

模拟电势失磁保护的 analysis

成都科技大学 杨嗣彭
贵州电力中试所 吴世楹

同步发电机在运行中, 由于励磁系统故障或运行人员误操作常常引起发电机部分地或全部地失去励磁, 故发电机失磁故障乃是电力系统运行中比较常见的一种故障。机组失磁后, 立即由向系统输送无功功率转变为从系统吸收无功功率, 使系统电压水平下降, 在系统的无功功率缺额较严重时, 系统电压严重下降有时会导致电力系统稳定的破坏, 引起大面积停电。因此近年来国内外电力工作者对失磁保护引起了足够的重视, 做了大量的研究工作, 有的按失磁机组的机端测量阻抗为判据; 有的以失磁机组的功角大小为判据; 有的以失磁机组所吸收的无功功率的大小为判据等等。目前我国研制成了几种以静稳边界为判据的失磁继电器并在某些大、中机组上投入了运行。这类继电器除主判据外, 为了提高可靠性及满足系统某些特定运行方式的要求, 还增设了诸如系统低电压判据以及转子低电压判据, 故结构较复杂, 造价较高, 但对于大、中机组还是很适用的。我们着眼于减少判据, 简化继电器结构从而提高继电器可靠性以及又能满足与系统联系较强的中型机组诸如单机容量50MW至100MW左右机组失磁保护的 need 出发, 试制了所谓模拟电势失磁保护继电器。

该装置是在文[1]的基础上作了一些变动和改进后提出的一套保护装置(图1)。在理论上进行了分析, 在实验室进行了大量的试验试制工作, 并于1978年5月在贵州电力系统贵阳发电厂#1/机进行失磁——失步——再同步的试验中进行了现场试验[5], 表明该失磁检测继电器动作可靠, 具有使用的价值。本文对该失磁保护进行了分析。

(一) 模拟电势失磁保护的基本原理和接线

1977年苏联电站杂志提出了模拟电势失磁保护, 它是利用同步发电机在正常运行, 外部短路, 同步振荡以及在有励磁下的异步运行时, 其内电势大于机端电压, 而在机组失磁时, 其内电势小于机端电压的这一特点, 提出以比较机端电压和发电机所谓模拟内电势(以下统称模拟电势)这两个绝对值, 即把前者作为动作量, 而后者作为制动量来确定保护装置是否动作的唯一判据。国内已有同志对它进行了分析[2], 得出把此保护的 action 特性反映到机端阻抗平面上还是一个阻抗园。

本文所提出的接线图(1)与文[1]接线的不同点在于:

(1) 将机端电压 U_{ab} 经自耦变压器变压后作为动作量, 其值为:

$$U'_{ab} = T_H U_{ab} \quad (1)$$

式中 T_H ——付边电压与原边电压之比。

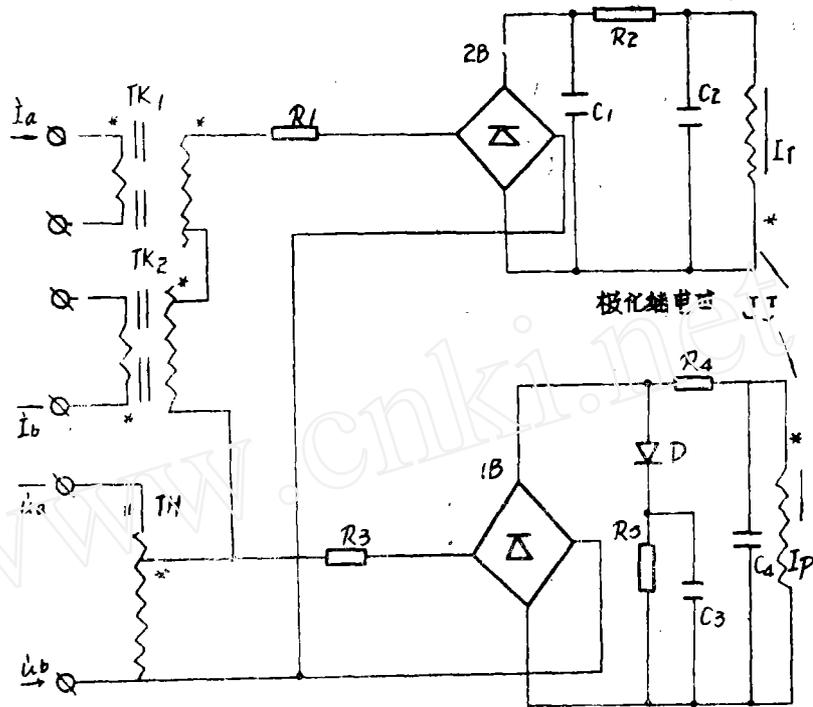


图1 失磁继电器接线图

从试验和分析可以看到选择不同的 T_H ，可以改变阻抗圆的大小和位置，这样就可以用改变 T_H 的值，来适应机组失磁保护整定的需要。

(2) 把文 [1] 中的一个电抗变换器 $T K^*$ 改为两个电抗变换器 $T K_1$ 和 $T K_2$ 。将 A、B 两相电流 I_a 和 I_b 分别通入 $T K_1$ 和 $T K_2$ 的原边，则在两者的付边所产生的电压降为各自通过的电流与其电抗的乘积，总的电压降 $\Delta u'$ 为该两个电压降的向量和。其值为：

$$\Delta \dot{u}' = \dot{I}_a X_a - \dot{I}_b X_b \quad (2)$$

式中 X_a 、 X_b ——分别为 $T K_1$ 和 $T K_2$ 的电抗值，把与发电机电流成正比的电压降 $\Delta \dot{u}'$ 和 \dot{u}'_{ab} 向量相加其值为：

$$\begin{aligned} \dot{E}'_{ab} &= \dot{u}'_{ab} + \Delta \dot{u}' \\ &= \dot{u}'_{ab} + j (\dot{I}_a X_a - \dot{I}_b X_b) \end{aligned} \quad (3)$$

作为制动量。

必须指出： u'_{ab} 并不是直接的机端电压，因此不能把 E'_{ab} 作为模拟电势。将 (3) 式两边同除以 T_H ，则得：

*文 [2] 作者把原文 [1] 中的电抗变换器当作两个进行分析，从该分析中可以看出两个变换器有一定的优点，所以我们也采用了两个电抗变换器。

$$\begin{aligned}\frac{\dot{E}'_{ab}}{T_H} &= \frac{1}{T_H} (\dot{u}'_{ab} + \Delta \dot{u}') \\ &= \frac{1}{T_H} [\dot{u}'_{ab} + j (\dot{I}_a X_a - \dot{I}_b X_b)] \\ \dot{E}_{ab} &= \dot{u}_{ab} + j \frac{1}{T_H} (\dot{I}_a X_a - \dot{I}_b X_b)\end{aligned}\quad (4)$$

