

小接地距离保护新接线方案

北京电网研究所 马鸣铎

一、前言

小电流接地系统或不接地系统的线路距离保护装置,简称为:“小接地距离保护”。往往要求这种距离保护能切除两相与三相短路故障,又能在两点接地故障发生时 $\frac{3}{2}$ 机会首先切除一个接地点。过去的保护为满足上述要求,必需用切换继电器控制很多切换接点,在交流回路中进行切换。若用晶体管构成这种保护,满足上述要求十分困难。本文提出的接线方案基本不需要切换,即能满足上述要求。接线回路比较简洁,铁心比较少。易于达到,造价低,性能好,调试方便,运行可靠等目标,为提高安全供电和我国电力系统发展作出贡献。

本接线方案的设计参考了“小接地系统相全能阻抗继电器构成的原则方案”的设想。接线方案中所采用的具体回路,都是选择有运行经验的,在以下章节中将逐一说明选择理由。这种接线方案是新的,所谓新者,即过去我们未用过。对于一个继电保护接线方案,首先必需解决的,其在技术原理上正确无误,当采用新接线时在这方面更要特别注意。所采用的具体回路应充分估计其对保护装置的性能影响。必需提出的,我们也是刚刚开始研究摸索,笔下错误之处在所难免,希同志们及时指出共同讨论。本方案的接线图如第1图所示,待后边加以说明,并对其性能进行分析。为读者阅读方便起见,把文中所用的标字和符号列表附于文末,可供随时翻阅,此为前言。

二、初步拟定的接线图

如第1图所示,小接地系统三段距离保护,一二段由一组继电器组成,第三段由另一组继电器组成,两组继电器是一样的,因而只需讨论一二段的一组继电器即可。这组继电器包括两个方向阻抗元件 $\frac{V_x}{V_{ra}}$ 、 $\frac{V_z}{V_{rc}}$ 和一个双补偿阻抗元件 $\frac{jV_z}{V_x}$ 。放在A相的 $\frac{V_x}{V_{ra}}$ 和放在C相的 $\frac{V_z}{V_{rc}}$,它们两个管两点接地故障时有 $\frac{2}{3}$ 机会切除一个接地点,及切除三相短路故障。而双补偿阻抗元件 $\frac{jV_z}{V_x}$ 专管两相短路(a-b, b-c, c-a)故障的切除,同时也能切除两点接地 $I_0 \neq 0$ 时的故障。这三个阻抗元件都是用两个输入量的相位比较原理构成的,而相位比较器皆采用相敏 90° 相位比较器。相位比较器有好

• 9 •

多种, 为何偏选用相敏 90° 相位比较器呢? 理由有三点: ①它的特性比较好(超越小, 动作快) ②回路简单, 主要由于线圈可以综合利用, ③对于它的特点比较熟悉知底。过去我们在整流型继电器中和晶体管保护中, 曾使用了多年。相敏 90° 相位比较器的输出端接到100周滤波器, 采用桥式滤波回路, 为何采用这种滤波回路呢? 因为其滤波效果较好, 而其中所用的电感 T_L 可以用III₈小铁心作成, III₈所绕制的 T_L , 尺寸很小, 宛若半导体收音机中的小输出变压器一样, 可以装在印刷板上, 在考虑体积和重量时, 它可以不必充作铁心的数目。

第1图中的结线图, 三个阻抗元件引入的电流与电压: a相的方向阻抗元件, $\frac{V_x}{V_{ra}}$, $V_x = V_{ra} - (I_a + K I_{a0}) Z_r$, V_{ra} 为保护安装处的a相电压。 V_x 与 V_{ra} 两个向量进行相位比较时, 相敏 90° 相位比较器要求的电压为: $\{ [V_{ra} - (I_a + K I_{a0})] + V_{ra} \}$ 和 $\{ [V_{ra} - (I_a + K I_{a0})] - V_{ra} \}$ C相的方向阻抗元件: $\frac{V_z}{V_{rc}}$, $V_z = V_{rc} - (I_c + K I_{c0}) Z_r$, V_{rc} 为保护安装处的c相电压, 相位比较器引入的电压为: $\{ [V_{rc} - (I_c + K I_{c0}) Z_r] + V_{rc} \}$ 和 $\{ [V_{rc} - (I_c + K I_{c0}) Z_r] - V_{rc} \}$ 双补偿阻抗元件 $\frac{jV_z}{V_x}$, $V_z = V_{rc} - (I_c + K I_{c0}) Z_r$, V_{rc} 为保护安装处的C相电压, 相位比较器引入的两个比较向量为:

$$j [V_{rc} - (I_c + K I_{c0}) Z_r] + [V_{ra} - (I_a + K I_{a0}) Z_r] \text{ 及 } j [V_{rc} - (I_c + K I_{c0}) Z_r] - [V_{ra} - (I_a + K I_{a0}) Z_r]$$

