

LH-11型距离保护中整流式 方向阻抗继电器的若干试验特性

湖南省水电局调度试验所 罗江定

LH-11型距离保护装置在我省110KV以上系统得到了广泛的应用，它与感应型距离保护装置相比较，具有体积较小，调试简便，灵敏度高、电压回路要求较低、维护方便等一系列优点，因此运行单位比较欢迎。

但从实际的调试和运行情况来看，元件的若干试验特性及装置中的若干问题，还影响着正确的运行。本文不能全部涉及，仅就方向阻抗继电器的若干试验特性加以分析。其分析方法和某些结论对类似原理的方向阻抗继电器也可作为参考。

(一) 稳态试验特性

在稳态试验特性中讨论下述问题：极化电压 U_I 与被测量电压 U_{CL} 不同相时对灵敏角和阻抗值的影响，第三相电压的影响，频率的影响等。

(1) 极化电压 U_I 与被测量电压 U_{CL} 不同相时对灵敏角和阻抗值的影响。

根据元件平衡条件：

$$\dot{U}_I - \dot{U}_I = -j\lambda \dot{U}_I \quad (1)$$

当 \dot{U}_I 与 \dot{U}_Y 同相时，则

$$K_Y \dot{U}_{CL} - K_K \dot{I}_{CL} = -j\lambda' \dot{U}_{CL} \quad (2)$$

$$\text{因而导出：} Z_{CL} = \frac{I}{I + j\lambda''} Z_{ZD} \quad (3)$$

该式反映的是在复平面内以 Z_{ZD} 为直径、转移阻抗 Z_K 的相角为最大灵敏角、园周通过座标原点并位于第I象限内的方向园。但该式只能是在 \dot{U}_{CL} 和 \dot{U}_I 同相时才是正确的。

若 \dot{U}_{CL} 与 \dot{U}_I 不同相，并设 \dot{U}_{CL} 为基准相， \dot{U}_I 超前 \dot{U}_{CL} 的角度 δ 为正，反之为负。根据平衡条件(2)，则：

$$K_Y \dot{U}_{CL} - K_K \dot{I}_{CL} = -j\lambda' \dot{U}_{CL} e^{\pm j\delta} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 \text{从而导出: } Z_{CL} &= \frac{1}{1 + j\lambda'' e^{\pm j\delta}} Z_{ZD} \\
 &= \frac{e^{\mp j\delta}}{\cos\delta} \cdot \frac{1}{1 + j\lambda'' - \frac{\sin\delta}{\cos\delta} Z_{ZD}} \\
 &= \frac{1}{\cos\delta} \cdot \frac{1}{1 + j\lambda''} Z_{ZD} e^{\mp j\delta} \quad (5)
 \end{aligned}$$

将(5)式和(3)式进行比较, (5)式反映的特性园增加了 $\frac{1}{\cos\delta} e^{\mp j\delta}$ 倍。其意思是最大灵敏角旋转了 $e^{\mp j\delta}$ 角, 而阻抗园增大了 $\frac{1}{\cos\delta}$ 倍。由此得出如下的一些结论:

- a) 若极化回路 \dot{U}_J 超前 \dot{U}_{CL} 的角度为 δ , 则最大灵敏角减少 δ , 亦即特性园顺时针方向旋转 3δ 角, 同时阻抗值增大 $\frac{1}{\cos\delta}$
- b) 若极化回路 \dot{U}_J 落后 \dot{U}_{CL} 的角度为 δ , 则最大灵敏角增大 δ , 亦即特性园反时针方向旋转了 δ 角, 同时阻抗值亦增大 $\frac{1}{\cos\delta}$
- c) 阻抗继电器特性园之最大阻抗值以 $\delta = 0$ 时为最小, 即 $Z_{CL} = \frac{K_K}{K_Y}$ 其最大灵敏角就是DKB的转移阻抗角, 即 $\varphi_{CL} = \varphi_K$ 其他不同 δ 值的最大阻抗值为 $\delta = 0$ 的最大阻抗值垂直线上的相应点上, 以该相应值为直径画园, 则 $\delta = 0$ 的最大阻抗值也落在该园周上。因此 $\delta = 0$ 的最大阻抗值为不同 δ 值园族的公共弦。为图 1 所示。弦的右边为 \dot{U}_J 超前 \dot{U}_{CL} 的园, 左边为 \dot{U}_J 落后于 \dot{U}_{CL} 的园。

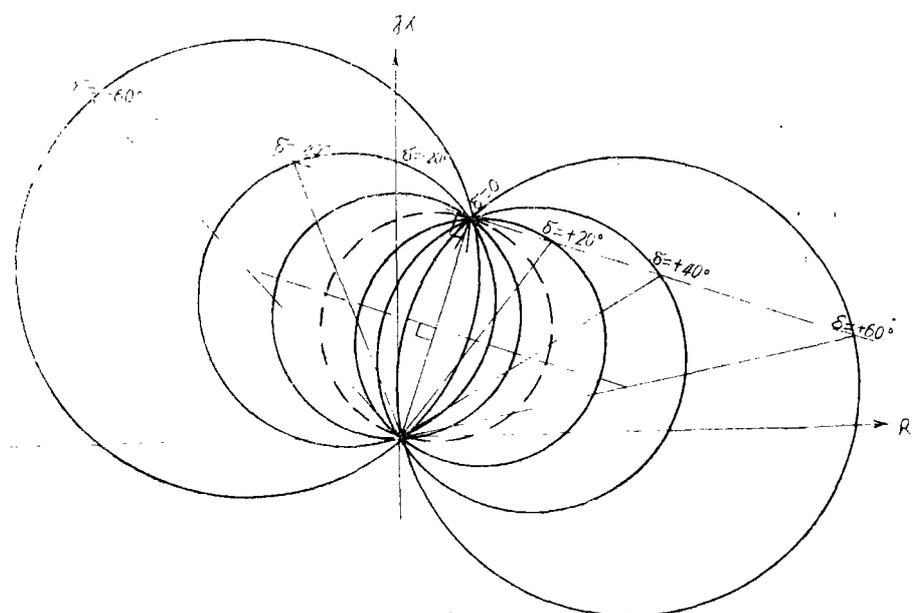


图 1 不同 δ 角的园族, 其中 $\delta = 0$ 的最大阻抗值为园族的公共弦。
 “+”表示 \dot{U}_J 超前于 \dot{U}_{CL} , “-”表示 \dot{U}_J 落后于 \dot{U}_{CL} 。

