

在复杂故障条件下，距离继电器动作行为分析

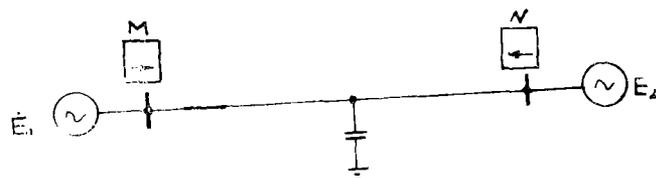
山东工学院 江世芳

引言

文〔2〕〔3〕论述了相间和接地距离继电器在故障开始瞬间的动作行为。本文是针对两端电源输电线路，当一相经过渡电阻接地短路，两侧故障相的断路器在不同时断开的情况下（属于两种复故障状态），相间和接地距离继电器随功率角、无功流向、过渡电阻和故障点位置的变化，被保护线路两侧的故障相和非故障相继电器动作行为的计算分析。实际上，这是分析距离继电器在复杂故障并伴随振荡时的动作行为。本文所得到的结论，是根据复杂故障条件下数学模型，由数字计算机进行了计算。它的部分结果还在输电线路静态模型上进行试验，两者基本是吻合的。

复故障状态下的数学模型

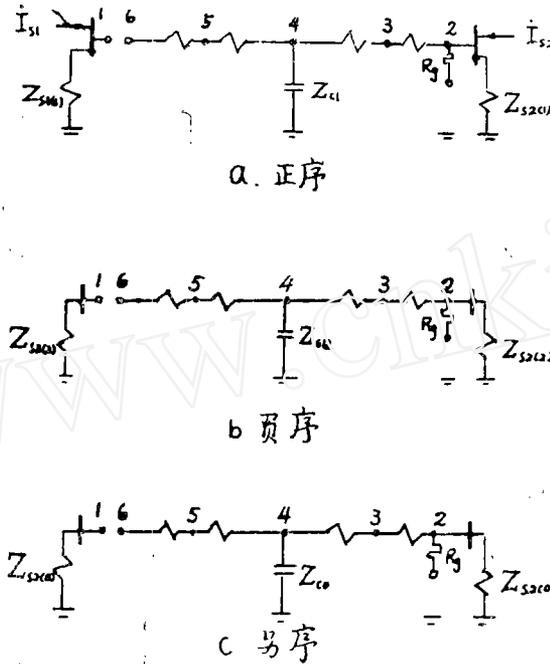
在〔图一〕所示两端电源的电力系统中， $E_2/0^\circ$ 为系统的参考坐标， δ 表示两侧电势摆开的角度，一般来说， δ 表示线路输送的有功负荷。 $+\delta$ 为 E_1 领前 E_2 的角度，即 E_1 侧为送端； $-\delta$ 为 E_1 滞后 E_2 的角度，即 E_1 侧为受端。 $m = |E_1| / |E_2|$ 比值是两侧电势幅值变化，一般情况下，它表示线路输送的无功。 $|E_1| > |E_2|$ 为 E_1 侧送无功， $|E_1| < |E_2|$ 为 E_1 侧受无功。



图一 电力系统图

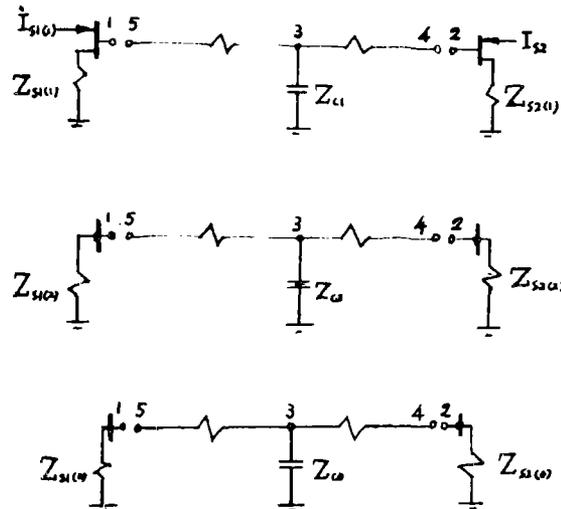
当输电线路任意点经过渡电阻（ R_x ）发生单相接地故障，同时出现M侧断路器一相先断开的条件下，称为串一并型双重复故障。〔图二〕是这种故障状态下的正序、负序、零序网络图。它是由节点⑦地（端口一）和节点①⑥（端口二）构成的各序双口网络。为了表示输电线路不同地点和不同过渡电阻值时发生短路，我们将各不同值的

R_g 支路设置在各序网从节点②至节点⑥上。



图二 电力系统序网图

接着，N侧断路器一相断开，故障被切除。这时，被保护线路上两处出现一相断线，称为并—并型双重复故障。〔图三〕是这种故障状态下的正序、负序、零序网络图。它是由节点①⑤（端口一）和节点②④（端口二）构成的各序双口网络。



图三 电力系统序网图

根据〔图二〕〔图三〕，按照网络拓扑理论形成的支路追加法，可以分别得到串—并型

复故障的各序网络的七阶节点阻抗矩阵和串—并型复故障的各序网络的五阶节点阻抗矩阵。

串—并型复故障：

$$Z = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{17} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{27} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{71} & Z_{72} & \cdots & Z_{77} \end{pmatrix} \quad (1)$$

并—并型复故障：

$$Z = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{15} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{25} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{51} & Z_{52} & \cdots & Z_{55} \end{pmatrix} \quad (2)$$