上边的 $K = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}}$, Z_{L0} , Z_{L1}

为线路的零序阻抗和正序阻抗。 Z_r 为补偿阻抗, 或称为模拟阻抗, 由图中的 T_x 通入电流构成, 第1图中的三个小自偶变压器, T_{HA} , T_{HB} , T_{HC} 有两种用途: ①用其三个二次线圈串联, 滤去零序电压。当保护安装处 $I_0 = 0$, 而电压互感器引来的电压中有另序电压时, 由此三个串联线圈把另序电压吃掉, ②三个小自偶变压器中的 T_{HA} , T_{HC} 同时作为三个阻抗元件: $\frac{V_z}{V_{ra}} \cdot \frac{V_z}{V_{rc}} \cdot \frac{jV_z}{V_x}$ 的整定用抽头变压器, 而且一二段和第三段皆共用其进行整定。B相的 T_{HB} 在结线图中无整定任务, 但在第1图中示出其具有第三段的整定端子, 原来设想它可与一个电抗互感器 T_x 构成一个阻抗园, 套在第三段的阻抗园外边, 作成振荡闭锁, 但未定。 T_{HA} , T_{HB} , T_{HC} , 三个小自偶变压器, 因为要求滤掉零序电压是必要的, T_{HA} 与 T_{HC} 对整定来说也是必要的, 因为一二三段的整定抽头很多, T_{HA1} , T_{HC1} 不能担当整定的任务, (其本身的线圈颇多, 都要抽头, 不胜其烦)。

T_{X0} , T_{HA} , T_{HB} , T_{HC} , T_{HA1} , T_{HC1} , T_{X1} , T_{XC1} , T_{HA3} , T_{HC3} , T_{XC3} , T_{XA3} , 皆用III₁₅铁心, 共计12个铁心。若振荡闭锁用大园套小园的方式, 只需再增加一个III₁₅铁心, 而断线闭锁采用III₈铁心构成(可不计)则此种结线方案只需要III₁₅铁心13个, 小接地系统距离有三段又考虑两点接地故障, 不经过很多切换接点, 而只用如此数目的铁心颇为可取。

以上算作结线图的简介, 及设计结线图的思路说明。

三、阻抗元件及结线原理

1. 双补偿阻抗元件 $\frac{jV_z}{V_x}$

(1) 输入量的推导

不论什么型式的短路故障, 设无过渡电阻金属性短路, 故障点的相电压为: (以a相为例)

$$V_{fa} = V_{ra} - I_a Z_L \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V_{fa} &= V_{ra} - I_{a1} Z_{L1} - I_{a2} Z_{L2} - I_{a0} Z_{L0}, \quad K = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}}, \quad Z_{L1} = Z_{L2} \\ &= V_{ra} - (I_a + K I_{a0}) Z_{L1} \end{aligned} \quad (2)$$

如果我们用电抗变压器, 作成补偿电压, 等于故障点的电压:

$$\begin{aligned} V_x &= V_{ra} - (I_a + K I_{a0}) Z_r = V_{x1} + V_{x2} + V_{x0} \\ V_y &= V_{rb} - (I_b + K I_{b0}) Z_r = a^2 V_{x1} + a V_{x2} + V_{x0} \\ V_z &= V_{rc} - (I_c + K I_{c0}) Z_r = a V_{x1} + a^2 V_{x2} + V_{x0} \end{aligned} \quad (3)$$

上式中 $Z_{L1} = Z_r$, $V_{x1} = V_{ra1} - I_{a1} Z_r$, $V_{x2} = V_{ra2} - I_{a2} Z_r$,

$$\begin{aligned} V_{x0} &= V_{r0} - I_{a0} Z_r, \quad K = n - 1, \quad n = \frac{Z_{L0}}{Z_{L1}}, \quad \text{即 } K = n - 1 = \frac{Z_{L0}}{Z_{L1}} - 1 = \\ &= \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}} \end{aligned}$$

