

多相补偿距离继电器 $\delta-R$ 特性分析

华中电管局调度局 柳焕章

内容摘要

多相补偿距离继电器的动作行为与很多因素相关,因此,对它的分析是极其复杂的。本文用解析的方法,导出补偿电压为功角 δ 、过渡电阻 R 的函数关系,并且在复平面上画出矢量轨迹,根据动作判据,十分明瞭地分析 δ 、 R 对继电器动作行为的影响。

一 网络模型及假设条件

将电力系统等值为图 1 所示的两端系统。

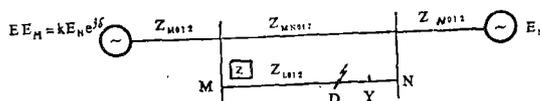


图 1 系统等值图

图中: E_M ——本侧电势; E_N ——对侧电势;
 Z_{MO12} , Z_{NO12} , Z_{MNO12} ——网络等值零、正、负序等值阻抗;
 Z_{LO12} ——被保护线路零、正、负序阻抗;
 Y ——整定点, 整定阻抗 $Z_Y = y \cdot Z_{L1}$; D ——故障点;
 M ——保护安装点; y —— M y 间距离; d —— MD 间距离。

假设条件:

1. $k = 1$ 两侧电势幅值相等;

杂, 一条线路上不同段分别与不同线路之间有耦合互感, 我认为可照上述分析法先定性地找出较严重的和决定性的运行方式, 再进行精确计算比较来正确地进行零序电流保护的定值计算和校检工作, 同时我个人认为上述分析有助于扩充零序电流保护整定计算程序软件的功能。

参考文献

1. 电力系统继电保护 中国工业出版社
2. 电力系统故障计算程序 湖北省电力中心调变所
3. 电力系统零序电流保护整定计算程序

2. 全系统阻抗角相等且为 φ_Z ;

3. 全系统负序阻抗等于正序阻抗。

设: M、Y、D三点零, 正序节点阻抗矩阵为:

$$\begin{pmatrix} Z_{MM01} & Z_{MY01} & Z_{MD01} \\ Z_{YM01} & Z_{YY01} & Z_{YD01} \\ Z_{DM01} & Z_{DY01} & Z_{DD01} \end{pmatrix}$$

M、Y、D三点故障前电压 $U_M^{(0)}$ 、 $U_Y^{(0)}$ 、 $U_D^{(0)}$, 故障后电压 U_{M012} , U_{Y012} , U_{D012} , 故障点电流 I_{D012} 。

二 补偿电压及零序电流

分析多相补偿继电器动作行为的关键是在不同的故障点(区外, 区内), 不同的故障类型的情况下, 补偿电压 U_0' , U_1' , U_2' (或 U_A' , U_B' , U_C')及零序电流 I_c 的函数表达式。因此这里作较详细的推导。

$$U_0' = U_{M0} - y \cdot Z_{L0} I_0$$

$$U_1' = U_{M1} - y \cdot Z_{L1} I_1$$

$$U_2' = U_{M2} - y \cdot Z_{L1} \cdot I_2$$

1. 区外故障

$$\therefore I_0 = \frac{U_{M0} - U_{Y0}}{Y \cdot Z_{L0}} \quad I_1 = \frac{U_{M1} - U_{Y1}}{Y \cdot Z_{L1}} \quad I_2 = \frac{U_{M2} - U_{Y2}}{Y \cdot Z_{L1}}$$

$$\therefore U_0' = U_{Y0} \quad U_1' = U_{Y1} \quad U_2' = U_{Y2}$$

$$U_0' = Z_{YD0} \cdot I_{D0} \quad U_1' = U_Y^{(0)} + Z_{YD1} I_{D1} \quad U_2' = Z_{YD1} I_{D2}$$

$$I_0 = \frac{Z_{MD0} - Z_{YD0}}{Y Z_{L0}} \cdot I_{D0}$$

2. 区内故障

$$\therefore I_0 = \frac{U_{M0} - U_{D0}}{d \cdot Z_{L0}} \quad I_1 = \frac{U_{M1} - U_{D1}}{d \cdot Z_{L1}} \quad I_2 = \frac{U_{M2} - U_{D2}}{d \cdot Z_{L1}}$$

