

接地距离保护及其在平行线上的应用

西安交通大学 朱声石

按欧姆计原理实现的第 I 类型阻抗继电器接入相电压 (U_Y) 和经过零序电流补偿的相电流 ($I_Y + KI_0$) 的相阻抗继电器用来保护接地故障有重大缺点 (文献 1、2)。最重要的缺点是在单相接地短路时允许的过渡电阻值太小和在二相短路经过渡电阻接地时故障相中超前的一相继电器要超范围。其次在背后母线上经小的过渡电阻短路时要失去方向性。克服这些缺点的几种接地距离继电器已研究出来 (文献 2、3 等)。但对这些继电器的特性一般尚不熟悉。

接地距离保护在平行线上应用时由于受零序互感的影响使性能恶化。文献 4 虽对零序互感的影响有详细的分析但未提出有效的解决的办法, 对于平行线上的接地距离继电器究竟应否引入另一回线中的零序电流实现补偿, 在国际上观点也不一致。

本文将对几种新型的接地距离继电器的性能作比较, 和提出在平行线上应用时解决零序互感影响的方法。

一、几种新型接地距离继电器的比较

美国早先采用的是 H X S 型接地距离继电器 (文献 5)。这种继电器具有电抗特性, 但没有方向性, 只有故障相继电器才能正确工作。尤其是不能通过对电压的切换改变继电器的整定阻抗使之适合于不同的保护段别。现在采用 SDG 型固定静态接地距离继电器 (文献 3、6), 继电器以补偿后的零序电压 U'_0 为动作电压

$$U'_0 = U_0 - \frac{Z_{01}}{Z_{11}} Z_Y I_0 \quad (1)$$

式中 Z_{11} 和 Z_{01} 分别为线路正序和零序阻抗。

Z_Y 为继电器之整定阻抗。

而以补偿后的正序和负序电压之和为制动电压。三相分别为

$$\left. \begin{aligned} U'_{12A} &= (U_{1a} + U_{2a}) - (I_{1a} + I_{2a}) Z_Y \\ U'_{12B} &= (U_{1b} + U_{2b}) - (I_{1b} + I_{2b}) Z_Y \\ U'_{12C} &= (U_{1c} + U_{2c}) - (I_{1c} + I_{2c}) Z_Y \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

继电器在满足下列任何一个条件时动作。

$$|U'_0| < |U'_{12A}|, \quad |U'_0| < |U'_{12B}|, \quad \text{或} \quad |U'_0| < |U'_{12C}| \quad (3)$$

这种继电器虽然较 H X S 型有所改进, 如有明确之方向性, 可以通过对电压的切换改变

整定阻抗。但是对二相接地短路的性能很差，其特性见附录。

我国研究的接地距离继电器都是反应三相补偿后电压的相位变化。三个补偿电压是

$$\left. \begin{aligned} U_{A'} &= U_A - Z_y (I_A + KI_0) \\ U_{B'} &= U_B - Z_y (I_B + KI_0) \\ U_{C'} &= U_C - Z_y (I_C + KI_0) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 Z_y 为继电器之整定阻抗

$$K = \frac{Z_{01} - Z_{11}}{Z_{11}} \text{ 为零序电流补偿系数}$$

为了测量相补偿电压的相位变化采取零序电流为极化(参考)量。继电器的动作条件是

$$\left. \begin{aligned} 360^\circ > \arg \frac{U'_{A'}}{I_0} > 180^\circ \\ 360^\circ > \arg \frac{U'_{B'}}{I_0} > 180^\circ \\ 360^\circ > \arg \frac{U'_{C'}}{I_0} > 180^\circ \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

在单相接地短路时故障相继电器和两相短路经电阻接地时超前相继电器有很好的电抗特性，但是非故障相继电器常常不能正确动作，过去采取外加选相元件和方向元件来保证继电器的正确动作。最近我国研制的接地距离继电器都采取三相综合的方法。

第一种三相综合的方法是要求同时满足(5)式中的三个不等式才构成继电器的动作条件，其具体实现的方式如图1所示。图中a和b具有完全相同的特性(注)。由于必需同时满足(5)式中三个不等式才动作就解决了继电器的方向性问题和避免了非故障相继电器误动作的问题，但使继电器的电抗特性受到限制即反应过渡电阻的能力有所下降。图5中代表故障相的电抗特性AP被非故障相特性PC所限制。

