

测量对地导纳的励磁回路一点 接地保护装置的分析

东北电力设计院 侯炳彦

用测量励磁回路对地导纳的方法，来构成发电机励磁回路一点接地保护装置，许昌继电器研究所已研制成功，并已有产品说明书出版。因此，与此有关的问题，引起了广泛的注意。本文的目的，是要通过对被保护对象和保护装置的分析，来说明电路参数对保护装置动作条件的影响。有不当之处，请同志们指正。

一、保护装置的结线

保护装置的结线图示于图 1。下面将以此图为例进行分析。

图 1 中，1 LH 和 2 LH 为变流器，与整流器 1 ZL 和 2 ZL 构成比较两个电气量绝对值的测量回路。电阻 R_m 和 R_{∞} 为整定电阻。L、C 组成 50Hz 带通滤波器。电容 C

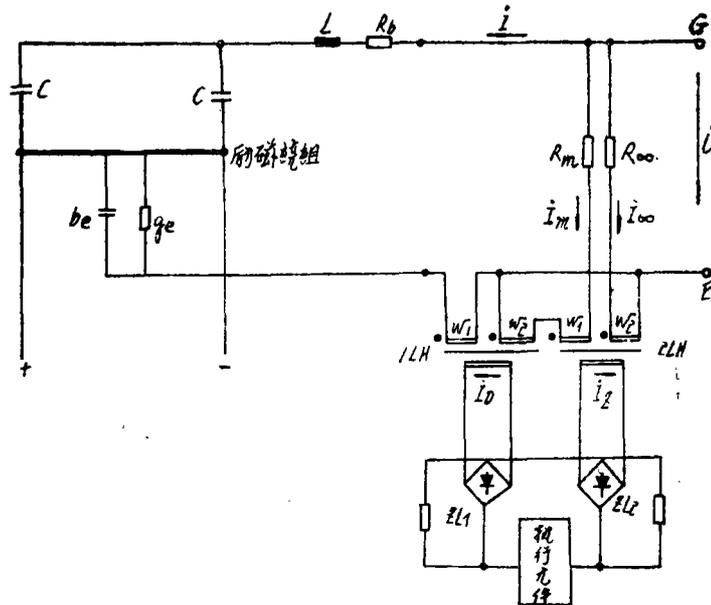


图 1 一点接地保护的测量回路举例

还起着隔直和耦合作用。励磁回路的对地分布电导和分布电容，在图 1 中以集中参数 $g_e = \frac{1}{R_e}$ 和 $b_e = \omega C_e = \frac{1}{X_e}$ 表示。其中 R_e 是励磁回路对地绝缘电阻； C_e 是对地电容，

X_e 为相应的容抗。 R_b 为附加电阻。 50Hz 交流电压 \dot{U} 经附加电阻 R_b 、滤波器 L 、 C 、和测量回路迭加到励磁回路正负极与地（转子本体）之间。简单说，保护装置反应流过 g_e 和 b_e 的电流 \dot{I} ，由 R_m 和 R_ω 回路的电流 \dot{I}_m 、 \dot{I}_ω 产生制动作用。当发生接地故障时， R_e 减小， G 、 E 端的测量导纳因而增加，此时保护装置动作。

回路中的参数 g_e 、 b_e 、 R_b 以及回路中的电抗（以 X_b 表示）对动作条件有什么影响？影响的趋势如何？上面那些简单的说明，还不能回答这些问题。下面将对这些问题进行一些分析。

二、测量阻抗与测量导纳

如前所述，将励磁回路的对地分布电导和分布电容以集中参数 g_e 和 b_e 表示。 g_e 和 b_e 构成励磁回路的对地导纳

$$\dot{Y}_e = \frac{1}{\dot{Z}_e} = g_e + jb_e$$

将励磁回路、滤波器、 1LH 的绕组 W_1 的电阻 归入附加电阻 R_b 之中，这些元件的电抗（对 50Hz ）以 X_b 表示。 R_b 和 X_b 组成附加阻抗 $\dot{Z}_b = R_b + jx_b$ 。相应的附加导纳 $\dot{Y}_b = \frac{1}{\dot{Z}_b}$ 。经过上述处理，图 1 可以用图 2 所示的等值回路来表示。

