

XFL—1型高压输电线路故障探测器原理

华中工学院——湖北中试、电力系统动态模拟实验室

湖北省电力中心试验所

湖北省黄石供电局 执笔：杨志刚

一、概 述

电力系统中发生的故障，以高压输电线路的故障为多。由于高压输电线路的电压高，距离长，又往往是在气候条件恶劣时发生故障。因而，在线路发生故障后，依靠人力去全线路查找故障点，是比较困难的，这就导致了事故停电时间的延长。有一些是瞬间故障，故障点靠肉眼往往难以查出，有可能因这些隐患而产生重复性故障，增加事故停电的机率。

在带电情况下迅速地确定故障位置，至少有下列好处：（1）能大量地减少巡线工人的繁重体力劳动，提高劳动效率；（2）能及时处理线路缺陷，减少因事故停电而造成的各种损失；（3）能消除瞬时故障造成的隐患，减少产生重复性故障的机率。这些也是我国及世界上许多国家致力于研制高压输电线路故障探测器的缘故。

目前，世界上较先进的高压输电线路故障探测器有两大类，一类是脉冲型，另一类是电抗型。脉冲型的式样很多。有在故障时向故障点发射脉冲波，在故障点产生反射波，测量脉冲波在探测器安装点至故障点之间的线路导线上往返传播的时间，按已知传播速度，以确定故障点位置的；有测定故障时产生的脉冲的频率来确定故障点位置的；有利用故障时产生的行波多次反射，测定和比较行波传播时间，以确定故障点位置的。脉冲型的优点是，不受电力系统运行方式的影响，在有三相高频通道时，测量精度高，一般可达 $\pm 1 \sim 2$ KM的误差，这类探测器的缺点是装置复杂，通道辅助设备较多，价格昂贵，有盲区。做成数字显示时，易受外界干扰而使测量误差很大，甚至探测不成功，还受系统运行情况（为气候、各段导线波阻抗不等）的影响。在没有可能使用三相高频通道时，依靠邻相探测原理进行探测，或或者探测不成功，或者测量误差很大，这些都使脉冲型故障探测器的应用受到限制。电抗型的式样也不少，其基本点是利用从母线或线路电压互感器和线路电流互感器取得被测故障时的电参量，采用电流过零技术，测量探测器安装点至故障点之间的线路导线电抗，以确定故障位置，这类探测器的优点是，装置简单，不需要高频通道及其他辅助设备，只需接入故障线路的电压和电流即可，可做到无盲区，抗干扰能力较强，易做成数字显示，探测成功率高，测量精度可达 $\pm 3\%$ ，因而电抗型故障探测器是有发展前途的。这类故障探测器的缺点是，测量精度较脉冲型的低些，多少要受点运行方式的影响。目前，电抗型故障探测器以法国生产的

DALD—DLNS型【资料(1)】和英国生产的XTF—32型【资料(2)】为好,我国500kV工程进口的一套就是英国XTF—32型的。

两种类型的故障探测器,国内均有一些单位在研制,由湖北省黄石供电局和湖北省电力中心试验所联合设计试制成功的XFL—1型高压输电线路故障探测器,在国内还是第一台数字显示的电抗型的通用故障探测器,该故障探测器于一九八〇年元月至六月期间,由华中工学院——湖北省中试所电力系统动态模拟实验室、湖北省电力中心试验所和湖北省黄石供电局共同进行了动模试验,试验表明,该故障探测器是成功的。

XFL—1型高压输电线路故障探测器的特点是:除采用了线性集成电路、MOS电路和过零技术外,自行设计了独具一格的低电压突变选相元件和比较负序电压和负序电流瞬时值相位的方向选线元件(以下简称负序比相方向选线元件),无需线路继电保护装置起动,不受运行电压低的影响;对单相接地故障和相间故障,共用一个装置来反应,不必用两个装置来分别反应上述两种故障,从而简化了装置;一台探测器监视四条线路,并采用了各条线路分别整定“ a ”值,可切换,以及采用了自行设计的数字频率除法器,因而对任一条线路都显示实测公里数,不需再乘以任何系数,对不同的电压互感器变比和电流互感器变比可整定不同的“ a ”值;不必在电压电流二次回路另作整定,就可探测可能的任意长度;探测速度快,无盲区。

XFL—1型高压输电线路故障探测器由于具有上述特点,因而既可用于单端电源供电的幅射形网络中,也可用于双端电源供电的输电线上以及环网中,其探测时间,从故障发生起至测量完毕,最长不超过57ms,最快为34ms。国外同类产品,是由输电线路的继电保护装置起动的,但其探测时间未计及继电保护装置的动作时间。将两个时间相加,就变成从故障发生开始计算的时间,设继电保护的动作为时间为一个半周波(30ms),则本探测器的探测时间相当于法国DALD—DLNS型和英国XTF—32/25ms型的,而探测精度,达到了英国XTF—32/25ms型的指标,接近法国DALD—DLNS型和英国XTF—32/45ms型的指标。

电力系统动态模拟试验也表明,本探测器在个别电路的设计和个别元器件的使用上仍存在不合理之处,有待进一步完善。

二、XFL—1型高压输电线路故障探测器理论原理

1. 设想:

一条由单端电源供电的三相输电线路的单线原理图如图2—1所示。

其中,由探测器安装处M至故障点K的距离为 X 公里,该故障线段的电阻为 R ,电感为 L ,流过故障线路的故障电流为 i ,故障线段的残压为

u , 设电压互感器及电流互感器的变比均为1,在故障点处的过渡电阻为 R' ,而线路单

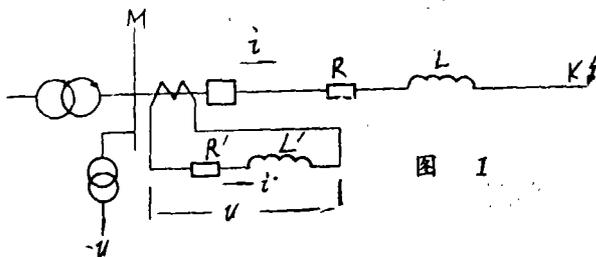


图 1

位长度的电阻和电感分别为 r_0 和 l_0 ，则有

$$\left. \begin{aligned} R &= x r_0 \\ L &= x l_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots (2-1)$$

图中， R' 和 L' 分别为故障探测器中设置的一个模拟阻抗的电阻和电感，由于电流互感器变比为 I ，因而流过模拟阻抗的电流也为故障电流 i ，而甚至模拟阻抗上产生的压降为 U 。

$$\text{令 } R'/r_0 = a, \quad L'/l_0 = a,$$

$$\text{即 } \left. \begin{aligned} R' &= a r_0 \\ L' &= a l_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots (2-2)$$

