

用正弦逻辑向量理论分析整流式 方向阻抗继电器（下）

抚州供电局 张旭俊

五、两比较回路不平衡时的影响

本节在两比较回路不平衡的条件下，分别先后对 LH—11 和 JJ—11 的动作特性作出分析。

（一）LH—11 在 K³ 故障时的行为

为了简便，下面亦只研究 K³ 故障时继电器的各种动作特性。

1. LH—11 正向动态动作特性

参见公式 (3.1)，并注意 $\dot{V}_{JO} = M \dot{E}$ ， $\dot{V}_F = N \dot{E}$ ，且 $M \cong N$ 幅角相同，可得，

$$\begin{aligned} \dot{S}_1 &= -j \frac{K \dot{U} - \dot{I} Z_v + N \dot{E}}{-\dot{I} Z_f + M \dot{E}} = -j \frac{(K+N) Z_k - Z_v + N Z_c}{M(Z_k + Z_c) - Z_f} \\ &= -j \left(\frac{K+N}{M} \right) \frac{Z_k - \left(\frac{K}{K+N} \right) Z_y + \left(\frac{N}{K+N} \right) Z_c}{Z_k + Z_c - Z_f} \dots\dots\dots (5.1) \end{aligned}$$

其中 $Z_F = \frac{Z_f}{M}$ ， $Z_c = \frac{Z_c}{K}$ 它们分别是一次标么偏移阻抗、一次标么整定阻抗。

从 (5.1) 式可知，在计及不平衡的影响时，正向动态特性依然是一圆。对照弦径转角定理 (2.8) 式，有下列参数对应关系：

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \left(\frac{K}{K+N} \right) Z_y - \left(\frac{N}{K+N} \right) Z_c = Z_y - \left(\frac{N}{K+N} \right) (Z_c + Z_y) \\ B_1 &= Z_F - Z_c \\ \delta &= \arg \left(\frac{K+N}{M} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots (5.2)$$

为了简便，假定在相位谐振频率下，即 $\delta = 0$ ，此时 K、M、N 均为实数。同时假定 Z_y 、 Z_c 、 Z_F 、 Z_d 具有相同的幅角，并以 Z_y 向量为正方向讨论正负或大小，现阐述如下，（参见图十）。

（1）当参考电压二次不平衡时，即 $N \neq 0$ ，它会导致整定范围末端的缩短或超越。当 $N > 0$ 时 $A_1 < Z_y$ ，即整定范围缩短；当 $N < 0$ 时 $A_1 > Z_y$ ，即整定范围伸长。

(2) 当电抗变压器二次不平衡时, 即 $Z_F \neq 0$, 它会导致偏移阻抗 B_1 点的缩短或伸长。当 $Z_F > 0$ 时, 它将缩短记忆回路为消除死区而产生的有益偏移, 当 $Z_F > Z_C$ 时, B_1 点将落在第一象限内, 此时正向动态动作园就不再包围原点, 因而正向出口故障将存在死区; 当 $Z_F < 0$ 时, 原点对动作边界的偏离加大, 出口故障动作将更可靠。

(3) 正向动态动作园的直径 D 可算出如下:

$$D = A_1 - B_1 = \left(\frac{K+1}{K+N} \right) (Z_c + Z_1) - Z_F \dots\dots\dots (5.2a)$$

在实际设计中, 制动臂回路串有可调电阻, 若减小制动电阻, 它相当于 $Z_1 > 0$ 、 $N > 0$ 的条件。根据 (5.2a) 式可知动作园的直径 D 将缩小。

反之, 若增大制动电阻, 它相当于 $Z_F < 0$ 、 $N < 0$ 的条件。根据 (5.2a) 式可知动作园的直径 D 将扩大。

2. LH-11 反向动态动作特性

同理我们可以推出反向动态动作特性, 或者用如下置换办法, $Z_c \rightarrow Z_d$ 、 $Z_y \rightarrow -Z_y$ 、 $Z_F \rightarrow -Z_F$ 可直接由公式 (5.1) 推得如下:

$$\dot{S}_2 = -j \left(\frac{K+N}{M} \right) \frac{Z_k + \left(\frac{K}{K+N} \right) Z_y + \left(\frac{N}{K+N} \right) Z_d}{Z_k + Z_d + Z_F} \dots\dots\dots (5.3)$$

与 (2.8) 式相比, 有下列参数对应关系

$$\left. \begin{aligned} A_2 &= - \left(\frac{K}{K+N} \right) Z_y - \left(\frac{N}{K+N} \right) Z_d \\ B_2 &= - Z_d - Z_F \\ \delta &= \arg \left(\frac{K+N}{M} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.4)$$

和前面参数假定相同, 现分析讨论如下:

(1) 当制动电阻减小时, 同时有 $Z_F > 0$ 、 $N > 0$ 的条件, 根据公式 (5.4) 可知, 此时 A_2 、 B_2 必位于第三象限, 从而保证反向故障下可靠制动。

(2) 当制动电阻增大时, 同时有 $Z_F < 0$ 、 $N < 0$ 的条件, 根据公式 (5.4) 可知, 此时 A_2 、 B_2 有可能落入第一象限, 从而有导致误动的可能。但由于两比较回路的不平衡, 通常总限制在 1.2% 以内, 故这种误动的可能性事实上不存在。

3. LH-11 正向稳态动作特性

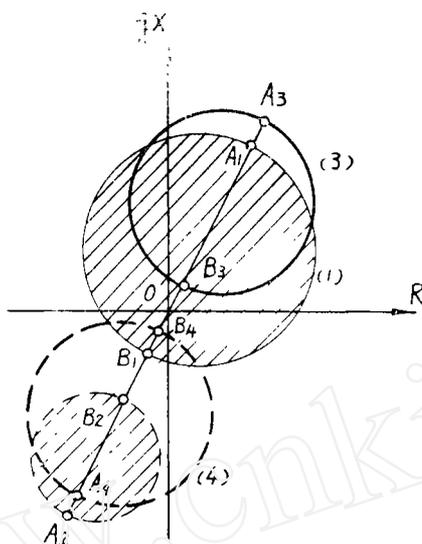
$$\dot{S}_3 = -j \left(\frac{K+N}{M} \right) \frac{Z_k - \left(\frac{K}{K+N} \right) Z_y}{Z_k - Z_F} \dots\dots\dots (5.5)$$

