

# BZ—6 型汽轮发电机失磁保护

许昌继电器研究所 陈祥霖

## 一、同步发电机失磁：

同步发电机励磁回路如果由于各种原因引起励磁消失时，转子的磁通将近似地按指数律关系而衰减；首先感应电势 $E$ 和同步功率 $P_c$ 随着减小，此时功率角 $\delta$ 便相应增大，以使 $P_c$ 自动增加到与原动机供给的机械功率 $P$ 相平衡。当 $\delta$ 角接近 $90^\circ$ 时发电机便开始失步，转子逐渐加速，至脱离同步状态而进入异步运行状态。

### 1、失磁的原因：

同步发电机在运行中突然全部或部分地失去励磁往往是由于下列几个原因引起的：

- (1) 励磁回路、励磁机装置或电源故障；
- (2) 转子回路故障；
- (3) 灭磁开关误动作等等。

### 2、失磁的现象：

同步发电机失去励磁后，发电机的各相应电气量、机械量发生了不同的变化，归结起来有下列几点：

- (1) 保持送出有功功率，但略有减小且有周期性摆动。
- (2) 定子电流增大，而有周期性摆动。失磁前所带无功愈多失磁后定子电流增加得也愈多。
- (3) 从送出无功功率变为吸收无功功率；失磁前所带无功愈多，失磁后所吸收无功功率也愈多；而与原来所带的无功功率无关。
- (4) 由于发电机吸收大量无功，使系统无功缺额而造成系统电压严重下降。
- (5) 转子产生频率为 $f_s$ 的交变电流。
- (6) 如果系统无功储备足够的话，汽轮发电机可以在很小的滑差率下（一般 $<1\%$ ）运行于异步状态一段时间。
- (7) 转子发生过热现象。
- (8) 在异步运行时，转子的交变电流（或感应出的涡流）构成旋转磁场，能发出一定的异步功率。

### 3、异步运行状态的分析：

原动机和发电机组的运动方程式：

$$T_J \frac{d^2 \delta}{dt^2} = M_T - M_e - M_{ac} - \Sigma M \dots\dots\dots 1$$

式中:  $T_J$ ——机组的惯性常数;

$\frac{d^2\delta}{dt^2}$ ——机组的角加速度;

$M_T$ ——原动机转矩;

$M_e$ ——电磁同步转矩;

$M_{ac}$ ——电磁异步转矩。

(1)失磁前, 同步发电机作正常同步运行

$$S = 0, \quad M_{ac} = 0 \quad T_J \frac{d^2\delta}{dt^2} = 0$$

$$M_T = M_e$$

(2)失磁后, 同步发电机由同步运行转为异步运行。

$S \neq 0$ , 随着 $\delta$ 角的增加,  $M_{ac}$ 增加,  $M_T$ 降低最后达到了平衡点A点。同步发电机处于稳定异步运行状态(见图1。)

但此时发电机输出的功率除了异步功率以外, 还有同步功率  $P_c = \frac{EU}{x} \sin\delta$ , 但 $P_c$ 的平均值为0。

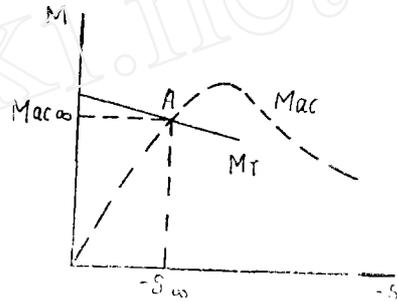


图 1

(3)水轮发电机和汽轮发电机的异步转矩特性的比较:

$$m_{ac} = -\frac{U^2}{2} \left\{ \left( \frac{1}{x'd} - \frac{1}{xd} \right) \frac{ST_d'}{1 + (ST_d')^2} + \left( \frac{1}{x''d} - \frac{1}{x'd} \right) \frac{ST_d''}{1 + (ST_d'')^2} \right. \\ \left. + \left( \frac{1}{x_q''} - \frac{1}{x_q} \right) \frac{ST_q''}{1 + (ST_q'')^2} \right\} = m_d' + m_d'' + m_q'' \dots \dots \dots 2$$