式中 $\dot{E}_{ab} = \dot{E}'_{ab} / T_H$ 为发电机的模拟电势,

$\Delta \dot{u}'_{ab} = j \frac{1}{T_H} (\dot{I}_a X_a - \dot{I}_b X_b)$ 为发电机定子绕组中的模拟电压降 ($\Delta \dot{u}$)。将

(4) 式中的电流 \dot{I}_a 、 \dot{I}_b 改用 $\dot{I}_{ab} = \dot{I}_a - \dot{I}_b$ 来表示, 可改写为:

$$\begin{aligned}\dot{E}_{ab} &= \dot{u}_{ab} + \dot{I}_{ab} \frac{1}{T_H} \left[\frac{1}{2\sqrt{3}} (x_a - x_b) + j \frac{1}{2} (x_x + x_b) \right] \\ &= \dot{u}_{ab} + \dot{I}_{ab} \frac{1}{T_H} (R'_m + j x'_m) \\ &= \dot{u}_{ab} + \dot{I}_{ab} (R_m + j x_m) \\ &= \dot{u}_{ab} + \dot{I}_{ab} Z_m\end{aligned}\quad (5)$$

式中 Z_m , R_m 和 X_m ——发电机定子绕组的模拟阻抗、模拟电阻和模拟电抗; 而

$$R_m = R'_m / T_H$$

$$R'_m = \frac{1}{2\sqrt{3}} (x_a - x_b) \quad (6)$$

$$x_m = x'_m / T_H$$

$$x'_m = \frac{1}{2} (x_a + x_b) \quad (7)$$

(3) 在滤波回路作了某些改进, 使电流波形比较平整, 这样极化继电器的动作特性也较稳定。

(二) 模拟电势失磁继电器动作特性的数学分析

电压 \dot{u}'_{ab} 经整流滤波后, 在极化继电器 JJ 的工作绕组中流过电流 I_p , 因而产生一个动作磁化力。通过试验证实, 由于整流二极管工作在线性区, 动作磁化力 $F_p - 5$ $|\dot{u}'_{ab}|$ 成正比变化, 并利用 (1) 式得:

$$F_p = K_1 |\dot{u}'_{ab}| = k_1 T_H |\dot{u}_{ab}| \quad (8)$$

同样, 极化继电器 JJ 的制动磁化力 F_T 与 $|\dot{E}'_{ab}|$ 成正比变化, 并利用 (4)、(5) 式得:

$$F_T = k_2 |\dot{E}'_{ab}| = k_2 T_H |\dot{E}_{ab}|$$

$$= k_2 T_H \left| \dot{u}_{ab} + \dot{I}_{ab} Z_m \right| \quad (9)$$

极化继电器动作应满足以下条件:

$$F_P - F_T \geq F_C$$

式中 F_C ——极化继电器 JJ 的工作磁化力, 实验表明它是一个不能忽略不计的定值。则动作的边界条件可写为:

$$F_P - F_T = F_C^2 \quad (10)$$

将(8)、(9)式代入上式:

$$k_1 T_H \left| \dot{u}_{ab} \right| - k_2 T_H \left| \dot{u}_{ab} + \dot{I}_{ab} Z_m \right| = F_C$$

$$k_1 T_H \left| \dot{u}_{ab} \right| - F_C = k_2 T_H \left| \dot{E}_{ab} \right|$$

用 u_{ab} 、 E_{ab} 分别表示为 \dot{u}_{ab} 和 \dot{E}_{ab} 的模, 则上式可改写为:

$$k_1 T_H u_{ab} - F_C = k_2 T_H E_{ab}$$

将上式两边各乘以 $\frac{u_{ab}}{k_1 T_H u_{ab} - F_C}$, 得:

$$u_{ab} = \frac{k_2 T_H u_{ab}}{k_1 T_H u_{ab} - F_C} E_{ab} = \alpha E_{ab} \quad (11)$$

$$\text{式中 } \alpha = \frac{k_2 T_H u_{ab}}{k_1 T_H u_{ab} - F_C} = \frac{u_{ab}}{E_{ab}} = \left| \frac{\dot{u}_{ab}}{\dot{E}_{ab}} \right| \quad (12)$$

为了保证继电器的动作可靠性, E_{ab} 必须小于 u_{ab} , 即 $\alpha > 1$ 。(12)式右边分子分母

各除以 $\left| \dot{u}_{ab} \right|$, 并令 $Z_f = \frac{u_{ab}}{I_f}$ 为发电机的机端阻抗, 则(12)式变为:

$$\alpha = \left| \frac{1}{1 + \frac{Z_m}{Z_f}} \right| = \left| \frac{Z_f}{Z_f + Z_m} \right|$$

再将上式两边各乘以 $|Z_f + Z_m|$, 则得:

$$\alpha |Z_f + Z_m| = |Z_f| \quad (13)$$

在 $\alpha > 1$ 时, 上式展开后得 [2]:

$$\left(R_f + \frac{\alpha^2}{\alpha^2 - 1} R_m \right)^2 + \left(x_f + \frac{\alpha^2}{\alpha^2 - 1} x_m \right)^2$$

$$= \frac{\alpha^2}{(\alpha^2 - 1)^2} (R_m^2 + x_m^2) \quad (14)$$

它是一个圆方程式。其

$$\text{圆心: } x_c = -\frac{\alpha^2}{\alpha^2 - 1} R_m = -\frac{\alpha^2}{\alpha^2 - 1} \cdot \frac{R'_m}{T_H} \quad (15)$$

$$y_c = -\frac{\alpha^2}{\alpha^2 - 1} x_m = -\frac{\alpha^2}{\alpha^2 - 1} \cdot \frac{x'_m}{T_H} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{半径: } r &= \frac{\alpha}{\alpha^2 - 1} \sqrt{R_m'^2 + x_m'^2} \\ &= \frac{\alpha}{(\alpha^2 - 1)T_H} \sqrt{(R_m')^2 + (x_m')^2} \end{aligned} \quad (17)$$

按以上分析, 讨论失磁继电器的动作边界如下:

(1) 当 x_a 和 x_b 选定, 即 R_m' 和 x_m' 为定值时, 阻抗园与 T_H 和 u_{ab} 的关系。由以上分析可见, 阻抗园的园半径和园心位置随 α 而变, 而 α 又随 $T_H u_{ab}$ 而变 (12式), 因此改变自耦变压器的抽头或机端电压的变化都会引起阻抗园的半径和园心位置的变化, 我们对在 u_{ab} 一定时, 改变 T_H , 进行试验, 证实了园半径和园心在 $R-X$ 平面的坐标是随 T_H 而变化的, 如图 2 所示。同样, 因为机组失磁时机端电压 u_{cb} 要下降, u_{ab} 的下降也必然引起阻抗园的半径和园心的变化。这些量随 T_H 和 u_{ab} 变化的分析见附录

