

# 方向阻抗继电器动态特性的模拟实验

天津大学 宋从矩 王笑然

## 提 要

本文在简要分析了有记忆回路的方向阻抗继电器在正、反方向突然短路时的动态特性后,主要介绍了在实验条件下,模拟实验该动态特性的两种方法及试验的结果。一种方法是用附加的电抗互感器来模拟系统阻抗上的电压降,另一种方法是用试验电源的三相电压进行系统阻抗上电压降的模拟。本文证实了理论分析与试验结果是一致的,

目前在高压和超高压输电线路的距离保护中,广泛采用了具有方向性的圆特性或四边形特性的阻抗继电器。而在继电器的极化电压中,又普遍采用了由R、L、C串联谐振(或并联谐振)、或由静态电路构成的记忆回路。

当发生突然短路时,由于记忆回路能“记忆”短路发生前保护安装地点的母线电压,然后按记忆回路的时间常数逐渐衰减至故障后母线电压的稳态值,因而就出现了继电器的动态特性。

以圆特性的方向阻抗继电器为例,设 $\dot{U}_p$ 表示具有记忆作用的极化电压,则继电器的动作条件可表示为:

$$-90^\circ \leq \text{Arg} \frac{\dot{U}_p}{\dot{I}_r Z_{zd} - \dot{U}_r} \leq 90^\circ \quad (1)$$

式中  $\dot{U}_p$ ——具有记忆作用的极化电压

$\dot{U}_r$ ——加入继电器的电压

$\dot{I}_r$ ——加入继电器的电流

$Z_{zd}$ ——继电器在最灵敏角方向上的整定值

在稳态条件下, $\dot{U}_p$ 与 $\dot{U}_r$ 同相位,动作特性为以 $Z_{zd}$ 为直径、圆周通过原点的方向阻抗圆,如图1(b)和图2(b)中的虚线所示。但在发生短路的初瞬间, $\dot{U}_p$ 将保持短路前负荷状态下母线电压 $\dot{U}_{r,k}$ 的相位,因此继电器的动作条件在 $t=0$ 时应为:

$$-90^\circ \leq \text{Arg} \frac{\dot{U}_{r,k}}{\dot{I}_r Z_{zd} - \dot{U}_r} \leq 90^\circ \quad (2)$$

