

整流型方向距离继电器极化电压暂态行为分析

吉林省电力勘测设计院 王野雷

目前一般在整流型方向距离继电器极化回路中都通过电阻引入一个辅助极化电压，其目的是改善继电器在电力系统某些故障情况下的动作行为，但同时也使继电器在某些情况下的动作行为分析变得很复杂。本文试图根据叠加原理以电压相量图分别对整流型方向距离继电器极化回路中的主极化电压和辅助极化电压在系统故障后的暂态变化过程作一分析，以利能更好地运用电压相量图法分析方向距离继电器的动作行为。

一、整流型方向距离继电器极化电压的暂态过程行为分析

整流型方向距离继电器极化回路是谐振回路，如图 1 所示，其中 \dot{V}_1 为主极化引入电压， \dot{V}_2 为辅助极化引入电压， \dot{V}_1 与 \dot{V}_2 共同作用在电阻 r 上产生极化电压 \dot{V}_J 。

在进行一般分析时，认为极化回路中元件 L 、 C 、 r 、 R 在系统故障前后皆保持线性，因此可以认为极化回路也是线性的，可以根据叠加原理，认为极化电压 \dot{V}_J 是下面两种情况下叠加的结果：

(1)、 $\dot{V}_2 = 0$ ，在 \dot{V}_1 单独作用下产生 \dot{V}_{J1} ；

(2)、 $\dot{V}_1 = 0$ ，在 \dot{V}_2 单独作用下产生 \dot{V}_{J2} ；

即有 $\dot{V}_J = \dot{V}_{J1} + \dot{V}_{J2}$ 成立；

可用图 2 表示叠加过程。

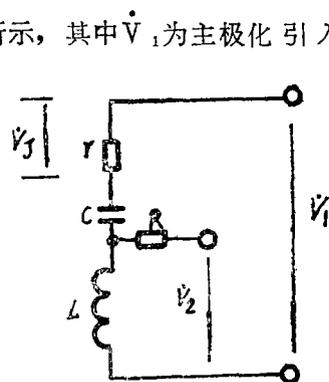


图 1

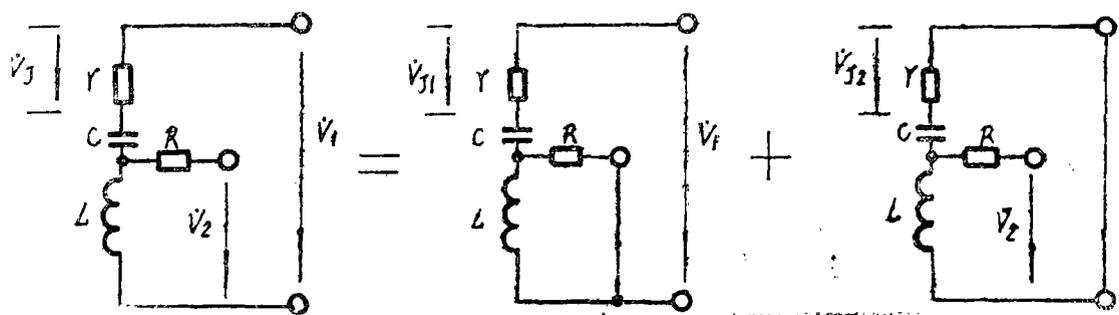


图 2

为分析方便，作如下假设：

在系统正常运行情况下主极化引入电压与辅助极化引入电压表示式为 $\dot{V}_{1N} = Ve^{j\theta}$ ，
 $\dot{V}_{2N} = Ve^{j(\theta+\delta)}$ ，在系统故障后稳态情况下主极化引入电压与辅助极化引入电
 压表示式为 $\dot{V}_{1\infty} = mVe^{j(\theta+\beta)}$ ， $\dot{V}_{2\infty} = nVe^{j(\theta+\delta+\delta')}$ 。

θ ：系统正常运行时主极化引入电压初相角。

α ：系统正常运行时辅助极化引入电压与主极化引入电压相角差。

β ：系统故障前后主极化引入电压相位变化角。

δ ：系统故障前后辅助极化引入电压相位变化角。

β 与 δ 和故障类型、故障点、短路点弧光电阻及系统正常运行时线路输送的功率有关。

β 与 δ 可正可负。

m ：系统故障后主极化引入电压残压水平。

n ：系统故障后辅助极化引入电压残压水平。

下面分别对 \dot{V}_1 与 \dot{V}_2 单独作用于极化回路进行分析。

1、主极化电压暂态行为分析

$\dot{V}_2 = 0$ ， \dot{V}_1 单独作用于极化回路，如

图 3。

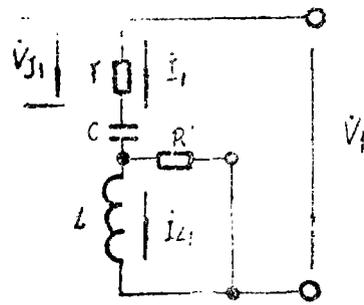


图 3

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{\dot{V}_1}{r + \frac{1}{j\omega C} + R // j\omega L} = \frac{\dot{V}_1}{r + \frac{R(\omega L)^2}{R^2 + (\omega L)^2} + j\left[\frac{R^2\omega L}{R^2 + (\omega L)^2} - \frac{1}{\omega C}\right]} \\ &= \frac{\dot{V}_1}{Z_1 e^{-j\varphi_1}} = \frac{\dot{V}_1}{Z_1} e^{j\varphi_1} \end{aligned} \quad (1-1)$$