当 u_{ab} 下降到使 (12) 式中的分母 $k_1 T_H u_{ab} - F_c < 0$ 时, 则意味着执行元件极化继电器的动作磁化力已小于其工作磁化力, 极化继电器将无法动作, 出现了失磁保护继电器的死区。试验证明死区发生在机端电压为其额定电压的 50% 左右。因此如欲降低死区电压, 尚需采取提高执行元件的灵敏度或其他有效措施。目前该装置所采用的极化继电器采作为执行元件, 在机组失磁时机端电压下降在 50% 以上时还是可以工作的。

(2) 当 x_a/x_b 为定值时, 由 (15)、(16)、(6) 和 (7) 式可以得到园心向量对横轴的偏移角 δ 可由下式决定:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta &= \frac{y_c}{x_c} = \frac{x_m'}{R_m'} = \frac{\frac{1}{2}(x_a + x_b)}{2\sqrt{3}(x_a - x_b)} \\ &= \frac{\sqrt{3}(x_a + x_b)}{x_a - x_b} = \frac{\sqrt{3}\left(1 + \frac{x_a}{x_b}\right)}{1 - \frac{x_a}{x_b}} \end{aligned} \quad (18)$$

(i) 当 $x_a = x_b$ 时, $\operatorname{tg} \delta = \infty$, $\delta = -90^\circ$ (图 2), 园心落在纵轴的负值上, 阻抗园对称于纵轴, 这与通常的阻抗型失磁继电器并无多大差别。

(ii) 当 $x_a > x_b > 0$ 时, $\operatorname{tg} \delta > 0$, x_c 和 y_c 均为负值, 园心处于第 III 象限, 使园偏向第 III 象限。这样机组失磁后, 机端阻抗进入园的时间就要延长, 显然这不是失磁保护

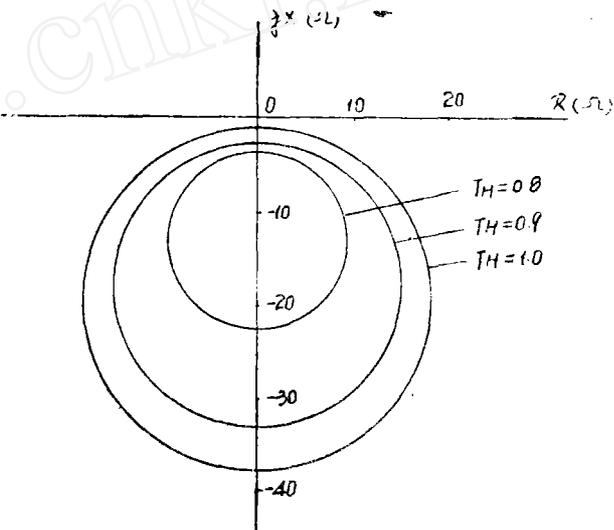


图 2 当 $u_{ab} = 100V$, $x_a - x_b = 2\Omega$ 时, 不同的 T_H 下的阻抗园。

所要求的特性。

(iii) 当 $x_b > x_a > 0$ 时, $\lg \delta < 0$, x_c 为正值而 y_c 为负值, 圆心处于第IV象限, 使园偏向第IV象限。这样失磁后, 机端阻抗进入园的时间就可以缩短, 加速了对失磁的反应。图3表明了 $x_b > x_a$ 时, 阻抗园偏向第IV象限的情况。

根据(18)式, 通过计算可得到不同的偏移角 δ 所对应的 x_a/x_b 值列于下表。

从表可见, 选择不同的 x_a/x_b 值, 圆心向量的偏移角也随着变化, 在 $\delta = -60^\circ$ 时, $x_a = 0$, 这可用电抗变换器 $T K_1$ 原边短路来达到。如欲 $\delta > -60^\circ$ 时, 则 $x_a < 0$, 可将 $T K_1$

原边输入反极性, 即使通入 $T K_1$ 原边的电流由 I_a 改接为 $-I_a$ 来达到。但必须注意不能过份要求圆心偏离纵轴往第IV象限偏移, 否则阻抗园会进入第I象限而限制了发电机的正常运行。要使整个园在横轴以下, 在机组失磁过程中应满足:

δ	-105°	-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	0°
$\lg \delta$	3.73	∞	-3.73	$-\sqrt{3}$	-1	$-\frac{1}{\sqrt{3}}$	0
x_a/x_b	2.73	1	0.363	0	-0.268	-0.5	-1

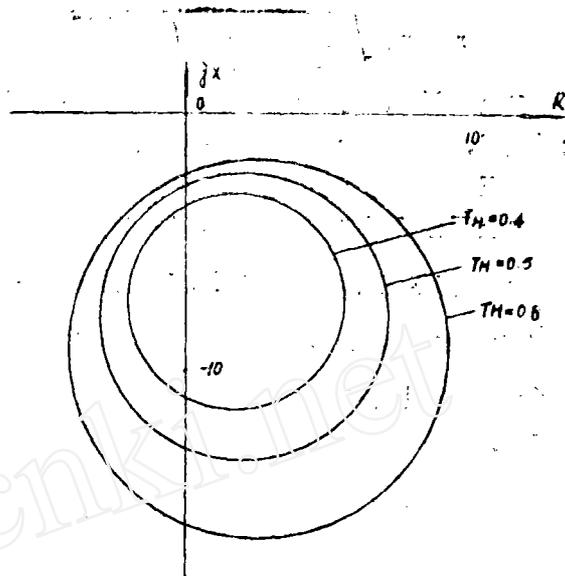


图3 当 $u_{ab} = 100V$, $x_a = 1\Omega$, $x_b = 3\Omega$ 时, 不同 T_H 下的阻抗园。

$$\frac{\alpha^2}{\alpha^2 - 1} \frac{x'_m}{T_H} > \frac{\alpha}{\alpha^2 - 1} \frac{1}{T_H} \sqrt{(R'_m)^2 + (x'_m)^2}$$

$$\alpha x'_m > \sqrt{(R'_m)^2 + (x'_m)^2}$$

$$(\alpha^2 - 1) \left[\frac{1}{2} (x_a + x_b) \right]^2 > \left[\frac{1}{2\sqrt{3}} (x_a - x_b) \right]^2$$

将上式两边开方, 由于 $x_b > x_a$, 右边应取负号, 得:

$$\sqrt{3} \sqrt{\alpha^2 - 1} (x_a + x_b) > x_b - x_a$$

$$x_a > \frac{1 - \sqrt{3} \sqrt{\alpha^2 - 1}}{1 + \sqrt{3} \sqrt{\alpha^2 - 1}} x_b \quad (19)$$

(3) 当 u_{ab} 、 T_H 和 x_a/x_b 均为定值时, 阻抗园与 $x_b(x_a)$ 大小的关系。在这种情况下, 由(12)、(17)和(18)式可知, α 和 δ 均为定值, 而园半径

$$r \alpha \sqrt{(R'_m)^2 + (x'_m)^2}$$

将(6)和(7)式代入上式, 得:

$$r \propto x_b \sqrt{\frac{1}{3} \left[1 + \frac{x_a}{x_b} + \left(\frac{x_a}{x_b} \right)^2 \right]} \quad (20)$$

