

I_0 比相原理及其在接地距离中的应用

水电部电科院 魏连壁

一 I_0 比相在原理上的优越性

应用故障分量构成保护继电器是近些年来继电保护发展的一个趋向。在国外出现行波保护,在国内大量采用突变量构成的振荡闭锁装置及突变量原理的选相元件等等,都是想从原理上摆脱正常运行状态对保护性能的影响。利用故障分量 I_0 作比相的参考量,根据补偿电压的相位变化对线路的接地点进行测量而构成的接地距离保护,是直接利用只有在接地故障中出现的故障分量 I_0 ,从而在理论上解决了与接地故障无关的正常运行以及短路故障状态对测量的影响。这样,就从根本上解决了不同相位电势在过渡电阻上产生助增电流而引起的保护范围伸长或缩短的问题。这个问题正是所有由全电气量构成的各种阻抗继电器所不可克服的原理上的缺点。因此,有很多全电气量的接地距离保护中也引入 I_0 比相部分,以解决超越误动的问题。如南京自动化所研制的多相补偿接地距离继电器利用 $-I_0$ 参与比相,还有美国GE公司的TLS-1000型距离保护装置中的接地距离也有 I_0 比相部分,都是用来解决超越误动的问题。

在短线路上应用接地距离保护时,保护电阻能力也是一个突出的问题,必需从原理上加以解决。采用 I_0 作极化量,在提高保护电阻能力方面,也有其他原理所不具备的优越性。从物理意义上来说,当线路发生经过渡电阻接地时,各故障相电势通过各相阻抗和接地过渡电阻形成相应数量的短路回路,而接地电阻是这几个回路的共同支路。电阻两端的电压降是由这几个回路电流之和产生的,所以过渡电阻在每个回路中的转移阻抗都要受到其他几个回路助增电流的数值和相位的影响。因此,全电气量阻抗继电器必然要通过这条共同支路感受到其他回路对其阻抗测量的影响。然而利用 I_0 作极化量,在理想的状态下,它和接地过渡电阻上的电压降保持相位相同并且不随电阻值而变化,因此,补偿电压的组成部分的过渡电阻上的电压降和 I_0 比相后不产生输出。这样就从根本上消除了过渡电阻对故障点距离测量的影响。所以说, I_0 才是利用模拟量实现接地阻抗测量元件唯一的、也是最合理的极化量,利用它作为比相的参考量而实现的接地阻抗测量元件,从故障相元件来看,真可以说是名符其实的反应故障点的距离(不是阻抗)而动作的距离继电器。因此,对于实现接地距离, I_0 是最为理想的天然量。这一点早已为国内、外距离保护的学者和权威所瞩目并且在实际当中已有应用。

二 I_0 极化短线路接地距离的工作原理

采用 I_0 为极化量,规定补偿电压滞后于 I_0 为动作范围的三个相比相元件,以“与”关系输出而构成的是一个多相接地阻抗继电器。当用整流原理实现这种继电器时,必须

是采用三个相补偿电压分别与 I_0 比相并将三个比相执行继电器的接点串联连接的接线方式，以实现三相之间的“与”关系并转化为统一的多相接地阻抗继电器。其基本动作条件公式为：

$$\begin{aligned} I_m \left[\frac{\dot{u}'_A}{I_0} \right] &= I_m \left[\frac{\dot{u}_A - (I_A + 3K I_0) Z_R}{I_0} \right] \leq 0 \\ I_m \left[\frac{\dot{u}'_B}{I_0} \right] &= I_m \left[\frac{\dot{u}_B - (I_B + 3K I_0) Z_R}{I_0} \right] \leq 0 \\ I_m \left[\frac{\dot{u}'_C}{I_0} \right] &= I_m \left[\frac{\dot{u}_C - (I_C + 3K I_0) Z_R}{I_0} \right] \leq 0 \end{aligned} \quad \dots\dots (1)$$

