

ZD—3B小接地电流信号选择装置

许昌继电器研究所 沈学斌

一、提 要

本文分析了中性点不接地系统、消弧线圈接地系统在稳态单相金属性接地或经弧光电阻接地时电容电流和零序电压变化规律，着重分析稳态情况弧光电阻 R_g 对接地信号装置的影响，同时也讨论了单相接地时过渡过程的特点。在上述理论分析基础之上，着重介绍利用PMOS集成元件实现的ZD—3B型接地信号选择装置的原理性能以及现场工业试验的结果。

二、小接地电流系统单相接地故障稳态零序电流和零序电压的计算

1. 中性点不接地系统零序电流和零序电压的计算

从图1所示接线可以看出，正常运行时三相对地有相同的电容 C_0 ，在相电压作用下，每相的电容电流超前相电压 90° 流入地中，三相电容电流之和为零。假设A相发生单相接地后，各相对地电压为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{A-D} &= 0 \\ \dot{U}_{B-D} &= \dot{E}_B - \dot{E}_A = \sqrt{3} \dot{E}_A e^{-j150^\circ} \\ \dot{U}_{C-D} &= \dot{E}_C - \dot{E}_A = \sqrt{3} \dot{E}_A e^{j150^\circ} \end{aligned} \right\} (1)$$

故障点 d 的零序电压为

$$\dot{U}_{d0} = \frac{1}{3} (\dot{U}_{A-D} + \dot{U}_{B-D} + \dot{U}_{C-D}) = -\dot{E}_A \quad (2)$$

在非故障相的电容电流为

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_B &= \dot{U}_{B-D} j\omega C_0 \\ \dot{I}_C &= \dot{U}_{C-D} j\omega C_0 \end{aligned} \right\} (3)$$

其有效值为 $I_B = I_C = \sqrt{3} U_\phi \omega C_0$ ，式中 U_ϕ 为相电压。那么，通过接地点的电容电流

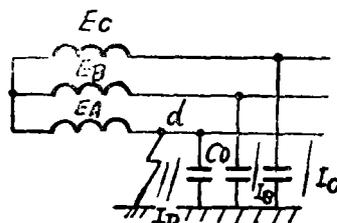


图1 中性点不接地系统图

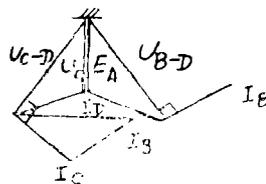


图2 单相接地向量图

为 $\dot{I}_D = \dot{I}_B + \dot{I}_C$, 从图 2 可以看出, 其有效值 $I_D = 3U_0 \omega C_0$ 。

通过以上分析可知, 在发生金属性单相接地后, 中性点对地电位发生偏移, 对地电压为故障相电压, 而线电压大小和相位不发生变化; 非故障线路上的电容电流等于本身对地电容电流, 方向是从母线流向线路; 故障线路流过整个系统非故障线路对地电容电流之总和, 方向从线路流向母线。ZD-4 型小接地电流信号装置就是利用故障线路稳态零序功率方向与非故障线路零序功率方向不同的特点来区分故障线路和非故障线路。

然而实际系统中发生单相接地故障并不都是金属性接地, 往往经过弧光电阻接地, 因此按照上面分析的零序电压、零序电流没有反映电弧电阻这样一种情况, 日本曾经对 6KV 系统, 各种故障类型进行统计和实测出故障点的电阻 R_g , 见表 1。

从表 1 可以看出, 发生单相接地故障大部分是有接地电阻的, 为了便于分析, 我们采用对称分量法, 利用复合序网来进行计算。

假设系统正序阻抗 $Z_1 = Z_K // Z_H // X_C$ (4)

式中: Z_K —系统短路阻抗

Z_H —负荷阻抗

X_C —对地容抗

负序阻抗 $Z_2 = Z_1$ (5)

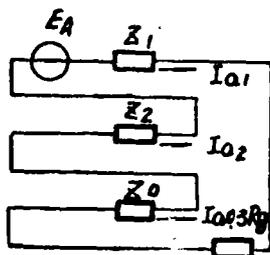


图 3 复合序网

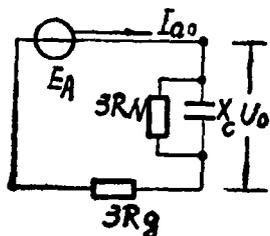


图 4 单相接地等值电路

零序阻抗 $Z_0 = Z_{K0} // Z_{H0} // Z_{T0} // X_{C0}$ (6)

式中: Z_{K0} —系统零序阻抗, 不接地系统为 ∞ ;

Z_{H0} —负荷零序阻抗, 近似 ∞ ;

Z_{T0} —P·T 零序阻抗;

X_{C0} —对地容抗。

根据非金属性接地时边界条件, 假设 A 相接地, 故障点电阻为 R_g , 则 A 相对地电压为:

$$\dot{V}_A = \dot{I}_D R_g = \dot{I}_{a1} \cdot 3R_g \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{a1} &= \dot{I}_{a2} = \dot{I}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} + \dot{V}_{a2} + \dot{V}_{a0} &= \dot{I}_{a1} \cdot 3R_g \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

根据边界条件, 获得图 3 的复合序网, 当 $R_g = 0$ 时, 接地电

流 $\dot{I}_D = \frac{3\dot{E}_A}{2Z_1 + Z_0}$, 由于 $Z_0 \gg Z_1$, 故近似地可以认为:

$$\dot{I}_D = \frac{3\dot{E}_A}{Z_0} \quad (9)$$

从 (9) 式可以看出, 考虑到接地电阻 R_g 和防止 P·T 过电压的阻尼电阻 R_N 就获图 4 等

值电路。

$$\text{零序电压: } \dot{V}_0 = \frac{\dot{E}_A}{1 + Rg \left(\frac{1}{R_N} + j3\omega C_0 \right)} \quad (10)$$

$$\text{零序电流: } I_0 = \frac{\dot{V}_0}{R_N \parallel -jX_C} \quad (11)$$

若 $R_N = \infty$, 那么零序电压和零序电流为:

$$\dot{V}_0 = \frac{\dot{E}_A}{1 + j3\omega C_0 Rg} \quad (10)'$$

$$I_D = \dot{V}_0 \cdot j\omega C_0 \quad (11)'$$

$$\text{而故障点电流: } \dot{I}_D = j3\omega C_0 \cdot \dot{V}_0 \quad (12)$$

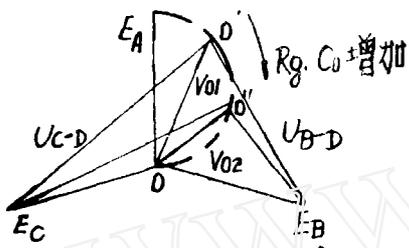


图5 零序电压 U_0 向量图

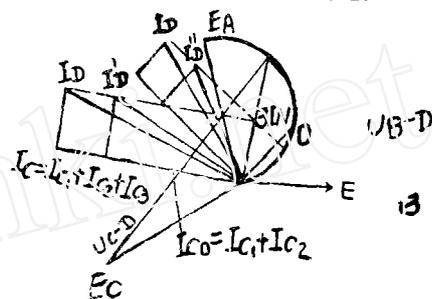


图6 零序电流向量图

根据(10)'和(11)'两式, 获得图5、和图6零序电压和零序电压的矢量图, 在图5中, 可以看到零序电压 \dot{V}_0 是以 \dot{E}_A 为直径的半虚线圆上变化。随着接地电阻 Rg 和对地分布电容的增加, 零序电压 V_0 沿着半圆轨迹从 O' 往 O 方向趋近, 其幅值变小; 按照电力规程规定, 6~10KV系统当电容电流 $I_c \leq 30A$ 时, 不需要用消弧线圈进行补偿, 在这种电容电流值情况下, 系统等值的对地分布电容对6KV系统 $C_0 = 9\mu f$, 10KV系统 $C_0 \approx 5.5\mu f$ 。假定在上述两种电容值情况下, 经 $Rg = 200\Omega$ 、 500Ω 、 1000Ω 时发生单相接地故障, 其零序电压 \dot{V}_0 计算结果见表2。从表2计算结果就相当清楚地看出, 非金属性单相接地故障时, P·T开口三角侧所输出的零序电压小于100伏, 它受接地电阻和对地分布电容的影响, 当 C_0 和 R_g 较大时, 接地零序电压 V_0 非常低, 因此在设计稳态的零序功率方向时, 其零序电压起动作值需要考虑接地电阻影响, 一般要求零序功率方向继电器零序电压起动作值低于30伏。

表2 \dot{V}_0 算结果 (V)

故障点电阻 R_g	200 Ω	500 Ω	1000 Ω
对地电容 C_0			
5.5 μf	69.3V	36V	18.6V
9 μf	50.8V	24V	11.8V

图6表示零序电流的向量图, 它取决于零序电压 \dot{V}_0 值的大小, 因此同样地受对地

分布电容 C_0 和接地电阻 R_g 的影响,从图6可以看出,故障点接地电流为:

$$\dot{I}_D = 3\dot{I}_N + \dot{I}_{C_1} + \dot{I}_{C_2} + \dot{I}_{C_3} = 3\dot{I}_N + j3\dot{U}_0 \cdot \omega C_0 \quad (13)$$

通过故障线路零序互感器电流:

$$\dot{I}'_D = 3\dot{I}_N + \dot{I}_{C_2} + \dot{I}_{C_3} = 3\dot{I}_N + j3\dot{U}_0 \cdot \omega C_0' \quad (14)$$

式中: $3I_N = \frac{9E_3}{R_N \frac{E_1}{E_3}}$ ——零序P·T回路有功电流;

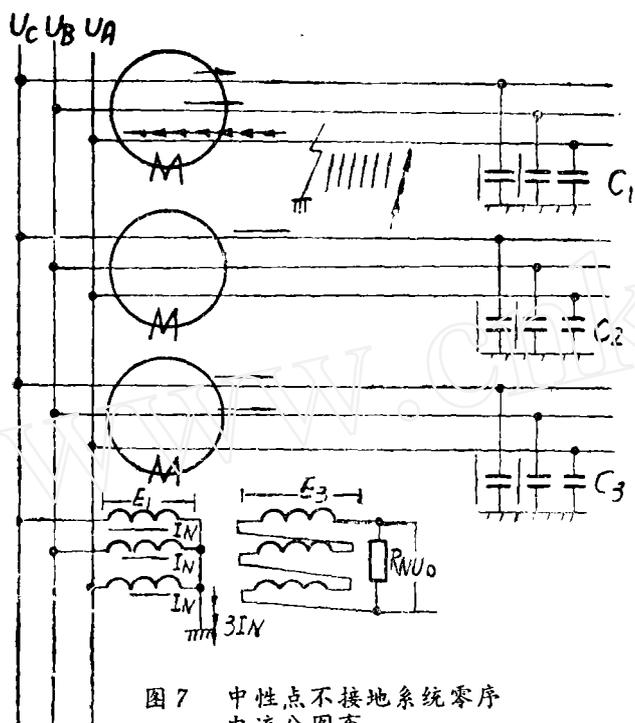


图7 中性点不接地系统零序电流分布

E_1 —P·T一次侧相电压
6KV(10KV)/ $\sqrt{3}$;

E_3 —P·T开口三角侧相电压
 $\frac{100}{3}$ (V);

R_N —防止过电压在P·T开口三角侧并联的阻尼电阻

2.中性点经消弧线圈接地网络零序电压和零序电流的计算

图8为中性点经消弧线圈接地网络等值接线图,其中 L_K 、 r_0 为消弧线圈有功分量的电阻, r_1 、 r_2 、 r_3 和 c_1 、 c_2 、 c_3 为对地分布电容和对地绝缘泄漏电阻。根据等值图可写出下列方程式:

$$\begin{aligned} (\dot{E}_A - \dot{U}_0) Y_1 + (\dot{E}_B - \dot{U}_0) Y_2 \\ + (\dot{E}_C - \dot{U}_0) Y_3 \\ = \dot{U}_0 Y_0 \quad (15) \end{aligned}$$

式中: $Y_1 = \frac{1}{r_1} + j\omega C_1$, $Y_2 = \frac{1}{r_2} + j\omega C_2$, $Y_3 = \frac{1}{r_3} + j\omega C_3$, $Y_0 = \frac{1}{r_0} - j\omega L_K$