(2) 双补偿阻抗元件 $\frac{jV_z}{V_x}$ 在两相短路故障时的阻抗特性方程, (a-b)(b-c)

(c-a) 三种情况

① b-c相短路 $\frac{jV_z}{V_x}$ 的特性方程。

以a相为参考则

$$\frac{jV_z}{V_x} = \frac{j(aV_{x1} + a^2V_{x2} + V_{x0})}{V_{x1} + V_{x2} + V_{x0}} = a \cdot \frac{j(V_{x1} + aV_{x2} + aV_{x0})}{V_{x1} + V_{x2} + V_{x0}} \quad (4)$$

化简后以 V_{x2} 除分母与分子得到:

$$\frac{jV_z}{V_x} = \frac{\frac{V_{x1}}{V_{x2}} + (a + a^2p)}{\frac{V_{x1}}{V_{x2}} + (1 + p)}, \quad e^{j210^\circ} \quad (15)$$

式中 $P = \frac{V_{x0}}{V_{x2}}$, 请参阅附录 II 的式 (II-3), 令 $W = \frac{V_{x1}}{V_{x2}}$, $A = -(a + a^2p)$,

$B = -(1 + p)$, $\beta = (90^\circ - \alpha) = 90^\circ - 210^\circ = \angle -120^\circ$, 将上边的各值代入附录 II 的 (II-3) 式得到,

根据第2图b-C相短路,以a相为参考的等价回路。

$$V_{a1} = E_a - I_{a1} Z_1 \quad V_{a1} = V_{a2} = I_{a1} Z_1 = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2}, \quad V_{a2} = -I_{a2} Z_2 = I_{a1} Z_2$$

上式中 $Z_1 = Z_{S1} + Z_{L1}$, $Z_2 = Z_{S2} + Z_{L2}$, V_{a1} , V_{a2} 表示故障点的正序和负序电压, $V_{X1} = V_{ra1} - I_{a1} Z_r = V_{a1} + I_{a1} Z_{L1} - I_{a1} Z_r = \frac{E_a (Z_{S2} + Z_{L2})}{Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{L1} + Z_{L2}}$

$$+ \frac{E_a (Z_{L1} - Z_r)}{Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{L1} + Z_{L2}} = \frac{E_a (Z_{L2} + 2Z_{L1} - Z_r)}{Z_{S1} + Z_{S2} + 2Z_L} \quad (8)$$

(式中 $Z_{L1} = Z_{L2}$)

$$V_{X2} = V_{ra2} - I_{a2} Z_r = \frac{E_a Z_{S2}}{Z_{S1} + Z_{S2} + 2Z_{L1}} + \frac{E_a Z_r}{Z_{S1} + Z_{S2} + 2Z_{L1}} = \frac{E_a (Z_{S2} + Z_r)}{Z_{S1} + Z_{S2} + 2Z_{L1}} \quad (9)$$

由(8)式与(9)式得到:

$$\frac{V_{X1}}{V_{X2}} = \frac{Z_{S2} + 2Z_{L1} - Z_r}{Z_{S2} + Z_r} \quad (10)$$

由式(10)与式(7)得到:

$$\frac{Z_{S2} + 2Z_{L1} - Z_r}{Z_{S2} + Z_r} = 1 \cdot \angle \theta \quad (11)$$

$$Z_{S2} + 2Z_{L1} - Z_r = (Z_{S2} + Z_r) \angle \theta$$

$$2Z_{L1} = (Z_r - Z_{S2}) + (Z_{S2} + Z_r) \angle \theta$$

$$\text{则 } Z_{L1} = \frac{Z_r - Z_{S2}}{2} + \frac{Z_r + Z_{S2}}{2} \angle \theta \quad (12) \text{ (正方向)}$$

上式即为阻抗园特性方程,可根据其绘出b-c相短路的阻抗园图,示于第3图。

b-c相短路反方向阻抗特性方程,只需把上式的 Z_r 符号变负号(设反方向的电源阻抗 Z_{S1} , Z_{S2} 不变)自式(12)得到

$$\text{反方向: } Z_{L1} = -\frac{Z_r + Z_{S2}}{2} + \frac{Z_{S2} - Z_r}{2} \angle \theta \quad (13)$$

②c-a相两相短路(正方向)