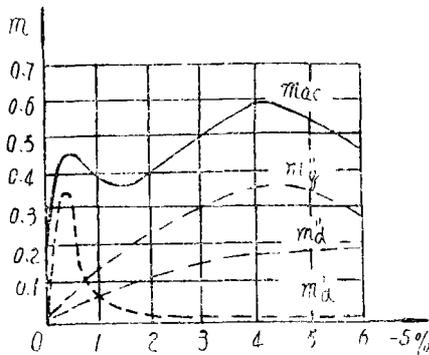


图 2 水轮发电机

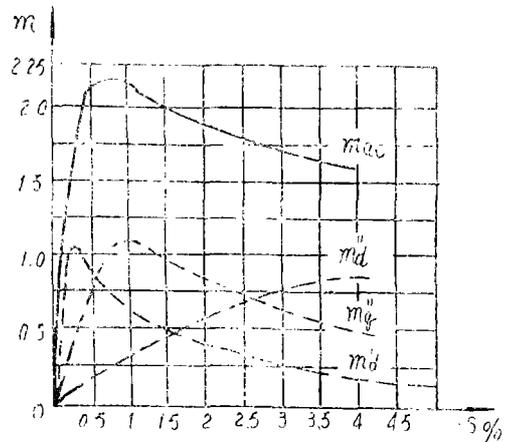


图 3 汽轮发电机

式中:  $U$ ——发电机端电压;

$x_d, x'd, x''d$ ——发电机纵轴同步、暂态、次暂态电抗;

$X_q, X''q$ ——发电机横轴同步、次暂态电抗;

$T'd$ ——纵轴暂态时间常数;

$T''_d, T''_q$ ——纵轴、横轴次暂态时间常数。

$m'_{ac}$  —— 转子纵轴回路总磁通变化引起的转矩分量；  
 $m''_{ac}$  —— 转子纵轴回路漏磁通变化引起的转矩分量；  
 $m'''_{ac}$  —— 转子横轴回路电流引起的转矩分量。

从图 2 图 3 水轮发电机和汽轮发电机的异步转矩曲线看出，汽轮发电机在很小的滑差率下（一般  $< 1\%$ ）具有较大的异步转矩（大约 2 倍）；而水轮发电机在较大的滑差率下（一般约 5% 左右）才具有最大异步转矩（约 0.5~0.8 倍）。所以一般汽轮发电机能在很小滑差率下作稳定异步运行。

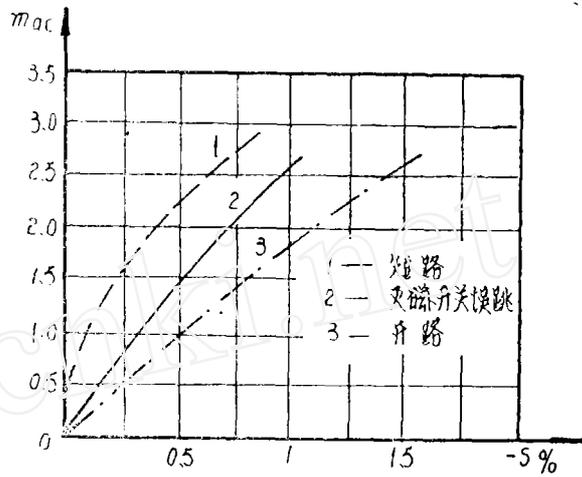


图 4 2 万 KW 汽轮发电机在  $U_H$  下  $m_{ac} - S$  曲线

失磁的方式不同，发电机所具有的异步转矩也不一样，一般短路时最大，开路时最小。见图 4。

## 二、失磁保护：

（一）根据汽轮发电机失磁时几个特点，对于汽轮发电机失磁保护应完成如下功能：

- 1、当发电机失去励磁时，不管是何原因应立即报警通知值班人员去处理；
- 2、当发电机失去励磁时，延时 2~5 分钟作用跳闸并停机。因为汽轮发电机一般允许无励磁运行一段时间，所以跳闸需要延时，以便运行人员有充分时间处理，减少用户的停电机会。
- 3、当发电机失去励磁时，如果这时机端电压下降，危及系统的稳定时，应立即与系统解列并停机。