4. LH-11 反向稳态动作特性

$$\dot{S}_4 = -j \left(\frac{K+N}{M} \right) \frac{Z_k + \left(\frac{K}{K+N} \right) Z_y}{Z_k + Z_F} \dots\dots\dots (5.6)$$

5. 略带制动偏移的 LH-11 综合动作园图

要做到两比较回路的绝对平衡是不可能的，一般总会存在微小的不平衡，为了确保反向故障的可靠制动，我们宁愿做成略带制动，当然它必须尽可能地小，这样对正向出口故障而言，完全靠记忆作用抵销略微的制动，并保证在正向出口大电流故障下都能可靠动作。



图十 略带制动偏移的LH—11综合动作园图

如图十，画出了一般略带制动偏移的方向阻抗继电器的特性园。如前分别以细实线园(1)表 \dot{S}_1 、细虚线园(2)表 \dot{S}_2 、粗实线园(3)表 \dot{S}_3 、粗虚线园(4)表 \dot{S}_4 的四种动作特性园。从图可见，该继电器具有如下特点：

(1) 正反向稳态动作园均不包围原点，即其稳态特性存在着出口附近的死区，故能保证电流无潜动，对反向出口故障能长时间的可靠制动，这是它的优点，故称略带制动偏移；但对正向出口故障却不能保持长时间的动作（记忆效用只保证瞬时动作 60^{1-5} ），故它对重合闸于正向出口 K^3 故障，须经延时才动作于掉闸的后备保护是不行的，这是它的缺点。

(2) 对于故障初瞬，由于记忆作用的存在，正向动态动作园包围了原点，故正向出口故障无死区，当 Z_0 愈大消除死区的作用亦愈大，它能抵销略带制动特性的偏移，确保正向出口故障可靠动作。同样由于记忆作用的存在，反向动态动作园远离原点，即反向出口故障能可靠制动， Z_0 愈大制动作用亦愈大。

记忆回路的这种不对称偏移是非常有益的。

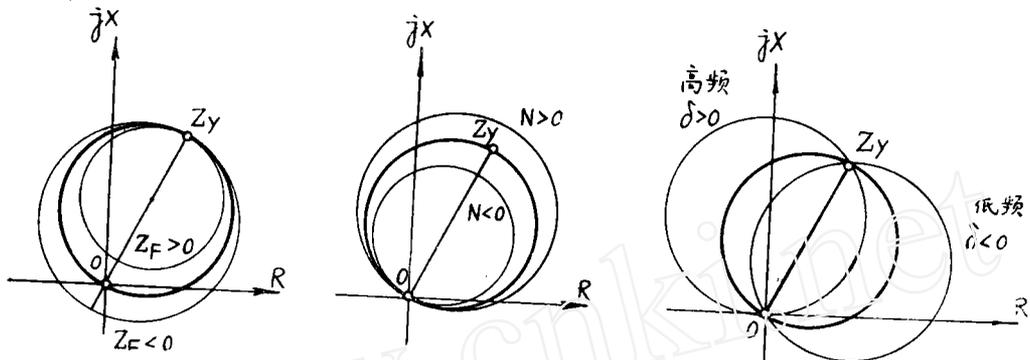
(3) 带记忆装置的方向阻抗元件，它有两种含义的方向，都必须接线正确才行，其一为稳态方向，它取决于 \dot{U} 和 \dot{I} 之间的极性，它保证“远处”故障时的方向距离判别，所谓“远处”系指除了出口附近以外的其他区域而言；其二为动态方向，它取决于 \dot{V}_J 和 \dot{I} 之间的极性，它保证“近处”故障时的方向判别，所谓“近处”系指出口前后

附近的区域而言。

6. 各种不平衡因素对 LH—11 正向稳态特性园的影响

经典理论只分析了各种不平衡因素对 LH—11 正向稳态特性园的影响，为了将本文的结果和其比较，亦在图十一中画出了如下三种情况：

- (1) DKB 不平衡：即只看 Z_F 变化。
- (2) JYB 不平衡：即只看 N 变化。
- (3) 非谐振频率下运行：即只看 δ 变化。



(1) DKB 不平衡 (2) JYB 不平衡 (3) 记忆回路不谐振

图十一

(二) JJ—11 在 K^3 故障时的行为

在这一节里，我们直接写出 JJ—11 的四种动作特性如下：

1. JJ—11 正向动态动作特性

$$\dot{S}_1 = -j \frac{(K+N)}{(K+M)} \frac{Z_L - \left(\frac{K}{K+N}\right) Z_Y + \left(\frac{N}{K+N}\right) Z_D}{Z_F + \left(\frac{M}{K+M}\right) (Z_L - Z_Y)} \dots\dots\dots (5.7)$$

2. JJ—11 反向动态动作特性

$$\dot{S}_2 = -j \frac{(K+N)}{(K+M)} \frac{Z_L + \left(\frac{K}{K+N}\right) Z_Y + \left(\frac{N}{K+N}\right) Z_D}{Z_F + \left(\frac{M}{K+M}\right) (Z_L + Z_Y)} \dots\dots\dots (5.8)$$

3. JJ—11 正向稳态动作特性

$$\dot{S}_3 = -j \frac{(K+N)}{(K+M)} \frac{Z_L - \left(\frac{K}{K+N}\right) Z_Y}{Z_K - \left(\frac{M}{K+M}\right) Z_F} \dots\dots\dots (5.9)$$

4. JJ—11 反向稳态动作特性

$$\dot{S}_4 = -j \frac{(K+N)}{(K+M)} \frac{Z_L + \left(\frac{K}{K+N}\right) Z_Y}{Z_K + \left(\frac{M}{K+M}\right) Z_F} \dots\dots\dots (5.10)$$

由公式(5.7)——(5.10)可知:

(1) 当JYB不平衡(即 $N \neq 0$)时,它导致整定范围端点A的变化和LH-11完全一样。

(2) 当DKB不平衡(即 $Z_F \neq 0$)时,它导致偏移阻抗点B的变化,均比LH-11中相应减少了 $(\frac{M}{K+M})$ 倍。

(3) 对JJ-11的动态特性而言,如(4.6)和(4.8)式中讨论过的,其记忆回路造成的有益偏移亦均较LH-11中相应减少了 $(\frac{M}{K+M})$ 倍。因此从记忆装置可以纠正不平衡影响的相对效用而言,它仍和LH-11的完全相当。

(4) 对JJ-11而言: $\delta = \arg(\frac{K+N}{K+M})$,故低频运行对JJ-11的影响,要比对LH-11的影响小。

六、在 K^2 故障下三相综合动作园图

在 K^2 故障下,安装在故障相与非故障相的继电器,其动作特性是大不相同的。

下面以 K^{BC} 故障为例,写出三相电压和电流如下,设 $\dot{E}_A = \dot{E}$, $\dot{I}_A = 0$ 。

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= (1 - \alpha^2) \left[\frac{Z_K + Z_C + \frac{\alpha^2}{2} Z_C}{Z_K + Z_C} \right] \dot{E} \\ \dot{U}_{BC} &= (\alpha^2 - \alpha) \left[\frac{Z_K}{Z_K + Z_C} \right] \dot{E} \\ \dot{U}_{CA} &= (\alpha - 1) \left[\frac{Z_K + Z_C + \frac{\alpha}{2} Z_C}{Z_K + Z_C} \right] \dot{E} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.1)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_B - \dot{I}_C &= \frac{(\alpha - \alpha^2) \dot{E}}{2(Z_K + Z_C)} \\ \dot{I}_C - \dot{I}_A &= \frac{(\alpha^2 - \alpha) \dot{E}}{(Z_K + Z_C)} \\ \dot{I}_A - \dot{I}_B &= \frac{(\alpha - \alpha^2) \dot{E}}{2(Z_K + Z_C)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.2)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{AB} &= (1 - \alpha^2) \dot{E} \\ \dot{E}_{BC} &= (\alpha^2 - \alpha) \dot{E} \\ \dot{E}_{CA} &= (\alpha - 1) \dot{E} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.3)$$

下面假定在平衡条件和相位谐振频率下,推出LH-11的三相综合动作特性,并举例说明 K^{BC} 故障下,非故障相 $S_{I,AB}$ 的推导过程如下:

$$\begin{aligned} \dot{S}_{1.AB} &= -j \frac{K \dot{U}_{AB} - (\dot{I}_A - \dot{I}_B) Z_Y}{M \dot{E}_{AB}} = -j \frac{\left(\frac{K}{M}\right) \dot{U}_{AB} - (\dot{I}_A - \dot{I}_B) Z_Y}{\dot{E}_{AB}} \\ &= -j \left(\frac{K}{M}\right) \frac{Z_K + Z_C + \frac{\alpha^2}{2} (Z_C + Z_Y)}{Z_K + Z_C} \\ &\stackrel{\textcircled{1}}{=} -j \frac{Z_K + Z_C + \frac{\alpha^2}{2} (Z_K + Z_Y)}{Z_K + Z_C} \end{aligned}$$

下面直接写出LH-11三相综合动作特性如下:

1. LH-11的正向动态动作特性

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_{1.AB} &\stackrel{\textcircled{1}}{=} -j \frac{Z_K + Z_C + \frac{\alpha^2}{2} (Z_C + Z_Y)}{Z_K + Z_C} \\ \dot{S}_{1.BC} &\stackrel{\textcircled{1}}{=} -j \frac{Z_K - Z_Y}{Z_K + Z_C} \\ \dot{S}_{1.CA} &\stackrel{\textcircled{1}}{=} -j \frac{Z_K + Z_C + \frac{\alpha^2}{2} (Z_C + Z_Y)}{Z_K + Z_C} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.4)$$

2. LH-11的反向动态动作特性

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_{2.AB} &\stackrel{\textcircled{1}}{=} -j \frac{Z_k + Z_d + \frac{\alpha^2}{2} (Z_d - Z_Y)}{Z_k + Z_d} \\ \dot{S}_{2.BC} &\stackrel{\textcircled{1}}{=} -j \frac{Z_k + Z_Y}{Z_k + Z_d} \\ \dot{S}_{2.CA} &\stackrel{\textcircled{1}}{=} -j \frac{Z_k + Z_d + \frac{\alpha^2}{2} (Z_d - Z_Y)}{Z_k + Z_d} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.5)$$

3. LH-11的正向稳态动作特性

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_{3.AB} &\stackrel{\textcircled{1}}{=} -j \frac{Z_K + Z_C + \frac{\alpha^2}{2} (Z_C + Z_Y)}{Z_K + Z_C + \frac{\alpha^2}{2} Z_C} \\ \dot{S}_{3.BC} &\stackrel{\textcircled{1}}{=} -j \frac{Z_K - Z_Y}{Z_K} \\ \dot{S}_{3.CA} &\stackrel{\textcircled{1}}{=} -j \frac{Z_K + Z_C + \frac{\alpha^2}{2} (Z_C + Z_Y)}{Z_K + Z_C + \frac{\alpha^2}{2} Z_C} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.6)$$

4. LH-11的反向稳态动作特性

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_{4.AB} &\stackrel{\textcircled{1}}{=} -j \frac{Z_k + Z_d + \frac{\alpha^2}{2}(Z_k - Z_y)}{Z_k + Z_d + \frac{\alpha^2}{2}Z_d} \\ \dot{S}_{4.BC} &\stackrel{\textcircled{1}}{=} -j \frac{Z_k + Z_y}{Z_k} \\ \dot{S}_{4.CA} &\stackrel{\textcircled{1}}{=} -j \frac{Z_k + Z_d + \frac{\alpha}{2}(Z_k - Z)}{Z_k + Z_d + \frac{\alpha}{2}Z} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.7)$$