d)实际试验 δ 角时,应将 R_J 与带实际负载的JYB并联,因JYB二次所带负载是纯电阻性的,其大致情况见图2所示。JYB的二次负载反映到一次侧的等效电阻为:

$$R_{JYB} = n^2_{JYB} \cdot \frac{R}{2}$$

其中 $n_{JYB} = \frac{\omega_1}{\omega_2}$ ……JYB的变比,故极化回路的并联等值电阻为:

$$R_{\epsilon_J} = R_{JYB} // R_J \quad (6)$$

一般 $R_J = 1200 \Omega$, $R_{JYB} \approx 3200 \Omega$,

故 $R_{\epsilon_J} \approx 873 \Omega$ 。

极化回路的 δ 角除 $\delta = 0^\circ$ 这一角度与回路的电阻大小无关外,其他角度均与电阻有关,即: $\delta = \arctg \frac{x_C - x_L}{R_{\epsilon_J} + R_{LJ}}$ 。所以并联与不并联 δ 是不一样的,而实际运行是并联的。

e)极化回路在试验时要求电压从 $100V$ 到 $5V$ 应是线性关系,即 δ 角基本上不变。否则第I段、第II段最大灵敏角因 δ 的变化而不一样,同时使试验所得的特性图亦发生畸变。但现在LJ线圈设计得并不理想,在高电压时呈现饱和现象,致使 δ 角发生一定程度的变化,望制造厂改进。

(2) 第三相电压对极化回路的影响。

第三相电压加入后,一般说明书及有关资料中对于出口金属性两相短路作了分析,其近似结论是 $U_{R\epsilon_J}$ 与短路前不考虑第三相影响的相位一致。但这只是近似的,因没有考虑LJ线圈中的电阻分量,也没有详细分析短路两相的残压不为零而为其他任何数值时第三相电压是否影响 $U_{R\epsilon_J}$ 的相位。现以AB相阻抗元件为例讨论于下:

如图3所示,第三相电压加入后,相当于以O点为中性点的星形负载,只是各相阻抗不对称而已,因此必须解出在此情况下 $U_{R\epsilon_J}$ 与 U_{AB} 的关系。

根据不对称三相短路解法得知:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AO} &= \frac{Y_{BO}\dot{U}_{AB} + Y_{CO}\dot{U}_{AC}}{Y_{AO} + Y_{BO} + Y_{CO}} \\ &= \frac{\frac{\dot{U}_{AB}}{R_{LJ} + jx_{LJ}} + \frac{\dot{U}_{AC}}{R_5}}{\frac{1}{R_{\epsilon_J} - jx_{CJ}} + \frac{1}{R_{LJ} + jx_{LJ}} + \frac{1}{R_5}} \\ &= \frac{R_5(R_{\epsilon_J} - jx_{CJ})\dot{U}_{AB} + (R_{\epsilon_J} - jx_{CJ})(R_{LJ} + jx_{LJ})\dot{U}_{AC}}{(R_{\epsilon_J} - jx_{CJ})(R_{LJ} + jx_{LJ}) + R_5(R_{LJ} + jx_{LJ}) + R_5(R_{\epsilon_J} - jx_{CJ})} \end{aligned}$$

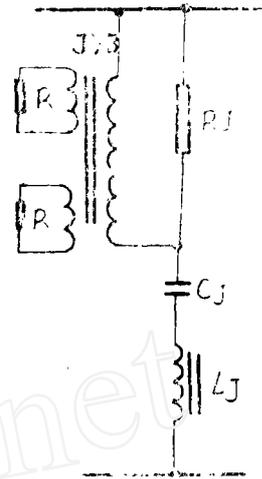


图2 极化回路的实际接线

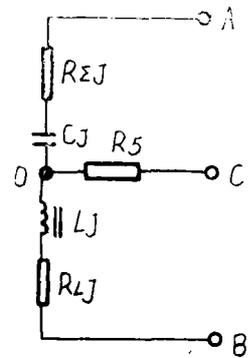


图3 极化回路接线全图

$$\begin{aligned} \text{则 } \dot{U}_{R\epsilon_j} &= \frac{R_{\epsilon_j}}{R_{\epsilon_j} - jX_{Cj}} \dot{U}_{A0} \\ &= \left[\dot{U}_{AB} + \frac{R_{Lj} + jX_{Lj}}{R_s} \dot{U}_{AC} \right] \frac{R_s R_{\epsilon_j}}{R_s(R_{Lj} + R_{\epsilon_j}) + R_{\epsilon_j} R_{Lj} + X_{Lj} X_{Cj} + j[(R_{\epsilon_j} + R_s)X_{Lj} - (R_{Lj} + R_s)X_{Cj}]} \\ &= [\dot{U}_{AB} + Me^{i\gamma} \dot{U}_{AC}] Ae^{i\theta} \quad (7) \end{aligned}$$

