

# 高压和超高压母线保护的研究

许昌继电器研究所 陈爱钦  
广西水电局设计院 李健宗

## 一、前 言

我国目前通常使用的母线保护，在保护的原理上没有很好考虑电流互感器的暂态过程等因素，动作速度慢，保护的使用受电流互感器10%误差的限制。在许多情况下，灵敏度低，适应系统运行方式变化的能力差，因此就不能满足大容量电力系统中的大容量发电厂和变电站的高压和超高压母线提出的基本要求。为了适应我国电力工业现代化建设的发展，许昌继电器研究所与广西水电局设计院合作，开展了对母线保护及其装置的研究工作。

通过对电流互感器在暂态过程中，二次回路电流的波形，幅值及相角的变化规律，差回路各个电量的分析和研究，提出了防止在母线外部故障时，故障连接元件电流互感器饱和和可能使母线保护误动作的一些方法：在差回路接入不同数值的电阻，在各元件电流相位比较保护中，能够有效地补偿饱和和电流互感器二次电流的相位移；在带制动特性的差电流保护中，能强制不平衡电流流入饱和电流互感器，有效地减小不平衡电流，增大制动量，减小工作量，提高了保护的灵敏度及可靠性。在二次电流回路中，串联电感元件可以有效地补偿饱和和电流波形过零点的相位变化；对电流差动保护动作判据的研究，制定出具有优良制动特性的动作判别方程式以及差动比较回路。

通过分析和研究各种不同接线方式的母线运行的特点，研究各种不同原理构成的母线保护的性能和特点，以及提高保护动作速度的方法，拟定出具有良好特性的动作判别式的母线保护。先后研究成功各元件电流相位比较原理，相位比较制动差电流原理，差回路接入低电阻的部分强制电流综合制动差电流原理，差回路接入高电阻的完全强制电流综合制动差电流原理以及电压差动原理等五种晶体管保护；后三种保护的动作为半个周波；还研制成功与上述保护配套的复合电压继电器及保护自动巡检装置。这些保护具有动作可靠、灵敏、快速、选择性好，适应系统运行方式能力强的特点，可相互组合成成套母线保护装置，适用于110KV~500KV(750KV)高压和超高压母线如单母线、分段单母线、双母线、一倍半接线母线等母线的保护。

本文作为上述各种母线保护构成原理的理论依据，愿以此文对我国母线保护的理论研究及保护装置的研制工作有所裨益，有所促进。

## 二、母线保护中一些基本问题的分析

任何继电保护装置的原理,都是通过分析电力系统各种运行方式下,在可能出现的各种不同故障时,各个电气量的特点和它们之间的关系的基础上提出来的。在母线保护中,分析和研究电流互感器暂态过程的特点,二次回路的电流波形的特点等是很重要的。只有正确认识这些问题,才能使研制的母线保护原理先进,符合实际的需要。

### 1. 电流互感器铁芯饱和的特点:

随着电力系统容量日益增大,短路电流也将增大;特别是大容量发电厂和变电所有多回进出线的高压母线,当刚刚位于母线保护区外的连接元件短路时,接于母线上的各电源的短路电流将全部流过该元件,幅值很大的短路电流以及短路电流中的非周期分量等因素的影响,可能使电流互感器在暂态过程中发生不同程度的铁芯饱和现象。

众所周知,电流互感器可用图1的等值电路来表示,图中的各个量都归算到电流互感器的二次侧。

在等值电路中, $X_{LC}$ 为电流互感器二次励磁电抗, $i_1$ 为折合到电流互感器二次的一次电流, $i_2$ 为电流互感器二次电流; $X_{fx}$ 、 $R_{fx}$ 为电流互感器二次负载总电抗和总电阻,包括电流互感器二次绕组阻抗,连接导线阻抗及保护装置负载阻抗。

$$X_{LC} = j\omega L_{LC} \quad X_{fx} = j\omega L_{fx}$$

则二次电流与一次电流的关系为:

$$i_2 = i_1 \frac{j\omega L_{LC}}{R_{fx} + j\omega(L_{LC} + L_{fx})} \quad (1)$$

其幅相特性可写为:

$$i_2 = i_1 \sqrt{\frac{\omega^2 L_{LC}^2}{R_{fx}^2 + \omega^2(L_{LC} + L_{fx})^2}} e^{j\theta} \quad (2)$$

$$\theta = \text{tg}^{-1} \frac{\omega(L_{LC} + L_{fx})}{R_{fx}} \quad (3)$$

由式(2)、式(3)可见,电流互感器的幅值变换特性与励磁电感 $L_{LC}$ 和负载电感 $L_{fx}$ 及电阻 $R_{fx}$ 有关, $L_{LC}$ 越小,变换误差加大,负载阻抗 $L_{fx}$ 、 $R_{fx}$ 越大,变换误差也越大;电流互感器的变换相角误差随着励磁电感的减小或负载电阻的加大而加大,而负载电感加大,相角误差减小,即变换的相角误差与负载的功率因数有关,功率因数越高,变换相角误差越大。由式(2)、式(3)还可见,当电流互感器饱和时, $L_{LC}$ 变得很小,因此 $i_2$ 减小,幅值误差变大,相角误差也变大;当电流互感器完全饱和时, $L_{LC} \approx 0$ , $i_2 \approx 0$ , $\theta \approx \text{tg}^{-1} \frac{\omega L_{fx}}{R_{fx}}$ ,如

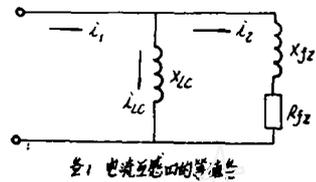


图1 电流互感器的等值电路

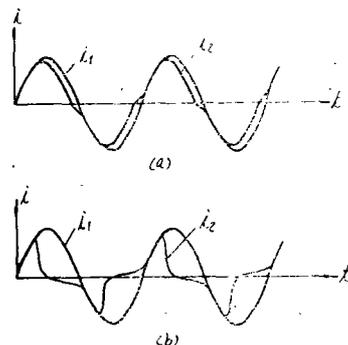


图2 电流互感器饱和时的二次电流波形

果负载电感为0, 则  $\theta \approx 90^\circ$ 。图2是当  $i_1$  为正弦波电流时, 电流互感器的饱和二次电流波形。

由图2可知, 当电流互感器饱和时, 二次电流波形的幅值和相角相对于一次电流发生了不同程度的畸变, 饱和越深, 畸变越大; 表现在幅值减小, 过零点偏移, 出现谐波, 二次电流已不能正确反应一次电流的变化。图2(a)为电流互感器轻度饱和的波形, 二次电流波形畸变不甚显著。图2(b)示出了短路电流很大, 电流互感器在1/4周波前饱和的二次电流波形; 按照  $i_2 = f\left(\frac{d\phi}{dt}\right)$  的关系, 在电流互感器饱和以前, 二次电流起初随着一次电流上升几毫秒, 一旦达到饱和点, 铁芯中的磁通随着时间变化的增量很小, 因此二次电流很快下降到接近于0, 直到5ms时波形过0; 过5ms以后, 由于  $i_1$  减小, 磁通变化为很小的负值, 因此出现一个很小的负向电流, 一直到下一半波重复同样的过程, 这是电流互感器饱和二次电流波形的一个重要特征。

