

# 方向距离元件的设计与运行

## 500KV线路保护设计介绍之三

东北电管局技术改进局 王祚义 张延龄

用两组电气量构成的方向距离元件，由于其接线方式相对来说比较简单，在电网的继电保护技术中得到了广泛的使用。自五十年代以来，基于采用不同的执行机构，先后出现过感应型、整流型与半导体型的方向距离元件。

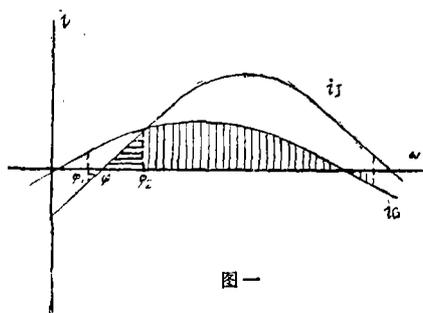
在设计东北50万伏电网的继电保护技术方案时，我们选择了以二极管环型调制器工作原理构成的方向距离元件作为线路保护装置中判别故障方向与测量距离的主要元件，理由除了接线比较简单以外，主要是动作快速，动作时间比较稳定，而后者正是元件本身技术性能的重要指标之一。

目前，东北50万伏线路继电保护装置的研制工作已经结束，本文主要是从电网运行的角度来讨论方向距离元件的实际工作特性以及与此有关的设计问题。

### 一、方向距离元件的工作特性

以下从目前使用比较普遍的环型调制器的方向距离元件作为分析对象，但是所有结论性的意见也同样适用于绝对值比较工作原理的方向距离元件。

用两组工频电气量构成方向距离元件时，环型调制器的工作方式是以两组电气量中瞬时值大的一组为调制量，对另一组瞬时值小的一组实行解调，以解调后的输出量来反映两组工频电气量之间的相位关系。图一中的阴影部分即为解调后的输出。



图一

如果方向距离元件是按工频半周内的平均值来工作，或者解调输出后有好的滤波措施以消除交流成分，根据距离元件的动作条件以下积分式成立：

$$\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} i_j \cdot d(\omega t) + \int_{\varphi_2}^{\varphi_1 + \pi} i_G \cdot d(\omega t) \geq \pi \cdot I_D \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中， 工作电流  $i_G = I_G \cdot \sin \omega t$

极化电流  $i_f = I_f \cdot \sin(\omega t - \varphi)$

$I_D$ 为执行机构的直流动作值

$\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 为积分的上下限，可以分别由 $i_G = \mp i_f$ 的条件求出，并在 $0 - \pi$ 范围内取值：

$$\varphi_1 = \tan^{-1} \frac{I_f \cdot \sin \varphi}{I_f \cdot \cos \varphi + I_G}$$

$$\varphi_2 = \tan^{-1} \frac{I_f \cdot \sin \varphi}{I_f \cdot \cos \varphi - I_G}$$

由上述给出的诸值对(1)式求解，则得出方向距离元件的动作方程：

$$\sqrt{I_G^2 + I_f^2 + 2I_G I_f \cos \varphi} - \sqrt{I_G^2 + I_f^2 - 2I_G I_f \cos \varphi} \geq \pi \cdot I_D \dots\dots\dots(2)$$

(2)式也可以用时间向量间的和与差的形式来表示，如下式：

$$\left| \dot{I}_G + \dot{I}_f \right| - \left| \dot{I}_G - \dot{I}_f \right| \geq \pi \cdot I_D$$

以上是方向距离元件动作方程的常用表达式， $I_G$ 、 $I_f$ 分别为两组正弦电气量中工作电流与极化电流的幅值。

上述动作方程表明：

1、当固定一组电流为常量、例如令极化电流 $I_f$ 为常数并且 $I_f \geq \frac{\pi}{2} I_D$ 时，另一组电流 $I_G$ 在极坐标上描述的轨迹为双曲线的一个分支。双曲线的实轴与极化电流 $I_f$ 表示的极轴一致，同时位于极轴同一侧的双曲线的分支有效。

2、该双曲线的实轴长为定值 $\pi \cdot I_D$ ，虚轴长为 $2 \sqrt{I_f^2 - (\frac{\pi}{2} I_D)^2}$ ；因此，渐近线与极轴间夹角的余弦值为：

$$\cos \varphi_m = -\frac{\pi I_D}{2 I_f} \dots\dots\dots(3)$$

3、如果令极化电流 $I_f$ 为不同数值的常量时，工作电流 $I_G$ 的轨迹为通过极轴上定点 $(\frac{\pi}{2} I_D, 0)$ 的一组双曲线族。显然，动作方程的定义域为 $I_f \geq \frac{\pi}{2} \cdot I_D$  当

$\frac{\pi I_D}{2 I_f} \rightarrow 0$ 时，工作电流 $I_G$ 的轨迹为过定点 $(\frac{\pi}{2} I_D, 0)$ 并垂直极轴的直

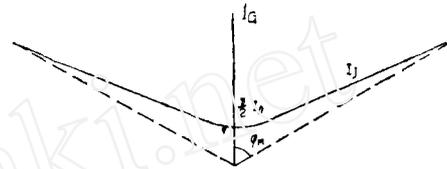
线，伴随电流幅值 $I_f$ 的减少，电流 $I_G$ 轨迹的渐近线与极轴夹角也逐渐变小，至 $I_f = \frac{\pi}{2} I_D$ 为止，最后在 $I_f = \frac{\pi}{2} I_D$ 时工作电流 $I_G$ 轨迹与极轴重合，始点为 $(\frac{\pi}{2} I_D, 0)$  轨迹方程为 $I_G \geq \frac{\pi}{2} I_D$ 。