第二种三相综合的方法如图2所示。这种方法实质上是要求同时满足：

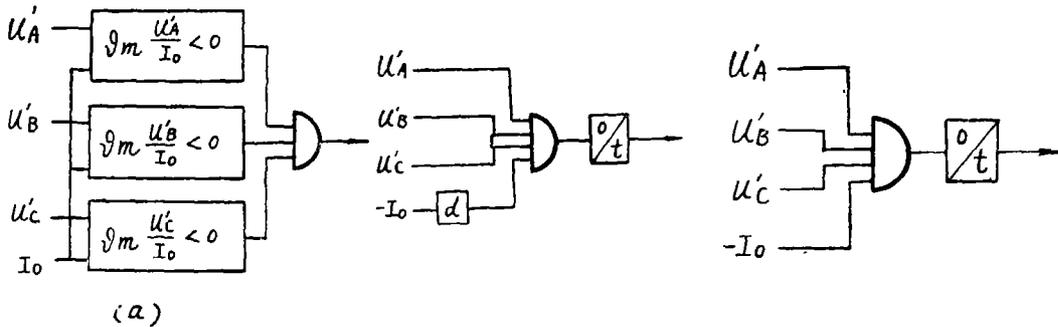


图1 接地距离继电器方案之一

图2 接地距离继电器方案之二

1. U'_A, U'_B, U'_C 三者出现同极性。
2. 故障相补偿电压满足(5)式的条件。

前一条件是多相补偿距离继电器。它解决了非故障相电抗继电器误动作的问题。但

注：图1a是电力科学研究院等单位研制的。

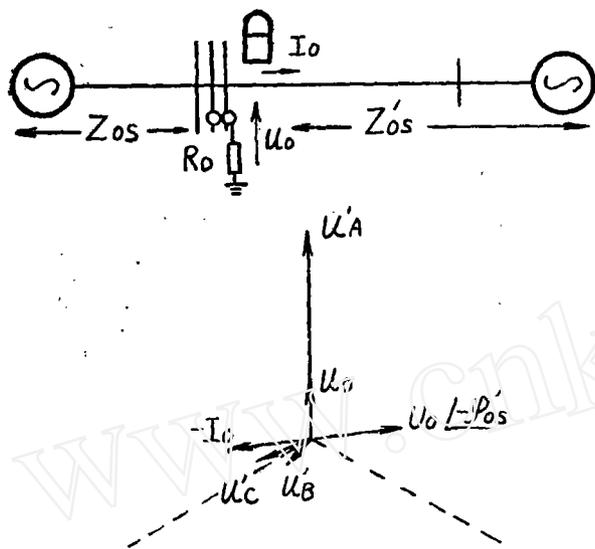


图3 背后母线二相短路经小电阻接地继电器整定阻抗又很小时之矢量图

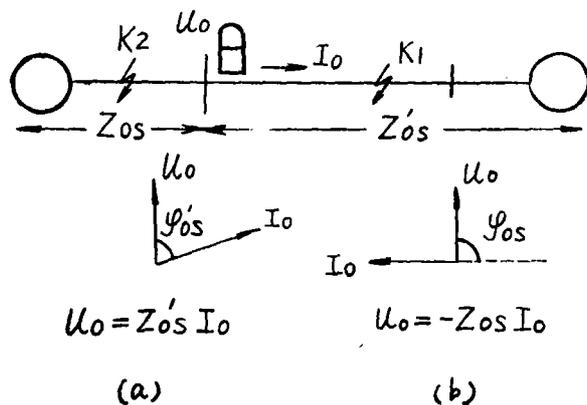


图4 正反方向短路时 U_0 和 I_0 的相位关系, (a)反方向短路(b)正方向短路

是对于方向性的问题没有彻底解决,它在背后母线上发生二相短路经小电阻接地同时继电器的整定阻抗又很小时仍会误动作。图3示出在这种情况下 U'_A , U'_B , U'_C 和 $-I_0$ 的矢量图,由图可见由这四个矢量落在半个平面内,继电器将误动作,而方案一则 I_0 落后 U'_A 而不会动作。