式中： $\dot{u}'_A, \dot{u}'_B, \dot{u}'_C$ ——A、B、C相补偿电压， $\dot{u}_A, \dot{u}_B, \dot{u}_C$ ——保护安装点的各相电压， I_A, I_B, I_C 和 I_0 ——流经保护安装点的各相电流和零序电流， $K = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1}$ ——线路零序电流补偿系数， Z_0 和 Z_1 ——线路单位长度的零序和正序阻抗。

当同时满足式(1)中三个条件，即三个比相式输出均为负值时，继电器动作。虽然，从形式上看，每个补偿电压都是单独和极化量 I_0 比相，已经完成了比相测量任务，特别是在整流型方案里，是把各相补偿电压与 I_0 比相完成后的执行元件的接点再串联起来，这是在现有的各种保护方案中从未见过的作法，因而误认为这是为了解决某些原理上的缺陷不得已而为之的作法。同时又把三相执行元件的接点串联连接看成是又一缺陷(文献6)。实际上，三个相补偿电压与 I_0 分别比相的三部分共同组成一个统一的多相接地距离继电器，不能把它们分割开来，孤立地分析它们每个的不足。从三个组成部分在故障时保证对故障点进行测量中所起的作用可以看出，三个部分都是统一体不可分割的一部分，它们之间存在着互相配合、协调的相互依赖关系。只有全面分析和利用故障相和非故障相比相部分在接地故障中的动作行为，才得以最大限度地充分理解这种原理在保护电阻能力和保护范围稳定方面的优越性。这一切都是其他原理难以作到的。下边，通过对各比相部分在各种接地故障中的动作行为的分析，进一步观察多相接地阻抗继电器各比相部分相互依赖的内在联系，从而正确理解和利用各比相部分的功用。

1, 单相接地短路时的动作行为

在图(1)所示的双侧电源系统中，在线路的g点发生经过渡电阻 R_g 的单相接地短路。假定故障相为A相。

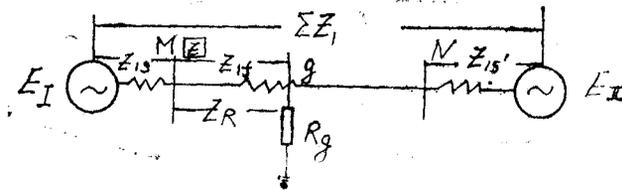


图1 线路接地短路的等值系统图

图中： E_I 和 E_{II} ——分别为送端和受端等值电势； Z_{I1} 和 Z_{II1} ——送端和受端等值电源的内阻， ΣZ_1 ——等值系统正序阻抗之和； Z_{f1} ——故障点到母线线路阻抗； Z_R ——整定阻抗， R_g 接地过渡电阻。

(1) 送端保护各相元件的动作行为对安装在送端M侧的多相距离继电器, 在求出负载和故障电流M侧分流的各序分量后, 代入式(1)经整理后得故障相A相比相元件的动作条件式:

$$I_m \left[\frac{\dot{u}'_A}{\dot{I}_0} \right] = I_m \left[\frac{\dot{I}_A + 3K \dot{I}_0}{\dot{I}_{0\Sigma} \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{0s} + Z_{0f}}} (Z_{1f} - Z_R) + \frac{3 \dot{I}_{0\Sigma} R_s}{\dot{I}_{0\Sigma} \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{0s} + Z_{0f}}} \right] \leq 0 \dots\dots\dots (2)$$

式中: \dot{u}'_A ——故障相补偿电压; $\dot{I}_{0\Sigma}$ ——故障点零序电流; $\frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{0s} + Z_{0f}}$ ——M侧的零序电流分流系数, 其中 Z_{0f} ——故障点零序阻抗; Z_{0s} ——送端电源的零序阻抗; Z_{0f} ——故障线段的零序阻抗。