下面将要导出描述 G 、 E 端测量导纳 \dot{Y} 与 $R_e C_e$ 、 \dot{Z}_b 之间的关系式，再依此作出 \dot{Y} 轨迹的图形。

1. 测量阻抗 \dot{Z} ：

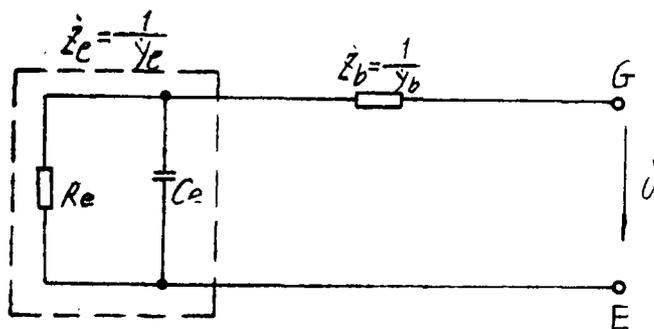


图 2

为了导出测量导纳 \dot{Y} 与 g_e 、 C_e 、 \dot{Z}_b 的关系式，在这里顺便导出测量阻抗 \dot{Z} 与它们的关系式，藉以说明在以后的分析中不用阻抗平面的原因。

图 2 中 G、E 端看进去的测量阻抗

$$\dot{Z} = \dot{Z}_b + \frac{1}{\frac{1}{R_e} - \frac{1}{jX_e}}, \dots\dots\dots (1)$$

其中： $\dot{Z}_b = R_b + jX = \text{常数}$ ，

$$X_e = \frac{1}{\omega C_e}。$$

我们来分析一下，当 $R_e = \text{常数}$ ， $C_e = \text{变数}$ 时，以及 $C_e = \text{常数}$ 、 $R_e = \text{变数}$ 时，测量阻抗 \dot{Z} 的轨迹。

当 $R_e = \text{常数}$ 、 $C_e = \text{变数}$ 时，由 (1) 式可得到：

$$\dot{Z} = \dot{Z}_b + \frac{R_e}{2} \cdot \frac{\frac{1}{R_e} - \frac{1}{jX_e} + \frac{1}{R_e} + \frac{1}{jX_e}}{\frac{1}{R_e} - \frac{1}{jX_e}}$$

化简后则得到测量阻抗 \dot{Z} 的另一表达式：

$$\left. \begin{aligned} \dot{Z} &= \dot{Z}_b + \frac{R_e}{2} (1 + e^{-j2\alpha}), \\ \alpha &= \text{arctg } \omega R_e C_e. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

(2) 式是园方程式。由 (2) 式可写出园心向量和半径向量：

$$\left. \begin{aligned} \dot{Z}_{cr} &= \dot{Z}_b + \frac{R_e}{2} \\ \dot{Z}_{rr} &= \frac{R_e}{2} e^{-j2\alpha} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

就是说，当 R_e 保持不变而只改变 C_e 值时， \dot{Z} 在阻抗复平面上的轨迹是一个以 \dot{Z}_{cr} 的末端为园心，以 Z_{rr} 为半径的园。用 (2)、(3) 式表示的园我们称为等电阻园。

当 $C_e = \text{常数}$ 、 $R_e = \text{变数}$ 时，用同样的方法，可由 (1) 式导出另一个园方程式：

$$\left. \begin{aligned} \dot{Z} &= \dot{Z}_b - \frac{jX_e}{2} (1 - e^{-j2\alpha}), \\ \alpha &= \text{arctg } \omega R_e C_e. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

其园心向量和半径向量可以从 (4) 式直接写出来：

$$\left. \begin{aligned} \dot{Z}_{cx} &= \dot{Z}_b - j\frac{1}{2} X_e, \\ \dot{Z}_{rx} &= j\frac{1}{2} X_e e^{-j2\alpha} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

即当 C_e 保持不变而只改变 R_e 值时，测量阻抗 \dot{Z} 在阻抗复平面上的轨迹是一个园，其园心在向量 \dot{Z}_{cx} 的末端，其半径的大小为 Z_{rx} 。用 (4)、(5) 式表示的园我们称

为等电抗园。

由(3)式看出,等电阻园的园心随 R_e 改变而移动。当 $R_e = 0$ 时,园心在 \dot{Z}_b 的末端,而半径 $Z_{rr} = 0$;当 $R_e \rightarrow \infty$ 时,则园心移向无穷远处,而半径 $Z_{rr} \rightarrow \infty$ 。

由(5)式看出,等电抗园的园心随 X_e 改变而移动。当 $X_e = 0$ 时,园心也是在 \dot{Z}_b 的末端,而半径 $Z_{rx} = 0$;当 $X_e \rightarrow \infty$ 时,则园心沿 $-jx$ 轴的方向移向无穷远处,半径 $Z_{kx} \rightarrow \infty$ 。