$$\therefore U_0' = \left(\frac{y}{d} - 1 \right) (U_{D0} - U_{M0}) + U_{D0}$$

$$= \left[\left(\frac{y}{d} - 1 \right) (Z_{DD0} - Z_{MD0}) + Z_{DD0} \right] I_{D0}$$

$$\text{又} \therefore \frac{Z_{DD0} - Z_{MD0}}{d Z_{L0}} + \frac{Z_{DD0} - Z_{YD0}}{(y-d) Z_{L0}} = 1$$

$$\therefore U_0' = \left[(y-d) Z_{L0} + Z_{YD0} \right] I_{D0}$$

$$I_0 = \frac{Z_{MD0} - Z_{DD0}}{d Z_{L0}} \quad I^{D0} = \left(\frac{Z_{MD0} - Z_{YD0}}{Y Z_{L0}} - 1 + \frac{d}{y} \right) I_{D0}$$

$$U_1' = \left(\frac{y}{d} - 1 \right) (U_{D1} - U_{M1}) + U_{D1}$$

$$\begin{aligned}
 &= \left(\frac{y}{d} - 1\right) \left[(U_D^{(0)} - U_M^{(0)}) + (Z_{DD1} - Z_{MD1}) I_{D1} \right] \\
 &+ U_D^{(0)} + Z_{DD1} I_{D1} \\
 &= \left(\frac{y}{d} - 1\right) (U_D^{(0)} - U_M^{(0)}) + U_D^{(0)} + [(y-d)Z_{L1} + Z_{YD1}] I_{D1}
 \end{aligned}$$

$$\therefore \frac{U_Y^{(0)} - U_M^{(0)}}{U_D^{(0)} - U_M^{(0)}} = \frac{y}{d}$$

$$\therefore U_1' = U_Y^{(0)} + [(y-d)Z_{L1} + Z_{YD1}] I_{D1}$$

同理 $U_2' = [(y-d)Z_{L1} + Z_{YD1}] I_{D2}$

因此，补偿电压及零序电流

$$U_0' = Z_0 I_{D0} \quad U_1' = U_Y^{(0)} + Z_1 I_{D1}$$

$$U_2' = Z_1 I_{D2} \quad -I_0 = C \cdot I_{D0} \quad I_{D012} = \frac{U_D^{(0)}}{Z_{012}(R)}$$

$$U_A' = Z_0 I_{D0} + U_Y^{(0)} + Z_1 I_{D1} + Z_1 I_{D2}$$

$$U_B' = Z_0 I_{D0} + \alpha^2 U_Y^{(0)} + \alpha^2 Z_1 I_{D1} + \alpha Z_1 I_{D2}$$

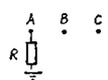
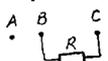
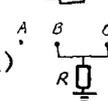
$$U_C' = Z_0 I_{D0} + \alpha U_Y^{(0)} + \alpha Z_1 I_{D1} + \alpha^2 Z_1 I_{D2}$$

其中： $\alpha = e^{j120^\circ}$

表1

故障	Z_0	Z_1	C
区外	Z_{YD0}	Z_{YD1}	$\frac{Z_{YD0} - Z_{MD0}}{y \cdot Z_{L0}}$
区内	$Z_{YD0} + (y-d)Z_{L0}$	$Z_{YD1} + (y-d)Z_{L1}$	$\frac{Z_{YD0} - Z_{MD0}}{y \cdot Z_{L0}} + 1 - \frac{d}{y}$

表2

故障类型	$Z_0(R)$	$Z_1(R)$	$Z_2(R)$
K(1) 	$-(Z_{DD0} + 2Z_{DD1} + 3R)$	同左	同左
K(2) 	∞	$-(2Z_{DD1} + R)$	$2Z_{DD1} + R$
K(1.1) 	$2Z_{DD0} + Z_{DD1} + 6R$	$\frac{Z_{DD1}(2Z_{DD1} + Z_{DD1} + 6R)}{Z_{DD0} + Z_{DD1} + 3R}$	$\frac{Z_{DD1}(2Z_{DD0} + Z_{DD1} + 6R)}{Z_{DD0} + 3R}$

