

# 方向阻抗继电器极化回路对继电器性能的影响

南京电力学校继电保护教研组 许正亚

方向阻抗继电器是距离保护中的一个核心元件，能同时进行故障点的距离（阻抗）和方向的测量，在继电保护领域中应用相当广泛。

在方向阻抗继电器中，电压回路一般引入一定大小的插入电压。插入电压的一部分经谐振记忆回路取自故障相电压或非故障相电压，其设置的主要目的是防止正向出口三相短路时继电器的拒动，插入电压的另一部分取自非故障相电压，其设置的主要目的是防止反向出口不对称短路时继电器的误动。

但是，由于插入电压回路中存在受频率变化敏感的谐振记忆回路，因此，在电网频率变化时，在某些情况下继电器将失去应有的性能，正向出口短路可能拒动，反向出口短路可能误动，也即插入电压的引入起不到预期的作用，另外，若调整不当还将引起保护区的变化，再考虑到负荷电流的影响，情况更为严重。

为此，应对方向阻抗继电器的动作性能作一定的分析，以便找到合理的调整方法，获得较好的性能。

## 一、插入电压引入回路分析

插入电压引入回路（一般可称极化回路）是影响方向阻抗继电器动作性能的主要环节，分析该回路，有助于对继电器特性的了解。大量使用的方向阻抗继电器中，插入电压引入回路主要为一个  $R-L-C$  串联谐振记忆电路，如图 1 所示，插入电压通常在电阻  $R$  上或  $L$  上取得。以下分析插入电压引入回路的一些有关参数。

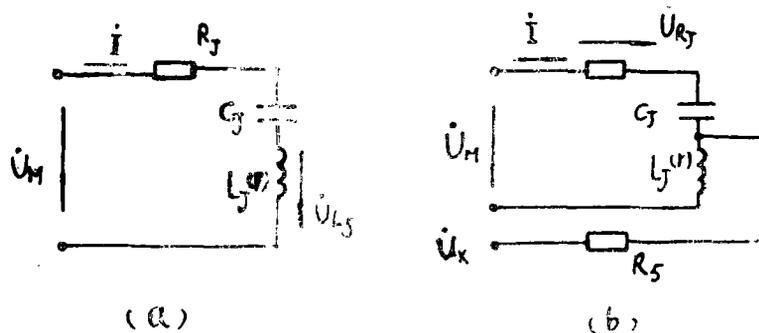


图 1 插入电压引入回路

(一) 固有振荡频率和衰减时间常数

当电力系统发生短路时, 继电器端子上电压受到扰动, 将在谐振记忆回路中产生过渡过程, 当  $R_J + r < 2\sqrt{\frac{L_J}{C_J}}$  时, 记忆回路中将出现衰减的振荡电流。分析表明, 振荡电流的频率  $f_0$ 、衰减时间常数  $T_j$  分别为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_J C_J} - \left(\frac{R_J + r}{2L_J}\right)^2} \quad (1)$$

$$T_j = \frac{2L_J}{R_J + r} \quad (2)$$

由(1)(2)式可见,  $f_0$ 、 $T_j$  仅与谐振回路参数有关, 与电网频率  $f$  无关。

当计及电阻  $R_s$  的影响后,  $f_0$ 、 $T_j$  将有所变化, 此时振荡电流频率、衰减时间常数求得为

$$f'_0 \approx f_0 \left[ 1 - \frac{2(R_J + r) + \frac{L_J}{R_s C_J}}{32\pi^2 f_0^2 L_J R_s C_J} \right]$$

$$T'_j \approx \frac{T_j}{1 + \frac{L_J}{R_s C_J (R_J + r)}}$$

将一般参数代入计算得到,  $f_0$  下降约 1~2%,  $T_j$  减小约 20% 左右, 可见衰减要加快。

(二) 插入电压的表示式

根据具体继电器的插入电压回路, 在求取  $L_J$  上电压时无  $R_s$  作用, 在求取  $R_J$  上电压时, 应计及  $R_s$  的作用。

在图 1(a) 中, 若正常情况下继电器端子电压为  $U_{MH} = U_{mH} \sin(\omega t + \alpha_0)$ , 系统发生故障后变为  $U_{MD} = U_{mD} \sin(\omega t + \beta_0)$ , 此时谐振记忆回路中电流由两个电压作用而得, 其中一个电压为  $U_{MH}$ , 另一个电压为  $\Delta U = U_{MD} - U_{MH} = U_{mH} \sin(\omega t + \alpha_0) - U_{mD} \sin(\omega t + \beta_0)$ 。将这两个电压作用下的电流迭加得到(分析从略)

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_H - \dot{U}_D}{Z} e^{-\frac{t}{T_j}} e^{j[(\omega_0 - \omega)t + \delta]} + \frac{\dot{U}_D}{Z} e^{j\delta} \quad (3)$$

式中  $Z = \sqrt{(R_J + r)^2 + \left(\omega L_J - \frac{1}{\omega C_J}\right)^2}$  为谐振记忆回路阻抗;

$\omega_0 = 2\pi f_0$  为谐振记忆回路固有角速度;

$$\delta = \arctg \frac{\frac{1}{\omega C_J} - \omega L_J}{R_J + r} \text{ 为角度;}$$

$\dot{U}_H$ 、 $\dot{U}_D$  为  $U_{MH}$ 、 $U_{MD}$  的复数表示式。

因谐振记忆回路处接近谐振状态, 故  $Z \approx R_J + r$ , 由此电感  $L_J$  上电压为

$$\dot{U}_{LJ} = j\omega L_J \dot{I} = \frac{\omega L_J}{R_J + r} \left\{ (\dot{U}_H - \dot{U}_D) e^{-\frac{t}{T_j}} e^{j(\omega_0 - \omega)t} + \dot{U}_D \right\} e^{j(90^\circ + \delta)} \quad (4)$$

分析(4)式可见,  $\dot{U}_{L1}$ 由两部分组成。一部分为 $\dot{U}'_D = \dot{U}_D e^{j(90^\circ + \delta)}$ , 不随时间而变, 由继电器端子上残压决定; 另一部分为变量 $\Delta \dot{U}' = (\dot{U}_H - \dot{U}_D) e^{-\frac{t}{T_i}} e^{j[(\omega_0 - \omega)t + 90^\circ + \delta]}$ , 随时间衰减且转动, 其转动方向由电网频率大小决定,  $f < f_0$ 时逆时针转动, 且 $\delta$ 为正值,  $f > f_0$ 时顺时针转动, 且 $\delta$ 为负值, 图2(a)、(b)示出了 $\dot{U}_{L1}$ 的变化情况。由图可见, 在动态变化过程中,  $\dot{U}_{L1}$ 可能失去应有的相位(应有相位超前 $\dot{U}_H 90^\circ$ ), 特别在 $\dot{U}_D = 0$ 、 $f$ 与 $f_0$ 相差较大的情况下, 失去应有相位的时间加快。

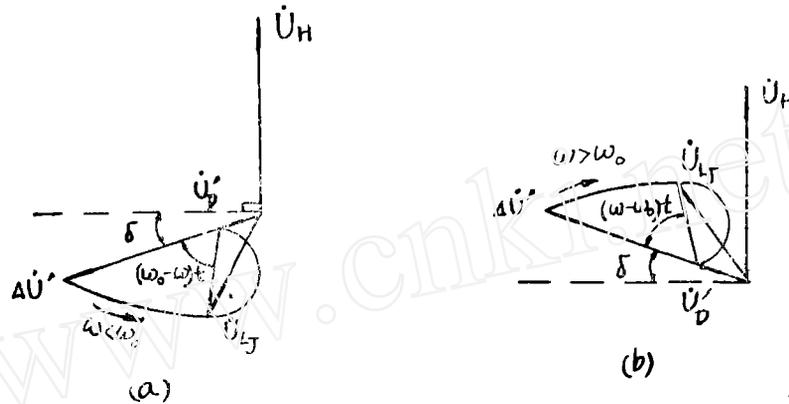


图2  $\dot{U}$ 的变化规律  
(a)  $f > f_0$ ; (b)  $f < f_0$

在图1(b)中, 电流 $\dot{I}$ 由 $\dot{U}_M$ 和 $\dot{U}_X$ 共同产生。考虑到 $R_6$ 数值甚大, 可认为 $\dot{U}_X$ 开路, 在 $\dot{U}_M$ 作用下产生的电流即为(3)式所示; 在 $\dot{U}_X$ 作用下产生的电流为

$$\begin{aligned} \dot{I}_X &= -\frac{\dot{U}_X}{R_6} \cdot \frac{r + j\omega L_I}{(R_I + r) - j\left(\frac{1}{\omega C_I} - \omega L_I\right)} \\ &\approx -j \frac{\dot{U}_X}{R_6} \cdot \frac{\omega L_I}{Z} \cdot e^{j\delta} \approx -j \frac{\omega L_I}{R_6} \cdot \frac{\dot{U}_X}{Z} \cdot e^{j\delta} \end{aligned}$$