根据各序节点阻抗矩阵可求出各序口阻抗矩阵元素，再求出各序混合型参数矩阵和各序网口导纳矩阵，最后求出复合双口序网的混合型口参数矩阵（式4）和口导纳矩阵（式6）：

串—并型：

$$H = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$H' = \begin{pmatrix} H'_{11} & H'_{12} \\ H'_{21} & H'_{22} \end{pmatrix} \quad (4)$$

并—并型：

$$Y = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$Y' = \begin{pmatrix} Y'_{11} & Y'_{12} \\ Y'_{21} & Y'_{22} \end{pmatrix} \quad (6)$$

故障前正序网络各节点注入电流：

串—并型：

$$I_{(1)}^{(0)} = \begin{pmatrix} \dot{I}_{s1} \\ \dot{I}_{s2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

并—并型：

$$I_{(1)}^{(0)} = \begin{pmatrix} \dot{I}_{s1} \\ \dot{I}_{s2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\text{式中：} \begin{cases} \dot{I}_{s1} = \frac{\dot{E}_1}{Z_{s1(1)}} = \frac{mE_2/\delta}{Z_{s1(1)}} \\ \dot{I}_{s2} = \frac{\dot{E}_2}{Z_{s2(1)}} \\ m = \frac{|E_1|}{|E_2|} \end{cases}$$

故障前，正序网络各节点电压：

串—并型：

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{1(1)}^{(a)} \\ \dot{U}_{2(1)}^{(0)} \\ \vdots \\ \dot{U}_{7(1)}^{(0)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{17} \\ Z_{21} & Z_{22} & & Z_{27} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Z_{71} & Z_{72} & & Z_{77} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_{s1} \\ \dot{I}_{s2} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

并—并型:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{1(1)}^{(0)} \\ \dot{U}_{2(1)}^{(0)} \\ \dot{U}_{3(1)}^{(0)} \\ \dot{U}_{4(1)}^{(0)} \\ \dot{U}_{5(1)}^{(0)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{15} \\ \vdots & & \vdots \\ Z_{51} & & Z_{55} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_{s1} \\ \dot{I}_{s2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

有源正序双口网络:

串—并型:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{1(1)} \\ \dot{I}_{2(1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11(1)} & H_{12(1)} \\ H_{21(1)} & H_{22(1)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_{1(1)} \\ \dot{U}_{2(1)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{U}_{N1(1)} \\ \dot{I}_{H2(1)} \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\text{式中: } \begin{pmatrix} \dot{U}_{H1(1)} \\ \dot{I}_{H2(1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{U}_{P1(1)} - \frac{Z_{12(1)}}{Z_{22(1)}} \dot{U}_{P2(1)}^{(0)} \\ -\frac{1}{Z_{22(1)}} \dot{U}_{P2(1)}^{(0)} \end{pmatrix}$$

$$\text{并—并型: } \begin{pmatrix} \dot{I}_{1(1)} \\ \dot{I}_{2(1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11(1)} & Y_{12(1)} \\ Y_{21(1)} & Y_{22(1)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_{1(1)} \\ \dot{U}_{2(1)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{I}_{s1(1)} \\ \dot{I}_{s2(1)} \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\text{式中 } \begin{pmatrix} \dot{I}_{s1(1)} \\ \dot{I}_{s2(1)} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} Y_{11(1)} & Y_{12(1)} \\ Y_{21(1)} & Y_{22(1)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_{P1(1)}^{(0)} \\ \dot{U}_{P2(1)}^{(0)} \end{pmatrix}$$

无源负序双口网络:

串—并型:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1(2)} \\ \dot{U}_{2(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11(2)} & H_{12(2)} \\ H_{21(2)} & H_{22(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{1(2)} \\ \dot{I}_{2(2)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

并—并型:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{1(2)} \\ \dot{I}_{2(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11(2)} & Y_{12(2)} \\ Y_{21(2)} & Y_{22(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{1(2)} \\ \dot{U}_{2(2)} \end{bmatrix} \quad (14)$$

无源零序双口网络:

串—并型:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1(0)} \\ \dot{U}_{2(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11(0)} & H_{12(0)} \\ H_{21(0)} & H_{22(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{1(0)} \\ \dot{I}_{2(0)} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{1(0)} \\ \dot{I}_{2(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H'_{11} & H'_{12} \\ H'_{21} & H'_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} n_{1(1)} & \dot{U}_{H1(1)} \\ n_{2(1)} & \dot{I}_{H2(1)} \end{bmatrix}$$

并—并型:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{1(0)} \\ \dot{I}_{2(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11(0)} & Y_{22(0)} \\ Y_{21(0)} & Y_{22(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{1(0)} \\ \dot{U}_{2(0)} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1(0)} \\ \dot{U}_{2(0)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Y'_{11} & Y'_{12} \\ Y'_{21} & Y'_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} n_{1(1)} & \dot{I}_{y1(1)} \\ n_{2(1)} & \dot{I}_{y2(1)} \end{bmatrix}$$

复故障序分量边界条件方程:

串—并型:

$$\begin{bmatrix} n_{1(1)} \\ n_{2(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{1(1)} \\ \dot{U}_{2(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{1(2)} \\ n_{2(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{1(2)} \\ \dot{U}_{2(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{1(0)} \\ \dot{U}_{2(0)} \end{bmatrix} \quad (17)$$

并—并型:

$$\begin{bmatrix} n_{1(1)} \\ n_{2(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{1(1)} \\ \dot{U}_{2(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{1(2)} \\ n_{2(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{1(2)} \\ \dot{U}_{2(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{1(1)} \\ \dot{U}_{2(0)} \end{bmatrix} \quad (18)$$