以上分析只是电流互感器的稳态饱和电流波形。在实际系统中, 在故障发生时, 故障一次电流往往是按指数衰减的非周期分量电流与周期分量电流叠加的结果。由于短路电流的非周期分量的衰减速度远小于周期分量的变化速度, 电流互感器对非周期分量的传变非常不利, 结果大部分非周期分量成为励磁电流, 使电流互感器在故障发生后产生饱和。

根据等值电路, 可写出方程式:

$$L_{LC} \frac{di_{LC}}{dt} = L_{fz} \frac{di_2}{dt} + R_{fz} i_2 \quad (4)$$

$$i_2 = i_1 - i_{LC} \quad (5)$$

令:

$$T_2 = \frac{L_{LC} + L_{fz}}{R_{fz}}, \quad q = \frac{L_{fz}}{L_{LC} + L_{fz}}$$

而  $i_1$  为一衰减直流分量与周期分量的叠加:

$$i_1 = I_1 \sin(\omega t + \varphi) - I_1 \sin \varphi e^{-\frac{t}{T_1}}$$

式中  $T_1$  为一次系统的时间常数。将方程式求解并简化后可得:

$$i_{LC} = \frac{1}{\omega T_2} I_1 [e^{-\frac{t}{T_2}} - \cos \omega t] - I_1 \sin \varphi \frac{T_1 - T_2 q}{T_1 - T_2} \left( e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \quad (6)$$

式(6)中第一项的值较小, 当  $T_2$  取1秒时, 其最大值只有  $0.064I_1$ ; 第二项的值较大, 是影响电流互感器饱和的主要因素。当取  $T_2 = 1$  秒,  $T_1 = 0.2$  秒,  $q = 0$  时, 可得励磁电流的最大值约为  $0.14I_1$ 。根据分析, 暂态磁通的变化与  $T_1$ 、 $T_2$  的数值有关, 系按其中较小者上升, 而按较大者下降(文献9)见图3。

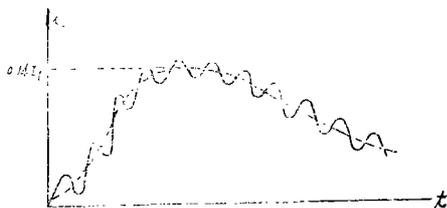


图3 过渡时短路励磁电流

由此可见,在过渡过程情况下,电流互感器饱和有二个特点,一是电流互感器饱和需要一定的时间,即励磁电流在暂态过程中是逐步增大的,达到最大值后又逐步衰减;另一个特点是暂态过程磁通可能是单方向的,因此电流互感器可能引起单方向的饱和,因此其饱和二次电流波形将是上下不对称的。图4为实测的电流互感器饱和电流波形(文献3)。

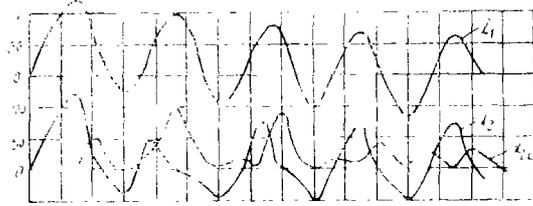


图4 电流互感器饱和的(单相短路时)

铁芯的剩磁也可能较大地改变电流互感器的暂态过程,影响铁芯的饱和,如果剩磁的方向和短路电流非周期分量所产生的磁通相同,电流互感器更容易饱和。电流互感器的剩磁由以下原因产生:(1)前一暂态过程已具有相当大的剩磁,如线路发生故障切除后的剩磁,在自动重合闸动作后几乎没有减小,或在正常负荷电流下减小得很慢,二次负荷越大,剩磁衰减得越慢。(2)变压器空载投入时,变压器励磁涌流通过电流互感器。(3)电流互感器二次回路断线引起励磁电流增大,在消除断线时引起的剩磁。(4)为测电流互感器磁化特性,在二次回路作试验时方法不当留下的剩磁。

总之,电力系统一次时间常数越大,故障电流倍数越大,非周期分量越大,铁芯剩磁越大,二次回路负载越重,二次回路负载功率因数越高,电流互感器变比越小,则电流互感器越容易饱和。在现代电力系统中,由于大容量机组的采用,短路暂态过程时间常数增大,预计在500KV系统中,在50KA的短路电流中将包含有0.1秒左右的时间常数偏移达100%的衰减非周期分量(文献5)。电流互感器将在短路发生后产生铁芯饱和现象,铁芯饱和最深的时间,将在故障后2~3周期内达到最大值(文献2)。

## 2. 差回路电流与母线各连接元件电流的区别。

母线二次差电流的值等于各连接元件二次电流的矢量和。即:

$$i_c = \sum_{j=1}^n i_{2.j} \quad (7)$$

式中: $i_c$ 为差回路电流; $i_{2.j}$ 为母线任一连接元件的二次电流; $n$ 为母线的连接元件数。

### (1) 母线外部故障:

假设母线保护区外的连接元件1发生短路,并规定元件1流出电流为正方向,则:

$$i_c = \sum_{j=2}^n i_{2.j} - i_{2.1} \quad (8)$$

而电流互感器二次电流为:

$$i_2 = (i_1 - i_{LC}) / N \quad (9)$$

式中: $i_1$ 和 $i_{LC}$ 为电流互感器一次电流和励磁电流, $N$ 为电流互感器变比。将式(9)代入式(8)变换得:

$$i_c = (i_{LC.1} - \sum_{j=2}^n i_{LC.j}) / N \quad (10)$$

式中： $i_{LC.1}$ ， $i_{LC.j}$  分别短路连接元件 1，连接元件  $j$  的电流互感器励磁电流。

由式(10)可知，外部故障时，差回路流过的电流等于短路连接元件电流互感器归算到二次侧的励磁电流与其余各连接元件电流互感器归算到二次侧的励磁电流之和的差值。如果接于差回路的电流互感器不饱和，在理想情况下， $i_c = 0$ ，如果短路连接元件的电流互感器已饱和，其余电流互感器不饱和，则式(10)括号内第二项可以忽略不计，则式(10)可写成：

$$i_c = i_{LC.1}/N \quad (11)$$

由式(11)可知，仅短路元件电流互感器饱和时，差电流为该连接元件电流互感器归算到二次侧的励磁电流。将式(9)代入式(11)可得：

$$i_c = \frac{i_{1.1}}{N} - i_{2.1} \quad (12)$$

由式(12)可得出结论，在母线外部短路时，如果短路连接元件的电流互感器饱和，而其余连接元件的电流互感器不饱和，则差电流为按照短路连接元件的电流互感器变比并且不考虑该电流互感器饱和而绘制的二次电流波形曲线( $i_{1.1}/N$ )与饱和电流互感器二次电流波形曲线( $i_{2.1}$ )的差值。根据以上分析，可得出母线外部故障对差电流与各连接元件二次电流的差别：

a) 在短路连接元件电流互感器不饱和时，差电流在理想情况下等于 0。实际情况的差电流等于考虑各电流互感器特性不一致等因素而产生的不平衡电流，此电流为各电流互感器励磁电流之和，其相位滞后于该元件二次电流约  $90^\circ$ ，其波形见图 5(a)。