计及(3)式和 $Z \approx R_I + r \approx R_I$ 的关系, 得到 $R_I$ 上电压为

$$\dot{U}_{R_I} = \dot{I} R_I = \left[ (\dot{U}_H - \dot{U}_D) e^{-\frac{t}{T_i'}} e^{j(\omega_0' - \omega)t} + \dot{U}_D - j \frac{\omega L_I}{R_6} \dot{U}_X \right] e^{j\delta} \quad (5)$$

分析(5)式可见,  $\dot{U}_{R_I}$ 也有两部分组成。一部分为 $\dot{U}'_D = \left( \dot{U}_D - j \frac{\omega L_I}{R_6} \dot{U}_X \right) e^{j\delta}$ 不随时间而变, 也有继电器端子上残压决定; 另一部分为变量 $\Delta \dot{U}' = (\dot{U}_H - \dot{U}_D) e^{-\frac{t}{T_i'}}$

$e^{j[(\omega_0' - \omega)t + \delta]}$  随时间衰减且转动。作出  $\dot{U}_{R_i}$  的变化情况如图 3 所示。同样，在动态变化过程中， $\dot{U}_{R_i}$  可能要失去应有的相位（应有相位与  $\dot{U}_H$  相同）。

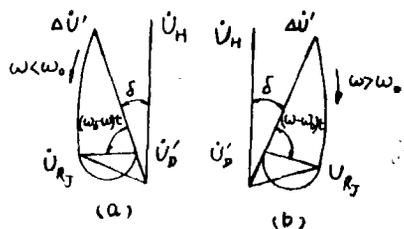


图 3  $\dot{U}_{R_i}$  的变化规律  
(a)  $f < f_0$ ; (b)  $f > f_0$

### (三) $\delta$ 角与 $f$ 的关系

这里给出的是稳态情况下  $\delta$  角与  $f$  的关系。

由 (1) 式得到

$$(2\pi f_0) Z_I = \frac{I}{2\pi f_0 C_I} - \frac{(R_I + r)^2}{8\pi f_0 L_I}$$

可见在  $f_0$  下，有  $X_{L_I} < X_{C_I}$ ，电路呈容性。计及 (1) 式电流超前电压的角度可简化为

$$\begin{aligned} \delta_0 &= \arctg \frac{\frac{1}{\omega_0 C_I} - \omega_0 L_I}{R_I + r} \approx \frac{\frac{1}{\omega_0 C_I} - \omega_0 L_I}{R_I + r} \times 57.3^\circ \\ &= \frac{\frac{1}{C_I} - \omega_0^2 L_I}{\omega_0 (R_I + r)} \times 57.3^\circ = \frac{R_I + r}{4\omega_0 L_I} \times 57.3^\circ = \frac{57.3}{4Q} \text{ (度)} \end{aligned} \quad (6)$$

式中  $Q \approx \frac{\omega_0 L_I}{R_I + r} = \frac{1}{\omega_0 (R_I + r) C_I} = \frac{U_C}{U_M}$  为品质因数。

当  $Q = 3$  时， $\delta_0 = 4.8^\circ$  当  $Q = 4$  时， $\delta_0 = 3.6^\circ$  故  $\delta_0$  是一个很小的角度。

当  $f$  变化时， $\delta$  角随  $f$  而变化，写成关系式为

$$\delta = \delta_0 + \left. \frac{d\delta}{df} \right|_{f=f_0} \cdot (f - f_0) \quad (7)$$

$$\text{而 } \frac{d\delta}{d\omega} = \frac{d}{df} \left[ \arctg \frac{\frac{1}{\omega C_I} - \omega L_I}{R_I + r} \right] \approx -\frac{2L_I}{R_I + r} = -T_I \quad (8)$$

$$\text{所以 } \left. \frac{d\delta}{df} \right|_{f=f_0} = 2\pi \left. \frac{d\delta}{d\omega} \right|_{f=f_0} = -(2\pi) T_I = -\frac{2Q}{f_0} \times 57.3 \text{ 度/赫} \quad (9)$$

$$\text{由此 } \delta = \frac{57.3^\circ}{4Q} - \frac{2Q}{f_0} (f - f_0) \times 57.3^\circ \quad (10)$$

$$\text{或写成 } \delta = \delta_0 + 2\pi T_i (f_0 - f) = \delta_0 + (\omega_0 - \omega) T_i \quad (11)$$

如果在频率  $f$  下的  $\delta$  角已测出, 则根据(10)式就可求得谐振记忆回路的  $f_0$  值。

## 二、继电器动作特性分析

以下分析两种典型极化回路的方向阻抗继电器的动作特性, 其中图 4(a) 为谐振记忆回路接于故障相上, 图 4(b) 为谐振记忆回路接于非故障相上。图中示出的是 AB 相方向阻抗继电器的接线。分析的结果也适用于接地方向阻抗继电器。

### (一) 故障相记忆的方向阻抗继电器的动作特性

#### 1. 继电器动作条件分析

由图 4(a) 得到继电器以幅值比较时的动作条件为

$$|\dot{U}_I - \dot{U}_Y + \dot{U}_K| \geq |\dot{U}_I + \dot{U}_Y - \dot{U}_K| \quad (12)$$

根据幅值—相位比较互换条件, 以比相形式写出时为

$$-90^\circ \leq \arg \left[ \frac{\dot{U}_K - \dot{U}_Y}{\dot{U}_I} \right] \leq 90^\circ \quad (13)$$

计及  $\dot{U}_Y = n_Y \dot{U}_{ABD}$ 、 $\dot{U}_I = n_I \dot{U}_{Rj}$ 、 $\dot{U}_K = (\dot{I}_A - \dot{I}_B) Z_{ZY}$ , 上式写成

$$-90^\circ \leq \arg \left[ \frac{(\dot{I}_A - \dot{I}_B) Z_Z - \dot{U}_{ABD}}{\dot{U}_{Rj}} \right] \leq 90^\circ \quad (14)$$

式中  $Z_Z = \frac{Z_{ZY}}{n_Y}$  为整定阻抗, 其中  $Z_{ZY}$  为 DKB 的转移阻抗,  $n_Y$  为 YB 电压变比。

考虑到(5)式, 并有  $\dot{U}_H = \dot{U}_{ABH}$ 、 $\dot{U}_D = \dot{U}_{ABD}$ 、 $\dot{U}_X = \dot{U}_{CD}$ , 则继电器的动作条件为

$$\begin{aligned} -90^\circ + \delta &\leq \arg \left( \frac{(\dot{I}_A - \dot{I}_B) Z_Z - \dot{U}_{ABD}}{(\dot{U}_{ABH} - \dot{U}_{ABD}) e^{-\frac{t}{T_i'}} e^{j(\omega_0' - \omega)t} + \dot{U}_{ABD} - j \frac{\omega L_j}{R_b} \dot{U}_{CD}} \right) \\ &\leq 90^\circ + \delta \end{aligned} \quad (15)$$

#### 2. 三相短路时的动作特性

##### (1) 正向短路时的情况



设在图5所示的D点三相短路,分析AB相继电器的动作特性。

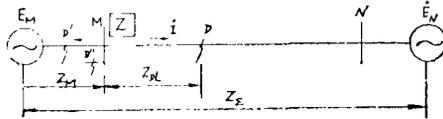


图5 等值电力系统

D点三相短路时,母线M上的电压为

$$\dot{U}_{ABD} = (\dot{I}_A - \dot{I}_B) Z_{DL} \quad (16)$$

$$\dot{U}_{CD} = \dot{I}_C Z_{DL} = \frac{j}{\sqrt{3}} (\dot{I}_A - \dot{I}_B) Z_{DL} \quad (17)$$

短路前母线M上AB相电压为

$$\dot{U}_{ABH} = k_M e^{-j\theta} \dot{E}_{ABM} = k_M e^{-j\theta} (\dot{I}_A - \dot{I}_B) (Z_M + Z_{DL}) \quad (18)$$

式中  $k_M$ —短路前M母线上电压与本侧电势之比;

$\theta$ —短路前M母线上电压落后本侧电势之角度,故

$\theta > 0$  时继电器处送电侧,  $\theta < 0$  处受电侧。

将(16)、(17)、(18)式代入(15)式,化简整理得到继电器的动作方程为

$$-90^\circ + \delta + \alpha \leq \arg \left( \frac{Z_z - Z_{DL}}{Z_{DL} - A} \right) \leq 90^\circ + \delta + \alpha \quad (19)$$

式中  $\alpha = \arg \dot{K}$ , (19a)

$$\dot{A} = -\frac{k_M}{K} \cdot Z_M \cdot e^{-\frac{t}{T_{i'}}} \cdot e^{j[(\omega_0' - \omega)t - \theta - \alpha]}, \quad (19b)$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } \dot{K} &= K e^{j\alpha} = 1 + \frac{\omega L_f}{\sqrt{3} R_0} + (k_M e^{-j\theta} - 1) e^{-\frac{t}{T_{i'}}} e^{j(\omega_0' - \omega)t} \\ &\approx 1 + (k_M e^{-j\theta} - 1) e^{-\frac{t}{T_{i'}}} e^{j(\omega_0' - \omega)t} \end{aligned} \quad (19c)$$