因为短路和断线都出现在同一相上(A相), 故

$$n_{1(1)} = n_{1(2)} = 1 \quad n_{2(1)} = n_{2(2)} = 1$$

通过求解上述各矩阵方程，得到故障时各序网的节点注入电流向量：
串—并型：

$$I_{(1)} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{s1} + \dot{I}_{2(1)} \\ \dot{I}_{s2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\dot{I}_{s2} \\ \dot{I}_{1(1)} \end{bmatrix} \quad I_{(2)} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{2(1)} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\dot{I}_{2(2)} \\ \dot{I}_{1(2)} \end{bmatrix} \quad I_{(0)} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{2(0)} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\dot{I}_{2(0)} \\ \dot{I}_{1(0)} \end{bmatrix} \quad (19)$$

并—并型：

$$I_{(1)} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{s1} + \dot{I}_{1(1)} \\ \dot{I}_{s2} + \dot{I}_{2(1)} \\ 0 \\ -\dot{I}_{2(1)} \\ -\dot{I}_{1(1)} \end{bmatrix} \quad I_{(2)} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{1(2)} \\ \dot{I}_{2(2)} \\ 0 \\ -\dot{I}_{2(2)} \\ -\dot{I}_{1(2)} \end{bmatrix} \quad I_{(0)} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{1(0)} \\ \dot{I}_{2(0)} \\ 0 \\ -\dot{I}_{2(0)} \\ -\dot{I}_{1(0)} \end{bmatrix} \quad (20)$$

根据式(1)(2)和(19)(20)可分别得到正、负、零序网的节点电压(对串—并型节点电压方程是七阶；对并—并型是五阶)。它的矩阵表达式是：

$$U_{(1)} = Z_{(1)} I_{(1)} \quad U_{(2)} = Z_{(2)} I_{(2)} \quad U_{(0)} = Z_{(0)} I_{(0)} \quad (21)$$

根据各序节点电压和各序支路阻抗，可求解各序网的支路电流：

$$\dot{I}_{mn} = \frac{\dot{U}_m - \dot{U}_n}{Z_{mn}} \quad (22)$$

式中： \dot{I}_{mn} ——为mn节点间的支路电流

$\dot{U}_m \dot{U}_n$ ——为m和n节点电压

Z_{mn} ——为mn节点间的支路阻抗

电力系统任意节点的各相电压和任意支路的各相电流：

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{(0)} \\ \dot{U}_{(1)} \\ \dot{U}_{(2)} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_{(0)} \\ \dot{I}_{(1)} \\ \dot{I}_{(2)} \end{pmatrix} \quad (24)$$

接地距离继电器（故障相，非故障相）测量阻抗。

$$\begin{aligned} Z_A &= \frac{\dot{U}_A}{\dot{I}_A + K \cdot 3 I_0} \\ Z_B &= \frac{\dot{U}_B}{\dot{I}_B + K \cdot 3 I_0} \\ Z_C &= \frac{\dot{U}_C}{\dot{I}_C + K \cdot 3 I_0} \end{aligned} \quad (25)$$

相间距离继电器测量阻抗

$$\begin{aligned} Z_{AB} &= \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_B}{\dot{I}_A - \dot{I}_B} \\ Z_{BC} &= \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_C}{\dot{I}_B - \dot{I}_C} \\ Z_{CA} &= \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_A}{\dot{I}_C - \dot{I}_A} \end{aligned} \quad (26)$$

在振荡和一相断线接地

同时发生时距离继电器动作行为

接地距离继电器

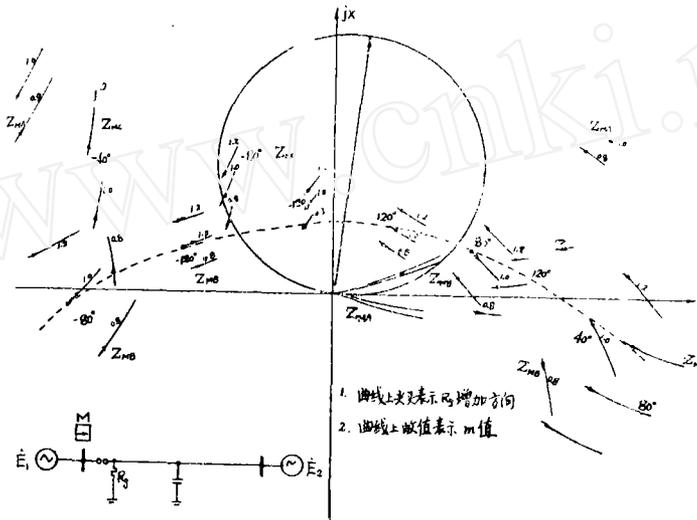
M侧

1. 非故障相继电器。由文(2)可知，在故障开始瞬间，用来作为选相元件的接地距离继电器，在靠近线路出口故障，非故障相选相元件超前相(相)选相元件在过渡电阻较大时容易误动。但是，随着短路距离增加，非故障相选相元件误动的可能性大大减少，甚至不可能误动。这说明了故障点的位置对非故障相继电器动作行为影响是很大