（二）为实现上述的保护功能，我所和清华大学师生共同研制，拟定图 5 的保护方式：

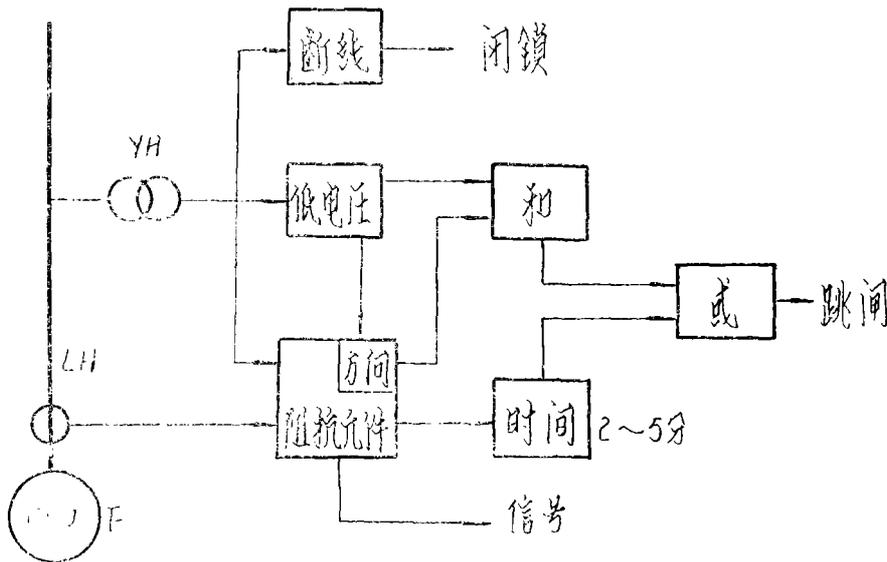


图 5 保护原理方框图

1、阻抗元件所应有的特性：

发电机励磁消失时，在发电机机端上看到的阻抗 $Z$ 由原来的第一象限转入第四象限。

a、当发电机励磁全部消失时：

在发电机机端上看到的阻抗 $Z$ 由原来的第一象限转入第四象限。一般高滑差时接近 $x'd$ ，而低滑差时接近 $x_d$ 。所以只要将方向阻抗元件的整定阻抗圆象图6情况，就可以实现在励磁全部消失时保护可靠地动作。

b、当发电机励磁部分消失时：

$$\dot{E}_r = k_e \dot{E}_c \dots \dots 3$$

根据等值阻抗图(图7)作向量图(图8)，

$$\dot{E}_r = \dot{E}_c + Z_c \dot{I} + Z_r \dot{I} \dots \dots 4$$

$$\dot{E}_r = \dot{U}_r + Z_r \dot{I} \dots \dots 5$$

$$\dot{U}_r = \dot{E}_c + Z_c \dot{I} \dots \dots 6$$

以O为圆心，OM为半径作圆；交OC于A'、B'。

连A'M、B'M，在MC上取一点N—— $\frac{CN}{MN} = \frac{Z_c}{Z_r}$ ；

作直线NA、NB；使NA//MA'，NB//MB'，交OC上A、B两点。

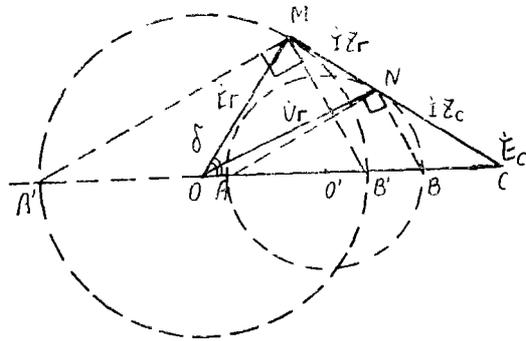


图8 向量图

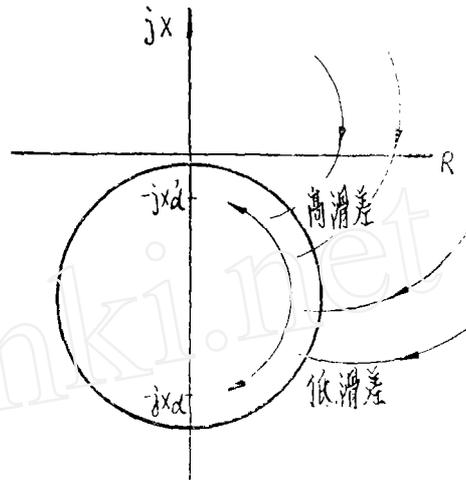


图6 全部失磁阻抗变化轨迹

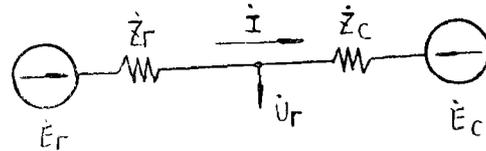


图7 等值阻抗图

$$\therefore \angle A'MB' = \angle ANB = 90^\circ$$

$\therefore$  N点是在以AB为直径的圆(圆O')。

$$\text{设 } \frac{Z_c}{Z_r} = k_z \dots \dots 7$$

$$\overline{NA} = \overline{CA} + \overline{NC}$$

$$= (\dot{E}_c + \dot{E}_r) \frac{k_z}{1+k_z} + \dot{I} Z_c$$

$$\text{用 } E_r = k_e E_c$$

$$Z_c = K_z Z_r$$

$$\dot{E}_c = \dot{U}_r - \dot{I} k_z Z_r \text{ 代入}$$

$$\overline{NA} = (\dot{U}_c - k_z \dot{I} Z_r) (1+k_e) \frac{k_z}{1+k_z} + \dot{I} k_z Z_r$$

$$= \frac{k_z(1+k_e)}{1+k_z} (\dot{U}_r + \dot{I} Z_r \frac{1-k_e k_z}{1+k_e}) \dots \dots 8$$