3. 单相接地

$$U_A' = \left(\frac{U_Y^{(0)}}{U_D^{(0)}} + \frac{Z_0 + 2Z_1}{Z_0(R)} \right) U_D^{(0)}$$

$$U_B' = \left(\alpha^2 \frac{U_Y^{(0)}}{U_D^{(0)}} + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_0(R)} \right) U_D^{(0)}$$

$$U_c' = \left(\alpha \frac{U_Y^{(0)}}{U_D^{(0)}} + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_0(R)} \right) U_D^{(0)}$$

$$-I_o = \frac{C}{Z_o(R)} U_D^{(0)}$$

4. 两相短路

$$U_A' = U_Y^{(0)} = \frac{U_Y^{(0)}}{U_D^{(0)}} \cdot U_D^{(0)}$$

$$U_B' = \left[\alpha^2 \frac{U_Y^{(0)}}{U_D^{(0)}} + (\alpha - \alpha^2) \frac{Z_1}{Z_2(R)} \right] U_D^{(0)}$$

$$U_C' = \left[\alpha \frac{U_Y^{(0)}}{U_D^{(0)}} + (\alpha^2 - \alpha) \frac{Z_1}{Z_2(R)} \right] U_D^{(0)}$$

5. 两相接地

$$U_A' = \left(\frac{U_Y^{(0)}}{U_D^{(0)}} + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_o(R)} \right) U_D^{(0)}$$

$$U_B' = \left[\alpha^2 \frac{U_Y^{(0)}}{U_D^{(0)}} + (\alpha - \alpha^2) \frac{Z_1}{2Z_{DD1}} + \frac{2Z_o + Z_1}{2Z_o(R)} \right] U_D^{(0)}$$

$$U_C' = \left[\alpha \frac{U_Y^{(0)}}{U_D^{(0)}} + (\alpha^2 - \alpha) \frac{Z_1}{2Z_{DD1}} + \frac{2Z_o + Z_1}{2Z_o(R)} \right] U_D^{(0)}$$

$$-I_o = \frac{C}{Z_o(R)} U_D^{(0)}$$

根据线性系统迭加原理和齐性原理

$$\frac{U_Y^{(0')}}{U_D^{(0')}} = \frac{[k_Y + (1 - k_Y)e^{j\delta}] E_N}{[k_D + (1 - k_D)e^{j\delta}] E_N}$$

k_Y, k_D, E_N 单独使用时, y, D 点的电压与 E_N 之比。

再由圆的二次(圆)分式表达式得:

$$\frac{U_Y^{(0')}}{U_D^{(0')}} = 1 + \rho (1 + e^{j\delta})$$

其中: $\rho = \frac{k_Y - k_D}{Z_{kd} - 1}$ 与整定点, 故障点,

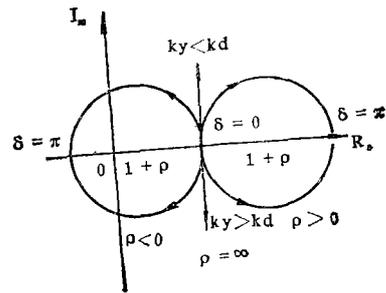
振荡中心三者的相对位置有关。

$$\delta' = \delta + \pi - 2 \arctg \frac{\sin \delta}{\frac{k_D}{1 - k_D} + \cos \delta}$$

$$\delta = \delta' + \pi - 2 \arctg \frac{\sin \delta'}{\frac{k_D}{1 - k_D} + \cos \delta'}$$

以上这些表达式 $\frac{U_A'}{U_D^{(0)'}}$ $\frac{U_B'}{U_D^{(0)'}}$ $\frac{U_C'}{U_D^{(0)'}}$ 由两部份组成, 第一部份是 δ 的函数轨迹