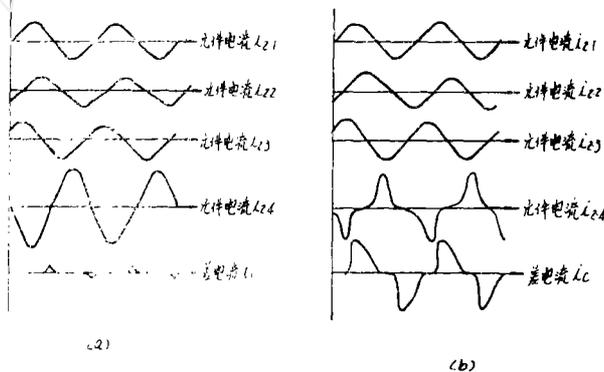


图 5 母线外部短路时差电流和各元件电流波形

b) 在仅短路连接元件电流互感器饱和时，差电流即为该电流互感器的励磁电流，其相位滞后于该元件二次电流的相位小于或等于  $90^\circ$ ，其波形见图 5(b)。

(2) 母线内部故障：

母线内部故障的差电流为：

$$i_c = \sum_{j=1}^n i_{1.j}/N - \sum_{j=1}^n i_{LC.j}/N \quad (13)$$

即差电流等于归算到二次侧的一次电流之和，与归算到二次侧的励磁电流之和的差值。母线内部短路时，电流互感器一般不会饱和，并且电流互感器的励磁电流比较小，

式(13)的第一项比第二项大得多,由励磁电流引起差电流波形畸变很小,就可以得到在母线内部故障时差电流的二个特征:

a) 母线内部短路只有流入母线的电流时,如图6,差电流与各连接元件电流几乎同相;若各连接元件电流的最大相位差为 $\alpha$ 角,则差电流与各元件电流的相位差小于 $\alpha$ 角,其波形图见图6。

b) 母线内部短路有流出电流时,例如图7中,分段断路器在断开位置,差电流与各连接元件电流几乎同相或反相。其波图见图8。

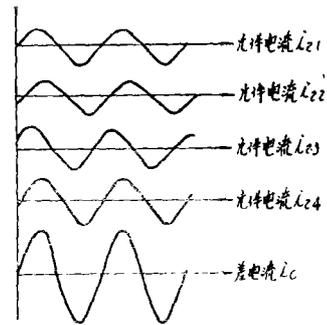


图6 母线内部短路只有流入电流时的波形图

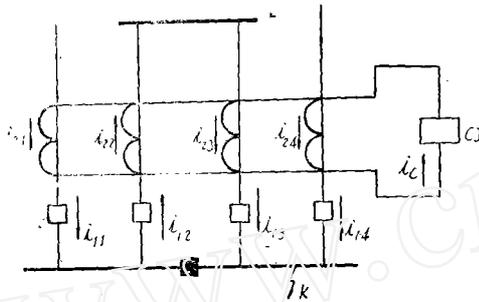


图7 母线内部短路有流出电流时的电流分布

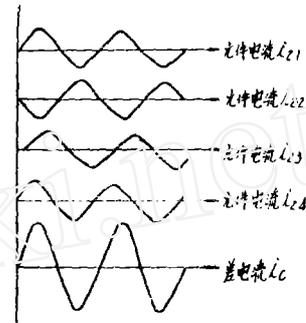


图8 母线内部短路有流出电流时的波形图

### 三、防止电流互感器暂态过程铁芯饱和以及对保护影响的对策

由于电流互感器在暂态过程中二次电流的波形和相角可能发生不同程度的畸变,误差增大,其电流误差最大可能达到80~90%〔文献7〕,相角误差可大于90°〔文献2〕;电流互感器的暂态过程可能历时几十个周期;就可能使继电保护装置发生不正确动作,可能引起保护的误动或拒动,或使保护的动作时间增大,使保护失去选择性,这是不允许的。

为了消除电流互感器饱和对保护装置的影响,通常采取以下几种措施:

1. 减轻电流互感器二次负载。如果电流互感器的二次负载低于额定负载,则允许较大的过电流倍数,其过电流倍数可按下式进行计算:

$$m = \frac{P_{e.LH} + P_{x.LH}}{P_{f.LH} + P_{x.LH}} \quad (14)$$

式中:  $m$  为过电流倍数。

$P_{x.LH}$  为电流互感器在额定电流时本身的消耗。

$P_{e.LH}$  为电流互感器的额定负荷。

$P_{f, LH}$ 为电流互感器在额定电流时所接的实际负荷。

如果保护的功率消耗很小，同保护与电流互感器之间的连接导线的功率损耗相比，可以忽略不计。如果采用单独的电流互感器铁芯供保护使用，电流互感器与保护之间的连接导线不长并且截面足够大，允许过电流倍数可达60~100倍；也就是说，一个在额定负荷下允许过电流倍数为20倍的电流互感器，此时的线性工作范围可提高3~5倍。

在实际工程中，电流互感器装设地点与保护装设地点有时距离较远，连接导线的电阻较大。如果以增大导线截面来减小电阻，一是电缆的截面是有限的，二是电缆的费用要增加，所以这种措施的作用是有限的。

2. 采用铁芯带非磁性间隙的电流互感器，可消除铁芯的剩磁，提高电流互感器的饱和倍数。但电流互感器在稳态电流情况下的准确性，对故障电流中非周期暂态分量的传变性能受到某种程度的影响，况且这种互感器未大量推广使用，因此尚不能得到普遍的应用。〔文献6〕介绍的母线电压差动保护就是使用这种型式电流互感器的例子。

3. 为了防止电流互感器饱和后保护的拒动或误动，可采用快速动作的保护，瞬时判断保护区内或区外故障，在区外故障时立即将保护闭锁，以防止电流互感的饱和后保护的误动，而保证在内部故障电流互感器饱和和以前保护已动作。

在母线保护中，为了防止在母线外部故障时由于电流互感器饱和而引起的误动作，拟定以下三种对策。

1. 用时间来躲过由于电流互感器饱和和差回路中产生的不平衡电流。因为电流互感器不可能在每半波的 $180^\circ$ 范围内全部饱和，其不平衡电流出现在故障电流每半周的后部，再加上适当的制动方式，使在每半波内不平衡电流所产生的动作电压历时不超过一定的时间（例如6ms），以躲过外部故障电流互感器饱和的不平衡电流，即构成了相位比较制动电流差动母线保护。

2. 当电流互感器变比相同时，在差回路接入电阻，部分或完全强制由于电流互感器饱和引起的不平衡电流流入饱和电流互感器的二次绕组。图9表示了电流互感器二次侧差回路接入电阻 $R_{CZ}$ 后，流入母线电流与流出母线电流之关系曲线。

由分析可知，在差回路接入电阻，不仅补偿了电流互感器二次电流由于饱和产生的幅值和相位畸变，而且减小了差回路的不平衡电流；接入电阻越大，效果越好，当接入电阻为2000欧时，几乎达到和不饱和时一样，差回路

电流减到很小。但在母线内部故障时，由于在差回路接入低电阻时实际上是增加了电流互感器的二次负荷，此时二次总负荷等于连接导线的电阻加上差回路电阻，因此降低了电流互感器在内部故障时的饱和倍数，各连接元件电流互感器在内部故障时就比较容易饱和。