式(2)的最后一项, 只有当分流系数 $\frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{0s} + Z_{0f}}$ 为实数时, 对全式的虚数部分输出才不产生影响。但在实际系统中, 由于电源的零序阻抗角偏大, 而线路的零序阻抗角相对偏小, 因此分流系数, 在一般情况下, 不会总是实数, 特别是靠近对侧母线故障时, 它将是带有正虚数部分的复数。在这种情况下, 由于式(2)的后一项将有负虚数部分输出, 而影响保护范围伸长。为了防止对端母线出口接地故障时, 由于接地过渡电阻的影响而发生超越误动, 需按产生最大 \dot{I}_0 、 $\dot{I}_{0\Sigma}$ 相角差的实际系统参数求出分流系数的最大幅角 α 。如果不是直接用 \dot{I}_0 作比相的参考量, 而是将它向滞后方向移相 α 角后去比相, 则可使参考量与故障点 $\dot{I}_{0\Sigma}$ 在相位上相重合。因而可以消除超越误动并达到理想的工作条件。对这个故障点, 可以直接用故障点的 $\dot{I}_{0\Sigma}$ 作比相的参考量。用 \dot{I}_0 移相后作极化量的比相式为:

$$I_m \left[\frac{\dot{I}_A + 3K \dot{I}_0}{\dot{I}_0 e^{-j\alpha}} (Z_{1f} - Z_R) + \frac{3 \dot{I}_{0\Sigma}}{\dot{I}_0 e^{-j\alpha}} \right] \leq 0 \dots\dots\dots (3)$$

当 $e^{-j\alpha}$ 完全纠正 \dot{I}_0 、 $\dot{I}_{0\Sigma}$ 相位差时, 无论 R_s 值如何变化, 后一项总是实数。所以, 比相式的虚数部分的输出完全取决于前一项的变化, 即

$$I_m \left[\frac{\dot{I}_A + 3K \dot{I}_0}{\dot{I}_0 e^{-j\alpha}} (Z_{1f} - Z_R) \right] \leq 0 \dots\dots\dots (4)$$

欲使比相式(4)的结果正确地反应故障点的位置与整定点的关系, 首先, 必须保证整定阻抗角和线路阻抗角相同, 其次, 还必须满足故障相补偿电流与比相参考量之间幅角差的负值不超过线路阻抗角(文献4)。在整定阻抗角正确整定的条件下, 后一点的物理意义是故障后相对 $\dot{I}_{0\Sigma}$ 以及 $3 \dot{I}_{0\Sigma} R_s$ 电压降, 在相位关系上, Z_{1f} 和 Z_R 仍保持含有电

抗性的成分，亦即它们的电压降仍然领先 $3 \dot{I}_{0\Sigma} R_g$ 上的电压降的条件下，才可以利用比相方式对故障点进行有效的测量。在系统稳定和保护正常工作的条件下，电流比相幅角差只有负值的大小才有实际意义。片面的追求前一项两部分幅角的组合，不考虑在实际中是否会有这种情况，就会提出莫明其妙的问题和结论。

当 $Z_{1\Sigma} = Z_{2\Sigma}$ ，可得A相比相式

$$I_m \left\{ \frac{\dot{u}'_A}{\dot{I}_{0e} e^{-j\alpha}} \right\} = I_m \left\{ \left[\dot{u}'_{A1} - I_{0\Sigma} \left(2Z_{1\Sigma} \frac{Z_{1S} + Z_R}{Z_{1S} + Z_{1f}} + Z_{0\Sigma} \frac{Z_{0S} + (1+3K)Z_R}{Z_{0S} + Z_{0f}} \right) \right] / I_{0\Sigma} \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{0S} + Z_{0f}} e^{-j\alpha} \right\} \leq 0$$