5. LH-11在K²故障下的三相综合动作园图。

为了清晰，在图十二中画出动态特性图，其中实线是正向动态动作区，虚线是反向动态动作区；在图十三中画出稳态特性图，其中实线是正向稳态动作区，虚线是反向稳态动作区。从图可知：

(1) 三相所有的反向动作园(动态与稳态)都不经第一象限，因而对反向故障可确保制动。其中只有故障相的反向稳态动作园穿过原点，它相当于临界状况，为了考虑不平衡因素造成不利的影晌，故一般只需注意故障相就行了。

(2) 三相所有的正向动作园(动态与稳态)中，故障相的动作园是最为关键的。对Z_k实际可能的第一象限而言，动作区主要取决于故障相的动作园，而非故障相的动作园所造成的附加动作区，一般位在第二、三、四象限，因而没有多大实用意义。

(3) 一般三相正向动态动作园都包围了原点，因而对正向出口故障而言，三个记忆装置都起了作用。故LH-11中第三相电压的加入，主要是为了克服因电压二次回路不平衡而引起的相互串扰用的(详见下文)。

(二) JJ-11在K²故障下的三相综合动作特性

经分析表明，JJ-11在K²故障下的三相综合动作园图和LH-11的相仿，由于JJ-11记忆回路接在第三相相电压上，在K²故障时第三相相电压依然保持不变，因之JJ-11的动态特性图和稳态特性图是完全一样的，即它们的图形类似于图十二。

下面以K^{BC}故障为例，说明非故障相 $\dot{S}_{1.AB}$ 的推导过程如下

$$\begin{aligned} \dot{S}_{1.AB} &= -j \frac{K\dot{U} - \dot{I}Z_y}{K\dot{U} + 2\dot{Y}_{ch}} = -j \frac{K\dot{U}_{AB} - (\dot{I}_A - \dot{I}_B)Z}{K\dot{U}_{AB} + (\alpha^2 - \alpha)M\dot{U}} \\ &= -j \frac{K \left[Z_K + Z_C + \frac{\alpha^2}{2}(Z_C + Z) \right]}{K \left[Z_K + Z_C + \frac{\alpha^2}{2}Z_C \right] + M \left[Z_K - \frac{\alpha^2}{2}Z_C \right]} \\ &= -j \left(\frac{K}{K+M} \right) \frac{Z_K + Z_C + \frac{\alpha^2}{2}(Z_C + Z)}{Z_K + \left(\frac{K}{K+M} \right) Z_C + \left(\frac{K-M}{K+M} \right) \frac{\alpha^2}{2} Z_C} \end{aligned}$$

$$\textcircled{1} \dot{S} = -j \frac{Z_K + Z_C + \frac{\alpha^2}{2} (Z_C + Z_Y)}{Z_K + \left(\frac{K}{K+M}\right) Z_C + \left(\frac{K-M}{K+M}\right) \frac{\alpha^2}{2} Z_C}$$

下面直接写出JJ-11的正反向动态（稳态）动作特性如下：

1. JJ-11的正向动态动作特性

$$\dot{S}_{1.AB} \textcircled{1} = -j \frac{Z_K + Z_C + \frac{\alpha^2}{2} (Z_C + Z_Y)}{Z_K + \left(\frac{K}{K+M}\right) Z_C + \left(\frac{K-M}{K+M}\right) \frac{\alpha^2}{2} Z_C}$$

$$\dot{S}_{1.BC} \textcircled{1} = -j \frac{Z_K - Z_Y}{Z_K + \left(\frac{M}{K+M}\right) Z_C}$$

$$\dot{S}_{1.CA} \textcircled{1} = -j \frac{Z_K + Z_C + \frac{\alpha^2}{2} (Z_C + Z_Y)}{Z_K + \left(\frac{K}{K+M}\right) Z_C + \left(\frac{K-M}{K+M}\right) \frac{\alpha^2}{2} Z_C}$$

..... (6.8)

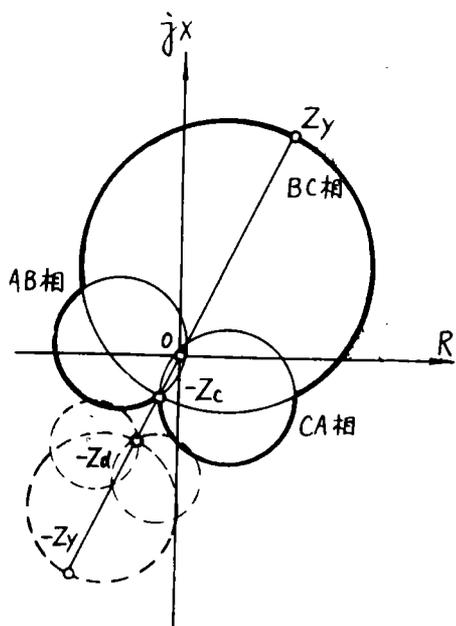
2. JJ-11的反向动态动作特性

$$\dot{S}_{2.AB} = -j \frac{Z_k + Z_d + \frac{\alpha^2}{2} (Z_d - Z_Y)}{Z_k + \left(\frac{K}{K+M}\right) Z_d + \left(\frac{K-M}{K+M}\right) \frac{\alpha^2}{2} Z_d}$$

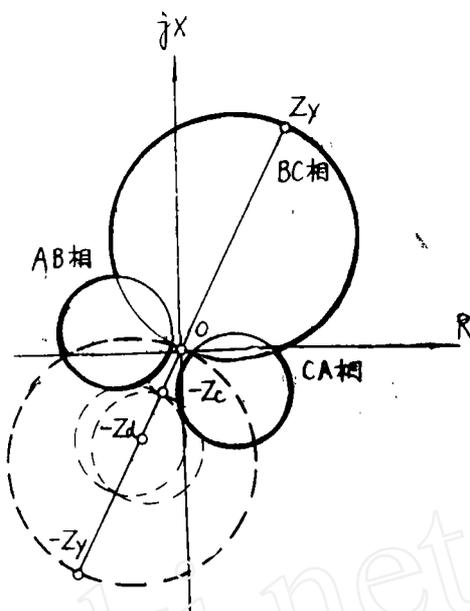
$$\dot{S}_{2.BC} = -j \frac{Z_k + Z_Y}{Z_K + \left(\frac{M}{K+M}\right) Z_C}$$

$$\dot{S}_{2.CA} = -j \frac{Z_k + Z_d + \frac{\alpha^2}{2} (Z_d - Z_Y)}{Z_k + \left(\frac{K}{K+M}\right) Z_d + \left(\frac{K-M}{K+M}\right) \frac{\alpha^2}{2} Z_d}$$