在正常运行三相对称, Y_1 、 Y_2 、 Y_3 又完全相等,故 $\dot{U}_0 = 0$ 。如果把(15)式化简,移项整理后获得:

$$\dot{U}_0 = \frac{(c_1 + a^2 c_2 + a c_3) \dot{U}_\phi}{(c_1 + c_2 + c_3) \left[1 + \left(\frac{1}{j\omega L_K} + \frac{3}{r} + \frac{1}{r_0} \right) / j\omega (c_1 + c_2 + c_3) \right]}$$

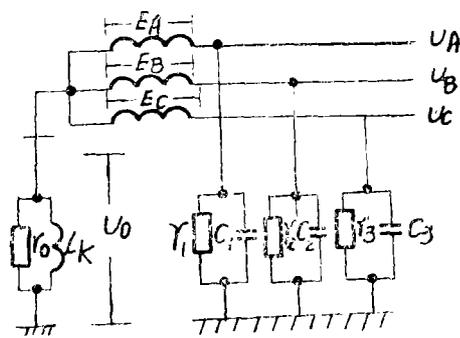


图8 消弧线圈网络等值图

$$= \frac{\dot{U}_{HC}}{1 + \left(\frac{1}{j\omega L_K} + \frac{3}{r} + \frac{1}{r_0} \right) / j\omega(c_1 + c_2 + c_3)} \quad (16)$$

式中: $U_{HC} = U_0 \frac{c_1 + a^2 c_2 + ac_3}{c_1 + c_2 + c_3}$ ——网络不对称电压

$$r = r_1 = r_2 = r_3$$

从(16)式可以看出, 当 $c_1 = c_2 = c_3$ 时, $\dot{U}_0 = 0$, $\dot{U}_{HC} = 0$; 当发生单相接地故障时, 若A相接地, $c_1 = 0$, 又 $c_2 = c_3 = c$, 则 $\dot{U}_{HC} = -U_0$, 此时零序电压,

$$\dot{U}_0 = \frac{-\dot{U}_0}{1 + \left(\frac{1}{j\omega L_K} + \frac{3}{r} + \frac{1}{r_0} \right) / j\omega(c_1 + c_2 + c_3)} \quad (16)'$$

根据(16)式能绘出补偿网络的简化电路图, 将(16)式化简,

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_0} = \frac{\dot{U}_{H.c}}{1 - K - jd} = \frac{\dot{U}_{HC}}{u - jd} \quad (17)$$

式中: \dot{U}_0 ——位移度,

$$\dot{U}_{HC} = \frac{\dot{U}_{HC}}{U_0} \text{ —— 不对称度}$$

$$K = \frac{1}{\omega L_K \cdot \omega(c_1 + c_2 + c_3)} \text{ —— 调谐度}$$

$$U = 1 - K \text{ —— 脱调度}$$

$$d = \frac{3}{r \cdot \omega(c_1 + c_2 + c_3)} + \frac{1}{r_0 \omega(c_1 + c_2 + c_3)} \text{ —— 阻尼率}$$

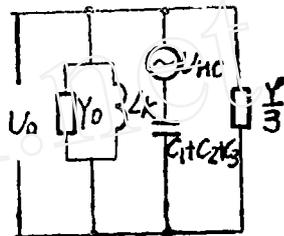


图9 补偿网络简化图

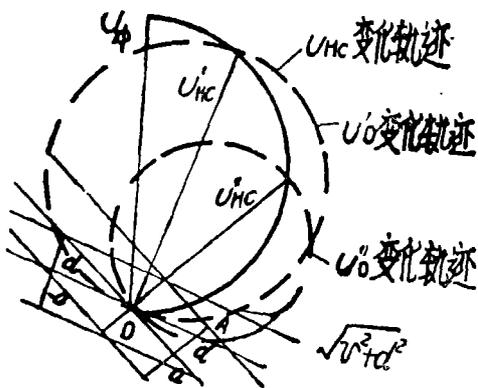


图10 零序电压向量图

根据(17)式就获得图10的矢量图, 从图中可以看出, 零序电压 U_0 不仅与电网结构有关, 而且还决定于回路的脱调度 U 。由于电弧电阻和对地分布电容的影响, 使不对称电压 \dot{U}_{HC} 在以相电压 \dot{U}_0 为直径的半圆轨迹上运动, 当电容和电阻大时, \dot{U}_{HC} 往0点趋近, 由于 k 、 d 的变化, 使得 U_0 或 \dot{U}_0 在以 \dot{U}_{HC} 为直径的轨迹圆上变化, 对应不同的 $\dot{U}_{H.c}$, 获得不同的一组 \dot{U}_0 的轨迹圆。它完全决定于消弧线 圈中, 补偿方式。目前, 在我国电力系统中为了防止完全

补偿时和欠补偿时出现谐振过电压, 通常采用过补偿方式, 其过补偿度一般5~10%, 决定于系统情况。由于采用过补偿方式, 在发生单相接地故障时, 流过故障线路的

零序电流为电感性，其方向与非故障线路方向相同，故采用稳态零序功率方向的选择装置是无法区分故障线路和非故障线路。而对于消弧线圈网络只能用暂态零序功率方向和五次谐波原理实现，因为反映暂态的在接故障瞬间认为消弧线圈是开路的；反映五次谐波原理，由于感抗 X_L 增大五倍，容抗减少五倍，因此五次谐波电感电流 I_L 减少到原来的 $\frac{1}{5}$ ，而电容电流增加5倍，因此流过故障线路的电流互感器的五次谐波还是电容性的，从线路流向母线，能正确选择出接地线路。

三、单相接地故障时过渡过程的特点

在小电流接地系统发生单相接地故障瞬间，由于故障相电压从相电压突然降低到零，而非故障相电压由相电压升高到线电压；这样对故障相来说，通过母线流向故障点产生一个十分高的振荡频率的放电电容电流，此放电电容电流的频率取决于线路参数 R 和 L ，故障点的位置及过渡电阻的大小。而非故障相电压突然升高产生一个充电电容电流，由于充电电容电流通回路的电感增大，故充电电流衰减较慢，振荡频率也较低（仅为几百赫芝）。

在过渡过程中，接地电容电流的估算，可以利用图11，等效网络进行。图中 R 、 L 、 C 表示网络分布参数， L_K 为消弧线圈电感，由于 $L_K \gg L$ ，因此在发生单相接地瞬间，消弧线圈 L_K 中电流不能突变，又因为正常运行时三相对称，流经 L_K 中电流为零，故发生接地故障瞬间认为开路，不影响电容电流分量的计算， L_K 可以忽略。这样电路就变成一个 R 、 L 、 C 串联谐振回路突然接通零序电压 $U(t) = \dot{U}_0 \sin \omega t$ 时的过渡过程进行分析。当开关 K

