

# 多相阻抗继电器特性分析

## ——采用修正故障阻抗法

河北省电力勘测设计院 袁季修

多相阻抗继电器或称为第二类阻抗继电器的特性分析，一直是大家关注的问题，特别是近年来国内研制了许多新型阻抗继电器，迫切需要一种简单准确的分析方法。国内许多人在这方面进行了大量工作，还提出了不少创造性的意见。

多相阻抗继电器特性分析较困难，不仅由于影响的因素很多，例如系统阻抗、故障点位置、短路类型、过渡电阻、负载状态及振荡等，而且涉及到所有各相的电气量。现有的分析方法中，有的是在某一给定状态下（例如某一负载状态下，某一点经某一过渡电阻短路等）求得继电器动作情况，对各种条件变化时的特性不容易看清楚。有的是将某些条件加以简化（例如忽略负载，认为相序阻抗网络相似等），这样往往只能定性分析，难以定量，在一些较复杂的情况下，有时不能确切说明继电器特性。因此，在分析方法方面再进行某些探索，还是有意义的。

本文建议采用短路时的故障阻抗，考虑负载加以修正作为变量（本文称为修正故障阻抗）来分析多相阻抗继电器。采用这种方法可以将各种情况下，包括一些较复杂的情况下的继电器特性，在阻抗平面上比较简明的表示出来，并可定量的确定继电器动作临界值，如两侧电势允许摆开角度（或负荷）、允许过渡电阻等。

### 一、概 述

分析计算用网络见图 1；图中(a)为系统接线及阻抗图，继电器装于线路M端，K

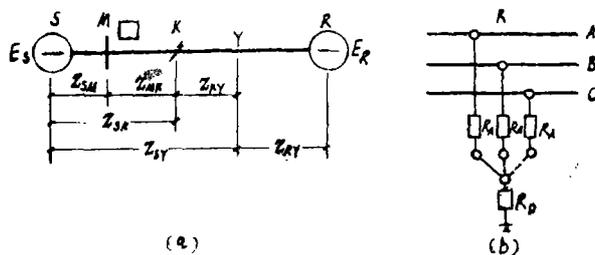


图 1 计算用网络图

为短路点， $Y$ 为保护区末端。(b)为经过渡电阻短路示意图，设相间过渡电阻相等，每相均为 $R_{12}$ ，接地电阻为 $R_D$ 。

各种阻抗继电器的动作条件可表示为：

$$0_1 < \arg \frac{U_M - I Z_{MY}}{I} < 0_2$$

式中  $U_M$  —— 保护安装处母线电压；

$I$  —— 接入继电器的电流；

$Z_{MY}$  —— 继电器整定阻抗；

$U_Y$  —— 极化电压。

对于相间阻抗继电器，通常 $U_M$ 为相间电压， $I$ 为两相电流差。对于接地阻抗继电器，通常 $U_M$ 为相电压， $I$ 是经零序电流补偿后的相电流，即 $I = I_I + KI_0$ 。

按绝对值比较原理构成的阻抗继电器，也可化为对应的相位比较特性。

不同类型阻抗继电器就在于 $U_Y$ 不同，例如： $U_Y = U_M$ 时为方向阻抗继电器； $U_Y$ 为故障前母线电压时，为极化回路有记忆作用的方向阻抗继电器的动态特性； $U_Y$ 为其他相补偿电压时，为多相补偿阻抗继电器；有的接地阻抗继电器以零序电流 $I_0$ 为极化量等。前一类接入继电器的只有一个电压和电流，通常称为单相阻抗继电器或第一类阻抗继电器。后面各类通常称为多相阻抗继电器或第二类阻抗继电器。本文主要讨论多相阻抗继电器的特性及分析方法。

确定继电器整定范围的相补偿电压为：

$$\begin{aligned} U' &= U_M - (I_L + KI_0) Z_{MY} \\ &= E_S - I_H Z_{1SY} - I_1 Z_{1SY} - I_2 Z_{2SY} - I_0 Z_{0SY} \\ &= U^{(q)} - (C_1 I_{1K} + C_2 I_{2K} + C_0 P_Y I_{0K}) Z_{1SY} \end{aligned}$$

式中  $I_H$  —— 负载电流

$$U^{(q)} = E_S - I_H Z_{1SY}, \text{ 短路前Y点电压}$$

$C_1, C_2, C_0$  —— 分别为正、负、零序短路电流分支系数

$$P_Y = \frac{Z_{0SY}}{Z_{1SY}}$$

将补偿电压除以正序短路电流（对于相间短路）或除以零序短路电流（对于接地短路）并设 $Z_{SY} = Z_{1SY}$ （下同）

$$\text{可得： } \frac{U'}{I_{0K}} \left( \text{或 } \frac{U'}{I_{1K}} \right) = C_K (Z_G^{\infty} - C Z_{SY})$$

$$\text{式中 } Z_G^{\infty} = \frac{U^{(q)}}{U^{(H)}} \left( Z_{1:K} + \frac{R}{C_K} \right) \quad (1)$$

根据附录一中的短路电流表达式，可求得各种短路情况下(1)式中的 $R$ 及 $C_K$ 值如表1：

表 1

短路形式	三相短路	两相短路	单相接地	两相接地
$R$	$R_A$	$2R_A$	$3(R_A + R_D)$	$3(R_A + 2R_D)$
$C_K$	$C_1$	$2C_1$	$2C_1 + C_0 P_K$	$C_1 + 2C_0 P_K$

$Z_G$ 称为修正故障阻抗。它的物理意义是： $C_K \left( Z_{1sK} + \frac{R}{C_K} \right)$ 是计算短路电流的综合短路阻抗， $U^{(H)}$ 、 $U^{(K)}$ 为Y、K两点故障前电压，这两个电压向量差反映了系统的负载状态。 $Z_G$ 即故障阻抗 $\left( Z_{1sK} + \frac{R}{C_K} \right)$ 乘一个负载修正系数 $U^{(Y)}/U^{(K)}$ 。以 $Z_G$ 作为参变量分析阻抗继电器特性时，用电压作极化量的阻抗继电器动作条件一般可写为：

$$\theta_1 < \arg \frac{Z_G - DZ_{SY}}{Z_G - CZ_{SY}} < \theta_2 \quad (2)$$

以电流为极化量的阻抗继电器动作条件一般可写为：

$$\theta_1 < \arg(Z_G - CZ_{SY}) < \theta_2 \quad (3)$$

(2)式动作条件的边界是圆，(3)式动作条件的边界是直线，这些动作条件边界很容易在阻抗平面上表示出来(详见第三、四节)。各种负载状态下各点短路时的 $Z_G$ 也很容易求得(详见第二节)。在阻抗平面上比较 $Z_G$ 轨迹与继电器动作范围，即可确定继电器在各种情况下的动作性能。