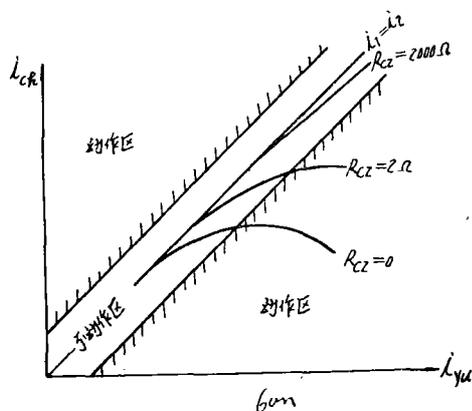


图9

电流互感器二次侧开路时，一次电流全部用于励磁，使铁芯磁通急剧增加，磁通在很短时间内上升到最大值，它超过额定值许多倍，此后整个半周都几乎维持在铁芯饱和水平上，最后又很快地减小，因此二次电势随着磁通的急剧增加和减小在前沿和后沿出现尖峰，其数值是很高的。

在差回路接入高电阻，在母线内部故障时，近似于电流互感器开路的情况，差回路出现峰值很高的二次电压，这是我们不希望的。因此必须采取限压措施，把二次电压限制在给定的数值。当用瞬时电压测量原理来反应这一给定数值时，就构成了测量瞬时值的电压差动保护；当用瞬时电流测量原理来反应限压措施时，例如用可控硅在给定数值时触发导通，瞬时短接差回路并起动作瞬时值测量的电流继电器，就构成了完全强制电流的电流差动保护。

3. 对电流互感器二次电流进行整形，使整形后的波形与一次电流的相位差不超过一定的误差值，再进行电流相位比较，实现的方法可用对策 2 补偿母线外部故障时故障连接元件二次电流波形的相位，可用在电流互感器二次回路串联电感的方法补偿饱和电流过  $O$  点的相位，也可用加适当的门槛电压经晶体管触发电路将二次电流波形转化为方波电压。

#### 四、电流差动母线保护动作判据的分析

按照电流差动原理构成的母线保护，具有简单可靠，有较好的选择性和速动性的特点。对于带制动特性的电流差动保护，由于制动方式的不同，具有不同的动作与制动特性及其灵敏度。为了便于分析，特作以下规定：

1. 设母线上有几个连接元件，各连接元件的电流为  $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}_2$ 、 $\dots$ 、 $\dot{I}_n$  则差电流  $\dot{I}_c$  为：

$$\dot{I}_c = \sum_{i=1}^n \dot{I}_i \quad (15)$$

2. 为了便于分析保护的動作特性，将母线各连接元件的电流归结为二个电流  $\dot{I}_M$  及  $\dot{I}_N$ ，并取  $\dot{I}_M$  与  $\dot{I}_N$  之间的相角为  $0^\circ$  或  $180^\circ$ ，即  $\dot{I}_M$  与  $\dot{I}_N$  是同相或反相，当  $\dot{I}_M$  与  $\dot{I}_N$  同时为正或同时为负时则  $\dot{I}_M$  与  $\dot{I}_N$  同相，在实际母线中表示  $\dot{I}_M$  与  $\dot{I}_N$  均为流进母线的电流；当  $\dot{I}_M$  与  $\dot{I}_N$  一个为正一个为负时，则  $\dot{I}_M$  与  $\dot{I}_N$  反相，在实际母线中，当  $|\dot{I}_M| > |\dot{I}_N|$  时，则  $\dot{I}_M$  为流进母线的电流， $\dot{I}_N$  为流出母线的电流；当  $|\dot{I}_N| > |\dot{I}_M|$  时， $\dot{I}_N$  为流进母线的电流， $\dot{I}_M$  为流出母线的电流。

3. 保护的差电流整定值为  $I_P$ 。令  $I_{GZ}$  为工作电流， $I_{ZD}$  为制动电流，则电流差动保护的通用动作方程式为：

$$I_{GZ} - I_{ZD} \geq I_P \quad (16)$$

则保护的灵敏系数  $S$  为：

$$S = \frac{I_{GZ} - I_{ZD}}{I_P} \quad (17)$$

### 1. 无制动量的电流差动母线保护。

该保护是以差电流作为工作量直接起动保护的执行元件，其动作方程式为：

$$\left| \sum_{i=1}^n \dot{I}_i \right| \geq I_P \quad (18)$$

根据上述规定，可得动作边界方程式为：

$$I_M + I_N = \pm I_P \quad (19)$$

式(19)中，等式，右边的±号，当 $I_M + I_N > 0$ 时取+号，当 $I_M + I_N < 0$ 时取-号（在以下分析中，如不作文字规定，凡有±号者，都按此规定取±号）。式(19)为二条直线的方程式，可以在图10以 $I_M$ 和 $I_N$ 为纵横座标的平面上作出二条平行于 $I_M = I_N$ 的倾斜45°的直线，直线的斜率为 $\tan\theta = 1$ ，两条直线之间的区域为不动作区，其它区域为动作区，可见保护的不动作区大小由整定值 $I_P$ 所决定。

如果设：

$$\left| \sum_{i=1}^n \dot{I}_i \right| = n_{1s} I_P$$

$n_{1s}$ 为母线故障时差电流为整定电流的倍数，则保护的灵敏系数为：

$$S_D = n_{1s} \quad (20)$$

不带制动的母线差动保护在整定时，应在满足电流互感器10%误差范围内，继电器的动作电流应按躲过系统最大运行方式下母线外部短路时，由于电流互感器误差等因素所产生的不平衡电流的稳态值进行整定。根据规程规定，灵敏系数应不小于2，按照计算可得，系统在各种运行方式下，最大短路电流与最小短路电流之比应小于3.8倍，如果系统在最小运行方式下的短路电流满足不了上述要求，则保护不能可靠动作。如果母线外部故障时，故障连接元件电流互感器饱和，电流互感器在10%的误差曲线以外工作，不平衡电流大大增加，保护就更难整定。通常这种保护继电器带有速饱和变流器，虽然速饱和变流器对外部故障差回路的暂态分量的影响有一定的抑制作用，但对稳态的不平衡电流是不起作用的。对于电流互感器饱和所产生的不平衡电流仍要误动作。

### 2. 最大值制动的电流差动母线保护。

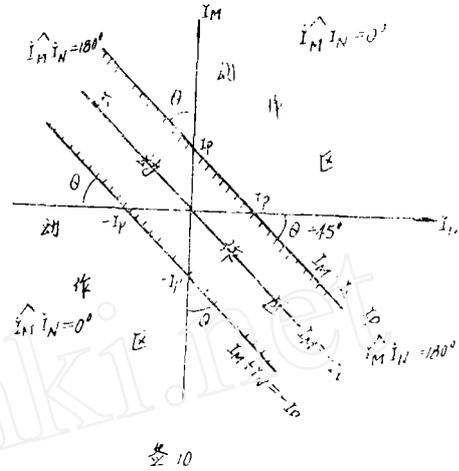
以差电流的绝对值作为工作量，以各连接元件电流最大值的绝对值作为制动量，构成了最大值制动的电流差动母线保护，其动作方程式为：

$$\left| \sum_{i=1}^n \dot{I}_i \right| - K_1 \max[|\dot{I}_1|, |\dot{I}_2|, \dots, |\dot{I}_n|] \geq I_P \quad (21)$$

当 $|\dot{I}_M| > |\dot{I}_N|$ 时，设 $\max[|\dot{I}_1|, |\dot{I}_2|, \dots, |\dot{I}_n|] = m_1 |\dot{I}_M|$