式中： R_{Lj} ——LJ线圈的有效电阻，一般约为200Ω，

$$\begin{aligned} A &= \sqrt{\frac{R_s R_{\epsilon_j}}{[R_s(R_{Lj} + R_{\epsilon_j}) + R_{\epsilon_j} R_{Lj} + X_{Lj} X_{Cj}]^2 + [(R_{\epsilon_j} + R_s)X_{Lj} - (R_{Lj} + R_s)X_{Cj}]^2}} \\ Me^{i\gamma} &= \sqrt{\frac{R_{Lj}^2 + X_{Lj}^2}{R_s}} e^{j \arctg X_{Lj}/R_{Lj}} \\ \theta &= \arctg \frac{(R_{Lj} + R_s)X_{Cj} - (R_{\epsilon_j} + R_s)X_{Lj}}{R_s(R_{Lj} + R_{\epsilon_j}) + R_{\epsilon_j} R_{Lj} + X_{Lj} X_{Cj}} \\ &= \arctg \frac{X_{Cj} - \frac{R_{\epsilon_j} + R_s}{R_{Lj} + R_s} X_{Lj}}{R_{\epsilon_j} + R_s // R_{Lj} + \frac{X_{Lj} X_{Cj}}{R_{Lj} + R_s}} \end{aligned}$$

由(7)式可知， δ 角不但决定于 θ ，而且还和 $Me^{i\gamma} \dot{U}_{AC}$ 有关。当 X_{Lj} 和 X_{Cj} 调定以后， θ 角及 γ 角是不变的，但 \dot{U}_{AC} 是随短路电压 \dot{U}_{AB} 而变的。由图4可知，当 \dot{U}_{AB} 由100V逐渐降至零值时， \dot{U}_{AC} 的模将由100V逐渐降至 $\sqrt{\frac{3}{2}} \times 100V$ ，而其相角将由落后 \dot{U}_{AB} 为 60° 逐渐变至落后 \dot{U}_{AB} 为 90° 。因此电压 U_{AB} 在调试变化过程中，考虑第三相的影响后 $U_{R\epsilon_j}$ 的幅值及相角 δ 将随之有所改变。其幅值的变化对继电器的特性没有什么影响，而主要影响继电器特性者乃是 δ 角的变化。

现以一个具体例子稍作说明其影响的程度，设极化回路已调为 $X_{Lj} = X_{Cj}$ ，即不考虑第三相电压时 $\delta = 0^\circ$ ，第三相加上后，将有关标准参数代入得：

$$\begin{aligned} A &= 0.6, \\ Me^{i\gamma} &= 0.1062e^{i18.6^\circ}, \\ \theta &= -2.9^\circ, \end{aligned}$$

当变化 U_{AB} 后，各有关计算数据为表1及图5所示。另并附某继电器的具体试验数据为表2所示（电压高时偏差较大，系由于LJ有饱和现象）。

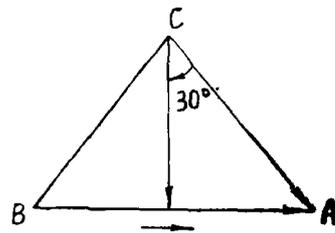


图4 \dot{U}_{AC} 随 \dot{U}_{AB} 变化的向量图

表 1

V_{AB}	$A (\dot{U}_{AB} + Me^{j\alpha} \dot{U}_{AC})$	$\dot{U}_{R\epsilon J}$
100V	$0.66U_{AB}e^{j25^\circ}$	$0.66U_{AB}e^{j0.4^\circ}$
75V	$0.508U_{AB}e^{j22.2^\circ}$	$0.508U_{AB}e^{-j0.8^\circ}$
50V	$0.357U_{AB}e^{j18^\circ}$	$0.357U_{AB}e^{j1.1^\circ}$
25V	$0.207U_{AB}e^{j1^\circ}$	$0.207U_{AB}e^{-j1.8^\circ}$
10V	$0.115U_{AB}e^{j0.6^\circ}$	$0.115U_{AB}e^{-j3.5^\circ}$
0V	$0.0552U_{AB}e^{-j3.6^\circ}$	$0.0552U_{AB}e^{-j8.5^\circ}$

注: U_{AB} 是指的额定电压。

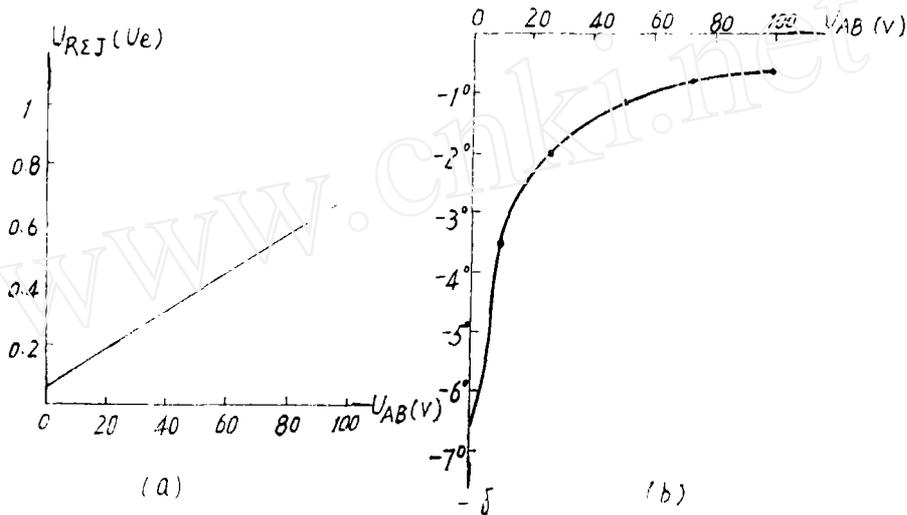


图 5 a) $U_{R\epsilon J}$ 幅值在第三相加入后随电压的变化曲线。

b) δ 角在第三相加入后随电压的变化曲线。

注: 条件是 $X_{LJ} = X_{CJ}$, 即不加第三相时 $\delta = 0$ 。

表 2

U	U_{R1}		δ	
	不加第三相	加第三相	不加第三相	加第三相
100V	77V	65V	13°	7°
80V	62V	53.8V	9.3°	4.4°
50V	38.8V	34.3V	5.8°	2.3°
20V	15V	12.7V	1.9°	0°
10V	7.95V	12V	3.1°	0°
5V	4V	8.9V	7.8°	-0.8°