其中 $Z_1 = \sqrt{\left[r + \frac{R(\omega L)^2}{R^2 + (\omega L)^2}\right]^2 + \left[\frac{R^2\omega L}{R^2 + (\omega L)^2} - \frac{1}{\omega C}\right]^2}$

$$\varphi_1 = \arctg \frac{\frac{1}{\omega C} - \frac{R^2\omega L}{R^2 + (\omega L)^2}}{r + \frac{R(\omega L)^2}{R^2 + (\omega L)^2}}$$

因此有

$$\dot{V}_{r1} = \dot{I}_1 r = \frac{r}{Z_1} \dot{V}_1 e^{j\varphi_1} \quad (1-2)$$

$$\dot{V}_{C1} = \dot{I}_1 \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{\omega CZ_1} \dot{V}_1 e^{j(\varphi_1 - 90^\circ)} \quad (1-3)$$

$$R \dot{I}_{L1} = (R + r) \dot{I}_1 + \dot{V}_{C1} - \dot{V}_1 = \frac{R+r}{Z_1} \dot{V}_1 e^{j\varphi_1} + \frac{1}{\omega CZ_1} \dot{V}_1 e^{j(\varphi_1 - 90^\circ)} - \dot{V}_1 \quad (1-4)$$

系统正常运行时有 $\dot{V}_{1H} = V e^{j\theta}$

$$\text{则有 } \dot{V}_{J1H} = \frac{r}{Z_1} \dot{V}_{1H} e^{j\varphi_1} = \frac{r}{Z_1} V e^{j(\theta+\varphi_1)} \quad (1-5)$$

$$\dot{V}_{C1H} = \frac{1}{\omega C Z_1} V e^{j(\theta+\varphi_1-90^\circ)} \quad (1-6)$$

$$R \dot{I}_{L1H} = \frac{R+r}{Z_1} V e^{j(\theta+\varphi_1)} + \frac{1}{\omega C Z_1} V e^{j(\theta+\varphi_1-90^\circ)} - V e^{j\theta} \quad (1-7)$$

由(1-5)式可见系统正常运行时 \dot{V}_{J1H} 的幅值小于 \dot{V}_{1H} , \dot{V}_{J1H} 的相位与 \dot{V}_{1H} 相差 φ_1 。一般情况下 φ_1 值很小。

系统故障后稳态时有 $\dot{V}_{1K\infty} = m V e^{j(\theta+\beta)}$

$$\text{则有 } \dot{V}_{J1K\infty} = \frac{r}{Z_1} \dot{V}_{1K\infty} e^{j\varphi_1} = \frac{r}{Z_1} m V e^{j(\theta+\beta+\varphi_1)} \quad (1-8)$$

$$\dot{V}_{C1K\infty} = \frac{1}{\omega C Z_1} m V e^{j(\theta+\beta+\varphi_1-90^\circ)} \quad (1-9)$$

$$R \dot{I}_{L1K\infty} = \frac{R+r}{Z_1} m V e^{j(\theta+\beta+\varphi_1)} + \frac{1}{\omega C Z_1} m V e^{j(\theta+\beta+\varphi_1-90^\circ)} - m V e^{j(\theta+\beta)} \quad (1-10)$$

由(1-8)式可见,系统故障后稳态时 $\dot{V}_{J1K\infty}$ 的相位仍与 $\dot{V}_{1K\infty}$ 相差 φ_1 角。

由图(3)可写出此种情况极化回路的状态方程为:

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{RrC+L}{LC(R+r)} \cdot \frac{du_c}{dt} + \frac{R}{LC(R+r)} u_c = \frac{1}{c(R+r)} \cdot \frac{du_1}{dt} + \frac{R}{LC(R+r)} u_1 \quad (1-11)$$

此微分方程的特征方程为:

$$S^2 + \frac{RrC+L}{LC(R+r)} S + \frac{R}{LC(R+r)} = 0 \quad (1-12)$$

特征解为

$$S_{1,2} = -\frac{RrC+L}{2LC(R+r)} \pm \sqrt{\left[\frac{RrC+L}{2LC(R+r)}\right]^2 - \frac{R}{LC(R+r)}}$$

$$\text{令 } \frac{1}{T} = \frac{RrC+L}{2LC(R+r)}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{R}{LC(R+r)}}$$

$$\text{则有 } S_{1,2} = -\frac{1}{T} \pm \sqrt{\frac{1}{T^2} - \omega_0^2}$$

因要求极化回路有记忆作用,因此必须有 $\frac{1}{T^2} - \omega_0^2 < 0$

$$\text{令 } \omega^1 = \sqrt{\omega_0^2 - \frac{1}{T^2}} \quad \text{及 } \omega^1 = \omega + \Delta\omega$$

$$\text{则有 } S_{1,2} = -\frac{1}{T} \pm j\omega^1$$

ω^1 为自由振荡角频率, ω 为工频。

微分方程(1-11)式的暂态解为:

$$u'_{C1K} = e^{-\frac{t}{\tau}} (f_1 \cos \omega^1 t + f_2 \sin \omega^1 t) \quad (1-13)$$