由上式可见, x_a/x_b 一经确定以后, 阻抗圆的半径大小随 x_b 值成正比变化。如要增大阻抗圆, 可用增大 $x_b(x_a)$ 来达到。

(三) 模拟电势失磁继电器动作特性的向量图解分析

由上面分析可知, 失磁继电器的动作特性主要取决于 E_{ab} 和 u_{ab} 的数值大小。在 $\frac{u_{ab}}{E_{ab}} \geq \alpha$ 的整定值时, 继电器就动作。当 α 一旦选定后, 由于 (12) 式中 k_1 、 k_2 和 F_c 均为常数, 则 $T_H u_{ab}$ (即 u'_{ab}) 就为定值。现在 u'_{ab} 为一定时, 再对各种不同的 x_a/x_b , 从向量图来看 \dot{E}'_{ab} 、 \dot{I}_{ab} 和 \dot{u}'_{ab} 之间的关系, 确定继电器的动作特性和最大灵敏角。

(1) $x_a = x_b$

(i) 发电机因失磁而使定子电流超前于其端电压, 当超前角 $\varphi = 90^\circ$ (如图 4 所示), 即发电机供给纯电容性电流时, 电压降 $\Delta \dot{u}' = j(\dot{I}_a x_a - \dot{I}_b x_b)$, 利用 (5)、(6) 和 (7) 式得 $\Delta \dot{u}' = j \dot{I}_{ab} x_a$ 。从图 4 可见, $\Delta \dot{u}'$ 与 u'_{ab} 在相位上相差 180° , 使 $\dot{E}'_{ab} = \dot{u}'_{ab} + \Delta \dot{u}'$ 变为 $E_{ab} = u'_{ab} - \Delta u'$ 。这样要满足继电器的动作条件 $\frac{E_{ab}}{u_{ab}} = \frac{E'_{ab}}{u'_{ab}} = \alpha$ 所需的 $\Delta u'$ 最小, 也就是所需的定子电流最小, 与此相应的机端阻抗 ($Z_f = \frac{u_{ab}}{I_{ab}}$) 则为最大值,

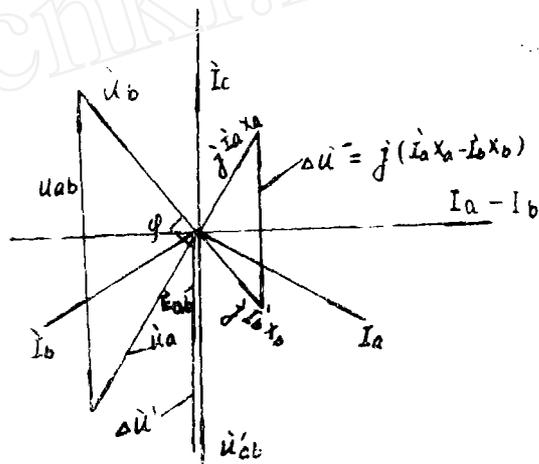


图 4 当 $x_a = x_b$ 发电机供纯容性电流时, E'_{ab} 和 u_{ab} 的相对关系

它处于 $R-X$ 平面 (图 5) 上的 X_A 点, 继电器的最大灵敏角 δ 为 -90° 。若增大定子电

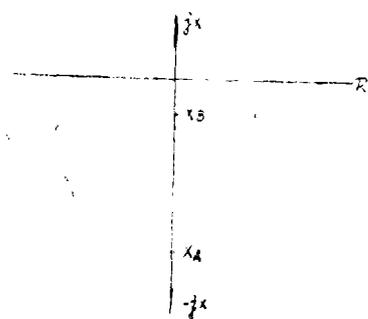


图 5 继电器在最大灵敏角下的 x_A 和 x_B 动作阻抗值

流, 使 $\Delta \dot{u}'$ 也增大, 而 E'_{ab} 随之减小, 继电器仍然动作, 再增大定子电流, 当 $\Delta u' > u'_{ab}$, E'_{ab} 的方向由原向下转为向上, 其值开始随着定子电流的继续上升而又加大, 直到 $\frac{u'_{ab}}{E'_{ab}} < \alpha$ 时, 继电器返回。在继电器返回后减小定子电流到 $\frac{u'_{ab}}{E'_{ab}} \geq \alpha$ 时, 继电器再度动作, 此时的电流值为继电器的最大动作电流, 与此相对应的机端阻抗则为最小值, 它处于 $R-X$ 平面 (图 5) 上的 x_B 点, x_B 也位于继电器的最大灵敏角下。

由上所述, 发电机因失磁而供纯容性电流时, 其机端阻抗在 $R-X$ 平面上是处于最大灵敏角 $\delta = -90^\circ$ 的 $-jx$ 轴上。当机端电抗在 $|x_B| < |x_f| < |x_A|$ 范围内时, 继电器均能保证可靠地动作。

(ii) 发电机因欠励磁而使定子电流超前于端电压, 继电器动作与否还是取决于 $\frac{u'_{ab}}{E'_{ab}}$ 之值。当其值大于整定的 α 值, 表示机组欠励磁已达到所不允许的程度。继电器动作而发出指令。

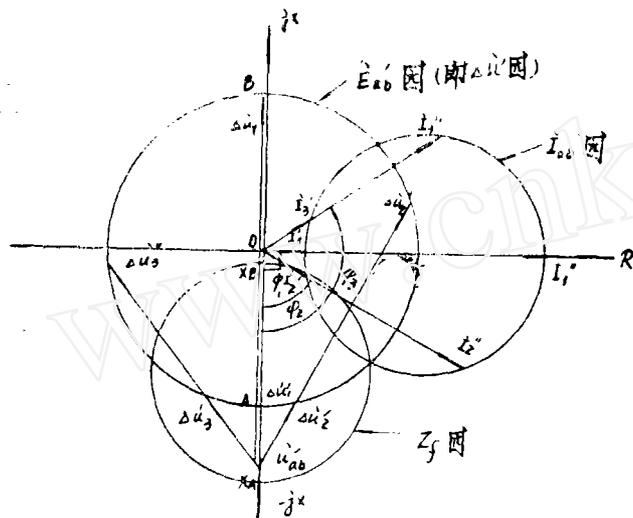


图6 继电器处于动作边界条件时, E'_{ab} 、 I_{ab} 和 Z_f 的轨迹

因为向量 $\Delta \dot{u}'$ 必定落在 E'_{ab} 园上, E'_{ab} 园也就是 $\Delta \dot{u}'$ 末端的轨迹, 因此 $\Delta \dot{u}'$ 末端的轨迹就是 E'_{ab} 园, 而 $\Delta u' = jI_b x$, x_a 又是定值, 这样 I_b 的轨迹也必定是个园, 落在园上的 I_2 和 I_2'' 是超前于 u'_{ab} 相位角 ϕ_2 ($\phi_2 < 90^\circ$ ——欠励磁同步发电机) 时的两个动作电流, 它所对应的电压降为 $\Delta u'_2$ 和 $\Delta u''_2$ 。同样, 落在园上的 I_3 和 I_3'' 是超前于 u'_{ab} 相位角 ϕ_3 ($\phi_3 > 90^\circ$ ——欠励磁同步电动机) 时的两个动作电流, 它所对应的电压降为 $\Delta u'_3$ 和 $\Delta u''_3$ 。