由以上分析及试验结果可知:

a) 第三相电压加入后, 极化电压 U_{RC} 的相位 δ 将产生一定程度的偏转。且随着测量电压的变化而变化。但影响并不是严重的。

b) 在作继电器诸特性试验时(诸如回特性、准确工作电流等), 应加入第三相电压, 并保证电源电压的对称性。如电源电压不对称, 将影响 U_{RC} 对 U_{AB} 的相对相位。也即影响 δ 角。

c) 由于第三相电压对 δ 角的影响与短路电压 U_{CL} 的大小有关, 用两点法测试灵敏角时, 第 I、II 段将有差异。我们应该注意应使两段的灵敏角不要超过线路实际阻抗角的 $\pm 5^\circ$ 。

(二) 暂态试验特性

暂态特性是继电器的重要性能, 它决定了继电器能否在各种过渡过程中可靠正确动作或可靠不动作。从试验和运行的角度出发, 着重讨论一下保护安装处三相短路时继电器的有关问题。

由附录中推演出短路的暂态电流表示式为:

$$i(t) = \sqrt{i_{\infty}^2} + \left\{ \frac{I}{L_1 \omega_1} \left\{ \frac{R \epsilon_J}{2} i(0) + U_{CL}(0) \right\} \right\} e^{-\alpha_1 t} \cos(\omega_1 t + \theta) \quad (8)$$

$$\text{或 } i(t) = \sqrt{1 + \left(\frac{R \epsilon_J}{2 L_1 \omega_1} + \frac{\operatorname{tg}(\varphi + \delta)}{\omega \omega_1 L_1 C_J} \right)^2} i(0) e^{-\alpha_1 t} \cos(\omega_1 t + \theta) \quad (9)$$

式中: ω ——电源额定角频率。

ω_1 ——极化回路自然谐振频率。

φ ——电源初相角。

δ ——极化回路在额定频率下的阻抗角。

$R \epsilon_J$ ——包括 R_J 与 JYB 等值电阻的并联及 R_{LJ} 的串联电阻。

$i(0) = I_m \cos(\varphi + \delta) = \sqrt{2} I \cos(\varphi + \delta)$ —— $t=0$ 时的电流。

$$u_{CL}(0) = \frac{\sqrt{2} U \sin(\varphi + \delta)}{\omega C_J \sqrt{R \epsilon_J^2 + \left(\omega L_J - \frac{1}{\omega C_J} \right)^2}}$$

$$= \frac{i(0) \operatorname{tg}(\varphi + \delta)}{\omega C_J} \quad t=0 \text{ 时电容器上的电压,}$$

$$\alpha_1 = \frac{R \epsilon_J}{2 L_J} \quad \text{极化回路衰减系数,}$$

$$\theta = \operatorname{arctg} \left(\frac{R \epsilon_J}{2 \omega L_J} + \frac{\operatorname{tg}(\varphi + \delta)}{\omega \omega_1 L_J C_J} \right) \quad \text{暂态电流初相角}$$

极化变压器 JYB 上的电压

$$U_{RJ} = (R \epsilon_J - R_{LJ}) i(t) \quad (10)$$

即极化电压与 $Ii(t)$ 同相位。

现在根据(8)~(10)式讨论下述问题:

a)关于极化回路的自由振荡频率问题:

由附录可知: $f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1} - \frac{R^2 \epsilon_1}{4 L_1^2}}$ 。因此只要 $\frac{1}{L_1 C_1} > \frac{R^2 \epsilon_1}{4 L_1^2}$, 则自由振荡是存在的。若要使极化回路的振荡频率为50周, 则应使

$$\Delta f = 50 - \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1} - \frac{R^2 \epsilon_1}{4 L_1^2}} = 0, \text{ 则可求得:}$$

$$X_{C1} = X_{L1} \left(1 + \frac{R^2 \epsilon_1}{4 X_{L1}^2} \right) \quad (11)$$

$$\delta = \arctg \frac{R \epsilon_1}{4 X_{L1}} \quad (12)$$

按本继电器的具体参数 $R \epsilon_1 = 1073 \Omega$, $X_{C1} = 3185 \Omega$, 代入(11)求得 $X_{L1} = 3092.5 \Omega$, $L_1 = 9.85 \text{亨}$ 。

再代入(12)式求得:

$$\delta = \arctg \frac{R \epsilon_1}{4 X_{L1}} = 5^\circ,$$

若要保证自由振荡频率为50周, 必须使极化回路的极化电压超前电源电压 5° 。

但一般是允许振荡频率为49~51周范围内, 若按此情况进行调整时, 其有关参数计算如下:

振荡频率为49周时, $L = 10.25 \text{亨}$, 则50周试验电源的 $\delta = -1.8^\circ$ 。

振荡频率为51周时, $L = 9.47 \text{亨}$, 则50周试验电源的 $\delta = 11.1^\circ$ 。

因此如果振荡频率考虑在49—51周范围内时, δ 角在50周的电源频率试验时应在 $-1.8^\circ \sim 11^\circ$ 范围内。

b)关于时间常数T。

$$\text{由于 } \alpha = \frac{R \epsilon_1}{2 L_1}, \quad \therefore T = \frac{2 L_1}{R \epsilon_1}。$$

