

第三相电压对方向阻抗继电器试验的影响

南京电力学校继电保护组 许正亚

电网中运行的方向阻抗继电器，不论是按绝对值比较方式工作还是按相位比较方式工作，都引入了记忆电压（插入电压或极化电压之统称），同时还引入了健全相电压分量。图1示出了两种典型的方向阻抗继电器的接线（AB相），图2示出了保护方向上短路故障时继电器的实际动作特性（见资料1.2）。其中圆1为短路故障瞬间的动作特性，圆2为两相短路故障时的稳态动作特性，计及电网频率变化后，最大灵敏角及动作特性圆的大小还要作相应变动。但不管怎样变动，动作特性始终过整定阻抗 Z_z 端点。

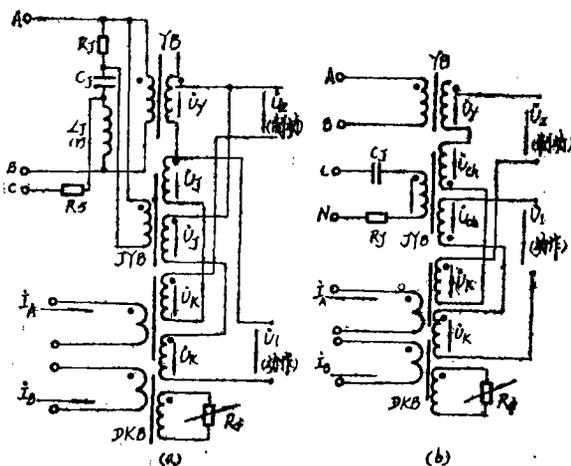


图1 相间方向阻抗继电器接线（AB相）
 (a) LH-II型（工作相记忆）；(b) JJ-II型（健全相记忆）

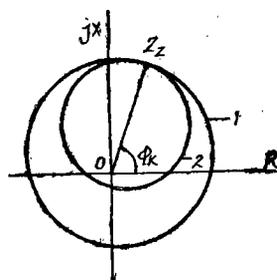


图2 正向短路故障时继电器的实际动作特性
 1—起始动作特性；
 2—两相短路故障时稳态动作特性

很显然，为要保证保护区稳定不变和继电器反应孤光电阻的能力，必须使继电器的整定阻抗角 φ_k 等于被保护线路阻抗角 φ_{XL} 。如果 φ_k 不等于 φ_{XL} ，则必将引起保护区的变化（伸长或缩短），并恶化继电器的性能。明显看出，整定阻抗角 φ_k 比最大灵敏角 φ_{Lm} 更有现实意义。

方向阻抗继电器的另一重要问题是正、反向出口三相短路故障时应有明确方向性问题，这和谐振记忆回路振荡频率的调整有密切关系，本文不加讨论，可参见资料1的分析。

第三相电压的引入，无疑提高了继电器的性能（注意，对图1(a)接线形式来说，要使记忆回路时间常数减小，影响到继电器记忆时间缩短，同时使振荡频率有所下降），

但在试验条件下，在整定阻抗角 φ_K 时，引入第三相电压（如资料3中的试验方法）是不恰当的，存在原理性误差。本文分析误差产生的原因及其影响因素，在此基础上提出 φ_K 正确调定的方法。

