

# 系统振荡时比拟电势失磁继电器的感受阻抗

成都科技大学 杨嗣彭

## 前 言

文(1)失磁继电器是用  $R_m$ 、 $X_m$  和  $Z_m$  来代表失磁机组的定子电阻、电抗和阻抗, 它们是随  $X_d$ 、 $X_d'$  和  $T_H$  而变, 这些参数是根据整定的要求来选择的。因此,  $R_m$ 、 $X_m$  和  $Z_m$  并不真实反映失磁机组的定子绕组阻抗值, 而是根据整定需要用它们来比拟(analog)机组定子绕组的阻抗值, 称“比拟”似较“模拟”更为适宜, 今后把有关该继电器的“模拟”一律改为“比拟”。例如, 文(1)中的  $E_{ab}$  也改称为比拟电势。

因为比拟电势  $E_{ab}$  不同于系统振荡时的电势  $E_f$ , 所以在系统振荡过程中, 由比拟电势而感受的阻抗轨迹就不能再用一般失磁继电器感受阻抗轨迹表达式(1)进行计算。本文主要分析, 在振荡过程中该继电器所感受的阻抗轨迹, 以及它与运行参数的关系, 从而判断在系统振荡时该继电器的行为。

### (一) 系统振荡时继电器感受阻抗的特点

在全相运行情况下, 发电机与系统间发生振荡时, 反应到本保护的机端阻抗值, 可仿照〔2〕的计算公式得到类似的表达式(证明从略):

$$Z_f = \frac{Z_m + jX_{s1}}{\frac{E_{ab}}{U_{s1}} e^{j\theta} - 1} + jX_{s2} \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中  $\theta$  ——比拟电势  $E_{ab}$  领前系统电压  $U_{s1}$  的相角

由于  $\dot{E}_{ab} = \dot{U}_{s1} + \dot{I}(Z_m + jX_{s1})$

而  $\dot{E}_f = \dot{U}_{s1} + j\dot{I}(X_d' + X_{s1})$

解以上两式, 得  $\dot{E}_{ab}$  和  $\dot{E}_f$  的关系式如下:

$$\dot{E}_{ab} = \frac{Z_m + jX_{s1}}{j(X_d' + X_{s1})} \dot{E}_f + \frac{jX_d' - Z_m}{j(X_d' + X_{s1})} \dot{U}_{s1} \quad \dots\dots\dots(2)$$

上式说明, 当系统振荡时, 即使  $E_f$  值一定, 由于  $E_f$  领前  $U_{s1}$  的相角变化, 将引起  $E_{ab}$  的大小和相位均随着变化。这样, 继电器感受阻抗为:

$$Z_i = \frac{Z_m + jX_{s1}}{\left[ \frac{Z_m + jX_{s1}}{j(X'_d + X_{s1})} \frac{E_f}{U_{s1}} + \frac{jX'_d - Z_m}{j(X'_d + X_{s1})} \right] e^{j\theta} - 1} + jX_{s1} \quad \dots\dots\dots(3)$$