按继电器的实际参数代入, $T = 0.183 \text{''}$ 。

当衰减到10%时, $t = 0.0421 \text{''}$; 衰减到5%时, $t = 0.0675 \text{''}$ 。而继电器的动作时间 $t_{0.2} \approx 10 \text{''}$ 。故能保证可靠动作, 而动作后由助磁保证其可靠掉闸。

c)暂态电流初相角 θ 的讨论。

暂态电流初相角 θ 与短路前稳态电流初相角($\varphi + \delta$)的差值极为重要, 其值不应过大, 否则影响暂态时极化电压 $U_{R \epsilon_1}$ 的相位移过大, 由附录式(12)可知:

$$\theta = \arctg \left[-\frac{R \epsilon_1}{2 L_1 \omega_1} + \frac{\text{tg}(\varphi + \delta)}{\omega_1 L_1 C_1} \right]$$

当短路前之电源频率为50周/秒, 而谐振频率也调整为50周/秒时, $\omega_1 L_1 C_1 = 1$,

$$R \epsilon_1 / 2 L_1 \omega_1 = \frac{1073}{2 \cdot 9.85 \cdot 314} = 0.173, \text{ 则}$$

$$\theta = \arctg [0.173 + \text{tg}(\varphi + \delta)]$$

计算结果如表 3 及图 6 所示。

表 3

$\varphi + \delta$	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°
θ	9.8°	23.8°	36.9°	49.60	62.3°	75.7°	90°	105.7°	122.7°
$\Delta\theta = \theta - (\varphi + \delta)$	9.8°	8.8°	6.9°	4.6°	2.3°	0.7°	0°	0.7°	2.7°

135°	150°	165°	180°
140.4°	158°	174.6°	189.8°
5.4°	8°	9.6°	9.8°

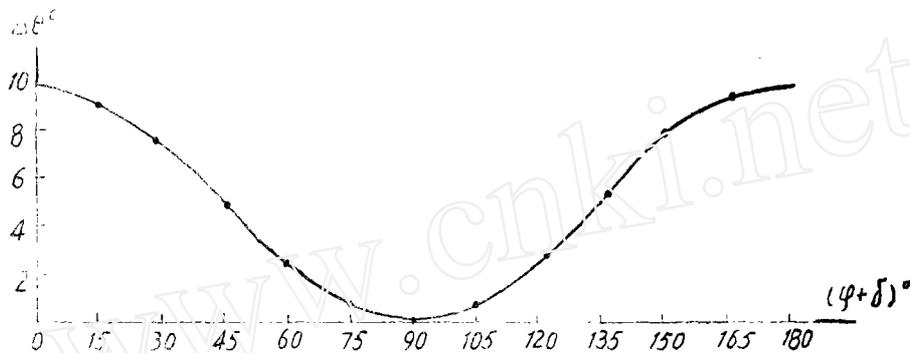


图 6 $\Delta\theta = f(\varphi + \delta)$ 的关系曲线。

由此可见，短路前后的极化回路电流相位（也即极化电压相位）相差不大，但稍超前于短路前的相位，最大约为 10° 。而谐振频率不为 50 周/秒，而是 49 周/秒或 51 周/秒或短路前稳态频率不为 50 周/秒而为 $49 \sim 51$ 周/秒，影响也不太大，因主要决定于 $\frac{Re_1}{2\omega_1 L_1}$ 项但此项变化不大。

d) 保护装置安装处三相短路时继电器动作的实质。

当保护装置安装处三相短路时，由于 $U_f = 0$ 故加到方向阻抗继电器里的电气量为：

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_J - (\dot{U}_f - \dot{U}_K) \\ &= \dot{U}_J + \dot{U}_K \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= \dot{U}_J + (\dot{U}_f - \dot{U}_K) \\ &= \dot{U}_J - \dot{U}_K \end{aligned} \quad (14)$$

极化继电器两线圈的电压差为：

$$|\dot{U}_1| - |\dot{U}_2| = |\dot{U}_J + \dot{U}_K| - |\dot{U}_J - \dot{U}_K| \quad (15)$$

很显然, (15) 式乃是方向继电器的动作方程, 故保护装置安装处三相短路时方向阻抗继电器已变成方向继电器的动作性质。暂态 \dot{U}_J 与短路 \dot{U}_K 同相时动作分量最大, 暂态 \dot{U}_J 与短路 \dot{U}_K 成 90° 时为动作边界条件, 为图 7 a 所示。考虑到 \dot{U}_K 与 \dot{I}_K 的夹角为 φ_K , 则动作区为以暂态 \dot{U}_J 为基准, 超前 $90^\circ - \varphi_K$ 画一斜线, 即为动作区与制动区的分界线。如图 7 b 所示。由前面分析可知, 暂态 \dot{U}_J 超前稳态 \dot{U}_Y 的角度为 $\Delta\theta + \delta$, 故动区这与制动区的分界线也即是以稳态 \dot{U}_Y 为基准, 超前 $90^\circ - (\varphi_K - \Delta\theta - \delta)$ 画一斜线。若 φ_K 为 70° , 则 $90^\circ - \varphi_K = 20^\circ$; 同时由表 3 可知, $\Delta\theta = 0^\circ \sim 10^\circ$ 之间, 则 $90^\circ - (\varphi_K - \Delta\theta - \delta) = 25^\circ \sim 35^\circ$ 之间 (设 δ 按准确的 $+5^\circ$ 调整)。