在阻抗复平面上,(19)式所表示的 $Z_{DL}$ 的动作特性为以 $Z_z$ 和 $\dot{A}$ 端点连线为弦的圆,该圆直径(过 $Z_z$ 点的直径)与此弦的夹角为 $\delta + \alpha$ ,当 $\delta + \alpha > 0$ 时,圆以 $Z_z$ 端点为中心逆时针转动并扩大,反之则为顺时针转动并扩大,且 $|\delta + \alpha| < 90^\circ$ 时圆内为动作区;当 $|\delta + \alpha| = 90^\circ$ 时,圆演变为过 $\dot{A}$ 和 $Z_z$ 端点的一条直线(圆为无穷大),动作区相应扩大到半个平面;当 $|\delta + \alpha| > 90^\circ$ 后,圆开始缩小,位置倒转,且动作区变为圆外。因此,当 $\delta + \alpha = 0^\circ \sim 360^\circ$ 变化时,特性圆之大小、动作区、位置相应作周期性变化。以下分析动作特性之影响因素。

负荷电流的影响;由(19)式可见,负荷电流是通过 $\theta$ 角引起 $\alpha$ 角的改变,对动作特

性起影响的。由(19c)式可见,当 $t = 0 \rightarrow \infty$ 秒变化时,有 $\alpha = -\theta \rightarrow 0$ 变化,也即负荷电流的影响随着故障时间的推移而逐渐减弱,继电器进入稳态,负荷电流不再起影响;另外,在送电侧,有 $\theta > 0$ ,所以 $\alpha < 0$ ,此时如电网处 $f > f_0$ 状态,有 $\delta < 0$ ,故 $\delta$ 和 $\alpha$ 是负值迭加,使动作特性向二、三象限偏转并扩大,在受电侧,有 $\theta < 0$ ,所以 $\alpha > 0$ ,此时如电网处 $f < f_0$ 状态,有 $\delta > 0$ ,故 $\delta$ 和 $\alpha$ 是正值迭加,使动作特性向一、四象限偏转并扩大。图6示出了负荷电流对继电器动作特性的影响。

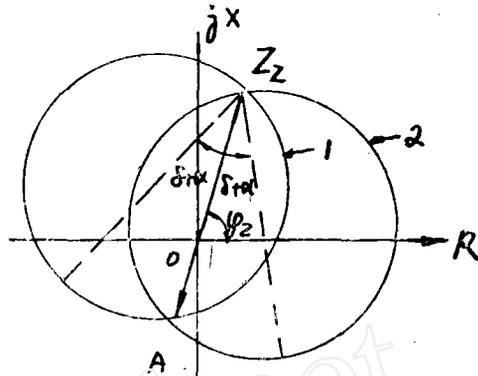


图6 负荷电流对继电器动作特性的影响  
1-- $f > f_0$ 送电侧; 2-- $f < f_0$ 受电侧

应当指出,短路前负荷电流愈大,影响愈严重;电源阻抗 $Z_M$ 愈大,影响也愈严重。因为在同样负荷电流下,有较大的 $\theta$ 角。当 $|\delta + \alpha| > 90^\circ$ 时,继电器可能失去保护区的控制,区外三相短路时可能要误动作,区内三相短路时动作要延时,但一般负荷电流不会大到如此程度(振荡除外)。

然而,在重负荷线路上负荷电流对继电器性能的影响是一个不可忽视的因素。

起始动作特性:起始动作特性是短路瞬间( $t = 0$ 秒)继电器的动作特性。此时由(19c)式得到 $\dot{K} = k_M e^{-i\theta}$ ,故 $K = k_M$ , $\alpha = -\theta$ ,再由(19b)式得到 $\dot{A} = -Z_M$ ,继电器动作方程为

$$-90^\circ + \delta - \theta \leq \arg\left(\frac{Z_Z - Z_{DL}}{Z_{DL} + Z_M}\right) \leq 90^\circ + \delta - \theta \quad (20)$$

作出起始动作特性如图7中圆1所示( $\vec{OA} = -Z_M$ )。由图可见,动作特性包含坐标原点,意味着出口三相短路时继电器能动作,说明了记忆电压所起之作用;另外,电源阻抗 $Z_M$ 愈大,出口短路时动作愈可靠。

稳态动作特性:稳态动作特性是记忆作用消失后( $t = \infty$ 秒)继电器的动作特性。

此时由(19b)、(19c)式得到 $\dot{A} = 0$ 、 $\alpha = 0$ ,继电器的动作方程为

$$-90^\circ + \delta \leq \arg\left(\frac{Z_Z - Z_{DL}}{Z_{DL}}\right) \leq 90^\circ + \delta \quad (21)$$

作出稳态动作特性如图7中圆3所示,过坐标原点,说明了出口三相短路时继电器动作不是十分可靠的,说明了记忆电压的引入不能完全保证出口三相短路时的可靠动作。另外,频率变化时引起 $\delta$ 角的变化,从而引起特性圆的变动。

动作特性的变化规律:由前分析可见,短路发生后继电器的动作特性由起始动作特性向稳态动作特性变化,若动作特性在变化过程中,电网频率不变的话,则由(19)式

可见, 动作特性的变化由  $\alpha$  角和  $\dot{A}$  值的变化决定。

前已分析得到, 当  $t = 0 \rightarrow \infty$  秒变化时,  $\alpha = -\theta \rightarrow 0$  变化; 对于  $\dot{A}$  值, 当  $t = 0 \rightarrow \infty$  秒变化时, 由 (19b) 式得到  $\dot{A} = -Z_M \rightarrow 0$  变化, 在以时间常数  $T_i'$  衰减的同时,  $\dot{A}$  值还以滑差角速度转动。由 (19b) 式可见, 当  $\omega < \omega_0'$  时,  $A$  点沿  $AM_1O$  曲线变化; 当  $\omega > \omega_0'$  时,  $A$  点沿  $AM_2O$  曲线变化; 当  $\omega = \omega_0'$  时, 若继电器处送电侧,  $A$  点沿  $AM_3O$  曲线变化, 若继电器处受电侧,  $A$  点沿  $AM_4O$  曲线变化, 若空载运行,  $A$  点沿  $AO$  直线变化, 其变化情况如图 7 中曲线所示。

由于  $\dot{A}$  值端点变化轨迹已确定, 相应的继电器动作特性的变化也确定。图 7 中圆  $\alpha$  即为  $A$  点转动到  $M_1$  位置时继电器的动作特性。

由图 7 可见, 动作特性在变化过程中, 可能呈抛球特性, 在出口三相短路时有可能使动作了的阻抗继电器返回, 从而出现拒动的可能。这种情况, 在  $f > f_0'$  时送电侧继电器最为严重, 在  $f < f_0'$  时受电侧继电器最为严重。由此可见, 谐振记忆回路的引入, 在某些情况下并不能完全保证出口三相短路时的可靠动作, 造成的主要原因是电网频率的变化和负荷电流的影响。

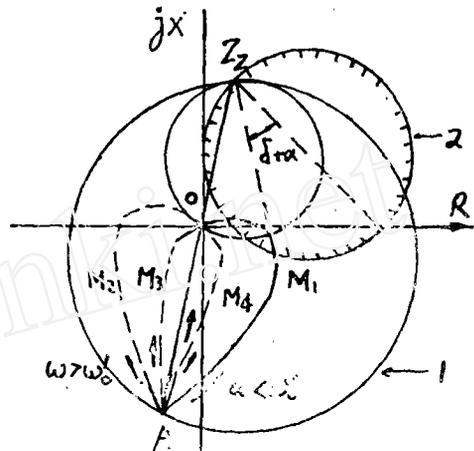


图 7 正向三相线路时动作特性  
1—起始动作特性;  
2—变化过程中动作特性;  
3—稳态动作特性

### (2) 反向短路时的情况

设在图 5 的保护反方向上  $D'$  点三相短路, 若以短路电流为阻抗正方向, 则在图 5 中与正向短路相比, 由于流经保护的电流反方向, 电抗变压器  $DKB$  二次电压  $\dot{U}_x$  相位改变  $180^\circ$ , 相当  $Z_z$  变号; 电源阻抗  $Z_M$  换以  $Z_S - Z_M$ ; 另外两侧电源应交换。考虑这些因素后, 继电器的反向动作方程为

$$-90^\circ + \delta + \alpha' \leq \arg \left( \frac{-Z_z - Z_{DL}}{Z_{DL} - \dot{A}'} \right) \leq 90^\circ + \delta + \alpha' \quad (22)$$

式中  $\alpha' = \arg \dot{K}'$ ; (22a)

$$\dot{A}' = -\frac{k_M'}{K'} (Z_S - Z_M) e^{-\frac{t}{T_i'}} e^{j[(\omega_0' - \omega)t - \theta' - \alpha']}, \quad (22b)$$