微分方程(1-11)式的稳态解为:

$$u_{C1K}'' = \frac{1}{\omega C Z_1} m V \sin(\omega t + \theta + \beta + \varphi_1 - 90^\circ) \quad (1-14)$$

则微分方程解为:

$$\begin{aligned} u_{C1K} &= u'_{C1K} + u_{C1K}'' \\ &= e^{-\frac{t}{\tau}} (f_1 \cos \omega^1 t + f_2 \sin \omega^1 t) \\ &\quad + \frac{1}{\omega C Z_1} m V \sin(\omega t + \theta + \beta + \varphi_1 - 90^\circ) \end{aligned} \quad (1-15)$$

并有

$$\begin{aligned} R i_{L1K} &= (R+r) i_{1K} + u_{C1K} - u_{1K} \\ &= (R+r) C \frac{du_{C1K}}{dt} + u_{C1K} - u_{1K} \\ &= (R+r) C \left[-\frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} (f_1 \cos \omega^1 t + f_2 \sin \omega^1 t) \right. \\ &\quad \left. + e^{-\frac{t}{\tau}} (-f_1 \omega^1 \sin \omega^1 t + f_2 \omega^1 \cos \omega^1 t) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{C Z_1} m V \cos(\omega t + \theta + \beta + \varphi_1 - 90^\circ) \right] \\ &\quad + e^{-\frac{t}{\tau}} (f_1 \cos \omega^1 t + f_2 \sin \omega^1 t) + \frac{1}{\omega C Z_1} m V \sin(\omega t + \theta + \beta + \varphi_1 - 90^\circ) \\ &\quad - m V \sin(\omega t + \theta + \beta) \end{aligned} \quad (1-16)$$

根据电容电压、电感电流不能跃变有

$$\begin{cases} u_{C1H}(0_-) = u_{C1K}(0_+) \\ i_{L1H}(0_-) = i_{L1K}(0_+) \end{cases}$$

即有

$$\begin{aligned} \begin{cases} \frac{1}{\omega C Z_1} V \sin(\theta + \varphi_1 - 90^\circ) = f_1 + \frac{1}{\omega C Z_1} m V \sin(\theta + \beta + \varphi_1 - 90^\circ) \\ \frac{R+r}{Z_1} V \sin(\theta + \varphi_1) + \frac{1}{\omega C Z_1} V \sin(\theta + \varphi_1 - 90^\circ) - V \sin \theta \\ = (R+r) C \left(-\frac{1}{\tau} f_1 + f_2 \omega^1 \right) + \frac{R+r}{Z_1} m V \cos(\theta + \beta + \varphi_1 - 90^\circ) \\ + f_1 + \frac{1}{\omega C Z_1} m V \sin(\theta + \beta + \varphi_1 - 90^\circ) - m V \sin(\theta + \beta) \end{cases} \end{aligned} \quad (1-17)$$

$$(1-18)$$

由上两式解得:

$$f_1 = \frac{1}{\omega C Z_1} V [m \cos(\theta + \beta + \varphi_1) - \cos(\theta + \varphi_1)] \quad (1-19)$$

$$f_2 = \frac{1}{T \omega \omega_1 C Z_1} V [m \cos(\theta + \beta + \varphi_1) - \cos(\theta + \varphi_1)] \\ - \frac{1}{\omega_1 C Z_1} V [m \sin(\theta + \beta + \varphi_1) - \sin(\theta + \varphi_1)] \\ + \frac{1}{(R+r) \omega_1 C} V [m \sin(\theta + \beta) - \sin \theta] \quad (1-20)$$

把(1-19)、(1-20)式代入(1-15)式得到:

$$u_{c1K} = e^{-\frac{t}{T}} \left\{ \left\{ \frac{1}{\omega C Z_1} V [m \cos(\theta + \beta + \varphi_1) - \cos(\theta + \varphi_1)] \cos \omega_1 t \right. \right. \\ + \left\{ \frac{1}{T \omega \omega_1 C Z_1} V [m \cos(\theta + \beta + \varphi_1) - \cos(\theta + \varphi_1)] \right. \\ - \left. \frac{1}{\omega_1 C Z_1} V [m \sin(\theta + \beta + \varphi_1) - \sin(\theta + \varphi_1)] \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{(R+r) \omega_1 C} V [m \sin(\theta + \beta) - \sin \theta] \right\} \sin \omega_1 t \right\} \\ + \frac{1}{\omega C Z_1} m V \sin(\omega t + \theta + \beta + \varphi_1 - 90^\circ) \quad (1-21)$$