根据经典公式，故障残压 u 与故障电流 i 的瞬时值之间的关系为

$$\begin{aligned} u &= (R + R_s) i + L \frac{di}{dt} \\ &= (x r_0 + R_s) i + x l_0 \frac{di}{dt} \end{aligned} \dots\dots (2-3)$$

在模拟阻抗上的压降 u 与故障电流 i 的瞬时值之间的关系为

$$\begin{aligned} U &= i R' + L' \frac{di}{dt} \\ &= a r_0 i + a l_0 \frac{di}{dt} \end{aligned} \dots\dots (2-4)$$

比较式(2-3)与式(2-4)可知，前者比后者多了一项过渡电阻 R_s 上的压降 $R_s i$ ，过渡电阻一般由电弧电阻或电弧电阻与接地电阻所构成，是随机性的，阻值不定，是无法模拟的，若想消除此项的影响，只有当故障电流 i 的瞬时值过另一瞬间取电压值，这时过渡电阻的影响均消除了，在故障电流 i 的瞬时值过另一瞬间的电压值我们记为 U_0 与 V_0 ，有

$$U_0 = x l_0 \frac{di}{dt} / i_0 \dots\dots (2-5)$$

$$V_0 = a l_0 \frac{di}{dt} / i_0 \dots\dots (2-6)$$

若将此二量储存起来，并相除，则

$$\begin{aligned} \frac{U_0}{V_0} &= \frac{x}{a}, \\ x &= a \frac{U_0}{V_0} \end{aligned} \dots\dots (2-7)$$

采用任何类型的除法器将两电压相除，并乘以系数 a ，就可得到被测的故障距离 x 。

对于不同类型的故障，所取的故障残压值和模拟电压值以及所取用的过另电流如表2-1所示。

表 2-1 故障探测器应取残压、模拟电压、电流

故障类型	取用残压	模拟电压	过另电流
A、B或A、B、C或 A、B、N或A、B、C、N	$U_A - U_B$	$U_A - U_B = ar_0(i_A - i_B) + al_0 \frac{d(i_A - i_B)}{dt}$	$i_A - i_B$
B、C或B、C、N	$U_B - U_C$	$U_B - U_C = ar_0(i_B - i_C) + al_0 \frac{d(i_B - i_C)}{dt}$	$i_B - i_C$
C、A或C、A、N	$U_C - U_A$	$U_C - U_A = ar_0(i_C - i_A) + al_0 \frac{d(i_C - i_A)}{dt}$	$i_C - i_A$
A、N	U_A	$U_A = ar_0(i_A + 3k_0 i_0) + al_0 \frac{d(i_A + 3k_0 i_0)}{dt}$	$3i_0$
B、N	U_B	$U_B = ar_0(i_B + 3k_0 i_0) + al_0 \frac{d(i_B + 3k_0 i_0)}{dt}$	$3i_0$
C、N	U_C	$U_C = ar_0(i_C + 3k_0 i_0) + al_0 \frac{d(i_C + 3k_0 i_0)}{dt}$	$3i_0$

表 2-1 中未考虑负荷电流, k_0 为另序补偿系数, $k_0 = \frac{z_0 - z_1}{3z_1}$, 其中 z_0 为线路另序阻抗, z_1 为线路正序阻抗。

2. 实施方案原理

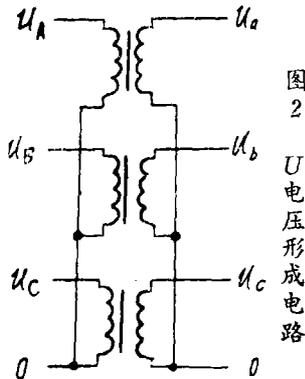


图 2 U 电压形成电路

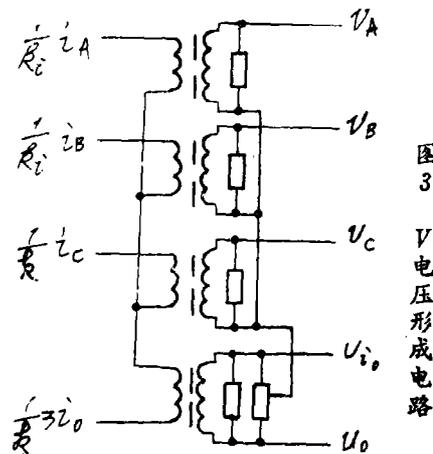


图 3 V 电压形成电路

由电压互感器取得的故障电压加至故障探测器的降压变压器 YB 上, YB 的变化为 n_v , 其接线接成具有中线的双星形, 如图 2-2 所示, 由电流互感器取得的电流加于故障探测器的 V 电压形成回路——电抗变压器 DKB, 设电流互感器变比为 k_i , 其接线如图 2-3 所示, A、B、C 三相电抗变压器的初级绕组为 12 匝, 接成星形, 各流过 i_A/k_i 、 i_B/k_i 、 i_C/k_i , 另序补偿电抗变压器初级绕组也为 12 匝, 接于上述星形接线的中点, 流过了 i_0/k_i 。这样与传统的作法不一样, 这样作与之比较可减轻电流互感器的

负担，各DKB次级绕组并一个移相电阻，使其输出电压超前输入电流的相角为线路阻抗角。A、B、C三相的次级绕组也接成星形，其中点与并联于另序补偿电抗变压器DKB次级绕组的电位器滑动接头相连接（若为平行双回线，则经另序互感DKB后再串联于此），此电位器可调节另序补偿度。

参照图2-1，设流过线路的负荷电流为 i_L ，故障电流中正、负、另序分量为 i_1 、 i_2 、 i_0 ，线路的正、负、另序参数分别为 R_1 、 R_2 、 R_0 、 L_1 、 L_2 、 L_0 ，且

$$\left. \begin{aligned} R_0 &= k_0 R_1 = k_0 R_2 \\ L_0 &= k_0' L_1 = k_0' L_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots (2-8)$$

按迭加原理，故障情况下，所求的量为正常分量与故障分量的迭加。

单相接地故障时，取用相电压和相电流，经过渡电阻 R ，单相接地的单线电路图如图2-4(a)所示。在故障点 K 与过渡电阻 R 之间，串入 U_k 和 $(-U_k)$ 两个数值相等而方向相反的电势，其性质不变，如图2-4(b)所示。这里， U_k 为故障前瞬间正常运行情况下， K 点对地的电压。利用迭加原理，分别求取正常分量和故障分量。先考虑电势 E 和 u_k 的单独作用，由于 u_k 等于正常运行时 K 点的电压，因而此支路中无电流流过， R ，或者整个支路可去掉，电路如图2-4(c)所示。线路上流过负荷电流， M 点电压的正常分量为

$$u_{LM} = u_K + R i_L + L \frac{di_L}{dt} \quad (2-9)$$

再考虑电势 $(-u_k)$ 的单独作用，此时电势 E 去掉后直接接地，其电路如图2-4(d)所示，这种情况下，流过线路的电流为故障分量 i_k 。设故障分量 i_k 在故障线段上产生的电压降为 u' ，则 M 点电压的故障分量为

$$\left. \begin{aligned} u'_M &= -u_K + u' \\ &\dots\dots (2-10) \end{aligned} \right\}$$