如果上述两组电气量中任一组的幅值小于 $\frac{\pi}{2} I_D$ 时，方向距离元件的动作方程无解。

4、在动作方程中令工作电流 $I_G$ 为常量时，则上述各点也同样适用于极化电流 $I_f$ ，

因此可以描述如图二的轨迹。

图二是以工作电流为参考量并当 $I_G$ 为某一常量时，两组工频电气量为不同相角差为 $\varphi$ 时使方向距离元件动作的极化电流幅值 $I_J$ 的最小值轨迹，此时渐近线与参考量间的夹角由参考量 $I_G$ 的幅值与元件的执行机构直流动作值 $I_D$ 决定，可以用前述的(3)式求出。



图二

根据以上的数学分析，提出下列结论对设计方向距离元件的工作可能会有所帮助。

1、引入方向距离元件的两组工频电气量的幅值都必须大于 $\frac{\pi}{2} I_D$ ，或者说在工频半周内每一组电气量的平均值至少都应当与执行机构的直流动作值 $I_D$ 相等，这是使方向距离元件动作的必要条件。此时两组工频电流为同相，由于方向距离元件在最小电流值下动作，故称之为距离元件的最灵敏方向。一般设计时希望在选择元件参数时能使在被保护线路金属性故障条件下距离元件工作在最灵敏方向。

2、渐近线与极轴的夹角 $\varphi_m$ ，表示能使方向距离元件动作的两组工频电流之间的最大相角差。 $2\varphi_m$ 称之为该方向距离元件的动作角度范围，根据实际运行对方向距离元件工作特性的要求而定。在设计时可以利用以前的(3)式来确定两组电流中的最小幅值与执行机构动作值的关系。

3、当方向距离元件不在最灵敏方向工作时，如果两组工频电流间的相角差为 $\varphi$ ，则幅值小的一组电流最小动作值由幅值大的一组电流数值而定。以工作电流 $I_G$ 为例，由(2)式可以导出下列关系：

$$I_G \geq \frac{\pi I_D}{2} \cdot \frac{\sin \varphi_m}{\sqrt{\cos^2 \varphi - \cos^2 \varphi_m}} \dots\dots\dots(4)$$

可以看出，当两组电流的相角差 $\varphi$ 不变的条件下，由于极化电流幅值 $I_J$ 的逐渐增加导致方向距离元件动作角度范围的扩展，工作电流 $I_G$ 的动作值也在逐渐减小，在动作角度范围为 $2\pi$ 时工作电流的最小动作幅值为 $I_G^{\min} = \frac{\pi I_D}{2 \cos \varphi}$ 。理由可以用图一来解释，当 $\varphi$ 角在 $-\frac{\pi}{2}$ 与 $\frac{\pi}{2}$ 范围内并为任一常量时，两组工频电流中任何一组幅值的增加必然导致在工频半周内积分面积代数之和的增大，只有方向距离元件工作于最灵敏方向，即两组电流为同相时幅值大的一组才只是成为参考（调制）量，此时方向距离元件的动作才只由幅值小的一组电流值来决定，前已述及，最小动作电流幅值为 $I = \frac{\pi I_D}{2}$ 。

4、目前，几乎所有的方向距离元件都是采用电压方向元件的接线方式，引入两组工频电压，即工作电压 $V_G$ 与极化电压 $V_J$ ，同时电路中存在非线性元件（二极管环型调制器，采用绝对值比较方式时也需要整流元件），因此以上所述的每一组电流本身都是两组工频电压的函数，这将导致分析工作的复杂化。但是我们总是希望所设计的方向

距离元件能够性能稳定而又高效率地工作，因此作为调制量的电压幅值应该大于二极管的结电压，并且负载阻抗应该远大于二极管的动态电阻。在上述的前提下用环型调制器的两组输入电压  $V_G$ 、 $V$ ，与执行机构的直流动作电压  $V_D$  置换以前公式中的相应电流值，对于工程计算来说应该是允许的。

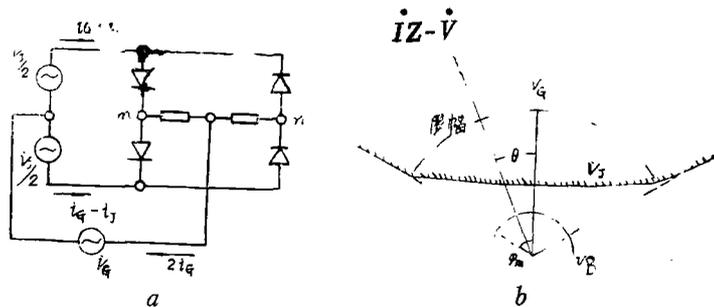
方向距离元件的设计工作包括根据运行需要来确定元件的最大动作角度范围  $2\varphi_m$ 。仿照(3)式求出调制器输入电压  $V$  与动作电压  $V_D$  间的关系：

$$\varphi_m = \cos^{-1} \frac{\pi V_D}{2V} \dots\dots\dots (5)$$

为了保证元件最大动作角度范围的稳定性也可以采用附加的限幅措施并以(5)式中的电压幅值  $V$  定为限幅点。当完全限幅形成方波后最大角度  $\varphi_m$ 。按下式计算：

$$\varphi_m = \frac{\pi}{2} \left( 1 - \frac{V_D}{V} \right) \dots\dots\dots (6)$$