当 $|\dot{I}_N| > |\dot{I}_M|$ 时，设 $\max[|\dot{I}_1|, |\dot{I}_2|, \dots, |\dot{I}_n|] = m_1 |\dot{I}_N|$

则当 $|\dot{I}_M| > |\dot{I}_N|$ 时可得动作边界方程为：



$$I_M = -\frac{I_N}{1-K_1 m_1} \pm \frac{I_P}{1-K_1 m_1} \quad (22)$$

当  $|\dot{I}_N| > |\dot{I}_M|$  时可得动作边界方程为:

$$I_N = -\frac{I_M}{1-K_1 m_1} \pm \frac{I_P}{1-K_1 m_1} \quad (23)$$

根据式(22)与式(23)可作出在  $I_M$  与  $I_N$  为座标的平面上的四条直线, 组成二条折线, 即为最大值制动的电流差动母线保护的电流特性曲线。每条折线由二条直线所构成, 见图11。直线的斜率为:

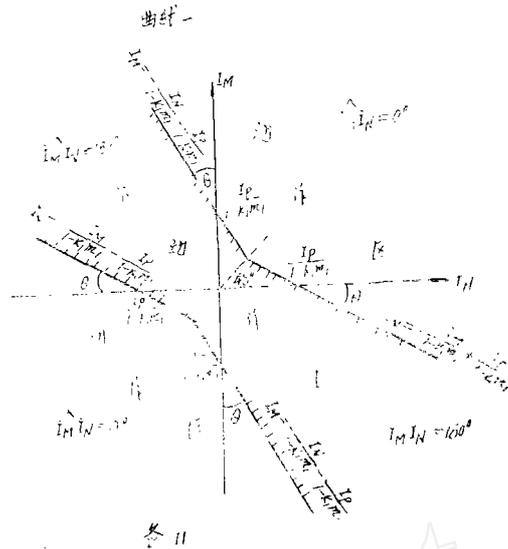
$$tg\theta = 1-K_1 m_1 \quad (24)$$

设  $|\sum_{i=1}^n \dot{I}_i| = n_1 s I_P$ ,

当  $|\dot{I}_M| > |\dot{I}_N|$  时, 保护的灵敏系数为:

$$S_1 = \frac{n_1 s I_P - K_1 m_1 I_M}{I_P} = n_1 s - K_1 m_1 \frac{I_M}{I_P} \quad (25)$$

在图11中, 四条直线之间的区域为不动作区。可见最大值制动的保护比无制动的保护的不动作区扩大了, 而且随着电流的增加而扩大, 因此在外部故障时具有可靠的制动特性, 但在内部故障时灵敏系数下降了  $K_1 m_1 - \frac{I_M}{I_P}$ , 在只有一个电流流进的情况下, 无制动的保护的動作值是  $I_P$ , 最大值制动的保护的動作值为  $\frac{I_P}{1-K_1 m_1}$ , 由于  $K_1$ 、 $m_1$  均小于 1, 所以  $\frac{I_P}{1-K_1 m_1} > I_P$ 。



### 3. 绝对值和制动的电流差动母线保护。

以差电流的绝对值作为工作量, 以各连接元件电流的绝对值之和作为制动量, 构成了绝对值和制动电流差动母线保护, 其动作方程式为:

$$\left| \sum_{i=1}^n \dot{I}_i \right| - K_2 \sum_{i=1}^n |\dot{I}_i| \geq I_P \quad (26)$$

当  $\angle I_M I_N = 0^\circ$  时可得动作边界方程为:

$$I_M + I_N = \pm \frac{I_P}{1-K_2} \quad (27)$$

当  $\angle I_M I_N = 180^\circ$  且  $|\dot{I}_M| > |\dot{I}_N|$  时, 可得到动作边界方程式为:

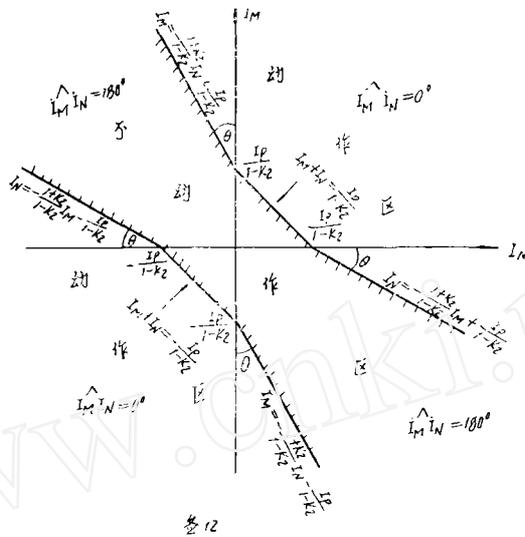
$$I_M = -\frac{1+K_2}{1-K_2} I_N \pm \frac{I_P}{1-K_2} \quad (28)$$

当  $\angle I_M I_N = 180^\circ$  且  $|\dot{I}_N| > |\dot{I}_M|$  时, 可得动作边界方程式为:

$$I_N = -\frac{1+K_2}{1-K_2}I_M \pm \frac{I_P}{1-K_2} \quad (29)$$

式(27)、(28)、(29)可以在以  $I_M$  与  $I_N$  为座标的平面上作出六条直线，组成二条折线，即为绝对值和制动的电流差动母线保护的电流特性曲线，每条折线由三条直线所组成，中间二条为平行于  $I_M = -I_N$  的直线段，见图12；其它四条直线的斜率为：

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{1-K_2}{1+K_2} \quad (30)$$



对于最大值制动方式与绝对值和制动方式进行比较，如果假设二种制动方式在外部故障时具有相同的制动特性，即特性曲线的斜率相同，则比较两种制动方式灵敏度的高低，灵敏者为优。根据直线的斜率相同可得：

$$1 - K_1 m_1 = \frac{1 - K_2}{1 + K_2}$$

求得 
$$K_1 = \frac{2K_2}{m_1(1+K_2)} \quad (31)$$

将式(31)代入式(22)或式(23)右侧第二项为：

$$\frac{I_P}{1 - K_1 m_1} = \frac{I_P}{1 - \frac{2K_2}{1+K_2}} \quad (32)$$

式(32)与式(28)、(29)右侧第二项进行比较，由于  $K_2 < 1$ ，所以：

$$\frac{2K_2}{1+K_2} > K_2$$

因此， 
$$\frac{I_P}{1 - K_1 m_1} > \frac{I_P}{1 - K_2} \quad (33)$$

式(33)表示在母线内部故障只有一个流入电流的情况下，最大值制动方式比绝对值和制动方式的灵敏度要低。

当  $\dot{I}_M$  与  $\dot{I}_N$  同时为正时，绝对值和制动方式的灵敏系数为：

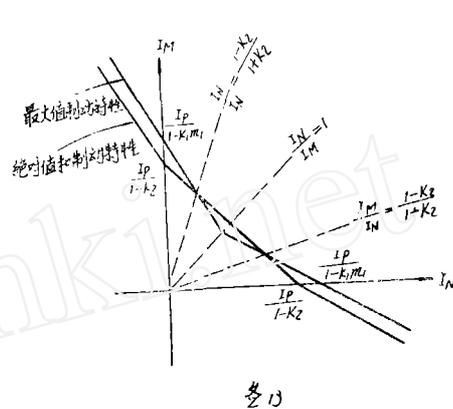
$$s_2 = \frac{n_1 s I_P - K_2 (I_M + I_N)}{I_P} = n_1 s - \frac{K_2 (1 + \frac{I_N}{I_M}) I_M}{I_P} \quad (34)$$