它与一般失磁继电器的感受阻抗轨迹是不同的。现把具体参数代入上式作为一例，对该继电器的阻抗轨迹图形先有一感性认识。

(1) 当  $X'_d = 0.3$ ,  $X_{s1} = 0.4$ ,  $X_m = 0.6$ ,  $R_m = 0$  时的阻抗轨迹图形

(i)  $\frac{E_f}{U_{s1}} = 1.1$  (图1a) 时的阻抗轨迹由两个接近圆形的曲线所组成。它比一般继电

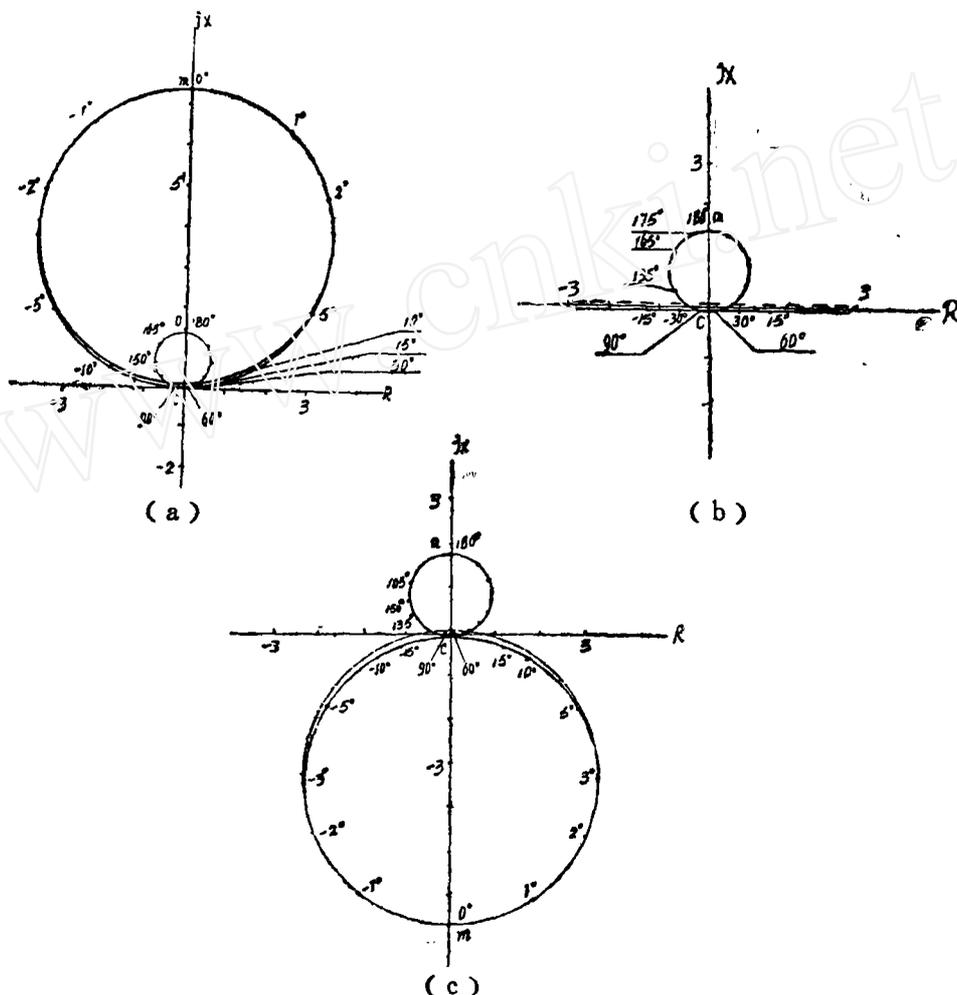


图1 当  $X'_d = 0.3$   $X_{s1} = 0.4$   $X_m = 2X'_d = 0.6$   $R_m = 0$  时，系统振荡过程中在不同  $\theta_f$  值下的继电器感受阻抗轨迹

(a)  $\frac{E_f}{U_{s1}} = 1.1$  (b)  $\frac{E_f}{U_{s1}} = 1.0$  (c)  $\frac{E_f}{U_{s1}} = 0.9$

器的轨迹多了一个小园（称作A园），该园是在 $90^\circ < \theta_f < 270^\circ$ （ $\theta_f$ 在这区间的变动范围大于 $180^\circ$ ）时的阻抗轨迹。大园（称作M园）是在 $-90^\circ < \theta_f < 90^\circ$ （ $\theta_f$ 在这区间的变动范围小于 $180^\circ$ ）时的阻抗轨迹，该园与一般继电器在同样运行参数（ $X'_d = 0.3$ ,

$X_{s1} = 0.4$ ,  $\frac{E_f}{U_{s1}} = 1.1$ ）下的阻抗园（如图中虚线所示）基本吻合。

(ii)  $\frac{E_f}{U_{s1}} = 1$ （图1b）时的阻抗轨迹不仅是一条近似水平直线（比一般继电器的水平线略为下降），还多了一个A园，该园也为 $90^\circ < \theta_f < 270^\circ$ 时的阻抗轨迹。

(iii)  $\frac{E_f}{U_{s1}} = 0.9$ （图1c）时的阻抗轨迹，其中M园与一般继电器的轨迹图形也是基本吻合的。此外，A园仍然存在。

因此，比拟电势失磁继电器所感受的阻抗与一般失磁继电器的阻抗园相比较，都增加了一个A园。图中A和M园均对称于纵轴，在本例所给定的参数下，A园基本上位于阻抗平面的横轴之上，不至于引起继电器的误动作。但是，倘使改变参数，A园如位于横轴之下，则在系统振荡时，就有可能引起继电器的误动作，这个问题的分析将在（三）中进行。