解决的办法有二,一是用零序电压代替零序电流或零序电压和零序电流均参加比相,参加比相的零序电压应经过移相,即 $U_0 / -\varphi'_{0s}$, φ'_{0s} 是正方向全部零序等值阻抗 Z'_{0s} 之相角,因为在正反方向短路时流入继电器之零序电流改变方向而零序电压的方向是不变的,故采用零序电压可以保证不失去方向性。但是为了保证不失去方向性应用 $U_0 / -\varphi'_{0s}$,而为了防止在正方向短路时的超范围应用 $U_0 / -\varphi_{0s}$,由于 $\varphi_{0s} \neq \varphi'_{0s}$,二者不能兼顾,所以最好同时采用 I_0 和 $U_0 / -\varphi'_{0s}$ 。二是加独立的零序功率方向继电器,前一方法不增加独立的继电器似乎比较简单但加入 U_0 后使继电器的特性试验复杂化。增加独立的零序功率方向继电器还可解决在平行线上出现的问题(见后),因此以后一方法为好。

为了比较这几种继电器在内部单相接地短路时对过渡电阻的反应能力,我们引用文献8的结果如图5所示。对于图1的方案继电器的动作特性为四边形OAPG,而图2的方案动作特性如图5中阴影所示的部份,后者对过渡电阻的反应能力显著大于前者。文献8在分析中作了一些简化假设,但这不妨碍对不同类型继电器进行比较,图2的继电器的动作特性的严格分析见文献2和7。尤其是二相短路经过渡电阻接地的动作特性文献7给出准确的结果,总之图2继电器对过渡电阻的反应能力远较图5和美国SDG型接

地距离继电器为大。

二、平行线上零序互感的影响问题

平行线二回线间的零序互感影响接地距离继电器中补偿电压测量的准确性，在理论上完全可以通过将相邻线的零序电流引入继电器进行补偿，以消除零序互感在补偿电压中的影响。实际上困难在于平行线运行方式变化时补偿方式不能适应，在考虑补偿时至少必须适应图6所示各种运行方式。