实际上  $\varphi_m$  一般大于  $\frac{\pi}{3}$ ，即  $\frac{V_D}{V} < \frac{1}{\pi}$ ；在上述的条件下由(5)式与(6)式计算出的  $\varphi_m$  值是相同的相对误差小于 3%，因之可以保证元件动作角度范围的稳定性。以下用图三(a)表示用两组工频电压方式的环型调制器的原理接线；(b)中描述了元件的电压方向特性。



图三

图三是根据两组工频电压  $V_G$ 、 $V$ ，经环型调制器后在  $m$ 、 $n$  两端于工频半周内直流平均值等于动作值  $V_D$ ，并引用以前的公式求解的，在(b)中给出了极化电压  $V$  的最小动作值轨迹。如前所述，在未被限幅以前极化电压  $V$  为一组双曲线，当两组电压同相时有最小值为  $\frac{\pi V_D}{2}$ 。伴随两组电压间相角差的增大， $V$  动作值也逐渐增加，至相角差  $\varphi_m$  为止开始达到限幅点。此后  $V$  动作值虽然已不再遵循双曲线规律，但是实际上已经位于最大动作角度  $\varphi_m$  点上。

方向距离元件的极化电压  $V$  采用相或相间电压，工作电压  $V_G$  是由同名相或相间电压、电流以  $\dot{I}Z - \dot{V}$  形式构成并在图三(b)中标明，其中角  $\theta$  为元件内部电路的综合相移。方向距离元件的实际动作角度范围如下，以  $\dot{I}Z - \dot{V}$  为参考量时电压  $\dot{V}$  滞后的动作角度范围（通常所谓第一象限）为  $\theta + \varphi_m$ ；越前时为  $\theta - \varphi_m$ 。

## 二、方向距离元件的运行问题

在谈论保护装置的基本性能与技术指标时，也和其他所有问题一样，总是使用者根据当时所处的客观条件要求来决定的，只要这种要求不是主观臆想的，而是实事求是提出的。结合目前我国电网结构、运行水平以及电力供需的基本情况来看，对保护装置，或是本文中主要讨论的方向距离元件提出以下的基本要求看来是合适的。首先要保证高度的工作可靠性，在这个前提下力争做到动作快速性，所谓工作可靠性是指，在保护区外发生各种类型故障或者不正常情况时不允许误动作，当内部故障时根据预先的设定值（包括定值与时间特性）有选择的动作。在上述有关工作可靠性的两方面要求中把不误动作列为首位，这对50万伏线路主保护双重化的配置方式来说，尤为必要。

在设计东北50万伏线路保护的技术方案时要求方向距离元件应该具有明确的方向性，研制方向距离元件工作的重点是如何保证该元件在设置点母线各种类型故障条件下不误动作，对于方向距离元件用作故障相的选择元件来说，还要求在出口单相接地时非故障相的选相元件不误选相。方向距离元件的测量精度也是在模拟实际的50万伏系统故障初瞬的动态条件下进行考核，习惯上以暂态超越来表示，对于50万伏系统来说这包括非周期分量的超越与高频分量的超越，要求测量元件的暂态超越不大于5%。方向距离元件的动作时间，要求在额定电流值下0.7倍整定值时不大于20毫秒，因为这可以保证在全线路内部各种类型故障条件下保护装置整组动作时间不大于30毫秒的技术要求。当然，如果线路一侧经大电阻接地时也允许保护相继动作，因为从实际运行角度来考虑稳定要求也是可以的。

如上所述，由于方向距离元件要求快速动作，实际上是在系统故障初瞬的暂态历程中工作，因此从保证实际运行时的高度可靠性出发研制方向距离元件的试验条件与试验方法，包括元件本身在试验室内的试验以及整组动模试验，均应符合实际50万伏系统故障情况。根据东北50万伏工程的初步设想，我们规定的试验条件与技术参数如下：

设备容量为210万千瓦的主力电厂经50万伏400公里线路向主网供电，线路的传输容量为150万左右，相当两侧电源电势角度差为 $45^\circ$ ；为了尽量反映实际系统故障时各种谐波自由分量与时间常数的影响，规定线路用集中参数元件组成四节等效T型网络来模拟，两侧接入并联电抗器，补偿度为70%，电源阻抗角在 $88^\circ$ 以上，模拟线路的正序阻抗角包括接入电流二次回路中的试验元件与装置的总功耗在内，不低于 $85^\circ$ 。按上述技术条件并在各种可能出现的不利的故障下对元件进行全面考核，在满足基本的技术性能之后投入系统运行时才能有比较充分的把握。

方向距离元件的具体技术指标是比较多的，以下只就与实际运行关系比较密切的三个方面加以说明：

第一、元件的动作持续时间。根据东北50万伏保护装置与直流操作回路的设计，保护装置的出口一经动作就能可靠地起跳跳闸回路使开关跳开，因此在内部故障时方向距离元件的动作持续时间只要不小于保护装置整组动作时间即能可靠使开关切除故障，如