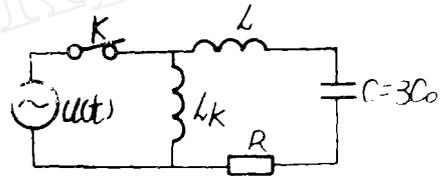


图11 等效网络

合闸时，根据图11获得下列方程式：

$$U(t) = U_L + U_R + U_C = L \frac{di}{dt} + iR + U_C = L_C \frac{d^2 U_C}{dt^2} + RC \frac{dU_C}{dt} + U_C \quad (18)$$

此微分方程的特征方程为

$$LCP^2 + RCP + 1 = 0 \quad (19)$$

解出它的根为：

$$P_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} \quad (20)$$

式中， $\delta = \frac{R}{2L}$ ——自由分量的衰减系数。

$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ ——回路的共振频率。

当 $\delta < \omega_0$ 时，令 $\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ ，所以 $P_{1,2} = -\delta \pm j\omega'$ ，那么就得到：

$$\left. \begin{aligned} U_c &= U_c'' + U_c' = Ae^{-\delta t} \sin(\omega' t + \theta) + U_m \sin(\omega t + 90^\circ) \\ i_c &= i_c'' + i_c' = CAe^{-\delta t} [-\delta \sin(\omega' t + \theta) + \omega' \cos(\omega' t + \theta)] \\ &\quad - U_m \omega C \sin \omega t \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

根据初始条件, 当合闸瞬间 $t = 0$, $u_c = 0$, $i = 0$, 因此求出未知数 A 和 θ 。

$$\left. \begin{aligned} A \sin \theta + U_m &= 0 \\ CA [-\delta \sin \theta + \omega' \cos \theta] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

解之可得: $\operatorname{tg} \theta = \frac{\omega'}{\delta}$,

$$\sin \theta = \frac{\omega'}{\omega_0}$$

$$A = -\frac{U_m}{\sin \theta} = -U_m \frac{\omega_0}{\omega'} \quad (23)$$

这样就求出回路电流

$$i = \frac{U_m}{\omega' L} e^{-\delta t} \sin \omega' t - U_m \omega C \sin \omega t$$

当 $\delta \ll \omega_0$, 故可近似认为 $\omega' \approx \omega_0$, 则

$$\begin{aligned} i &= U_m \omega_0 C e^{-\delta t} \sin \omega_0 t - U_m \omega C \sin \omega t \\ &= U_m \omega C \left(\frac{\omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin \omega_0 t - \sin \omega t \right) \\ &= I_c \left(\frac{\omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin \omega_0 t - \sin \omega t \right) \end{aligned} \quad (24)$$

当 $t = \frac{70}{4}$ 时, $\sin \omega_0 t = 1$, 则自由分量获得最大值, 故可求得过渡过程中首半波的最大电流值

$$I_{m \cdot x} = I_c \left(\frac{\omega_0}{\omega} e^{-\delta t} - \sin \omega t \right) \quad (25)$$

式中: ω —— 工频频率, ω_0 —— 共振频率

$$\therefore \frac{I_{m \cdot x}}{I_c} = \frac{\omega_0}{\omega} e^{-\delta t} - \sin \omega t \quad (26)$$

式(26)为最大电流和稳态电流之比, 近似地等于共振频率与工频频率之比, 它可能较稳态值大几倍到几十倍, 同时, 由(25)式可知, 过渡过程中, 电容电流最大值与接地瞬间相电压最大值有关, 当故障发生在相电压瞬时值过零附近时, 就没有暂态零序电容电流。

通过上述分析可知, 小电流接地系统发生单相接地故障具有下列特点:

1. 暂态电容电流最大值 $I_{m \cdot x}$ 与稳态电容电流值之比, 近似地等于共振频率与工频频率之比, 它可能较稳态值大几倍到几十倍, 同时其大小决定于短路瞬间相电压的合闸角。

2. 在过渡过程中, 由于电感线圈中所流经的电流不能产生突变, 因此可以认为消

弦线圈在过渡过程中是开路的。

3. 回路自由分量振荡频率 $\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ ，当 $\delta \ll \omega_0$ 时， $\omega' \approx \omega_0$ ，在满足振荡条件 $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 条件下，单相接地故障发生后将产生一衰减的频率较高的振荡电容电流。对于架空线路，电感 L 大，对地分布电容 C 较小，故自由振荡频率一般在 $300 \sim 1500 \text{HZ}$ ，且衰减迅速，而电缆线路，由于 C 、 L 小，故障电流自由分量衰减快，自由分量的频率较高，一般在 $1500 \sim 3000 \text{HZ}$ 左右。

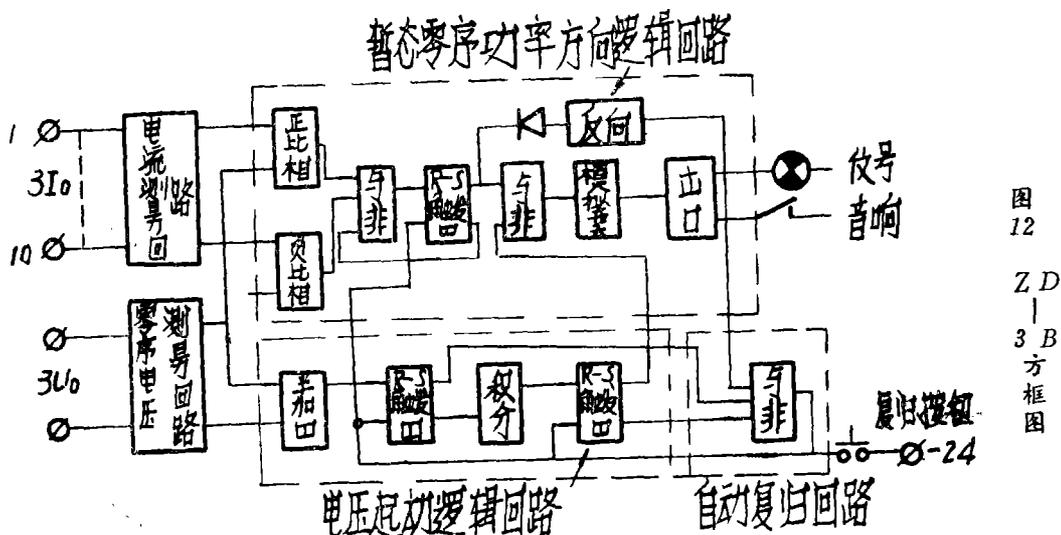
4. 在发生单相接地故障瞬间，故障回路暂态零序功率为负（因为暂态电容电流是从线路指向母线），而非故障线路暂态零序功率方向为正（因为暂态零序电流是从母线流向线路）。