I_{ab} 的轨迹是一个不经过坐标原点的园, u'_{ab} 又是定值, 这样机端阻抗 $Z_f = \frac{u'_{ab}}{I_{ab}}$ 反映到 $R-X$ 平面也将是一个园周不经过坐标原点, 位于 III—IV 象限的下抛园, 该园与 $-jx$ 轴相交的两点即为 x_A 和 x_B 。

(iii) 当发电机过励磁运行时, 其定子电流将落后于端电压, 情况与 (ii) 相反, $u'_{ab} < E'_{ab}$, 继电器处于可靠的不动作状态。

(2) $x > x_b$

在这种情况下, 当定子电流超前于端电压 90° 时, 由于 $x_a \neq x_b$, $\Delta \dot{u}'$ 与 \dot{u}'_{ab} 在相位上不再相差 180° (图7) 而是 $180^\circ - \gamma$, E'_{ab} 也不再是 u'_{ab} 与 $\Delta \dot{u}'$ 的代数和而是

图6表示了在不同的 ϕ 值时, 继电器动作边界的 E'_{ab} 、 I_{ab} 和 Z_f 的轨迹。在 α 选定后 u'_{ab} 则为定值, 并把向量 u'_{ab} 固定在纵轴的负方向。因 $E'_{ab} = \frac{u'_{ab}}{\alpha}$, 则 E'_{ab} 的轨迹是一个以坐标原点的园心和以 E'_{ab} 为半径的一个园。该园上的 A 、 B 两点分别为 $u'_{ab} + \Delta u_1$ 和 $u'_{ab} + \Delta u_1''$ 两个向量和的末端。由于 Δu_1 和 $\Delta u_1''$ 均与 u'_{ab} 相位上相差 180° , 这种情况就是前面提到的发电机供纯容性电流 ($\phi = 90^\circ$) 时所产生的电压降, 与此对应的电流 I_1 和 I_1'' 即为最小和最大动作电流。

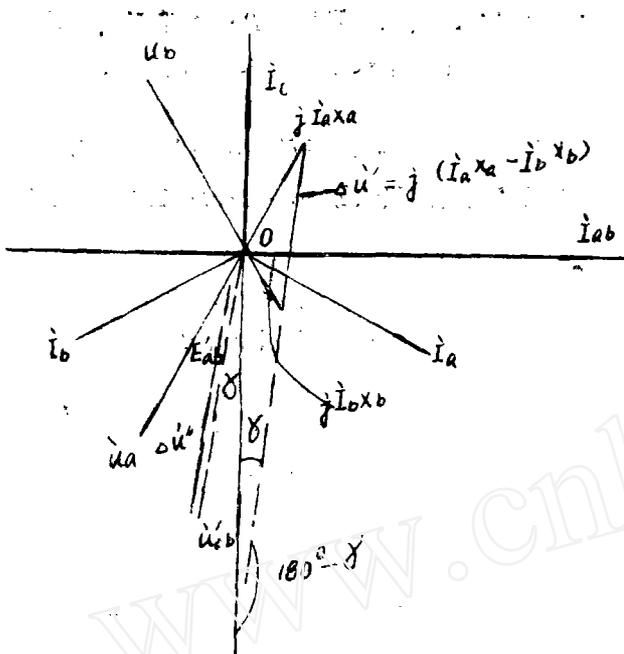


图7 当 $x > x_b$ 时, 继电器的最大灵敏角 $\delta = -(90^\circ + \gamma)$

向旋转 γ , 此时继电器的最大灵敏角 δ 为 $-(90^\circ + \gamma)$, 相应地图6中的阻抗园向第IV象限偏移(未画出)。

从上面向量图解分析可见, 模拟电势失磁继电器的阻抗特性可归纳如下:

当 $x = x_b$ 时, 继电器的阻抗特性为一园心处于 $-jx$ 轴上, 对称于 $-jx$ 轴的下抛阻抗园;
 当 $x > x_b$ 时, 继电器的阻抗特性为一向第III象限偏移的阻抗园;
 当 $x < x_b$ 时, 继电器的阻抗特性为一向第IV象限偏移的阻抗园。
 这就从图解向量关系形象地说明了模拟电势失磁继电器的数学表达式(14)式。

(四) 模拟电势失磁继电器在机组外部短路和系统振荡时的行为

u 与 $\Delta u'$ 的向量和。为了 E_{af} 仍能满足 u_{ab} 与 $\Delta u'$ 代数和的要求, 必须使 u_{ab} 向滞后方向(顺时针方向)旋转一个 γ 角(如图7中虚线所示), 也就是当定子电流超前于端电压 $90^\circ + \gamma$ 时, 继电器动作所需的定子电流为最小, 相应地图6中的阻抗园也要向滞后方向旋转 γ 角(未画出), 使阻抗园向第三象限偏移。此时继电器的最大灵敏角 δ 为 $-(90^\circ + \gamma)$ 。

(3) $x_a < x_b$

在这种情况下, 当定子电流超前其端电压 90° 时, 也由于 $x_a \neq x_b$, $\Delta u'$ 与 u'_{ab} 在相位上同样也不是相差 180° (图8), 而是 $180^\circ + \gamma$, 为了满足 u_{ab} 与 $\Delta u'$ 相位差 180° , 应将 u_{ab} 向反时针方

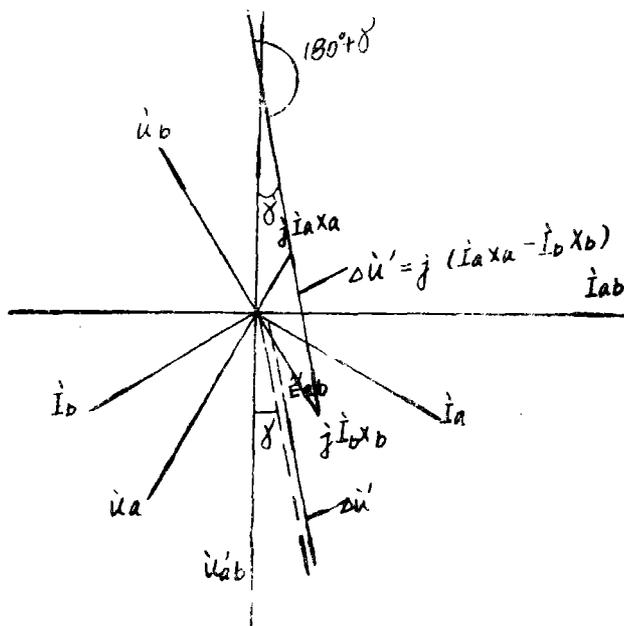


图8 当 $x < x_b$ 时继电器的最大灵敏角 $\delta = -(90^\circ - \gamma)$

为了确定失磁继电器是否误动作,应对机组外部短路和系统振荡时的行为进行分析。文[3]和[4]已对此作了分析。节省本文篇幅起见,这里不再赘述。

从上述分析可知,失磁继电器的动作特性反映到阻抗平面上是一个园。当机端阻抗进入园内,继电器就动作,反之则不动作。至于机组外部短路和系统振荡时是否误动,主要还是取决于这两种情况下的机端阻抗值。已有分析证实,当机组外部发生金属性短路时,机端阻抗均处于横轴之上,因继电器的阻抗园在横轴之下,所以继电器是不会误动作的,动模试验也证实了这一点。若故障点存在过渡电阻时,在个别短路(如机端BC两相短路时)情况下,机端阻抗有可能进入阻抗园,如将失磁保护动作附加以延时与外部短路主保护时限相配合,这种误动是可以避免的。