前所述,该时间定为30毫秒。对于极化回路有记忆作用的方向距离元件当内部故障并且保护设置点母线残压为零时动作持续时间为最短,因此通常以出口三相金属性故障方式来考核元件动作持续时间的技术指标,上述时间也能大致反映元件的记忆回路的效能。目前,在电网运行频率比较稳定的情况下应该适当增大记忆回路的时间常数,以便充分利用动态特性来提高方向距离元件在正反方向故障下的技术性能。所谓适当是指不过分增加电压回路的功耗与部件的尺寸。为了改善保护电阻性故障的性能,在调整检验时可以使记忆回路的自由频率高于电网运行频率,而且这种方法也是简单易行的。当记忆回路时间常数不过长时,将自由频率调整为51周,即比电网运行频率高1周是没有问题的。

影响方向距离元件的动作持续时间的因素比较多,除了记忆回路的时间常数外,还与回路参数间的平衡调整有关,当调整不当时会产生类似感应型元件的潜动行为。根据东北电网运行经验,在所有电流值下的潜动不易消除时宁愿选择在大电流下,即大于最大反向故障电流时的正向潜动,因为这使方向距离元件在近端故障时兼有电流速断的功能。不允许在大电流下的反向潜动,因为这可能导致方向距离元件在出口故障时拒动。为了避免出现上述情况,用三相出口金属性故障方式考核元件的最短动作持续时间,亦即习惯上称之为记忆时间时,应该使故障电流从工作电流额定值作起,在增大故障电流时元件动作的记忆时间不应该变短,否则,要重新进行方向距离元件参数的平衡调整。

第二,距离元件的动态测量精度。一般说来,在检验距离元件的静态特性定值时,只存在试验结果的离散值,当模拟实际系统故障并且距离元件的动作时间与故障的暂态历程时间可以比拟时才产生元件的测量误差问题,因此距离元件的动态测量精度与动作时间这两项技术指标之间是互相制约的。但是设计与调试距离元件的任务就是要尽量恰当地处理两者的关系,以求得对于使用者比较满意的结果。

对于输入距离元件的两组电压量中产生工作电压 $\dot{V}_0$ 的一组 $\dot{I}Z - \dot{V}$ 的模拟阻抗或称转移阻抗 $Z$ ,我们提倡在调整时应使其与被保护区间的线路正序阻抗相同,这包括模拟阻抗 $Z$ 的阻抗角与线路正序阻抗角一致,并且其一次侧归算值与被保护区间的线路正序阻抗值相等,如果调整的结果不符合上述要求,在检验距离元件的定值时 $\dot{I}Z - \dot{V}$ 肯定不为零值(假如距离元件执行机构的直流动作值为零),因此由以前的图三(b)中可以看出距离元件定值必须满足的条件是两组输入电压量的相角差为 $\theta \pm \varphi_m$ ,如果没有任何限幅措施并且两组电压值比较大时相角差则接近 $\theta \pm 90^\circ$ 。为距离元件动作的边界条件。动作边界时两组输入电压的最大相角差取值如下:

当模拟阻抗角大于线路阻抗角时为 $\theta + \varphi_m$ ,反之则为 $\theta - \varphi_m$ 。在实际系统中保护区末端、即距离元件的整定点发生金属性故障时,由工频电气量形成的 $\dot{I}Z - \dot{V}$ 相角是固定的,但是形成极化电压 $\dot{V}_r$ 的输入电压因有记忆回路所以是反映故障前设置点母线的运行电压。对于两侧电源的系统或者即使是空载线路但是线路阻抗角与系统阻抗角不同,因此在故障初瞬间带记忆的母线正常运行电压与故障电压之间相位是不同的,所以输入距离元件的两组工频电压不再满足相角差为 $\theta \pm \varphi_m$ 的动作边界条件而产生动态测量误差。一般说来当模拟阻抗角大于线路正序阻抗角时送电侧的距离元件的保护区缩短,受电侧元件则伸长,而模拟阻抗角小于线路阻抗角时上述情况正好相反。在故障初

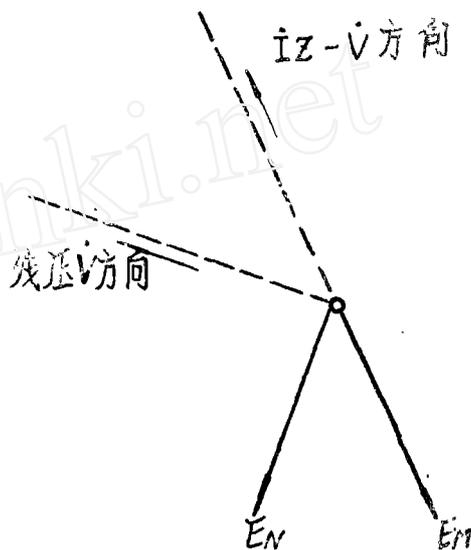
瞬间保护区缩短的元件要待动态消失后方能动作，因而延迟了动作时间这是不希望的。至于保护区伸长的元件将导致越级动作，这在运行中是不允许的。

以上所谈的只是由于调试方面的问题引起距离元件在故障初瞬间工频电气量作用下产生的测量误差及其为实际运行带来的后果，从这里也可以看出，要求在调整时使模拟阻抗 $Z$ 与保护区段的线路正序阻抗相同是合理的。应当指出，对阻抗角一致的要求更为重要得多，因为被记忆的母线正常运行电压是不固定的，由运行方式来决定，由此引起的测量误差是不可控制的。而绝对值不等的后果只是表现为距离元件实际保护区段的伸长或缩短，与运行方式并无关系。