一、试验误差分析

图9示出了方向阻抗继电器常用的试验接线（资料3），输入对称三相380伏电源， K_1 闭合模拟两相短路， K_1 断开模拟正常情况，分析时应注意如下几个事实：

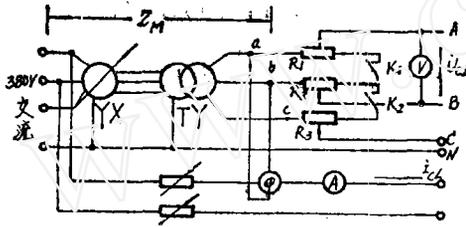


图3 方向阻抗继电器试验接线

YX—1KVA移相器，TY—(3—12)KVA三相调压器 R₁、R₂、R₃—100欧滑线电阻

(1) 试验时通常用固定 \dot{I}_{CL} 电流(如5安)，改变 R_1 、 R_2 滑动抽头位置以改变电压，对继电器进行动作特性的测试。

(2) 考虑到相角表 φ 电压太低时测量不正确，所以电压线圈接到TY二次侧(100伏)，注意到双臂滑线电阻每臂通常为100欧以及被试继电器电压端子输入阻抗相对要大得多(对LH—II型继电器，如图1(a)，YB二次抽头变化时，输入阻抗约在600~800欧间，阻抗角为3°左右；对于JJ—II型继电器，如图1(b)，YB二次抽头变化时，输入阻抗约在2000~5000欧间，阻抗角在5°~20°间)，所以在 K_1 闭合模拟两相短路故障时，可以认为 \dot{U}_{ab} 与 \dot{U}_{CL} 同相位(将继电器电压端子视作开路)，不会引入测量误差，故相角表 φ 指示的即是 \dot{U}_{CL} 和 \dot{I}_{CL} 的相角差 φ_{CL} 。

(3) 继电器的电流回路独立，不是模拟短路时的短路电流，和继电器的电压回路无联系，这和继电器在电力系统中实际运行情况是不同的。

图3试验接线，可以画成图4等值电路，

图中 \dot{E}_A 、 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 为等值三相电势， Z_M 为三相调压器二次向电源侧看的一相等值阻抗，其中主要为移相器和三相调压器的阻抗； R' 、 R'' 为滑臂电阻 (R_1 和 R_2) 的一部分电阻。由图可得

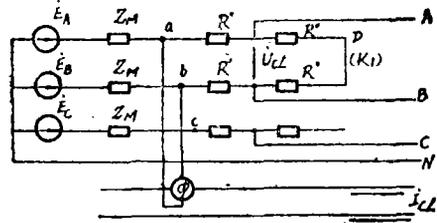


图4 试验接线等值电路

$$\frac{\dot{E}_{AB}}{2(Z_M + R' + R'')} \cdot 2R'' = \dot{U}_{CL}$$

即
$$\dot{E}_{AB} = \frac{Z_M + R}{R''} \dot{U}_{CL} \quad \dots\dots (1)$$

式中 $R = R' + R''$, 通常 R 为 100 欧。

(一) LH-II 类型继电器

1. \dot{U}_J 表示式

观察图 5 (a) 输入电压为 \dot{U}_A 、 \dot{U}_B 、

\dot{U}_C 、三相电压, 不管三相电压对称与否,

总有 $\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0$, 所以三个线电

压中仅有两个量独立, 若取 \dot{U}_{AB} 和 \dot{U}_{CA} , 于是应用迭加原理, \dot{U}_J 可写成

$$\dot{U}_J = \dot{U}_J \Big|_{\dot{U}_{CA}=0} + \dot{U}_J \Big|_{\dot{U}_{AB}=0} \dots\dots (2)$$

当 $\dot{U}_{CA} = 0$ 时, 考虑到 R_B 甚大, 可视为开路, 于是

$$\dot{U}_J \Big|_{\dot{U}_{CA}=0} = \frac{n_J \dot{U}_{AB} \cdot R_J}{(R_J + r) + j(X_{LJ} - X_{CJ})} \dots\dots (3)$$

$$\approx \frac{n_J R_J}{R_J + r} \dot{U}_{AB} e^{j\theta}$$

式中 r —电阻 L_J 电阻, n_J —JYB 变比;
 θ —角度, $\theta = \arctg \frac{1}{R_J + r} \frac{-\omega L_J - \omega C_J}{1}$, 随频率 f 而变化。

当 $\dot{U}_{AB} = 0$ 时, 即 A、B 连在一起, 在 \dot{U}_{CA} 作用下, 得到

$$\dot{U}_J \Big|_{\dot{U}_{AB}=0} = \frac{n_J \dot{U}_{CA}}{R_B + \left[(r + jX_{LJ}) // (R_J - jX_{CJ}) \right]} \cdot \frac{-(r + jX_{LJ}) R_J}{(R_J + r) + j(X_{LJ} - X_{CJ})}$$

$$\approx -j \frac{n_J R_J}{R_J + r} \cdot \frac{X_{LJ}}{R_B + \frac{X_{LJ} X_{CJ}}{R_J + r}} \cdot \dot{U}_{CA} e^{j\theta} \dots\dots (4)$$