(2) 当  $X'_d = 0.3$   $X_{s1} = 0.4$   
 $X_m = 0.6$ ,  $R_m = -0.1$ 时的阻抗轨迹图形

该参数与(1)参数的不同点仅在于  $R_m \neq 0$ 。通过计算，把此时的阻抗轨迹图形图2与图1的图形相比较，没有本质上的不同。仅当  $R_m$  为负值时，整个图形向反时针方向转了一个角度。即A园偏向第II象限；而M园在  $K > 1$  时偏向第II象限，在  $K < 1$  时则偏向第III象限（图2中M园未全部绘出）。

由此可见，当  $R_m \neq 0$  时，系统振荡过程中的阻抗轨迹偏移方向与该继电器的特性阻抗园的偏移方向一致<sup>(1)</sup>。这表明当  $R_m \neq 0$  时，并不因为特性阻抗园的偏移而会在系统振荡时引起误动。因此，不必再对  $R_m \neq 0$  的情况另作讨论。下面仅对  $R_m = 0$  的情况进行分析。

当  $R_m = 0$  时，(2)和(3)式可分别改写为：

$$\dot{E}_f = \frac{X_m + X_{s1}}{X'_d + X_{s1}} \dot{E}_f + \frac{X'_d - X_m}{X'_d + X_{s1}} U_{s1} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$Z_f = \frac{i(X_m + X_{s1})}{\left[ \frac{X_m + X_{s1}}{X'_d + X_{s1}} \frac{E_f}{U_{s1}} + \frac{X'_d - X_m}{X'_d + X_{s1}} \right] e^{j\theta} - 1} + iX_{s1} \quad \dots\dots\dots(5)$$

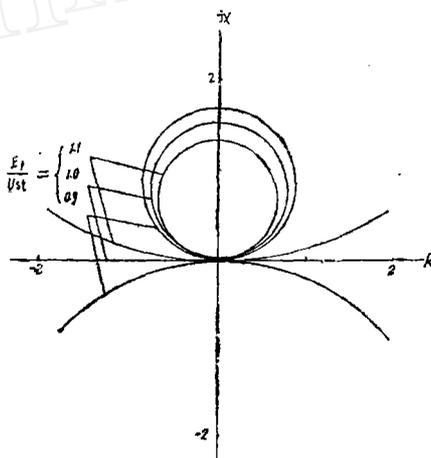


图2 当  $X'_d = 0.3$ ,  $X_{s1} = 0.4$ ,  
 $X_m = 0.6$ ,  $R_m = -0.1$ 时 系统振荡过程中继电器的感受阻抗

## (二) M园的大小和位置与参数的关系

当  $\frac{E_f}{U_{St}} \approx 1$  时,从图1a和图1c可见,M园在  $\theta_f = 0^\circ$  时的阻抗与一般继电器在  $\theta_f = 0^\circ$  时的阻抗重合于  $m$  点。现证明如下:

把  $\theta_f = 0^\circ$  代入(4)式,并令  $\frac{E_f}{U_{St}} = K$ , 得:

$$E_{ab} = \frac{U_{St}}{X'_d + X_{St}} [K(X_m + X_{St}) + X'_d - X_m] \quad \dots\dots\dots(6)$$

若满足

$$K(X_m + X_{St}) + X'_d > X_m \quad \dots\dots\dots(7)$$

时,  $E_{ab}$  为正实数, 则  $\theta = 0^\circ$ 。将  $\theta = \theta_f = 0^\circ$  代入(5)式, 简化后得  $m$  点的阻抗:

$$Z_{fm} = j \frac{X'_d + KX_{St}}{K - 1} \quad \dots\dots\dots(8)$$

上式是  $\theta_f = 0^\circ$  时, 比拟电势失磁继电器的感受阻抗, 即  $m$  点的阻抗值; 因为该阻抗的实部为零,  $Z_{fm} = jX_{fm}$ 。(8)式与一般继电器在  $\theta_f = 0^\circ$  时的感受阻抗相同<sup>2</sup>。因此, 只要满足(7)式的条件(为本例), 两种继电器在  $m$  点一定重合, 正因为如此,  $m$  点随  $K$  的变化也与一般继电器相同。但当  $K$  值减小到不能满足(7)式时,  $E_{ab}$  变为负实数,  $Z_{fm}$  值就完全不同。不过此时  $K$  值已经降得很低, 表明发电机已处于严重失磁状态, 检验系统振荡是否会引起继电器误动已无实际意义, 可不必予以讨论。