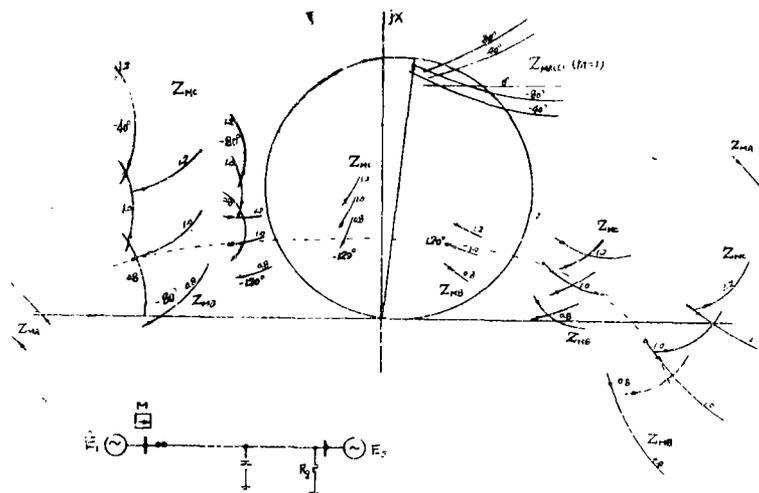
的。

但是，一旦一侧（M侧）故障相断路器断开后，导致系统两侧电势角摆开或者出现系统非全相振荡，健全相电压下降而电流增加，导致非故障相继电器动作。〔图四〕

〔图五〕示出了在被护线路出口和末端经过渡电阻短路时，故障相（A相）和非故障相测量阻抗轨迹（ Z_{MA} 、 Z_{MB} 、 Z_{MC} ）。



图四 出口短路，接地距离继电器（A、B、C相）测量阻抗



图五 线路末端短路，接地距离继电器（A、B、C相）测量阻抗

由图可见，不论是出口还是末端故障，当两侧电势角摆到大于 80° 以后，非故障相继电器都可能误动。滞后相（B相）继电器当M侧为送端时（ $+\delta$ ），其误动的可能性

更大；当M侧为受端（ $-\delta$ ），领前相（C相）继电器误动可能性大。而且，不论M侧是送端还是受端，M侧电势高于N侧电势（ $E_1/E_2 = 1.2$ ）更加剧误动的可能性。同时，我们比较〔图四〕和〔图五〕发现，当一侧断开后，故障点的位置对非故障相继电器动作行为的影响是很小的。

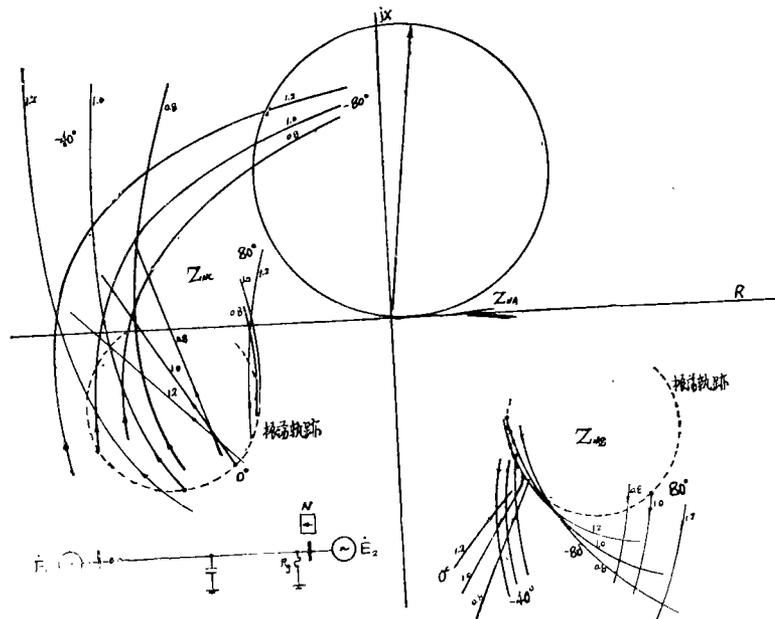
综合故障开始瞬间和一侧断开后（故障仍存在）的两种故障状态。作为选相元件的非故障相继电器在故障开始瞬间，由于两侧电势角较小或者短路距离较远而不致于误动作，以保证能正确选相。随后，当故障相断开后，由于非故障相输送功率，两侧电势角摆动较大，非故障相继电器误动可能性大，将导致选相元件相继动作。由图可见，当两侧电势角大于 $\pm 80^\circ$ 后，非故障相（B相、C相）继电器误动是不可避免的。

2. 故障相继电器。〔图四〕〔图五〕分别示出了故障相（A相）继电器测量阻抗（ Z_{MA} 、 $Z_{MA(L)}$ ）。电压互感器的位置对测量阻抗影响是很大的。当电压互感器在母线上时，不论在何处故障，其测量阻抗（ Z_{MA} ）远离继电器特性园。这是因为故障相断开后，母线电压增高和流入继电器的电流小所致。当电压互感器在线路侧，其测量阻抗（ $Z_{MA(L)}$ ）均是从继电器特性园内最大灵敏线为始点的曲线簇， $Z_{MA(L)}$ 轨迹大都落在特性园内，这就出现了断路器跳开后，故障相继电器不返回的问题。