四、ZD—3B接地信号选择装置的原理

通过对小电流接地网络单相接地故障时稳态和暂态过程行为的分析，确认利用反映暂态过程中零序暂态电流和零序暂态电压构成的暂态零序功率方向的特点，它能获得较高的灵敏度，能反映瞬时故障和永久性故障，不受接地方式的影响。但是，由于装置是反映暂态过程中的故障量，如何正确地地区分故障和操作干扰，给装置设计带来一定的复杂性。

ZD—3B信号装置的交流回路是由零序电流测量回路（10条），零序电压测量测量回路，交直流电源（供灯光指示及直流稳压电源回路）组成；它们分别接于 $3I_0$ 、 $3U_0$ 和 U_{AB} 交流电源。装置的直流逻辑回路由暂态零序功率方向测量逻辑回路、电压启动回路、自动复归回路三部分构成，装置方框图示于图12。现分别叙述各部分功能：

1. 暂态零序功率方向逻辑回路：它由正比相、负比相、与非门、R-S触发器、或非门、R-S触发器、出口回路构成。其方框图和原理图示于图13a、b。



正、负比相回路是判断暂态零序功率方向的极性。对故障线路暂态零序功率方向是负的，即暂态零序电压的首半波与暂态零序电流首半波方向是相反的，那么此时要求正、负比相有输出，而非故障线路暂态零序功率方向是正的，即暂态零序电压首半波与暂态零序电流首半波方向相同，那么此时要求正、负比相无输出。正、负比相的逻辑设计可按下式：

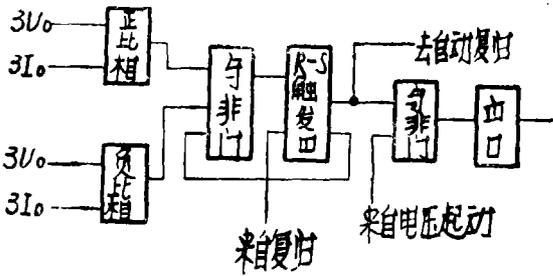


图13 a 暂态零序，功率方向逻辑回路方框图

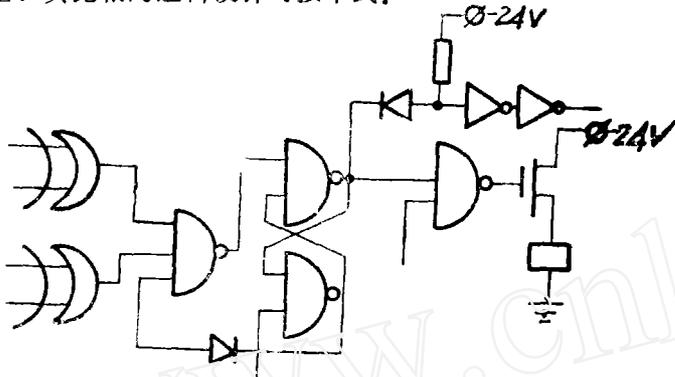


图13 b 暂态零序功率方向逻辑回路原理图

$$\left. \begin{aligned} 1 + 1 &= 0 \\ 1 + 0 &= 1 \\ 0 + 0 &= 0 \end{aligned} \right\} (27)$$

(27)式很明显地看出，它为一半加法器的逻辑功能。电路中采用5G641 PMOS片，一片5G641有四个半加法器，它有正常输出端和否输出端，图14a表示它在电路中符号，图14b表示5G641的管脚图，

管脚9为0V电位，在逻辑设计时取作为“1”电平，管脚18为-24V，在逻辑设计时取作为“0”电平。

在暂态零序功率方向测量回路中，设置两个与非门，它们主要的功能是进行电平转换，保证故障线路有“0”电平输出，起动R-S触发器和模拟开关回路。它由5G601 PMOS片构成，一片5G601 PMOS片具有四组三个输入端一个非输出端的与非门

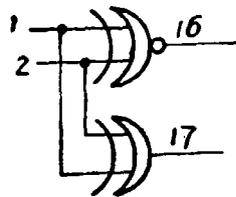


图14 a 半加法器原理图

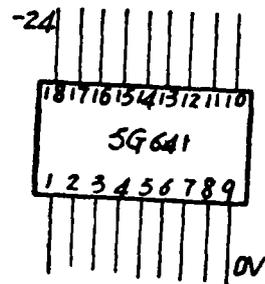


图14 b 半加法器管脚图

组成，其管脚图示于图15.b。回路中有一个由与非门构成的R-S触发器，它的功能是实现第一个半波暂态零序功率方向极性的记忆，从而保证装置仅反应第一个半波暂态零序功率的方向。R-S触发器怎样才能够实现记忆的功能呢？由它的真值表就能比较清楚地看出，当R端为“0”电平，S端为“1”电平，那么输出 Q_{n+1} 为“1”电平，从图15电路可以看出，由于输出 Q_{n+1} 又将其“1”电平反馈到S端，使S端总是保持“1”电平，而 Q_{n+1} 又把“0”电平反馈到R端，使R端总有一个“0”电平，因此使这样一种工作状态长期维持下去。要解除这样一种状态，只有当R端为“1”电平，S端为“0”电平。输出 Q_{n+1} 才是“0”电平，这种状态翻转一般通过在S端加入一

个“0”电平清零信号来获得。这样使暂态零序功率方向获得记忆的功能。现分别叙述在三种运行状态下，暂态零序功率方向回路电平变化情况。

正常运行时，由于三相对称，因此零序电流 $3I_0$ 和零序电压 $3U_0$ 均为零，其电平如图15.a所示，图15.b示于5G601和5G612管脚图。由于模拟开关5G612是“0”电平导通，“1”电平截止，因此出口中间继电器在这种运行情况下不动作。