根据在外部故障时制动特性相同原则来对比在上述情况下二种制动方式的灵敏系数，为此，将式(31)代入式(25)得：

$$s_1 = n_1 s - \frac{2K_2 I_M}{I + K_2 I_P} \quad (35)$$

比较式(34)与式(35)可得，当  $-\frac{I_N}{I_M} > \frac{1 - K_2}{I + K_2}$  时，最大值制动方式的灵敏系数比绝对值

和制动方式要高，见图13；由于在  $\dot{I}_M \dot{I}_N = 0^\circ$  范围内，二种制动方式的特性同，因此在不同的  $\frac{I_N}{I_M}$  的值范围内，二种制动方式的灵敏系数相比有高低。



#### 4. 综合制动电流差动母线保护。

以差电流的绝对值作为工作量，以各连接元件电流最大值的绝对值减去差电流的绝对值并取正值作为制动量，称为最大值综合制动电流差动母线保护；若以各连接元件绝对值之和减去差电流的绝对值并取正值作为制动量，称为绝对值和综合制动电流差动母线保护。二种综合制动方式的动作方程式如下：

$$\left| \sum_{i=1}^n \dot{I}_i \right| - K_3 \left\{ \max [ |\dot{I}_1|, |\dot{I}_2|, \dots, |\dot{I}_n| ] - K_4 \left| \sum_{i=1}^n \dot{I}_i \right| \right\}^+ \geq I_P \quad (36)$$

$$\left| \sum_{i=1}^n \dot{I}_i \right| - K_5 \left\{ \sum_{i=1}^n |\dot{I}_i| - K_6 \left| \sum_{i=1}^n \dot{I}_i \right| \right\}^+ \geq I_P \quad (37)$$

大括号右上角+号表示取大括号内的值为正时的值，当大括号内的值为0或负时则取0值。

当  $|\dot{I}_M| > |\dot{I}_N|$  时设：

$$\max [ |\dot{I}_1|, |\dot{I}_2|, \dots, |\dot{I}_n| ] = m_2 |\dot{I}_M|$$

当  $|\dot{I}_N| > |\dot{I}_M|$  时设：

$$\max [ |\dot{I}_1|, |\dot{I}_2|, \dots, |\dot{I}_n| ] = m_2 |\dot{I}_N|$$

如果大括号内的值为正，根据式(36)、(37)可得到二种综合制动方式的动作边界表达式。对于最大值综合制动方式，当  $|\dot{I}_M| > |\dot{I}_N|$  时为：

$$I_M = - \frac{1 + K_3 K_4}{1 - K_3 m_2 + K_3 K_4} I_N \pm \frac{I_P}{1 - K_3 m_2 + K_3 K_4} \quad (38)$$

当  $|\dot{I}_N| > |\dot{I}_M|$  时为:

$$I_N = -\frac{1+K_3K_4}{1-K_3m_2+K_3K_4}I_M \pm \frac{I_P}{1-K_3m_2+K_3K_4} \quad (39)$$

对于绝对值和综合制动方式, 当  $|\dot{I}_M| > |\dot{I}_N|$  时为:

$$I_M = -\frac{1+K_5+K_5K_6}{1-K_5+K_5K_6}I_N \pm \frac{I_P}{1-K_5+K_5K_6} \quad (40)$$

当  $|\dot{I}_N| > |\dot{I}_M|$  时为:

$$I_N = -\frac{1+K_5+K_5K_6}{1-K_5+K_5K_6}I_M \pm \frac{I_P}{1-K_5+K_5K_6} \quad (41)$$

如果大括号内的值为 0 或负, 根据式 (36)、(37) 可得到二种综合制动方式的动作边界表达式:

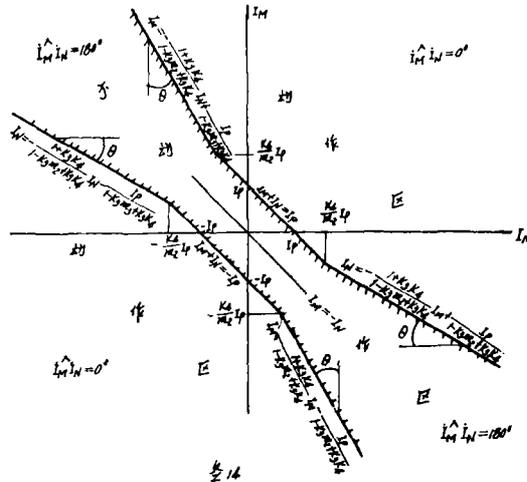
$$I_M + I_N = \pm I_P \quad (42)$$

由式 (38)、(39)、(42) 可在以  $I_M$  和  $I_N$  为座标的平面上作出六条直线, 组成二条折线, 每条折线由三条直线所组成, 中间二条为平行于  $I_M = -I_N$  的直线段, 即为最大值综合制动电流差动保护的电流特性曲线, 见图 14。其中四条直线的斜率为:

$$\operatorname{tg} \theta = -\frac{1-K_3m_2+K_3K_4}{1+K_3K_4} \quad (43)$$

根据大括号内的值为 0 及式 (42) 可得折线拐点的座标为:

$$I_M = \pm \frac{K_4}{m_2} I_P \quad \text{及} \quad I_N = \pm \frac{K_4}{m_2} I_P \quad (44)$$



根据式 (40)、(41)、(42) 也可以得到与图 14 相类似的二条折线, 即为绝对值和综合制动电流差动保护的电流特性曲线, 直线的斜率为:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{1-K_5+K_5K_6}{1+K_5+K_5K_6} \quad (45)$$

折线的拐点为:

$$I_M = \pm \frac{1+K_0}{2} I_P \quad \text{及} \quad I_N = \pm \frac{1+K_0}{2} I_P \quad (46)$$

在图14中，二条折线之间的部分为保护的不动作区，可见综合制动的电流差动保护在外部故障时具有可靠的制动特性，随着电流的增加，不动作区扩大；而在母线内部故障时，灵敏度不受影响，与无制动情况相同。因此，综合制动方式是一种优良的制动方式，具有优良的动作与制动特性；在新研制的母线保护中，应用综合制动方式，使母线保护具有良好的性能，对于变压器保护以及线路纵差保护，应用综合制动方式也是比较合适的。

## 五、在二次电流回路中对电流互感器饱和和引起畸变的补偿理论

1. 差回路接入强制电阻对差回路在外部故障时的不平衡电流的补偿作用分析。

在差回路接入强制电阻后，在外部故障时可以补偿电流互感器饱和而引起的不平衡差电流，由于强制电阻的作用，故障电流强制流过故障连接元件电流互感器二次绕组，减小了差回路的不平衡电流。