其中  $\dot{K}' = K' e^{j\alpha'} = 1 + \frac{\omega L_f}{\sqrt{3}R_b} + (k_M' e^{-j\theta'} - 1) e^{-\frac{t}{T_i'}} e^{j(\omega_0' - \omega)t} \approx 1 +$

$(k'_M e^{-j\theta'} - 1) e^{-\frac{t}{T_{i'}}} e^{j(\omega_0' - \omega)t}$ ,  $k'_M$ 为母线M上电压与对侧电源( $E_N$ )之比,  $\theta'$ 为相应落后之角度, 故 $\theta' > 0$ 时继电器处受电侧,  $\theta' < 0$ 处送电侧。

负荷电流的影响, 也是通过 $\theta'$ 角起影响的。继电器处送电侧时, 有 $\alpha' > 0$ , 与 $f < f_0'$ 时的 $\delta$ 角是正值迭加; 继电器处受电侧时, 有 $\alpha' < 0$ , 与 $f > f_0'$ 时的 $\delta$ 角是负值迭加。这两种情况下, 负荷电流的影响最为严重。

起始动作特性: 当 $t = 0$ 秒时, 有 $A' = -(Z_Z - Z_M)$ ,  $\alpha' = -\theta'$ , 动作方程由(22)式可得为

$$-90^\circ + \delta - \theta' \leq \text{arg} \left[ \frac{-Z_Z - Z_{DL}}{Z_{DL} + (Z_Z - Z_M)} \right] \leq 90^\circ + \delta - \theta' \quad (23)$$

作出起始动作特性如图8中圆1所示 [ $\overrightarrow{OA'} = -(Z_Z - Z_M)$ ]。可见动作特性不包含坐标原点, 说明了记忆电压的引入有防止反向出口三相短路误动的作用。

稳态动作特性: 当 $t = \infty$ 秒时, 有 $A' = 0$ ,  $\alpha' = 0$ , 动作方程由(22)式可得为

$$-90^\circ + \delta \leq \text{arg} \left( \frac{-Z_Z - Z_{DL}}{Z_{DL}} \right) \leq 90^\circ + \delta \quad (24)$$

作出稳态动作特性如图8中圆3所示。

动作特性变化规律: 动作特性的变化由 $\alpha'$ 角和 $A'$ 值的变化决定, 与正向三相短路情况类似。由(22b)式可见, 当 $\omega < \omega_0'$ 时,  $A'$ 点沿 $A'M_1'O$ 曲线变化; 当 $\omega > \omega_0'$ 时,  $A'$ 点沿 $A'M_2'O$ 曲线变化; 当 $\omega = \omega_0'$ 时, 若继电器处送电侧,  $A'$ 点沿 $A'M_3'O$ 曲线变化, 若继电器处受电侧,  $A'$ 点沿 $A'M_4'O$ 曲线变化, 若空载运行,  $A'$ 点沿 $A'O$ 直线变化, 变化情况如图8中曲线所示。由于 $A'$ 值变化可确定, 相应的动作特性变化也可确定。

如在图8中, 若 $\overrightarrow{OA'}$ 变化(衰减同时还转动)到 $\overrightarrow{OM_1'}$ 位置, 继电器动作特性如图2所示(以 $\overrightarrow{OM_1'}$ 、 $-Z_Z$ 端点连线为弦的圆)。

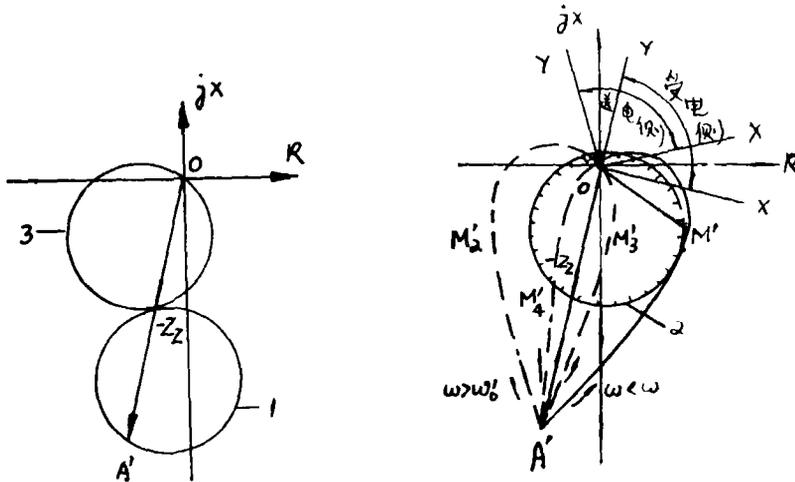


图8 反向三相线路时动作特性

1—起始动作特性; 2—变化过程中动作特性; 3—稳态动作特性

关心的是动作特性在变化过程中是否可能包含坐标原点,引起反向出口三相短路故障时的误动,图8中圆2示出了这一可能。显然这种误动作在 $f < f_0'$ 时以送电侧最为严重,在 $f > f_0'$ 时以受电侧最为严重。同样的造成可能误动作的主要原因是电网频率的变化和负荷电流的影响

需要指出,当反方向经小阻抗 $Z_{dl}$ 短路时,情况略有差别。如图5中 $D''$ 点发生三相短路,此时母线 $M$ 上的电压为

$$\dot{U}_M \approx \left( \frac{\dot{E}_M}{Z_M} + \frac{\dot{E}_N}{Z_N - Z_M} \right) Z_{DL}$$

式中  $Z_{DL}$ —短路点 $D''$ 到母线 $M$ 间之阻抗

若以短路电流为阻抗正方向,则继电器之测量阻抗为

$$Z_{CL} = \frac{\left( \frac{\dot{E}_M}{Z_M} + \frac{\dot{E}_N}{Z_N - Z_M} \right) Z_{DL}}{\frac{\dot{E}_N}{Z_N - Z_M}} = \left( 1 + \frac{\dot{E}_M}{\dot{E}_N} \cdot \frac{Z_N - Z_M}{Z_M} \right) Z_{DL}$$

可见,测量阻抗之大小与两侧电势之间相对关系、继电器安装位置有关。若继电器处送电侧,则有 $\dot{E}_M$ 超前 $\dot{E}_N$ ,当小阻抗 $Z_{DL}$ 从纯电阻变化到纯电抗时, $Z_{CL}$ 的变化范围在 $\angle XOY$ 内;若继电器处受电侧,当小阻抗 $Z_{DL}$ 从纯电阻变化到纯电抗时, $Z_{CL}$ 的变化范围在 $\angle X'OY'$ 内。由图8可见,当小阻抗接近纯电抗时(如带接地线合闸),电源 $\dot{E}_M$ 的助增作用,在误动作可能性最严重情况下,继电器的误动作要比反向出口金属性短路困难些,特别是在 $\frac{Z_N - Z_M}{Z_M}$ 比较大的时候。

由以上分析可见,不注意某些影响因素(电网频率、负荷电流),谐振记忆回路的引入并没有达到预期的作用;另外,由于 $\delta$ 角随电网频率变化,也有可能引起保护区的变化,伸长或缩短。

### 3. 两相短路时的动作特性

为使分析简化容易得到结论,不计负荷电流的影响。

(1) 正向短路时的情况

设在图5的 $D$ 点 $AB$ 相短路,此时母线 $M$ 上电压为

$$\dot{U}_{ABD} = (\dot{I}_A - \dot{I}_B) Z_{DL}, \quad \dot{U}_{CD} = \dot{E}_{CM} = j \frac{\dot{E}_{ABM}}{\sqrt{3}} = -\frac{j}{\sqrt{3}} (\dot{I}_A - \dot{I}_B) (Z_M + Z_{DL})$$

短路前母线 $M$ 上电压为

$$\dot{U}_{ABH} = \dot{E}_{ABM} = (\dot{I}_A - \dot{I}_B) (Z_M + Z_{DL})$$

将上三式代入(15)式,化简整理得到

$$-90^\circ + \delta \leq \arg \left( \frac{Z_N - Z_{DL}}{Z_{DL} - Z_M} \right) \leq 90^\circ + \delta \quad (24)$$

$$\text{式中 } \dot{B} = -\frac{\omega L_J / \sqrt{3} R_5}{1 + \omega L_J / \sqrt{3} R_5} Z_M - \frac{1}{1 + \omega L_J / \sqrt{3} R_5} Z_M e^{-\frac{t}{T_J'}} e^{j(\omega_0' - \omega)t} \quad (24a)$$

(24)式与(19)式相比,有类似的动作特性,只是 $\dot{B} \neq \dot{A}$ 。

起始动作特性:当 $t = 0$ 秒时,由(24a)式得 $\dot{B} = -Z_M$ ,代入(24)式,知动作方程如(20)式,和正向三相短路时动作特性相同,如图9中圆1所示( $\overrightarrow{OB} = -Z_M$ )。同样的,记忆电压的作用使动作特性包含坐标原点。