将 (3)、(4) 式代入 (2) 式, 得到

$$\dot{U}_J = \frac{n_J R_J}{R_J + r} \left[\dot{U}_{AB} - jm \dot{U}_{CA} \right] e^{j\theta} \dots\dots (5)$$

式中 m —实系数, $m = \frac{X_{LJ}}{R_B + \frac{X_{LJ} X_{CJ}}{R_J + r}}$ 对某一继电器来说是常数。

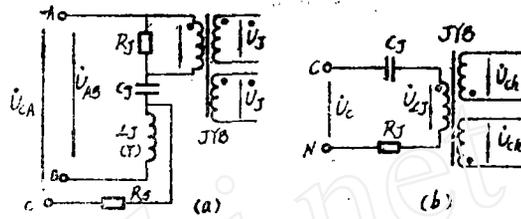


图 5 输入电压回路
 (a) LH-II 型; (b) JJ-II 型

$$= \left[-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{Z_M + R}{R''} \right] \dot{U}_{cL}$$

代入(5)式, 再将 \dot{U}_j 代入(6)式, 得到

$$-90^\circ \leq \arg \left\{ \frac{\dot{I}_{cL} K_K - n_y \dot{U}_{cL}}{\frac{n_j R_j}{R_j + r} \left[\dot{U}_{cL} - j m \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{Z_M + R}{R''} \right) \dot{U}_{cL} \right] e^{j\theta}} \right\} \leq 90^\circ$$

$$-90^\circ + \theta \leq \arg \left\{ \frac{Z_Z - Z_{cL}}{\left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2} m \frac{Z_M + R}{R''} + j\frac{m}{2} \right) Z_{cL}} \right\} \leq 90^\circ + \theta$$

$$-90^\circ + \theta + \alpha \leq \arg \frac{Z_Z - Z_{cL}}{Z_{cL}} \leq 90^\circ + \theta + \alpha \dots \dots (9)$$

其中 $\alpha = \arg \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2} m \frac{Z_M + R}{R''} + j\frac{m}{2} \right) \dots \dots (10)$

(9)式即是加入第三相电压后在试验条件下继电器的动作方程, 其特点如下:

(1) 在 R'' 保持不变条件下, α 角为常数, 此时继电器的动作特性为过座标原点的一个圆(相当于固定电压改变电流的试验), 如图6中圆2所示。但在求取继电器动作特性时, 总是在 I_{cL} 保持常数、改变 R'' 状态下进行的。即试验状态下, 不同 φ_{cL} 角时有不同的 α 角, 从而实际所测得的动作特性不是一个圆, 而是不同 R'' 值下对应圆上相应点的连线。由此可见, 在试验状态下(模拟两相短路)测得的动作特性和继电器在电力系统中的实际稳态动作特性(正向两相短路)是不同的, 前者的动作特性过座标原点, 不是一个圆(可能与圆相近); 后者的动作特性包含座标原点, 是一个圆。造成动作特性不同的根本原因是, 试验状态下电流回路处于独立状态, 与电压回路无任何联系。

(2) 在求最大灵敏角时, R'' 不变动, 此时试验状态下的动作特性为过座标原点的一个圆, 测得最大灵敏角由(9)式求得为

$$\varphi_{Lm} = \varphi_K - \theta - \alpha \dots \dots \dots (11)$$

显然, $\varphi_{Lm} \neq \varphi_K$, 其误差一则来自 θ 角, 二则来自 α 角, 故即使 $\theta = 0^\circ$, 测得的 φ_{Lm} 也不等于 φ_K 角, 此时的误差来自 α 角。由(10)式可见, α 角与 Z_M 大小、 R'' 大小(I_{cL} 保持不变时, 即与整定阻抗大小的关系, 因为 R'' 增大, 即表示整定阻抗大)有关, 分析如下:

对LH—II方向阻抗继电器来说, $R_s = 30$ 千欧、 $X_{Lj} = 3.2$ 千欧、 $X_{cL} = 3.2$ 千欧、 $R_j = 1.2$ 千欧、 $r = 0.25$ 千欧, 故

$$m = \frac{X_{Lj}}{R_s + \frac{X_{Lj} X_{cL}}{R_j + r}} = \frac{3.2}{30 + \frac{3.2 \times 3.2}{1.2 + 0.25}} = 0.087$$

对1kVA移相器, 其阻抗实测值约为 $29 \angle 65^\circ$ 欧; 对12kVA三相调压器, 二次侧为100伏时每相阻抗测得约为 $10 \angle 60^\circ$ 欧, 于是(移相器接在调压器前)

$$Z_M = (29 \angle 65^\circ + 10 \angle 60^\circ) \times \left(\frac{100}{220} \right)^2 = 3.57 + j7.22 \text{ (欧)}$$

如设 $R'' = 9$ 欧, 则由 (10) 式得到

$$\alpha = \arg \left[1 + \frac{\sqrt{3}}{2} \times 0.087 \times \frac{3.57 + j7.22 + 100}{9} + j \frac{0.087}{2} \right] = 3.2^\circ$$

如果图3中TY与YX对换(调压器接在移相器前), 则图4中的 Z_M 为

$$Z_M = 29/\underline{65^\circ} + 10/\underline{60^\circ} \times \left(\frac{100}{220} \right)^2 = 13.29 + j28.07 \text{ (欧)}$$

所以
$$\alpha = \arg \left[1 + \frac{\sqrt{3}}{2} \times 0.087 \times \frac{13.29 + j28.07 + 100}{9} + j \frac{0.087}{2} \right] = 8.1^\circ$$

这样, 测得的 φ_{L_m} 要比 φ_K 小 8° 左右 ($\theta = 0^\circ$ 条件下), 与试验数据相符。当试验设备容量较小时, α 角还将增大。显然, 这种误差产生的原因是第三相电压的引入, Z_M 和线路模拟阻抗(图3中为 R_1, R_2) 阻抗角不等所造成的。自然, 减小 Z_M 值可使误差减小, 但不能减小到零。在极端情况下, $Z_M = 0$ ($R'' = 9$ 欧时), 则

$$\alpha = \arg \left[1 + \frac{\sqrt{3}}{2} \times 0.087 \times \frac{0 + 100}{9} + j \frac{0.087}{2} \right] = 1.4^\circ$$

(3) 由于第三相电压加入后, 在试验状态下求出的动作特性理论上不是一个圆, 同时在某一 R'' 下测得的最大灵敏角与 φ_K 有 α 度的误差 ($\theta = 0^\circ$ 条件下), 故用两点法(或测量制动回路电阻上电压最小值时的阻抗角)测出的最大灵敏角比 φ_K 小, 不能反映 φ_K 角(当 $\theta = 0^\circ$ 时, 比 φ_K 角小 α 度), 故测试方法是不恰当的, 存在原理性误差。

(二) JJ-11 类型继电器

在图5(b)正方向规定下, 求得 \dot{U}_{cA} 表示式为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{cA} &= -n_Y \dot{U}_{L1} \\ &= -n_Y \frac{\dot{U}_{c1} j \omega L_1}{(R_1 + r) + j(X_{L1} - X_{c1})} \approx -\frac{j n_Y \omega L_1}{R_1 + r} \dot{U}_{c1} e^{j\theta} \quad \dots\dots (12) \end{aligned}$$

1. 不加第三相电压时的试验动作特性

此时继电器的第三相电压不加入, 即将图1(b)中JYB的一次绕组或两个二次绕组分别短接。

继电器的动作方程写为 ($\dot{U}_Y = n_Y \dot{U}_{cL}, \dot{U}_K = \frac{1}{2} \dot{I}_{cL} \dot{K}_K$)

$$\left| \frac{1}{2} \dot{I}_{cL} \dot{K}_K \right| \geq \left| n_Y \dot{U}_{cL} - \frac{1}{2} \dot{I}_{cL} \dot{K}_K \right|$$