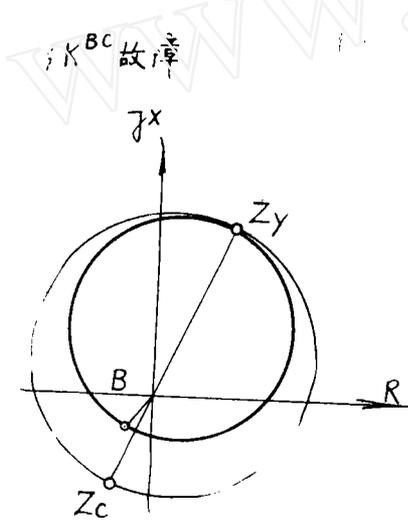
..... (6.9)



图十二 KBC故障下, LH-11 的暂态特性图

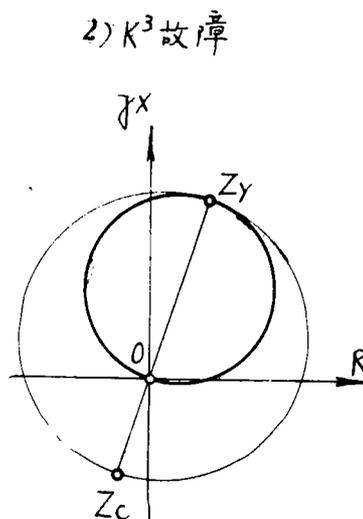


图十三 KBC故障下, LH-11 的稳态特性图



$$B = 0.084 e^{j\theta} Z_c$$

图十四 加入第三相电压后LH-11的正向特性园图。



JJ-11的三相综合动作园图(动态和稳态)均和图十二相仿, 此不赘述。

七、加入第三相电压对 LH—11 动作特性的影响

以上各节为了分析简便，对 LH—11 均未计及第三相电压的影响，下面我们要分别研究在 K^2 、 K^3 故障下，加入第三相电压对 LH—11 的动作特性将发生怎样的影响。为了简便，假定两比较回路平衡，同时只研究安装在故障相继电器的动作特性，兹分析如下：

(一) 当 K^{BC} 故障时

当假定 K^{BC} 故障时，安装在 BC 相的动态和稳态参考电压可由 (1.6)、(1.7) 式按相序顺推而得出：

$$\dot{V}_{JO} = M [\dot{E}_{BC} - q \dot{U}_{AB}] \dots\dots\dots (7.1)$$

$$\dot{V}_{J\infty} = M [\dot{U}_{BC} - q \dot{U}_{AB}] \dots\dots\dots (7.2)$$

当考虑记忆回路在相位谐振条件下，

$$\text{即 } \omega L = \frac{1}{\omega C} \text{ 时有 } M = m e^{-j^{2.90^\circ}}, q = 0.1062 j^{82.40^\circ}$$

〔参见公式 (1.5a)，将此参数代入 (7.1)、(7.2)，下面分别推出故障相四种动作特性如下：

1. LH—11 正向动态动作特性

参见公式 (3.12)、(6.1) → (6.3)、(7.1) 可得

$$\begin{aligned} \dot{S}_{1 \cdot BC}^{(2)} &= -j \left(\frac{K}{M} \right) \frac{\dot{U}_{BC} - (I_B - I_G) Z_y}{\dot{E}_{BC} - q \dot{U}_{AB}} \\ &= -j \left(\frac{K}{M} \right) \frac{(\alpha^2 - \alpha) \dot{E} \left[\frac{Z_K}{Z_K + Z_G} - \frac{Z_y}{Z_K + Z_C} \right]}{(\alpha^2 - \alpha) \dot{E} \left[1 - q \alpha \left(\frac{Z_K + Z_C + \frac{1}{2} Z_C}{Z_K + Z_C} \right) \right]} \\ &= -j \left(\frac{K}{m} \right) e^{j^{2.90^\circ}} \frac{Z_K - Z_y}{(1 - q \alpha) Z_K + (1 - q \alpha - \frac{1}{2} q) Z_C} \\ &= -j \left(\frac{K}{m} e^{j^{2.90^\circ}} \right) \frac{Z_K - Z_y}{1.0955 e^{j^{2.50^\circ}} Z_K + 1.0921 e^{-j^{0.30^\circ}} Z_C} \\ &\stackrel{\textcircled{1}}{=} -j e^{j^{0.40^\circ}} \left[\frac{Z_K - Z_y}{Z_K + e^{-j^{2.80^\circ}} Z_C} \right] \dots\dots\dots (7.3) \end{aligned}$$

2. LH—11 反向动态动作特性

用置换法 $Z_y \rightarrow -Z_y$ ， $Z_c \rightarrow Z_d$ 可直接从 (7.3) 式推出

$$\dot{S}_{2 \cdot BC}^{(2)} \stackrel{\textcircled{1}}{=} -j e^{j^{0.40^\circ}} \left[\frac{Z_K + Z_y}{Z_K + e^{-j^{2.80^\circ}} Z_d} \right] \dots\dots\dots (7.4)$$