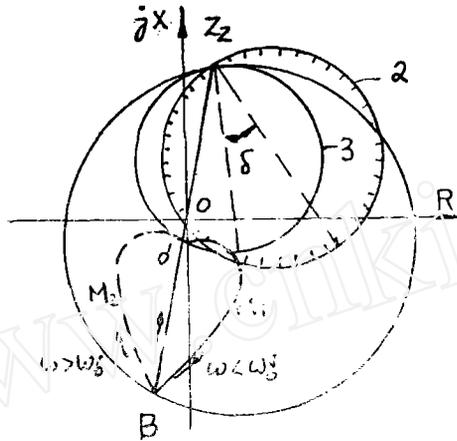


图9 正向二相短路动作特性

- 1—起始动作特性;
- 2—变化过程中动作特性;
- 3—稳态动作特性

稳态动作特性:当 $t = \infty$ 秒时,由(24a)式得 $\dot{B} = -\frac{\omega L_J / \sqrt{3} R_5}{1 + \omega L_J / \sqrt{3} R_5} Z_M \approx -\frac{\omega L_J}{\sqrt{3} R_5} Z_M$ ,代入(24)式得到动作方程为

$$-90^\circ + \delta \leq \arg \left( \frac{Z_Z - Z_{DL}}{Z_{DL} + \frac{\omega L_J}{\sqrt{3} R_5} Z_M} \right) \leq 90^\circ + \delta \quad (25)$$

作出稳态动作特性如图9中圆3所示,图中 $\overrightarrow{OO'} = -\frac{\omega L_J}{\sqrt{3} R_5} Z_M$ ,可见,稳态动作特性包含坐标原点,意味着第三相电压的引入有防止正向出口两相短路拒动的作用。

动作特性的变化规律:动作特性的变化规律由 $\dot{B}$ 值的变化确定。由(24a)式可见,当 $\omega < \omega_0'$ 时, $B$ 点沿 $BM_1O'$ 曲线变化;当 $\omega > \omega_0'$ 时, $B$ 点沿 $BM_2O'$ 曲线变化;当 $\omega = \omega_0'$ 时, $B$ 点沿 $BO'$ 直线变化,图9中示出了变化的曲线。由于 $\dot{B}$ 值变化规律确定,



由上分析可见,第三相电压的引入能有效防止正向、反向出口不对称短路时的拒动、误动,但是由于谐振记忆回路的存在,仍然有反向出口短路时误动的可能,只是较三相短路时为轻;加大第三相电压引入的分量(电阻 $R_5$ 减小),对防止反向出口不对称短路时的误动是有利的,但此时记忆回路的衰减时间常数由 $T$ 减小到 $T'$ ,也较多,将引起记忆时间的缩短。

(二)非故障相记忆的方向阻抗继电器的动作特性

1. 继电器动作条件分析

由图4(b)得到继电器以幅值比较时的动作条件为

$$|\dot{U}_K - \dot{U}_I| \geq |\dot{U}_Y - \dot{U}_K - \dot{U}_I| \quad (27)$$

根据幅值—相位比较互换条件,以比相形式写出时为

$$-90^\circ \leq \arg\left(\frac{2\dot{U}_K - \dot{U}_Y}{\dot{U}_Y - 2\dot{U}_I}\right) \leq 90^\circ \quad (28)$$

计及 $\dot{U}_Y = n_Y \dot{U}_{ABD}$ 、 $\dot{U}_I = n_I \dot{U}_{LJ}$ 、 $\dot{U}_K = \frac{1}{2}(\dot{I}_A - \dot{I}_B)Z_{ZY}$ ,代入(28)式化简可得

$$-90^\circ \leq \arg\left[\frac{(\dot{I}_A - \dot{I}_B)Z_{ZY} - n_Y \dot{U}_{ABD}}{n_Y \dot{U}_{ABD} - 2n_I \dot{U}_{LJ}}\right] \leq 90^\circ \quad (29)$$

式中  $n_Y$ 、 $n_I$ —YB、JJB电压变比;

$\frac{1}{2}Z_{ZY}$ —DKB转移阻抗。

计及(4)式,并 $\dot{U}_H = \dot{U}_{CH}$ 、 $\dot{U}_D = \dot{U}_{CD}$ , (29)式可写成

$$-90^\circ \leq \arg\left\{\frac{(\dot{I}_A - \dot{I}_B)Z_Z - \dot{U}_{ABD}}{n_Y \dot{U}_{ABD} - \frac{2n_I \omega L_J}{R_J + r} \left[ (\dot{U}_{CH} - \dot{U}_{CD}) e^{-\frac{t}{T_I}} e^{j(\omega_0 - \omega)t} + \dot{U}_{CD} \right] e^{j(90^\circ + \delta)}}\right\} \leq 90^\circ \quad (30)$$

此式即为继电器的动作条件。

2. 三相短路时的动作特性

(1)正向短路时的情况

设在图5的保护正方向D点三相短路,短路前母线M上C相电压可写为

$$\dot{U}_{CH} = k_M e^{-i\theta} \dot{E}_{CM} = k_M e^{-i\theta} \frac{j}{\sqrt{3}} \dot{E}_{ABM} = \frac{j}{\sqrt{3}} k_M e^{-i\theta} (\dot{I}_A - \dot{I}_B) (Z_M + Z_{DL})$$

再计及(16)、(17)式,并计及(19c)式,(30)式可简化为

$$-90^\circ \leq \arg\left\{ (Z_Z - Z_{DL}) / \left[ n_Y + \frac{2n_I \omega L_J}{\sqrt{3}(R_J + r)} K e^{j(\delta + \alpha)} \right] Z_{DL} + \frac{2n_I \omega L_J}{\sqrt{3}(R_J + r)} k_M Z_M e^{-\frac{t}{T_I}} e^{j[(\omega_0 - \omega)t + \delta - \theta]} \right\} \leq 90^\circ \quad (31)$$

$$\text{令 } n_Y + \frac{2n_J \omega L_J}{\sqrt{3}(R_J+r)} \cdot K e^{j(\delta+\alpha)} = K_X e^{j\delta'}$$

$$\text{则有 } K_X = \sqrt{\left[ n_Y + \frac{2n_J \omega L_J}{\sqrt{3}(R_J+r)} \cdot K \cos(\delta+\alpha) \right]^2 + \left[ \frac{2n_J \omega L_J}{\sqrt{3}(R_J+r)} \cdot K \sin(\delta+\alpha) \right]^2} \quad (32)$$

$$\delta' = \arctg \left( \frac{\sin(\delta+\alpha)}{\cos(\delta+\alpha) + \frac{\sqrt{3}(R_J+r)}{2n_J \omega L_J} \cdot \frac{n_Y}{K}} \right) \quad (33)$$

由此, (31) 式可写成

$$-90^\circ + \delta' \leq \arg \left( \frac{Z_Z - Z_{DL}}{Z_{DL} - \dot{C}} \right) \leq 90^\circ + \delta' \quad (34)$$

$$\text{式中 } \dot{C} = -\frac{2n_J \omega L_J}{\sqrt{3}(R_J+r)} \cdot \frac{k_M}{K_X} Z_M e^{-\frac{t}{T_J}} e^{j[(\omega_0 - \omega)t + \delta - \theta - \delta']} \quad (34a)$$

(34) 式与 (19) 式相比, 有类似的形式, 可知两种记忆方式的继电器性质是类似的 (三相短路)。所不同的是:

\* 起始动作特性要小, 且与整定变压器变比  $n_Y$  有关,  $n_Y$  增大, 动作特性缩小。由 (32) 式可见,  $\frac{2n_J \omega L_J}{\sqrt{3}(R_J+r)} < K_X$ , 另外  $t = 0$  秒时, 由 (19c) 式得  $K = k_M < 1$ 。根据 (34a)、(19b) 式得到关系

$$\left| \frac{\dot{C}}{\dot{A}} \right|_{t=0 \text{ 秒}} = \frac{2n_J \omega L_J}{\sqrt{3}(R_J+r)} \cdot \frac{K}{K_X} < 1$$

故 (34) 式表示的动作特性小于 (19) 式表示的动作特性。又当  $n_Y$  增加时,  $K_X$  相应增大, 从而使  $|\dot{C}|$  值减小, 相应动作特性要缩小。图 11 示出了两种接线起始动作特性的比较, 图中  $\dot{C}$  值超前  $-Z_M$  ( $\dot{A}$  值) 的角度为  $(\delta - \theta - \delta')$ 。由此可见, 当正向出口三相短路时, 图 4(a) 接线要比图 4(b) 接线动作灵敏度高。

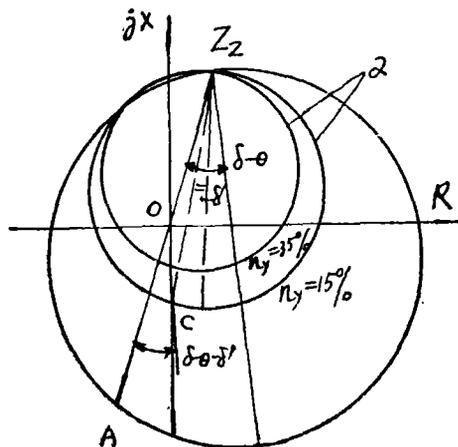


图 11 起始动作特性的比较

- 1—故障相记忆;
- 2—非故障相记忆

※在同样电网频率变化时,动作特性变动小。由(33)式可见,  $\delta' < \delta + \alpha$ , 即动作特性变动小, 且  $n_Y$  增大时  $\delta'$  更小。