从输入电压 $\dot{I}Z - \dot{V}$ 的构成方式来看，它实际上是一个模拟电路。在不考虑线路的分布电容或者说被保护区段没有分支回路的条件下如果令模拟阻抗的一次归算值及其阻抗角与保护区段的线路阻抗完全相同，则当实际保护区段末端亦即整定点处发生金属性故障时输入电压 $\dot{I}Z - \dot{V}$ 对于工频电气量来说必为零值，满足距离元件动作的另一种边界条件，并且与故障前的运行方式无关。从这种意义上来说，对于故障时的工频电气量而言，距离元件并不存在动态测量误差的问题，而这正是实际使用时所要求的。更进一步，再假定互感器能够忠实地加以传变，即准确地反映一次系统故障电气量的瞬时值的话，甚至可以说距离元件对故障初瞬间的全部暂态过程，包括各种自由分量在内，也不存在测量误差。当然这仅是从理论上而言，实际上距离元件对非周期分量与高频分量是有测量误差的，这就是通常称之为元件的暂态超越。过去一般只注意非周期自由分量的超越现象，但是对于正在出现的超高压长距离线路来说高频分量的超越也不容忽视。例如对50万伏400公里线路来说，故障时最低次数的高频分量的频率已接近于工频的五倍，再由于暂态历程加长而元件的动作时间又要求快速，就更需要采取一定的技术措施来控制高频自由分量的超越行为。在距离元件输入电压 $\dot{I}Z - \dot{V}$ 中加入选频网络是可以采用的技术措施之一，但是要求网络的时间常数很小，以免影响元件动作的快速性，与此相似的技术措施过去也曾在感应型方向距离元件中使用过。另一种比较简单的方法是使距离元件的执行机构动作时带一固定的延时，以躲开故障初瞬高频自由分量的影响，这种方法虽然从技术上来说并不完善，但行之有效。东北50万伏线路保护中方向距离元件采用带10毫秒左右的固定延时动作，暂态超越控制在5%以内，而在电流额定值下0.7倍整定值故障时方向距离元件的动作时间小于20毫秒。

第三、反向故障时元件的方向性。如果当反方向各种类型故障下不能保证正确的方向判别而误动作，结果是联结母线所有元件之一的出口故障将导致所有非故障线路的瞬动段方向距离元件误动作而将母线跳开，鉴于后果的严重，为了保证工作的高度可靠性，在方向距离元件的研制工作中把确保方向性作为重要课题。根据理论分析与实际模拟试验证实，在两侧电源系统的受电侧母线上发生小电阻接地故障时，与故障同名相结线的方向距离元件最容易失去方向性而误动作。为了能比较方便地检验相以及相间结线方式的方向距离元件，规定用受电侧母线三相分别经小电阻接地故障作为考核元件方向性的主要项目。当然，根据距离元件结线方式的不同以及在整组保护装置中具有的不同功能，还要有针对性地进行其他检验元件方向性的考核内容。

众所周知，加强方向距离元件记忆回路的效能对于保证方向性总是有利的，至少可以延迟元件的误动作时间，因此在研制东北50万伏线路高频闭锁距离保护与后备距离保护瞬动段时普遍采取了故障经一定时间后将可能误动作的距离元件闭锁的措施以防止整组装置在反向故障时误动作，尽管如此我们还是认为，最好的办法是从方向距离元件本身解决问题，这样也能使整组逻辑回路趋于简化。下面以受电侧母线三相分别经小电阻接地的故障方式为例，考察方向距离元件的两组输入电压间的相位关系。



图四

为了简化分析方法，同时使工作有更充分的把握，选择了最不利的条件下两组电压的相位，如图四所示：

最不利的条件是指，受电侧为无穷大系统因此母线电压以电源电势  $E_N$  表示，对于

小电阻接地故障时母线残压  $\dot{V}$  滞后正常运行电压  $\dot{E}_N$  角度的极限值为  $90^\circ$ ，由于残压  $\dot{V}$  很小，因此  $\dot{I}Z - \dot{V}$  与送电侧电源电势  $\dot{E}_M$  反相。按以上规定条件画出两组输入电压，其相角差是可能出现的最小值，因而是方向距离元件最不利的工作条件。根据东北50万伏系统考虑两侧电势角度相差  $45^\circ$  时，可知两组输入电压最小相角差为  $45^\circ$ ，即残压  $\dot{V}$  越前  $\dot{I}Z - \dot{V}$  的角度为  $45^\circ$ 。因此结论是，如果把方向距离元件的动作条件限制在残压  $\dot{V}$  越前  $\dot{I}Z - \dot{V}$  的角度为  $45^\circ$  以内时，可以保证反向故障不致误动作。

由以前图三(b)的距离元件电压方向特性中可以看出，以电压  $\dot{I}Z - \dot{V}$  为基准时滞后的动作角度范围是有用的，因为它能保护内部电阻性故障，越前的动作角度范围并无更多的实际意义，而且为保证方向性必须加以限制，这也是运行上的需要。根据上述理由，对用于东北50万伏线路保护的方向距离元件动作特性作如下的规定，滞后的动作角度范围按过去的习惯定为  $90^\circ$ （即第一象限）。越前时最大动作角度不得大于  $45^\circ$ ，即  $\theta - \varphi_m = -45^\circ$ ；因此方向距离元件的动作角度范围  $2\varphi_m$  为  $135^\circ$ 。具有上述动作特性的方向距离元件经过动模试验后，结果是满意的。