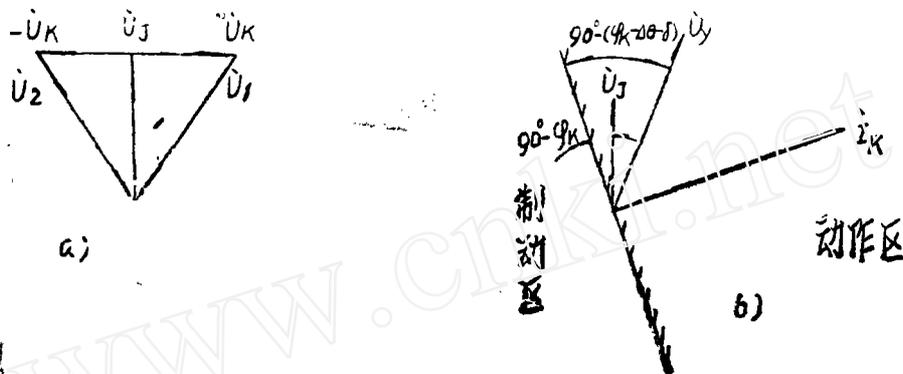


图 7 a) \dot{U}_J 与 \dot{U}_K 动作边界条件向量图 b) 动作区与制动区边界条件图

顺便指出, 保护装置处两相短路也是方向继电器的动作性质, 用不着详细讨论了。
e) 反方向出口三相短路的可靠性讨论。

对于极化回路如为准确的 50 周/秒谐振且系统周波也是 50 周/秒, 毫无疑问能保证反方向出口三相短路的可靠不动作, 但对谐振频率不为 50 周/秒时, 则有详细讨论的必要了。

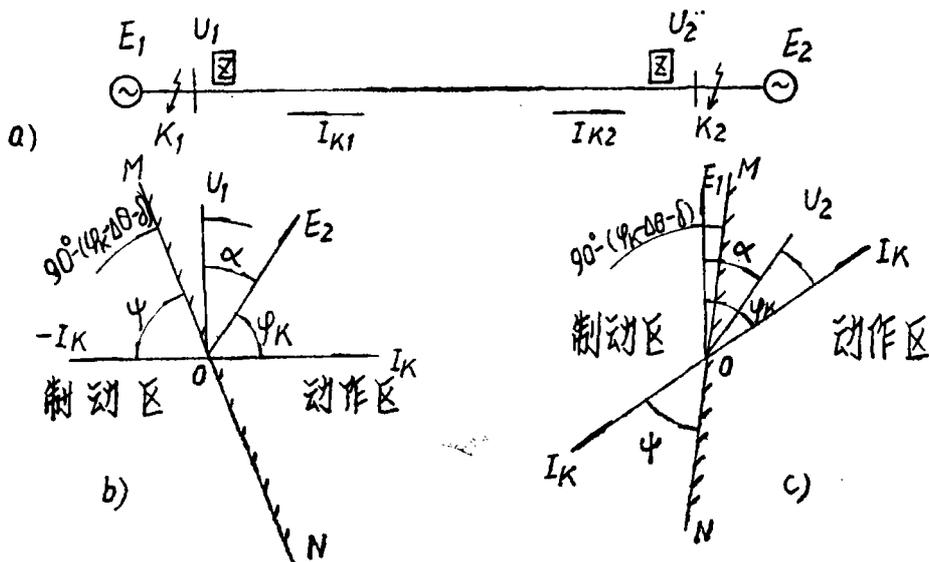


图 8 a) 简化等效系统图。 b) 送电端母线短路向量图。 c) 受电端母线短路向量图。

图 8 a) 是一个简化的等效系统图, U_1 为送电端, U_2 是受电端。送电端母线短路时 I_{K1} 由 E_2 供给, 受电端母线短路时 I_{K2} 由 E_1 供给。设正常时 E_1 和 U_2 、 U_1 和 E_2 的送电角为 α , 短路时极化回路的暂态极化电压初相角决定于短路前稳态电压的相位, 因此方向阻抗继电器变成方向继电器后的临界动作线 MON 超前稳态电压的相角为 $90^\circ - (\varphi_K - \Delta\theta - \delta)$ 。

对送电端反向母线短路时, 如 K_1 点, 方向继电器的动作特性如图 8 b 所示。流过继电器的电流为 $(-I_{K1})$, 而 $(-I_{K1})$ 落后于临界线 NOM 的角度为:

$180^\circ + \varphi_K + \alpha + 90^\circ - (\varphi_K - \Delta\theta - \delta) = 270^\circ + \alpha + \Delta\theta + \delta$ 。也即 $(-I_K)$ 超前于临界线 OM 的角度为 ψ 。

$$\psi = 360^\circ - (270^\circ + \alpha + \Delta\theta + \delta) = 90^\circ - (\alpha + \Delta\theta + \delta) \quad (16)$$

式中: α ——送电角, 对于中短距离线路一般不超过 30° ;

$\Delta\theta$ ——暂态初相角与稳态时 $\varphi + \delta$ 的差值, 由表 3 可知, 在 $0^\circ \sim 10^\circ$ 之间;

δ ——稳态时极化电压与测量电压的差值, 由 (12) 式可知, 与谐振频率及短路前电源频率有关。

将 $\alpha = 30^\circ$ 、 $\Delta\theta = 0^\circ \sim 10^\circ$ 及相应的 δ 值代入 (16) 式得到 ψ 值于表 4 所示。

表 4

电源频率(周)	50	50	50	49	49	49
调谐频率(周)	50	49	51	50	49	51
δ°	5	-1.8	11.1	11.5	4.7	17.6
ψ°	55~45	61.8~51.8	48.9~38.9	48.5~38.5	55.3~45.3	42.4~32.4
	51	51	51			
	50	49	51			
	-1.5	-8.3	4.3			
	61.5~51.5	68.3~58.3	55.7~45.7			

对受电端反向母线短路时, 如 K_2 点, 方向继电器的动作特性如图 8 c 所示, 流过继电器的电流为 $(-I_{K2})$, 而 $(-I_2)$ 落后于临界线的角度为:

$$180^\circ + \varphi_K - \alpha + 90^\circ - (\varphi_K - \Delta\theta - \delta) = 270^\circ - (\alpha - \Delta\theta - \delta)$$