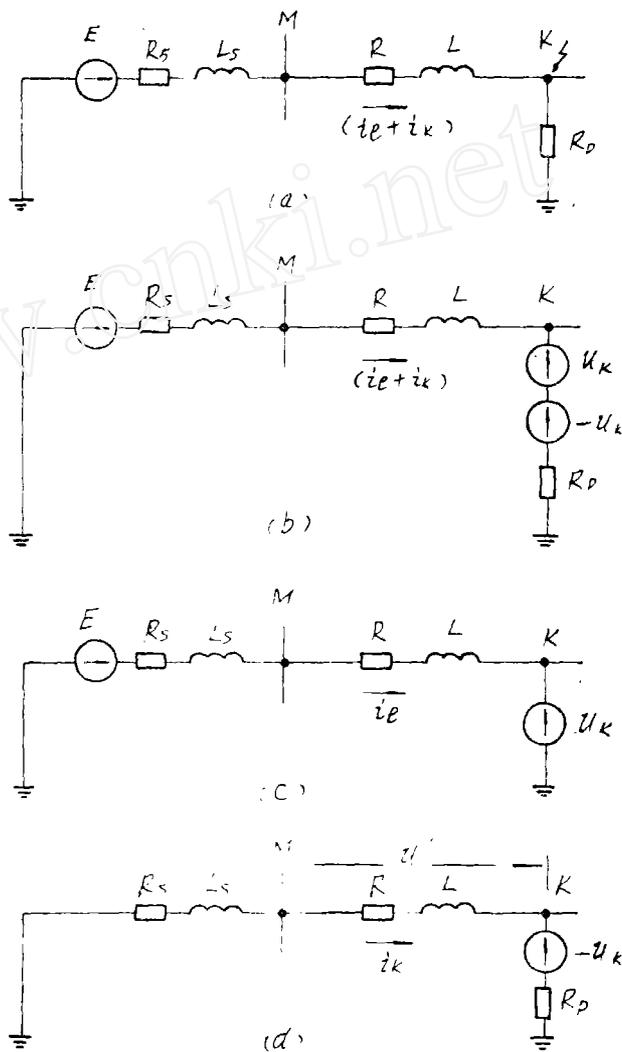


图4 单相接地故障时的等值电路图

M点的故障残压为正常分量与故障分量的迭加, 即

$$u = u_{LM} + u'_M = Ri_f + L \frac{di_f}{dt} + u' \quad \dots\dots (2-11)$$

式(2-11)中前两项为负荷电流在故障线段上产生的压降。负荷电流仅有正序分量, 无负序分量和另序分量。因而, 式(2-11)中前两项可写为

$$R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt}$$

式(2-11)中的 u' 为故障分量电流 i_f 在故障线段上产生的电压降, 因而可仅对故障线段作出复合序网络, 用正、负、另序的电参量来表示 u' 。在计算故障分量时, 为便于分析, 近似地令负荷阻抗为无穷大, 且对端变压器中性点不接地, 则其复合序网络如图2-5所示。

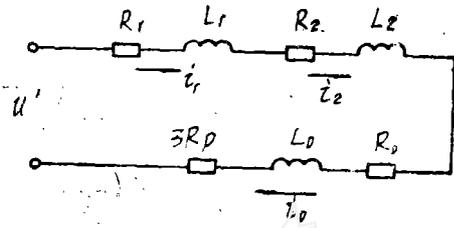


图2-5 单相接地故障线路的复合序网络

由图2-5可得:

$$u' = R_1 i_1 + R_2 i_2 + R_0 i_0 + 3R_0 i_0 + L_1 \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} + L_0 \frac{di_0}{dt}$$

单相接地时有 $i_1 = i_2 = i_0$. \dots\dots (2-12)

正常分量与故障分量迭加后有下列关系:

$$u = i_f R_1 + i_1 R_1 + i_2 R_2 + i_0 R_0 + L_1 \frac{di_1}{dt} + L_1 \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} + L_0 \frac{di_0}{dt} + 3i_0 R_0 \quad \dots\dots (2-13)$$

将式(2-8)、式(2-12)代入式(2-13), 整理后有

$$u = i_f R_1 + (2+k_0) i_0 R_1 + 3i_0 R_0 + L_1 \frac{di_f}{dt} + (2+k') L_1 \frac{di_f}{dt}$$

只有在另序电流为另时, 才能消除过渡电阻的影响, 故取另序电流瞬时值过另时的相电压, 有

$$U_0 = \left[i_f R_1 + L_1 \frac{di_f}{dt} + (2+k'_0) L_1 \frac{di_0}{dt} \right] i_{0=0} = X \left[i_f r_0 + L_0 \frac{di_f}{dt} + (2+k'_0) L_0 \frac{di_0}{dt} \right] i_{0=0} \quad \dots\dots (2-14)$$

设电压互感器的变比为 k_v , 在YB之后进行分压, 分压后取量, 分压比为 n_v , 在取量之处电压

$$U_{oc} = \frac{x}{k_v \cdot n_v \cdot n_v} \left[i_f k_0 + l_0 \frac{di_f}{dt} + (2+k'_0) L_0 \frac{di_0}{dt} \right] i_{0=0} \quad \dots\dots (2-15)$$

对于V电压形成电路, 取另序补偿度为 k , 流过另序补偿电抗变压器的电流是 $3i_0/k_i$ 。

设电抗变压器模拟的阻抗的电阻, 电感为 R_{V1} 、 L_{V1} ,

且 $R_{V1} = a' r_0$ $L_{V1} = a' l_0$.

则在其上产生的电压降为

$$\begin{aligned} & \frac{3i_0}{k_i} \cdot kR_{V1} + kL_{V1} \cdot \frac{d\left(\frac{3i_0}{k_i}\right)}{dt} \\ &= \frac{3ki_0R_{V1}}{k_i} + \frac{3kL_{V1}}{k_i} \cdot \frac{di_0}{dt} \end{aligned}$$

流过每相电抗变压器DKB的正、负、另序电流为 $\frac{i_1}{k_i}$ 、 $\frac{i_2}{k_i}$ 、 $\frac{i_0}{k_i}$ ，则产生的电压降取相应的相序量，为

$$\begin{aligned} & \frac{i_1 R_{V1}}{k_i} + L_{V1} \cdot \frac{d\left(\frac{i_1}{k_i}\right)}{dt}, \quad \frac{i_2 R_{V2}}{k_i} + L_{V1} \cdot \frac{d\left(\frac{i_2}{k_i}\right)}{dt}, \\ & \frac{i_0 R_{V0}}{k_i} + L_{V0} \cdot \frac{d\left(\frac{i_0}{k_i}\right)}{dt} \end{aligned}$$