### 三、方向距离元件的设计

为了满足上述对方向距离元件动作特性的技术要求，结合上面所提出的设计原则与主要步骤来讨论一些应该考虑的技术问题。前面已经提到，采用附加的限幅措施可使方向距离元件的动作角度范围比较稳定，由于环型调制器的解调输出本身已经具有某种限幅性能，因此对附加的限幅环节要求并不严格，可以利用二极管的正向特性来实现。限

幅二极管可以用锗管, 因为对于并联双向限幅的接线方式来说, 反向漏电流的因素并无实际影响而电压受温度变化的影响硅管与锗管大致相同。当温度上升时都是以平均 2 毫伏/度递减。以用锗二极管为例, 为了取得较好的限幅效果, 限幅点电压选定为 0.8 伏, 考虑方向距离元件的最大动作角度范围  $2\varphi_m$  为  $135^\circ$ , 由前引的 (5) 式可以估算出执行机构的直流动作值  $V_D$  约为 0.2 伏。当方向距离元件工作于最灵敏方向时输入调制器的电压动作值为最小, 其交流有效值约为 0.22 伏。由 50 万伏线路要求电流额定值为 1 安, 阻抗为 10 欧可以推算出方向距离元件的最小动作电流为 0.022 安, 相当额定电流的 2.2%。如果方向距离元件的最小动作电压定为 2 伏时, 可以算出极化变压器的变比。当然, 以上的推算值是属于最理想的无损耗的情况, 因为输入环型调制器最小动作电压幅值 0.3 伏时已经开始限幅, 我们希望在设计时能充分考虑各种因素从而使回路的工作效率提高。如果降低二极管的限幅点电压会对最小动作电压时的工作情况有某种程度的改善, 但是还要注意到温度对二极管正向特性的影响。例如以室温  $20^\circ\text{C}$  为标准, 当环境温度由  $-10^\circ\text{C}$  至  $+50^\circ\text{C}$  变化时限幅电压将变化  $\pm 0.06$  伏, 而选择限幅点电压为 0.8 伏的理由不仅希望有小的动态电阻以提高限幅的效能, 也考虑把上述温度变化的影响控制在 10% 以内。由此看来, 设计工作的艺术就表现在众多的互相冲突的因素中寻求对于使用者比较满意的折衷解决。

控制方向距离元件最大动作角度范围的方法比较多, 上述双向对称限幅的优点是, 以元件的执行机构直流动作值来控制动作角度范围为任意数值, 同时执行机构动作性能稳定, 不易受外来可能干扰的影响, 缺点表现在以上讨论的温度影响中, 虽然并不严重。

另一种控制动作角度范围的方法是采用双向不对称限幅的措施, 即调制器反向输出电压的限幅点高于正向输出电压的限幅点。可以用完全限幅后形成的输出方波来说明, 当用同一种半导体材料的二极管在正向输出并接一个, 而反向输出并接两个时, 由于反向电压为正向电压的两倍, 故最大动作角度范围肯定为  $120^\circ$ , 并且动作角度范围不受前述温度变化的影响。但是要求元件执行机构的直流动作值接近于零值, 即所谓零指示器, 因此这种双向不对称限幅的方式的优缺点与前述的对称限幅正好相反。优点是很少受温度影响, 因此选择限幅点电压可以比较灵活一些。缺点在于元件的执行机构易受外界干扰的影响, 同时任意调整动作角度也比较困难。此外在设计时还应该注意, 由于执行机构的动作非常灵敏, 因此当正向输出未限幅前方向距离元件的最大动作角度范围接近于  $180^\circ$ 。当然, 由于一些特殊的原因, 要求元件的动作角度范围大于  $180^\circ$  时, 就只能采用这种双向不对称限幅的工作方式了。

当方向距离元件的解调输出电压经滤波回路后尚有残余的二次谐波分量时, 也可以有意识地利用它来达到控制动作角度范围的目的, 方法是使元件的执行机构动作值很小但动作带一固定的延时。从理论上来说, 当固定动作延时为 5 毫秒时元件的最大动作角度范围为  $180^\circ$ 。动作延时大于 5 毫秒时动作范围即小于  $180^\circ$ 。这种控制动作角度范围的方法虽然简便易行, 但是其主要缺点在于方向距离元件的动作时间不稳定, 根据故障瞬间的电气角度不同而异, 最慢与最快相差 10 毫秒, 这是正负半波比相工作原理的共同缺点。前面已经提到, 东北 50 万伏系统保护设计把元件的动作时间稳定作为重要指标之

一，因此不能简单地采用这种方法来调整方向距离元件的动作角度范围。

以上简单地介绍了控制方向距离元件最大动作角度范围的几种常用方法，得到的动作特性已经在图三(b)中表示过，即如果以工作电压  $\dot{V}_G$  为参考量时极化电压  $\dot{V}$ ，在超前或滞后时最大相角差是相同的，如上所述  $\varphi_m$  等于  $67.5^\circ$ 。为了使方向距离元件具有不对称的动作特性，即以输入电压  $I Z - \dot{V}$  为参考量时设置点母线电压  $\dot{V}$  滞后的最大动作角度大于越前的动作角度，最简单的方法是合理地利用元件内电路的相移，以前述的使用要求为例，方向距离元件的最大动作角度范围为  $135^\circ$ ，如果设计时使元件内电路的综合相移  $\theta$  为  $22.5^\circ$  时，可以满足在内部故障下元件的保护范围为  $90^\circ$ ，越前时动作角度不大于  $45^\circ$ ，有效地抑制了元件的反向故障误动作区域。所谓合理性，是指这种相移方法也能同时改善方向距离元件在其他方面的一些技术性能。