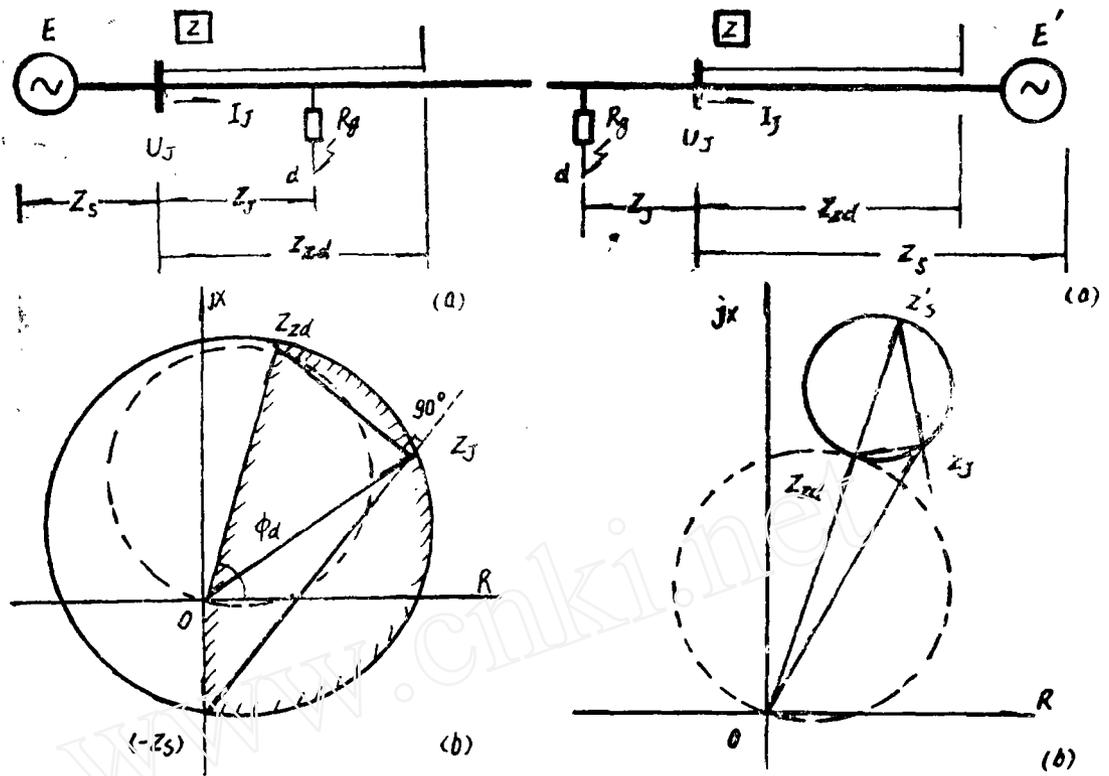


图 1

图 2

由于式中出现了三个变量,不能再简化为一个变量  $Z_r = \dot{U}_r / \dot{I}_r$  来表示,因此需结合具体系统的接线、参数和故障点的位置进行分析〔文献 1〕。

1. 正方向短路: 设继电器所在系统及其有关的参数如图 1 (a) 所示, 如取电压和电流互感器的变比  $n_Y = n_L = 1$ , 则

$$Z_r = -\frac{\dot{U}_r}{\dot{I}_r}$$

$$\dot{I}_r = \frac{\dot{E}}{Z_s + Z_r}$$

$$\dot{I}_r Z_{zd} - \dot{U}_r = \frac{Z_{zd} - Z_r}{Z_s + Z_r} \dot{E}$$

代入 (2) 式可得继电器的动作条件为:

$$-90^\circ \leq \text{Arg} \frac{Z_s + Z_r}{Z_{zd} - Z_r} \cdot \frac{\dot{U}_{fn}}{\dot{E}} \leq 90^\circ$$

$$\text{或} \quad -90^\circ + \text{Arg} \frac{\dot{E}}{\dot{U}_{fn}} \leq \text{Arg} \frac{Z_r + Z_s}{Z_{zd} - Z_r} \leq 90^\circ + \text{Arg} \frac{\dot{U}}{\dot{U}_{fn}} \quad (3)$$

如果短路前为空载, 则  $\dot{U}_{fh} \approx \dot{E}$ , 继电器的动作条件为:

$$-90^\circ \leq \text{Arg} \frac{Z_I + Z_s}{Z_{zd} - Z_I} \leq 90^\circ \quad (4)$$

此时继电器的动作特性是以向量  $Z_{zd}$  和  $(-Z_s)$  末端的连线为直径所作之圆, 如图 1 (b) 中实线园所示, 测量阻抗  $Z_I$  位于园内为动作区。这个特性通常又称为方向阻抗继电器的动态特性园。

由于  $Z_I$  是在正方向短路时的测量阻抗, 即使存在有过渡电阻或串联补偿电容等因素的影响,  $Z_I$  也不会呈现负电阻性质, 其阻抗角也不会大于  $\phi_d$ , 因此动作特性园的有效区只是绘有阴影的部分。动态特性园虽然包含原点在内, 但并不意味着失去方向性, 因为 (3) 或是针对正方向短路的前提下导出的, 根本不适用于反方向短路的情况。

2 反方向短路: 此时系统的接线及参数如图 2 (a) 所示, 实际流过继电器的电流由电势  $\dot{E}$  供给, 并且总具有  $Z'_s > Z_{zd}$ 。仍采用电流的正方向为从母线流向被保护线路, 则由图可得:

$$\begin{aligned} \dot{U}_I &= \dot{I}_I Z_I \\ \dot{E}' &= \dot{U}_I - \dot{I}_I Z'_s = \dot{I}_I (Z_I - Z'_s) \\ \dot{I}_I Z_{zd} - \dot{U}_I &= \frac{Z_{zd} - Z_I}{Z_I - Z'_s} \dot{E}' \end{aligned}$$