## 二、修正故障阻抗 $Z_G$ 的轨迹

修正故障阻抗的表达式见(1)式，式中的 $R$ 及 $C_K$ 值见表1。下面主要讨论负载状态对 $Z_G$ 的影响。

### 1. 某点短路，系统振荡时的 $Z_G$

系统各阻抗向量表示于图2，这些向量也可以表示通过某一负载电流(或振荡电流)时的电压向量。图中H表示系统电压中性点或负载阻抗向量端点。SH和RH分别表示两侧电源电压 $E_S$ 和 $E_R$ ，或表示阻抗 $\frac{E_S}{I_H}$ 和 $\frac{E_R}{I_H}$ ， $I_H$ 为负载电流。YH和KH分别表示 $U^{(Y)}$ 和 $U^{(K)}$ 。系统振荡时，H的轨迹示于图2。

当线路某点K金属性短路时，则：

$$Z_G = \frac{U^{(Y)}}{U^{(K)}} Z_{1sK} = \frac{YH}{KH} \cdot SK = SK'$$

此时  $\triangle SKK' \sim \triangle HKY$ 。

当线路K点通过过渡电阻 $R$ 短路时，设 $KD = \frac{R}{C_K}$ ，

则：
$$Z_G = \frac{U(\frac{H}{Y})}{U(\frac{H}{K})} \left( Z_{1SK} + \frac{R}{C_K} \right) = \frac{YH}{KH} \cdot SD = SD'$$

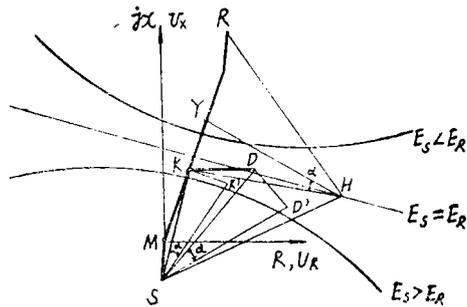


图2 阻抗或电压向量图

系统振荡，即H沿振荡轨迹变化时， $Z_G$ 的轨迹为圆。该轨迹圆与故障点位置、振荡中心位置等因素有关。图3表示H通过保护区内时 $Z_G$ 的轨迹，图4表示H通过保护区外时 $Z_G$ 的轨迹。图中近似认为系统与线路阻抗角相等。

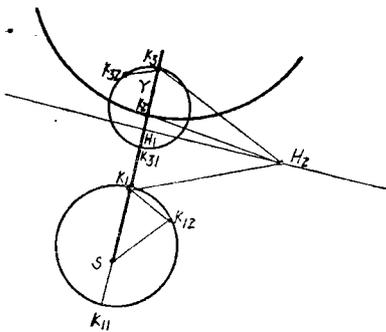


图3 H通过保护区内时 $Z_G$ 轨迹

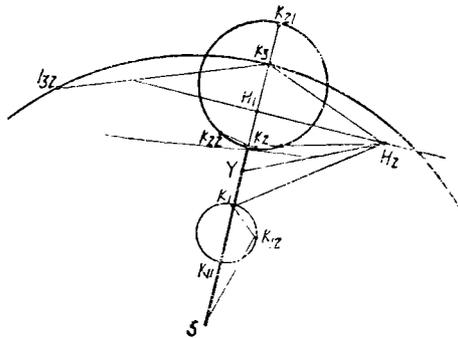


图4 H通过保护区外时 $Z_G$ 轨迹

$Z_G$ 轨迹圆作法很简单。设振荡时系统中心点轨迹与KY线交于 $H_1$ ，参见图3中短路点 $K_1$ ，作 $SK_{11}$ ，使 $\frac{SK_{11}}{SK_1} = \frac{YH_1}{K_1H_1}$ ，以 $K_1K_{11}$ 为直径作圆，即所求的 $Z_G$ 轨迹。证明见附录二。

如已知某一负载状态 $H_2$ ，求 $K_1$ 短路时的 $Z_G$ 。作 $SK_{12}$ ，令 $\angle K_{12}SK_1 = \angle YH_2K_1$ ，与轨迹圆交于 $K_{12}$ ，则所求的 $Z_G = SK_{12}$ 。

当K点经过电阻短路时，可用上述类似方法求 $Z_G$ 轨迹。如图5，圆 $KK_1$ 是振荡时K点金属短路的 $Z_G$ 轨迹，作 $KD = \frac{R}{C_K}$ ，作 $SD_1 = \frac{SK_1}{SK} \cdot SD$ ，以 $DD_1$ 为直径作圆，即所求 $Z_G$ 轨迹。对于任一负载状态 $H_2$ ，在圆 $DD_1$ 上可找到一点 $D_2$ ，使 $\angle D_2SD = \angle YH_2K$ ，则