是一个圆; 第二部份是 R 的函数轨迹是一段弧。 $-\frac{I_o}{U_D^{(0)'}}$ 是 R 的函数轨迹是一段弧。因此很容易在复平面上画出这四个量的轨迹, 分析 δ, R 对继电器动作行为的影响。



δ 增大轨迹变化方向

$k_Y < k_D$ 向上 $k_Y > k_D$ 向下

图 2 $\frac{U_Y^{(0)'}}{U_D^{(0)'}}$ 系统振荡轨迹图

三 接地多相补偿继电器动作行为分析

接地距离的动作判据是 U_A' , U_B' , U_C' 及 $-I_0$ 在同半个平面, 为了便于分析同除以 $U_D^{(0)}$ 。

1. 单相接地

(1) 区外故障

$$\frac{U_A'}{U_D^{(0)}} = 1 + \rho (1 + e^{j\delta'}) - \frac{Z_{YD0} + 2Z_{YD1}}{Z_{DD0} + 2Z_{DD1} + 3R_1}$$

$$\frac{U_B'}{U_D^{(0)}} = \alpha^2 [1 + \rho (1 + e^{j\delta'})] - \frac{Z_{YD0} - Z_{YD1}}{Z_{DD0} + 2Z_{DD1} + 3R}$$

$$\frac{U_C'}{U_D^{(0)}} = \alpha [1 + \rho (1 + e^{j\delta'})] - \frac{Z_{YD0} - Z_{YD1}}{Z_{DD0} + 2Z_{DD1} + 3R}$$

$$-\frac{I_0}{U_D^{(0)}} = -\frac{Z_{YD0} - Z_{MD0}}{y \cdot Z_{L0} (Z_{DD0} + 2Z_{DD1} + 3R)}$$

$$\frac{Z_{YD0} + 2Z_{YD1}}{Z_{DD0} + 2Z_{DD1}} < 1 \quad \text{自阻抗大于互阻抗}$$

(2) 区内故障

$$\frac{U_A'}{U_D^{(0)}} = 1 + \rho (1 + e^{j\delta'}) - \frac{Z_{YD0} + (y-d)Z_{L0} + 2Z_{YD1} + 2(y-d)Z_{L1}}{Z_{DD0} + 2Z_{DD1} + 3R}$$

$$\frac{U_B'}{U_D^{(0)}} = \alpha^2 [1 + \rho (1 + e^{j\delta'})] - \frac{Z_{YD0} + (y-d)Z_{L0} - Z_{YD1} - (y-d)Z_{L1}}{Z_{DD0} + 2Z_{DD1} + 3R}$$

$$\frac{U_C'}{U_D^{(0)}} = \alpha [1 + \rho (1 + e^{j\delta'})] - \frac{Z_{YD0} + (y-d)Z_{L0} - Z_{YD1} - (y-d)Z_{L1}}{Z_{DD0} + 2Z_{DD1} + 3R}$$

$$-\frac{I_0}{U_D^{(0)}} = -\frac{Z_{YD0} - Z_{MD0} + (y-d)Z_{L0}}{y \cdot Z_{L0} (Z_{DD0} + 2Z_{DD1} + 3R)}$$

$$\therefore \frac{Z_{DD0} - Z_{YD0}}{(y-d)Z_{L0}} + \frac{Z_{DD0} - Z_{MD0}}{dZ_{L0}} = 1$$

$$\therefore \frac{Z_{YD0} + (y-d)Z_{L0}}{Z_{DD0}} > 1$$

同理

$$\frac{Z_{YD1} + (y-d)Z_{L1}}{Z_{DD1}} > 1$$

$$\therefore \frac{Z_{YD0} + (y-d)Z_{L0} + 2Z_{YD1} + 2(y-d)Z_{L1}}{Z_{DD0} + 2Z_{DD1}} > 1$$