代入 (2) 式, 相似于正方向短路时的分析, 可得继电器的动作条件为:

$$-90^\circ + \text{Arg} \frac{\dot{E}'}{\dot{U}_{fh}} \leq \text{Arg} \frac{Z_I - Z'_s}{Z_{zd} - Z_I} \leq 90^\circ + \text{Arg} \frac{\dot{E}'}{\dot{U}_{fn}} \quad (5)$$

如取短路以前为空载, 则继电器的动作条件为:

$$-90^\circ \leq \text{Arg} \frac{Z_I - Z'_s}{Z_{zd} - Z_I} \leq 90^\circ \quad (6)$$

此时继电器的动作特性是以向量  $(Z'_s - Z_{zd})$  为直径所作之圆, 如图 2 (b) 中实线园所示, 当  $Z_I$  位于园内时为动作区。这就是方向阻抗继电器在反向短路时的动态特性图。

此结果表明, 当反方向发生短路时, 继电器必须测量到一个感性阻抗才有可能动作。但是实际上, 按照规定的电流正方向来看, 当反向故障点与保护安装地点之间没有串补电容器时, 继电器测量阻抗一般都位于第三象限, 不会落入动态特性园内, 因此继电器具有明确的方向性。当记忆电压衰减以后, 继电器的稳态特性仍是以  $Z_{zd}$  为直径的方向阻抗园, 如图 2 (b) 中虚线园所示。

如所周知, 利用上述的动态特性, 对正方向短路, 可以可靠地消除出口附近处短路的死区, 并增强防御过渡电阻的能力; 对反向短路则能保证明确的方向性。

在引进的美国 GE 公司 SLYP-SLCN 型静态方向比较式高频保护中 [文献 2], 对三相短路采用了反应正、反方向故障的两个正序距离继电器 ( $M_1 T$  动作于跳闸,  $M_1 B$  动作于闭锁保护跳闸)。当被保护线路的正方向或反方向发生故障时, 可以利用这两个继电器动态特性和稳态特性的相互配合, 来保证保护装置的正确动作。

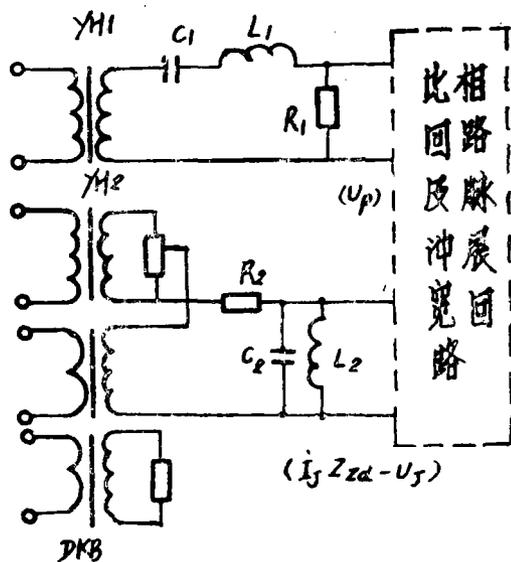


图 3

离出来，另行加入一个模拟短路前母线电压的电压。

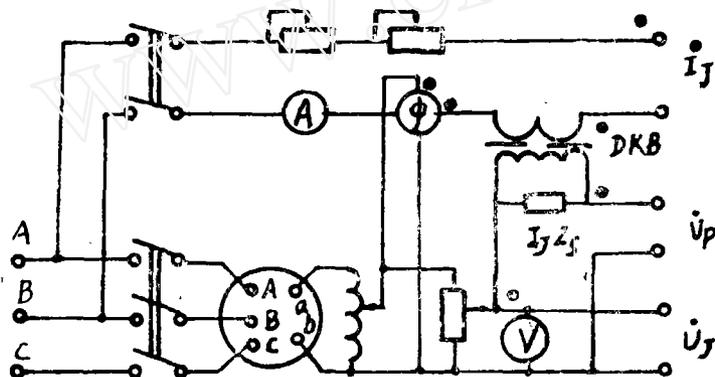


图 4

以空载条件下正方向短路为例，加入继电器极化回路的电压应为电源电势 $\dot{E}$ ，根据图 1 (a) 的网络接线，当加入继电器的电压为 $\dot{U}_j$ 、电流为 $\dot{I}_j$ 时，则：