也即 $(-I_K)$ 落后于临界线 ON 的角度为 ψ ,

$$\psi = 270^\circ - (\alpha - \Delta\theta - \delta) - 180^\circ = 90^\circ - (\alpha - \Delta\theta - \delta) \quad (17)$$

同样将 $\alpha = 30^\circ$ 、 $\Delta\theta = 0^\circ \sim 10^\circ$ 及相应的 δ 值代入 (17) 式得到 ψ 值于表 5 所示。

表 5

电源频率(周)	50	50	50	49	49	49
调谐频率(周)	50	49	51	50	49	51
δ°	5	-1.8°	11.1	11.5	4.7	17.6
4°	65~75	58.2~68.2	71.1~81.1	71.5~81.5	64.7~74.7	77.6~87.6

51	51	51
50	49	51
-1.5	-8.3	4.3
58.5~68.5	51.7~61.7	64.3~74.3

由以上分析可知:

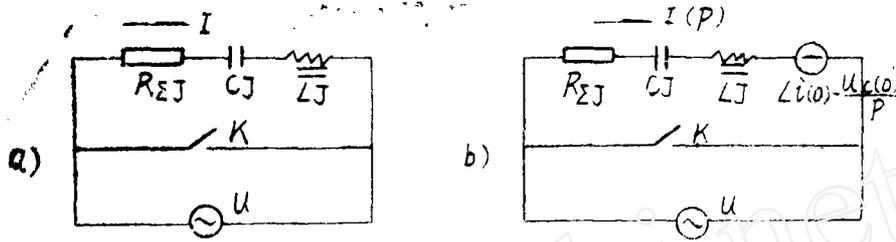
①对送电端来说,谐振频率偏高, ψ 角减少,则 $(-I_K)$ 向临界线OM移动。对受电端来说,谐振频率偏低, ψ 角减少,则 $(-I_K)$ 向临界线ON移动。

②考虑到极化回路的衰减时间常数。衰减到10%的时间约为 42ms ,衰减到5%的时间约为 67.5ms 。对送电端来说,由表4可知,若运行频率为49周/秒,谐振频率为51周/秒在最严重的情况下($\Delta\theta=10^\circ$), $(-I_K)$ 移到临界线需时间 43.7ms $\left(\frac{0.5}{360} \times 32.4 = 43.7\text{ms}\right)$,已不属可靠。对受电端来说,由表5可知,若运行频率为51周/秒,谐振频率为49周/秒,在最严重的情况下($\Delta\theta=0^\circ$), $(-I_K)$ 移到临界线需时间 69.8ms $\left(\frac{0.5}{360} \times 51.7 = 69.8\text{ms}\right)$ 基本上尚属可靠。由此可见极化回路的谐振频率不宜规定在49~51周/秒范围内,最好严格一点,在49.0~50.5周/秒范围内。相应地在50周/秒试验电源下,极化回路的电流超前于电源电压的相位在 $-2^\circ \sim +8^\circ$ 范围内。

③关于暂态试验方法问题:根据电流 $(-I_K)$ 超前电源电压的角度 $\psi+90^\circ-(\varphi_K-\Delta\theta-\delta)$ 则随着电源频率、谐振频率及送电角的不同而有一定的不同,这将对试验造成很大困难,因此为简化起见,仍然可以规定电流超前电压 90° 作为反向短路试验的依据,但电流应稍取大些。

附录

关于极化回路短路的暂态分析



附图 1 a) 极化回路短路图 b) 拉普拉斯变换后的短路运算图

$$\left. \begin{aligned} \text{设短路前所加之稳态电压为: } u &= u_m \cos(\omega t + \psi), \\ \text{短路前极化回路之稳态电流为: } i &= I_m \cos(\omega t + \psi + \delta) \end{aligned} \right\} \quad (\text{附 } 1)$$

$$\begin{aligned} \text{电容器 } C_J \text{ 上之电压为: } u_c &= \frac{1}{C_J} \int i dt \\ &= \frac{I_m}{\omega C_J} \sin(\omega t + \psi + \delta) \end{aligned} \quad (\text{附 } 2)$$

附(1)(2)式中: ω ——电源额定角频率
 ψ ——电源电压初相角
 δ ——额定频率下极化回路之阻抗角

由附图 1 a 可写出该回路的微分方程:

$$L_J \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_J} \int i dt + R_{\Sigma J} i = 0 \quad (\text{附 } 3)$$

并由附(3)式可写出为附图 1 b 所示的拉普拉斯变换式:

$$PL_J I(P) - L_J i(0) + \frac{1}{PC_J} I(P) + \frac{U_{C_J}(0)}{P} + R_{\Sigma J} I(P) = 0$$

$$\text{即 } R_{\Sigma J} I(P) + PL_J I(P) + \frac{1}{PC_J} I(P) = L_J i(0) - \frac{u_{C_J}(0)}{P} \quad (\text{附 } 4)$$

$$\begin{aligned} \text{则可解出电流: } I(P) &= \frac{L_J i(0) - \frac{U_{C_J}(0)}{P}}{PL_J + \frac{1}{PC_J} + R_{\Sigma J}} \\ &= \frac{p i(0) - \frac{u_{C_J}(0)}{L_J}}{p^2 + \frac{R_{\Sigma J}}{L_J} p + \frac{1}{L_J C_J}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{P_i(0)}{P^2 + \frac{R\varepsilon_J}{L_p} P + \frac{I}{L_J C_J}} - \frac{U_{C_J}(0)}{\frac{L}{L_J C_J}} \\
&= \frac{P_i(0)}{\left(P + \frac{R\varepsilon_J}{2L_J}\right)^2 + \left(\sqrt{\frac{I}{L_J C_J}} - \frac{R^2\varepsilon_J}{4L_J^2}\right)^2} - \frac{U_{C_J}(0)}{\left(P + \frac{R\varepsilon_J}{2L_J}\right)^2 + \left(\sqrt{\frac{I}{L_J C_J}} - \frac{R^2\varepsilon_J}{4L_J^2}\right)^2} \\
&= \frac{P_i(0)}{(P + \alpha_J)^2 + \omega_J^2} - \frac{U_{C_J}(0)}{(P + \alpha_J)^2 + \omega_J^2} \quad (\text{附5})
\end{aligned}$$