在全相运行时,发电机与系统间发生振荡,其机端阻抗可按式表示:

$$Z_f = \frac{j(x'_d + x_{22})}{\frac{E_f}{u_{22}} e^{j\theta} - 1} + jx_t \quad (21)$$

式中 E_f —— 系统振荡时的发电机电势,

θ —— E_f 超前 u_{22} 的相角。

当 $E_f/u_{22} = 1$ 时, Z_f 的轨迹是一经过纵轴 $\frac{1}{2}j(x_{22} - x'_d)$ 点的水平线,在系统联系电抗 x_{22} 比较小的情况下, x_{22} 和 x'_d 都因比较小而相差不大,因此它是一条接近横轴的水平线。

当 $E_f/u_{22} > 1$ 时,表明发电机在过激的情况下发生振荡,振荡时机端阻抗轨迹是位于横轴之上的一个阻抗园,失磁继电器不会误动作。

当 $E_f/u_{22} < 1$ 时,表明发电机在欠激或部分失磁情况下振荡,此时机端阻抗轨迹是位于横轴之下的阻抗园,该轨迹如进入继电器的阻抗园内,则失磁继电器是会动作的。

(五) 模拟电势失磁继电器整定原则讨论

(1) 继电器应按机端电压对模拟电势的比值来整定,即按 α 整定, α 值在一定程度上反映了的欠激程度,一般取为 $1.3 \sim 1.6$ 。 α 值一经取定即决定了机组的允许失磁程度,同时表明了机组运行中所允许的欠励磁程度。

(2) 确定 α 值以后,可根据计算或实测机组失磁(最严重的全失磁故障)时的机端电压,选择自耦变压器的抽头 T_H 及电抗变换器的电抗值,经试验计算出反映在 $R-X$ 平面上的阻抗园,并使 $-jx$ 轴上的 $|x_A| > x_d$, $|x_B| < x'_d$ 。

(3) 确定继电器的偏移度。如需提早机组失磁继电器的动作时间,在满足以上两个条件的前提下,可将继电器的阻抗园向第四象限偏移,但在电抗选择时仍应满足(19)式,以免发生误动作。

(六) 几点看法

(1) 本文所述的模拟电势失磁继电器可适用在与系统联系较强、系统容量又较大的中型机组上,它是一种结构简单、价格低廉、动作可靠的失磁保护继电器

(2) 本保护利用改变 T_H 抽头及电抗变换器的电抗值来改变特性阻抗园的大小和

置位, 利用改变 x_b/x_a 的比值来改变阻抗圆的偏移角, 以满足使用该装置的发电机组的整定要求。

(3) 如果按上节整定原则来整定继电器, 它就可可在机组外部短路和系统振荡时不至于发生误动作。

(4) 动作特性的整定必须计及失磁机组机端电压的下降程度。因此, 使用本保护时应事先计算一下(或试验一下)失磁机组的机端电压水平。根据这个电压水平来整定反映到 $R-X$ 平面上的继电器特性。失磁时机端电压下降到继电器死区电压以下, 或接近死区电压使可靠性不足时, 就不能采用本保护。

(5) 降低死区电压是本保护有待继续进行的工作

最后, 应当说明, 由于我们水平有限, 错误难免, 愿此, 恳请同志们批评指正。

附 录:

模拟电势失磁继电器阻抗圆的半径和园心坐标 x_c 和 y_c 随 $T_H U_H$ 变化关系的分析。

$$\text{由(12)式 } \alpha = \frac{k_2 T_H u_{ab}}{k_1 T_H u_{ab} - F_c}$$

$$\text{即 } \frac{1}{\alpha} = \frac{k_2}{k_1} - \frac{F_c}{k_2 T_H u_{ab}} \quad (22)$$

上式中 k_1 、 k_2 和 F_c 均为常数, 当 $T_H u_{ab}$ 下降, 则 α 增大; 反之, α 减少。

在 $\alpha > 1$ 时, 继电器动作边界为一园, 由(15), (16)和(17)式得:

$$x_c = -\frac{\alpha^2 R'_m}{(\alpha^2 - 1) T_H}$$

$$|X_c| = \frac{\alpha^2}{(\alpha^2 - 1) T_H} |-R'_m| \quad (23)$$

$$y_c = -\frac{\alpha^2 x'_m}{(\alpha^2 - 1) T_H}$$

$$|y_c| = \frac{\alpha^2}{(\alpha^2 - 1) T_H} |-x'_m| \quad (24)$$

$$r = \frac{\alpha}{(\alpha^2 - 1) T_H} \sqrt{R'^2_m + x'^2_m} \quad (25)$$

在 x 、 x_b 选定后, R'_m 和 x'_m 为定值, 今分别讨论园半径 r 和园心坐标 x_c 、 y_c 随 T_H 和 U_{ab} 的变化规律。

(一) T_H 为定值时, r 、 x_c 和 y_c 随 u_{ab} 的变化规律

将(23) — (25)式分别对 α 求导得:

$$\frac{d r}{d \alpha} = \frac{-(\alpha^2 + 1)}{(\alpha^2 - 1) T_H} \sqrt{R'^2_m + x'^2_m} \quad (26)$$

$$\frac{d |x_c|}{d \alpha} = \frac{-2 \alpha}{(\alpha^2 - 1)^2 T_H} |-R'_m| \quad (27)$$

$$\frac{d |y_c|}{d \alpha} = \frac{-2\alpha}{(\alpha^2 - 1) T_H} | -x'_m | \quad (28)$$

以上三式的右边均为负值, 这表明 r 、 $|x_c|$ 和 $|y_c|$ 均随 α 增大而减小, 而 α 的增大又因 u_{ab} 的下降所引起。因此, 当 T_H 一定时, 阻抗网随 u_{ab} 的下降而变小, 该网的圆心随 u_{ab} 的下降表 $R-X$ 平面上则向坐标原点靠近。