3. LH-11正向稳态动作特性

$$\begin{aligned} \dot{S}_{3-BC} &= -j \left(\frac{K}{M} \right) \frac{\dot{U}_{BC} - (\dot{I}_B - \dot{I}_C) Z_Y}{\dot{U}_{BC} - \alpha \dot{U}_{AB}} \\ &= -j \left(\frac{K}{M} \right) \frac{(\alpha^2 - \alpha) E \left[\frac{Z_K}{Z_K + Z_C} - \frac{Z_Y}{Z_K + Z_C} \right]}{(\alpha^2 - \alpha) E \left[\frac{Z_K}{Z_K + Z_C} - \alpha q \left(\frac{Z_K + Z_C + \frac{\alpha^2}{2} Z_C}{Z_K + Z_C} \right) \right]} \\ &= -j \left(\frac{K}{M} \right) \frac{(Z_K - Z_Y)}{(1 - \alpha q) Z_K - j \sqrt{\frac{3}{2}} q Z_C} \\ &= -j \left(\frac{K}{m} e^{j^{2.9^\circ}} \right) \frac{(Z_K - Z_Y)}{1.0955 e^{j^{2.9^\circ}} Z_K + 0.0921 e^{-j^{3.8^\circ}} Z_C} \\ &\stackrel{\textcircled{1}}{=} -j e^{j^{0.4^\circ}} \left[\frac{Z_K - Z_Y}{Z_K + 0.084 e^{-j^{6.1^\circ}} Z_C} \right] \dots \dots \dots (7.5) \end{aligned}$$

4. LH-11反向稳态动作特性

同理用置换法 $Z_Y \rightarrow -Z_Y$, $Z_C \rightarrow Z_d$ 可直接从 (7.5) 式推出:

$$\dot{S}_{4-BC} \stackrel{\textcircled{1}}{=} -j e^{j^{0.4^\circ}} \left[\frac{Z_K + Z_Y}{Z_K + 0.084 e^{-j^{6.1^\circ}} Z_d} \right] \dots \dots \dots (7.6)$$

从公式 (7.3) → (7.6) 我们可以看到加入第三相电压对 LH-11 动作特性的影响程度, 兹分述如下:

(1) 加入第三相电压对动态特性的影响有二, 第一是引起了 0.4° 的弦径转角, 第二是使偏移阻抗 Z_C 有了一 2.8° 的反偏转。总的说它对动作区域的影响并不大。

(2) 加入第三相电压对稳态特性的影响是它有一个不大的不对称有益偏移, 它有利于出口前后故障的方向判别, 但是从数量上说它只有 $8.4\% Z_C$ (或 Z_d), 因而远远小于记忆回路的效用。但它是在故障时间内长期存在的量, 它主要目的在于避免反向出口 K^2 故障时, 若电压二次回路负载不平衡, 非故障相可能对故障相残压有不利串扰。

在图十四(1)中画出了 K^{BC} 故障下加入第三相电压的 LH-11 正向动态和稳态动作园。

(二) 当 K^3 故障时:

下面直接写出当 K^3 故障时 LH-11 在加入第三相电压后的四种特性如下:

1. LH-11 正向动态动作特性

$$\begin{aligned} \dot{S}_1 &= -j \left(\frac{K}{M} \right) \frac{\dot{U}_{BC} - (\dot{I}_B - \dot{I}_C) Z_Y}{\dot{E}_{BC} - \alpha \dot{U}_{AB}} \\ &= -j \left(\frac{K}{M} \right) \left[\frac{Z_K - Z_Y}{Z_K + Z_C} \right] \left[1 - \alpha q \left(\frac{Z_K}{Z_K + Z_C} \right) \right] \end{aligned}$$

$$= -j \left(\frac{K}{m} e^{j2.9^\circ} \right) \frac{Z_K - Z_Y}{(1 - \alpha q) Z_K + Z_C}$$

$$\stackrel{\textcircled{1}}{=} -j e^{j0.4^\circ} \frac{Z_K - Z_Y}{Z_K + 0.913 e^{-j2.5^\circ} Z_C} \dots\dots\dots (7.7)$$

2. LH—11反向动态动作特性

$$\dot{S}_2 \stackrel{\textcircled{1}}{=} -j e^{j0.4^\circ} \frac{Z_K + Z_Y}{Z_K + 0.913 e^{-j2.5^\circ} Z_d} \dots\dots\dots (7.8)$$

3. LH—11正向稳态动作特性

$$\dot{S}_3 \stackrel{\textcircled{1}}{=} -j e^{j0.4^\circ} \left[\frac{Z_K - Z_Y}{Z_K} \right] \dots\dots\dots (7.9)$$

4. LH—11反向稳态动作特性

$$\dot{S}_4 \stackrel{\textcircled{1}}{=} -j e^{j0.4^\circ} \left[\frac{Z_K + Z_Y}{Z_K} \right] \dots\dots\dots (7.10)$$

综合(7.7)→(7.10)可知：当K³故障时第三相电压加入的影响如下：

(1) 对动态特性而言，第三相电压的加入反而削弱了一些记忆的作用，其值为8.7% Z_C，这是由于插入电压的相位和记忆电压不同相之故。

(2) 对稳态特性而言，第三相电压的加入并未产生一些有益的偏移，这主要是由于出口K³故障时，三相电压均为另，插入电压亦为另。

为了比较在图十四(2)中画出了K³故障下加入第三相电压的LH—11正向动态和稳态动作园。

八、评“同径园”法

(一) 所谓“同径园”法的实质

已如前述，分析整流式阻抗继电器的经典方法是绝对值不等式的边界条件，转为由模值、幅角表示的三角方程式。当两电气量绝对值比较器中的每臂具有三个输入量时，它的幅值展开可以由三个输入量的余弦定理来进行，兹推证如下：

$$\left| \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \pm \dot{V}_3 \right|^2 = (\dot{V}_1 + \dot{V}_2 \pm \dot{V}_3) (\dot{V}_1 + \dot{V}_2 \pm \dot{V}_3)^*$$

$$= \left| \dot{V}_1 \right|^2 + \left| \dot{V}_2 \right|^2 + \left| \dot{V}_3 \right|^2 + (\dot{V}_1 \dot{V}_2^* + \dot{V}_1^* \dot{V}_2) \pm (\dot{V}_2 \dot{V}_3^* + \dot{V}_2^* \dot{V}_3) \pm (\dot{V}_3 \dot{V}_1^* + \dot{V}_3^* \dot{V}_1)$$

$$= V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + 2 V_1 V_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) \pm 2 V_2 V_3 \cos(\phi_2 - \phi_3) \pm 2 V_3 V_1 \cos(\phi_3 - \phi_1) \dots\dots\dots (8.1)$$