$$u_{J1K} = i_{1K} r = r C \frac{du_{c1K}}{dt} \\ = -\frac{r}{Z_1} V \left(\frac{1}{T^2 \omega \omega_1} + \frac{\omega_1}{\omega} \right) [m \cos(\theta + \beta + \varphi_1) - \cos(\theta + \varphi_1)] e^{-\frac{t}{T}} \sin \omega_1 t \\ + \frac{r}{T \omega_1} V \left\{ \frac{1}{Z_1} [m \sin(\theta + \beta + \varphi_1) - \sin(\theta + \varphi_1)] \right. \\ - \frac{1}{R+r} [m \sin(\theta + \beta) - \sin \theta] \left. \right\} e^{-\frac{t}{T}} \sin \omega_1 t \\ - r V \left\{ \frac{1}{Z_1} [m \sin(\theta + \beta + \varphi_1) - \sin(\theta + \varphi_1)] \right. \\ - \left. \frac{1}{R+r} [m \sin(\theta + \beta) - \sin \theta] \right\} e^{-\frac{t}{T}} \cos \omega_1 t \\ + \frac{r}{Z_1} m V \sin(\omega t + \theta + \beta + \varphi_1) \quad (1-22)$$

式(1-22)即为方向距离继电器主极化电压暂态过程表示式,下面对此式进行简化分析。

在一般情况下 $R \gg r$, $R \gg Z_1$, 并且 φ_1 很小, 因此可忽略 $\frac{1}{R+r}$ 项。

由于 ω_1 与 ω 相差不大, T 不低于 15ms, 因此可认为 $\frac{1}{T^2 \omega \omega_1} + \frac{\omega_1}{\omega} = 1$ 并且 $\frac{1}{T \omega_1}$

值相对很小可忽略不计。则(1-22)式可简化为:

$$\begin{aligned}
 u_{JK} &= -\frac{r}{Z_1} V \left[m \cos(\theta + \beta + \varphi_1) - \cos(\theta + \varphi_1) \right] e^{-\frac{t}{T}} \sin \omega t \\
 &\quad - \frac{r}{Z_1} V \left[m \sin(\theta + \beta + \varphi_1) - \sin(\theta + \varphi_1) \right] e^{-\frac{t}{T}} \cos \omega t \\
 &\quad + \frac{r}{Z_1} m V \sin(\omega t + \theta + \beta + \varphi_1) \\
 &= \frac{r}{Z_1} V \left[\sin(\omega t + \theta + \varphi_1) - m \sin(\omega t + \theta + \beta + \varphi_1) \right] e^{-\frac{t}{T}} \\
 &\quad + \frac{r}{Z_1} m V \sin(\omega t + \theta + \beta + \varphi_1) \quad (1-23)
 \end{aligned}$$

(1-23)式的相量表示式为:

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_{JK} &= \frac{r}{Z_1} V \left[e^{j(\Delta\omega t + \theta + \varphi_1)} - m e^{j(\Delta\omega t + \theta + \beta + \varphi_1)} \right] e^{-\frac{t}{T}} + \frac{r}{Z_1} m V e^{j(\theta + \beta + \varphi_1)} \\
 &= \frac{r}{Z_1} V e^{-\frac{t}{T}} e^{j(\theta + \varphi_1)} e^{j\Delta\omega t} + \frac{r}{Z_1} m V e^{j(\theta + \beta + \varphi_1)} (1 - e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t}) \\
 &= \dot{V}_{J1H} e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t} + \dot{V}_{J1K\infty} (1 - e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t}) \quad (1-24)
 \end{aligned}$$

下面用相量图分析主极化电压的暂态变化行为:

(1) $\omega^1 = \omega$

即有 $\Delta\omega = 0$, (1-24)式变为:

$$\dot{V}_{JK} = \dot{V}_{J1H} e^{-\frac{t}{T}} + \dot{V}_{J1K\infty} (1 - e^{-\frac{t}{T}})$$

$$\text{变形整理得} \quad \frac{\dot{V}_{J1K\infty} - \dot{V}_{JK}}{\dot{V}_{J1K\infty} - \dot{V}_{J1H}} = e^{-\frac{t}{T}} \quad (1-25)$$

由(1-25)式可看出,主极化电压 \dot{V}_{JK} 的暂态过程是由初始位置 \dot{V}_{J1H} 沿直线 $\dot{V}_{J1K\infty} - \dot{V}_{J1H}$ 逐渐过渡到稳态位置 $\dot{V}_{J1K\infty}$ 过渡时间为 $4T$ 。

主极化电压 \dot{V}_{JK} 的暂态过程见图4(图中设 $-180^\circ < \beta < 0^\circ$)

(2) $\omega^1 \neq \omega$

$$\text{(1-24)式变形整理得} \quad \frac{\dot{V}_{J1K\infty} - \dot{V}_{JK}}{\dot{V}_{J1K\infty} - \dot{V}_{J1H}} = e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t} \quad (1-26)$$

即有以下二式

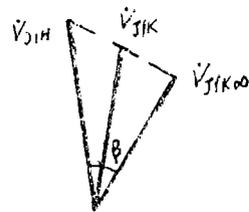


图 4

$$\left| \frac{\dot{V}_{J1K\infty} - \dot{V}_{J1K}}{\dot{V}_{J1K\infty} - \dot{V}_{J1H}} \right| = e^{-\frac{t}{T}} \quad (1-27)$$

$$\arg \frac{\dot{V}_{J1K\infty} - \dot{V}_{J1K}}{\dot{V}_{J1K\infty} - \dot{V}_{J1H}} = \Delta \omega t \quad (1-28)$$