将附(5)式进行拉普拉斯反变换后的暂态电流为:

$$i(t) = i(0)e^{-\alpha_J t} \left(\cos \omega_J t - \frac{\alpha_J}{\omega_J} \sin \omega_J t \right) - \frac{u_{C_J}(0)}{L_J \omega_J} e^{-\alpha_J t} \sin \omega_J t \quad (\text{附6})$$

式中: $\alpha_J = R\varepsilon_J / 2L_J$ 极化回路衰减系数

$$\omega_J = \sqrt{\frac{I}{L_J C_J} - \frac{R^2\varepsilon_J^2}{4L_J^2}} \dots\dots\dots \text{极化回路自然谐振频率}$$

$R\varepsilon_J$ 包括 R_{L_J} 在内的整个回路电阻

求 $i(0)$, $U_{C_J}(0)$ 的初始值

由附(1)式当 $t=0$ 时,

$$i(0) = I_m \cos(\psi + \delta) = \sqrt{2} I \cos(\psi + \delta) \quad (\text{附7})$$

$$\text{由附(1)(2)式当} t=0 \text{时, } U_{C_J}(0) = \frac{\sqrt{2} U \sin(\psi + \delta)}{\omega C_J \sqrt{R^2\varepsilon_J^2 + \left(\omega L_J - \frac{I}{\omega C_J}\right)^2}} \quad (\text{附8})$$

$$\text{或 } U_{C_J}(0) = \frac{I_m}{\omega C_J} \sin(\psi + \delta) = \frac{i(0) \tan(\psi + \delta)}{\omega C_J} \quad (\text{附9})$$

将附(6)式利用尤拉公式进行运算整理后得:

$$\begin{aligned}
i(t) &= \left[i(0) \cos \omega_J t - \left(i(0) \frac{\alpha_J}{\omega_J} + \frac{U_{C_J}(0)}{L_J \omega_J} \sin \omega_J t \right) e^{-\alpha_J t} \right. \\
&= \sqrt{i^2(0) + \left[\frac{I}{L_J \omega_J} \left\{ \frac{R\varepsilon_J}{2} i(0) + U_{C_J}(0) \right\} \right]^2} e^{-\alpha_J t} \cos(\omega_J t + \theta) \quad (\text{附10})
\end{aligned}$$

$$\text{或 } i(t) = i(0) e^{-\alpha_J t} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{R\varepsilon_J}{2\omega_J L_J} + \frac{\tan(\psi + \delta)}{\omega_J L_J C_J} \right)^2} \right] \cos(\omega_J t + \theta) \quad (\text{附11})$$

$$= I_m' e^{-\alpha_J t} \cos(\omega_J t + \theta) \quad (\text{附12})$$

式中: $\theta = \arctan \left(\frac{R\varepsilon_J}{2\omega_J L_J} + \frac{\tan(\psi + \delta)}{\omega_J L_J C_J} \right)$ 暂态电流初相角

$$I_m' = \sqrt{2} I \cos(\psi + \delta) \sqrt{1 + \left(\frac{R\varepsilon_J}{2L_J \omega_J} + \frac{\tan(\psi + \delta)}{\omega_J L_J C_J} \right)^2} \quad \text{短路瞬间的最大电流}$$

关于附(10)式的推演附于下:

设 $i(0) = n$, $i(0) \frac{\alpha_j}{\omega_j} + \frac{u_{c1}(0)}{L_1 \omega_j} = m$,

$$\begin{aligned} \text{则 } i(t) &= n \left(\frac{e^{j\omega_1 t} + e^{-j\omega_1 t}}{2} - \frac{m}{2j} (e^{j\omega_1 t} - e^{-j\omega_1 t}) \right) \\ &= \frac{1}{2} \left[(n + jm) e^{j\omega_1 t} + (n - jm) e^{-j\omega_1 t} \right] \\ &= \frac{1}{2} \left[\sqrt{n^2 + m^2} e^{j(\omega_1 t + \text{tg}^{-1} \frac{m}{n})} + \sqrt{n^2 + m^2} e^{-j(\omega_1 t + \text{tg}^{-1} \frac{m}{n})} \right] \\ &= \sqrt{n^2 + m^2} \cos \left(\omega_1 t + \text{tg}^{-1} \frac{m}{n} \right) \end{aligned}$$

将 n 、 m 有关数据代入即得 (10) 式及 θ 角, 并用 (9) 式代入即得 (11) 式。

参考资料

- 1、PLH-11/b型整流式距离保护说明书 上海继电器厂
许昌继电器厂
- 2、PLH-11/b型继电保护屏检验规程 陕西省电业管理局调度所
- 3、电工基础(第二册) A·B·聂图什尔
C·B·斯特拉霍夫
- 4、GH-11型距离保护装置 北京、内蒙古、中原、邯郸安、
山东、山西电业管理局中心试验所
- 5、继电保护通讯(1974年第二、三期) 河南省电业局电力调度所
中心试验所
- 6、关于LH-11型距离保护的若干试验特
性及装置中的若干问题 湖南省水电局调度试验所继电班