表3 R-S触发器真值表

R	S	Q_{n+1}
0	1	1
1	0	0
1	1	Q^n

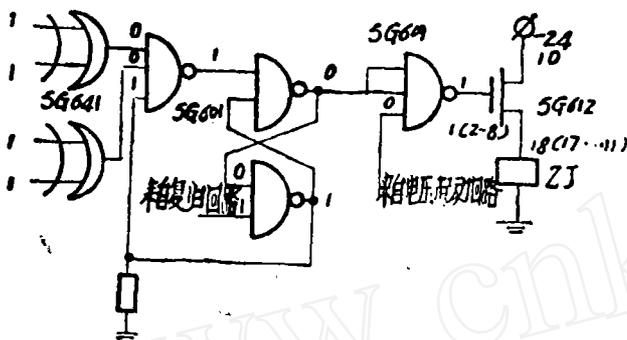


图15.a 暂态零序方向回路正常运行电平图

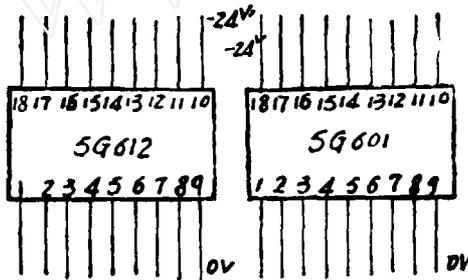


图15.b 5G612, 5G601管脚图

在发生单相接地故障时，对于非故障线路，暂态零序功率方向为正，此时其电平如图16所示，和正常运行情况一样，模拟开关获得“1”电平而不能导通，故不能动作出口中间继电器；对于故障线路，暂态零序功率方向为负，此时电平如图17所示，因为模拟开关获得“0”电平而导通，起动出口中间继电器ZJ发出接地故障信号。

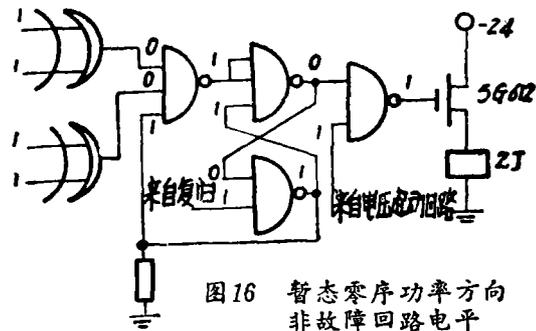


图16 暂态零序功率方向非故障回路电平

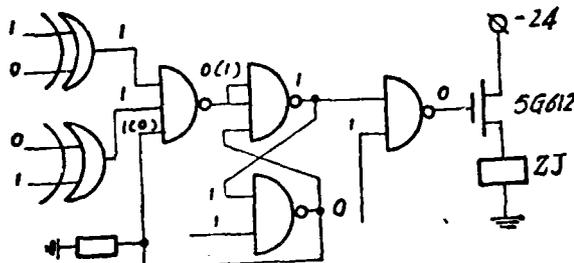


图17 暂态零序方向故障回路电平

障、永久性接地故障和正常运行时的操作干扰信号，在电压起动回路增加了一个R-C延时积分环节，实现对操作干扰信号的排除。

2. 电压起动回路：它由半加法器、R-S触发器、积分延迟回路、与否门组成。其方框图和原理图示于图18a、b。

电压起动回路的功能是实现对整个信号装置起动，解除暂态零序功率回路闭锁信号。为了区分瞬时接地故障

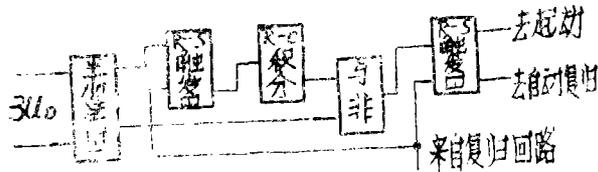


图18. a 电压起动回路方框图

电路中半加法器采用5G641型PMOS片，其作用有两个，第一个作用是使合适的电平加到R-S触发器和与非门；第二个作用提高两个R-S触发器的可靠性，因为当有 $3U_0$ 出现时，无论是怎样交替变化，半加法

器输出电平保持不变，“1”或“0”电平，使R-S触发器输入端获得一个恒定的电平，而不是交变电平，那么R-S触发器翻转后就能可靠地保持已有的工作状态，不因此而导致工作状态的变化，排除反向脉冲干扰R-S触发器。

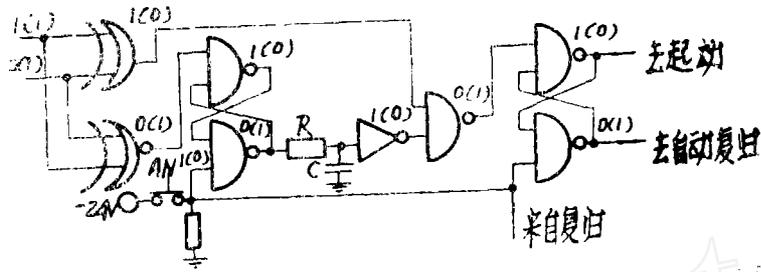


图18 b 电压起动回路电平

两个R-S触发器由5G601与非门组成，其作用是保证装置能反映具有一定故障时间的瞬时性接地故障，在这种情况下两个R-S触发器能翻转并能记住。R-C延迟积分环节的电位波形图示于图19，当有一个输入信号加到R-C积分环节，由于电容器C两端的电压不能突变，使得C点电平缓慢下降，当电位降到某一电平时，达到反向器的翻转电平， U_b 存一个电平输出， U_a 和 U_b 波形之间的差，就是R-C延迟环节造成的延迟。电路中反向器采用5G605 PMOS片，一片5G605 PMOS片它具有8个反向器，其管脚图示于图19.b。图18.b中所表示的电平，括号为复归清零电平，无括号为电压回路起动后的电平。