以b相为参考c-a相短路时的补偿电压:

$$V_{X1}^{(b)} = V_{r1} = V_{rb1} - I_{b1} Z_r = a^2 V_{ra1} - a^2 I_{a1} Z_r = a^2 (V_{ra1} - I_{a1} Z_r) = a^2 V_{X1} \quad (14)$$

$$V_{X2}^{(b)} = V_{r2} = V_{rb2} - I_{b2} Z_r = a V_{ra1} - a I_{a1} Z_r = a (V_{ra2} - I_{a2} Z_r) = a V_{X2} \quad (15)$$

$$V_{X0}^{(b)} = V_{r0} = V_{rb0} - I_{b0} Z_r = V_{ra0} - I_{a0} Z_r = V_{X0} \quad (16)$$

由上边的式(14)(15)(16)可以看出,当由b-c相相间短路变为c-a相相间短路时, V_{X1} 向导前方向转 240° , V_{X2} 向前转 120° , 而 V_{X0} 保持原来的相角不变, 因而以 $a^2 V_{X1}$, $a V_{X2}$, V_{X0} 代替式(4)中 V_{X1} , V_{X2} 和 V_{X0} 得到:

$$c-a \text{相短路时, } \frac{jV_z}{V_x} = \frac{j(V_{x1} + V_{x2} + V_{x0})}{a^2 V_{x1} + a V_{x2} + V_{x0}} \quad (17)$$

上式的分子分母皆乘以a:

$$\frac{jV_z}{V_x} = \frac{aj(V_{x1} + V_{x2} + V_{x0})}{V_{x1} + a^2 V_{x2} + V_{x0}} = \frac{V_{x1} + V_{x2} + V_{x0}}{V_{x1} + a^2 V_{x2} + a V_{x0}} \cdot e^{j210}$$

以 V_{x2} 除上式的分母与分子:

$$\frac{jV_z}{V_x} = \frac{\frac{V_{x1}}{V_{x2}} + 1 + \frac{V_{x0}}{V_{x2}}}{\frac{V_{x1}}{V_{x2}} + a^2 + a \frac{V_{x0}}{V_{x2}}} \cdot e^{j240} = \frac{\frac{V_{x1}}{V_{x2}} + (1 + P)}{\frac{V_{x1}}{V_{x2}} + (a^2 + aP)} \cdot e^{j210} \quad (18)$$

用上边同样的推导方法得到:

$$\frac{V_{x1}}{V_{x2}} = a^2 P + |1 - aP| \angle \theta \quad (19a)$$

但 $P = 0$, 代入上式得到

$$\frac{V_{x1}}{V_{x2}} = 1 \cdot \angle \theta \quad (19b)$$

当 $c-a$ 相短路, 以阻抗表示 $\frac{V_{x1}}{V_{x2}}$ 的式子:

$$\begin{aligned} V_{x1}^{(b)} = V_{y1} = V_{rb1} - I_{b1} Z_r &= V_{b1} + I_{b1} Z_{L1} - I_{b1} Z_r = \\ &= \frac{E_b (Z_{S2} + Z_{L2})}{Z_{S1} + Z_{S2} + 2 Z_{L1}} + \frac{E_b (Z_{L1} - Z_r)}{Z_{S1} + Z_{S2} + 2 Z_{L1}} = \frac{E_b (Z_{S2} + 2 Z_{L1} - Z_r)}{Z_{S1} + Z_{S2} + 2 Z_{L1}} \end{aligned} \quad (20)$$

$$V_{x2}^{(b)} = V_{y2} = V_{rb2} - I_{b2} Z_r = \frac{E_b (Z_{S2} + Z_r)}{Z_{S1} + Z_{S2} + 2 Z_{L1}} \quad (21)$$

$$\frac{V_{x1}^{(b)}}{V_{x2}^{(b)}} = \frac{E_b (Z_{S2} + 2 Z_{L1} - Z_r)}{E_b (Z_{S2} + Z_r)} = \frac{Z_{S2} + 2 Z_{L1} - Z_r}{Z_{S2} + Z_r} \quad (22)$$