对于我们将要研究的问题,用阻抗轨迹不如用导纳轨迹清晰明了。因为,如上所述等电阻园的半径随 $R_e \rightarrow \infty$ 而趋向 ∞ ,在阻抗复平面上不易作出完整的图形,而感兴趣的部分又比较小。此外,保护装置的整定回路,其特性用导纳表示也比较方便。因此,下面将把测量阻抗 Z 的轨迹反演成导纳 \dot{Y} 的轨迹。园的反演还是园。等电阻园反演求出的称为等电导园,等电抗园反演求出的称为等电纳园。

2. 测量导纳 \dot{Y} :

图2由G、E端看进去的测量导纳为

$$\dot{Y} = \frac{1}{Z} \quad \dots\dots\dots (6)$$

当 $R_e = \text{常数}$, $C_e = \text{变数}$ 时,则 $g_e = \text{常数}$, $b_e = \text{变数}$ 。此时测量阻抗 \dot{Z} 用(2)式表示。将(2)式代入(6)式,并改变一下表示形式,则得到

$$\dot{Y} = \frac{2}{1 + \frac{R_e}{Z_{be}} e^{-j(2\alpha + \alpha_{be})}} \dots\dots\dots (7)$$

其中: $Z_{be} = \sqrt{(2R_b + R_e)^2 + (2X_b)^2}$,
 $\alpha_{be} = \text{arctg} \frac{2X_b}{2R_b + R_e}$,
 $\alpha = \text{arctg} \omega R_e C_e$.

(7)式中,只有导纳角 α 随 C_e 变化,而其他量却是常数,因此这是一个典型的园方程式。其园心向量和半径,可根据园周上在相反方向上的两个给定点求出。根据(7)式:

在 $2\alpha + \alpha_{be} = 0$ 的一点上,测量导纳

$$\dot{Y} = \dot{Y}_m = \frac{2 e^{-j\alpha_{be}}}{Z_{be} + R_e}$$

在 $2\alpha + \alpha_{be} = 180^\circ$ 的一点上,测量导纳

$$\dot{Y} = \dot{Y}_n = \frac{2 e^{-j\alpha_{be}}}{Z_{be} - R_e}$$

根据 \dot{Y}_m 和 \dot{Y}_n 可求出园心向量 $\dot{Y}_{c.g}$ 和半径向量 \dot{Y}_{rg} :

$$\dot{Y}_{c \cdot g} = \frac{1}{2} (\dot{Y}_m + \dot{Y}_n),$$

$$Y_{r \cdot g} = \frac{1}{2} \left| \dot{Y}_m - \dot{Y}_n \right|.$$

将 \dot{Y}_m 和 \dot{Y}_n 代入上式后, 经化简得到,

$$\left. \begin{aligned} \dot{Y}_{c \cdot g} &= \frac{2(2R_b + R_e - j2X_b)}{Z_{be}^2 - R_e^2}, \\ Y_{r \cdot g} &= \frac{2R_e}{Z_{be}^2 - R_e^2}. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

注意 (8) 式中的 $Y_{r \cdot g}$ 只表示半径的大小。设 $Y_{r \cdot g}$ 的偏转角为 θ_1 , 则测量导纳的表达式可写成如下的形式:

$$\dot{Y} = \dot{Y}_{c \cdot g} + \dot{Y}_{r \cdot g} = \dot{Y}_{c \cdot g} + Y_{r \cdot g} e^{j\theta_1}. \dots\dots\dots (9)$$

(9) 式中的偏转角 θ_1 可由 (8) 式和 (7) 式求出:

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= 2r_1 - 2\alpha_{be} - 2\alpha \\ r_1 &= \arctg \frac{R \sin(2\alpha + \alpha_{be})}{Z_{be} + R_e \cos(2\alpha + \alpha_{be})}. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

(8) 式和 (9) 式说明, 若 g_e 保持不变, 只改变 b_e , 则只有 θ_1 随导纳角 α 变化, 因而测量导纳 \dot{Y} 的轨迹是一个以 $\dot{Y}_{c \cdot g}$ 末端为圆心, 以 $Y_{r \cdot g}$ 为半径的圆, 这个圆称为等电导圆。对于不同的 g_e 值, 就得到一个等电导圆族。如图 3 所示。

由 (8) 式, 在 $\dot{Y}_{c \cdot g}$ 式的右边加减一项 $\dot{Y}_b = \frac{1}{Z_b}$, 整理之后可得到:

$$\dot{Y}_{c \cdot g} = \frac{1}{Z_b} - \frac{2R_e}{Z_{be}^2 - R_e^2} e^{-j\beta_1}$$