而电抗变压器的模拟阻抗值是一个值——对不同相序，

$$\text{即 } R_{V1} = R_{V2} = R_{V0}, \quad L_{V1} = L_{V2} = L_{V0}$$

因为单相接地故障时有 $i_1 = i_2 = i_0$ ，故其等值复合序网络可作成如图2-6(a)所示的形式。正常情况下，负荷

电流 i_l/k_i 只流过每相的电抗变压器，压降为

$$\frac{i_l R_V + L_V \cdot \frac{d\left(\frac{i_l}{k_i}\right)}{dt}}$$

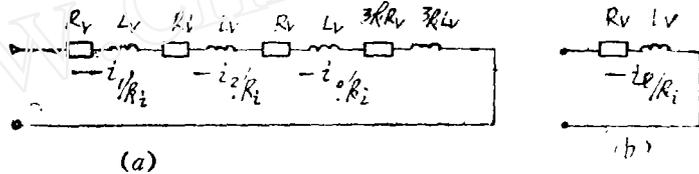


图2-6 V形成电路的等值电路

等值网路如图2-6(b)所示，按迭加原理，V电压形成电路在单相接地故障时的相量为

$$\begin{aligned} U &= \frac{i_l R_V}{k_i} + \frac{3(1+k)}{k_i} i_0 R_V + \frac{L_V}{k_i} \cdot \frac{di_l}{dt} + \frac{3(1+k_0)L_V}{k_i} \cdot \frac{di_0}{dt} \\ &= \frac{a'}{k_i} \left[i_l r_0 + 3(1+k) i_0 r_0 + l_0 \frac{di_l}{dt} + 3(1+k) l_0 \frac{di_0}{dt} \right] \dots \dots (2-16) \end{aligned}$$

在另序电流瞬时值过另瞬间，式(2-16)变为

$$V_0 = \frac{a'}{k_i} \left[i_l r_0 + l_0 \frac{di_l}{dt} + 3(1+k) l_0 \frac{di_0}{dt} \right] i_0 = 0 \quad \dots \dots (2-17)$$

在V形成电路之后进行分压，分压之后取量，设分压比为 n_V ，在取量之处电压为

$$V_{0c} = \frac{a'}{k_i n_V} \left(i_l r_0 + l_0 \frac{di_l}{dt} + 5 l_0 \frac{di_0}{dt} \right) i_0 = 0 \quad \dots \dots (2-18)$$

$$\text{当取 } 3(1+k) = 2 + k'_0 \text{ 或 } k = \frac{2+k'_0}{3} - 1 = \frac{1}{3}(k'_0 - 1) \text{ 时,}$$

式(2-15)除以式(2-18)，消去同类项，得

$$\frac{U_{0c}}{V_{0c}} = \frac{x \cdot k_i \cdot n_V}{a' k_i n_V n_V}$$

$$x = \frac{a' k_u n_u n_v}{k_i n_v} \cdot \frac{U_{0c}}{V_{0c}}$$

$$\triangleq a = \frac{a' k_u n_u n_v}{k_i n_v} \quad \dots\dots (2-19)$$

得

$$x = a \frac{U_{0c}}{V_{0c}} \quad \dots\dots (2-20)$$

在故障探测器中, 所取得的 U_{0c} 和 V_{0c} 两个电压量, 用两个吸附效应小。漏电阻很大而温度系数小的精密电容储存起来。本探测器采用由电压—频率变换器、计数器、和相除开关等组成的数字除法器。储存在精密电容上的 U_{0c} 和 V_{0c} , 经阻抗变换器而各自馈给一个电压—频率变换器。电压—频率变换器的系数为 $k_1/\text{伏}$, 则

$$F_U = k_1 U_{0c}, \quad F_V = k_1 V_{0c}$$

分别供给显示计数器和整定计数器计数。当整定计数器经 t 时间后记的脉冲数为 a , 即 $a = t F_V$, 便发出命令脉冲, 停止显示计数器的计数。此时

$$t = \frac{a}{F_V}$$

显示计数器记得的脉冲数为 N , 而

$$N = t F_U = a \frac{F_U}{F_V} = a \frac{k_1 U_{0c}}{k_1 V_{0c}} = a \frac{U_{0c}}{V_{0c}} = x$$

因而, 显示计数器记得的脉冲数就等于需要探测显示的故障距离。

两相短路时, 取相电压之差与相电流之差。以 B 、 C 两相短路为例, 短路时之接线如图 2—7 (a) 所示。在过渡电阻 R_P 处串入大小相等而方向相反的两个电势 u_{KBC} ($-u_{KBC}$), u_{KBC} 等于故障前正常运行情况下 K 点的 B 、 C 相间电压。这样作并未改变电路的特性, 接线如图 2—7 (b) 所示。运用迭加原理, 先考虑三相电势与电势 u_{KBC} 的单独作用, 此时为正常运行情况。由于取 u_{KBC} 等于 K 点正常运行的相间电压, 此支路无电流流过, 所以过渡电阻 R_P 可略去, 接线如图 2—7 (c) 所示, 三相流过对称的负荷电流, 在 M 点的电压 u_{MBC} 为

$$u_{MBC} = u_{KBC} + R(\dot{u}_{CB} - i_{IC}) + L \frac{d(i_{IB} - i_{IC})}{dt}$$

再考虑电势 ($-u_{KBC}$) 的单独作用, 近似零时测负荷阻抗为无穷大时, 接线如图 2—7 (d) 所示。流过线路的电流为故障分量 i_B 、 i_C , 而流过过渡电阻 R_P 的电流为 $(i_B - i_C)$, M 点电压的故障分量 u'_{MBC} 为

$$u'_{MBC} = -u_{KBC} + (R i_B - i_C) + R_P (i_B - i_C) + L \frac{d(i_B - i_C)}{dt}$$

M 点的故障残压 u 为两分量的迭加, 即

$$u = R(i_{IB} - i_{IC}) + R(i_B - i_C) + R_P(i_B - i_C) + L \frac{d(i_B - i_C)}{dt} + L \frac{d(i_B - i_C)}{dt} \quad \dots\dots (2-21)$$

对于U电压形成电路, 参看图2-3, 在B、C相短路时, 有

$$U = \frac{R_v}{k_i}(i_{cB} - i_{lC}) + \frac{R_v}{k_i}(i_v - i_c) + \frac{L_v d(i_{cB} - i_{lC})}{k_i} + \frac{L_v d(i_B - i_c)}{k_i} \dots (2-22)$$