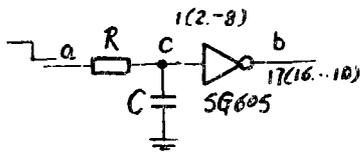


图19. a R-C延迟回路波形图

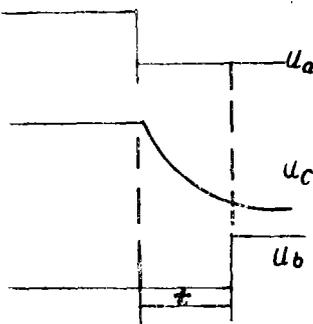
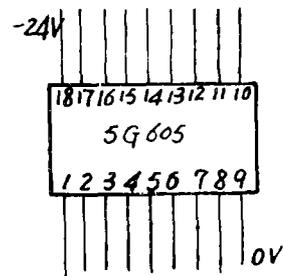


图19. b 5G605反向器管脚图



3. 自动复归回路：该回路的功能是当电压回路没有起动，而由于某种原因引起暂态零序功率方向逻辑回路起动，其起动后自保持。当发生单相接地故障时，因暂态功率方向回路早已起动就可能引起接地信号选择装置发生误判断，为此设置此回路，它能自动地把已起动的暂态零序功率方向回路复归清零，保证发生接地故障时能正确地判断。

整套信号装置的自动复归回路仅由一个与非门构成。它的三个输入信号为：比相回路R-S触发器的 Q_{n+1} 、电压起动回路第二个R-S触发器 \bar{Q}_{n+1} 和电压起动回路半加法器 Q_n 。当三个信号均为“1”电平时，与非门为“0”电平，给出清零复归脉冲。图20表示在三种运行情况下的电平。从图中可以看出，在正常运行及接地故障发生后，自动复归回路输出“1”电平，均不进行自动复归，而只有当暂态零序功率方向回路起动后，输出“0”电平，装置才能自动复归。

4. 装置的零序电流和零序电压测量回路：

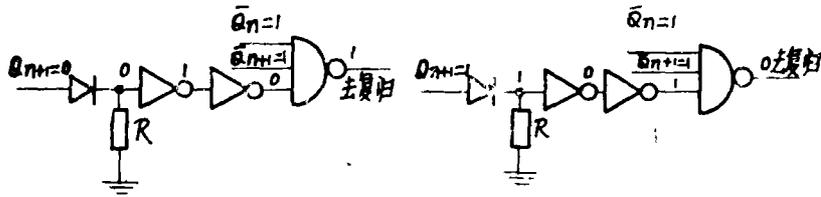


图20.a 正常运行

图20.b 暂态零序方向回路起动
电压回路未起动

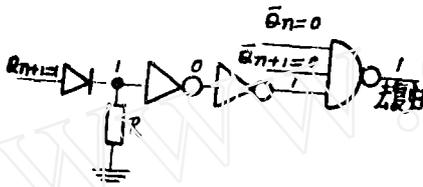


图20.c 暂态零序方向回路和
电压回路均已起动

图20 自动复归回路三种状态
下的电平

零序电压测量回路比较简单，它由变压器YB和 $50H Z$ 滤波器构成，YB的一次绕组接到 $3U_0$ ，而二次绕组接在 $50H Z$ 滤波器输入端；零序电流测量回路由变流器 $1LB \sim 10LB$ 和带通滤波器构成，其频率范围根据前面过渡过程特点分析，我们取为 $500 \sim 1500H Z$ 。变流器LB一次绕组接零序电流 $3I_0$ 回路，二次绕组接带通滤波器。带通滤波器由两节高通R-C过滤器和一节低通R-C过滤器构成，从而实现交流工频分量和 $150H Z$ 分量的极大抑制，保证 $500 \sim 1500H Z$ 范围最灵敏，其谐波频率近似地可认为：

$$f_0 = \sqrt[3]{f_1 \cdot f_2 \cdot f_3} = \frac{1}{2\pi \sqrt[3]{R_1 C_1 R_2 C_2 R_3 C_3}} \quad (28)$$

装置是实现暂态零序功率进行极性判别而动作的，由于暂态零序电流是一个衰减得十分快的高频分量，为了保证在暂态零序电流第一个半波出现后，能可靠地实现对暂态零序电压进行比相，为此要求零序电压测量回路滤波器延时小于暂态零序电流测量回路滤波器的延时，才能实现正确地比相，否则就可能造成装置拒动。因此在设计两个滤波器时，是按上述原则进行的。

5. 装置的直流电源和灯光指示回路电源。

本装置直流电源是通过全波整流、滤波、稳压后输出 $0, -24V$ 直流电压，供给信号装置PMOS片 $0, -24V$ 直流电源。变压器YB一次绕组接到P、T线电压 $V_{A,B}$ ，二次绕组接到全波整流桥，其电路示于图22。

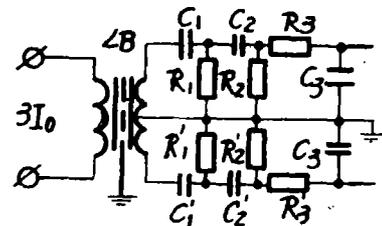


图21 零序电流测量回路

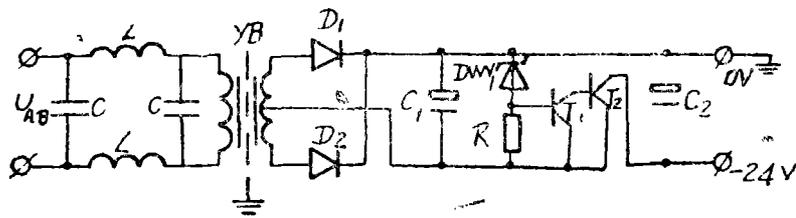


图22 直流稳压电源

灯光显示回路电源由电源变压器YB构成，一次接 $V_{A.B}$ 线电压，二次输出交流 $20\sim 24V$ ，供给灯光指示回路。

五、ZD—3B信号选择装置特点和工业实验的结果

ZD—3B信号装置它是在原ZD—3基础上改进后的一种新产品，它的性能完全能替代ZD—3接地信号选择装置，同时比ZD—3信号选择具有下列特点。

ZD—3B装置采用PMOS集成片实现其逻辑功能，电路简单，体积减少，直流回路功率消耗降低。

ZD—3B接地信号选择装置在原理上是反映暂态零序功率方向，而ZD—3是分别测量零序电压和零序电流首半波方向，通过由零序电压和零序电流起动的指示灯光信号来区分故障线路和非故障线路。由于两种装置在原理上有所区分，因此ZD—3B装置灯光指示故障线路而不指示非故障线路，但ZD—3装置当发生接地故障后，故障线路和非故障线路零序电流信号指示灯均起动，通过与电压元件灯的颜色来判断故障线路和非故障线路，这种灯光显示方式有两点不足之处：其一所有回路灯光均起动，增加回路功耗消耗，其二由于非故障线路仅是用本回路的电容电流起动信号指示回路，其电容电流值大小相对故障线路小得很多，这样在故障出现某一合闸角下，非故障线路暂态零序电流值很小，有可能造成非故障回路拒动或误动几率增加。