3. 非全相振荡。〔图四〕〔图五〕也示出了电力系统在非全相振荡时，测量阻抗在对应不同过渡电阻和 m 值时的振荡轨迹（虚线）。它是穿越四个象限的曲线簇。

N 侧

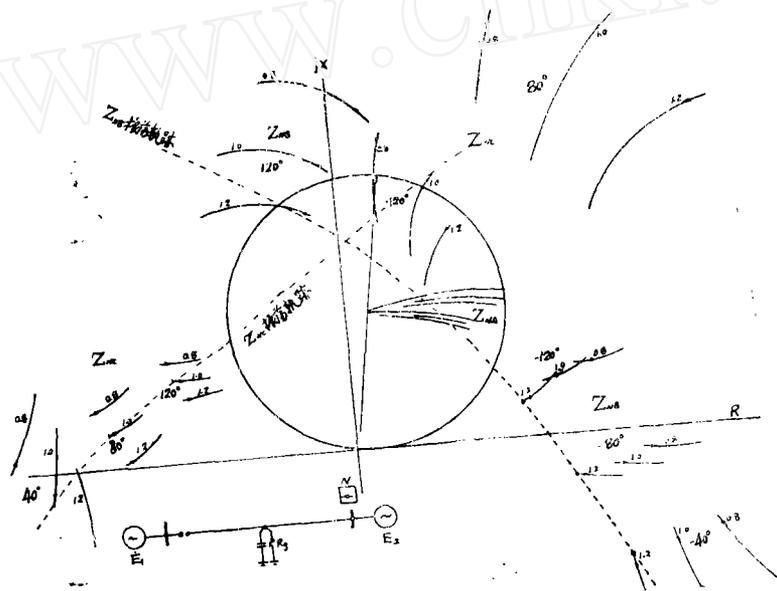
1. 非故障相继电器。〔图六〕示出了在N侧线路出口故障时，继电器测量阻抗轨



图六 出口短路，接地距离继电器（A、B、C相）测量阻抗

迹 (Z_{NB} 、 Z_{NC})。当M侧断开后,由于两侧电势角摆开,超前相(C相)继电器在较大过渡电阻时,其测量阻抗可能落在园内,导致C相继电器误动作。而B相继电器测量阻抗轨迹处在第四象限,所以误动的可能性较小。

〔图七〕示出了在线路中点故障时,继电器测量阻抗轨迹。由图可见,其测量阻抗在复平面上分布的区域较广,当两侧电势角较大时,B相继电器在N侧为受端时 ($+120^\circ$),测量阻抗在园内;C相继电器在送端时 ($\delta = -120^\circ$),测量阻抗在园内。而且,不论N侧是送端还是受端,M侧向N侧送无功 ($E_1/E_2 = 1.2$) 更加剧误动的可能性。



图七、线路中点短路,接地距离继电器(A、B、C相)测量阻抗

2. 故障相继电器。测量阻抗轨迹均落在继电器特性园内,从而保证了故障相继电器(A相)在复杂故障条件下的正确动作。

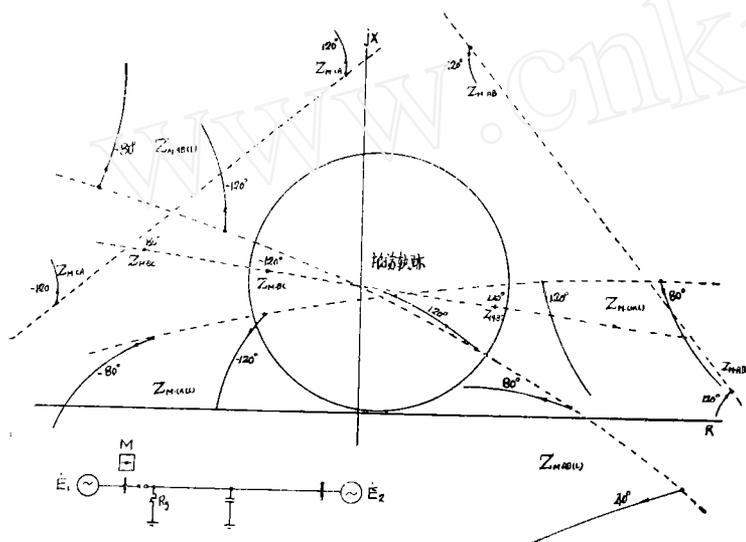
3. 非全相振荡。非故障相继电器测量阻抗的振荡轨迹,在M侧断开时与故障点的位置有关。在N侧出口故障时, Z_{NB} 、 Z_{NC} 的振荡轨迹 ($R_g = 0^\circ$, $m = 1$) 分别位于第四和第三象限的一个园〔见图六〕。在线路中点故障时, Z_{NB} 振荡轨迹 ($R_g = 0^\circ$, $m = 1.2$) 是穿越第二、四象限一段园弧。 Z_{NC} 振荡轨迹是穿越第一、三象限一段园弧〔见图七〕。

相间距离继电器

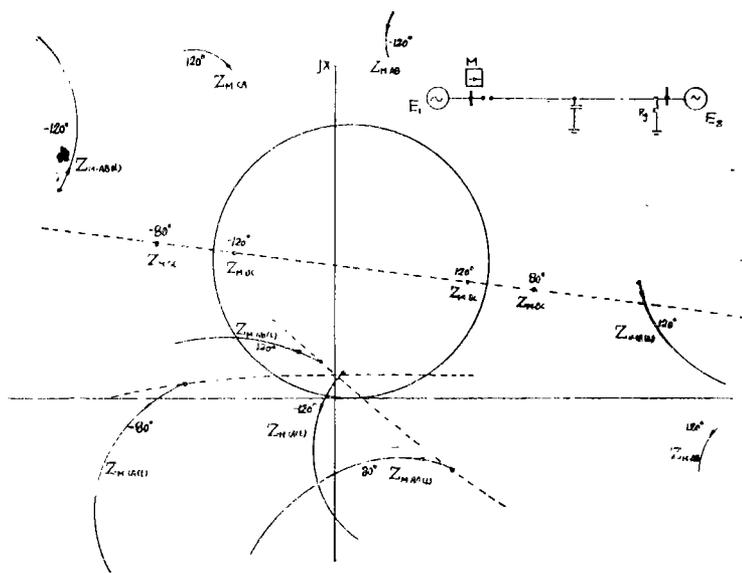
当一相断线与接地故障同时发生时,分析相间距离继电器是为了更进一步了解在这种复杂故障状态下继电器的动作行为。