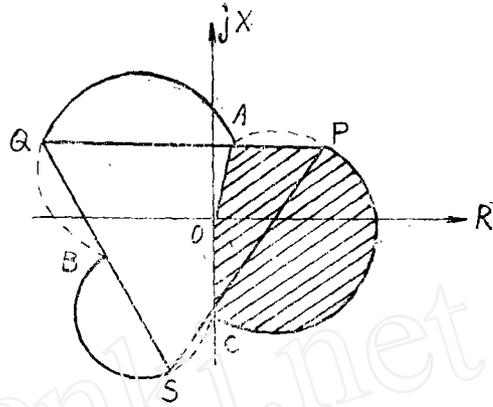


图5 接地距离继电器在单相接地短路时的动作特性（引自文献8）

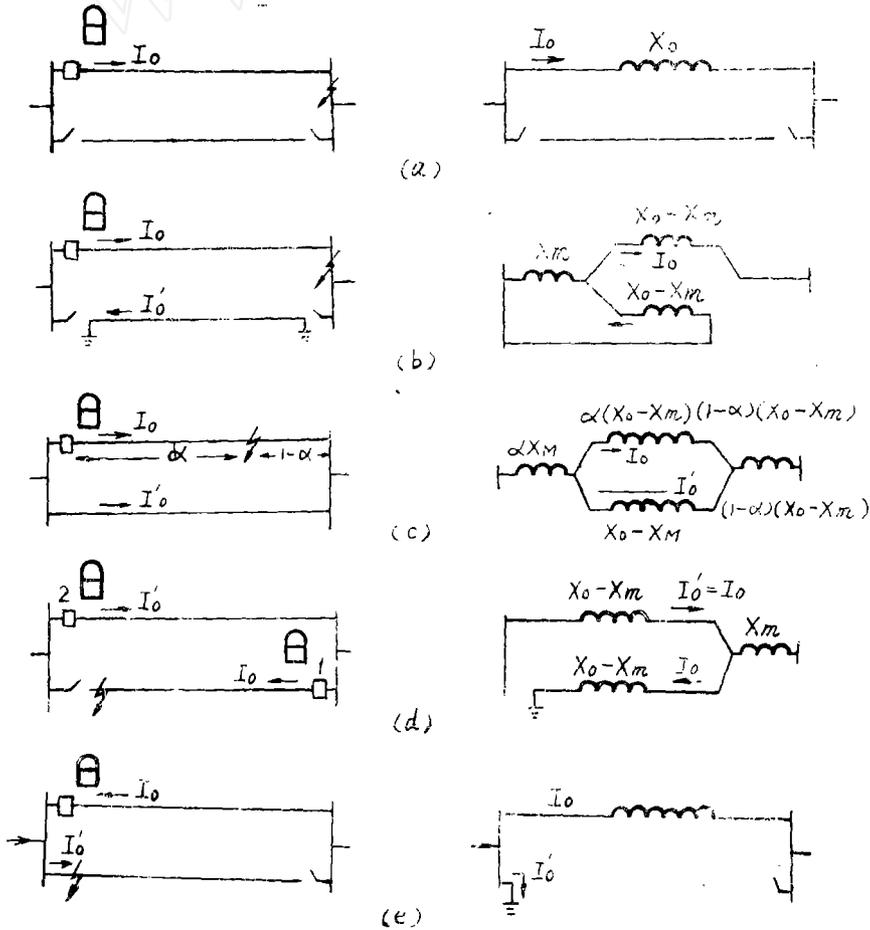


图6 考虑平行线零序互感对距离继电器影响的几种运行方式及相应的等值回路图

对于接地距离继电器本文只考虑在补偿电压中引入零序电流进行补偿的方式,按不同补偿的方式和补偿度的大小共分为4种进行比较(文献9)

$$1. \quad I_j = I_Y + K_1 I_0 \quad K_1 = \frac{X_0 - X_1}{X_1}$$

$$2. \quad I_j = I_Y + K_{1g} I_0 \quad K_{1g} = \frac{X_0 - X_1 - \frac{X_m^2}{X_0}}{X_1}$$

$$3. \quad I_j = I_Y + K_1 I_0 + \frac{X_m}{X_1} I'_0$$

$$4. \quad I_j = I_Y + K_{1g} I_0 + (K_2 - K_{1g}) I'_0 \quad K_2 = \frac{X_0 - X_1 + X_m}{X_1}$$

以上第一、二两种补偿方式未引入相邻线零序电流补偿,第三、四两种则引入相邻线零序电流补偿,第一种方式的补偿系数 K_1 是按图6a确定的,第二种方式的 K_{1g} 是按图6b确定的。第三种方式的补偿系数是按图6a和c(图c中 $\alpha = 1$)确定的。第四种方式是按图6b及c($\alpha = 1$)确定的。

在进行计算时选用下列参数值(这些参数取自文献9) $\frac{X_0}{X_1} = 2.91$; $\frac{X_m}{X_0} = 0.604$;

$\frac{X_m}{X_1} = 1.76$; 按此计算得

$$K_1 = 1.91; \quad K_{1g} = 0.85; \quad K_2 - K_{1g} = 2.82$$

为了简单起见整定计算都按单侧电源进行。兹以第4种方式为例计算如下,由于是单电源有 $I_1 = I_2 = I_0$

1. 整定阻抗的确定,因为在图b情况下继电器的测量阻抗最小,故按此确定整定阻抗,此时相邻线的零序电流补偿不起作用。

$$Z_y = 0.8Z_j = \frac{X_1 I_1 + X_1 I_2 + (X_0 - \frac{X_m^2}{X_0}) I_0}{I_1 + I_2 + (1 + K_{1g}) I_0} Z_{11} \times 0.8 = 0.8Z_{11}$$

所以保护区 $\alpha = 0.8$

2. 计算在图a下的保护范围

$$\frac{I_1 + I_2 + \frac{X_0}{X_1} I_0}{I_1 + I_2 + (1 + K_{1g}) I_0} \alpha Z_{11} = 0.8Z_{11}$$