以极化回路为例，当品质因数  $Q$  为 3 时，时间常数为 19 毫秒。如上述距离元件的最小动作电压定为 2 伏，则出口故障下记忆时间约为 75 毫秒，如果回路自由频率调成 51 周，故障时在 75 毫秒内相移为  $27^\circ$ ，因为越前（即第二象限区域）的动作范围为  $45^\circ$ ，故不致使距离元件拒动。即使考虑不利的条件，受电侧小电源出口故障，因为此时极化电压已经前移某一角度，也不存在问题，理由是故障后 30 毫秒保护装置出口已经起动开关跳闸回路，而 30 毫秒内记忆电压前移电气角度为  $10^\circ$ 。一般极化电压  $\dot{V}$ ，是由记忆回路的电阻两端取得，因此自由频率高于电网运行频率时，方向距离元件的输入电压  $\dot{V}$  总是滞后极化电压  $\dot{V}_r$ ，滞后的角度  $\alpha$  可由下式算出：

$$\alpha = \tan^{-1} \left[ \left( \frac{f_s^2}{f_0^2} - 1 \right) Q + \frac{1}{4Q} \right] \dots\dots\dots (7)$$

如果(7)式中，运行频率  $f_0$  为 50 周，自由频率取 51 周， $Q$  为 3，可以算出相角差  $\alpha$  为  $11.5^\circ$ 。实际上述诸因素影响是不大的，例如取自由频率为 50.5 周， $Q$  为 2.5 时，相角差  $\alpha$  为  $8.5^\circ$ 。由于综合相移要求  $22.5^\circ$ ，除开从极化回路得到  $11.5^\circ$ ，余值可以设法从工作回路中得到解决。

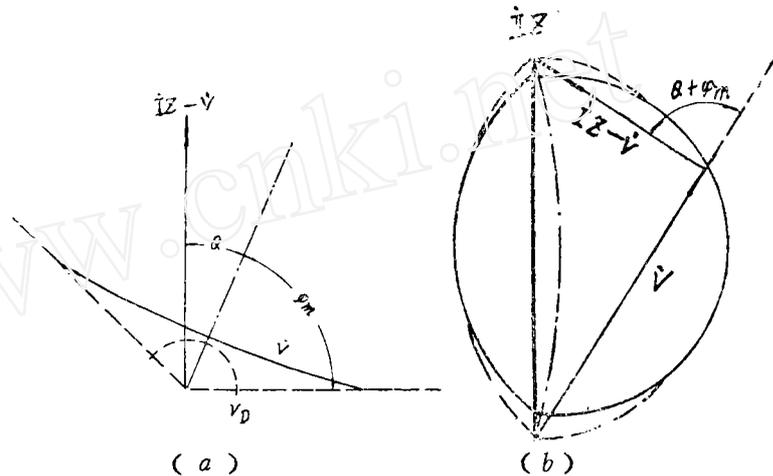
过去在设计方向距离元件时，为了减少元件的内角，不得不减少电抗变换器的二次匝数，有时甚至使电流二次回路的功耗增大。现在为了在工作回路中得到附加的相移而有意识地利用电抗变换器二次的感抗。由于元件的工作回路是由电抗变换器二次的输出阻抗与调制器负载电阻串联，如果使电阻值为 5 倍感抗值时可以使  $I Z - \dot{V}$  越前工作电压  $\dot{V}_G$  约为  $11^\circ$ 。按上述参数关系考虑，工作回路的时间常数为 0.6 毫秒，实际上对方向距离元件的工作并无任何影响。在电抗变换器假定无漏磁的条件下，可以用增加二次匝数与减少一次匝数的方法来保持转移阻抗的设计值不变，同时又增加二次感抗数值，上述方法对降低元件的电流回路功耗有利，也充分发挥了内电路各参数的作用。

目前东北电网用于 50 万伏线路保护的方向距离元件中采取的主要技术措施是，执行机构带 10 毫秒左右的固定延时动作，用不对称的双向限幅方法控制最大动作角度范围，以极化回路与工作回路的内部综合相移取得实际需要的不对称动作特性，如图五所示：

图五中实线表示方向距离元件的实际动作特性，虚线则是元件的执行机构直流动作值为零时的理想动作特性。图五(a)与以前的图三(b)大致相同，不同的只是元件的

输入电压  $\dot{V}$  以有效值表示, 实线是有效值  $\dot{V}$  的最小动作值轨迹, 当滞后  $\dot{I}Z - \dot{V}$  为  $\theta$  角时  $\dot{V}$  数值最小, 表示此时方向距离元件工作于最灵敏方向。图五 (b) 是以  $\dot{I}Z$  为参考量的动作特性, 与过去习惯以阻抗平面表示的方法相同。当以实线与虚线表示的两种动作特性重合时方向距离元件已在限幅区内工作。