M侧

1. 电压互感器设置在母线上。由〔图八〕〔图九〕可见，当M侧一相断开后，无论故障发生在出口还是被保护线路任意点，与故障相（A相）有关的继电器测量阻抗（ $Z_{M \cdot AB}$ 、 $Z_{M \cdot CA}$ ）均远离继电器特性圆。所以，在非全相振荡过程中，尽管电势角摆



图八 出口短路，相间距离继电器（AB、BC、CA）测量阻抗



图九 线路末端短路，相间继电器（AB、BC、CA）测量阻抗

开较大(大于 120°)，继电器不会误动。这是因为A相断开后，接在母线上电压互感器A相电压升高的缘故。

$Z_{M \cdot AB}$ 、 $Z_{M \cdot CA}$ 的振荡轨迹分别是穿越第一、四和第二、三象限的圆弧(虚线)，它远离继电器特性园。

2. 电压互感器设置在线路上。继电器测量阻抗($Z_{M \cdot AB(L)}$ 、 $Z_{M \cdot CA(L)}$)在电势角大于 120° 时均进入继电器特性园内。由〔图八〕可见， $Z_{M \cdot AB(L)}$ 是在送端时($\delta = +120^\circ$)进园，然后随着过渡电阻增大，其轨迹深入继电器特性园内。 $Z_{M \cdot CA(L)}$ 是在受端时($\delta = -120^\circ$)进园，随着过渡电阻增大，其轨迹逸出继电器特性园外。由此可见，当电压互感器设置在线路上，当两侧电势角摆开较大时，相间距离继电器可能动作。这是因为一相断开，故障仍存在，故障相电压降低引起的。

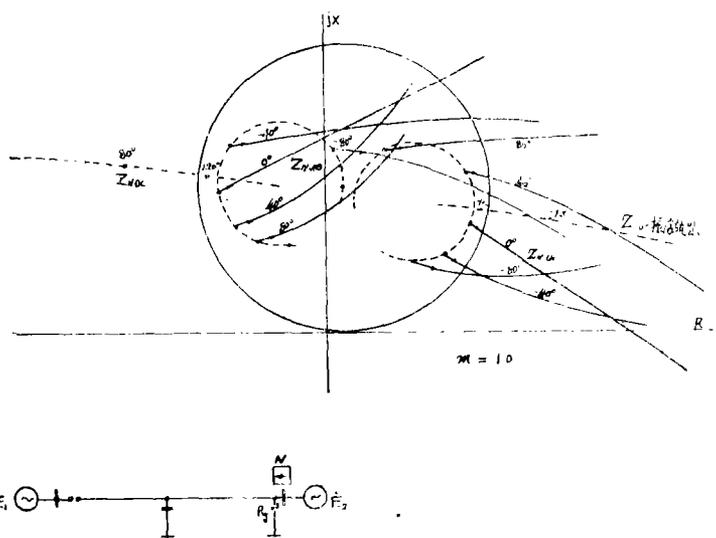
$Z_{M \cdot AB(L)}$ 、 $Z_{M \cdot CA(L)}$ 的振荡轨迹是交叉穿越继电器特性园内的圆弧。

3. 与故障相(A相)无关的BC相继电器测量阻抗的振荡轨迹($Z_{M \cdot BC}$)是一条穿越继电器特性园内的直线。当电势角接近 $\pm 120^\circ$ 时，其测量阻抗进园。还应指出的是，BC相继电器测量阻抗与过渡电阻、故障点位置、电压互感器设置均无关。

N侧

1. 在N侧出口故障，见〔图十〕。与故障相(A相)有关的继电器测量阻抗($Z_{N \cdot AB}$ 、 $Z_{N \cdot CA}$)，当金属性短路时，在各种不同电势角时($-120^\circ \sim +120^\circ$)都落在特性园内。然后，随着 R_g 增大其测量阻抗逸出园外。由此可见，在出口故障的大多数情况下，相间距离继电器(AB相、CA相)误动的可能性是很大的。为解决上述问题，一般是用零序分量(电压或电流)断开相间距离继电器的动作回路来解决。

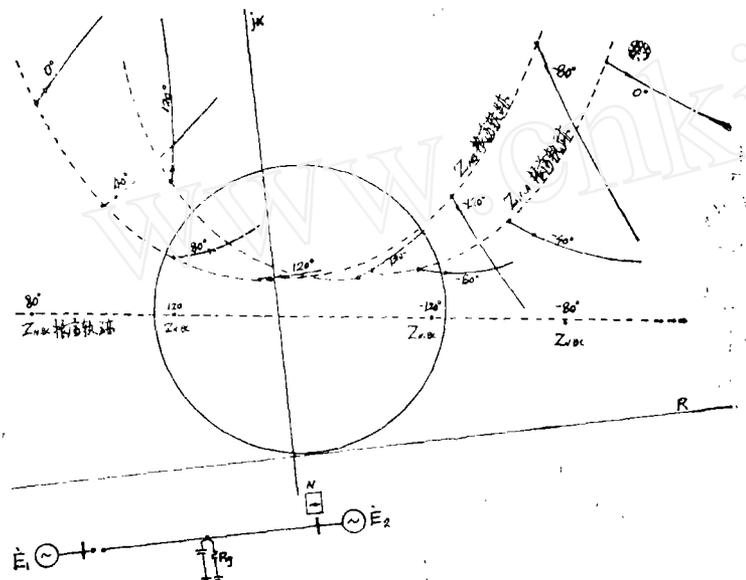
$Z_{N \cdot AB}$ 、 $Z_{N \cdot CA}$ 的振荡轨迹($R_g = 0$ 欧、 $m = 1$)分别位于第二、第一象限的一个