$SD_2$ 即所求的 $Z_G$ 轨迹。

2. 某一负载状态下线路各点短路时的 $Z_G$ 对应于某一负载状态 $H_1$ ，求线路各点短路时 $Z_G$ 轨迹的方法如下：

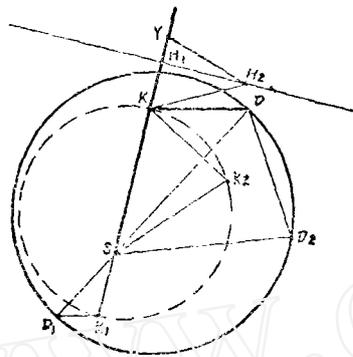


图5. 经过渡电阻短路时 $Z_G$ 轨迹

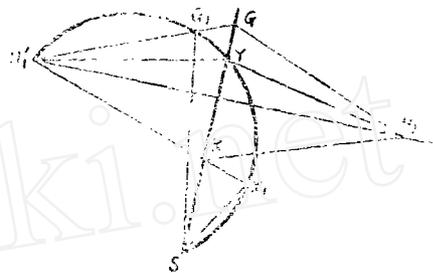


图6. 某一负载状态下各点短路时的 $Z_G$ 轨迹

如图6，以 $SY$ 为轴，取 $H_1$ 的镜象 $H_1'$ ，通过 $H_1'YS$ 三点的圆弧即所求的 $Z_G$ 轨迹。对于线路上任一点 $K$ ，连接 $H_1'K$ 延长交圆弧于 $K_1$ ，则 $SK_1$ 即对应 $K$ 点短路的 $Z_G$ 。证明如下：

$$\text{因 } \angle K_1SY = \angle K_1H_1'Y = \angle KH_1Y$$

$$\text{又 } \angle K_1KS = \angle YKH_1' = \angle YKH_1$$

$$\text{故 } \triangle K_1SK \sim \triangle YH_1K$$

$$\text{故 } SK_1 = \frac{YH_1}{KH_1} SK = Z_G$$

容易看出，在保护区内各点短路时， $Z_G$ 的轨迹为弧 $\widehat{SY}$ ，保护区外各点短路时， $Z_G$ 轨迹为弧 $\widehat{YH_1}$ 。

### 三、多相补偿阻抗继电器特性分析

多相补偿阻抗继电器是以另一相补偿电压作为极化量，三个继电器动作条件分别为：

$$A/B: 0 < \arg \frac{U_b'}{U_a'} < 180^\circ$$

$$B/C: 0 < \arg \frac{U_c'}{U_b'} < 180^\circ$$

$$C/A: 0 < \arg \frac{U_a'}{U_c'} < 180^\circ$$

(4)

$$\left. \begin{aligned} U'_A &= U^{(H)} - (C_1 I_{1K} + C_2 I_{2K} + C_0 P_Y I_{OK}) Z_{SY} \\ U'_B &= \alpha^2 U^{(H)} - (\alpha^2 C_1 I_{1K} + \alpha C_2 I_{2K} + C_0 P_Y I_{OK}) Z_{SY} \\ U'_C &= \alpha U^{(H)} - (\alpha C_1 I_{1K} + \alpha^2 C_2 I_{2K} + C_0 P_Y I_{OK}) Z_{SY} \end{aligned} \right\} (5)$$

对(4)式进行适当变换: 当 $U'_B/U'_A$ 的角度处于动作范围内, 即处于 $0 \sim 180^\circ$ 以内时,  $U'_B/U'_A$ 加上一个实数后的角度仍处于动作范围内, 如:

$$\begin{aligned} \frac{U'_B}{U'_A} + \frac{1}{2} &= \frac{\alpha^2 U^{(H)} - (\alpha^2 C_1 I_{1K} + \alpha C_2 I_{2K} + C_0 P_Y I_{OK}) Z_{SY}}{U^{(H)} - (C_1 I_{1K} + C_2 I_{2K} + C_0 P_Y I_{OK}) Z_{SY}} + \frac{1}{2} \\ &= -j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{U^{(H)} - (C_1 I_{1K} - C_2 I_{2K} + j\sqrt{3} C_0 P_Y I_{OK}) Z_{SY}}{U^{(H)} - (C_1 I_{1K} + C_2 I_{2K} + C_0 P_Y I_{OK}) Z_{SY}} \end{aligned}$$

将其他两个继电器进行类似变换, 可将继电器动作条件写为如下形式:

$$\left. \begin{aligned} A/B: & 90^\circ < \arg \frac{U^{(H)} - (C_1 I_{1K} - C_2 I_{2K} + j\sqrt{3} C_0 P_Y I_{OK}) Z_{SY}}{U^{(H)} - (C_1 I_{1K} + C_2 I_{2K} + C_0 P_Y I_{OK}) Z_{SY}} < 270^\circ \\ B/C: & 90^\circ < \arg \frac{U^{(H)} - (C_1 I_{1K} - C_2 I_{2K}) Z_{SY}}{U^{(H)} - (C_1 I_{1K} + C_2 I_{2K} - 2C_0 P_Y I_{OK}) Z_{SY}} < 270^\circ \\ C/A: & 90^\circ < \arg \frac{U^{(H)} - (C_1 I_{1K} - C_2 I_{2K} - j\sqrt{3} C_0 P_Y I_{OK}) Z_{SY}}{U^{(H)} - (C_1 I_{1K} + C_2 I_{2K} + C_0 P_Y I_{OK}) Z_{SY}} < 270^\circ \end{aligned} \right\} (6)$$

将各种形式的短路电流代入(6)式, 各继电器动作条件均可表示为如下形式:

$$90^\circ < \arg \frac{Z_G - DZ_{SY}}{Z_G - CZ_{SY}} < 270^\circ$$

式中 $Z_C$ 的表达式及参数见(1)及表1,  $C$ 、 $D$ 值见表2:

表2

短路类型		三相短路	两相短路	单相接地	两相接地
A/B	C	1	0	$\frac{2C_1 + C_0 P_Y}{C_K}$	$\frac{C_1 - C_0 P_Y}{C_K}$
	D	1	1	$j \frac{\sqrt{3} C_0 P_Y}{C_K}$	$1 + E - j \frac{\sqrt{3} C_0 P_Y}{C_K}$
B/C	C	1	0	$\frac{2(C_1 - C_0 P_Y)}{C_K}$	$\frac{C_1 + 2C_0 P_Y}{C_K}$
	D	1	1	0	$1 + E$
C/A	C	1	0	$\frac{2C_1 + C_0 P_Y}{C_K}$	$\frac{C_1 - C_0 P_Y}{C_K}$
	D	1	1	$-j \frac{\sqrt{3} C_0 P_Y}{C_K}$	$1 + E + j \frac{\sqrt{3} C_0 P_Y}{C_K}$

表中  $C_K$ 值见表(1)

$$E = \frac{\frac{R}{C_K} - \frac{R_A}{C_1}}{Z_{1SY} + \frac{R_A}{C_1}} = \frac{\frac{6R_D}{C_K} - \left(\frac{1}{C_1} - \frac{3}{C_K}\right)R_A}{Z_{1SK} + \frac{R_A}{C_1}}$$