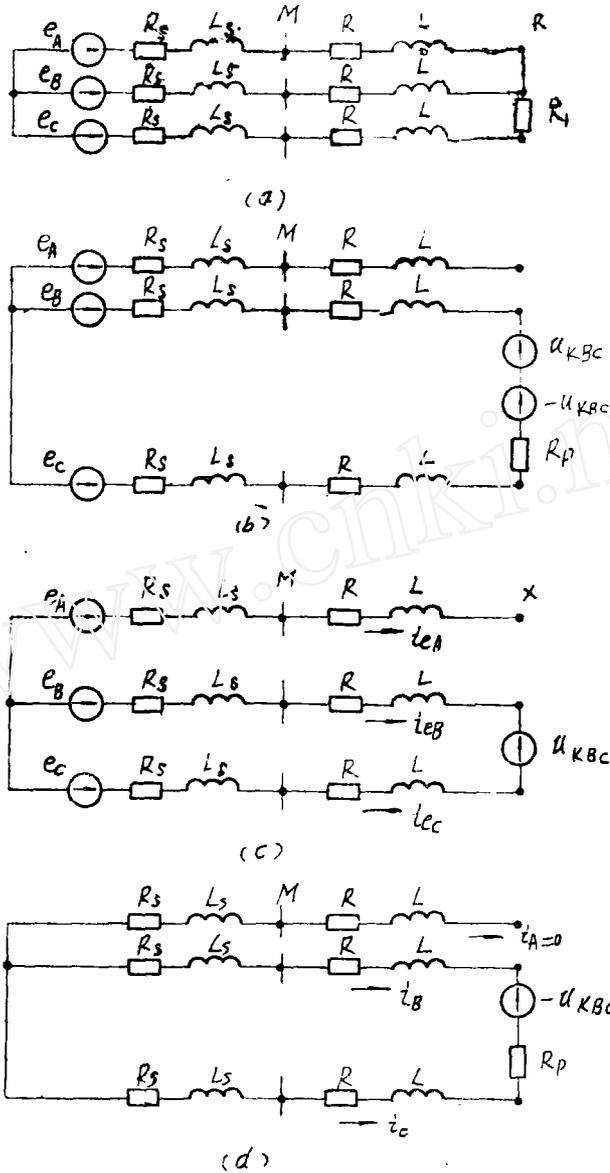


图 6-7 两相短路时的等值电路

若在 $(i_B - i_c)$ 过另瞬时取 U 与 U 值, 并换算至储存电容处, 用单位长度参数表示, 则式 (2-21) 与式 (2-22) 变为

$$U_{oc} = \frac{x}{k_u \cdot n_y \cdot n_u} \cdot \left[r_0(i_{lB} - i_{lC}) + l_0 \frac{d(i_{lB} - i_{lC})}{dt} + l_0 \frac{d(i_B - i_c)}{dt} \right] (i_B - i_c) = 0 \dots (2-23)$$

$$V_{0C} = \frac{a'}{k_{i_3} \cdot n_V} \left[r_0 (i_{lB} - i_{lC}) + l_0 \frac{d(i_{lB} - i_{lC})}{dt} + l_0 \frac{d(i_B - i_C)}{dt} \right] (i_B - i_C) = 0 \quad \dots\dots (2-24)$$

式(2-23)除以式(2-24)并整理得

$$x = \frac{k_u n_Y n_u \cdot a'}{k_{i_3} \cdot n_V} \cdot \frac{U_{0C}}{V_{0C}} = a \frac{U_{0C}}{V_{0C}}$$

这与单相接地时所得结果一致。

若在 $[(i_B + i_{lB}) - (i_C + i_{lC})]$ 过另瞬间,即全电流过另瞬间取 u 值和 U 值,令

$$\left. \begin{aligned} i_{\Sigma B} &= i_{lB} + i_B \\ i_{\Sigma C} &= i_{lC} + i_C \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2-25)$$

则式(2-21)与式(2-22)变为

$$u = R(i_{\Sigma B} - i_{\Sigma C}) + R_P(i_B - i_C) + L \frac{d(i_{\Sigma B} - i_{\Sigma C})}{dt}$$

$$U'_{0C} = \frac{1}{k_u n_Y n_u} \left[R_P(i_B - i_C) + x p_0 \frac{d(i_{\Sigma B} - i_{\Sigma C})}{dt} \right] (i_{\Sigma B} - i_{\Sigma C}) = 0 \quad \dots\dots (2-26)$$

$$U = R_V \frac{1}{k_i} (i_{\Sigma B} - i_{\Sigma C}) + \frac{L_V d(i_{\Sigma B} - i_{\Sigma C})}{k_i a t}$$

$$V'_{0C} = \frac{a' l_0}{k_{i_3} n_V} \left[\frac{d(i_{\Sigma B} - i_{\Sigma C})}{dt} \right] (i_{\Sigma B} - i_{\Sigma C}) = 0 \quad \dots\dots (2-27)$$

式(2-26)除以式(2-27),经整理得

$$\frac{U'_{0C}}{V'_{0C}} = \frac{x}{a} + \frac{R_P}{a l_0} \left[\frac{(i_B - i_C)}{\frac{d(i_{\Sigma B} - i_{\Sigma C})}{dt}} \right] (i_{\Sigma B} - i_{\Sigma C}) = 0$$

$$a \frac{U'_{0C}}{V'_{0C}} = x + \frac{R_P}{l_0} \cdot \left[\frac{i_B - i_C}{\frac{d(i_{\Sigma B} - i_{\Sigma C})}{dt}} \right] (i_{\Sigma B} - i_{\Sigma C}) = 0 = x'$$

$$x' = x + \Delta x$$

其中,

$$\Delta x = \frac{R_P}{l_0} \cdot \left[\frac{i_B - i_C}{\frac{d(i_{\Sigma B} - i_{\Sigma C})}{dt}} \right] (i_{\Sigma B} - i_{\Sigma C}) = 0 \quad \dots\dots\dots (-28)$$

由此可见,在取全电流过另而不是故障分量过另时,在两相短路情况下,测量值产生一个原理上的附加误差 Δx ,它是由负荷电流和短路过渡电阻引起。由式(2-28)可看出,当 $R_P = 0$ 时, $\Delta x = 0$;当 $i_{lB} = i_{lC} = 0$ 时, $i_{\Sigma B} - i_{\Sigma C} = i_B - i_C = 0$, $\Delta x = 0$ 其相对误差(以100KM, 200KM, 300KM为基准)

$$\Delta = \frac{\Delta x}{x} = \frac{R_P (i_B - i_C)}{x l_0 \frac{d(i_{\Sigma B} - i_{\Sigma C})}{dt}} (i_{\Sigma B} - i_{\Sigma C}) = 0 \quad \dots\dots (2-29)$$

即相对误差等于,在全电流过另时,过渡电阻 R_P 上的电压降与故障线路段电抗上的电压降之比。

$$\text{令 } i_{\Sigma BC} = i_{\Sigma B} - i_{\Sigma C} = i_{lB} + i_B - i_{lC} - i_C = (i_{lB} - i_{lC}) + (i_B - i_C)。$$