图十 出口短路，相间继电器(AB、BC、CA)测量阻抗

园(虚线)。

2. 在线路中点或末端故障, 见〔图十一〕。只有当两侧电势角大于 $\pm 80^\circ$ 时, 继电器测量阻抗($Z_{N\cdot AB}$ 、 $Z_{N\cdot A}$)才能落到继电器特性园内。 $Z_{N\cdot AB}$ 在受端($\delta = +80^\circ$)时容易进园, $Z_{N\cdot CA}$ 在送端($\delta = -80^\circ$)时容易进园。 $Z_{N\cdot AB}$ 和 $Z_{N\cdot CA}$ 的振荡轨迹($R_g = 0, m = 1$)是穿越第一、二象限的一段圆弧。



图十一 线路中点短路, 相间继电器(AB、BC、AC)测量阻抗

线路两相运行并振荡时距离继电器动作行为

不论是按 $UY/Y + K \cdot 3I_0$ (接地)接线还是按 U_{Δ}/I_{Δ} (相间)接线的距离继电器, 在非全相振荡过程中的动作行为, 它不仅决定于线路输送的有功和无功功率, 而且还与电压互感器设置在母线上还是在线路侧的位置有关。同时, 输电线路对地分布电容也是不可忽视的。

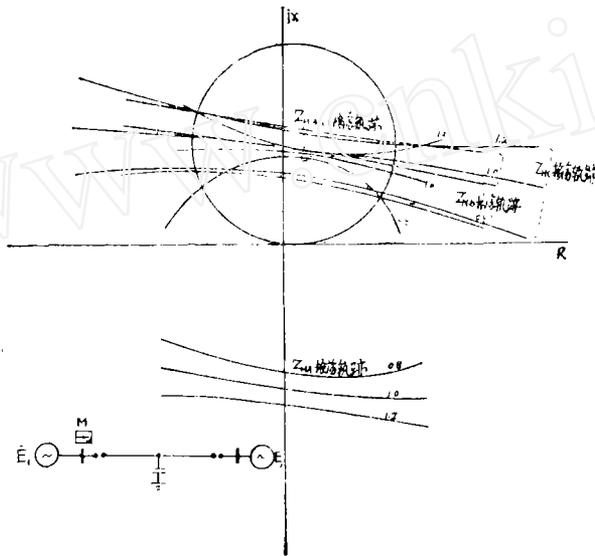
接地距离继电器

1. 非故障相继电器。〔图十二〕示出了B相和C相接地距离继电器测量阻抗振荡轨迹(Z_{MB} 、 Z_{MC})。它是一段穿越继电器特性园内的圆弧。当两侧电势角摆到 $\pm 120^\circ$ 时, 其测量阻抗进园, 继电器误动。图中也示出了线路无功(不同 m 值)对测量阻抗的影响。当然, 非故障相继电器测量阻抗与电压互感器设置位置无关。

2. 故障相继电器。当电压互感器设置在母线上时, 由于故障相断开后, 母线电压增高($226.2/0^\circ$ 伏)而继电器电流只有较小的零序电流。所以, 测量阻抗 Z_{MA} 振荡轨

迹远离继电器特性园，以保证故障相继电器可靠返回。

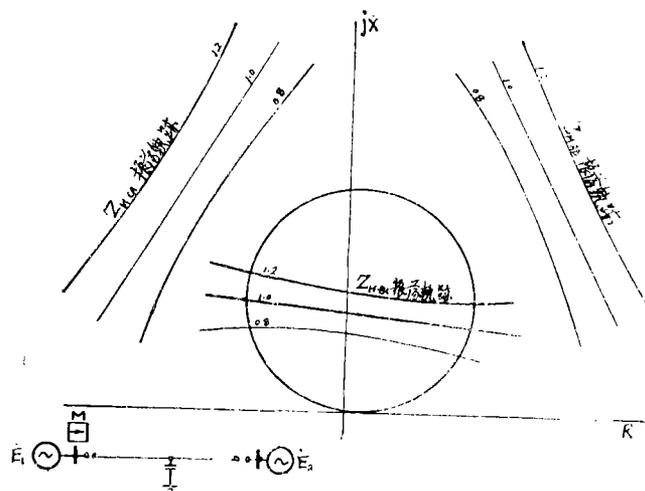
当电压互感器设置在线路上时，由于故障相线路对地分布电容耦合的影响，使得接入故障相继电器的电压很低（ $6.9/\sqrt{-180^\circ}$ 伏）。所以，测量阻抗 $Z_{MA(L)}$ 振荡轨迹仍然是一段穿越继电器特性园的圆弧，而且当两侧电势角摆到只有 $\pm 120^\circ$ 左右时，其测量阻抗进园，导致继电器误动。由〔图十二〕可见，线路输送的有功和无功对测量阻抗的影响也是非常显著的。



图十二 接地距离继电器（A、B、C相）测量阻抗

相间距离继电器

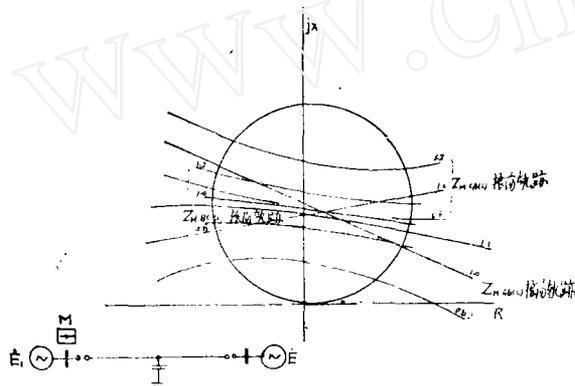
1. 〔图十三〕示出了相间继电器测量阻抗振荡轨迹（ $Z_{M \cdot AB}$ 、 $Z_{M \cdot BC}$ 、 $Z_{M \cdot CA}$ ）。