(二) u_{ab} 为定值时, r 、 x_c 和 y_c 随 T_H 的变化规律

把 (22) 式变换后得:

$$\frac{1}{T_H} = \frac{u_{ab}}{F_c \alpha} (k_1 \alpha - k_2) \quad (29)$$

将 (29) 式代入 (23) — (25) 式:

$$r = \frac{u_{ab}}{F_c (\alpha^2 - 1)} (k_1 \alpha - k_2) \sqrt{R'_m{}^2 + X'_m{}^2} \quad (30)$$

$$|x_c| = \frac{u_{ab} (k_1 \alpha^2 - k_2 \alpha)}{F_c (\alpha^2 - 1)} | -R'_m | \quad (31)$$

$$|y_c| = \frac{u_{ab} (k_1 \alpha^2 - k_2 \alpha)}{F_c (\alpha^2 - 1)} | -X'_m | \quad (32)$$

再将 (30) — (32) 式分别对 α 求导

$$\frac{d r}{d \alpha} = \frac{u_{ab} [-k_1 (\alpha^2 + 1) + 2k_2 \alpha]}{F_c (\alpha^2 - 1)^2} \sqrt{R'_m{}^2 + X'_m{}^2} \quad (33)$$

$$\frac{d |x_c|}{d \alpha} = \frac{u_{ab} [k_2 (\alpha^2 + 1) - 2k_1 \alpha]}{F_c (\alpha^2 - 1)^2} | -R'_m | \quad (34)$$

$$\frac{d |y_c|}{d \alpha} = \frac{u_{ab} [k_2 (\alpha^2 + 1) - 2k_1 \alpha]}{F_c (\alpha^2 - 1)^2} | -X'_m | \quad (35)$$

讨 论:

(1) r 随 α 和 T_H 的变化关系

从 (33) 式可见, 当此式右边

$$-k_1 (\alpha^2 + 1) + 2k_2 \alpha < 0 \quad (36)$$

时, 则 $\frac{d r}{d \alpha}$ 为负值。

(i) 当 $k_1 > k_2$ 时

由于 $k_1 > k_2$ 和 $\alpha^2 + 1 > 2\alpha$, (36) 式条件必定满足,

则 $\frac{d r}{d \alpha}$ 必为负值。因此 r 随 α 的增大而减小, 即 r 随 T_H 的减小而减小。

(ii) 当 $k_1 < k_2$ 时

根据 (36) 式的条件, 经运算得:

$$\text{当 } \alpha > \frac{k_2}{k_1} + \sqrt{\left(\frac{k_2}{k_1}\right)^2 - 1} \quad (37)$$

$$\text{或 } 1 < \alpha < \frac{k_2}{k_1} - \sqrt{\left(\frac{k_2}{k_1}\right)^2 - 1} \quad (38)$$

时, $\frac{d}{d\alpha} r$ 为负值, r 随 T_H 的减小而减小;

$$\text{当 } \frac{k_2}{k_1} + \sqrt{\left(\frac{k_2}{k_1}\right)^2 - 1} > \alpha > \frac{k_2}{k_1} - \sqrt{\left(\frac{k_2}{k_1}\right)^2 - 1} > 1 \quad (39)$$

时, $\frac{d}{d\alpha} r$ 为正值, r 随 T_H 减小而增大。

(2) x_c 和 y_c 随 α 和 T_H 的变化关系

从(34)和(35)式可见, 当此两式右边

$$k_2(\alpha^2 + 1) - 2k_1\alpha < 0 \quad (40)$$

时, 则 $\frac{d|x_c|}{d\alpha}$ 和 $\frac{d|y_c|}{d\alpha}$ 均为负值。

(i) 当 $k_1 > k_2$ 时

根据(40)式的条件, 经运算得, 当

$$1 < \frac{k_1}{k_2} - \sqrt{\left(\frac{k_1}{k_2}\right)^2 - 1} < \alpha < \frac{k_1}{k_2} + \sqrt{\left(\frac{k_1}{k_2}\right)^2 - 1} \quad (41)$$

时, $\frac{d|x_c|}{d\alpha}$ 和 $\frac{d|y_c|}{d\alpha}$ 为负值, $|x_c|$ 和 $|y_c|$ 随 T_H 的减小而向坐标原点靠近;

$$\text{当 } \alpha > \frac{k_1}{k_2} + \sqrt{\left(\frac{k_1}{k_2}\right)^2 - 1} \quad (42)$$

$$\text{或 } 1 < \alpha < \frac{k_1}{k_2} - \sqrt{\left(\frac{k_1}{k_2}\right)^2 - 1} \quad (43)$$

时, $|x_c|$ 和 $|y_c|$ 因随 T_H 的减小而与坐标原点的距离增大。

(ii) 当 $k_1 < k_2$ 时

$$\text{令 } y = k_2(\alpha^2 + 1) - 2k_1\alpha \quad (44)$$

上式在 $\alpha = 1$ 时, $y > 0$ (45)

再将(44)对 α 求导, 得

$$\frac{d}{d\alpha} y = 2k_2\alpha - 2k_1 > 0 \quad (46)$$

由上两式可见: 在 $\alpha = 1$ 时, y 已大于 0, 且 y 又随 α 的增大而增大, 因此在 $\alpha > 1$

时, y 始终大于 0, $\frac{d|x_c|}{d\alpha}$ 和 $\frac{d|y_c|}{d\alpha}$ 恒为正值, $|x_c|$ 和 $|y_c|$ 随 T_H 的减小而与坐标原点的距离增大。

从上面讨论的情况来看, r 、 $|x_c|$ 和 $|y_c|$ 随 T_H 的变化关系虽然比较复杂, 但是继电器整定后, T_H 已固定。我们感兴趣的还是这些量随 u_c 变化规律, 关于这点, 已如前述它们是随 u_c 的减小而减小。

参 考 文 献

[1] В.Ф.АЛЕКСАНДРОВ, К. Н ЛЕБЕДЕВ, РЕЛЕ ЗАЩИТЫ

〔2〕 候炳蕴 模拟电势失磁继电器的分析

电力部东北电力设计院 1978.8

〔3〕 姚孟电站第一台30万千瓦机组并网对河南

系统的影响 动模试验报告之二

(失磁过程和失磁保护行为的分析) 1975.1.

〔4〕 大型水轮发电机失磁保护动模试验研究报告 自动保护装置 1974.1

〔5〕 杨嗣彭 吴世楷 贵阳发电机#1机失磁与再同步试验分析 1980.4.