同理

$$\overline{NB} = \frac{k_z(1-k_e)}{1+k_z} (\dot{U}_r + \dot{I} Z_r \frac{1+k_e k_z}{1-k_e}) \dots \dots 9$$

$$\text{设: } k_1 = \frac{k_z(1+k_c)}{1+k_z}$$

$$k_2 = \frac{k_z(1-k_c)}{1+k_z}$$

$$\overline{N\bar{A}} = k_1 \left( \dot{U}_r + jZ_r \frac{1-k_c k_z}{1+k_c} \right) \dots\dots 10$$

$$\overline{W\bar{B}} = k_2 \left( \dot{U}_r + jZ_r \frac{1+k_c k_z}{1-k_c} \right) \dots\dots 11$$

式10、11分别以 $k_1i$ 、 $k_2i$ 除, 得:

$$\frac{\overline{N\bar{A}}}{k_1i} = Z + Z_r \frac{1-k_c k_z}{1+k_c} \dots\dots 12$$

$$\frac{\overline{N\bar{B}}}{k_2i} = Z + Z_r \frac{1+k_c k_z}{1-k_c} \dots\dots 13$$

其中 $Z = \frac{\dot{U}_r}{i}$ 为发电机机端阻抗。

式12、13可以作出相应的阻抗向量图。(见图9) 其中

$$\overline{N_1A_1} = \frac{\overline{N\bar{A}}}{k_1i}, \quad \overline{N_1B_1} = \frac{\overline{N\bar{B}}}{k_2i}$$

$$\overline{N_1O} = Z$$

$$\overline{A_1O} = -jZ_r \frac{1-k_c k_z}{1+k_c} \dots\dots 14$$

$$\overline{B_1O} = -jZ_r \frac{1+k_c k_z}{1-k_c} \dots\dots 15$$

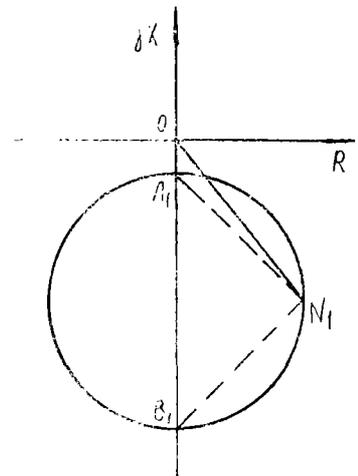


图9 阻抗图

在图8中N点是以AB为直径的圆, 在阻抗图(图9)中 $N_1$ 点是以 $A_1B_1$ 为直径的圆。一般 $k_c$ 取0.6左右, 所以由部分失磁决定的阻抗圆比全部失磁时阻抗圆大。