(22) 式与 (10) 式相等, 即 $\frac{V_{x1}}{V_{x2}} = \frac{V_{x1}^{(b)}}{V_{x2}^{(b)}}$, 因而

$$\text{在 } c-a \text{ 相短路时 (正方向) } \frac{V_{x1}}{V_{x2}} = \frac{Z_{S2} + 2 Z_{L1} - Z_r}{Z_{S2} + Z_r} = 1 \cdot \angle \theta$$

$$\text{由之得到: } Z_{L1} = \frac{Z_r - Z_{S2}}{2} + \frac{Z_{S2} + Z_r}{2} \angle \theta \quad (23) \text{ 与式 (12) 同}$$

$c-a$ 相短路反方向, 把 Z_r 的符号变为:

$$Z_{L1} = -\frac{Z_r + Z_{S2}}{2} + \frac{Z_{S2} - Z_r}{2} \angle \theta \quad (24) \text{ 与式 (13) 同}$$

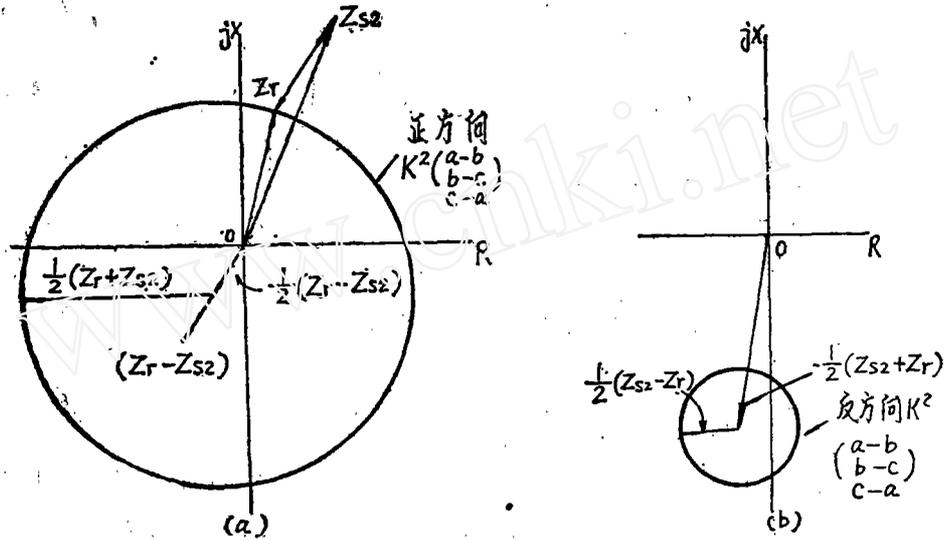
结果 $c-a$ 相相间短路的阻抗特性园图与 $b-c$ 相短路者完全相同。

③ $a-b$ 相相间短路 (正方向) 与反方向的阻抗特性方程可用上述的同样办法推导出:

$$\text{正方向: } Z_{L1} = \frac{Z_r - Z_{S2}}{2} + \frac{Z_{S2} + Z_r}{2} \angle \theta \quad (25)$$

$$\text{反方向: } Z_{L1} = -\frac{Z_r + Z_{S2}}{2} + \frac{Z_{S2} - Z_r}{2} \angle \theta \quad (26)$$

由以上的推证得知, a—b, b—c, c—a 三种两相短路其阻抗性园图, 正方向皆以 $Z_{L1} = \frac{Z_r - Z_{S2}}{2} + \frac{Z_{S2} + Z_r}{2} \angle \theta$ 表之, 而反方向皆以 $Z_{L1} = -\frac{Z_r + Z_{S2}}{2} + \frac{Z_{S2} - Z_r}{2} \angle \theta$ 表示, 兹绘制其阻抗特性园图如下:



第 3 图

$\frac{jV_z}{V_x}$ 继电器在两点接地故障而保护按装处 $I_0 = 0$ 时若滤掉零序电压, 则其动作与两相短路类同的说明。

设不接地系统如附录 I 的图 (I-1), a 相于 M 点接地, C 相于 N 点接地, 其电流电压分布, 如附录 I 图 (I-2) 所示。继电器装在 K 与 M 点之间, 将其抄绘示于第 4 图, 继电器在这种情况下 $I_0 = 0$, 则 $\dot{V}_z = \dot{J} [V_{rc} - (I_c + K I_{c0}) Z_r]$

$$= \dot{J} [V_{rc} - I_c Z_r], \quad V_x = V_{ra} - (I_a + K I_{a0}) Z_r = V_{ra} - I_a Z_r$$