$$\dot{E} = \dot{U}_j + \dot{I}_j Z_s \quad (7)$$

因此要获得 $\dot{E}$ ，就必须模拟出电流 $\dot{I}_j$ 在 $Z_s$ 上的压降，然后再和 $\dot{U}_j$ 相加。

为了模拟 $\dot{I}_j Z_s$ 上的压降，我们在实验研究中采用了两种不同的方法。

1、在试验电路的电流回路中，附加串入一个电抗互感器DKB，用其付边输出的电压模拟 $\dot{I}_j Z_s$ ，其接线如图4所示。图中 $\dot{U}_j$ 用于加入继电器的电压回路， $\dot{I}_j$ 用于加入

对上述动态特性，能否在实验室的条件下通过模拟实验做出，以证实其存在，是很多人十分关心的一个问题。对此，我们进行了分析和实验研究，现将结果报告如下。

实验采用我校研制的晶体管相位比较式方向阻抗继电器〔文献3〕，它已在天津第三发电厂110千伏出线上运行多年，效果良好，其原理接线如图3所示。为了做出动态特性图，继电器的极化回路需从原来的电压回路中分

继电器的电流回路（这和一般采用的实验电路相同），再把电压 $\dot{U}$ 和DKB二次输出电压（模拟 $\dot{I}, Z_s$ ）同方向串联，即可获得极化电压 $\dot{U}_p$ 。

这种模拟方法的正确性在于：对任何一个角度 $\varphi_j$ ，当继电器刚好能够动作时， $\dot{U}_j$ 均等于 $\dot{I}_j Z_j$ ，因此 $\dot{U}_p = \dot{U}_j + \dot{I}_j Z_s = \dot{I}_j (Z_j + Z_s) = \dot{E}$ 。由于在实验电路中，可利用移相器来任意改变 $\dot{U}_j$ 和 $\dot{I}_j$ 之间的角度 $\varphi_j$ ，因此就可以模拟出在正方向短路的条件下，位于任何一个象限中的继电器测量阻抗 $Z_j$ ，因而就能够作出完整的动态特性园。

但这种模拟方法与实际情况之间又是区别的。其区别在于：当实际发生短路时， $\dot{E}$ 不变，而电流 $\dot{I}_j$ 随着不同的短路阻抗 $Z_j$ 而改变其幅值和相位，并满足下式的关系：

$$\dot{I}_j = -\frac{\dot{E}}{Z_s + Z_j} \quad (8)$$

而在实验电路中是维持 $\dot{I}_j$ 不变，使 $\dot{U}_p$ 随着不同的继电器测量阻抗 $Z_j$ 而改变其幅值和相位，并满足下式的关系：

$$\dot{U}_p = \dot{I}_j (Z_s + Z_j) \quad (9)$$

对比（8）、（9）两式不难发现，尽管 $\dot{U}_p$ 和 $\dot{E}$ 的幅值并不相等，但由于两式中的 $(Z_s + Z_j)$ 是相同的，因此 $\dot{U}_p$ 必然和 $\dot{E}$ 为同相位。对相位比较式继电器而言，其动作

特性并不受极化电压幅值大小的影响，故上述区别不影响模拟实验结果的准确性。

根据以上模拟实验电路，设取继电器的整定阻抗为 $Z_{zd} = 2\Omega \angle 70^\circ$ ，系统阻抗为 $Z_s = 0.04\Omega \angle 90^\circ$ 维持 $I_j = 5\text{A}$ 不变，所做出的动态特性实验结果如表1所示。实验完成后，取消模拟 $Z_s$ 压降的电抗互感器，重作继电器的稳态特性实验，其结果如表2所示。图5示出了按以上实验结果得出的动态特性和稳态特性图，与图1中理论分析的结论相符。