注意到 (8) 式中的 $\dot{Y}_{r \cdot g}$, 则上式可改写为

$$\left. \begin{aligned} \dot{Y}_{c \cdot g} &= \frac{1}{Z_b} - Y_{r \cdot g} e^{-j\beta_1}, \\ \beta_1 &= \arctg \frac{2R_b X_b}{R_b^2 - X_b^2}. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

(11) 式中, 右边第二项的模值与 R_e 有关, 而角 β_1 只与 R_b, X_b 有关。因此, 当改变 R_e 时, β_1 是常数, (11) 式表示的是一条直线。tg β_1 是这条直线的斜率。就是说, 改变 R_e 值时, 等电导圆的圆心轨迹是一条直线, 等电导圆族中的所有圆, 其圆心都在这条直线上。这一直线在图 3 中用直线 \overline{PN} 表示。

由 (11) 式, 因为 $\left| \dot{Y}_{c \cdot g} - \dot{Y}_b \right| = Y_{r \cdot g}$, 即等电导圆圆心到 \dot{Y}_b 末端的距离恰好等于圆的半径, 所以圆族中所有圆周都要过 \dot{Y}_b 的末端。这个点在图 3 中用 P 来表示。因 \overline{PN} 是圆心轨迹, 所以等电导圆族都在 P 点与 \overline{PN} 的垂线相切。

由 (8) 式可知, 当 $R_e = 0$ 时, 圆心在 $\dot{Y}_{c \cdot g} = \dot{Y}_b$ 的末端 (图 3 中的 P 点),

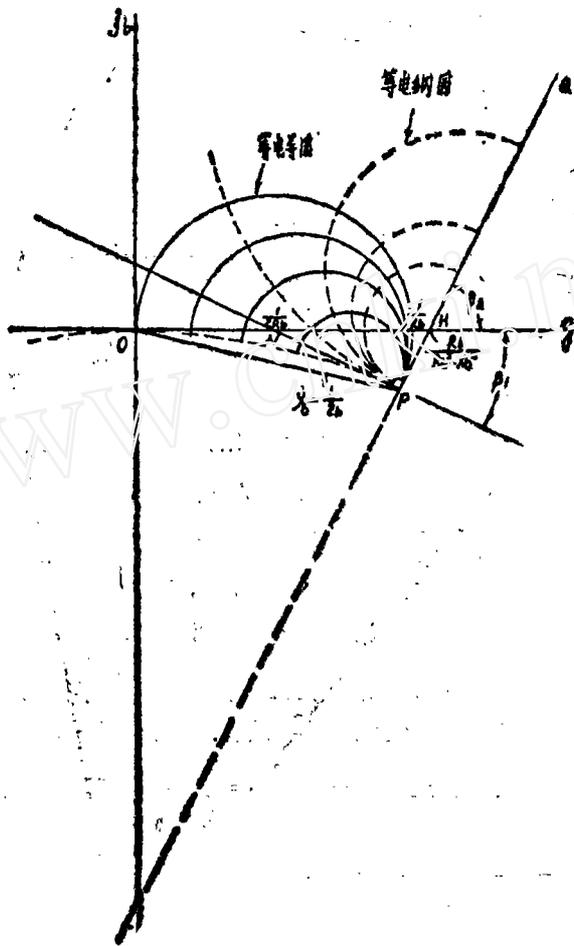


图3 等电导及电纳园图

\overline{PN} ——等电导园园心轨迹； \overline{PQ} ——等电纳园园心轨迹。

当 $R_e = \infty$ 时，园心在 $\dot{Y}_{cg} = \frac{1}{2}g_b$ 的末端，即此时在 g 轴上的 N 点。可见，当 $R_e = 0 \rightarrow \infty$ 时，园心将由 P 点趋向 N 点。换句话说，就是 R_e 在 $0 - \infty$ 范围内变化时，园心轨迹是线段 \overline{PN} 。

当 $b_e = \text{常数}$ ， $g_e = \text{变数}$ 时，测量导纳的轨迹也是园，称为等电纳园。用求等电导园相同的方法，将 (4) 式代入 (6) 式后，可得到等电纳园的园心向量 \dot{Y}_{cb} 和半径向量 \dot{Y}_{rb} ：

$$\left. \begin{aligned} \dot{Y}_{cb} &= \frac{4R_b - j2(2X_b - X_e)}{Z_{eb}^2 - X_e^2} \\ \dot{Y}_{rb} &= \frac{2X_b}{Z_{eb}^2 - X_e^2} e^{j\theta_2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