此时 $\frac{jV_z}{V_x} = \frac{j(V_{rc} - I_c Z_r)}{V_{ra} - I_a Z_r}$, 当零序电压滤去以后, 继电器所看到的系统 K 侧电流的中性点, 自接地点 V 又恢复为点 0, 继电器安装处的电压 a 相为 V_{ra} , C 相为 V_{rc} , 而电流 I_a 和 I_c 并不受滤掉或不滤掉零序电压影响, 而由系统中的故障点位置决定。为简便起见把第 4 图的 L_x 视为零, 这与说明问题的实质并无不良影响, 自附录 I 摘抄下列算式, 作为绘制第 4 图的说明, 算式的编号按 ①②……编写:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0 \quad (1)$$

$$\dot{I}'_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 3 I_0 \quad (2)$$

$$\dot{i}'_A + \dot{i}'_B + \dot{i}'_C = 0 \quad (3)$$

$$U_{0v} = -\dot{E}_A + I_A Z_1 L \quad (4)$$

$$U_{0w} = -\dot{E}_C - \dot{i}'_C Z_1 L'' \quad (5)$$

$$\frac{U_{0v} - U_{0w}}{Z_0 L'} = I_0 \quad (6)$$

$$\dot{i}'_A = -\frac{U_{0v} - U_{0w}}{Z_0 L'} \cdot \frac{2L' + 3L''}{L + L' + L''} = -\frac{U_{0v} - U_{0w}}{Z_0 \cdot \Sigma L} \left(2 + 3 \frac{L''}{L'} \right) \quad (7)$$

$$\dot{i}'_C = \frac{U_{0v} - U_{0w}}{Z_0 L'} \cdot \frac{L' + 3L''}{L + L' + L''} = \frac{U_{0v} - U_{0w}}{Z_0 \cdot \Sigma L} \left(1 + 3 \frac{L''}{L'} \right) \quad (8)$$

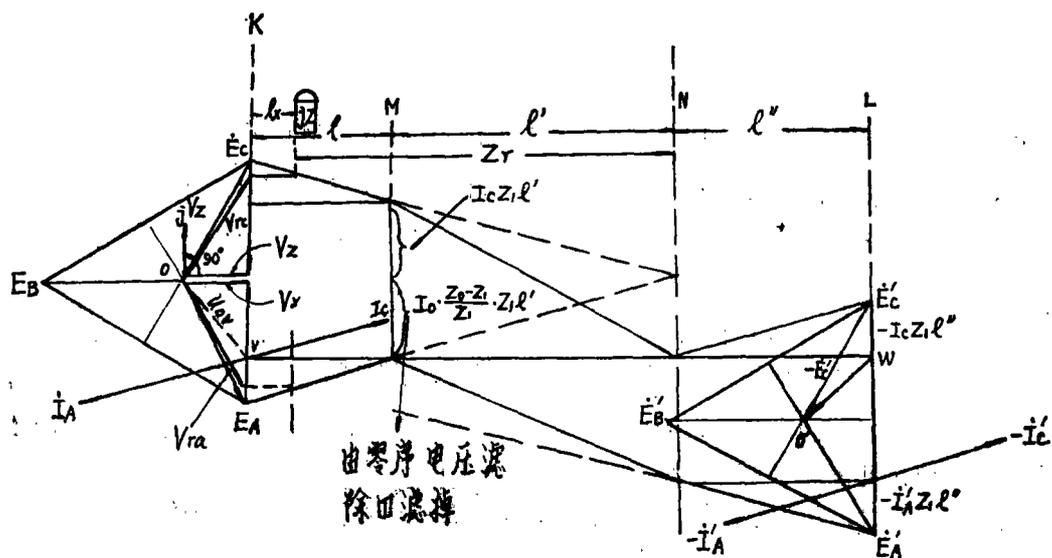
$$\dot{i}'_A = \frac{U_{0v} - U_{0w}}{Z_0 L'} \cdot \frac{L' + 3L''}{L + L' + L''} = \frac{U_{0v} - U_{0w}}{Z_0 \cdot \Sigma L} \left(1 + 3 \frac{L''}{L'} \right) \quad (9)$$

$$\dot{i}'_C = -\frac{U_{0v} - U_{0w}}{Z_0 L'} \cdot \frac{2L' + 3L''}{L + L' + L''} = -\frac{U_{0v} - U_{0w}}{Z_0 \Sigma L} \left(2 + 3 \frac{L''}{L'} \right) \quad (10)$$

$$\dot{i}'_B = \frac{U_{0v} - U_{0w}}{Z_0 L'} \cdot \frac{L'}{L + L' + L''} = \frac{U_{0v} - U_{0w}}{Z_0 \Sigma L} \quad (11)$$

$$U_{0v} - U_{0w} = \frac{\dot{E}_C - \dot{E}_A}{1 + \frac{2Z_1 [L'(L + L'') + 3LL'']}{Z_0 L' (L + L' + L'')}} \quad (12)$$