附 录:

模拟电势失磁继电器阻抗园的半径 r 和园心坐标 x_c 、 y_c 随 $T_H U_b$ 变化关系的分析

$$\text{由 (12) 式 } \alpha = \frac{k_2 T_H u_{cb}}{k_1 T_H u_{cb} - F_c}$$

$$\text{即 } \frac{1}{\alpha} = \frac{k_1}{k_2} - \frac{F_c}{k_2 T_H u_{cb}} \quad (22)$$

在上式中 k_1 、 k_2 和 F_c 均为常数, 当 $T_H u_b$ 下降, 则 α 增大, 反之则减小。

在 $\alpha > 1$ 时, 继电器的动作边界为一园, 由 (15) - (17) 式得,

$$x_c = -\frac{\alpha^2 R'_m}{(\alpha^2 - 1) T_H},$$

$$|x_c| = \frac{\alpha^2}{(\alpha^2 - 1) T_H} | -R'_m | \quad (23)$$

$$y_c = -\frac{\alpha^2 x'_m}{(\alpha^2 - 1) T_H},$$

$$|y_c| = \frac{\alpha^2}{(\alpha^2 - 1) T_H} | -x'_m | \quad (24)$$

$$r = \frac{\alpha}{(\alpha^2 - 1) T_H} \sqrt{R_m'^2 + x_m'^2} \quad (25)$$

当 x 、 x_b 选定后, R'_m 、 x'_m 为定值, 分别讨论园半径 r 和园心坐标 x_c 、 y_c 随 T_H 和 U_b 的变化规律。

(一) T_H 为定值时, r 、 x_c 、 y_c 随 u_b 的变化关系

将 (23) - (25) 式分别对 α 求导得:

$$\frac{d r}{d \alpha} = \frac{-(\alpha^2 + 1)}{(\alpha^2 - 1)^2 T_H} \sqrt{R_m'^2 + x_m'^2} \quad (26)$$

$$\frac{d |x_c|}{d \alpha} = \frac{-2\alpha}{(\alpha^2 - 1)^2 T_H} | -R'_m | \quad (27)$$

$$\frac{d |y_c|}{d \alpha} = \frac{-2\alpha}{(\alpha^2 - 1)^2 T_H} | -x'_m | \quad (28)$$

上面三式均为负值, 这表明 r 、 $|x_c|$ 和 $|y_c|$ 随 α 增大而减小, α 的增大又是由 u_b 的下降所引起, 因此, 当 T_H 一定时, 阻抗园随 u_b 的下降而变小, 该园的园心随 u_b

的下降在 $R-x$ 平面上向坐标原点靠近。

(二) u_{ab} 为定值时, r, x_c, y_c 随 T_H 的变化关系

(22) 式经变换后得:

$$\frac{1}{T_H} = \frac{u_{ab}}{F_1 \alpha} (k_1 \alpha - k_2) \quad (29)$$

将 (29) 式代入 (23) — (25) 式:

$$r = \frac{u_{ab}}{F_c(\alpha^2 - 1)} (k_1 \alpha - k_2) \sqrt{R_m^2 + x_m^2} \quad (30)$$

$$|x_c| = \frac{u_{ab}(k_1 \alpha^2 - k_2 \alpha)}{F_c(\alpha^2 - 1)} | -R'_m | \quad (31)$$

$$|y_c| = \frac{u_{ab}(k_1 \alpha^2 - k_2 \alpha)}{F_c(\alpha^2 - 1)} | -x'_m | \quad (32)$$

再将 (30) — (32) 式分别对 α 求导得:

$$\frac{d r}{d \alpha} = \frac{u_{ab}[-k_1(\alpha^2 + 1) + 2k_2 \alpha]}{F_c(\alpha^2 - 1)^2} \sqrt{R_m^2 + x_m^2} \quad (33)$$

$$\frac{d |x_c|}{d \alpha} = \frac{u_{ab}[k_2(\alpha^2 + 1) - 2k_1 \alpha]}{F_c(\alpha^2 - 1)^2} | -R'_m | \quad (34)$$

$$\frac{d |y_c|}{d \alpha} = \frac{u_{ab}[k_2(\alpha^2 + 1) - 2k_1 \alpha]}{F_c(\alpha^2 - 1)^2} | -x'_m | \quad (35)$$

讨 论:

(1) r 随 α 和 T_H 的变化关系

从 (33) 式可见, 当此式右边

$$-k_1(\alpha^2 + 1) + 2k_2 \alpha < 0 \quad (36)$$

时, 则 $\frac{d r}{d \alpha}$ 为负值。

(i) 当 $k_1 > k_2$

由于 $k_1 > k_2$ 和 $\alpha^2 + 1 > 2\alpha$

(36) 式的条件满足, $\frac{d r}{d \alpha}$ 必为负值。因此 r 随 α 的增大而减小, 即 r 随 T_H 的减

小而减小

(ii) 当 $k_1 < k_2$

根据 (36) 式的条件, 经过运算得: 当

$$\alpha > \frac{k_2}{k_1} + \sqrt{\left(\frac{k_2}{k_1}\right)^2 - 1} \quad (37)$$

时, $\frac{d r}{d \alpha}$ 为负值, r 随 T_H 的减小而减小。反之, 当

$$\frac{k_2}{k_1} + \sqrt{\left(\frac{k_2}{k_1}\right)^2 - 1} > \alpha > 1 \quad (38)$$

时, r 随 T_H 减小而增大。

(2) $|x_c|$ 、 $|y_c|$ 随 α 和 T_H 的变化关系

从 (34) 和 (35) 式可见, 当此两式右边

$$k_2(\alpha^2 + 1) - 2k_1\alpha < 0 \quad (39)$$

时, 则 $\frac{d|x_c|}{d\alpha}$ 和 $\frac{d|y_c|}{d\alpha}$ 均为负值。

(i) 当 $k_1 > k_2$

根据 (39) 式的条件, 经过运算得: 当

$$\frac{k_1}{k_2} + \sqrt{\left(\frac{k_1}{k_2}\right)^2 + 1} > \alpha > 1 \quad (40)$$

时, $\frac{d|x_c|}{d\alpha}$ 和 $\frac{d|y_c|}{d\alpha}$ 均为负值, $|x_c|$ 和 $|y_c|$ 随 T_H 的减小而减小, 圆心向坐标原点靠近。反之, 当

$$\alpha > \frac{k_1}{k_2} + \sqrt{\left(\frac{k_1}{k_2}\right)^2 + 1} \quad (41)$$

时, $|x_c|$ 和 $|y_c|$ 均随 T_H 的减小而增大, 圆心对坐标原点的距离也就增大。

(ii) 当 $k_1 < k_2$

由于 $k_2 > k_1$ 和 $\alpha^2 + 1 > 2\alpha$

(39) 式的条件始终得不到满足, 即 $\frac{d|x_c|}{d\alpha}$ 和 $\frac{d|y_c|}{d\alpha}$ 均恒为正值, $|x_c|$ 和 $|y_c|$ 随 T_H 的减小而增大。圆心对坐标原点的距离也就增大。

从上面讨论的情况来看, r 、 $|x_c|$ 和 $|y_c|$ 随 T_H 的变化而变化。即变动 T_H 会引起继电器的动作阻抗圆的大小和位置的改变, 但是, 当继电器一旦整定好后, T_H 就被固定, r 、 $|x_c|$ 和 $|y_c|$ 随 u_{ab} 的变化关系, 已如前述, 它们是随 u_{ab} 的减小而减小。