现分析各种短路时继电器动作条件:

### 1. 三相短路

$$\arg \frac{Z_G - Z_{SY}}{Z_G - Z_{SY}} = 0^\circ$$

角度不在动作范围 $90^\circ \sim 270^\circ$ 内, 故继电器不会动作。

### 2. 两相短路

三个继电器的动作条件均为:

$$90^\circ < \arg \frac{Z_G - Z_{SY}}{Z_G} < 270^\circ$$

继电器动作范围边界为图 7 中的粗线圆, 三个继电器动作边界圆相同。再在图上表示出 $Z_G$ 的轨迹, 如圆弧 I、II、III 分别表示 $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ 三种负载状态下不同点短路时 $Z_G$ 的轨迹。可以看出, 在 $H_1$ 、 $H_2$ 状态下保护区内短路时, 弧 I、II 处于动作圆内, 继电器能正确动作。比较弧 I 和 II 可以看出,  $H_2$ 状态(受电状态)比 $H_1$ 状态(送电状态)允许的过渡电阻大。 $H_3$ 状态下内部故障将拒动, 外部故障将误动。实际上, 只要 $H$ 进入动作圆内, 即出现这种不正确动作情况。

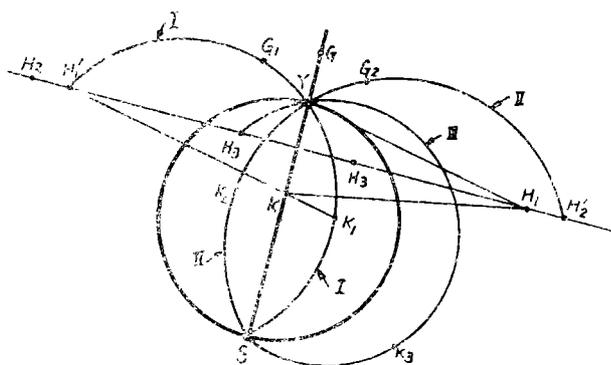


图 7. 多相阻抗继电器两相短路特性

以上分析的是振荡时 $H$ 通过保护区内的情况, 如果通过保护区外, 用类似方法作图, 可以看出, 继电器不会误动或拒动。

### 3. 单相接地

三个继电器的动作边界圆见图 8 中的实线圆, 金属性单相接地时,  $Z_G$ 的轨迹见图 8 中的虚线圆。图中表示在 $K_1$ 、 $K_2$ 两点短路情况, 其中 $K_1$ 处于保护区内(粗线所示特性),  $K_2$ 处于保护区外(细线所示特性)。

从图 8 中可以看出以下一些特性:

- (1) 三个继电器的动作边界圆是各不相同的, 这一点与两相短路情况是不一样的。
- (2) 继电器动作边界圆与负荷状态及过渡电阻无关, 但与短路点有关, 区内故障动

作圆将稍扩大，区外故障则动作圆将稍缩小。如果系统中各点的各序阻抗是均匀的，即各点 $Z_0$ 与 $Z_1$ 之比相等时，则 $C_1 = C_0$ ， $P_K = P_Y$ ，则动作边界圆不因短路点而改变，并通过 $Y$ 点。在作近似分析时，特别是在保护区末端附近故障时，也可以在这样的简化条件下进行。

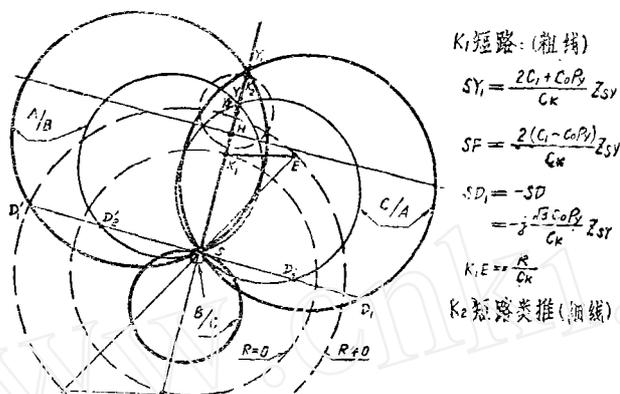


图8. 多相故障阻抗接地单相接地特性

(3) 空载状态 $A$ 相接地时，故障相继电器均动作。其中 $C/A$ 继电器允许的过渡电阻比 $A/B$ 继电器允许的大，而且前者比两相短路时允许值还大一些，后者则小一些。

(4) 振荡并接地时，继电器动作特性与两相短路相似，如振荡中心在保护区内（如图所示），则功角大到一定值时，区内短路继电器将拒动，区外短路则将误动。如振荡中心在保护区外，则不会发生这种情况。两个故障相继电器误动或拒动的功角不同，送电侧 $A/B$ 比 $C/A$ 容易不正确动作，受电侧 $C/A$ 比 $A/B$ 容易不正确动作。