近似令BC相短路前后， U_{BC} 相位不变，则可以 u_{BC} 为基准，负荷的功率数为 $\cos\varphi$ 故障电流分量 i_{BC} 滞后 u_{BC} 的角度为 φ_K ， $i_{\Sigma BC}$ 滞后 U_{BC} 的角度为 φ_Z ，有

$$\varphi_K = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\omega L}{R + R_P} \quad \dots\dots (2-30)$$

因 $(i_B - i_C)$ 的有效值为 $\sqrt{3}I_B$ ， $(i_B - i_C)$ 的有效值为 $2I_B$ ，有

$$\varphi_Z = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\sqrt{3}I_B \sin\varphi + 2I_B \sin\varphi_K}{\sqrt{3}I_B \cos\varphi + 2I_B \cos\varphi_K} \quad \dots\dots (2-31)$$

$$I_{\Sigma BC} = \frac{\sqrt{3}I_B \sin\varphi + 2I_B \sin\varphi_K}{\sin\varphi_Z} \quad \dots\dots (2-32)$$

其矢量图如图2-7所示，在全电流 $i_{\Sigma BC}$ 过另时，由于 $i_{\Sigma BC}$ 在电感上的压降超前 $i_{\Sigma BC}$ 为 90° ，此时故障分量在过渡电阻 R_P 上的压降 $R_P i_{BC}$ 的相位为 $|\varphi_K - \varphi_Z|$ ，在负末用，如图2-8波形图所示，因此

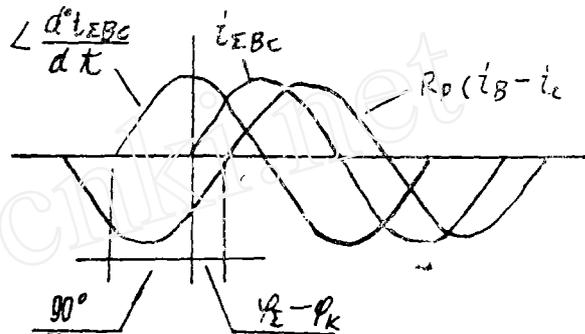
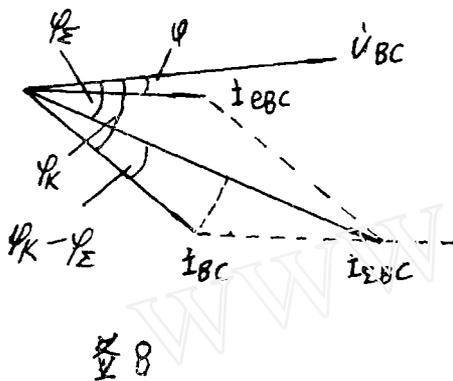


图9 过零波形相位图

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{R_P}{\omega L} \cdot \frac{2I_B \sin(\varphi_Z - \varphi_K)}{\sqrt{3}I_B \sin\varphi + 2I_B \sin\varphi_K} \\ &= \frac{R_P}{\omega L} \cdot \frac{2I_B \sin(\varphi_Z - \varphi_K) \sin\varphi_Z}{\sqrt{3}I_B \sin\varphi + 2I_B \sin\varphi_K} \quad \dots\dots (2-33) \end{aligned}$$

试举一例(以动模试验为基础)，设 $\omega L_S = 10\Omega$ ， $\omega L = 40\Omega$ ， $R = 13\Omega$ ， $R_P = 11\Omega$ ，负荷 $P = 100000\text{KW}$ ， $\cos\varphi = 1$ ， $U = 115\text{KV}$ ，计算相对误差。

因为 $\cos\varphi = 1$ ， $\sin\varphi = 0$ ，式(2-33)变为

$$\Delta = \frac{R_P}{\omega L} \cdot \frac{\sin(\varphi_Z - \varphi_K) \sin\varphi_Z}{\sin\varphi_K}$$

根据所给参数计算得： $\varphi_K = 64.35^\circ$ ， $\varphi_Z = 46.6^\circ$ ，代入得

$$\Delta = \frac{11}{40} \cdot \frac{-0.30486 \times 0.7266}{0.9015} = -6.7\%$$

并即在 $115\text{KV}100\text{KM}$ 的输电路上，输送负荷十万千瓦，功率因数为1，末端发生两相短路故障，采用全电流过零，理论上将引起 -6.7% 的误差(在相同条件下，本探测器在动模试验中未有如此大的误差，仅为 3%)。

对于两相接地短路，本故障探测器亦以两相短路进行测量，对于三相短路，以 AB

两相进行测量。

综上所述可见：

(1) 采用此种原理的故障探测器，在单端电源供电的单回输电线路，发生单相接地、两相短路或两相接地短路时，若以故障分量电流过零时进行测量，理论上，探测结果不受负荷电流的影响，不受故障处过渡电阻的影响，也不受一次电路中非用期分量或过渡过程的影响，但受二次电路过渡过程及探测器本身内部过渡过程的影响，具体反映在稳态下与暂态下各变比、分压比的变化、相位的变化这一影响，除在缩短过渡过程的历时这方面做工作外，时间上应尽量躲过（约40ms左右）；

(2) 在两相短路或两相接地短路时，若以全电流过零时进行测量，理论上，由于负荷电流的影响和过渡电阻的影响，将引起误差，本探测器与英国产XTF—32型故障探测器均采用全电流过零，不好，本探测器今后将改成故障电流分量过零测量。

以上是按单端电源供电情况分析的，两端电源时，分析比较复杂，但定性分析可知，短路点有过渡电阻时，对侧助增电流将引起误差，其影响程度，我们主要通过动模试验进行检查（见第四部分）。

三、XFL—1型高压输电线路故障探测器的工作原理

1. 探测器的构成

XFL—1型高压输电线路故障探测器的各组成部分及其相互联系如逻辑原理图所示。

探测器由四组相同的V电压形成电路，四组相应的负序比相方向选线元件，正序比相方向选线元件及选线信号元件，一组U电压形成电路，一组相应的低电压突变选相元件及选相信号元件，一个电流过零开关，一组V电压存储电路，一组U电压存储电路，一个数字除法器，一组显示电路，一个接地信号指示及一个中间继电器以及直流电源回路等构成。

每组V电压形成电路接于相应线路的电流互感器二次侧，引入电流 i_a 、 i_b 、 i_c 、 i_0 。它输出一组V电压的全电压 U 、 U_b 、 U_c 、 U_0 及过另信号 U_i ，如图2—3所示，供测量用。另输出一组负序U电压，供负序比相方向选线元件比相用。还输出一组 U_{AB} 电压供正序比相方向选线元件在三相短路时进行比相用。

U电压形成电路接于母线电压互感器二次供测，引入电压 u_A 、 u_B 、 u_C 、 u_{AB} 。它输出一组全电压供测量用，输出另一组全电压供低电压突变选相元件用。它另输出一组负序电压供负序比相方向选线元件比相用，又输出一组 u_{ab} 供正序比相方向选线元件在三相短路时作比相用，它还输出一个另序电压给接地信号元件，作为接地故障指示，供测量用的电压示于图2—2。