从上面分析, 将阻抗元件的动作特性圆取适当值, 即可以反映发电机全部及部分失磁。

## 2、阻抗元件的原理

方框图见图10, 原理图见图11。

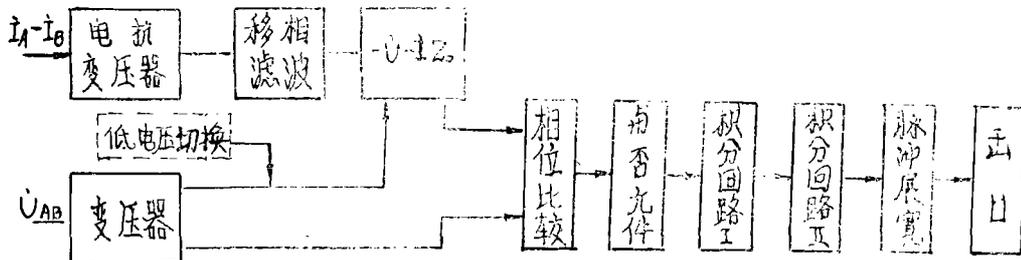


图10 阻抗元件方框图

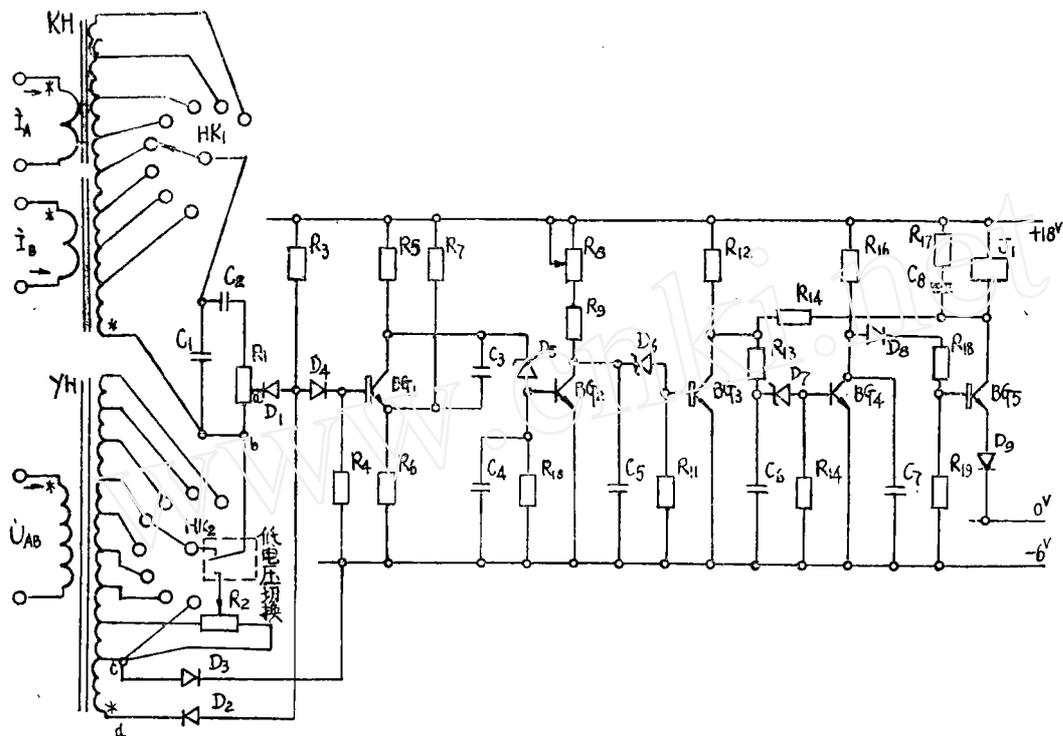


图11 阻抗元件原理图

(1) KH二次电压经过滤波、移相在 $R_1$ 上取得补偿电压 $\dot{U}_M = i_2$ 领先于一次电流 $(i_A - i_B)90^\circ$ 。

YH二次电压 $\dot{U}_{bc} = -\dot{U}$ ,  $\dot{U}_{dc} = \dot{U}$ 。

$\dot{U}_{ab} = -\dot{U}_M \therefore \dot{U}_{ac} = -\dot{U} - \dot{U}_M$ 各电压量的向量图如图12。

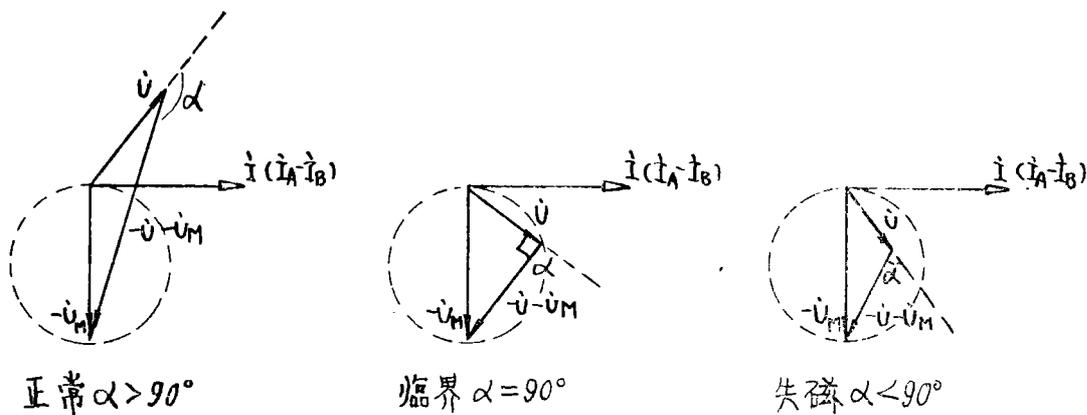


图12 各种状态向量图

由图12向量图可以看出保护动作的条件应当是 $\pi - \alpha \geq 90^\circ$ ，对于图13波形即为“bc”段一重合时间 $t_{bc} \geq 5ms$ 。

(2)  $D_1 \sim D_4$ 、 $BG_1$ 等组成“相比”、“与否”回路，当 $u$ 及 $-u-u_m$ 均为正时， $D_1$ 、 $D_3$ 截止， $D_4$ 导通 $\rightarrow BG_1$ 导通。即图13中“bc”“fg”两段。当 $u$ 或 $-u-u_m$ 为负时， $D_3$ 或 $D_1$ 导通， $D_4$ 截止 $\rightarrow BG_1$ 截止。即图13中“ab”“cf”两段时间。