测量导纳 \dot{Y} 的方程式可写为

$$\dot{Y} = \dot{Y}_{cb} + \dot{Y}_{rb} \quad \dots\dots\dots (13)$$

在 (12) 式中,

$$\begin{aligned} Z_{eb}^2 &= (2R_b^2) + (2X_b - X_e)^2 \\ \theta_2 &= 2r_2 - 2\alpha - \alpha_{eb} + 90^\circ \\ r_2 &= \arctg \frac{X_e \sin(2\alpha + \alpha_{eb} - 90^\circ)}{Z_{eb} + X_e \cos(2\alpha + \alpha_{eb} - 90^\circ)} \\ \alpha_{eb} &= \arctg \frac{2X_b - X_e}{2R_b} \\ \alpha &= \arctg \omega R_e C_e \end{aligned}$$

(12) 式和 (13) 式说明, 若 b_e 保持不变, 只改变 g_e , 则只有 θ_2 随 C_2 而改变, 因此测量导纳 \dot{Y} 的轨迹是以 $\dot{Y}_{c.b}$ 的末端为园心, 以 Y_{rb} 为半径的一个园。对于不同的 b_e 值, 就有一个等电纳园族。这个园族在图 3 中用虚线表示。

由 (12) 式, 在 \dot{Y}_{cb} 式的右边加减一项 \dot{Y}_b , 变化之后得到 \dot{Y}_{cb} 的另一表达式:

$$\dot{Y}_{cb} = \frac{1}{Z_b} - \frac{2X_e}{Z_{eb}^2 - X_e} e^{-j\beta_2}$$

注意到 (12) 式中的 \dot{Y}_{rb} 式, 则上式可写为

$$\left. \begin{aligned} \dot{Y}_{c.b} &= \frac{1}{Z_b} - Y_{rb} e^{-j\beta_2}, \\ \beta_2 &= \arctg \frac{R_b^2 - X_b^2}{2R_b X_b} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

(14) 式中, β_2 只与 R_b 、 X_b 有关, Y_{rb} 则与 X_e 有关。当改变 X_e 时, β_2 是常数, Y_{rb} 随 X_e 而变。因此, (14) 式是表示的一条直线。其斜率为 $\tg \beta_2$ 。就是说, 当 X_e 变化时, 等电纳园的园心轨迹是一条直线, 园族的所有园心都在这条直线上。这条直线在图 3 中用 \overline{GPQ} 表示。

因为 $|\dot{Y}_{cb} - \dot{Y}_b| = Y_{rb}$, 即等电纳园园心到 \dot{Y}_b 末端的距离恰好等于该园的半径, 所以园族中所有园的园周都过 \dot{Y}_b 的末端。在图 3 中, 这一点就是 P 点。因 \overline{GPQ} 是园心轨迹, 故等电纳园族都在 P 点与 \overline{GPQ} 的垂线相切。

现在来看一看几个特殊情况下等电纳园的园心位置 (参见图 3):

- $X_e = 0$, $\dot{Y}_{c.b} = \dot{Y}_b$ 。园心在四象限 P 点。
- $X_e = 2X_b$, $\dot{Y}_{c.b} = R_b / (R_b^2 - X_b^2)$ 。园心在 g 轴上的 H 点。
- $X_e = (X_b^2 + R_b^2) / X_b$, $\dot{Y}_{cb} \rightarrow \infty$ 。园心在无穷远处。园周为一直线, 与直线 \overline{PN} 重合。
- $X_e = 2(X_b^2 + R_b^2) / X_b$, $Y_{cb} = -\frac{R_b}{R_b^2 + X_b^2} (1 + j\frac{R_b}{X_b})$ 。园心在第三

象限内。

$$\text{---} X_e = \infty, \dot{Y}_{cb} = -j \frac{1}{2 X_b} \text{。园心在 } -jb \text{ 轴的 } G \text{ 点。}$$

可见，当 $X_e = 0 \rightarrow (R_b^2 + X_b^2) / X_b$ 时，等电纳园的园心由 P 点趋向 $+\infty$ ，而当 $X_e = (R_b^2 + X_b^2) / X_b \rightarrow \infty$ 时，园心位置由 $-\infty \rightarrow G$ 点。就是说 $X_e = 0 - \infty$ 范围内变化时，等电纳园园心是在 \overline{GP} 两侧的线段上。