由图五可以看出, 由于元件内电路的相移, 在被保护线路内部金属性故障时方向距离元件的工作偏离最灵敏方向。为了尽量减少这种不利因素的影响, 方



图五

向距离元件在第二象限的动作区域不能太小, 因此动作角度范围定为  $45^\circ$ 。以上是针对元件的静态特性而言, 至于瞬时动作的带记忆回路的方向距离元件, 除非是空载线路的故障情况, 否则在故障初瞬也不可能工作在最灵敏方向, 因为即使元件的内电路无相移, 但是故障前后设置点母线电压的相位是不同的。根据上述理由, 方向距离元件具有图五表示的动作特性从实际使用的角度是比较满意的。

以下再对方向距离元件的几项设计指标稍加说明。仿照前述的 (3) 式与 (4) 式可以写出以两组输入电压表示的具有任意特性的方向距离元件动作方程如下:

$$K_G |\dot{I}Z - \dot{V}| \geq \frac{\pi V_D}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{K_I^2 V^2 - \left(\frac{\pi V_D}{2\sqrt{2}}\right)^2}{\cos^2(\beta - \theta) K_I^2 V^2 - \left(\frac{\pi V_D}{2\sqrt{2}}\right)^2}} \dots\dots\dots (8)$$

(8) 式中  $\dot{I}Z - \dot{V}$  与  $\dot{V}$  是以交流有效值表示的方向距离元件两组输入电压, 角度  $\beta$  是以  $\dot{I}Z - \dot{V}$  为参考量时输入电压  $\dot{V}$  的初相角, 滞后时取正值, 角  $\theta$  仍然表示元件内电路的综合相移。系数  $K_G$ 、 $K_I$  分别为:  $K_G = \dot{V}_G / (\dot{I}Z - \dot{V})$ ,  $K_I = \dot{V}_I / \dot{V}$ 。先来分析在最灵敏方向下距离元件输入电压的最小动作值。根据 (8) 式可得:

$$\left[ K_G^2 |\dot{I}Z - \dot{V}|^2 - \left(\frac{\pi V_D}{2\sqrt{2}}\right)^2 \right] \cdot \left[ K_I^2 V^2 - \left(\frac{\pi V_D}{2\sqrt{2}}\right)^2 \right] \geq 0$$

由上式中后一项可以求解距离元件的最小动作电压值, 可以看出, 在最灵敏方向下元件的最小动作电压只由执行机构的直流动作值决定, 根据规定的最小动作电压指标可以求出系数  $K_I$  的设计值。如果元件内电路的综合相移为零时由式中前一项可以求出距离元件的最小动作电流值, 即

$$I \geq \frac{\pi V_D}{2\sqrt{2} K_G \cdot Z} \dots\dots\dots (9)$$

根据定义,元件的精工电流数值要比(9)式的最小动作电流值大10倍,为了改善上述情况,采用在小电流值下的过补偿措施来增大转移阻抗 $Z$ 借以降低距离元件的精工电流值。应该指出,降低距离元件的最小动作电流值主要是靠设计工作的合理性,权衡各种因素加以妥善解决并且追求高效率的工作状态,上述补偿措施是有限度的,我们不希望在小电流值下距离元件的动作阻抗反而增大。

由(9)式可知,距离元件的最小动作电流与精工电流值由执行机构的直流动作值 $V_D$ 与转移阻抗 $Z$ 决定,与电压回路的整定无关。在讨论工作回路的相移时已经说明,在保持转移阻抗 $Z$ 为规定值时适当增加电抗变换器二次匝数,减少一次匝数是合理的,这对降低元件的电流回路功耗有利。

当距离元件内电路的综合相移不为零时影响元件最小动作电流值的基本因素与上相同,但是数值要增大。将(8)式改写成(4)式的形式可得:

$$K_c |I Z - \dot{V}| \geq \frac{\pi V_D}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{\sin(\beta_m - \theta)}{\sqrt{\cos(\beta - \beta) - \cos(\beta_m - \theta)}}$$

式中 $\beta_m$ 为输入电压 $\dot{V}$ 滞后时的最大动作角。当线路全属性故障,方向距离元件在第一象限的动作角度范围为 $90^\circ$ 时上式可以简化为:

$$K_c |I Z - \dot{V}| \geq \frac{\pi V_D}{2\sqrt{2} \cdot \sqrt{1 - \tan^2 \theta}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

根据以前提供的参数,元件内电路的综合相移为 $22.5^\circ$ ,可以求出最小动作电流值为:

$$I \geq 1.1 \frac{\pi V_D}{2\sqrt{2} \cdot K_c Z}$$

与(9)式比较,最小动作电流值增加10%。由此也可以看出,内电路相移的方法是可行的。

## 结 语

具有不对称工作特性的方向距离元件与目前国内外各种类型的距离元件相比,其技术性能是优越的。

与对称工作特性的方向距离元件(如所谓圆特性、透镜型等),东北电网研制的方向距离元件能够在保证反向故障不误动作的同时,保留了内部电阻性故障的保护性能。

与其他接线方式比较复杂的,如四边形、扇形等距离元件比较,虽然它们之间的静态工作特性是类似的,这由图五(b)中可以看到。但是本元件还具有优良的动态工作特性,结构也比较简单。

本文主要是从电网运行的角度来讨论方向距离元件的基本技术性能,经过理论分析与试验证实选择不对称工作特性的理由。并提出有关距离元件设计的原则与步骤和实现不对称工作特性的一些技术手段。

目前,用于东北电网50万伏线路保护的方向距离元件的研制工作已告结束,经过动模试验的考核,技术性能是满意的。