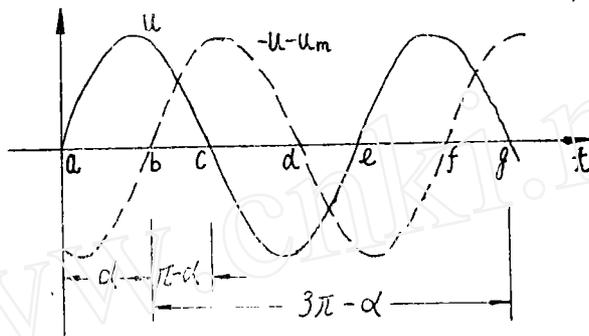


图13 波形图

(3) 各类工作状态阻抗元件工作情况列表一：

表

回路	相比与否	积分 I	积分 II	脉冲展宽	出口
基本回路	$D_1 \sim D_4$ $BG_1$ 等	$C_3$ 、 $D_5$ $BG_2$ 等	$R_8$ 、 $R_9$ 、 $C_5$ 、 $D_6$ $BG_3$ 等	$C_6$ 、 $C_7$ $BG_4$ 等	$J_1$ 、 $BG_5$ 等
状态 I	$D_2$ 或 $D_3$ 通 $D_4$ 止 $BG_1$ 止	$C_3$ 充电 $D_5$ 导通 $BG_2$ 导通	$C_5$ 短接 $D_6$ 止 $BG_3$ 止	$C_6$ 充电 $t_{c_6} > 30ms$ 时 $D_7$ 通 $BG_4$ 通	$BG_5$ 截止 $J_1$ 不动
状态 II	$D_2$ 和 $D_3$ 止 $D_4$ 通 $BG_1$ 通	$C_3$ 放电 $D_5$ 止 $BG_2$ 止	$C_5$ 充电，但因充电时间 $< 5ms$ $D_6$ 不导通。 $BG_3$ 止	同上	同上
状态 III	同上	同上	$C_5$ 充电，充电时间 $\geq 5ms$ $D_6$ 导通 $BG_3$ 通	$C_6$ 放电 $D_7$ 止 $BG_4$ 止，若这时 $BG_3$ 截止， $C_6$ 充电，但其充电时间 $< 20ms$ 故 $D_7$ $BG_4$ 均不导通。	$BG_5$ 导通 $J_1$ 动作

注：状态 I ——  $u$ 或 $-u-u_m$ 为负或均为负时，图13中“ab”“cf”段

状态 II ——  $u$ 及 $-u-u_m$ 均为正时，且 $\alpha > 90^\circ$ 时

状态 III ——  $u$ 及 $-u-u_m$ 均为正时，且 $\alpha \leq 90^\circ$ 时

图13中“bc”“fg”段

(4) 阻抗特性及整定:

a、当反应全部失磁时为式 16, 图 11 中园 a。

$$Z_a = K X_d \sqrt{\frac{U_H}{3} I_H} \cdot \frac{n_L}{n_Y} \dots 16$$

式中:

$U_H$ 、 $I_H$  分别为发电机额定电压、电流;  
 $n_L$ 、 $n_Y$  分别为电流、电压互感器的变化;  
 $K$  为灵敏系数  $K = 0.8 \sim 1.2$

b、当反应部分失磁时, 按式 14、15 计算, 作出图 14 中园 b; 而阻抗元件按园 c 整定。

c、当发电机失去励磁后, 系统电压严重下降, 危及系统稳定时 (这时低电压元件应动作); 低电压元件的接点将阻抗元件切换成 “大园” —— 图 14 中园 d。园 d 的整定值为园 a 或园 c 的 5~10 倍。

“小园” 整定阻抗为 5~40Ω; “大园” 整定为 40~200Ω。

3、时间元件:

采用充电延时电路, 其原理图见图 15。整定时间为 2~10 分。

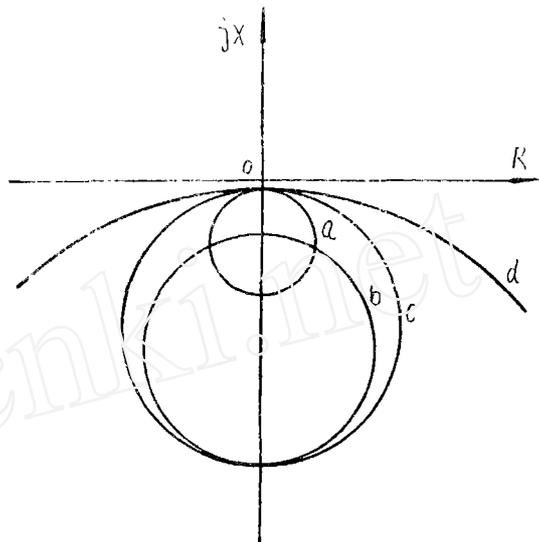


图 11 阻抗园

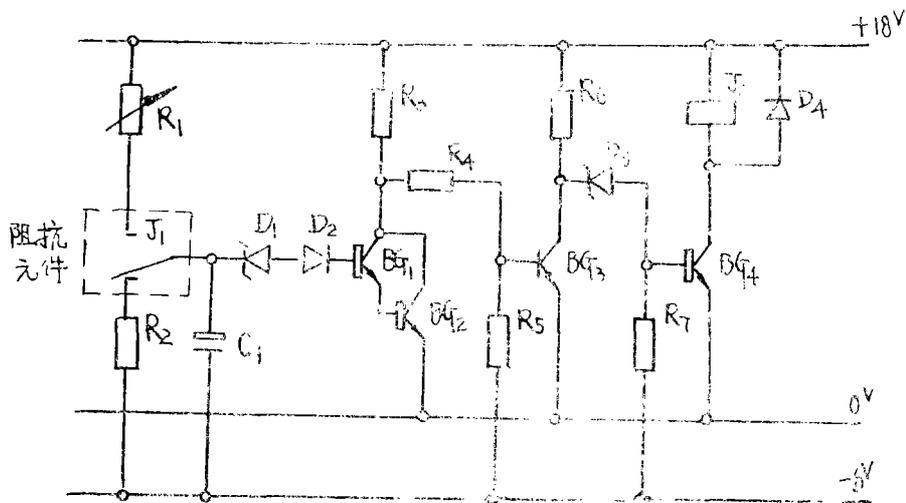


图 15 时间元件原理图

4、低电压元件:

采用反应三相电压同时降低时动作的低电压继电器, 延时躲过振荡周期。原理方框图见图 16。整定电压为 60~100V; 整定时间为 0.5~1.5 秒。

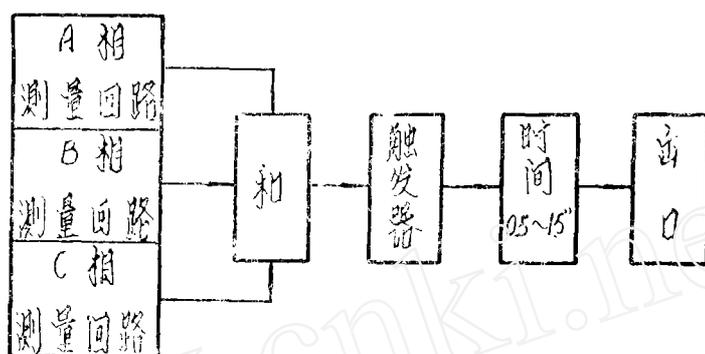


图16 低电压元件

5、断线闭锁元件：

当电压回路发生断线时，阻抗元件可能误动作，所以必须设立断线闭锁元件。

原理图见图17。它是比较发电机机端两组电压互感器（1YH、2YH）的另序电压。当外部发生接地故障时，1YH、2YH都具有另序电压； $J_1$ 、 $J_2$ 不动作。当1YH的一次或二次断线时，它具有另序电压，而2YH没有另序电压，所以 $J_1$ 动作。反之， $J_2$ 动作。这样本元件就起着断线闭锁的作用。

