_{j,x,\Delta} \cdot (K_{d2}^{(n)} \cdot I_{d2}^{(n)})}{n_{L,\Delta}} \cdot W_{g,\Delta} \\ &= \frac{K_{j,x,y} \cdot W_{g,y} + K_{j,x,\Delta} \cdot W_{g,\Delta}}{\Lambda \cdot W_{g,o}} \end{aligned}$$

3 “两手册”在计算用BCH—2差动继电器构成变压器差动保护灵敏系数上的错误

“两手册”灵敏系数的计算公式

$$K_{Lm} = \frac{K_{j,x,bh} I_{d\Sigma,xx}}{I_{d2,bh,jb}}$$

$I_{d2,bh,jb}$ ——基本侧保护的起动电流。

$I_{d2,\Sigma,xx}$ ——内部短路归算到基本侧的总的最小短路电流。

$K_{j,x,bh}$ ——保护的接线系数。为上述的等效系数乘以电流互感器的接线系数。

3.1 此式与上面导出并证明了三种校验方法是一样的,第一种灵敏系数计算方法多乘了一个电流互感器的接线系数 $K_{j,x}$,即灵敏系数扩大了 $K_{j,x}$ 倍。这样,当基本侧为变压器的 Δ 侧时,因 $K_{j,x,\Delta} = 1$,计算结果数一样。当基本侧为变压器Y侧时,因 $K_{j,x,y} = \sqrt{3}$,计算结果就比实际值扩大了 $\sqrt{3}$ 倍。

3.2 从“手册”公式本身来分析也是错误的。对变压器内部同一故障,按原理,不管归算到那一侧进行校验,计算结果应一样,但“手册”公式则不然,现推导如下:

$$\begin{aligned}
 K_{LmY} &= \frac{K_{js \cdot bkY} \cdot I_{d\Sigma 2mY}}{I_{d2 \cdot Y}} = \frac{K_{js \cdot bkY \cdot n} \cdot I_{d \cdot \Sigma 2m \cdot Y} \cdot n_B}{I_{d2Y} \cdot n_B} \\
 &= \frac{K_{js \cdot bkY} \cdot I_{d\Sigma \cdot 2m \cdot \Delta}}{I_{d2 \Delta}} \\
 &= \frac{K_{js \cdot bk \cdot Y}}{K_{js \cdot bk \cdot \Delta}} \cdot \frac{K_{js \cdot bk \cdot \Delta} \cdot I_{d \cdot \Sigma \cdot 2m \cdot \Delta}}{I_{d \cdot \Sigma \cdot \Delta}} \\
 &= \sqrt{3} \cdot K_{Lm \Delta}
 \end{aligned}$$

由此看出，用“手册”的校验公式，对同一内部故障归算到变压器Y侧计算所得之灵敏系数为归算到变压器Δ侧计算之灵敏系数的 $\sqrt{3}$ 倍。

3.3 例证：

以一台50MVA、121±2×2.5%/38±2.5%/10.5kV、接线为Y₀/Y/Δ-12-11变压器的差动保护为例，网络接线，等效网络（参数以115kV、100MVA为基准），以及在35kV侧短路的最大及最小三相短路电流标于图中。

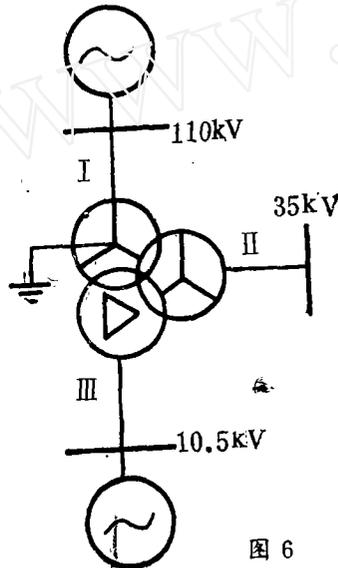


图 6

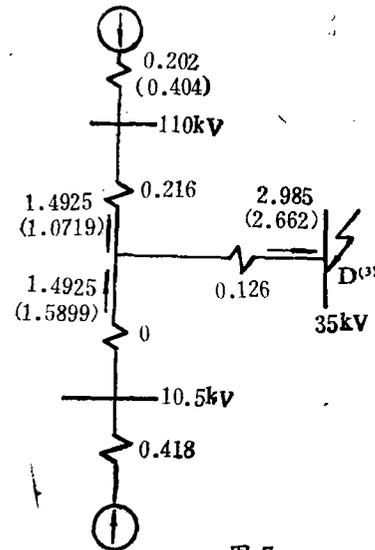


图 7

3.3.1 变压器各侧额定电流，各侧电流互感器接法及变比，二次额定电流，各侧整定的保护动作电流，工作线圈的匝数，继电器的动作电流等均列于表 3

表 3

	121kV侧	38.5kV侧	10.5kV侧
一次额定电流(A)	238.58	749.827	2749.827
电流互感器接法	Δ	Δ	Y
电流互感器变比	600/5	1500/5	3000/5
二次额定电流(A)	3.4437	4.329	4.583
保护动作电流(A)	520.605	1636.116	60000
工作线圈匝数	7.985	6.352	6
继电器动作电流(A)	7.514	9.4458	10

3.3.2 灵敏系数校验

a. 以安匝比较法校验: $K_{Lm} = 2.49046$

b. 以二次电流比较法校验:

分别以10.5kV侧, 35kV侧, 110kV侧校验 K_{Lm} 均为2.490。

c. 以一次电流比较法校验:

分别以105kV侧, 35kV侧, 110kV侧校验, K_{Lm} 均为2.490。

按“手册”方法校验: 以10.5kV侧校验, $K_{Lm} = 2.490$; 以35kV侧和110kV侧校验, 均为 $K_{Lm} = 4.3127$ 。

$4.3127/2.490 = \sqrt{3}$ 。验证了上述的推导和结果。

在上例计算中, 为使计算准确, 对短路电流以平均电压计算, 而整定计算以各侧额定电压计算两者的差异进行了修正。

4 结论

4.1 按同一铁芯上诸线圈的磁势平衡原理, 可简便地写出各种接法变压器在对称或不对称下原副方电流的分布和相量关系, 以及这些变压器差动保护的各种电流的分布和相量关系。

4.2 导出的三种灵敏系数的计算是正确的, “两手册”的计算是错误的。揭示了所谓的“保护的接线系数”的实质, 是不对称短路的短路电流等效为对称下进入保护的电流的等效系数, 所以, 以“等效系数”或“差动保护的对称系数”更恰如其份地反映了问题的实质。

参考文献

- [1] BCH型差动继电器检验手则。
- [2] 西北、东北电力设计院编。电力工程设计手册(第二册)。上海人民出版社, 1973年2月。
- [3] 许敬贤、张道民著。电力系统继电保护。中国工业出版社, 1965年9月。
- [4] 水电站机电设计手册编写组。水电站机电设计手册(电气二)。水利电力出版社, 1984年12月第一版。