由上两式可看出主极化电压在暂态过程中不再是沿直线，而是沿一曲线由初始位置 \dot{V}_{J1H} 逐渐过渡到稳态位置 $\dot{V}_{J1K\infty}$ ，曲线的形状由 $\Delta \omega$ 与 T 两个因素决定。

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= \frac{\dot{V}_2}{R + j\omega L // (r + \frac{1}{j\omega C})} \cdot \frac{j\omega L}{j\omega L + r + \frac{1}{j\omega C}} \\ &= \frac{\dot{V}_2}{Rr + \frac{1}{C} + j\omega L} \cdot \frac{j\omega L}{R(\omega L - \frac{1}{\omega C}) + \omega Lr} \\ &= \frac{e^{-j90^\circ}}{Z_2 e^{-j\varphi_2}} \cdot \dot{V}_2 = \frac{\dot{V}_2}{Z_2} e^{j(\varphi_2 - 90^\circ)} \end{aligned} \quad (1-29)$$

$$\text{其中 } Z_2 = \frac{1}{\omega L} \sqrt{\left(Rr + \frac{L}{C}\right)^2 + \left[R(\omega L - \frac{1}{\omega C}) + \omega Lr\right]^2}$$

$$\varphi_2 = -\arctg \frac{R(\omega L - \frac{1}{\omega C}) + \omega Lr}{Rr + \frac{L}{C}}$$

由此有

$$\dot{V}_{J2} = \dot{I}_2 r = \frac{r}{Z_2} \dot{V}_2 e^{j(\varphi_2 - 90^\circ)} \quad (1-30)$$

$$\begin{aligned} \text{系统正常运行时有 } \dot{V}_{2H} &= V_c e^{j(\theta + \alpha)} \\ \text{则有 } \dot{V}_{J2H} &= \frac{r}{Z_2} \dot{V}_{2H} e^{j(\varphi_2 - 90^\circ)} = \frac{r}{Z_2} V_c e^{j(\theta + \alpha + \varphi_2 - 90^\circ)} \end{aligned} \quad (1-31)$$

可见正常时， \dot{V}_{J2H} 的幅值小于 \dot{V}_{2H} ， \dot{V}_{J2H} 的相位与 \dot{V}_{2H} 相差 $\varphi_2 - 90^\circ$ 。一般 φ_2 很小，但 Z_2 较大。

$$\begin{aligned} \text{系统故障后稳态时有 } \dot{V}_{2K\infty} &= n V_c e^{j(\theta + \alpha + \delta)} \\ \text{则有 } \dot{V}_{J2K\infty} &= \frac{r}{Z_2} \dot{V}_{2K\infty} e^{j(\varphi_2 - 90^\circ)} = \frac{r}{Z_2} n V_c e^{j(\theta + \alpha + \delta + \varphi_2 - 90^\circ)} \end{aligned} \quad (1-32)$$

由图 7 可写出此种情况极化回路的状态方程为

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{RrC + L}{LC(R+r)} \frac{du_c}{dt} + \frac{R}{LC(R+r)} u_c = -\frac{1}{C(R+r)} \frac{du_2}{dt} \quad (1-33)$$

此微分方程的特征方程为

$$S^2 + \frac{RrC + L}{LC(R+r)} S + \frac{R}{LC(R+r)} = 0 \quad (1-34)$$

(1-34)式与(1-12)式完全相同,说明主极化量与辅助极化量在暂态过程中有相同的自由振荡频率 ω' 及衰减时间常数 T 。

求解微分方程(1-33)并经过简化处理,可求得与 $U_{J2K}(t)$ 类似的表示式如下:

$$U_{J2K} = \frac{r}{Z_2} V \left[\sin(\omega' t + \theta + \alpha + \varphi_2 - 90^\circ) - n \sin(\omega' t + \theta + \alpha + \delta + \varphi_2 - 90^\circ) \right] e^{-\frac{t}{T}} \\ + \frac{r}{Z_2} n V \sin(\omega' t + \theta + \alpha + \delta + \varphi_2 - 90^\circ) \\ + \frac{r}{R+r} V \left[n \sin(\theta + \alpha + \delta) - \sin(\theta + \alpha) \right] e^{-\frac{t}{T}} \cos \omega' t \quad (1-35)$$

(1-35)式与(1-23)式相比只是在形式上增加了一项 $\frac{r}{R+r} V \left[n \sin(\theta + \alpha + \delta) - \sin(\theta + \alpha) \right] e^{-\frac{t}{T}} \cos \omega' t$,由于 Z_2 与 R 相差不大,因此该项不能忽略,它表示了系统故障瞬间辅助极化电压产生的突变量。

$$\Delta U_{J2K} = \frac{r}{R+r} V \left[n \sin(\theta + \alpha + \delta) - \sin(\theta + \delta) \right] e^{-\frac{t}{T}} \cos \omega' t \\ = \frac{r}{R+r} V e^{-\frac{t}{T}} \left[n \sin(\theta + \alpha + \delta) \cos \omega' t - \sin(\theta + \alpha) \cos \omega' t \right] \\ = \frac{r}{2(R+r)} V e^{-\frac{t}{T}} \left[n \sin(\omega' t + \theta + \alpha + \delta) - n \sin(\omega' t - \theta - \alpha - \delta) \right. \\ \left. - \sin(\omega' t + \theta + \alpha) + \sin(\omega' t - \theta - \alpha) \right] \quad (1-36)$$