综合上述本失磁保护方式可以作为汽轮发电机组各类失磁的保护。

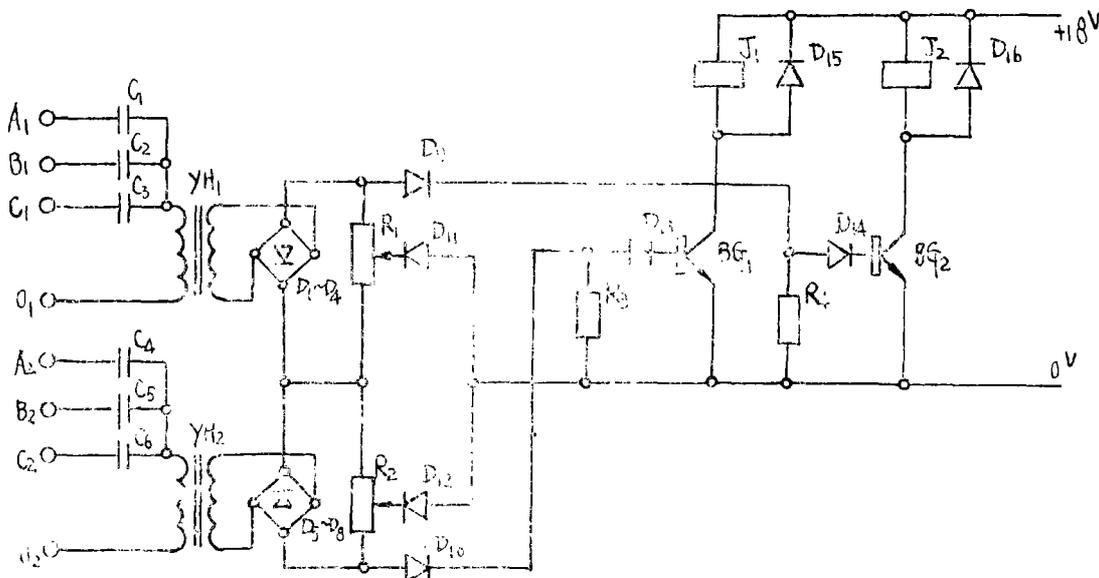


图17 断线闭锁元件原理图

三、BZ—6型失磁保护动模试验结果：

今年1月BZ—6型失磁保护在清华大学做了不同联系阻抗，不同容量机组的四种失磁类型（转子开路、转子短路、AVF误跳及励磁失磁等）的动态模拟试验，试验结果保护均

能正确反应。现将试验结果的部分机端阻抗轨迹作图18~21于后。

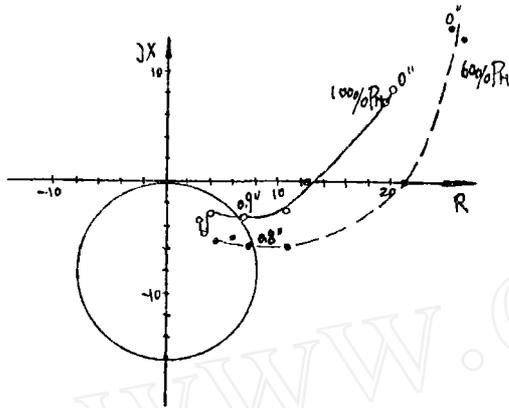


图18 转子开路

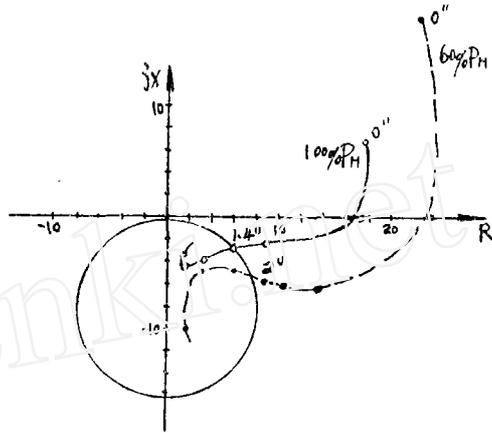


图19 转子短路

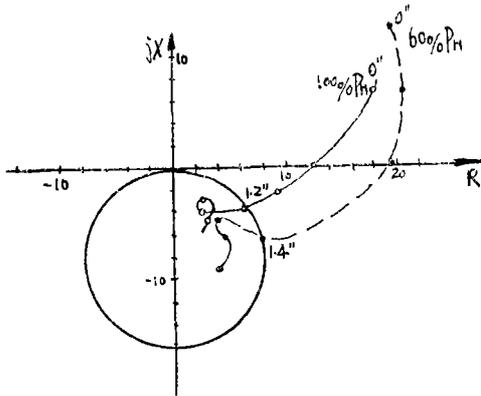


图20 AVR误动

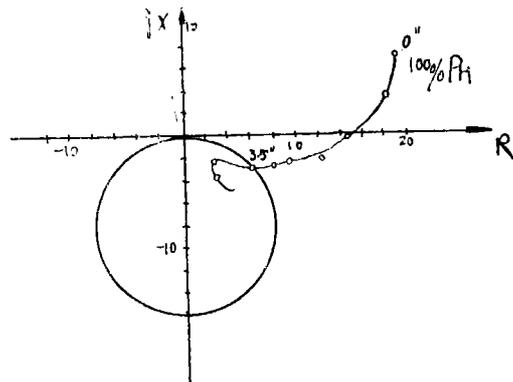


图21 励磁机失磁

BZ—6型失磁保护经过现场系统失磁试验，投入北京系统高井电厂试运行。保护还可能存在一定的缺点，有待试运行过程中总结，改进和提高。

## BD—10型100%定子接地保护

许昌继电器研究所 周慧新

近年来，随着机组容量的日益增大，对大型发电机定子接地保护问题日渐重视，因为定子绕组的接地故障比相间短路和匝间短路容易发生，因此，为了避免接地故障引起的破坏，要从两方面着手，一方面是从避免接地故障发生后接地电流对定子绕组的绝缘破坏，另一方面是定子绕组任意点发生接地故障后能及时的反映出来。