由 (11) 式和 (14) 式可知，

$$\text{tg } \beta_1 \cdot \text{tg } \beta_2 = 1 \text{。}$$

因此，等电纳园的园心轨迹 \overline{PN} 与等电纳园的园心轨迹 \overline{GPQ} 之间的夹角为 90° ，即他们是互相垂直的两条直线。

图 3 中的 P 点，是 \dot{Y}_b 的末端，如上所述，等电纳园族与等电纳园族都过此点。而当 R_b 不变，改变 X_b 值时，P 点将随之移动。其变化规律如下：

- X_b 为感性时，P 点在四象限；
- $X_b = 0$ 时，P 点在 g 轴上；
- X_b 为容性时，P 点在一象限。

因此， X_b 改变时，两个园族也要随之在一、四象限内偏移。而它们园心轨迹的夹角仍保持 90° 不变。

三、整定导纳

图 1 中，变流器 1 LH、2 LH 原边各有两个绕组，设各绕组对副边的变比均为 n 。2 LH 原边两个绕组的回路中，分别串联接入电阻 R_m 和 R_∞ 。将 1 LH、2 LH 原边绕组的漏抗略去不计，而绕组的电阻，分别归入 R_m 和 R_∞ 之中。设电流 \dot{I} 、 \dot{I}_m 和 \dot{I}_∞ 分别为流过被保护回路、 R_m 回路和 R_∞ 回路的电流， \dot{I}_D 和 \dot{I}_Z 分别为 1 LH 副边和 2 LH 副边的电流， \dot{I}_D 为动作电流， \dot{I}_Z 为制动电流。上述电流进入绕组的极性如图 3 所示。

经过上述处理，由图 3 就可以写出，

$$\dot{I}_D = \frac{1}{n} (\dot{I} - \dot{I}_m) = \frac{\dot{U}}{n} \left(\frac{1}{Z} - \frac{1}{R_m} \right) - \frac{\dot{U}}{n} (\dot{Y} - g_m),$$

和
$$\dot{I}_Z = \frac{1}{n} (\dot{I}_\infty - \dot{I}_m) = \frac{\dot{U}}{n} \left(\frac{1}{R_\infty} - \frac{1}{R_m} \right) - \frac{\dot{U}}{n} (g_\infty - g_m)。$$

用 U/n 除上式，则得到动作导纳和制动导纳

$$\left. \begin{aligned} \dot{Y}_D &= \dot{Y} - g_m, \\ \dot{Y}_Z &= g_\infty - g_m. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

其中： $g_m = \frac{1}{R_m}$ ， $g_\infty = \frac{1}{R_\infty}$ 。

\dot{Y} ——图 1 G、E 端的测量导纳；在上节中已详细讨论过。

装置按比较两个电气量的绝对值的原理构成。其动作条件是：

$$|\dot{Y}_D| \leq |\dot{Y}_z|$$

或
$$|\dot{Y} - g_m| \leq |g_\infty - g_m| \quad \dots\dots\dots (16)$$

动作的边界条件是：

$$|\dot{Y} - g_m| = |g_\infty - g_m| \quad \dots\dots\dots (17)$$

(16) 式是用绝对值表示的圆方程式。圆的圆心和半径可以从 (17) 式直接写出：

$$\left. \begin{aligned} \dot{Y}_{c \cdot g} &= g_m, \\ \dot{Y}_{r \cdot g} &= g_\infty - g_m. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

用 (17) 和 (18) 式表示的圆我们称为整定圆，或整定导纳圆。整定圆的圆心和半径由 R_m 和 R_∞ 决定，给定 R_m 和 R_∞ 后，这个圆就是确定的。

根据 (17) 或 (18) 式作出的整定圆示于图 4。动作区在圆内。

下面来确定 g_m 和 g_∞ 的整定值。

设励磁回路对地电导 g_e 下降到 $g_{ez} = \frac{1}{R_{ez}}$ 时要求保护装置动作。并认为装置在调整时已使附加电抗 $X_b = 0$ 。由 (8) 式可以求出 $X_b = 0$ 的条件下对地电导 $g_e = g_{ez}$ 的等电导圆圆心和半径，