上边式中 $\Sigma L = L + L' + L''$ 表示线路的长度, Z_1 为线路单位长度的正序阻抗。第 4 图是根据上述算式画的, 但是为了说明滤掉另序电压 U_{0v} 后继电器 $\frac{jV_z}{V_x}$ 的动作, 而突出了要说明的部分, 略去一些不必要的部份。



第 4 图 电流电压分布示意图

设补偿阻抗 $Z_r = (L + L') Z_1$, N点为保护区末端, $Z_r = (L + L' + L'') \cdot 0.8 Z_1 = 0.8 (\Sigma L) Z_1$, $L'' = 0.2 (\Sigma L) \cdot Z_1$ 概线路长度 ΣL 为定值不变, 其整定阻抗 Z_r 当然也为定值不变。令 Z_r 的末端 N 点 C 相接地, 此点不变, 而变换另一接地点 M 的位置, 求出在各位置时的 \dot{I}_c 与 \dot{I}_A , 及其时的 jV_z 与 V_x , 绘出引到 $\frac{jV_z}{V_x}$ 继电器的向量, 观查是否与两相短路的情况类似。

① a 相的接地点 M 移到 N 点与之重合, 即成为两相短路接地, (在不接地系统, 一个接地点不起作增加短路电流的作用, 即成为两相短路)

此时的 \dot{I}_A 与 \dot{I}_c 计算如下:

由式 (7) 与 (12):

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= -\frac{U_{0V} - U_{0W}}{Z_0 L'} \cdot \frac{2L' + 3L''}{\Sigma L} \\ &= \frac{\dot{E}_c - \dot{E}_a}{1 + \frac{2Z_1}{Z_0 L'} \left[\frac{(L + L'')L' + 3LL''}{\Sigma L} \right]} \cdot \left(-\frac{1}{Z_0 L'} \right) \\ \frac{2L' + 3L''}{\Sigma L} &= -\frac{(\dot{E}_c - \dot{E}_a)(2L' + 3L'')}{Z_0 L' \cdot \Sigma L + 2Z_1 [(L + L'')L' + 3LL'']} \quad (13) \end{aligned}$$

令 $L' = 0$, 而同时 L 增加到 $0.8 \Sigma L$, 概 $(L' + L) = 0.8 \Sigma L$, 而 $0.8 \Sigma L$ 保持不变, 则式 (13) 变为:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= -\frac{(\dot{E}_c - \dot{E}_a) 3L''}{(2Z_1)(3LL'')} = -\frac{(\dot{E}_c - \dot{E}_a)}{2Z_1 L} = -\frac{\dot{E}_c - \dot{E}_a}{2Z_1 (0.8 \Sigma L)} \\ &= -\frac{\dot{E}_c - \dot{E}_a}{1.6 Z_1 \Sigma L} \quad (14) \end{aligned}$$

此时的 \dot{I}_c 为:

$$\begin{aligned} \dot{I}_c &= \frac{U_{0V} - U_{0W}}{Z_0 L'} \cdot \frac{L' + 3L''}{\Sigma L} \\ &= \frac{(\dot{E}_c - \dot{E}_a)(L' + 3L'')}{Z_0 L' \Sigma L + 2Z_1 [(L + L'')L' + 3LL'']} \quad (15) \end{aligned}$$