“继电器”76年1期提出的所谓“同径园”法，充其量只不过是实现上述的展

开, 该文罗列大量的三角公式, 而却把继电器动作方程的推导过程以一笔带过, 但依然掩盖不了它繁锁不堪的数学方法, 读者是不难自明的, 因而它绝不是什么“新方法”。

此外“同径园”的概念亦完全是多余的, 作为动作边界约束方程的条件是 $\left| \dot{V}_{动} \right| = \left| \dot{V}_{制} \right|$, 而绝不是 $\left| \dot{V}_{动} \right| = \left| \dot{V}_{制} \right| = \text{常数}$, 因而本来就不存在以如此电压向量概念来表征的园。

所谓“同径园”方法中的“同径比”恒为 $\frac{1}{2}$, 这只不过是它先合成 $(\dot{V}_1 + \dot{V}_2)$, 然后取对角线中点, 以 $-\frac{1}{2}(\dot{V}_1 + \dot{V}_2) \pm \frac{1}{2}\dot{V}_3$ 来求总结果罢了, 可见“同径园”法是毫无意义的。

(二) 阻抗继电器动作方程的轨迹

对LH-11而言, 在计及一般不平衡因素下, 阻抗继电器的动作方程由本文用 正弦逻辑向量理论推出的结果如: (5.1)、(5.3)、(5.5)、(5.6) 各式。它们分别是正、反向故障下的动态特性和稳态特性方程, 根据径弦转角定理显然它们都是园, 它们是以 Z_k 为复变数的动作园 (第二种表示法)。

由“同径园”法推出的普遍公式如(8.2)式, 这个结果也是正确的, 现写出如下:

$$\rho^2 - \rho \frac{2K(Z_1 - Z_2) \cos(\phi - \theta) + 2(J_1 Z_1 + J_2 Z_2) \cos(\phi - \theta + \beta)}{(J_1^2 - J_2^2) + 2K(J_1 + J_2) \cos \beta} + \frac{Z_1^2 - Z_2^2}{(J_1^2 - J_2^2) + 2K(J_1 + J_2) \cos \beta} = 0 \quad \dots\dots\dots (8.2)$$

为了书写简便, 本文引用简写符号, 它和“同径园”法一文符号对应关系如下表:

本 文	ρ	ϕ	θ	β	Z_1	Z_2	J_1	J_2
“同径园”法	Z_{CL}	ϕ_k	ϕ	β	Kk_1	Kk_2	KJ_1	KJ_2

其中 ρ 和 ϕ 是极坐标变数, 它相当于本文感受阻抗 Z_ρ 的模值和幅角, 因而(8.2)式是以 Z_ρ 为复变数的动作园 (第一种表示法)。

根据动态特性和稳态特性的区别, 可相应选择 J_1 、 J_2 和 β 的参数, 显然它们也应当是园。但“同径园”一文中竟认为当 $\beta \neq 0$; $Z_1 \neq Z_2$; $J_1 \neq J_2$ 的一般情况下, (8.2)式的轨迹并不是园(?!), 这岂非和本文的结果矛盾! 澄清这一问题十分重要, 它对于验证本文由正弦逻辑向量理论所得的结果是否正确, 和“同径园”法的结果是否相符, 这是人们颇为关切的问题。

诚然由(8.2)式表达的三角方程的型式比较复杂, 人们不容易一眼就看出它是园的方程。详细推导出这一园轨迹的园心, 半径等参数; 证明轨迹存在的条件; 说明它和本文的结果相符, 可以更充分体现正弦逻辑向量理论的优越, 因而以下的推导虽繁而仍

是很必要的。

根据数学手册可知：如下极坐标方程的轨迹是圆，即

$$\rho^2 + \rho [H \cos \phi + G \sin \phi] + T = 0 \quad \dots\dots\dots (8.3)$$

为了证明此点，将它转为直角坐标方程就很明显，可得：

$$X^2 + Y^2 + HX + GY + T = 0 \quad \dots\dots\dots (8.4)$$

显然园心坐标为：

$$X_0 = -\frac{H}{2}, Y_0 = -\frac{G}{2} \quad \dots\dots\dots (8.5)$$

园心离坐标原点的距离简称为：园心距，标以 ρ_0 。显然它为：

$$\rho_0 = \sqrt{X_0^2 + Y_0^2} = \frac{1}{2} \sqrt{H^2 + G^2} \quad \dots\dots\dots (8.5a)$$

园的半径R为

$$R = \frac{1}{2} \sqrt{H^2 + G^2 - 4T} = \sqrt{\rho_0^2 - T} \quad \dots\dots\dots (8.6)$$

为了验证(8.2)式最终也可化为(8.3)式，先用简化符号改写(8.2)式如下：

$$\rho^2 - \rho \left[\frac{D}{A} \cos(\phi - \theta) + \frac{E}{A} \cos(\phi - \theta + \beta) \right] + \frac{F}{A} = 0 \quad \dots\dots\dots (8.7)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} D &= 2K(Z_1 - Z_2) \\ E &= 2(J_1 Z_1 + J_2 Z_2) \\ A &= (J_1^2 - J_2^2) + 2K(J_1 + J_2) \cos \beta \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (8.8)$$

只要把(8.7)式中的 $\cos(\phi - \theta)$ 和 $\cos(\phi - \theta + \beta)$ 用三角公式展开，(8.7)式就可转为(8.2)式的型式，即：

$$\rho^2 - \rho \left\{ \left[\frac{D}{A} \cos \theta + \frac{E}{A} \cos(\theta - \beta) \right] \cos \phi + \left[\frac{D}{A} \sin \theta + \frac{E}{A} \sin(\theta - \beta) \right] \sin \phi \right\} + \frac{F}{A} = 0 \quad \dots\dots\dots (8.9)$$