解之得保护区 $\alpha = 0.628$

3. 计算图c下的保护范围。

$$\frac{(I_1 + I_2) \alpha Z_{11} + I_0 \alpha Z_{01} + I'_0 \alpha X_m}{I_1 + I_2 + (1 + K_{1g}) I_0 + (K_2 - K_{1g}) I'_0} = 0.8Z_{11}$$

$$I'_0 = \frac{\alpha}{2 - \alpha} I_0$$

解之得保护区 $\alpha = 0.69$

4. 计算图d中保护1和2的测量阻抗。

保护 1 的测量阻抗为

$$Z_{j1} = \frac{I_1 + I_2 + \frac{X_0 - X_m}{X_1} I_0}{I_1 + I_2 + (1 + K_{1g}) I_0 - (K_2 - K_{1g}) I'_0} Z_{11} = 3.06 Z_{11}$$

保护 2 的测量阻抗为

$$Z_{j2} = 2 \frac{X_0 - X_m}{X_1} Z_{11} = 1.64 Z_{11}$$

对各种方式对图 6 中 a、b、c、d 4 种运行方式的计算结果（保护区 α 或测量阻抗 Z_j ）列于表 1。

表 1:

继电器 补偿方式	整定阻抗 Z_j , 保护区 α 及测量阻抗 Z_j			
	图 a	图 b	图 c	图 d
1	$Z_v = 0.628 Z_{11}$ $\alpha = 0.628$	$\alpha = 0.8$	$\alpha = 0.55$	$Z_{j1} = 0.64 Z_{11}$ $Z_{j2} = 1.28 Z_{11}$
2	$\alpha = 0.628$	$Z_v = 0.8 Z_{11}$ $\alpha = 0.8$	$\alpha = 0.55$	$Z_{j1} = 0.82 Z_{11}$ $Z_{j2} = 1.64 Z_{11}$
3	$Z_v = 0.628 Z_{11}$ $\alpha = 0.628$	$\alpha = 0.8$	$\alpha = 0.628$	$Z_{j1} = Z_{11}$ $Z_{j2} = 1.28 Z_{11}$
4	$\alpha = 0.628$	$Z_v = 0.8 Z_{11}$ $\alpha = 0.8$	$\alpha = 0.69$	$Z_{j1} = 3.06 Z_{11}$ $Z_{j2} = 1.64 Z_{11}$

由上表可见引入相邻线零序电流补偿后在双回线运行时的保护区有所提高，第 4 种补偿方式比第三种方式效果更好，但是在出现如图 6 d 之纵续动作的情况时保护 1 和 2 之间将发生无选择性动作，第 3 种方式保护 1 由于有相邻线零序电流的正确补偿，测量阻抗为 Z_{11} ，但保护 2 由于得不到补偿，测量阻抗下降为 $1.28 Z_{11}$ 。于是保护 1 和 2 均将是第 II 段动作，造成无选择性动作，第 4 种方式是本线零序电流欠补偿，相邻线零序电流过补偿，所以保护 1 和 2 在此情况下无选择性动作更严重，第 1、2 两种方式由于没有采用相邻线零序电流补偿，保护 1 和 2 的测量阻抗均下降，保护 1 的第 I 段接近于全线纵续动作，如为双电源则纵续动作区将减小。

图 6 e 如果相邻线零序电流 I'_0 很大，则可能由于其补偿作用造成接地距离失去方向性。为了防止这种误动作文献 3 提出 2 种对策，一是比较 I'_0/I_0 当 I'_0 大于 I_0 时实现闭锁，一是仅保护第 I 段采用相邻线零序电流补偿，而第 II 段则不采用。再用第 II 段和第 I 段组成“与”门输出。这必须有独立的第 II 段才有可能，这二种对策都使保护复杂化。

为了适应平行线的各种运行方式建议采用第四种补偿方式，并在每回线上装设零序功率方向元件。本线零序功率方向元件 P_0 一方面闭锁接地距离继电器 Z_0 ，以防止在图 6 e 情况下的误动作，一方面二回线零序功率方向元件 P_0 和 P'_0 组成纵续动作时的加速跳闸回路，即在出现 P_0+ 和 P'_0- 时立即跳闸。同理出现 P'_0+ ， P_0- 时跳另一回