应用幅值——相位比较转换关系式, 动作方程写为

$$-90^\circ \leq \arg \frac{\dot{I}_{cL} \dot{K}_K - n_Y \dot{U}_{cL}}{n_Y \dot{U}_{cL}} \leq 90^\circ$$

计及 $Z_2 = \dot{K}_K / n_Y, Z_{cL} = \dot{U}_{cL} / \dot{I}_{cL}$, 上式改写成

$$-90^\circ \leq \arg \frac{Z_2 - Z_{cL}}{Z_{cL}} \leq 90^\circ \quad \dots\dots (13)$$

动作特性是以 Z_2 为直径的一个圆, 此时测得的最大灵敏角 φ_{L_m} 和 φ_K 相等, 不受电网频

率、试验接线以及电源阻抗 Z_M 的影响。

2. 加入第三相电压时的试验动作特性

此时继电器的动作方程为

$$\left| \dot{U}_{ck} + \frac{1}{2} \dot{I}_{cL} \dot{K}_K \right| \geq \left| \dot{U}_{cL} + n_Y \dot{U}_{cL} - \frac{1}{2} \dot{I}_{cL} \dot{K}_K \right|$$

写成比相形式时的动作方程为

$$-90^\circ \leq \arg \frac{\dot{I}_{cL} \dot{K}_K - n_Y \dot{U}_{cL}}{n_Y \dot{U}_{cL} + 2 \dot{U}_{ck}} \leq 90^\circ \quad \dots\dots (14)$$

根据图4电路，并计及(12)、(1)式，同时考虑到 $Z_M + R'$ 要比继电器记忆回路输入电阻小得多，故有

$$\begin{aligned} n_Y \dot{U}_{cL} + 2 \dot{U}_{ck} &= n_Y \dot{U}_{cL} + \frac{-j2n_Y \omega L_J \cdot \dot{U}_c e^{j\theta}}{R_J + r} \\ &= n_Y \dot{U}_{cL} + \frac{-j2n_Y \omega L_J}{R_J + r} \cdot j \frac{\dot{E}_{AB}}{\sqrt{3}} \cdot e^{j\theta} \\ &= n_Y \dot{U}_{cL} + \frac{2n_Y \omega L_J}{\sqrt{3}(R_J + r)} \dot{U}_{cL} \frac{Z_M + R}{R''} \cdot e^{j\theta} \\ &= n_Y \dot{U}_{cL} \left[1 + \frac{2n_Y \omega L_J}{\sqrt{3}(R_J + r)} \cdot \frac{1}{n_Y} \cdot \frac{Z_M + R}{R''} \cdot e^{j\theta} \right] \end{aligned}$$

于是(14)式可写成

$$-90^\circ + \alpha \leq \arg \frac{Z_M - Z_{cL}}{Z_{cL}} \leq 90^\circ + \alpha \quad \dots\dots (15)$$

$$\text{其中 } \alpha = \arg \left[1 + \frac{2n_Y \omega L_J}{\sqrt{3}(R_J + r)} \cdot \frac{1}{n_Y} \cdot \frac{Z_M + R}{R''} \cdot e^{j\theta} \right] \quad \dots\dots (16)$$

(15)式就是加入第三相电压后在试验条件下继电器的动作方程。和LH—11型继电器相比，有类似特点。首先，在试验状态下，因 R'' 改变，测得的动作特性不是一个圆，和继电器在电力系统中的实际稳态动作特性有差别（正向两相短路故障），其次，在试验状态下（某一 R'' 值），测得的最大灵敏角（见(15)式）为

$$\varphi_{Lm} = \varphi_K - \alpha$$

而 α 角由(16)式确定，与试验时的 Z_M 、 n_Y 、 R'' 、 θ 角等有关，分析如下：

对JJ—11型继电器来说， $\frac{n_Y \omega L_J}{R_J + r}$ 约为0.04，若 $R = 100$ 欧、 $R'' = 9$ 欧、 $Z_M = 13.29 + j28.07$ 欧时，则在不同 θ 、 n_Y 值时 α 角如下表所示。