假设在外部故障时把所有流进母线的电流归结为一个连接元件的流进电流，则等效为只有二个连接元件的母线情况，因此可画出等值电路见图15。

图中， $x_1, x_2$ 为电流互感器归算到二次侧的励磁电抗， $R_1, R_2$ 为二次回路导线电阻， $R_{CZ}$ 为差回路强制电阻。

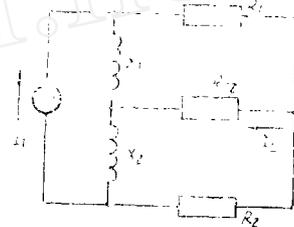


图 15

当  $R_{CZ} = 0$  时，可得到无强制作用的差回路不平衡电流为：

$$\dot{I}_C = \frac{j(R_1 x_2 - R_2 x_1)}{(R_1 + jx_1)(R_2 + jx_2)} \dot{I}_1 \quad (47)$$

当差回路接入强制电阻后，其不平衡电流为：

$$\dot{I}_{CZ} = \frac{j(R_1 x_2 - R_2 x_1)}{(R_1 + jx_1)(R_2 + jx_2) + (R_1 + R_2)R_{CZ} + j(x_1 + x_2)R_{CZ}} \dot{I}_1 \quad (48)$$

接入强制电阻后对差回路不平衡电流的改善效果为：

$$\frac{\dot{I}_{CZ}}{\dot{I}_C} = \frac{1}{1 + \frac{R_1 + R_2 + j(x_1 + x_2)}{(R_1 + jx_1)(R_2 + jx_2)} R_{CZ}} = \frac{1}{1 + \frac{R_{CZ}}{Z_n}} \quad (49)$$

式中： $Z_n = \frac{(R_1 + jx_1)(R_2 + jx_2)}{R_1 + R_2 + j(x_1 + x_2)}$  为从差回路看进去的电源内阻抗。

可见，当有强制电阻  $R_{CZ}$  时，不平衡电流减小到无强制电阻的  $\left(1 + \frac{R_{CZ}}{Z_n}\right)$  分之一。

$R_{CZ}$  越大， $Z_n$  越小，则改善效果越好；假设在极端情况下，电流互感器饱和， $x_1 \approx 0$ ；

因  $x_2 \gg R_2$ , 故在计算时可认为  $x_2 \approx \infty$ ; 令  $R_1 = R_2 = 1 \Omega$ ,  $R_{CZ} = 4 \Omega$  则:

$$\frac{\dot{I}_{CZ}}{\dot{I}_C} = \frac{1}{1 + \frac{4}{1}} = \frac{1}{5}$$

可见在此情况下不平衡电流减小到五分之一。

2. 差回路接入强制电阻对外部故障时故障连接元件二次电流相位的补偿作用分析。

根据等值电路可求得在外部故障时故障连接元件电流互感器二次电流的相位, 在没有强制电阻时为:

$$\theta_1 = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\omega L_1}{R_1} \quad (50)$$

在有强制电阻时, 由于故障连接元件电流互感器饱和, 因此  $X_1 = \omega L_1$  变得很小, 而  $X_2 = \omega L_2$  为未饱和电流互感器的励磁电感, 因此  $L_2 \gg L_1$  故在近似计算中可认为  $L_2 \approx \infty$ , 则可得:

$$\theta_2 = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\omega L_1 R_1}{R_{CZ}^2 + R_{CZ} R_1 + \omega^2 L_1^2} \quad (51)$$

假设在电流互感器饱和的情况下,  $L_1 = 0.1 \text{mH}$ , 并假定  $R_1 = 1 \Omega$ , 则在  $R_{CZ} = 0$  时,  $\theta_1 \approx 88.2^\circ$ ; 而在  $R_{CZ} = 0.2 \Omega$  时, 可得  $\theta_2 \approx 7.5^\circ$ 。由此可见, 只要在差回路串一个很小的电阻, 就可得到很好的相角补偿作用。

3. 电流互感器二次回路串联电感元件对二次电流过零点相位的补偿作用分析。

在电流互感器二次回路串联电感  $L$  后, 虽然负载加大了, 使电流互感器更容易饱和, 但是由于串联电感以后, 减小了负荷的功率因数, 改善了在暂态过程情况下电流互感器的工作特性。另外, 主要由于电感元件在电流互感器饱和以前的储能作用, 在电流互感器饱和后释放能量, 使电流互感器二次电流过零点相位变化减小。如前所述, 电流互感器饱和后的二次电流过零点的相角与不饱和波形的过零点相角变化可达  $90^\circ$ , 而在串联电感  $L$  后的饱和电流波形见图16所示。

在图16中1—2段, 电流互感器处在不饱和段, 因此一次电流与二次电流相吻合, 此期间电感元件储能; 在2—3段, 电流互感器饱和, 这时电感元件所储的能量释放, 其电流变化按指数曲线衰减;

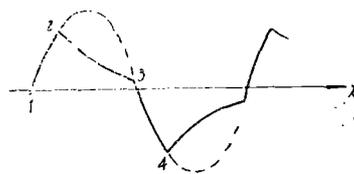


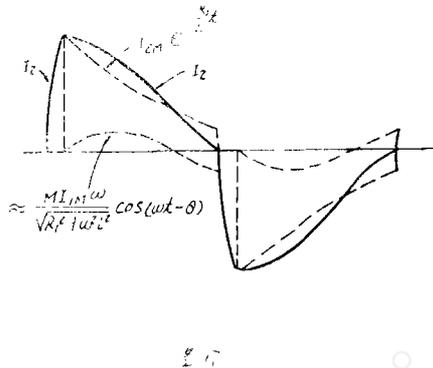
图16

$$I_L = I_M e^{-\frac{R_1}{L} t} \quad (52)$$

当电流衰减到了点时, 电流互感器又进入不饱和区, 从3点以后波形又重复前半周的过程。由此可见, 串联电感以后, 可以补偿二次电流过零点的相角。

当电感足够大时, 可使电流过零点相角得到完全的补偿。全补偿的电感值的大小取决于电流互感器二次回路电阻的大小, 以及电流互感器饱和后一次绕组与二次绕组之间的互感; 因为  $\frac{L}{R}$  为电流互感器二次回路的时间常数, 决定了电流互感器饱和后电流衰

减的快慢；在电流互感器饱和后，一次电流流过一次绕组，在二次绕组上感应出互感电势，超前于一次电流 $90^\circ$ ，而二次负荷是一个具有电感和电阻的感性阻抗，其阻抗角 $\varphi_z$ 小于 $90^\circ$ ，因此由互感产生的二次电流超前于一次电流的角度为 $90^\circ - \varphi_z$ 。如果假设铁芯有理想的磁化特性，则在电流互感器饱和后的二次电流是由电感放电电流和互感产生的电流综合而成，见图17。



在 $t = \pi$ 时，由电感放电的电流应大于或等于由互感产生的电流，则过零点的相角的变化得到全补偿。假设在极端情况下，电流互感器在大接近于 $0^\circ$ 时就饱和，并令饱和电流的峰值为 $I_{2M}$ ，令一次电流的峰值为 $I_{1M}$ ，一次绕组与二次绕组的互感为 $M$ ，则可得：

$$I_{2M} e^{-\frac{R_1}{L} t} \Big|_{t = \frac{\pi}{\omega}} = - \frac{M \frac{dI_1}{dt}}{R_1 + j\omega L} \Big|_{t = \frac{\pi}{\omega}} \quad (53)$$

经运算后可得：

$$I_{2M} e^{-\frac{R_1 \pi}{L \omega}} = \frac{M I_{1M} \omega}{\sqrt{R_1^2 + \omega^2 L^2}} \omega s \theta \quad (54)$$