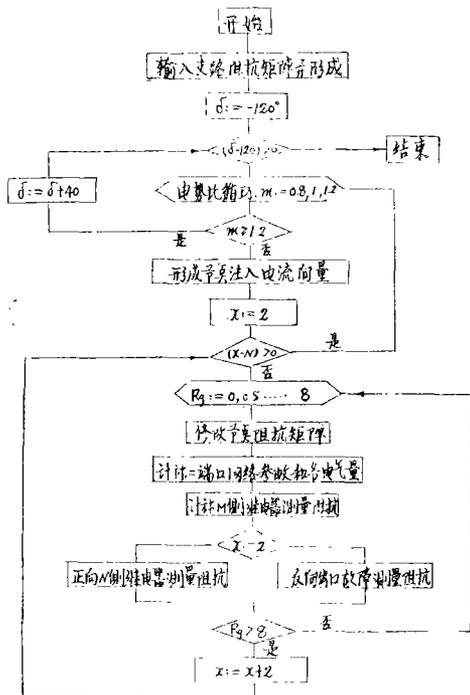
图十三 相间继电器（AB、BC、CA）测量阻抗

由图可见，与故障相（A相）有联系的测量阻抗 $Z_{M \cdot AB}$ 、 $Z_{M \cdot CA}$ 偏离继电器特性园外，不论两侧电势角摆开有多大，继电器是不会误动的。这是因为断开后的故障相电压增高的缘故。图中也显示了线路输送的无功对振荡轨迹影响较大。也就是当M侧受无功（ $m = 0.8$ ）时，测量阻抗轨迹更接近于特性园。

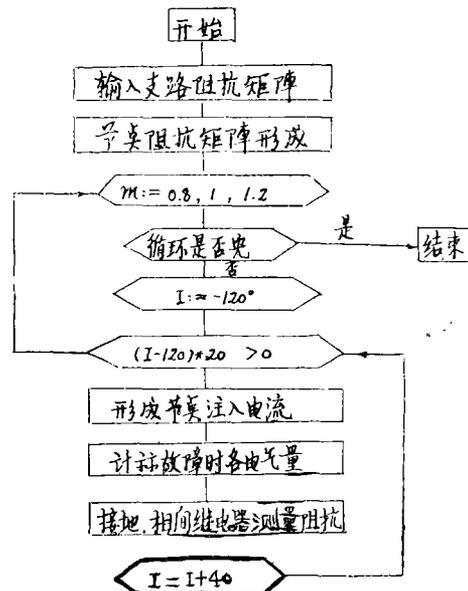
与故障相无联系的BC相继电器，其测量阻抗（ $Z_{M \cdot BC}$ ）是一段穿越继电器特性园的曲线。当 $\delta = \pm 120^\circ$ 时，测量阻抗进园，继电器误动作。这是因为两相运行时，被保护线路仍输送一定数量的有功和无功，导致BC相母线电压下降而引起的。



图十四 相间继电器（AB、BC、CA）测量阻抗（PT在线路上）



复故障（短路—断线）时继电器行为框图



复故障（断线—断线）时继电器行为框图

2. [图十四] 示出了电压互感器设置在线路侧, 相间继电器测量阻抗振荡轨迹 ($Z_{M \cdot AB(L)}$ 、 $Z_{M \cdot BC(L)}$ 、 $Z_{M \cdot CA(L)}$)。当故障相(A相)两侧断开后, 由于线路对地分布的影响, 接入继电器的A相电压下降, 所以 $Z_{M \cdot AB}$ 、 $Z_{M \cdot CA}$ 轨迹不是偏离而是穿越继电器特性园。

结 语

一、本文是根据两端电源电力系统中发生复故障(短路——断线, 断线——断线)的数学模型, 编写出数字计算机程序。可以根据实际系统参数, 用于电力系统距离继电器的运行, 设计和事故分析, 而不是拘泥于一般地理论分析。

二、本文计算分析了被保护线路两侧(M侧、N侧)的接地和相间距离继电器在复故障、非全相振荡、两相运行过程中的动作行为。同时, 也讨论了线路输送有功、无功功率、过渡电阻、故障点位置, 线路对地分布电容等因素对继电器行为的影响。

三、通过计算可以得到在复故障条件下被保护线路各点的各序电压、相电压以及各支路的各序电流、相电流。因而, 它不只限于用来分析距离保护, 也可以用来分析零序功率方向、负序功率方向以及其他超高压输电线路保护的動作行为。

四、由于本文对网络节点阻抗矩阵形成是根据网络拓朴理论形成的支路追加法。因而在程序设计和网络结构上, 它不只局限于两端电源电力系统, 也可以方便地扩展到多个电源电力系统中。

本文承马长贵教授审阅并提出宝贵意见。本文计算机程序是在作者指导下由潮兴涌、蔡洪波同学写出的。一并致谢。

参 考 文 献

1. 华北电力学院“电力系统故障分析”
2. 江世芳、曲青“方向阻抗继电器测量阻抗及动作行为分析”(上、下)许昌继电器研究所《继电器》 1981年第二期、第三期
3. 江世芳“阻抗继电器行为分析” 山东工学院学报 1982年第三期
4. ANDERSON “Analysis of Faulted Power Systems”