B相比相式

$$I_m \left\{ \frac{\dot{u}'_B}{\dot{I}_{0e} e^{-j\alpha}} \right\} = I_m \left\{ \left[\dot{u}'_{B1} + I_{0\Sigma} \left(Z_{1\Sigma} \frac{Z_{1S} + Z_R}{Z_{1S} + Z_{1f}} - Z_{0\Sigma} \frac{Z_{0S} + (1+3K)Z_R}{Z_{0S} + Z_{0f}} \right) \right] / I_{0\Sigma} \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{0S} + Z_{0f}} e^{-j\alpha} \right\} \leq 0$$

C相比相式

$$I_m \left\{ \frac{\dot{u}'_C}{\dot{I}_{0e} e^{-j\alpha}} \right\} = I_m \left\{ \left[\dot{u}'_{C1} + I_{0\Sigma} \left(Z_{1\Sigma} \frac{Z_{1S} + Z_R}{Z_{1S} + Z_{1f}} - Z_{0\Sigma} \frac{Z_{0S} + (1+3K)Z_R}{Z_{0S} + Z_{0f}} \right) \right] / I_{0\Sigma} \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{0S} + Z_{0f}} e^{-j\alpha} \right\} \leq 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中： \dot{u}'_{A1} 、 \dot{u}'_{B1} 和 \dot{u}'_{C1} ——正常运行时的各相补偿电压。

根据式(5)画出M侧保护区边缘处单相接地故障时的向量图，如图(2)

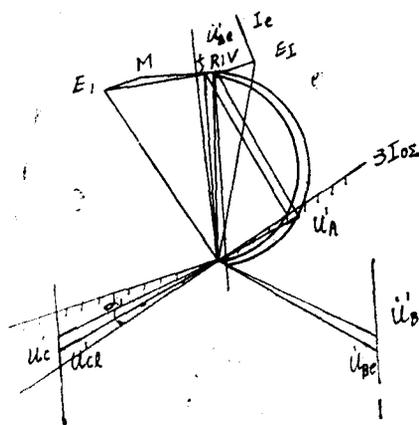


图2 单相接地故障向量图

要受比相器的灵敏度所限，试验结果表明，保护电阻值不超过200欧。

b, 从图(2)，在 R_g 从小到大的变化过程中，C相补偿电压向量首先脱离动作相

从图(2)可以看出，a, 送端保护故障相比相元件，在理想的条件下，以 $\dot{I}_{0\Sigma}$ 为极化量，区内短路时，无论 R_g 值如何变化，补偿电压 \dot{u}'_A 总是滞后于 $\dot{I}_{0\Sigma}$ ，一直是动的。因此，可以说它的保护电阻的能力是无限大的。但实际上，按线路末端短路条件而移相的参考量，在保护区内故障时，一定是滞后 $\dot{I}_{0\Sigma}$ 的，并且随故障点向始端移动滞后的相角差 δ 也越来越大，电抗型阻抗特性的斜率也随之变大，因此保护电阻的能力不会是无限制的。此外，实际装置的保护电阻能力也还

应用这种原理的保护时,对 α_1 和被保护线路的长度,根据式(8)的条件加以限制。我们应用 \dot{I}_0 比相原理主要是为了解决短线路的接地保护问题。经过综合考虑,将 α_1 角固定在 $20\sim 25^\circ$,以提高保护电阻能力,同时限制使用在50公里以上的线路上。试验证明,既可得较高的保护电阻能力,又保证了进行正常测量的条件,同时又保证在反方向故障时不失去方向性。

既然这种保护装置是用于短线路的,对于它就不存在线路串联补偿电容所引起的问题。假如真的把这种保护用在有串补电容的线路上,可以肯定地说,它的性能绝不比全电气量的接地距离差。