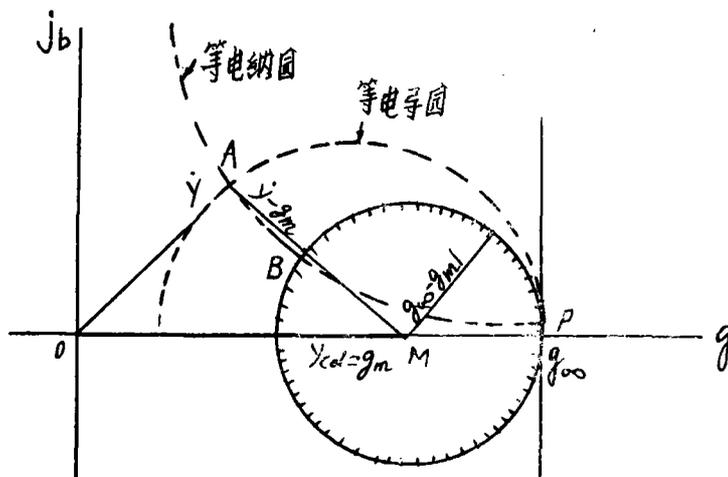


图 4 整定导纳圆图 (圆内为动作区)

$$\left. \begin{aligned} Y_{c \cdot g} &= \frac{2 R_b + R_{cz}}{2 R_b (R_b + R_{cz})}, \\ Y_{r \cdot g} &= \frac{R_{ez}}{2 R_b (R_b + R_{ez})} = \frac{1}{R_b} - Y_{c \cdot g}. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

比较(18)式和(19)式, 令

$$\left. \begin{aligned} g_{\infty} &= \frac{1}{R_b} \\ g_m &= Y_{c.g} = \frac{2 R_b + R_{ez}}{2 R_b (R_b + R_{ez})} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (20)$$

或

$$\left. \begin{aligned} R_{\infty} &= R_b, \\ R_m &= \frac{2 R_b (R_b + R_{ez})}{2 R_b + R_{ez}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (21)$$

这样, 当 R_{∞} 和 R_m 按(21)式整定时, 则整定圆将于 $X_b = 0$ 条件下 $R_e = R_{ez}$ 的等电导圆相重合。因此, 在这种条件下, C_e 值在 $0 - \infty$ 范围内变化时, 动作电导值恒等于 g_z , 或者说动作电阻值恒等于 R_z , 而与 C_e 值的大小无关。

由图4看出, 若正常情况下测量导纳 Y 的末端在 A 点, 当绝缘变坏, g 增加时, A 点将沿等电纳圆向 P 点移动, 到达 B 点时装置动作, 若绝缘正常, g 未变, 而 C_e 增加, A 点将沿相应的等电导圆向 P 点移动, 只有在 $C_e = \infty$ 时, 才会在 P 点到达动作边界, 引起误动作, 而实际上 C_e 不可能达到 ∞ , 这种情况是无须考虑的。

动作值不受电容 C 大小的影响是这种原理的优点, 因为不需要忧虑发电机励磁回路对地电容不同所产生的影响。

四、导纳园图及其分析

为了作一定量分析, 给定一组 C_e 、 R_e 值, 按(8)式作出等电导圆族, 按(12)式作出等电纳圆族。设对地电阻 $R_e = 1 K \Omega$ 时装置动作, 即取 $R_{ez} = 1 K \Omega$ 作出整定圆。

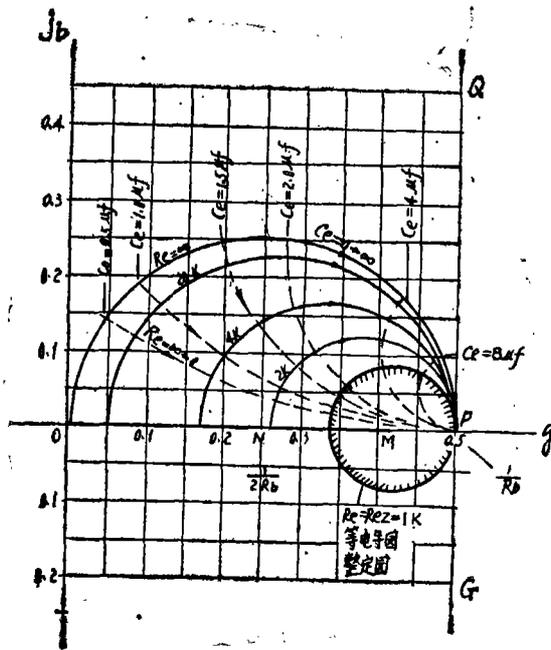


图5 $Z_b = 2 K$ $X_b = 0$ 的测量导纳园图

为了比较附加电抗 X_b 的影响, 取 $\dot{Z}_b = 2K\Omega$, $\dot{Z}_b = 2 + j0.44K\Omega$ 和 $\dot{Z}_b = 2 - j0.44K\Omega$, 作出三组园图。为明了起见, 其中 X_b 取用了较大的数值。这三组园图分别示于图 5、6、7。

比较图 5、6、7 这三组园图, 可以看出:

1. 由于整定回路内只存在 R_o 和 R_m 而无感抗, 所以整定园的圆心在 g 轴上, 因而只是在 $X_b = 0$ 的条件下, $R_{oz} = 1K\Omega$ 的整定园才同 $R_o = 1K\Omega$ 的等电导圆相重合, 也就是说只是在 $X_b = 0$ 的条件下, 才能做到动作值与电容 C_e 值无关。

2. 当回路中存在附加感抗 X_b 时, P 点移入四象限内, 等电导园和等电纳园随之向四象限偏移。而整定园的圆心仍在 g 轴上, 整定园仍处于对称于 g 轴的位置上。此时, $R_o = 1K\Omega$ 的等电导园与 $R_{oz} = 1K\Omega$ 的整定园不再重合, 从而使动作值随电容 C_e 而

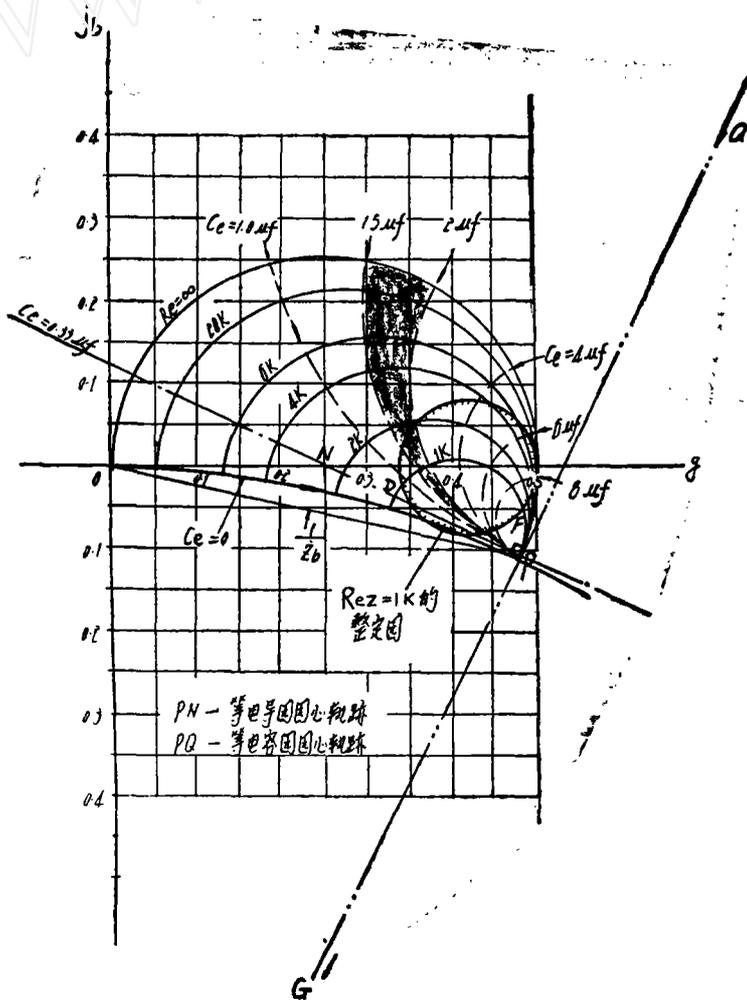


图 6 $\dot{Z}_b = 2 + j0.44K$ 的测量导纳园图

的影响就成为不可忽视的问题了。

5. 在上述分析中, 均将1 LH和2 LH的原边漏抗略去, 实际上多少是存在漏抗的。这相当于与 R_m 和 R_c 分别串联接入一个感抗。这一感抗的影响, 是使整定圆向四象限偏移。因此, 当附加电抗 X_b 为感性时, 1 LH、2 LH原边漏抗的影响是有利的; 而当 X_b 为容性时, 其影响是不利的, 因为它将加大整定圆与测量导纳轨迹的偏离程度。

6. 综上所述, 可知附加电抗 X_b 的存在对继电器的动作值有严重影响。附加电抗 X_b 由励磁绕组的电抗 X_f 、1 LH绕组 W_1 的漏抗 X_1 和电容C与L匹配的残余电抗 X_L 等几项组成。 X_1 的影响可认为与整定回路内1 LH、2 LH原边漏抗的作用大致相抵。这样, 附加电抗

$$X_b = X_f + X_L.$$

其中, X_f 可能呈感性, 也可能呈容性; 滤波器要精心调整, 使残余电抗不要过大。交流电压 U 经两只电容器从正负极两端输入, 可使 X_f 降低, 因此, 不应采用单端输入的方式。总之, 调整时要力求使 $X_b \approx 0$, 并避免 X_b 呈现容性。