负序比相方向选线元件是利用比较故障时的负序电压和负序电流过另时的相位的原理构成，供非对称故障时选择故障输电线，送入故障线路的相应电参量用，正序比相方向选线元件也是采用与上述类似原理构成，作为三相短路时选择故障线路用，它们均由晶体管回路构成，并均经低电压突变选相元件闭锁，它们共用一个出口中间元件（1~4）FJ，

用单段电路保证接点有足够的接通时间。选线元件除选择故障线路外，还要按一定的相位将故障量接至存储电路，以减少机内过渡过程造成测量的分散性，选线信号元件也由晶体管电路构成，它指示故障线别。

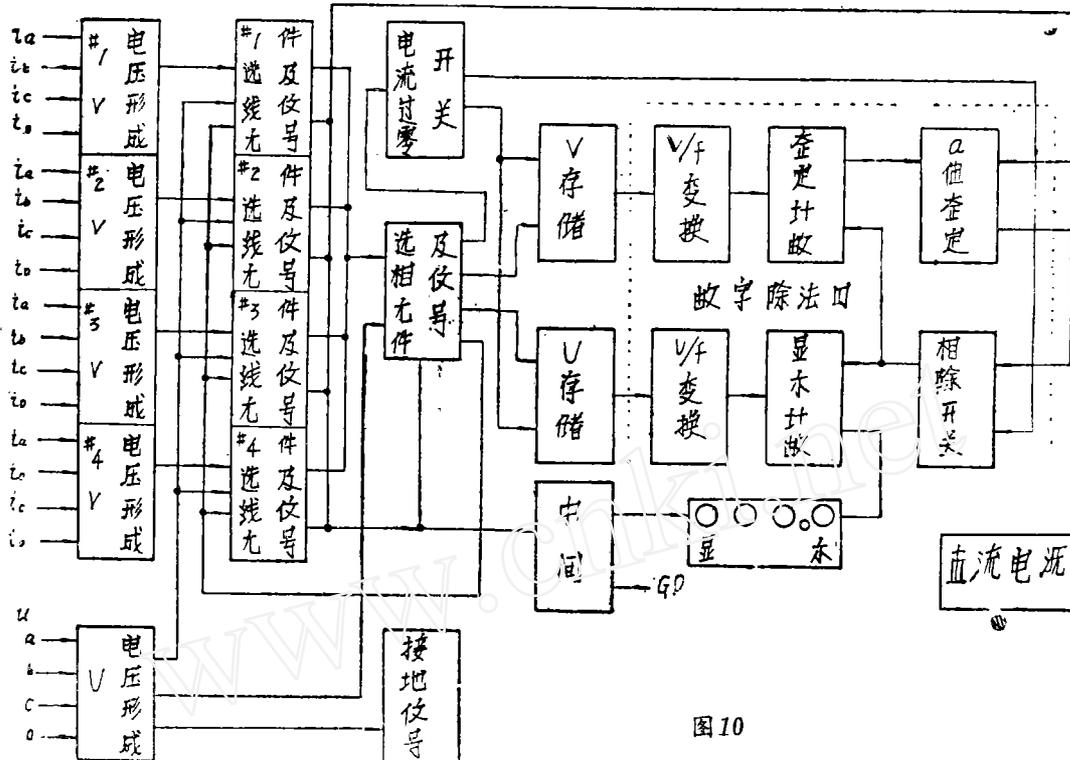


图10

低电压突变选相元件反应于电压降低的突变量，即负增量，它由一整套晶体管逻辑电路构成，具有执行元件 YJ_A 、 YJ_B 、 YJ_C 、 YJ_{AB} 、 YJ_{BC} 、 YJ_{CA} ，反映各种不对称故障，三相短路共用 YJ_{AB} 出口元件，利用电路的逻辑原理来选择故障相别，而起动回路是共用的，用保证其执行元件接点有足够的接通时间来整定动作值，它不反应低电压运行和电压的缓慢降低，选相信号元件也由晶体管门电路构成，由选相元件逻辑回路起动，指示故障相别，由选相元件对选线元件进行电位闭锁。

V存储电路和U存储电路是相同的，由一个精密电容（具有小的吸附效应和小的温度系数）和一个高输入阻抗低输出阻抗的阻抗变换元件（电路）构成，具有很小的另漂，温升 30°C ，另漂小于 5mV ，阻抗变换元件的输入电阻大于 $10^8\Omega$ 。

数字除法器由逻辑原理图中点线框内的V/f电压—频率变换器、U/f电压—频率变换器、整定计数器、显示计数器、a值整定部件和相除开关等构成，采用线性集成元件和MOS集成元件组成相应电路，电压—频率变换器的线性度在 0.5% 以内，每伏 3.5 千赫，各条输电线路具有相应的a值整定部件，午即有四组，可以分别整定a值，以保证在任一输电线路故障时，均能显示实测公里数，而无需象国外产品那样要乘以系数。

此外，本探测器装有a值检测按钮、重读按钮、清另按钮、总复归按钮、电压检测按

钮、选线、选相元件检测按钮等，在故障显示后，只要不总复归，还可用清另按钮清另，然后用重读按钮重新显示故障距离，若数字除法或显示部分出现障碍，还可用电压检测按钮测出 U_{oc} 、 V_{oc} 的粗略数值，用人工计算出故障距离，其他按钮用来检查装置是否正常。

2. 工作程序

正常情况下，各被监测的输电线的电流接至探测器内相应的 V 电压形成电路，母线电压接至探测器 U 电压形成电路，变电站的直联接至探测器的直流电源电路。除直流电源监视灯亮外，其余全无指示，萤光数码管也不发光。