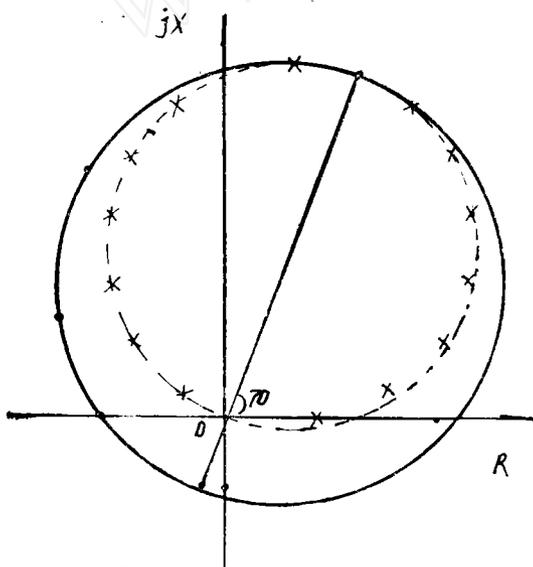


图5

表1 正方向短路动态特性实验数据

$\varphi_j$	$0^\circ$	$30^\circ$	$60^\circ$	$70^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$	$150^\circ$	$180^\circ$	$210^\circ$	$240^\circ$	$250^\circ$	$270^\circ$	$300^\circ$	$330^\circ$	$360^\circ$
$Z_{zd}, j$	1.14	1.7	2	2	1.89	1.56	1.03	0.64	0.44	0.38	0.36	0.36	0.46	0.76	1.16

表2 稳态特性实验数据

$\phi_f$	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°
$Z_{dz.f}$	0.47	0.87	1.24	1.52	1.75	1.93	1.99	2	1.95	1.85	1.68	1.5	1.25	0.94	0.61	0.15

表3 反方向短路动态特性实验数据

$\phi_f$	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°
$Z_{dz.f}$	0.96	1.3	1.6	1.78	1.9	1.9	1.8	1.65	1.5	1.22	0.85
$Z_{dz.f}$	0.48	0.29	0.28	0.22	0.21	0.21	0.21	0.23	0.29	0.35	0.5

在图4的实验电路中，如将附加的电抗互感器付边倒换极性，即可模拟实验反向故障时的动态特性，此时：

$$\dot{U}_p = \dot{U}_f - \dot{I}_f Z'_s$$

相当于在空载情况下，模拟了电势 $E'$ 。实验时采用的参数为 $Z'_s = 1.8\Omega \angle 70^\circ$ ， $Z_{dz} = 0.2\Omega \angle 70^\circ$ ，实验结果如表3所示。由于动态特性是一个上抛圆，因此对应每一个角度都有两个起动阻抗值。此动态特性圆示于图6，亦与理论分析相符。