(1-34)式的相量表示式为:

$$\dot{V}_{J2K} = \frac{r}{Z_2} V \left[e^{j(\Delta\omega' t + \theta + \alpha + \varphi_2 - 90^\circ)} - n e^{j(\Delta\omega' t + \theta + \alpha + \delta + \varphi_2 - 90^\circ)} \right] e^{-\frac{t}{T}} \\ + \frac{r}{Z_2} n V e^{j(\theta + \alpha + \delta + \varphi_2 - 90^\circ)} \\ + \frac{r}{2(R+r)} V e^{-\frac{t}{T}} \left[n e^{j(\Delta\omega' t + \theta + \alpha + \delta)} - n e^{j(\Delta\omega' t - \theta - \alpha - \delta)} \right. \\ \left. - e^{j(\Delta\omega' t + \theta + \alpha)} + e^{j(\Delta\omega' t - \theta - \alpha)} \right] \\ + \frac{r}{Z_2} n V e^{j(\theta + \alpha + \delta + \varphi_2 - 90^\circ)} (1 - e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega' t}) \\ + \frac{Z_2}{2(R+r)} e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega' t} \left[\frac{r}{Z_2} n V e^{j(\theta + \alpha + \delta + \varphi_2 - 90^\circ)} e^{j(90^\circ - \varphi_2)} \right. \\ \left. - \frac{r}{Z_2} n V e^{-j(\theta + \alpha + \delta + \varphi_2 - 90^\circ)} e^{j(\varphi_2 - 90^\circ)} \right. \\ \left. - \frac{r}{Z_2} V e^{j(\theta + \alpha + \varphi_2 - 90^\circ)} e^{j(90^\circ - \varphi_2)} \right]$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{r}{Z_2} \dot{V} e^{-j(\theta+\alpha+\varphi_2-90^\circ)} e^{j(\varphi_2-90^\circ)} \\
& = \dot{V}_{J2H} e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t} + \dot{V}_{J2K\infty} (1 - e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t}) \\
& + \frac{Z_2}{2(R+r)} \left[(\dot{V}_{J2K\infty} - \dot{V}_{J2H}) e^{j(90^\circ-\varphi_2)} - (\hat{V}_{J2K\infty} - \hat{V}_{J2H}) e^{j(\varphi_2-90^\circ)} \right] e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t} \\
& = \dot{V}'_{J2K} + \Delta \dot{V}_{J2K} \quad (1-37)
\end{aligned}$$

其中 $\dot{V}'_{J2K} = \dot{V}_{J2H} e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t} + \dot{V}_{J2K\infty} (1 - e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t})$

$$\Delta \dot{V}_{J2K} = \frac{Z_2}{2(R+r)} \left[(\dot{V}_{J2K\infty} - \dot{V}_{J2H}) e^{j(90^\circ-\varphi_2)} - (\hat{V}_{J2K\infty} - \hat{V}_{J2H}) e^{j(\varphi_2-90^\circ)} \right] e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t}$$

$\hat{V}_{J2K\infty}$ 与 \hat{V}_{J2H} 分别为 $\dot{V}_{J2K\infty}$ 与 \dot{V}_{J2H} 的共轭。

\dot{V}'_{J2K} 的暂态过程与 \dot{V}_{J1K} 完全相似。

$\Delta \dot{V}_{J2K}$ 的暂态过程亦与 \dot{V}_{J1K} 完全相似。

\dot{V}_{J2K} 的暂态过程可认为是两个过程的叠加。

以上分别分析了继电器主极化电压与辅助极化电压各自的暂态变化过程，做这种分析的目的在于分析方向距离继电器的动作行为时可以更清楚地看出主极化电压与辅助极化电压各自与距离测量电压产生的“力矩”关系，尤其是辅助极化电压在某些系统故障情况下所起的特殊作用（例如，对于装在线路受端的相间方向距离继电器在背后母线两相经小弧光电阻短路时，主极化电压与距离测量电压二者之间产生动作力矩，使继电器动作，而辅助极化电压与距离测量电压二者之间产生制动力矩，使继电器不动作）。