要确定  $M$  园的大小和位置, 除了确定  $M$  点的位置以外, 还必须找到该园在纵轴上的另一点  $C$ 。通过大量计算(表1, 2)和图1a—1c可以看到,  $C$  点发生在  $\theta_f < 90^\circ$  或  $\theta_f > 270^\circ$

表1

编号	$X_{St}$	$X'_d$	$X_m$	$K$	$Z_f$		
					$\theta_f = 0^\circ$	$\theta_f = 90^\circ$	$\theta_f = 180^\circ$
1	0.4			1.1	$j7.4$	$-0.125 + j0.028$	$j1.4$
				1.0	$\infty$	$-0.144$	$j1.567$
				0.9	$-j6.6$	$-0.161 - j0.0153$	$j1.8$
2	0.8	0.3	0.6	1.1	$j11.8$	$-0.132 + j0.228$	$j2.88$
				1.0	$\infty$	$-0.149 + j0.196$	$j3.67$
				0.9	$-j10.2$	$-0.166 + j0.16$	$j4.15$
3	0.1			1.1	$j4.1$	$-0.118 - j0.112$	$j0.518$
				1.0	$\infty$	$-0.134 - j0.123$	$j0.567$
				0.9	$-j3.9$	$-0.153 - j0.135$	$j0.628$

表 2

编号	$X_m$	$X'_d$	$X_{s1}$	K	$Z_f$		
					$\theta_f = 0^\circ$	$\theta_f = 90^\circ$	$\theta_f = 180^\circ$
				1.1	$j7.4$	$-0.238 + j0.0317$	$j1.084$
1	0.9			1.0	$\infty$	$-0.26 + j0.015$	$j1.158$
				0.9	$-j6.6$	$-0.29 + j0.06$	$j1.25$
				1.1	$j7.4$	$-0.125 + j0.028$	$j1.4$
2	0.6	0.3	0.4	1.0	$\infty$	$-0.144$	$j1.567$
				0.9	$-j6.6$	$-0.161 - j0.0153$	$j1.8$
				1.1	$j7.4$	$j0.0667$	$j7.4$
3	0.3			1.0	$\infty$	$j0.05$	$\infty$
				0.9	$-j6.6$	$j0.316$	$-j6.6$

的某一电抗值（即前面所提到的M园是由 $\theta_f$ 的振荡角度小于 $180^\circ$ 所形成的阻抗轨迹），但要直接由数学公式求得C点是困难的。因为 $\theta_f = 90^\circ$ （或 $\theta_f = 270^\circ$ ）的阻抗值在阻抗平面上已接近纵轴，并且该段曲线又较平坦，我们近似地把 $\theta_f = 90^\circ$ 时阻抗的虚部作为 $X_{fc}$ （即表1, 2中 $\theta_f = 90^\circ$ 时的 $jX_f$ ）。

从图1a和图1c可见， $X_{fc}$ 与一般继电器在 $\theta_f = 180^\circ$ 时的感受电抗很接近。在 $X'_d$ 和 $X_{s1}$ 为定值时（表1）， $X_{fc}$ 随 $X_{s1}$ 和K的增大而向上移动，这点也与一般继电器在 $\theta_f = 180^\circ$ 的情况也是相同的；在 $X'_d$ 和 $X_{s1}$ 为定值时（表2）， $X_{fc}$ 随 $X_m$ 的变动，则变化不大。当 $X_m = X'_d$ 时，由(4)式得 $\dot{E}_{ab} = \dot{E}_f$ 和 $\theta = \theta_f$ ，把这些关系代入(5)式，即得：

$$Z_f = \frac{j(X'_d + X_{s1})}{\frac{E_f}{U_{s1}} e^{j\theta_f} - 1} + jX_{s1}$$

此式就是一般失磁继电器的阻抗轨迹表达式。因此，当 $X_m = X'_d$ 时，M园即为一般失磁继电器在系统振荡过程中的阻抗轨迹。

由此上述分析，我们可以这样简单地认为：M园的轨迹用一般失磁继电器的阻抗轨迹来代替，但C点略微偏下一些，误差是不大的，因此可用一般继电器在系统振荡时的阻抗轨迹来检验比拟电势失磁继电器是否会引引起误动。

### (三) A园的位置与参数的关系

A园的大小和位置由a点（ $\theta_f = 180^\circ$ ）和 $X_{fc}$ 所决定。当 $\theta_f = 180^\circ$ 时， $\dot{E}_f = -E_f$ ，