2 两相接地短路时的动作行为

对于两相接地短路,除接地保护外,还有相间保护可以切除故障。同时两相接地短路故障随接地跨越电阻值的不断增大,逐渐向两相短路转变。在这个过程中,接地保护将逐渐失去保护能力,而相间保护自始至终都有能力切除故障。因此,对接地距离保护并不一定要求它对两相接地故障有足够大的保护电阻能力,但是一定不能产生误动作。这一观点在很多接地距离保护装置的逻辑回路中都有所反应,并且已被广大距离保护工作者广泛地接受。

以下重点分析影响正确测量的两个因素:

(1) 滞后故障相元件在 R_f 的影响下的动作行为

在图(1)所示的系统中,在送端M母线出口经过渡电阻 R_f 发生B、C两相接地短路。

B相元件的比相式

$$I_m \left[\frac{\dot{u}_B}{\dot{I}_0 e^{-j\alpha}} \right] = I_m \left\{ \left[\dot{u}_{B1} - a^2 \right] I_{1\Sigma}^{(1,1)} Z_{1\Sigma} \frac{Z_{1S} + Z_R}{Z_{1S} + Z_{1f}} - a I_{2\Sigma}^{(1,1)} Z_{2\Sigma} \frac{Z_{2S} + Z_R}{Z_{2S} + Z_{1f}} - \dot{I}_{0\Sigma} Z_{0\Sigma} \frac{Z_{0S} + (1+3k)Z_R}{Z_{0S} + Z_{of}} \right\} / \left[\dot{I}_{0\Sigma} \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{0S} + Z_{of}} e^{-j\alpha} \right] \leq 0 \dots \dots (9)$$

C相元件的比相式

$$I_m \left[\frac{\dot{u}_{c'}}{\dot{I}_0 e^{-j\alpha}} \right] = I_m \left\{ \left[\dot{U}'_{c1} - a \right] I_{1\Sigma}^{(1,1)} Z_{1\Sigma} \frac{Z_{1S} + Z_R}{Z_{1S} + Z_{1f}} - a I_{2\Sigma}^{(1,1)} Z_{2\Sigma} \frac{Z_{2S} + Z_R}{Z_{2S} + Z_{1f}} - \dot{I}_{0\Sigma} Z_{0\Sigma} \frac{Z_{0S} + (1+3k)Z_R}{Z_{0S} + Z_{of}} \right\} / \left[\dot{I}_{0\Sigma} \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{0S} + Z_{of}} e^{-j\alpha} \right] \leq 0 \dots \dots (10)$$

A相元件的比相式,当 $Z_{1\Sigma} = Z_{2\Sigma}$ 时,

$$I_m \left[\frac{\dot{u}_A}{\dot{I}_0 e^{-j\alpha}} \right] = I_m \left\{ \left[\dot{u}'_{A1} + \dot{I}_{0\Sigma} (Z_{1\Sigma} \frac{Z_{1S} + Z_R}{Z_{1S} + Z_{1f}} - \dots \right) \right.$$

$$-Z_{0\Sigma} \frac{Z_{0S} + (1 + 3K)Z_R}{Z_{0S} + Z_{0f}} \Big/ I_{0\Sigma} \frac{Z_{0S}}{Z_{0S} + Z_{0f}} e^{-j\alpha} \Big\} \leq 0, \dots\dots (11)$$

根据式(9)、式(10)令 $R_0 = 0$ 可以画出如图(4)所示的向量图。

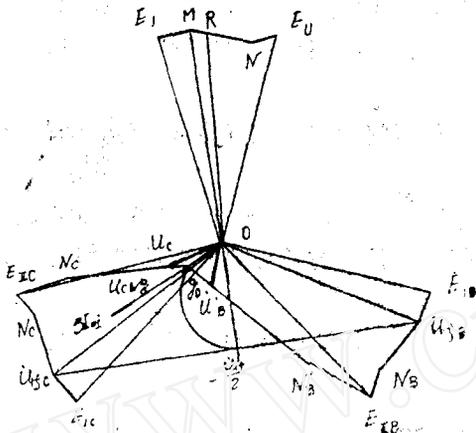


图4 区外两相接地短路向量图($R_0 = 0$)