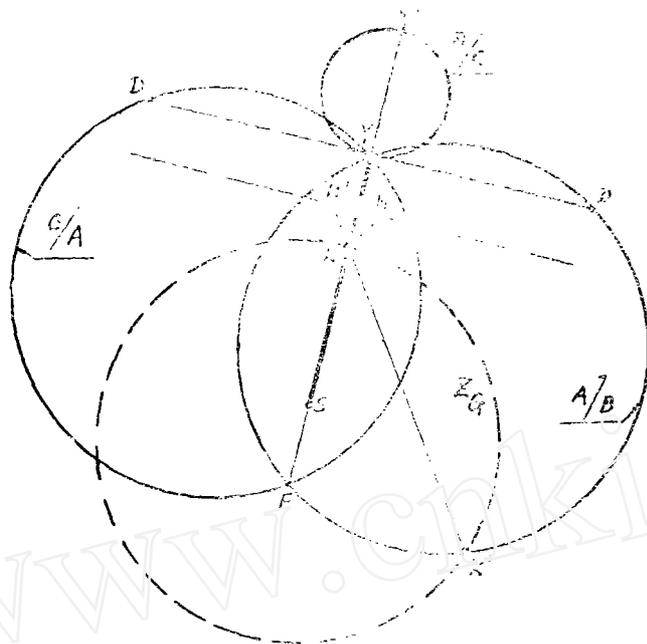
#### 4. 两相接地

三个继电器的动作边界圆见图9，其中(a)表示金属性短路情况，(b)表示相间过渡电阻为零只经接地过渡电阻短路情况，(c)表示同时有相间和接地过渡电阻的短路情况。

继电器的某些特性与单相接地相似，不再一一重复。但要注意，两相接地时 $A/B$ 继电器特性与单相接地的 $C/A$ 继电器特性相似。

现在着重分析一下过渡电阻对两相接地动作特性的影响。两相接地时的过渡电阻包括相间电阻 $R_A$ 与接地电阻 $R_D$ ，两者对动作特性的影响是不一样的。由于两相接地时 $A/B$ 继电器允许的过渡电阻较大，故保护拒动的问题不严重。但由于过渡电阻引起的区外短路超越误动情况则很严重。现分析一下这种情况，见图9(b)、(c)。

区外 $K$ 点短路，接地电阻为 $R_D$ ，相间电阻 $R_A$ 为零时，见图9(b)，动作边界圆将向右移 $YE$ ，故障阻抗 $Z_G = Z_{1SK} + \frac{6R_D}{C_K} = SG$ ， $G$ 位于圆内，故保护将误动。



$$S_1' = \frac{C_1 + 2C_2}{C_K} S_1$$

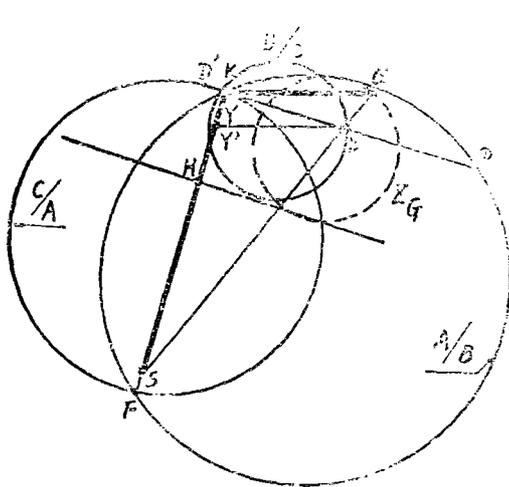
$$S_1 = \frac{C_1 - C_1 \beta_1}{C_K} S_1$$

$$YD = -\beta \frac{AS_1}{C_1} S_1$$

$$= -YD'$$

$$C_K = C_1 + 2C_2$$

(a) 区内K经全源柱两相接地



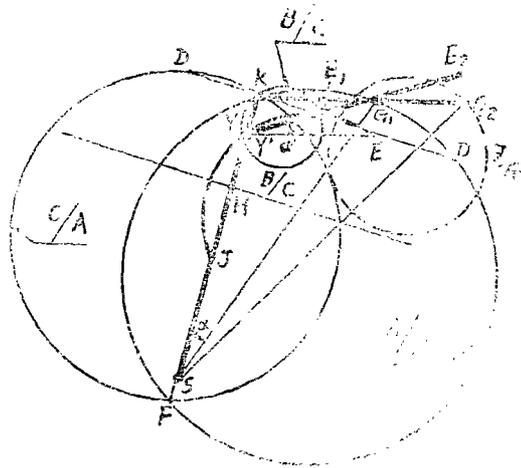
(b) 区内K经R<sub>D</sub>两相 (R<sub>A</sub>=0)

$$KG = \frac{GR_D}{C_K}$$

$$YE = \frac{GR_D}{C_K} \frac{S_1}{Z_{1SK}}$$

$$KG_1 = \frac{R_A}{C_1}$$

$$YE_1 = \frac{(R_A - R_1)}{C_1} \frac{S_1}{Z_{1SK} + \frac{L_A}{C_1}}$$



(c) 区内K经R<sub>A</sub>, R<sub>D</sub>两相短路

$$KG_2 = \frac{3(R_A + R_D)}{C_K} \frac{S_1}{C_1}$$

图9 多相补偿阻抗型电抗器两相接地特征

如  $R_A \neq 0$ , 见图 9(c), 则  $\frac{R}{C_K} = \frac{3(R_A + 2R_D)}{C_K}$ ,  $Z_G = SG_2$ , 而动作圆偏移  $YE_1$ , 由于  $KG_2 > KG$ ,  $|YE_1| < |YE|$ ,  $G_2$  在动作圆外, 保护不会误动。可以看出,  $R_A$  的存在对防止保护超越误动是有利的。

$R_D$  固定,  $R_A$  增大时,  $E_1$  的轨迹可按如下方法求得, 因

$$YE_1 = \frac{\frac{6R_D}{C_K} - \frac{(C_K - 3C_1)R_A}{C_1 C_K}}{Z_{1SK} + \frac{R_A}{C_1}} \cdot Z_{SY}$$

可以看出,  $R_A$  变化时  $YE$  轨迹为一圆, 该圆通过如下三点:

(1)  $R_A = 0$  时,  $YE_1 = YE$ 。

(2)  $R_A = \infty$  时,  $YE_1 = -\frac{C_K - 3C_1}{C_K} \cdot Z_{SY}$

(3)  $R_A = \frac{6C_1}{C_K - 3C_1} R_D$  时,  $YE_1 = 0$

据此三点, 可以画出  $E_1$  的轨迹圆  $EYJ$ 。

对于某一  $R_A$ , 在图上作  $KG_1 = \frac{R_A}{C_1}$ , 如  $SK$  与  $SG_1$  夹角为  $\alpha$ , 自  $Y$  作  $YE_2$ ,

令  $\angle E_2 Y E = \alpha$ ,  $YE_2$  与圆  $EYJ$  交于  $E_1$ ,  $E_1$  即所求的点。当  $R_A$  固定,  $R_D$  变化时的  $E_1$  轨迹即  $YE_2$  直线。

总之,  $R_D$  增大时, 动作图向右偏移并扩大, 将使区外短路误动的可能性增加; 当  $R_A$  增大时, 则动作圆的偏移减小, 区外短路误动可能性也相应减小了。