式中：

$$\theta = \text{tg}^{-1} \frac{\omega L}{R_1} \quad (55)$$

对方程式(54)求解可得最小的电感值 $L$ 。由于求解比较复杂，因此可用以等式(54)二边以 $L$ 为变量作出二条曲线，用曲线相交求解的作图方法，或用实验的方法求出 $L$ 的最佳值。

#### 4. 采用强制电阻的综合制动方式的强制系数 $n_z$ 最小值的计算。

在计算中，假定执行元件灵敏度很高，即令 $I_p = 0$ ，在内部故障时，假定有一个流进电流 $\dot{I}_K$ ，一个流出电流为 $m_{ch} \dot{I}_K$ ， $m_{ch}$ 为流出系数，则：

$$\sum_{i=1}^n \dot{I}_i = (1 - m_{ch}) \dot{I}_K, \quad \max[|\dot{I}_1|, |\dot{I}_2|, \dots, |\dot{I}_n|] = |\dot{I}_K|$$

代入式(36)可得:

$$\begin{aligned} & (1 - m_{ch}) \dot{I}_K - K_3 \dot{I}_K + K_3 K_4 (1 - m_{ch}) \dot{I}_K \\ & = \dot{I}_K [(1 - m_{ch})(1 + K_3 K_4) - K_3] = 0 \end{aligned} \quad (56)$$

在外部故障电流互感器饱和时, 流进电流为  $\dot{I}_K$  则:

$$\sum_{i=1}^n \dot{I}_i = (1 - n_z) \dot{I}_K, \quad \max[|\dot{I}_1|, |\dot{I}_2|, \dots, |\dot{I}_n|] = n_z |\dot{I}_K|$$

代入式(36)可得:

$$\begin{aligned} & (1 - n_z) \dot{I}_K - K_3 n_z \dot{I}_K + K_3 K_4 (1 - n_z) \dot{I}_K \\ & = \dot{I}_K [(1 - n_z)(1 + K_3 K_4) - K_3 n_z] = 0 \end{aligned} \quad (57)$$

由式(56)、(57)可得:

$$K_3 = (1 - m_{ch})(1 + K_3 K_4) = \frac{(1 - n_z)(1 + K_3 K_4)}{n_z}$$

因此  $1 - m_{ch} = \frac{1 - n_z}{n_z}, \quad n_z = \frac{1}{2 - m_{ch}} \quad (58)$

若内部故障无流出电流时, 即  $m_{ch} = 0$ , 则  $n_z = \frac{1}{2}$ , 若内部故障考虑  $\frac{1}{2}$  流出电流, 即

$m_{ch} = \frac{1}{2}$ , 则  $n_z = \frac{2}{3}$ 。

## 六、综合制动电流差动保护比较电路的分析

在通常的差动继电器中, 通常采用环流比较法或均压比较法进行比较, 将工作量与制动量分别进行整流后进行比较, 其输出量为工作量与制动量之差成比例, 满足方程式(21)、(26)。

在新研制的比较回路中, 具有图18的接线方式的比较回路。

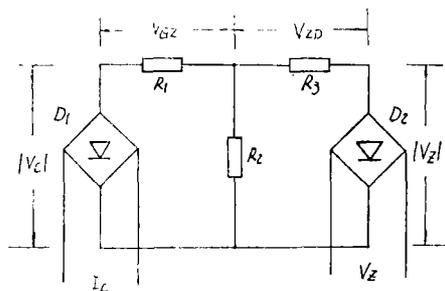


图 18

在母线保护中, 整流桥  $D_1$  所加的交流量是差电流  $I_c$ , 整流后得到电压  $|V_c|$ ; 整流桥  $D_2$  所加的交流量是参与制动的最大值电压  $V_z$ , 整流后得到电压  $|V_z|$ 。在母线内部

故障时,  $|V_c|$  较  $|V_z|$  大, 在  $R_2$  上得到的电压  $V_{R_2}$  足够大, 将整流桥  $D_2$  封住, 因此在  $R_3$  上没有电流流过, 制动电压  $V_{zD}$  为 0; 当  $R_1$  上的工作电压  $V_{C_2}$  大于继电器的门槛电压时, 继电器动作。在母线外部故障时,  $I_c$  较小,  $V_z$  较大, 因此整流桥  $D_2$  不会被封住, 在  $R_3$  上的制动电压大于  $R_1$  上的工作电压, 继电器制动。由图 18 可得到继电器的动作方程式为:

$$|\dot{I}_c| R_1 - [|\dot{V}_z| - |\dot{I}_c| R_2]^+ \geq A \quad (59)$$

对照式 (36) 可得:

$$\left| \frac{V_z}{R_z} \right| = \max[|\dot{I}_1|, |\dot{I}_2|, \dots, |\dot{I}_n|], \quad \dot{I}_c = \sum_{i=1}^n \dot{I}_i$$

$R_z$  为各元件电流经中间变换后经该电阻后取得参与制动电压  $V_z$  的电阻, 因此动作方程式可写为:

$$\left| \sum_{i=1}^n \dot{I}_i \right| - \frac{R_z}{R_1} \left\{ \max[|\dot{I}_1|, |\dot{I}_2|, \dots, |\dot{I}_n|] - \frac{R_2}{R_z} \left| \sum_{i=1}^n \dot{I}_i \right| - \frac{V_{D_2}}{R_z} \right\} \geq \frac{A}{R_1} \quad (60)$$

因此可得  $K_3 = \frac{R_z}{R_1}$ ,  $K_4 = \frac{R_2}{R_z}$ ,  $I_P = \frac{A}{R_1}$

在实际电路中, 调整动作值采用可变门槛电压的方法, 而该门槛电压也同时加入比较回路, 给制动整流桥一封锁电压  $V_D$ , 因此实际的动作方程式为:

$$|\dot{I}_c| R_1 - [|\dot{V}_z| - |\dot{I}_c| R_2 - V_D]^+ \geq A$$

即  $\left| \sum_{i=1}^n \dot{I}_i \right| - \frac{R_z}{R_1} \left\{ \max[|\dot{I}_1|, |\dot{I}_2|, \dots, |\dot{I}_n|] - \frac{R_2}{R_z} \left| \sum_{i=1}^n \dot{I}_i \right| - \frac{V_D}{R_z} \right\} \geq \frac{A}{R_1} \quad (61)$

根据不同的整定值可以作出特性曲线族。

## 参 考 文 献

1. 电流互感器的暂态响应特性《500千伏输变电专业技术情报网译》
2. 电流互感器的暂态响应(英文)《IEEE. PAS 1977. 96卷. NO.6》
3. 最近保护的动向(日文)《电气评论, 昭和52年4月第62卷 NO.6》
4. 500千伏继电保护方式(日文)《电气评论, 昭和52年4月第62卷 NO.4》
5. 500千伏继电保护装置(日文)《三菱电机技报, 昭和45年第45卷 NO.9》
6. 带有非磁性间隙的电流互感器的母线保护(俄文)《Электромашиностроение 1975 № 1》
7. 电流互感器暂态过程的特性(俄文)《ИЗВ. Энергетика 1975 № 12》
8. 技术情报1975年第三期《水电部南京自动化研究所》
9. 薛玉峰: 电流互感器过渡过程分析讲稿。