二、对于具体接线方式的方向距离继电器极化电压分析

1、相间方向距离继电器极化电压分析

以PJH—11型方向距离继电器为例

$$r = 1.1\text{k}\Omega \quad R = 39\text{k}\Omega$$

$$L = 10\text{H} \quad C = 1\mu\text{F}$$

则有

$$Z_1 = 1.36\text{k}\Omega \quad \varphi_1 = 2.54^\circ$$

$$Z_2 = 16.86\text{k}\Omega \quad \varphi_2 = -2.05^\circ$$

$$T = 15.16\text{ms} \quad \omega^1 = 311.86\text{Hz}$$

$$\Delta\omega = \omega^1 - \omega = -2.3\text{Hz}$$

由于一般情况 ω^1 与 ω 相差不大，即 $\Delta\omega$ 很小，在 T 较小时 \dot{V}_{J1K} 的暂态轨迹是一

较平坦曲线，如图 5 所示。在这种情况下虽然 $\omega' \neq \omega$ ，但并不影响继电器的动作行为。

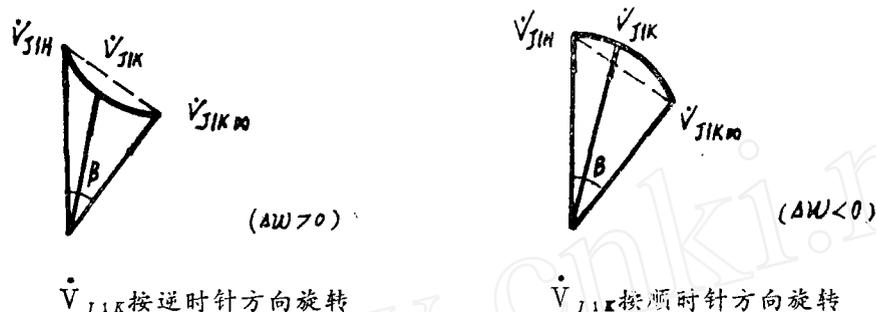


图 5

当 T 较大时， \dot{V}_{J1K} 的暂态轨迹可能是一螺旋线，如图 6 所示。此种情况下 \dot{V}_{J1K} 在暂态过程中有可能超出其应有的变化域，使继电器的动作范围发生暂态扩大，导致继电器在区外故障时误动作，或在区内故障时拒动。但继电器动作范围的暂态扩大只在系统发生故障一段时间后才可能出现。

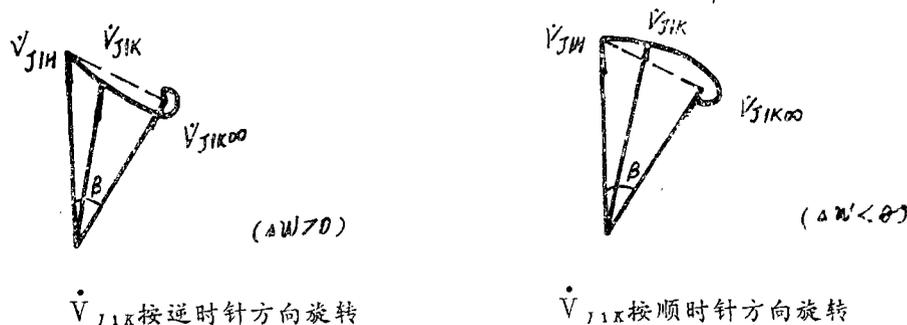


图 6

从上面分析可看出，方向距离继电器极化回路的时间常数 T 以及极化回路本身的谐频与工频之差 $\Delta\omega$ 都不宜过大。

2、辅助极化电压暂态行为分析

$\dot{V}_1 = 0$ ， \dot{V}_2 单独作用于极化回路，如图 7。

对于 AB 相距离继电器

$$\begin{aligned} \dot{V}_{1H} &= \dot{V}_{ABH} & \dot{V}_{2H} &= \dot{V}_{CBH} \\ \dot{V}_{1K\infty} &= \dot{V}_{ABK\infty} & \dot{V}_{2K\infty} &= \dot{V}_{CBK\infty} \end{aligned}$$

主极化电压为

$$\dot{V}_{J1K} = \dot{V}_{JABH} e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t} + \dot{V}_{JABK\infty} (1 - e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t})$$

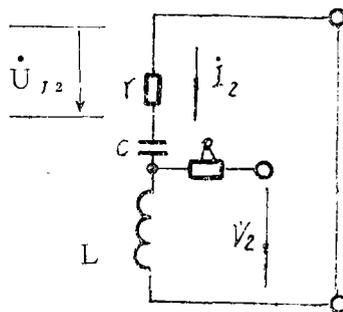


图 7

$$\begin{aligned}
&= \frac{r}{Z_1} \dot{V}_{ABH} e^{j\varphi_1} e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t} + \frac{r}{Z_1} \dot{V}_{ABK\infty} e^{j\varphi_1} (1 - e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t}) \\
&= 0.81 \dot{V}_{ABH} e^{j2.54^\circ} e^{-\frac{t}{15.16}} e^{-j(0.13t)^\circ} \\
&\quad + 0.81 \dot{V}_{ABK\infty} e^{j2.54^\circ} (1 - e^{-\frac{t}{15.16}} e^{-j(0.13t)^\circ})
\end{aligned} \tag{2-1}$$