### 5. 反方向短路

前面讨论的动作边界图, 只适用于正方向短路。如果反方向短路时, 进入继电器的是由系统对侧 ( $R$  侧) 送来的电流, 且电流方向与设定的正方向相反。故决定继电器动作特性的补偿电压为:

$$\begin{aligned} U' &= U_M + (I'_L + KI'_0)Z_{MY} \\ &= [E_R - (I'_H + C'_1 I'_{1K})Z_{1RM} - C'_2 I'_{2K} Z_{2RM} - C'_0 L_{OK} Z_{ORM}] \\ &\quad + [(I'_H + C'_1 I'_{1K})Z_{MY} + C'_2 I'_{2K} Z_{MY} + (1+K)C'_0 I'_{OK} Z_{MY}] \\ &= U^{(H)} - (C'_1 I'_{1K} + C'_2 I'_{2K} + C'_0 P'_Y I'_{OK})Z_{1RY} \end{aligned}$$

式中  $I'_H$  —— 为由  $R$  侧送出的负载电流,  $I'_H = -I_H$ ;  $C'_1$ 、 $C'_2$ 、 $C'_0$  ——  $R$  侧电流分支系数;  $P'_Y = Z_{ORY}/Z_{1RY}$

由  $U'$  的表达式可看出反方向短路与正方向短路的不同点在于前者是以  $R$  为基准点, 而后者以  $S$  为基准点, 而修正故障阻抗和继电器动作边界圆的形式则与正方向短路相似。例如:

$$Z_G = \frac{U^{(H)}}{U^{(K)}} \left( Z_{1RK} + \frac{R}{C'_K} \right)$$

多相补偿阻抗继电器在反方向两相短路及单相接地时动作边界圆见 10。图中还同时表示出  $K$  点短路振荡时的  $Z_G$  轨迹 (虚线), 可以看出, 如继电器整定值超出振荡中心, 即

$SY > SH$ , 则振荡时反方向短路, 继电器有良好的方向性, 如  $SY < SH$ , 则严重振荡时, 反方向短路继电器可能误动。

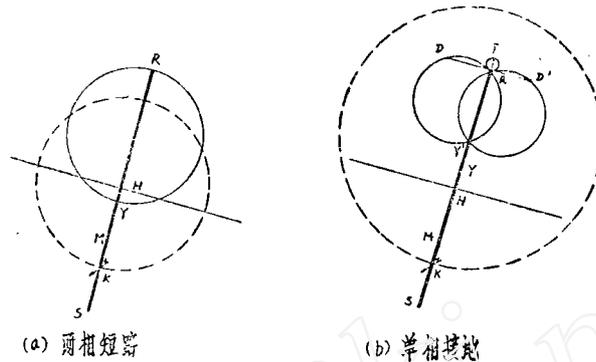


图 10 反方向短路多相补偿继电器特性

#### 四、以 $I_0$ 为极化量的接地阻抗继电器

继电器动作条件如下:

$$\theta_1 < \arg \frac{U'}{I_0} < \theta_2$$

将附录一中各种接地短路电流代入(5)式, 各相继电器的动作条件均可化为如下形式:

$$(\theta_1 - \theta) < \arg(Z_0 - CZ_{SY}) < (\theta_2 - \theta)$$

各种情况下的  $\theta$  及  $C$  值见表 3

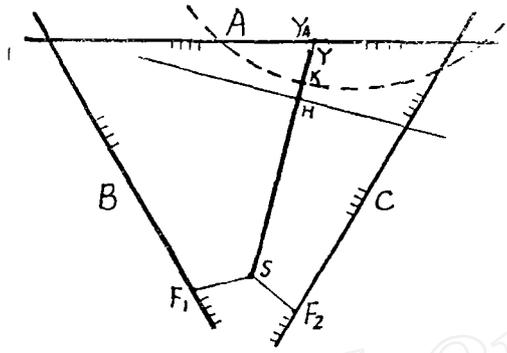
表 3

	A 相接地		BC 两相接地	
	$\theta$	$C$	$\theta$	$C$
$\frac{U'_A}{I_0}$	$\arg \frac{C_K}{C_0}$	$\frac{2C_1 + C_0 P_Y}{C_K}$	$\arg \left( -\frac{C_K}{C_0} \right)$	$\frac{C_1 - C_0 P_Y}{C_K}$
$\frac{U'_B}{I_0}$	$\arg \frac{\alpha^2 C_K}{C_0}$	$\frac{\alpha(C_0 P_Y - C_1)}{C_K}$	$\arg \left( -\frac{\alpha^2 C_K}{C_0} \right)$	$1 - \frac{\alpha C_0 (P_Y - P_K)}{C_K} + (1 - \alpha^2) E$
$\frac{U'_C}{I_0}$	$\arg \frac{\alpha C_K}{C_0}$	$\frac{\alpha^2 (C_0 P_Y - C_1)}{C_K}$	$\arg \left( -\frac{\alpha C_K}{C_0} \right)$	$1 - \frac{\alpha^2 C_0 (P_Y - P_K)}{C_K} + (1 - \alpha) E$

表中  $C_K$  见表(1)

$$E = \frac{3R_D - \frac{C_0 P_K - C_1}{C_1} R_A}{C_K \left( Z_{1SK} + \frac{R_A}{C_1} \right)}$$

继电器的动作边界见图11及图12。图中并注明了某些阻抗向量的值。图是按  $\theta_1 = 180^\circ$ ,  $\theta_2 = 360^\circ$  画的。