下面推导园心距 ρ_0 。

$$\begin{aligned} \rho_0 &= \frac{1}{2} \sqrt{\left[\frac{D}{A} \cos \theta + \frac{E}{A} \cos(\theta - \beta) \right]^2 + \left[\frac{D}{A} \sin \theta + \frac{E}{A} \sin(\theta - \beta) \right]^2} \\ &= \frac{\sqrt{D^2 + E^2 + 2DE \cos \beta}}{2A} \quad \dots\dots\dots (8.10) \end{aligned}$$

园的半径R可推出如下：

$$R = \sqrt{\rho_0^2 - T} = \frac{\sqrt{D^2 + E^2 + 2DE \cos \beta - 4AF}}{2A} \quad \dots\dots\dots (8.11)$$

将(8.8)式的结果代入上述两式，可得：

$$\rho_0 = \frac{\sqrt{K^2(Z_1 - Z_2)^2 + (J_1 Z_1 + J_2 Z_2)^2 + 2K(Z_1 - Z_2)(J_1 Z_1 + J_2 Z_2) \cos \beta}}{(J_1^2 - J_2^2) + 2K(J_1 + J_2) \cos \beta} \quad \dots\dots\dots (8.12)$$

$$R = \frac{\sqrt{K^2 (Z_1 - Z_2)^2 + (J_1 Z_2 + J_2 Z_1)^2 - 2K(Z_1 - Z_2)(J_1 Z_2 + J_2 Z_1) \cos \beta}}{(J_1^2 - J_2^2) + 2K(J_1 + J_2) \cos \beta} \quad \dots\dots\dots (8.13)$$

由于上述 ρ_0 和 R 两式中的分子根号内的值必为正数，因而可知园轨迹必定存在，可见阻抗继电器动作特性的普遍公式(8.2)的轨迹是园。

下面验证一个例子：当 $\beta = 0$ ，但 $Z_1 \neq Z_2$ ， $J_1 \neq J_2$ 时有：

$$\rho_0 = \frac{K(Z_1 - Z_2) + J_1 Z_1 + J_2 Z_2}{J_1^2 - J_2^2 + 2K(J_1 + J_2)} \quad \dots\dots\dots (8.14)$$

$$R = \frac{K(Z_1 - Z_2) - J_1 Z_2 - J_2 Z_1}{J_1^2 - J_2^2 + 2K(J_1 + J_2)} \quad \dots\dots\dots (8.15)$$

由于 $\beta = 0$ ，则坐标原点和园心之间的连线必和阻抗继电器的最大灵敏角的方向相同，因而由上述联线和动作园相交的两端点 Z_A 、 Z_B 可求出如下：

$$Z_A = \rho_0 - R = \frac{Z_1 + Z_2}{2K + J_1 - J_2} \quad \dots\dots\dots (8.16)$$

$$Z_B = \rho_0 + R = \frac{Z_1 - Z_2}{J_1 + J_2} \quad \dots\dots\dots (8.17)$$

当考虑正向故障的稳态特性时，用本文正弦逻辑向量理论得到的结果为(5.5)式，

由于 $\beta = 0$ ，则可知 $(\frac{K+N}{M})$ 为正实系数，于是有：

$$\dot{S}_3 = j \frac{Z_K - (\frac{K}{K+N})Z_Y}{Z_K - Z_F} \quad \dots\dots\dots (8.18)$$

注意此时本文和“同径园”法之间存在如下参数关系，即

$$\left. \begin{aligned} J_1 &= M + N; & J_2 &= M - N \\ Z_1 &= Z_Y + Z_f; & Z_2 &= Z_Y - Z_f \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8.19)$$

将此结果代入(8.16)、(8.17)中可得：

$$\left. \begin{aligned} Z_A &= \frac{2Z_Y}{2K + 2N} = \left(\frac{K}{K+N}\right)Z_Y \\ Z_B &= \frac{2Z_f}{2M} = Z_f \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8.20)$$

可见用正弦逻辑向量理论得到的结果，和“同径园”法的结果完全相同。但是用正弦逻辑向量理论来分析、表达却要简单、明瞭得多，这是新理论较经典理论要优越的地方。

九、结 论

1. 用正弦逻辑向量和第二种动作区表示法，能使阻抗继电器的动作方程和 Z_k 平面上的动作区图示之间建立复数 \Rightarrow 几何的直观联系。当两比较回路不平衡（即 $N \neq 0$ 、 $Z_f \neq 0$ ），且频率不满足相位谐振条件（ δ 即 $\neq 0$ ）时，整流式方向阻抗继电器的动

作方程用正弦逻辑向量(5.1)式表达十分简明,根据弦径转角定理一看可知它依然是圆。若按经典办法标记公式十分繁锁,物理、几何概念均不明确,如“继电器”76年1期中曾得出当 $\beta \neq 0$, $Z_1 \neq Z_2$, $J_1 \neq J_2$ (它们分别相当于 $\delta \neq 0$, $Z_1 \neq 0$, $I_N \neq 0$ 的条件)时继电器动作轨迹不再是圆这样错误结论来。

2.第二种表示动作区方法的优点,在于它直接和系统短路阻抗 Z_k 的概念相联系,故它能直接表示非金属性短路允许弧阻的“弹性区”范围。此外它还可以表征故障相或非故障相的动作圆图。

3.在 Z_k 平面上可充分体现记忆回路的消除死区的效用。一般动作臂和制动臂要绝对平衡事实上是不可能的,而记忆回路所具有的不对称有益偏移的效应,在理论上指明了一个允许不平衡误差范围,使实际调试有了可能,一般多采用略带制动偏移的特性。

4.本文还分析了加入第三相电压之后,对LH-11继电器的影响。它充分体现了正弦逻辑向量理论在分析问题时的简明和确切。

5.正弦逻辑向量理论是一更为普遍的理论。它可以方便地分析:(1)幅值比较器、(2)相位比较器、(3)多输入量相位重合比较器等原理构成的阻抗继电器特性;它也可以方便地分析:记忆、不平衡、振荡、低频、弧阻、加入第三相电压等各种因素影响下的故障相或非故障相的阻抗继电器性能。

全面理论请详见作者所写「正弦逻辑向量和相全阻抗继电器」一文。