线，这样在图 6 d 的情况下保护 1 总可全线纵续动作，保护 2 不会越级跳闸。总之，这样在单回线运行时（单回线运行另一回线一般都是二端接地的）保护区达 80%，在双回线运行时保护区达 69%，不论在线路上哪一处短路都有一侧保护第 I 段动作，只要一側先跳闸另一側随着纵续动作，并完全消除任何无选择性的动作。

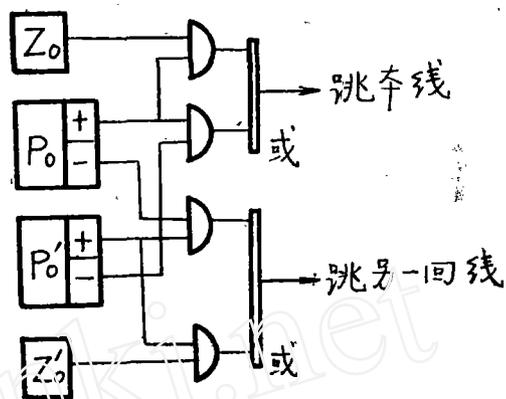


图 7 接地距离继电器 Z_0 加零序功率方向元件 P_0, P'_0 以适应双回线

附录：SDG型接地距离继电器的特性

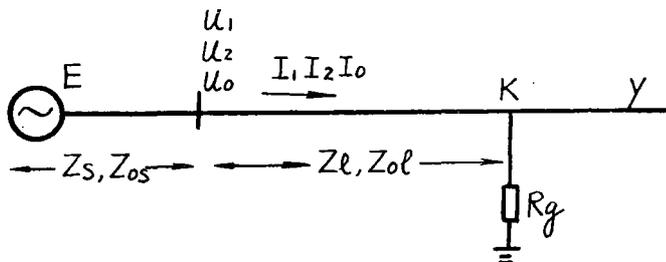


图 8 计算用系统图

一、单侧电源正方向单相接地短路。

由图 8 有

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{E}{2(Z_s + Z_l) + (Z_{os} + Z_{ol}) + 3R_g}$$

$$U'_0 = -(Z_{os} + Z_{ov}) I_0 \quad Z_{ov} = (1 + K) Z_v$$

$$U'_{12} = U'_1 + U'_2 = E - (Z_s + Z_v)(I_1 + I_2)$$

$$= \frac{2(Z_l - Z_v) + (Z_{os} + Z_{ol}) + 3K_s^2}{2(Z_s + Z_l) + (Z_{os} + Z_{ol}) + 3R_g} E$$

式中 $1 + K = \frac{Z_{ol}}{Z_{11}}$

继电器动作条件为 $|U'_0| > |U'_{12}|$

将以上所求 U'_{10} , U'_{12} 代入并整理后得

$$\left| Z_l + \frac{3R_g}{3+K} - \frac{2Z_y - Z_{os}}{3+K} \right| < \left| \frac{Z_{os} + (1+K)Z_y}{3+K} \right|$$

上式在阻抗平面上为园心在 $\frac{2Z_y}{3+K} - \frac{Z_{os}}{3+K}$ 矢量末端, 半径为 $\left| \frac{Z_{os}}{3+K} + \frac{(1+K)Z_y}{3+K} \right|$

之园。如图9所示此园经过矢量 Z_y 之末端, 故保护区固定。特性园包围坐标原点并不意味无方向性, 因此特性园是在正方向短路的前提下导出的。特性园偏移意味对过渡电阻有较强的反应能力。 Z_{os} 越大, 对过渡电阻反应能力也越强。

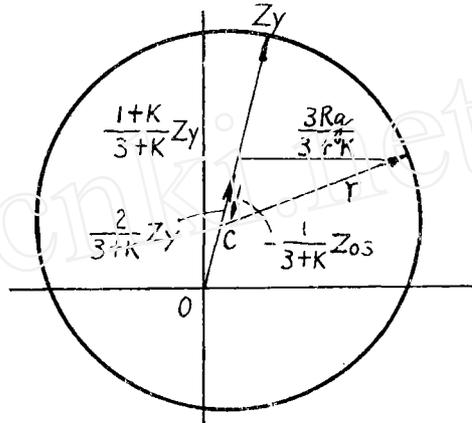


图9 SDG接地距离继电器在单电源单相接地短路时之特性

二、单侧电源正方向二相短路经过渡电阻接地。

二相短路接地有相间过渡电阻和接地过渡电阻。一般后者数值大得多, 故为了简化仅考虑后者的影响, 这样仍用图8进行计算。

$$\text{令 } q = \frac{Z_{os} + Z_{o1} + 3R_g}{Z_s + Z_l + Z_{os} + Z_{o1} + 3R_g}$$