※负荷电流是通过  $K$  值和  $\alpha$  角对动作特性起影响的, 因继电器的  $\frac{2n_Y \omega L_J}{\sqrt{3}(R_J+r)}$  值较小 ( $>10\%$ ), 由(32)、(33)式可见, 在  $n_Y$  不是太小时, 负荷电流对  $K_X$ 、 $\delta'$  影响不大, 由此对动作特性的影响也是不大的。当不计负荷电流时, 有  $K = 1, \alpha = 0^\circ$ 。(32)、(33)式改写为

$$K_X = \sqrt{\left[ n_Y + \frac{2n_Y \omega L_J}{\sqrt{3}(R_J+r)} \cos\delta \right]^2 + \left[ \frac{2n_Y \omega L_J}{\sqrt{3}(R_J+r)} \sin\delta \right]^2} \quad (35)$$

$$\delta' = \arctg \left( \frac{\sin\delta}{\cos\delta + \frac{\sqrt{3}(R_J+r)}{2n_Y \omega L_J} \cdot n_Y} \right) \quad (36)$$

(2) 反向短路时的情况

在图5的保护反方向上  $D'$  点三相短路时, 动作方程由(34)式可得为

$$-90^\circ + \delta'' \leq \arg \left( \frac{-Z_Z - Z_{DL}}{Z_{DL} - \dot{C}'} \right) \leq 90^\circ + \delta'' \quad (37)$$

$$\text{式中 } \dot{C}' = -\frac{2n_Y \omega L_J}{\sqrt{3}(R_J+r)} \cdot \frac{k_M'}{K_X'} (Z_Z - Z_M) e^{-\frac{t}{T_i}} e^{j[(\omega_0 - \omega)t + \delta - \theta - \delta'']} \quad (37a)$$

其中  $K_X'$ 、 $\delta''$  是相应于  $K'$ 、 $\alpha'$  时之数值 [见(32)、(33)式]。

比较(22)和(37)式, 有类似的动作特性。

因  $K_X'$  与  $n_Y$  有关, 故  $|\dot{C}'|$  值与  $n_Y$  有关,  $n_Y$  愈大,  $|\dot{C}'|$  值愈小。图12示出了不同  $n_Y$  值下的反向三相短路时的起始动作特性。同样的, 在动态变化过程中, 动作特性可能包含坐标原点, 情况和图4(a)接线类似。

### 3. 两相短路时的动作特性

在这种情况下, 因非故障相电压不变, 故记忆回路中不会产生过渡过程, 所以故障相继电器动作特性不随时间而变化。由于第三相电压的作用, 正向短路时的动作特性包含坐标原点, 如图11中圆2所示, 反向短路时的动作特性呈抛球特性, 如图12中之圆所示。

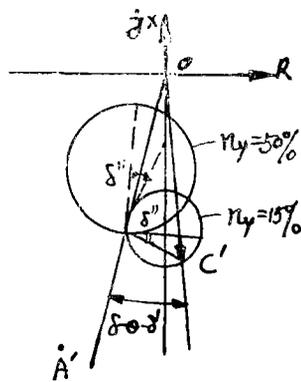


图12 不同  $n_Y$  值下反向三相短路时的起始动作特性

### (三) 小结

通过以上对图4两种典型极化回路方向阻抗继电器特性的分析, 其共同特点可归纳如下:

1. 虽然继电器具有谐振记忆回路, 但是由于电网频率变化和负荷电流影响, 仍然具有正向出口三相短路时拒动的可能。这种情况以  $f > f_0$  时送电侧继电器,  $f < f_0$  时受

电侧继电器最为严重。

2. 同样由于电网频率变化和负荷电流的影响,反向出口三相短路时有误动作的可能。这种情况以  $f < f_0$  时送电侧继电器、 $f > f_0$  时受电侧继电器最为严重。

3. 很小的健全相电压分量的引入,在正、反向出口不对称短路时,对防止继电器拒动、误动是有效的。但在三相短路时,这一措施是无效的。

4. 谐振记忆回路的存在,对消除正向动作死区、防止反向误动是有利的。但是因谐振记忆回路在电压突变时过渡过程的存在,使动作特性发生变化,从而可能出现正向拒动、反向误动两点不利因素。如何发挥有利因素,消除不利因素,主要取决于谐振记忆回路的正确调试和继电器某些参数的正确选择。

5. 考虑到电网频率的变化,动作特性要发生变动,从而可能引起保护区的变化,但是动作特性始终过  $Z_2$  端点,因此,要使保护区基本不变,继电器的整定阻抗角和线路阻抗角相等是必要条件;另外,在  $f < f_0$  ( $\delta > 0$ ) 时,继电器反应过渡电阻的能力增加,反之为减小。

6. 正向短路时的动作特性虽然包含坐标原点,但没有实际的反向动作区,仅说明正向出口短路时动作可靠的程度,因在反向短路时这部分区域已不再存在,由相应的反向动作特性代替,故有实用意义的正向动作特性是第一、四象限部分。

### 三、影响继电器动作性能的因素分析

通过以上对继电器动作特性的分析,可知影响继电器正、反向出口三相短路不正确动作的因素,就电网方面来说是频率的变化和负荷电流的影响,就继电器方面来说,与谐振记忆回路的振荡频率  $f_0$ 、衰减时间常数  $T_1$ 、以及继电器极化回路的最小动作电压  $U_{1,zx}$  等有关。显然,当电网频率保持不变时,  $f_0$  的调整与电网频率相等是理想的,当电网频率变化时,应考虑频率高值、低值的影响,  $f_0$  的调整取中间数值是合适的。

#### (一)正向出口三相短路拒动可能性分析

在这种情况下,记忆电压在衰减的动态变化过程中继电器为一方向继电器。动作了的继电器出现返回的一种情况是由于滑差 ( $\omega \neq \omega_0$ ) 的存在,使  $\dot{U}_Y$  ( $-\dot{U}_Y$ ) 发生转动,进入继电器的制动区而出现返回,这构成了相位条件;另一种情况是记忆电压由起始值  $\dot{U}_{Y0}$  ( $-\dot{U}_{Y0}$ ) 逐渐衰减,当衰减到最小返回电压  $U_{Y,zx}$  (返回) 时,继电器开始返回,这构成了幅值条件。

##### 1. 相位条件

因出口三相短路,可认为  $U_Y = 0$ , 由 (13)、(28) 式可见,在图 4(a)、(b) 接线中,  $\dot{U}_Y$ 、( $-\dot{U}_Y$ ) 与  $\dot{U}_K$  的夹角超过  $\pm 90^\circ$  范围时,继电器开始返回。图 13 示出了  $f < f_0$  时受电侧继电器的向量关系,直线  $\overline{OO'}$  带阴影线一侧为  $\dot{U}_Y$ 、( $-\dot{U}_Y$ ) 的动作区。

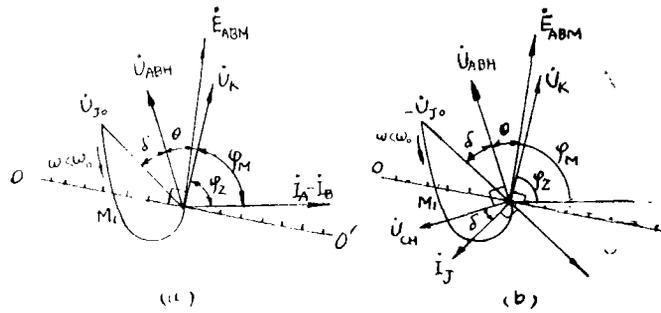


图13  $f < f_0$  时受电侧继电器正向出口三相短路时的向量关系

(a) 图 4(a) 接线; (b) 图 4(b) 接线

由图可得, 若不计继电器的返回时间, 按相位条件求得进入拒动区的时间(短路开始到继电器返回这段时间)为

$$t_{\text{相位}} = \frac{90^\circ - (\varphi_M - \varphi_Z) - |\theta| - \delta}{\omega_0 - \omega}$$

计及(11)式, 可写成

$$t_{\text{相位}} = \frac{90^\circ - (\varphi_M - \varphi_Z) - |\theta| - \delta_0 - T}{360(f_0 - f)}; \quad (f < f_0 \text{ 受电侧}) \quad (38)$$

类似地, 求得  $f > f_0$  送电侧继电器在正向出口三相短路时进入拒动区的时间为

$$t_{\text{相位}} = \frac{90^\circ + (\varphi_M - \varphi_Z) - \theta + \delta_0 - T}{360(f - f_0)}; \quad (f > f_0 \text{ 送电侧}) \quad (39)$$