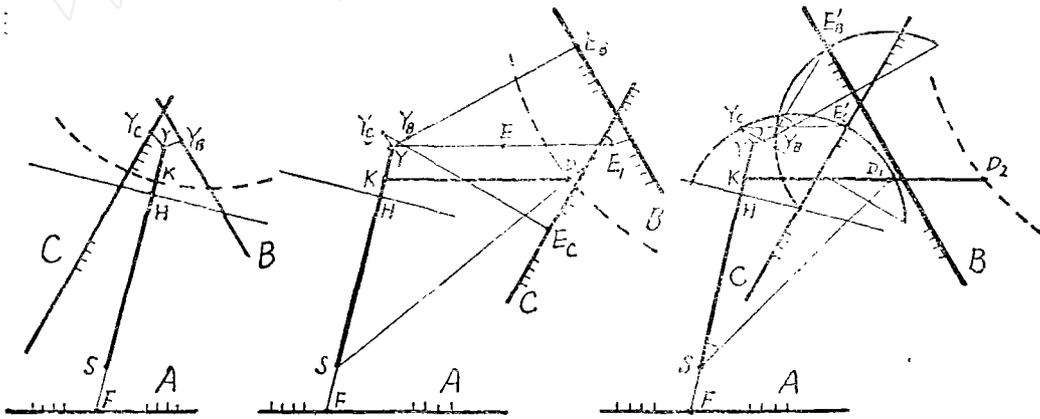
$$SY_A = \frac{2C_1 + C_0\beta}{C_K} Z_{SY}$$

$$SF_1 = \frac{\alpha(C_0\beta - C_1)}{C_K} Z_{SY}$$

$$SF_2 = \frac{\alpha^2(C_0\beta - C_1)}{C_K} Z_{SY}$$

$$C_K = 2C_1 + C_0\beta_K$$

图11 接地阻抗继电器单相接地特性



(a) 金属性接地

(b) 经电阻  $R_D$  接地 ( $R_A = 0$ )

(c) 经电阻  $R_A, R_D$  短路接地

$$SF = \frac{C_1 - C_0\beta}{C_K} Z_{SY}$$

$$YY_B = \frac{-\alpha C_0(\beta - \beta_K)}{C_K} Z_{SY}$$

$$YY_C = \frac{-\alpha^2 C_0(\beta - \beta_K)}{C_K} Z_{SY}$$

$$C_K = C_1 + 2C_0\beta_K$$

$$KD = \frac{6R_D}{C_K}$$

$$KD_1 = \frac{R_A}{C_1}$$

$$KD_2 = \frac{3(R_A + 2R_D)}{C_K}$$

$$YE = \frac{3R_D}{C_K} \cdot \frac{Z_{SY}}{Z_{ISK}}, \quad YE_1 = 2YE$$

$$Y_B E_B = (1 - \alpha^2) YE \quad Y_C E_C = (1 - \alpha) YE$$

$$YE' = \left( \frac{3R_D}{C_K} - \frac{C_0\beta_K - C_1}{C_1 C_K} R_A \right) \frac{Z_{SY}}{Z_{ISK} + \frac{R_A}{C_1}}$$

$$Y_B E_B' = (1 - \alpha^2) YE', \quad Y_C E_C' = (1 - \alpha) YE'$$

图12 接地阻抗继电器两相接地特性

### 1. 单相接地

由图11可以看出以下一些特性:

(1)故障相继电器允许过渡电阻大,在空载时过渡电阻不受限制。

(2)区外短路时,非故障相继电器将误动。

(3)带负载或振荡时,区内短路,如 $SK < SH$ ,故障相继电器也不会因过渡电阻而拒动;如 $SK > SH$ ,则在振荡时可能拒动,一般受电侧继电器拒动情况较送电侧严重。

### 2. 两相接地

由图12可以看出以下一些特性:

(1)金属性短路时[图12(a)]:

空载时两故障相B、C继电器均可正确动作。带负载或振荡时,送电侧的B相和受电侧的C相在区内短路时很容易拒动,而在区外短路时则容易误动。非故障相A继电器在区内区外短路时均将动作。

(2)经过渡电阻 $R_D$ 接地,但相间过渡电阻 $R_A$ 为零时[图12(b)]:

此时,故障阻抗 $Z_G = Z_{1SK} + \frac{6R_D}{C_K}$ 。在 $\theta_1 \sim \theta_2$ 为 $180^\circ \sim 360^\circ$ 的条件下,继电器动作边界相当于向右移动 $\frac{6R_D}{C_K} \cdot \frac{Z_{SY}}{Z_{1SK}}$ 。区内短路时, $Z_G$ 仍在B继电器动作范围内,能正确动作。C继电器可能拒动,因为当 $Z_G$ 幅角小于 $60^\circ$ 左右时, $Z_G$ 可能处于C继电器动作边界左侧,即不在动作区。在区外故障时,由于同样原因,C继电器可能误动。

带负载或振荡时,区内短路,B继电器也可能拒动,C继电器则系统两侧特性的变化趋势不一致,送电侧可能进入动作区,受电侧则拒动情况更严重。

(3)经相间过渡电阻 $R_A$ 和接地过渡电阻 $R_D$ 短路接地情况[图9(c)]

由于相间过渡电阻的作用,总的故障阻抗增大, $R = 3(R_A + 2R_D)$ ,

$Z_G = Z_{1SK} + \frac{R}{C_K}$ 。而动作边界线向右偏移 $YE'_B$ 或 $YE'_C$ ,比 $R_A = 0$ 时偏移小,故B继电器可能拒动,而 $Z_G$ 可能进C继电器动作区。 $R_A$ 变化时, $E'_B$ 及 $E'_C$ 的轨迹为圆,以 $E'_B$ 为例,

$$Y_B E'_B = (1 - \alpha^2) \frac{\frac{3R_D}{C_K} - \frac{C_0 P_K - C_1}{C_1 C_K} R_A}{Z_{1SK} + \frac{R_A}{C_1}} Z_{SY}$$

$$R_A = 0 \text{ 时, } Y_B E'_B = (1 - \alpha^2) \frac{3R_D}{C_K} \cdot \frac{Z_{SY}}{Z_{1SK}}$$

$$R_A = \infty \text{ 时, } Y_B E'_B = -(1 - \alpha^2) \frac{C_0 P_K - C_1}{C_K} Z_{SY}$$

$$R_A = \frac{3C_1}{C_0 P_K - C_1} R_D, Y_B E'_B = 0$$

通过上述三点,可作出 $E'_B$ 轨迹圆,同样可作出 $E'_C$ 轨迹圆。

通过以上分析,C相继电器在两相接地时容易拒动。为了改善C继电器特性,可将继电器动作角的范围 $180 \sim 360^\circ$ 作一些改变,例如 $\theta_1$ 改为 $120^\circ$ ,有利于防止C继电器拒

动,  $\theta_2$  改为  $350^\circ$  左右有利于防止区外故障超越误动。国内正在研制的这种类型继电器就将  $\theta_1$  和  $\theta_2$  做了改变。