把它代入(4)式,经简化后得:

$$\dot{E}_{ab} = \frac{U_{Sf}}{X_d' + X_{Sf}} [X_d' - K X_{Sf} - (1+K)X_m] \quad \dots\dots\dots(9)$$

如果  $X_m > X_d'$  .....(10)

则在任何情况下 ( $K \geq 0$ ),  $E_{ab}$  总为负实数,即  $\theta = 180^\circ$ 。把  $\dot{E}_f = -E_f$  和  $\theta = 180^\circ$  代入(5)式,经整理后得:

$$Z_{fa} = j \frac{X_{Sf}(2X_m - X_d') + X_d'X_m + K X_{Sf}(X_m + X_{Sf})}{K(X_m + X_{Sf}) - (2X_d' + X_{Sf} - X_m)} \quad \dots\dots\dots(11)$$

上式实部为 0,  $Z_{fa} = jX_{fa}$ 。为了保证系统振荡时, A 圆的轨迹不至于引起继电器误动作,首先要保证  $X_{fa}$  应为正值,即(11)式右边的分数为正值。现在先看该分数的分母,要使分母为正值,应满足:

$$K(X_m + X_{Sf}) > 2X_d' + X_{Sf} - X_m$$

则  $X_m > \frac{2X_d' + (1-K)X_{Sf}}{1+K}$  .....(12)

从上式来看,当  $K$  越大,满足上式条件的  $X_m$  就可越小,为了确保过励磁 ( $K > 1$ ) 时,分母为正值。按  $K = 1$  代入(12)式,得:

$$X_m > X_d' \quad \dots\dots\dots(13)$$

把上式代入(11)式的分子部分,分子也为正值。这就是说,只要满足(13)式条件,在  $K \geq 1$  时,  $X_{fa}$  必为正值。附带指出:由于(13)式与(10)相同,若按(13)式来整定比拟电抗(这在整定时一般均能满足)则(11)式也是成立的。因此,只要  $X_m > X_d'$ ,  $X_{fa}$  始终为正值。当  $X_m = X_d'$  时,  $\dot{E}_{ab} = \dot{E}_f$  (式 4)。A 圆与 M 圆相重合(表 2 中的 3) A 圆即为一般继电器的阻抗轨迹。

至于  $X_{fc}$  已如前述,更接近于一般继电器在  $\theta_{fd}^0 = 180^\circ$  时感受电抗值。

根据  $X_{fa}$  和  $X_{fc}$ , 就可确定 A 圆的位置。在  $K \geq 1$  时, A 圆是否会引起继电器的误动作,可分下面三种情况来讨论:

(1)  $X_m > X_d'$

$X_{fa}$  恒为正值,  $X_{fc}$  在横轴附近, A 圆基本上在横轴之上,当  $X_{Sf}$  和  $K$  增大,  $X_{fc}$  随轴向上移动,则 A 圆全在横轴之上,继电器是不会误动的。

(2)  $X_m = X_d'$

A 圆与 M 圆重合,并与一般继电器的感受阻抗轨迹相同,不必另作讨论。

(3)  $X_m < X_d'$

$X_{fa}$  将为负值,使 A 圆主要在横轴之下,有可能引起继电器的误动。但事实上,不可能把  $X_m$  整定得比  $X_d'$  还小,这种情况是不会发生的。

#### (四) 几点结论

(1) 在系统振荡时,比拟电势失磁继电器所感受的阻抗与一般继电器感受阻抗

不同，它是由两个接近圆形的轨迹所组成—— $A$ 园和 $M$ 园（在 $\frac{E_f}{U_{s1}} = 1$ 时， $M$ 园变为一条近似水平的直线）。

（2） $A$ 园是该继电器所特有的。在 $K \geq 1$ 时，只要满足 $X_m > X'_d$ ，该园基本上处于横轴之上，不至引起继电器的误动。

（3） $M$ 园可把它近似看作在同样运行参数下一般继电器的阻抗轨迹。但由于 $M$ 园是 $\theta_f$ 的振荡角度不到 $180^\circ$ 所引成的阻抗轨迹，因此即使它进入继电器整定的特性阻抗园内，在园内停留的时间也比一般继电器在园内的时间短。这样造成继电器误动的可能也就比一般继电器为少。所以从躲开系统振荡误动来看，比拟电势失磁继电器也比较优越。

#### 参 考 文 献

- 〔1〕 杨嗣彭、吴世楷 模拟电势失磁保护的分析（继电器） 1981、No 3
- 〔2〕 许昌继电器研究所、清华大学电力系大型机组晶体管继电保护