就继电器的动作特性来说, 自短路发生后, 经(38)、(39)式所确定的时间, 动作特性正好变为经过座标原点的圆, 而后动作特性偏离座标原点呈抛球特性, 出现拒动可能。需要指出, (38)、(39)式所确定的时间, 也可由(19)、(34)式求得。由(38)(39)式可见, 决定  $t_{\text{相位}}$  大小的主要是  $\Delta f$ , 其次是  $\theta$ 、 $T$  值, 当  $\Delta f$  增大时,  $t_{\text{相位}}$  减小, 滑入拒动区时间快, 反之滑入拒动区时间为慢; 负荷电流的加大, 相应  $\theta$  角增大, 使  $t_{\text{相位}}$  减小(严重工况下,  $\theta$  角和  $\delta$  角是正值或负值迭加), 容易滑入拒动区;  $T$  减小使  $t_{\text{相位}}$  增大, 滑入拒动区时间相应加长, 反之滑入拒动区时间缩短。

## 2. 幅值条件

由(4)、(5)式, 得到出口三相短路时插入电压的衰减表示式( $\dot{U}_D = 0$ ,  $\dot{U}_X = 0$ ,  $\dot{U}_H \propto \dot{U}_{J_0}$ )为

$$U_I = U_{J_0} e^{-\frac{t}{T_i}}$$

不论  $\dot{U}_I$  处在动作区还是拒动区, 当  $U_I = U_{I.ZX}$  (返回) 时, 继电器返回, 故有

$$t_{\text{幅值}} = T_i \ln \frac{U_{J_0}}{U_{I.ZX} \text{ (返回)}} \quad (40)$$

即经过  $t_{\text{幅值}}$  时间，动作了的继电器返回。

### 3. 相位条件和幅值条件之间关系

显然， $t_{\text{相位}}$  和  $t_{\text{幅值}}$  之间，小者成为限制继电器“记忆时间”的条件，以下分析比较之。

对图 4(a) 接线，若  $T_i = 20\text{ms}$ ，取  $\varphi_M - \varphi_Z = 5^\circ$ ， $\theta = 20^\circ$ ， $\delta_0 = 4.8^\circ$  则当  $f_0 - f = 2$  赫时，按相位条件滑入拒动区的时间由(38)式得到为

$$t_{\text{相位}} = \frac{90^\circ - 5^\circ - 20^\circ - 4.8^\circ}{360 \times 2} \times 20 = 63\text{ms}$$

如  $U_{r0} = 37.5\text{V}$ ， $U_{rZK} = 0.8\text{V}$ ，计及返回系数约为 0.5，按幅值条件继电器返回所需时间由(40)式求得为

$$t_{\text{幅值}} = 20 \ln \frac{37.5}{0.5 \times 0.8} = 90\text{ms}$$

对图 4(b) 接线，若  $T_i = 25\text{ms}$ ，取  $\varphi_M - \varphi_Z = 5^\circ$ ， $\theta = 20^\circ$ ， $\delta_0 = 3.6^\circ$ ，则当  $f_0 - f = 2$  赫时，由(38)式可得为

$$t_{\text{相位}} = \frac{90^\circ - 5^\circ - 20^\circ - 3.6^\circ}{360 \times 2} \times 25 = 60\text{ms}$$

如  $U_{r0} = 3\text{V}$ ， $U_{rZK} = 0.2\text{V}$ ，计及返回系数约为 0.8，按幅值条件继电器返回所需时间由(40)式求得为

$$t_{\text{幅值}} = 25 \ln \frac{3}{0.2 \times 0.8} = 73\text{ms}$$

由此可见，在正向出口三相短路时，若  $f$  与  $f_0$  差两赫，则继电器“记忆时间”主要由相位条件决定，因此减小极化回路的最小动作电压，在实际运行中并不能使“记忆时间”增长；另外，当频率变化不大时，增大  $T_i$  可提高保护正向动作的可靠性和增大反应过渡电阻的能力，但是考虑电网频率变化和负荷电流的影响，由(38)(39)式可见，只有适当减小  $T_i$ ，才对提高保护正方向出口三相短路时动作可靠性有利；为使保护可靠动作， $t_{\text{相位}}$  应大于整组保护出口动作时间，以保证在滑入拒动区之前，出口继电器已动作；此外，记忆回路接于非故障相（弱记忆）的接线方式，并不能提高正向出口三相短路时动作的可靠性。

#### (二) 反向出口三相短路误动可能性分析

在这种情况下，动作特性在变化过程中要出现包含坐标原点的情况，在变化过程中继电器实际上是一只方向继电器，记忆电压将从制动区以滑差角速度（ $f \neq f_0$ ）向动作区转动，从而造成误动作可能；另一方面，若记忆电压滑入误动区时已衰减到极化回路最小动作电压以下时，就能避免上述的误动作现象。

因在这种情况下流经保护的电流与正方向短路时相比有  $180^\circ$  的相位差，故电压  $\dot{U}_x$  相位改变  $180^\circ$ ，作出  $f < f_0$  时送电侧继电器的向量关系如图 14 所示，直线  $\overline{OO'}$  带阴影线一侧为动作区。由图可得， $\dot{U}_{r0}$ 、 $(-\dot{U}_{r0})$  滑入动作区的时间为

$$t'_{\text{相位}} = \frac{90^\circ - (\varphi_M' - \varphi_Z) - |\theta'| - \delta_0}{360(f - f_0)} - T_j \quad (f < f_0 \text{ 送电侧}) \quad (41)$$

类似的, 求得  $f > f_0$  时受电侧继电器反向出口三相短路时,  $\dot{U}_{J_0}$ 、 $(-\dot{U}_{J_0})$  滑入动作区的时间为

$$t'_{\text{相位}} = \frac{90^\circ + (\varphi_M' - \varphi_Z) - \theta' + \delta_0}{360(f - f_0)} - T_j \quad (f > f_0 \text{ 受电侧}) \quad (42)$$

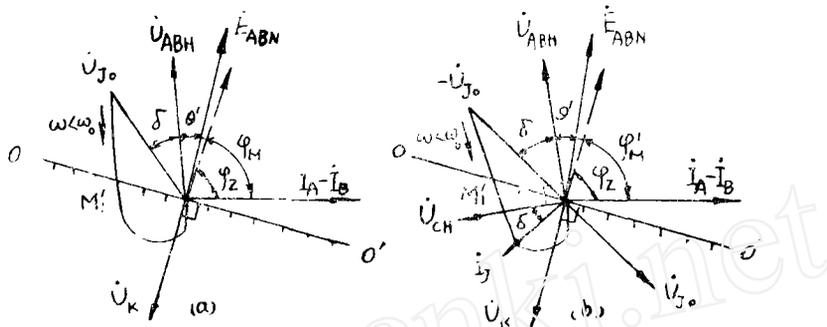


图14  $f < f_0$  送电侧继电器反向出口三相短路时的向量关系

(a) 图 1(a) 接线; (b) 图 1(b) 接线

可见, 滑入动作区的时间与  $\Delta f$ 、 $\theta'$ 、 $T_j$  因素有关。同样的, 就继电器的动作特性来说, 自短路发生后, 经(41)(42)式所确定的时间, 动作特性由偏离坐标原点的起始动作特性变为经过坐标原点的圆, 而后动作特性可能包含坐标原点, 出现误动可能。需要指出, (41)、(42)式所确定的时间也可由(22)、(37)式求得。

另一方面, 记忆电压在滑入误动作区的同时在衰减, 其衰减到极化回路最小动作电压的时间由(4)、(5)式得到为

$$t'_{\text{幅值}} = T_j \ln \frac{U_{J_0}}{U_{J.ZX}} \quad (43)$$

显然, 若  $t'_{\text{幅值}} < t'_{\text{相位}}$  时, 则就可避免反向出口三相短路时的误动作; 若  $t'_{\text{幅值}} \geq t'_{\text{相位}}$  时, 则就有误动作的危险。仍然以前述参数计算之, 只是  $\varphi_M' - \varphi_Z = 0^\circ$ , 对图 4(a) 接线, 有

$$t'_{\text{相位}} = \frac{90^\circ - 0^\circ - 20^\circ - 4.8^\circ}{360 \times 2} - 20 = 70 \text{ms}$$

$$t'_{\text{幅值}} = 20 \ln \frac{37.5}{0.8} = 77 \text{ms}$$

对图 4(b) 接线, 有

$$t'_{\text{相位}} = \frac{90^\circ - 0^\circ - 20^\circ - 3.6^\circ}{360 \times 2} - 25 = 67 \text{ms}$$

$$t'_{\text{幅值}} = 25 \ln \frac{3}{0.2} = 68 \text{ms}$$

由此可见,在上述数据情况下,  $t'_{\text{相位}} \approx t'_{\text{幅值}}$ 。因此,为了防止反向出口三相短路时的误动作,除合理整定 $f_0$ 值以外,适当提高极化回路最小动作电压和适当减小 $T_j$ 是可取的措施。