## 五、小 结

1. 本文所用的修正故障阻抗是计算正序或零序短路电流用的综合故障阻抗乘一个修正系数, 该修正系数反映了负载电流或振荡情况, 采用修正故障阻抗作变量分析多相阻抗继电器特性时, 可以不对计算条件进行简化, 而能较简单的得出各种情况下, 包括比较复杂情况下的定量的结果。

2. 采用修正故障阻抗为变量分析多相阻抗继电器的特性时, 将影响继电器特性的多种因素分成了两部分, 一部分作为确定修正故障阻抗  $Z_G$  的因素, 如系统阻抗及故障点、负载状态及振荡等, 另一部分则作为确定继电器动作边界的因素, 如继电器型式、短路类型等, (实际上不能完全分开, 某些因素对两者都有影响)。将这些因素分开处理, 可以使修正故障阻抗和继电器动作边界都有比较简单的表达式, 见式(1)、(2)、(3), 并且两者都可以方便的在同一阻抗平面上表示出来, 便于综合分析, 比较两者的轨迹, 即可得到继电器的各种特性。

3. 分析某点短路包括经过渡电阻短路又发生振荡时的继电器特性, 使用修正故障阻抗作变量可以简便的确定各种情况下继电器动作情况, 如区内故障是否会拒动, 区外故障是否会误动, 而且可以简便的确定继电器不正确动作时两侧电势摆开的角度。

4. 在某一负载状态下短路, 采用本方法可方便的定性的看出允许过渡电阻情况, 对于较复杂的包括相间与接地过渡电阻的两相短路接地情况, 用本方法分析各种过渡电阻对保护的影响也较方便。由于各点允许过渡电阻值不是一个简单曲线(直线或圆), 而是一个高阶函数曲线, 如要求准确的定量的确定过渡电阻值, 则可用作图法逐点求出。

5. 本方法的缺点是在某些情况下, 继电器动作边界曲线与短路点有关, 特别是两相接地时, 还与过渡电阻有关, 分析比较复杂。

## 附录一 各种类型故障时的短路电流

线路上  $K$  点发生各种类型故障时, 如  $Z_1 = Z_2$ ,  $K$  点正常运行时电压为  $U^{(k)}$ , 则短路电流如下:

### 1. 三相短路

$$I_{1K} = \frac{U^{(k)}}{C_1 Z_{1SK} + R_d}$$

### 2. 两相短路

$$I_{1K} = -2K I = \frac{U_K^{(H)}}{2C_1 Z_{1SK} + 2R_A}$$

3. 单相接地

$$I_{1K} = I_{2K} = I_{OK} = \frac{U_K^{(H)}}{2C_1 Z_{1SK} + C_0 Z_{OSK} + 3R_A + 3R_D}$$

$$= \frac{U_K^{(H)}}{(2C_1 + C_0 P_K) Z_{1SK} + 3(R_A + R_D)}$$

4. 两相接地

$$I_{OK} = \frac{C_1 Z_{1SK} + R_A}{C_0 Z_{OSK} + R_A + 3R_D} I_{2K} = - \left( \frac{C_1 Z_{1SK} + R_A}{C_0 Z_{OSK} + R_A + 3R_D} + 1 \right) I_{1K}$$

$$= - \frac{U_K^{(H)}}{C_1 Z_{1SK} + 2C_0 Z_{OSK} + 3R_A + 6R_D} = - \frac{U_K^{(H)}}{(C_1 + 2C_0 P_K) Z_{1SK} + 3(R_A + 2R_D)}$$

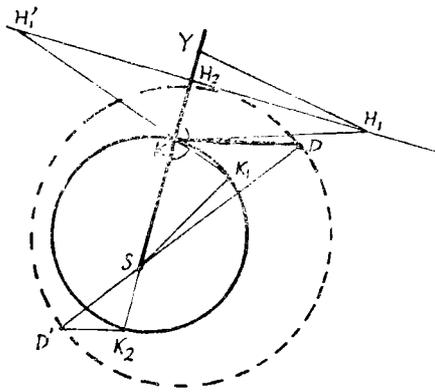
上列各式中,  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_0$ 分别为S侧电流分支系数,  $R_A$ 为每相的相间过渡电阻,  $R_D$ 为接地过渡电阻。

## 附录二

## 系统振荡时的修正故障阻抗

修正故障阻抗的表达式为:

$$Z_G = \frac{U_Y^{(H)}}{U_K^{(H)}} \left( Z_{1SK} + \frac{R}{C_F} \right)$$



附图 1

由附图 1, 对于某一负载状态  $H_1$ ,  $U_Y^{(H)} = YH_1$ ,  $U_K^{(H)} = KH_1$ 。在  $K$  点金属短路时, 如修正故障阻抗为  $SK_1$ , 则

$$Z_G = SK_1 = SK + KK_1$$

又因 
$$Z_G = \frac{YH_1}{KH_1} SK = SK + \frac{YK}{KH_1} SK$$

故 
$$KK_1 = \frac{YK \cdot SK}{KH_1}$$

故  $KK_1$  是  $KH_1$  的倒数，其单位值为  $YK \cdot SK$ 。当  $H_1$  沿  $H_1H_2$  变化时， $K_1$  的轨迹则为以  $K$  为原点的  $H_1H_2$  线反演圆。空载时， $KH_1 = \infty$ ， $K_1$  与  $K$  重合。如  $H_2$  是  $H_1H_2$  线与  $SK$  的交点，则  $KH_2$  垂直  $H_1H_2$ ，如  $H_2$  的反演点为  $K_2$ ，则  $KK_2$  为反演圆的直径。此时

$$KK_2 = \frac{YK \cdot SK}{KH_2}$$

$$SK_2 = SK + KK_2 = \left(1 + \frac{YK}{KH_2}\right) SK = \frac{YH_2}{KH_2} SK$$

如  $K$  点经过渡电阻  $R$  短，作  $KD = \frac{R}{C_K}$ ，则  $SD = Z_{1SK} + \frac{R}{C_K}$ ，取  $SD' = \frac{YH_2}{KH_2} SD$ ，以  $DD'$  为直径作圆，则该圆即  $K$  经  $R$  短路的轨迹。