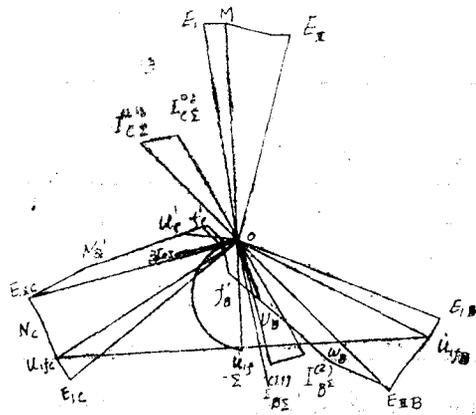


图5 区外两相接地短路向量图($R_0 \neq R_g \neq 0$)

从图(4)可以看出,当过渡电阻值增大到使 $I_{0\Sigma}$ 超前线路电压降 u_{cN_g} 以后,受端c相比相元件将发生超越误动。可是受端的超前故障相元件,在一般情况下,还可以正确地反应故障点位置。因此,将两故障相比相执行元件的接点串联连接,便可以避免超越误动。过渡电阻 R_0 继续增大,送端接地距离保护装置的滞后故障相元件同样也会出现超越动作的问题。

(2) 在 R_0 影响下的动作行为

根据式(9)和式(10) R_0 和 R_g 均不等于零,画出如图(5)所示的向量图。

从图(5)可以看出,在 R_0 的影响下,故障滞后相元件的保护范围将伸长,向故障超前相元件的保护范围将缩短。

实际上,在两相接地短路故障中,一般是相过渡电阻 R_0 和接地过渡电阻 R_g 同时存在,从相量图(5)明显地看出, R_0 使滞后故障相元件有超越范围,因此不能单纯地从 R_g 的影响来定保护接地电阻的能力。

从上述各相比相元件在接地故障中的动作情况可以看出,(a)在单相接地时,非故障相元件测量机能,区别不开区内还是区外短路,只要满足它的比相动作条件

它就动作,所以它不能独立地动作于出口。同时故障相元件也需要依靠非故障相元件来保证它正常工作的条件和维持方向性(b)在两相接地短路时,在对地电阻和相过渡电阻的影响下,故障滞后相元件的保护范围将伸长,而故障超前相元件能够正确测量或缩短保护范围。看来,不但需要利用故障超前相元件来防止滞后相元件的误动,同时也还需要非故障相元件共同来维持方向性。由此可见,三个相比相元件之间存在着相互依存的关系,三个比相元件通过“与”的逻辑关系联系到一起是符合其原理的必然结果,也就是说,它们从原理上就是一个统一的多相接地距离继电器,在功能上互相补充而完善。

三 I_0 比相原理的应用效果

(1) I_0 比相多相接地阻抗继电器,从原理上根本消除了因受不同相位助增电流影响而引起的原理性的超越。根据动模试验结果,整流型多相接地阻抗继电器的动态超越不超过1—2%,所以在对这种保护作整定计算时,可以考虑取可靠系数为0.9,以增大速动保护范围和提高第二段对线路末端的灵敏度,对提高全网的保护质量有很大意义。

许多全电气量的接地距离保护装置,为了解决超越问题把整定值的可靠系数降低到0.7—0.65以下。

(2) I_0 比相在原理上保护范围不受过渡电阻影响,虽然在实现和使用当中不能达到理想状态,但总的结果保护过渡电阻的能力仍然是较高的并且基本满足了短线路的保护要求。下边列出几组动模试验所得数据参考。

(a) 单侧电源,整定值为4.9欧(12km),在表中各点发生单相接地短路,所得保护过渡电阻值列入下表。

系统容量	故障点	出口	5kM	10kM
5400	MVA	15.4	22.7	8.8
10 700	MVA	14.4	19.3	8.8

(b) 双侧电源,模拟不同点发生单相接地故障,所得结果如下:

安装地点	故障点	出口	5kM	10kM
线路的M侧		15.4	8.1	3.7
线路的N侧		16.1	11.7	5.9

表内数据是比较典型的(文献7)(i)单侧电源时保护电阻能力:保护区中点附近最大,可达4—5倍;出口处,达3—4倍;83%的地方也可以保护1.8—2倍定值的过渡电阻。(ii)双侧电源时,由于对侧助增的影响,虽然保护电阻的能力基本不变,但保护电阻的数值有所降低,其中出口附近保护电阻值是几乎不变的。

整流型接地距离适用于短线路,而短线路一般是出现在工业密集的城市市区和郊区,这些地区土壤的导电率都是较高的,只要杆塔的接地装置能满足规程(文献2)要求,杆塔的并联电阻和电弧的综合电阻一般小于5—7欧(文献1),这样,在短线路上,只有使用 I_0 比相的多相接地阻抗继电器才能满足要求。

运行条例(文献3)要求配置时限小于1.5秒切除线路末端经10欧/相过渡电阻短路故障的相间距离保护段。显然,距离保护瞬时的定值是无法按10欧/相过渡电阻值考虑,条例并未提出这样的要求。然而,在定值大于10kM时 I_0 比相的接地距离,在保护

区很大范围内,还是有这样好的(10欧以上)保护电阻能力。至于经100欧姆以上的过渡电阻的接地故障乃是任何原理的接地距离保护装置所不能切除的。在这种情况下,只有依靠灵敏度高的零序电流保护来完成切除任务。

(3) 整流型多相接地距离继电器接线简单,在整流型接地距离继电器中,仅采用三相元件接点简单的串联方式,实现了不同相别、不同类型接地短路的情况下各相元件轮换担当测量、方向以及相互保证正确工作条件的复杂逻辑关系。而在全电气量的接地距离装置里,为了解决超越误动的问题,采取循环闭锁接线方式,这样在每一相回路中要包括有关两个相所有元件的2—4付接点串联,同时在每套保护装置中有三组这样的回路,相比之下, I_0 比相的多相接地距离的接线是非常简单的。

(4) 接地距离保护共有两个保护段,主要用来加强本线路的保护。考虑到,在运行方式变化引起各序分流有较大变化的条件下,按接地距离各段之间的配合关系整定的Ⅲ段很难充当所有相邻线路的远后备。另外,在本线路经大电阻接地时,也不一定有足够的灵敏度可靠地切除故障,因此,采用两段方式与零序电流保护配合使用。

参 考 文 献

- 1、 电力系统短路时过渡阻抗的计算 袁季修 中国电机工程学会会议论文1979年
- 2、 架空送电线路设计规程 电力规划设计院制订1979年
- 3、 继电保护与安全自动装置运行条例 水电部生产司制订
- 4、 整流型接地距离保护装置的研究 魏连璧 朱 震 项中芳 中国电机工程学会会议交流论文1982年
- 5、 阻抗继电器的构成及其电压相量图分析法 魏连璧 电科院1983年资料
- 6、 对 I_0 参加比相的接地距离保护的分析计算与评价 合肥工业大学 姚晴林 《继电器》84年3期
- 7、 整流型接地距离保护装置的动模试验报告 魏连璧 电科院 1984年资料

Z T B—1型同期捕捉装置投产

本期刊登了许昌继电器研究所研制的ZTB—1同期捕捉装置。它适用于变电所作同期合闸之用。装置结构简单,使用维护方便,价格低廉。

ZTB—1同期捕捉装置经过试制、试运行,于1983年初在丰满电厂作了全面的工业试验,经考核,性能良好。

该装置于1984年经型式试验并通过了鉴定。已向海城500KV变电所正式供货。

ZTB—1同期捕捉装置现已投产,可向广大用户供货。