当任一条输电线路发生故障时，例如， $\#$ /线路 A 相接地时，母线 A 相电压突然降低，选相元件的执行元件 YJ_A 动作。此时，一方面解除对选线元件的电位闭锁，一方面用其接点将 U 存储电路接至 A 相电压 $-U$ 电压形成电路的输出，将 V 存储电路选接至 $V_a - V_b$ 输出及将过另开关选接至 $V_i - V_0$ 输出。与此同时， $\#$ /选线元件因闭锁已解除，当负序电压与负序电流在模拟阻抗上的压降的过另方波重合时，选线元件的执行元件 $1FJ$ 动作。它一方面用其接点将 $V_a - V_b$ 接至 V 存储电路，将 $V_i - V_0$ 接至电流过另开关，接通时间在另序电流 i_0 从负到正过另点的附近；另一方面，用其接点将 $\#$ /线路相应的 a_1 值整定部件接通，为防正过另开关在 $1FJ$ 于另序电流正半周接通时误动作，电流开关采取了负半周闭锁，必需经过负半周后才能在电流过另时动作，在另序电流从负到正过另时，过另开关动作，其接点将 U 存储电路与 V 存储电路与输入回路断开。这时在存储电路的相应精密电容上就存下了另序电流从负到正过另瞬间的 U_{oc} 与 V_{oc} 电压，这两个电压经相应的存储电路的阻抗变换元件输出至数字除法器，数字除法器的 U/f 电压—频率变换器和 V/f 电压—频率变换器分别将 U_{oc} 和 V_{oc} 变为相应的频率为 $F_U = kU_{oc}$ 与频率为 $F_V = kV_{oc}$ 的“两个”脉冲信号， F_U 脉冲加至显示计数器， F_V 脉冲加至整定计数器。在相除开关未发出命令以前，两组计数器均不计数，过另开关动作后，经一个延时，起动相除开关，发出相除命令，两组计数器开始计数，当整定计数器记录 F_V 脉冲达到 a_1 个时，使相除开关返回，发出停止命令，将两组计数器同时封闭，停止计数。此时整定计数器记的数是 a_1 。若记 a_1 个脉冲用的时间为 t ，即 $a_1 = tF_V$ ，则显示计数器记的 F_U 的脉冲个数为 N ，而

$$N = tF_U = a_1 \frac{F_U}{F_V} = a_1 \frac{kU_{oc}}{kV_{oc}} = a_1 \frac{U_{oc}}{V_{oc}} = x$$

即显示计数器记得 F_U 的脉冲数 N 就是故障距离数 x 公里，用集成译码器译码，供萤光数码管显示。

在选线信号元件和选相信号元件动作后，它们一方面指示出故障线别和故障相别，另一方面用接点组成与门起动一中间继电器，中间继电器一组接点接通萤光数码管的灯丝电源，一付接点接通栅极和小数点的电源，萤光数码管亮后直接显示出故障距离 x 公里，中间继电器还有一付接点使中央信号装置，亮一个“探测器动作”光字牌 GP ，同时发出音响信号。

在 $\#$ /输电线路故障时，其余被监测的线路的选线元件由于负序电压与负序电流的相

位关系不符合动作条件而不能动作，而当 $\#$ /线路选线元件开始动作时， $1FJ$ 接点刚起动而未接通，使由电路用电位将其余非故障线的选线元件闭锁，保证可靠测量。

在过另开关动作断开其常闭接点（动作时间为 $0,2mS$ ），存储电容上存下了故障电流分量过另瞬间的 U_{0c} 和 V_{0c} 后，探测即告完毕，不再受外号影响，机内处理则可快可慢。

若不按总复归按钮，则显示计数一直保存下去，按总复归按钮则全套装置复归到原始状态。

其他类型的故障与上述类似，仅选出的故障相别不同，其他线路故障亦相同，在此不一一赘述。

上述 a 值整定的 a 值，可由公式（2—19）计算，求出。

参 考 资 料

- (1) SOLID STATE FAULT LOCATORS DALD—DLNS AND DLDS (法)
- (2) TYPE—XTF DISTANCE—TO—FAULT LOCATOR. (英)
- (3) XFL—1型高压输电线路故障探测器动模试验研究。

四. 动模试验结果 [见资料(3)]

1. 探测时间:

本探测器的探测时间，理论上，最长为 $58mS$ ，最短一般为 $34mS$ （例外情况可达 $2mS$ ）。在动模试验中对远区故障作了六次测量，分别为 $37mS$ 、 $40mS$ 、 $40mS$ 、 $49.2mS$ 、 $50mS$ 及 $53mS$ ，均未超出上述范围。

2. 电流灵敏度与盲区:

试验中（额定电流为 $5A$ ） $1.5A$ 时能可靠探测，准确记录数值，相当额定电流的30%以下。

经试验，在 $2.258KM$ 处设置故障点，记录显示 $1.9KM$ 、 $2.1KM$ 、 $2.4KM$ ，在过渡电阻为 11Ω 时，为 $3.3KM$ 、 $3.2KM$ 、 $3.5KM$ ，在 $0KM$ （但经测量用电流互感器）设置三相短路，记录为 $2KM$ 、 $2.4KM$ 、 $2.4KM$ 。由于均处于3%允许误差以内，故可说没盲区。

3. 探测精度:

单端电源供电单回输电线路动行情况下，在各点上发生单相接地故障、两相短路、两相短路接地及三相短路时，探测精度为:

$R_a + R_e$	$K^{(1)}$	$K^{(2)}$	$K^{(3)}$	$K^{(1,1)}$	I_{K1}
0Ω	$\pm 3\%$	$\pm 3\%$	-5%	$\pm 3\%$	$>I_n$
11Ω	$\pm 3\%$	$\pm 3\%^*$			$<I_n$
20Ω	$\pm 3\%$				$<I_n$
$11+0\Omega$				$\pm 3\%$	$<I_n$
$5+10\Omega$				$\pm 3\%$	$<I_n$
$11+10\Omega$				$\pm 3\%$	$<I_n$

其中 R_a 为电弧电阻, R_e 为接地电阻, I_n 为额定电流。*在末端故障时,个别数据例外,去4%, I_{K1} 为末端之故障电流。

两端供电双回输电线时为:

$R_a + R_e$	$K^{(1)}$	$K^{(2)}$	$K^{(3)}$	$K^{(1,1)}$	I_{K1}
0Ω	$\pm 3\%$	$\pm 3\%$	-4%	$\pm 3\%$	$\geq I_n$
11Ω	$\pm 3\%$				$<0.5I_n$
$3\Omega, 5\Omega$		$\pm 3\%^*$			$<I_n$
$0+10\Omega$				$\pm 3\%$	$>I_n$

其中符号同上述。

4. 过渡过程

试验表明,一次故障电流过渡过程历时约30ms, V 电压形成电路输出的过渡过程历时约40ms,在两端供电情况下,另序电流过渡过程,在过渡电阻为 0Ω 时,历时约75ms,在过渡电阻为 11Ω 时,约为50ms,在过渡电阻为另时,一次电路的故障残压与二次模拟阻抗上的电压降成比例,不受另序电流过渡过程影响。

试验表明,探测时间为40~50ms较为适宜。

5. 助增电流及两端另序网络阻抗角不等的影响:

在助增较大,两端另序网络阻抗角相差较大,过渡电阻较大时,误差较大。如助增0倍,角差 15° ,过渡电阻 11Ω ,误差可达14%,过渡电阻小时,或为另时,测量准确,角差小时,测量也准确。

6. 负荷电流的影响:

在单端电源供电单回输电线上发生故障,负荷电流无明显影响,在双端电源供电双回输电线运行,其中一回末端发生单相接地,负荷、助增及过渡过程总的作用下,过渡电阻为 11Ω 时,负荷变化约十千瓦,略有影响;在经 3Ω 过渡电阻两相短路,负荷变化与上相同时,影响也不明显。