$$I_1 = \frac{E}{(1+q)(Z_s + Z_l)}, \quad I_2 = -qI_1, \quad I_0 = -(1-q)I_1$$

$$U'_{11} = E - (Z_s + Z_y)I_1, \quad U'_{12} = q(Z_s + Z_y)I_1, \quad U'_{10} = (1-q)(Z_{os} + Z_{o1})I_1$$

$$U'_{12B} = a^2 U'_{11} + a U'_{12} = a^2 [E - (1-a^2q)(Z_s + Z_y)I_1]$$

$$U'_{12C} = a U'_{11} + a^2 U'_{12} = a [E - (1-aq)(Z_s + Z_y)I_1]$$

继电器在满足下列二条件中任何一个时动作。

$$\left| \frac{U'_{12B}}{U'_{10}} \right| < 1 \quad \text{或} \quad \left| \frac{U'_{12C}}{U'_{10}} \right| < 1$$

由此二式推出下面二不等式

$$\left| (Z_s + Z_y)e^{-j60^\circ} - \frac{3+2K}{1+K}(Z_y - Z_l) - K_r \sqrt{3}(Z_y - Z_l)e^{j60^\circ} + K_r(Z_s + Z_l)e^{j150^\circ} \right| \leq \left| Z_s + Z_y \right|$$

$$\left| (Z_s + Z_y)e^{-j60^\circ} - \frac{3+2K}{1+K}(Z_y - Z_l) + K_r [\sqrt{3}(Z_y - Z_l) + \sqrt{\frac{3}{2}}Z_s] e^{j60^\circ} + K_r \left(\frac{Z_s}{2} + Z_l \right) e^{j30^\circ} \right| \leq \left| Z_s + Z_y \right|$$

$$\text{式中 } K_r = \frac{3R_g}{(1+K) |Z_s + Z_l|}$$

当 $K_r = R_g = 0$, $Z_l = Z_y$ 二不等式均系二边相等, 继电器处于临界动作状态。

当 $R_g = 0$ 在外部短路时 $Z_l > Z_y$ 继电器不会动作, 在内部短路时 $Z_l < Z_y$, 继电器动作的条件为

$$\frac{3 + 2K}{1 + K} (Z_y - Z_l) \leq Z_s + Z_y$$

所以继电器有死区为

$$Z_l \leq \frac{2 + K}{3 + 2K} Z_y - \frac{1 + K}{3 + 2K} Z_s$$

当 $R_g \neq 0$ 时即 $K \neq 0$ 时继电器是很容易拒绝动作的。

参 考 文 献 目 录

1. 接地距离及综合自动重合闸调查分析报告
1978年1月 水利电力部电力科学研究院
2. 朱声石 接地距离继电器之研究
电力系统自动化 1977年第4期
3. G.D. Rockefeller Zone - Packaged Ground Distance Relay I - Principles of Operation.
IEEE PAS - 85 1966.p. 1021~1044
4. H. Ungrad, V. Narayan Behaviour of distance relays under earth fault conditions on double-circuit lines. Brown Boveri Review vol. 56 1969 p. 494~501
- 双回路接地短路时距离继电器的行为
技术情报3 1973年8月 南京水利电力仪表厂
5. Applied Protective Relaying Westinghouse Electric corporation
1963年8月 p8 - 19~20
6. Applied Protective Relaying Westinghouse Electric corporation
Relaying - Instrument Division 1976
7. 多相补偿接地阻抗继电器动作特性分析 1978年2月
水利电力部华东电力设计院
8. 张旭俊 正弦逻辑向量和相全能阻抗继电器
技术通讯 1976 第1期 南京水利电力仪表厂
9. 短线保护调查报告 1977年8月 水利电力部东北电力设计院