表 4

型 号	ZD—3	ZD—3B	ZD—4	ZD—5
原 理	反映暂态零序电流和电压首半波方向	反映暂态零序功率方向	反映稳态零序功率方向	反映五次谐波功率方向
电路形式	晶体管分立元件	PMOS集成元件	晶体管分立元件	整流型
保护回路	10路	10路	20路	单回路
适应网络方式	中性点不接地带消弧线圈接地	同左	中性点不接地	中性点不接地带消弧线圈接地
零序C、T要求	专用零序C、T或C、T构成的零序回路	同左	专用零序C、T	同ZD—3要求
交流电压取得方式	$V_{A.B}$ 、 $3U_0$	$V_{A.B}$ 、 $3U_0$	$3U_0$	$3U_0$

ZD-3B接地信号选择装置引出一对接点，起动音响告警或远动信号，原有ZD-3装置没有此接点。

通过实践证明，采用延迟起动电压回路较用整定值来躲过开关操作不同时产生的干扰信号效果较好一些，因此ZD-3B利用电压起动回路R-C延迟环节来躲过操作干扰信号。

为了便于了解使用几种接地信号装置，表4列出了几种装置的主要性能。

ZD-3B型小电流接地信号选择装置投入批量生产时，曾经在郑州10KV系统进行人工接地试验，试验的目的是考验保护装置的性能，为改进、投产、试运行提供依据。试验系统结线为图23所示，该10KV系统为单母线分段，试验时分段断路器是断开的，在I段母线#11出线和II段母线#35出线设置单相接地点，通过油开关进行短路合闸，分别在I段、II段母线进行三次接地，ZD-3B装置投入四条回路进行试验，六次人工接地试验表明，装置在外部故障，相当于非故障线路均未起动，而接地线路均正确指示出故障线路。由于该变电所电缆出线长，而且多，因此电容电流比较大，根据接地试验测量，I段母线系统电容电流为31.2A，II段母线系统电容电流为51.2安。对装置正确选择是有利的，但是试验中，零序电流互感器采用与ZD-4型接地信号装置配套的FL-2型互感器，这种互感器用冷轧矽钢片作导磁体，漏抗很大，参数设计按ZD-4型进行匹配的，因此通过互感器供给ZD-3B装置的零序电流对装置来说是要求比较高。图23b是试验后整理的暂态录波图，从录波图可以看出，在发生接地瞬间，无论故障线路和非故障线路，零序电流暂态幅值很高，故障线路为稳态值8-10倍左右，而非故障线路为稳态值的4-5倍，故障线路和非故障线路均是一个衰减十分快的电容电流，故障线路电容电流首半波方向与电压是相反

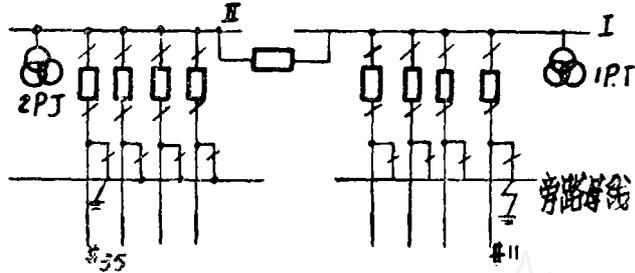


图23a 人工接地系统结线图

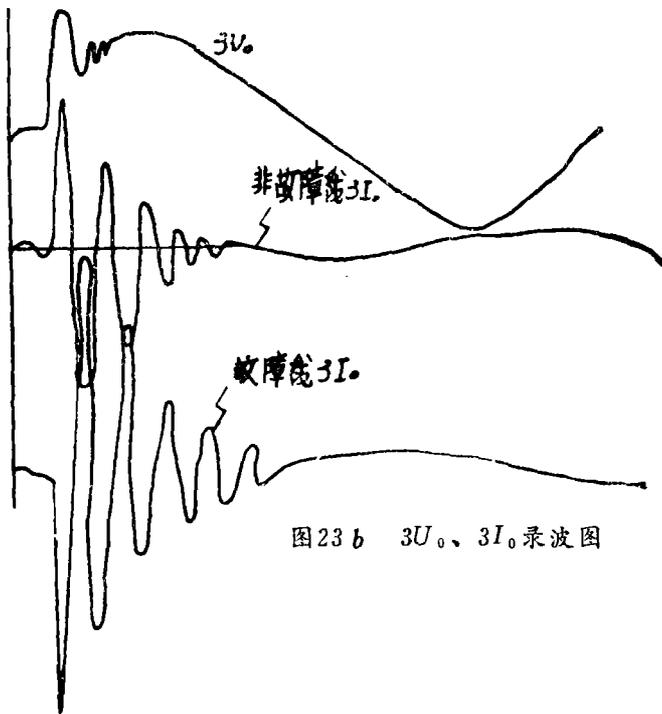


图23b $3U_0$ 、 $3I_0$ 录波图

图23b是试验后整理的暂态录波图，从录波图可以看出，在发生接地瞬间，无论故障线路和非故障线路，零序电流暂态幅值很高，故障线路为稳态值8-10倍左右，而非故障线路为稳态值的4-5倍，故障线路和非故障线路均是一个衰减十分快的电容电流，故障线路电容电流首半波方向与电压是相反

的，而非故障线路电容电流首半波方向与电压是相同的。

总之，通过上述试验表明，ZD—3B型装置在原理上和逻辑设计上是正确地，它能正确地选择故障；在电路、体积和主要性能上比ZD—3型装置有一定的优越性，能完全替代ZD—3型接地信号装置。

主要参考文献

1. 电力系统继电保护 天津大学编
2. 6—10KV中性点不接地系统单相接地保护及内部过电压的几个问题（内部资料）南昌有色冶金设计院
3. 消弧设备的选择和运行 Φ 、A·李哈乔夫