辅助极化电压为

$$\begin{aligned}
\dot{V}_{J2K} &= \dot{V}_{JCBH} e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t} + \dot{V}_{JCBK\infty} (1 - e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t}) + \Delta \dot{V}_{J2K} \\
&= \frac{r}{Z_2} \dot{V}_{CBH} e^{j(\varphi_2 - 90^\circ)} e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t} + \frac{r}{Z_2} \dot{V}_{CBK\infty} e^{j(\varphi_2 - 90^\circ)} (1 - e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t}) \\
&\quad + \frac{Z_2}{2(R+r)} \left[(\dot{V}_{CBK\infty} - \dot{V}_{CBH}) - (\hat{V}_{CBK\infty} - \hat{V}_{CBH}) \right] e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t} \\
&= 0.065 \dot{V}_{CBH} e^{-j2.05^\circ} e^{-\frac{t}{15.16}} e^{-j(0.13t)^\circ} \\
&\quad + 0.065 \dot{V}_{CBK\infty} e^{-j9205^\circ} (1 - e^{-\frac{t}{15.16}} e^{-j(0.13t)^\circ}) \\
&\quad + 0.21 \left[(\dot{V}_{CBK\infty} - \dot{V}_{CBH}) - (\hat{V}_{CBK\infty} - \hat{V}_{CBH}) \right] e^{-\frac{t}{15.16}} e^{-j(0.13t)^\circ}
\end{aligned} \tag{2-2}$$

从(2-1)式及(2-2)式可看出,在系统正常时辅助极化电压的相角落后于主极化电压约为 30° ,辅助极化电压与主极化电压幅值之比为 $\frac{Z_1}{Z_2} = 0.08$ 。

3、接地方向距离继电器极化电压分析对于A相接地距离继电器

$$\begin{aligned}
\dot{V}_{1H} &= \dot{V}_{AH} & \dot{V}_{2H} &= \dot{V}_{CH} \\
\dot{V}_{1K\infty} &= \dot{V}_{AK\infty} & \dot{V}_{2K\infty} &= \dot{V}_{CK\infty}
\end{aligned}$$

主极化电压为

$$\begin{aligned}
\dot{V}_{J1K} &= \dot{V}_{JAH} e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t} + \dot{V}_{JAK\infty} (1 - e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t}) \\
&= \frac{r}{Z_1} \dot{V}_{AH} e^{j\varphi_1} e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t} + \frac{r}{Z_1} \dot{V}_{AK\infty} e^{j\varphi_1} (1 - e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t})
\end{aligned} \tag{2-3}$$

辅助极化电压为

$$\begin{aligned}
\dot{V}_{J2K} &= \dot{V}_{JCH} e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t} + \dot{V}_{JCK\infty} (1 - e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t}) + \Delta \dot{V}_{J2K} \\
&= \frac{r}{Z_2} \dot{V}_{CH} e^{j(\varphi_2 - 90^\circ)} e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t} + \frac{r}{Z_2} \dot{V}_{CK\infty} e^{j(\varphi_2 - 90^\circ)} (1 - e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t}) \\
&\quad + \frac{Z_2}{2(R+r)} \left[(\dot{V}_{CK\infty} - \dot{V}_{CH}) - (\hat{V}_{CK\infty} - \hat{V}_{CH}) \right] e^{-\frac{t}{T}} e^{j\Delta\omega t}
\end{aligned} \tag{2-4}$$

从(2-3)式及(2-4)式可看出,在系统正常时辅助极化电压的相角超前于主极化电压约为 30° ,辅助极化电压与主极化电压幅值之比仍为 $\frac{Z_1}{Z_2}$ 。

极化电压对偏移阻抗特性圆的影响

—贵州省遵义市长征电器八厂 谢敏毅

在ZZC—4综合重合闸装置里，其选相元件为阻抗继电器，经过DKB副边的切换，能实现方向阻抗特性圆和偏移阻抗特性圆。

由于偏移阻抗特性圆本身的特点，在正方向出口短路时能确保选相元件可靠动作，因此从原理上讲不必加入极化电压（如LH—15中第Ⅲ段采用不加极化电压的偏移阻抗继电器）。为了避免选相元件接线和结构的复杂化，ZZC—4中选相元件在偏移阻抗特性圆运行时仍保留了极化电压。

本文就极化电压加入后对偏移阻抗特性圆的影响作一些分析讨论，不足之处请指正。

一、不加极化电压时

不加极化电压时，偏移阻抗继电器的动作条件为：

$$\left| \dot{Z}_m - \frac{1}{2} \dot{Z}_I \right| < \left| \frac{1}{2} \dot{Z}_I \right| \quad (\dot{Z}_I > \dot{Z}_I)$$

其动作方程为： $\left| \dot{Z}_m - \frac{1}{2} \dot{Z}_I \right| = \left| \frac{1}{2} \dot{Z}_I \right|$

这里： \dot{Z}_I 、 \dot{Z}_I 同相位，设其阻抗角为 ϕ 。其圆特性如图1：

从图1知：

$$\text{圆心: } \begin{cases} X_0 = \frac{1}{2} Z_I \cos \phi \\ Y_0 = \frac{1}{2} Z_I \sin \phi \end{cases} \quad (\text{直角坐标系中})$$

$$\text{半径: } R = \frac{1}{2} Z_I$$

~~~~~

## 三、几点结论

1、主极化电压与辅助极化电压在系统故障后暂态过程中的变化轨迹主要取决于频差 $\Delta\omega$ 与时间常数T。

2、如果频差 $\Delta\omega \neq 0$ ， $\Delta\omega$ 对继电器的动作行为可能不产生影响，也可能产生不利影响。当 $\Delta\omega$ 与T较大时，在系统故障一段时间后继电器的动作域可能暂态扩大。

3、主极化电压与辅助极化电压具有相同的振荡频率和衰减时间常数。