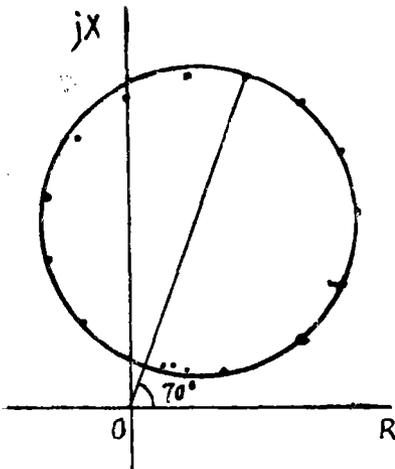


图6

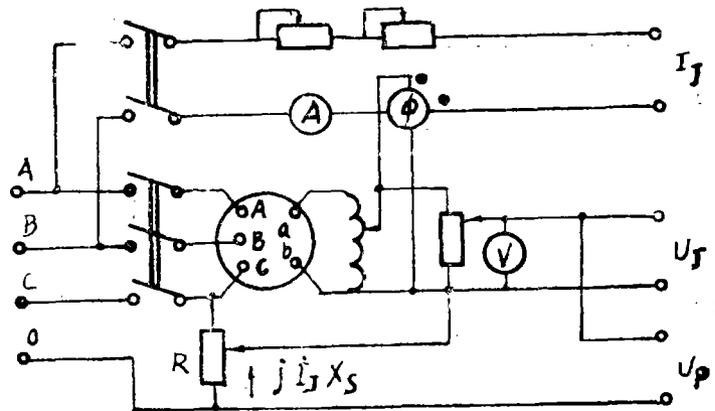


图7

2、另外一种模拟实验的电路如图7所示，设电流回路经滑线电阻接于电源电压 $\dot{U}_{AB}$ ，则实验过程中 $\dot{I}_f$ 与 $\dot{U}_{AB}$ 为同相位。另用一电位器R接于实验电源的C相，由于 $\dot{U}_c$ 超前 $\dot{U}_{AB}$ 为 $90^\circ$ ，因此从R活动端取出的电压，即可表示为 $j\dot{I}_f X_s$ ，相当于模拟了一个系统阻抗为纯电抗的情况，利用改变活动端的位置，可以方便地调节 $X_s$ 的数值。利用这个

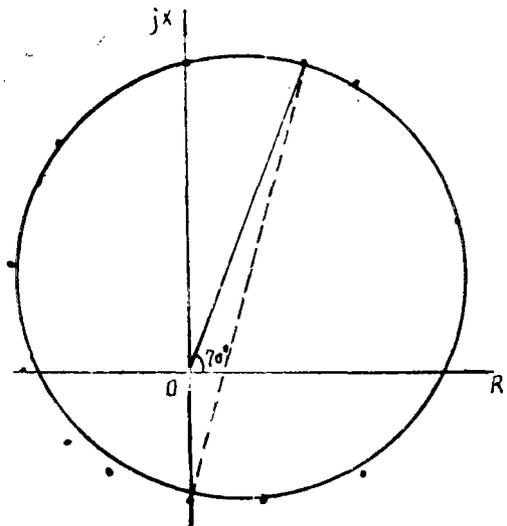


图 8

实验电路作出的正方向短路时的动态特性如表4所示,实验中采用 $Z_{ZL} = 2.4\Omega \angle 70^\circ$ ,  $Z_S = 1\Omega \angle 90^\circ$ , 动态特性园示于图8。

根据以上分析和实验的结果,可以得出如下结论:

1、方向阻抗继电器在故障发生瞬间的动态特性,可以通过模拟实验的方法予以证实,理论分析与实验结果是相符的。

2、本文提出的模拟实验方法简易可行,能准确模拟出电源电势 $\dot{E}$ 的相位,利用它作为极化量,去和补偿电压进行相位比较,即可获得继电器的动态特性。

3、对其他型式的方向阻抗继电器,只要能将极化回路从原来的接线中分离出来,就可以利用这种电路进行动态特性的实验。例如对整流型方向阻抗继电器,就可以考虑将极化变压器JYB的原边从内部接线中分离出来,然后接入实验电路的 $\dot{U}$ ,即可进行动态特性的实验。

表 4 正方向短路动态特性实验数据

$\phi_f$	$0^\circ$	$30^\circ$	$60^\circ$	$70^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$	$150^\circ$	$180^\circ$	$210^\circ$	$240^\circ$	$250^\circ$	$270^\circ$	$300^\circ$	$330^\circ$	$360^\circ$
$Z_{ZL}$	1.82	2.24	2.44	2.4	2.22	1.9	1.53	1.22	1.04	0.96	0.96	1	1.15	1.48	1.82

### 参 考 文 献

1. 《距离继电器的分析》(水电部继电保护研究班补充讲义)  
西安交大 朱声石 天津大学 宋从矩 水电部科技委印 1981年8月
2. Type SLYP-SLCN Static Directional Comparison Relaying Description And Application. 《GENERAL ELECTRIC》
3. 《晶体管相位比较式三段距离保护》 天津大学 宋从矩  
《继电器》1979年第3期。