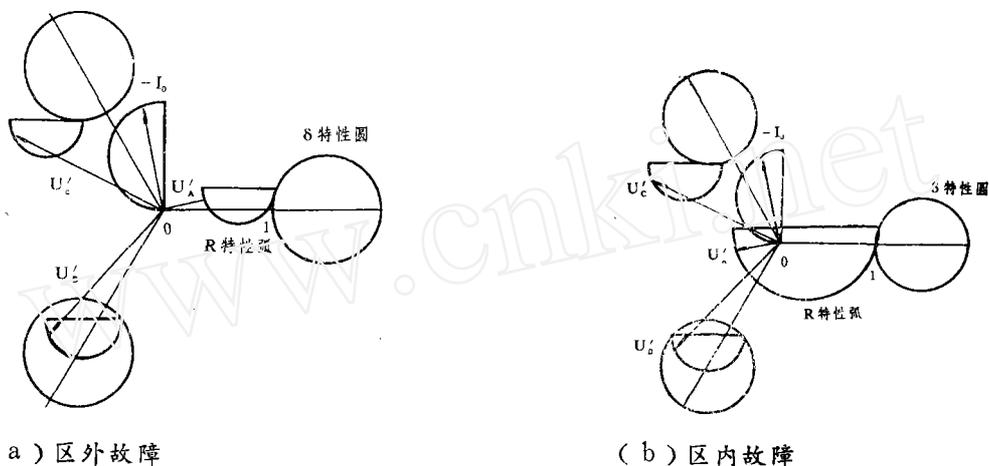


图3 单相接地轨迹图

2. 两相接地

(1) 区外故障

$$\frac{U'_A}{U_{D(0)}} = 1 + \rho (1 + e^{j\delta'}) + \frac{Z_{YD0} - Z_{YD1}}{2Z_{DD0} + Z_{DD1} + 6R}$$

$$\frac{U'_B}{U_{D(0)}} = \alpha^2 [1 + \rho (1 + e^{j\delta'})] + (\alpha - \alpha^2) \frac{Z_{YD1}}{2Z_{DD1}} + \frac{2Z_{YD0} + Z_{YD1}}{4Z_{DD0} + 2Z_{DD1} + 12R}$$

$$\frac{U'_C}{U_{D(0)}} = \alpha [1 + \rho (1 + e^{j\delta'})] + (\alpha^2 - \alpha) \frac{Z_{YD1}}{2Z_{DD1}} + \frac{2Z_{YD0} + Z_{YD1}}{4Z_{DD0} + 2Z_{DD1} + 12R}$$

$$-\frac{I_0}{U_{D(0)}} = \frac{Z_{YD0} - Z_{MD0}}{yZ_{L0}(2Z_{DD0} + Z_{DD1} + 6R)}$$

$$\frac{2Z_{YD0} + Z_{YD1}}{4Z_{DD0} + 2Z_{DD1}} < \frac{1}{2}$$

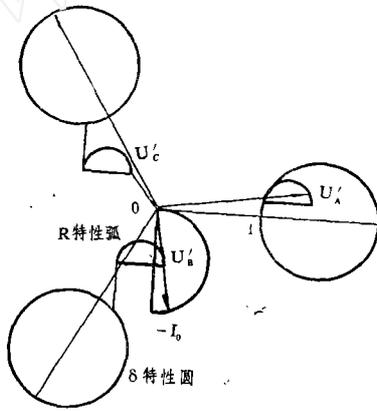
$$\frac{Z_{YD1}}{2Z_{DD1}} < \frac{1}{2}$$

(2) 区内故障

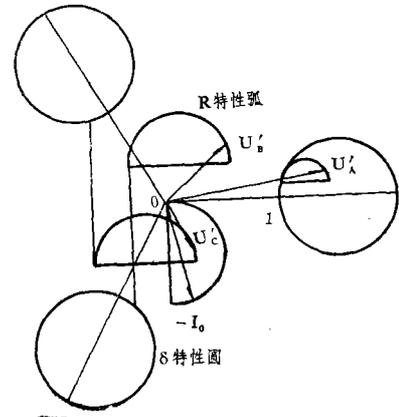
$$\frac{U'_A}{U_{D(0)}} = 1 + \rho (1 + e^{j\delta'}) + \frac{Z_{YD0} + (y-d)Z_{L0} - Z_{YD1} - (y-d)Z_{L1}}{2Z_{DD0} + Z_{DD1} + 6R}$$