不同 θ 、 n_Y 时的 α 角

θ 角	-20°	-10°	0°	10°	20°
$n_Y = 40\%$	-3.6°	2.4°	8.4°	14.4°	20.5°
$n_Y = 80\%$	-2.6°	1.7°	6.0°	10.3°	14.5°

可以看出, n_T 减小、 θ 角(正值)增大时, α 角也随着增大, 当然 Z_M 增大时, α 角还要加大。

由上分析可见, 由于试验时第三相电压的加入, 使继电器动作特性不是一个圆, 且在某一 R'' 值下测得的 φ_{L_m} 与 φ_K 有 α 度的误差角, 有时 α 角较大, 故试验方法是不妥的, 同样存在原理性误差。

二、结论和建议

1. 第三相电压加入后, 试验得到的继电器动作特性(模拟两相短路)仍过坐标原点, 但不是一个圆(通常情况下与圆接近), 与继电器在电力系统中正向两相短路故障呈现的稳态动作特性不同。这种动作特性不同的原因是在试验条件下通入继电器电流回路独立所造成的。

需要指出, 试验条件下所得到的动作特性经过坐标原点, 并不意味着继电器出口两相短路故障时(试验条件下)失去方向性, 因为在这种情况下继电器变为无死区而有明确方向性的方向继电器了。

2. 在第三相电压加入的试验条件下, 在某一 R'' 下测得的最大灵敏角与整定阻抗角 φ_K 不相等, 有时差别较大。其产生的原因一是试验电源频率下记忆回路不是处于谐振状态($\theta \neq 0^\circ$), 二是试验时电源阻抗(Z_M)与模拟阻抗(R)存在相角差。当然, 减小 Z_M 数值可以减小误差, 但不能减小到零(见(10)式)。

3. 在加入第三相电压情况下, 采用两点法或测量制动回路电阻上电压的方法确定的最大灵敏角, 即使谐振记忆回路处于谐振状态($\theta = 0^\circ$), 与 φ_K 也有较大的差别, 数值偏小, 存在原理性误差, 试验证实了这点, 故测试方法是不恰当的(如资料3中的方法)。

4. 在整定阻抗角时, 为正确测定 φ_K (等于被保护线路阻抗角 φ_{XL}), 方法之一, 可以应用相位电压表(电压档放高一些), 直接测定电抗变压器二次空载电压与一次电流(等于额定电流)间的相角差, 调整灵敏角调节电阻($R\phi$)使等于线路阻抗角; 如果不用相位电压表, 方法之二, 可在电抗变压器一次通入不变的额定电流、在整定变压器一次加入大小和相位可变的电压情况下, 调整灵敏角调节电阻, 测量电抗变压器和整定变压器二次的总电压(在 \dot{U}_{L_1} 或 \dot{U}_1 等于零的条件下), 使输入的电流和电压间相角差在被保护线路阻抗角下有接近于零的最小值; 方法之三, 在不加第三相电压条件下, 短接 C 和 L , [图1(a)] 或 JYB 一次侧 [图1(b)] 条件下, 用常规方法(如两点法)测量最大灵敏角, 调整灵敏角调节电阻, 使最大灵敏角等于被保护线路阻抗角, 这种整定方法不受试验电源频率、试验接线以及电源阻抗 Z_M 大小的影响。

参考资料:

1. 许正亚《方向阻抗继电器极化回路对继电器性能的影响》继电器1980.N0.1
2. 洪佩蓀《方向阻抗继电器过渡特性及对方向阻抗继电器极化回路构成的意见》中国电机工程学会第二次继电保护及自动装置学术讨论会论文集 1979.
3. PLH—11/B型继电保护屏检验 水利电力出版社 1978.5