### (三)保护区变化的可能性分析

由于谐振记忆回路的存在,使继电器的动作特性自短路发生后随时间而变动,从而有可能引起保护区的变化。由前述动作特性分析可见,即使是稳态动作特性,当 $\phi_{XL}$ (被保护线路阻抗角)小于 $\varphi_Z$ (整定阻抗角)时,则频率下降时保护区伸长,频率上升时保护区缩短;当 $\varphi_{XL}$ 大于 $\varphi_Z$ 时,则频率下降时保护区缩短,频率上升时保护区伸长。这种情况,动作特性在动态变化过程中还要严重,特别是图4(a)接线的方向阻抗继电器。但是,动作特性在变化过程中,始终过整定阻抗 $Z_Z$ 端点,因此只要使 $\varphi_Z = \varphi_{XL}$ ,就可保证保护区不变。顺便指出,频率下降时,继电器反应过渡电阻的能力增加,特别是图4(a)接线的方向阻抗继电器。

### (四)小结

通过以上分析,可归纳如下:

1. 在计及电网频率变化和短路前的负荷电流后,记忆回路的振荡频率 $f_0$ 的数值是引起正向、反向出口三相短路时拒动、误动的重要因素。因此, $f_0$ 调整偏高或偏低是不适当的,应根据电网频率实际变化范围取中间值是合理的,如 $f = 47 \sim 50$ 赫变化, $f_0$ 选取48.5赫是恰当的。当然,电网频率稳定在额定值50赫运行时, $f_0$ 应调整在此额定频率上。

2. 如电网频率稳定运行,则增大时间常数 $T_j$ ,有利于正向出口三相短路时动作可靠性的提高和防止反向出口三相短路时的误动作。但是,在计及电网频率变化和短路前的负荷电流时,却是适当减小 $T_j$ ,才能使 $t'_{\text{相位}}$ 增大 $t'_{\text{幅值}}$ 减小,从而有利于提高正向出口三相短路时动作的可靠性和防止反向出口三相短路时的误动作。

3. 适当提高极化回路的最小动作电压,有利于防止反向出口三相短路时的误动作,因而这一措施是可取的,且在一般情况下并不影响正向短路时“记忆时间”的缩短,因为在此情况下,影响“记忆时间”长短的是相位条件。由此,将极化回路最小动作电压做得过小,并无多大的实际意义。

4. 虽然增大记忆回路的记忆时间,可提高正向出口三相短路时的动作可靠性,但同时也增加了反向出口三相短路误动的可能性,因此,过长的“记忆时间”并不合适,一般取50~70毫秒即可

5. 为使保护区长度保持不变,首要条件是继电器的整定阻抗角和线路阻抗角相等,然后在此阻抗角方向上整定所需阻抗值。应注意到阻抗角和阻抗值均随频率而变化,但因线路阻抗角和整定阻抗角在通常电网频率变化范围内变化甚小,故可不计及频率变化的影响,即在试验工频条件下,整定给定的线路阻抗角即可。而阻抗值应按试验时的频率值进行校正,分析得到线路阻抗、整定阻抗随频率变化的关系为

$$Z_{(f)} = \left( 1 + \frac{f-f_e}{f_e} \sin^2 \varphi \right) \times Z_{(f_e)} = k_z Z_{(f_e)} \quad (44)$$

式中  $f_e$ —电网额定频率值；  
 $f$ —继电器调整试验时的电网频率值；  
 $\varphi$ —阻抗角（线路阻抗、整定阻抗之阻抗角）；  
 $Z_{(f_e)}$ —频率为  $f_e$  时的给定阻抗值；  
 $Z_{(f)}$ —频率为  $f$  时的阻抗值；

$$k_z \text{—整定阻抗的修正系数, } k_z = 1 + \frac{f-f_e}{f_e} \sin^2 \varphi。$$

可见，阻抗值整定时应根据试验时的电网频率按（44）式进行校正，这样就可保证保护区基本不变。

6. 图4(a)、图4(b)接线的继电器有如下特点：正、反向出口三相短路时，继电器的拒动和误动情况是类似的，和记忆回路接于故障相或是非故障相无关系，而与记忆回路的  $Q$  值有关， $Q$  值愈高，拒动、误动可能性增大；当电网频率变化时，图4(b)接线的继电器动作特性变动较小，这是图4(b)接线的优点之一，但是只要合理整定继电器的阻抗角和在此方向上的阻抗值，图4(a)接线继电器受频率变化相对较为敏感的缺点并不会引起保护区的变化；图4(b)接线的继电器记忆回路接于非故障相，因而不对称短路时继电器的动作特性基本不变化，而图4(a)接线继电器动作特性仍然要发生变化，理论上在反向出口不对称短路时有误动可能性（引入不大的健全相电压分量可防止误动），但这种情况没有三相短路时严重；图4(a)接线的继电器起始动作特性要比图4(b)接线的大得多（正向动作特性），因而在出口三相短路时，图4(a)接线比图4(b)接线的继电器理论上动作要可靠。因此，就图4的两种接线比较起来，若执行元件灵敏度较高（如晶体管触发电路）采用图4(b)接线较好，若执行元件灵敏度不是很高（如极化继电器），则采用图4(a)接线较为合适。

#### 四、继电器的整定方法讨论

根据对继电器的动作特性分析，为保证继电器应有的性能，记忆回路的  $f_0$  值、阻抗整定值（幅角和大小）的合理调整是重要的，以下说明之。

##### （一）记忆回路串谐频率 $f_0$ 的调整

当电网频率保持不变时， $f_0$  值即为运行频率；当电网频率在一定范围内变化时， $f_0$  值应取中间值。根据（7）式，有

$$f_0 = f - \frac{\delta - \delta_0}{d\delta/df} \quad (45)$$

因此，调整的方法为：

1. 先测量谐振回路的  $Q$  值，并根据（6）、（9）式求出  $\delta_0$ 、 $\frac{d\delta}{df}$ ；
2. 在试验电源频率  $f$  下测出  $\delta$  角；
3. 将  $f$ 、 $\delta$ 、 $\frac{d\delta}{df}$  代入（45）式，求出  $f_0$  值，如果不满足要求，可改变  $L$ ，电感抽头

或在 $C_1$ 上增并小电容(耐压要足够)直到 $f_0$ 值满足要求为止。

在调整过程中,需要注意的是 $L_1$ 的非线性关系,使 $\delta$ 角随 $L_1$ 上电压而变化,为此应对 $L_1$ 进行补偿,使 $\delta$ 角符合线性度的要求( $L_1$ 饱和或 $L_1$ 上电压过小处磁化曲线根部,均使 $L_1$ 减小,导致 $\delta$ 角增大),整定时采用线性区的 $\delta$ 角。

另外,在作试验时,应考虑送电角的影响。在测定正向出口三相短路时的记忆时间时,应在频率为最低、电流滞后电压角度为 $\varphi_M + |\theta|$ 时进行或在频率最高、电流滞后电压角度为 $\varphi_M - |\theta|$ 时进行(第三相电压应接入);在作反向出口误动性试验时,应在频率最低、电流滞后电压角度为 $180^\circ + \varphi_M' + |\theta'|$ 时进行或在频率最高、电流滞后电压角度为 $180^\circ + \varphi_M' - |\theta'|$ 时进行(第三相电压应接入)。其他情况下做试验,并不是最严重情况。

## (二) 阻抗值的整定

1. 阻抗角的整定:为保证整定阻抗角和被保护线路阻抗角相等,方法之一是采用相位电压表进行,测定电抗变压器二次空载电压与一次电流间的相位角,调整灵敏角调节电阻,使之和线路阻抗角相等;方法二是在工作回路通入额定电流及大小、相位可变的电压,调整灵敏角调节电阻,使电抗变压器和整定变压器二次的总电压,在输入电压、电流间为给定的线路阻抗角下,有接近为零的最小值;方法之三是强迫插入电压和工作电压同相或是将记忆回路解除,这样继电器的动作特性不随频率而变动,直径在整定阻抗角方向上,因此对图4(a)接线的继电器,不加第三相电压并将 $C_1$ 、 $L_1$ 短接,对图4(b)接线的继电器,不加第三相电压并将 $YB$ 一次绕组短接,在这种情况下,调整灵敏角调节电阻,使最大灵敏角等于线路阻抗角。

2. 在整定阻抗角方向上整定所需阻抗值:首先将给定阻抗值( $f_0$ 下之值)根据(44)式折算到试验频率下的阻抗值,然后在整定阻抗角方向上使继电器的动作阻抗和折算后之阻抗值相等。

继电器的其他调整项目按常规方法进行。上述的调整方法保证了继电器应有的性能。

1979.5.

## 主要参考资料

1. L.M.wedelpol: 《polarised mho distanc relay》  
—P.I.E.E 1965.NO.3(南京电力学校技术资料第一期译文)
2. 洪佩荪: 《方向阻抗元件在背后径小阻抗发生短路时工作状态的分析》  
—南京电力学校技术资料第七期
3. 东北电业管理局: 《东北220千伏系统距离保护的运行分析和改进》
4. 林至达: 《JJ—11A型保护装置中阻抗元件受电网频率影响的讨论》  
—电力系统自动化 1977.4
5. 南京水利电力仪表厂: 《 $\begin{matrix} J & J-11A \\ J & J-12 \end{matrix}$ 型晶体管距离保护装置说明书》