$$\frac{U'_B}{U_{D(0)}} = \alpha^2 [1 + \rho (1 + e^{j\delta'})] + (\alpha - \alpha^2) \frac{Z_{YD1} + (y-d)Z_{L1}}{2Z_{DD1}}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{2 [Z_{YD0} + (y-d)Z_{L0}] + Z_{YD1} + (y-d)Z_{L1}}{4Z_{DD0} + 2Z_{DD1} + 12R} \\
 \frac{U_c'}{U_D^{(0)}} &= \alpha [1 + \rho(1 + e^{i\delta'})] + (\alpha^2 - \alpha) \frac{Z_{YD1} + (y-d)Z_{L1}}{2Z_{DD1}} \\
 & + \frac{2 [Z_{YD1} + (y-d)Z_{L0}] + Z_{YD1} + (y-d)Z_{L1}}{4Z + 2Z_{DD1} + 12R} \\
 - \frac{I_0}{U_D^{(0)}} &= \frac{Z_{YD0} - Z_{MDO} + (y-d)Z_{L0}}{yZ_{L0}(2Z_{DD0} + Z_{DD1} + 6R)} \\
 \frac{2 [Z_{YD1} + (y-d)Z_{L0}] + Z_{YD1} + (y-d)Z_{L1}}{4Z_{DD0} + 2Z_{DD1}} &> \frac{1}{2} \\
 \frac{Z_{YD1} + (y-d)Z_{L1}}{2Z_{DD1}} &> \frac{1}{2}
 \end{aligned}$$



(a) 区外故障



(b) 区内故障

图4 两相接地轨迹图

四 相间多相补偿继电器动作行为分析

动作判据 $\frac{|U_1'|}{|U_2'|} < 1$

1. 两相短路

$$\frac{U_1'}{U_2'} = \frac{2Z_{DD1} + R}{Z_1} \cdot \frac{U_Y^{(0)}}{U_D^{(0)}} - 1$$

2. 单相接地

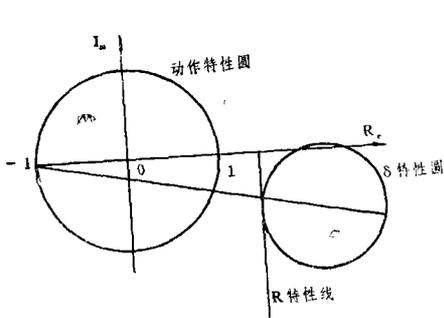
$$-\frac{U_1'}{U_2'} = \frac{Z_{DD0} + Z_{DD1} + 3R}{Z_1} \cdot \frac{U_Y^{(0)}}{U_D^{(0)}} - 1$$

3. 两相接地

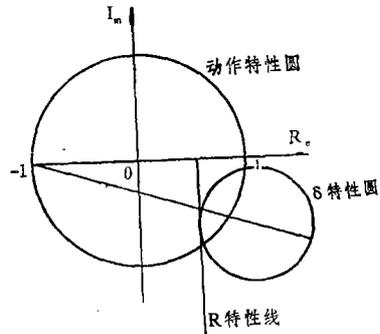
$$\frac{U_1'}{U_2'} = \left(\frac{Z_{DD1}}{Z_{DD0} + 3R} + 2 \right) \left(\frac{Z_{DD1}}{Z_1} \cdot \frac{U_Y^{(0)}}{U_D^{(0)}} - 1 \right) + 1$$

表 3

$\frac{U_1}{U_2}$ 或 $(-\frac{U_1}{U_2})$	K(2)	K(1)	K(1,1)
区 外	$\frac{2Z_{DD1} + R}{Z_{YD1}} [1 + \rho(1 + e^{j\delta_1})] - 1$	$\frac{2Z_{DD1} + Z_{DD0} + 3R}{Z_{YD1}} [1 + \rho(1 + e^{j\delta_1})] - 1$	$(-\frac{Z_{DD1}}{Z_{DD0} + 3R} + 2) \left\{ \frac{Z_{DD1}}{Z_{YD1}} [1 + \rho(1 + e^{j\delta_1})] - 1 \right\} + 1$
内 区	$\frac{2Z_{DD1} + R}{Z_{YD1} + (y-d)Z_{L1}} [1 + \rho(1 + e^{j\delta_1})] - 1$	$\frac{2Z_{DD1} + Z_{DD0} + 3R}{Z_{YD1} + (y-d)Z_{L1}} [1 + \rho(1 + e^{j\delta_1})] - 1$	$(-\frac{Z_{DD1}}{Z_{DD0} + 3R} + 2) \left\{ \frac{Z_{DD1}}{Z_{YD1} + (y-d)Z_{L1}} [1 + \rho(1 + e^{j\delta_1})] - 1 \right\} + 1$

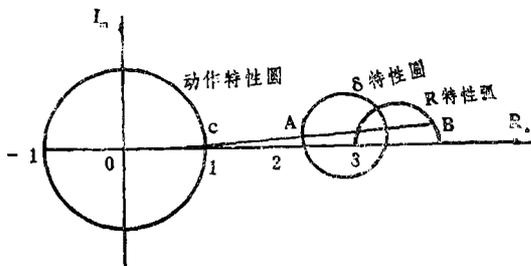


(a) 区外故障

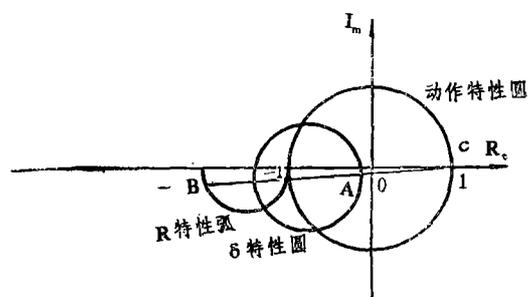


(b) 区内故障

图 5 两相短路或单相接地轨迹图



(a) 区外故障



(b) 区内故障

图 6 两相短路接地轨迹图

区外故障: $\frac{2Z_{DD1}}{Z_{YD1}} - 1 > 1$ R特性线在动作圆外。

区内故障: $\frac{2 Z_{DD1}}{Z_{YD1} + (y-d) Z_{L1}} - 1 < 1$ R特性线从动作圆内穿出, R小

时在圆内, R大时在圆外。

区外故障:

$\frac{Z_{DD1}}{Z_{YD1}} - 1 > 0$ A点在动作圆外

若 $\frac{Z_{DD1}}{Z_{YD1}} - 1 < 1$ A点在BC线段上,

$\frac{Z_{DD1}}{Z_{YD1}} - 1 > 1$ A点在BC延长线上。

区内故障

$\dots 1 < \frac{Z_{DD1}}{Z_{YD1} + (y-d) Z_{L1}} - 1 < 0$

A点在BC线段上, 可能在圆内, 也可能在圆外, 因此存在死区。

以上轨迹图都是在 $\rho > 0$; $Z_{YD0} - Z_{YD1} > 0$; $Z_{YD0} - Z_{MD0} > 0$ 的情况下所作。

五 结 语

δ , R是影响继电器动作特性的两个主要因素, 同时研究它们的轨迹对继电器反应振荡带故障过渡电阻的能力是十分有益的。本文发现振荡轨迹主要取决于整定点、故障点及振荡中心三者的电气位置, 因此对复杂网络区外故障很难作出定性分析, 但是对单回线两端系统就不难作出定性分析。由于有了补偿电压及零序电流的分析式, 很容易得出

类似支接阻抗特性的 δ -R 曲线 。进行定量分析。

参考文献

1. 《高压电网继电保护原理与技术》朱声石 电力工业出版社 1981. 3
2. 《高压电网继电保护运行技术》王梅义 蒙定中等 电力工业出版社 1981. 6
3. 《电力系统继电保护原理与运行》华中工学院 电力工业出版社 1981. 7
4. 分析距离继电器的电势分析法 李晓明 《电力系统自动化》 1988. 2