把 $L' = 0$, $L = 0.8 \Sigma L$ 代入上式:

$$\dot{I}_c = \frac{(\dot{E}_c - \dot{E}_a)(3L'')}{(2Z_1)(3LL'')} = \frac{\dot{E}_c - \dot{E}_a}{2Z_1 (0.8 \Sigma L)} = \frac{\dot{E}_c - \dot{E}_a}{1.6 Z_1 \Sigma L} \quad (16)$$

$$\text{即 } I_A = -\frac{0.56(\dot{E}_c - \dot{E}_a)}{Z_1 \Sigma L} \quad (17)$$

$$\dot{I}_c = \frac{0.56(\dot{E}_c - \dot{E}_a)}{Z_1 \Sigma L} \quad (18)$$

$jV_z = j(V_{rc} - \dot{I}_c Z_r)$, $V_x = V_{ra} - \dot{I}_A Z_r$, 如第 4 图所示,

\dot{V}_z 与 V_x 正好为 90° 相位差, 进入 90° 相位比较器的动作边缘。

②令接地点M点靠近保护安装点, 接地点N仍保持原来位置不变, 即 $L \approx 0$, $L \approx 0.8 \Sigma L$, $L'' = 0.2 \Sigma L$ (这是M点远离N点的极限位置, 这种情况如果能满足要求, 则在靠近N点的位置自然更会满足要求。)此时的 \dot{I}_A 与 \dot{I}_C 仍利用式(13)与式(15)计算:

$$L \approx 0, L' = 0.8 \Sigma L, L'' = 0.2 \Sigma L$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= - \frac{(\dot{E}_C - \dot{E}_A)(2L' + 3L'')}{Z_0 L' \Sigma L + 2Z_1 [(L + L'')L' + 3LL'']} \\ &= - \frac{(\dot{E}_C - \dot{E}_A)(2L' + 3L'')}{Z_0 L' \Sigma L + 2Z_1 \cdot L' L''} \\ &= - \frac{(\dot{E}_C - \dot{E}_A)(2 \times 0.8 + 0.6) \Sigma L}{Z_0 (0.8) (\Sigma L)^2 + 2Z_1 (0.16) (\Sigma L)^2} \\ &= - \frac{2.2(\dot{E}_C - \dot{E}_A)}{0.8Z_0 \Sigma L + 0.32Z_1 \Sigma L} = - \frac{2.2(\dot{E}_C - \dot{E}_A)}{Z_1 \Sigma L \left[0.8 \frac{Z_0}{Z_1} + 0.32 \right]} \\ &= - \frac{(\dot{E}_C - \dot{E}_A)}{Z_1 \Sigma L \left[0.363 \frac{Z_0}{Z_1} + 0.145 \right]} \end{aligned}$$

当 $Z_0 = 3.5Z_1$, 代入上式则:

$$\dot{I}_A = - \frac{\dot{E}_C - \dot{E}_A}{Z_1 \Sigma L (0.363 \times 3.5 + 0.145)} = - \frac{0.688(\dot{E}_C - \dot{E}_A)}{Z_1 \Sigma L} \quad (19)$$

$L \approx 0$, $L' = 0.8 \Sigma L$, $L'' = 0.2 \Sigma L$ 时的C相电流:

$$\begin{aligned} I_C &= \frac{(\dot{E}_C - \dot{E}_A)(L' + 3L'')}{Z_0 L' \Sigma L + 2Z_1 [(L + L'')L' + 3LL'']} \\ &= \frac{(\dot{E}_C - \dot{E}_A)(L' + 3L'')}{Z_0 L' \Sigma L + 2Z_1 (L' L'')} \\ &= \frac{(\dot{E}_C - \dot{E}_A)(0.8 \Sigma L + 3 \times 0.2 \Sigma L)}{Z_0 (0.8 \Sigma L) \Sigma L + 2Z_1 (0.8 \Sigma L)(0.2 \Sigma L)} \\ &= \frac{1.4(\dot{E}_C - \dot{E}_A) \Sigma L}{Z_1 (\Sigma L)^2 \left[0.8 \frac{Z_0}{Z_1} + 0.32 \right]} \end{aligned}$$

$Z_0 = 3.5Z_1$ 代入上式

$$\begin{aligned} I_C &= \frac{1.4(\dot{E}_C - \dot{E}_A)}{Z_1 \Sigma L [0.8 \times 3.5 + 0.32]} \\ &= \frac{(\dot{E}_C - \dot{E}_A)}{Z_1 \Sigma L \times 2.23} = \frac{0.45(\dot{E}_C - \dot{E}_A)}{Z_1 \Sigma L} \quad (20) \end{aligned}$$

我们希望(19)式等于(17)式; (20)式等于(18)式, 但是并不相等, 不等相差多少呢? 这种差别说明什么问题呢?

以下对两种情况的差别进行分析:

两相短路时, 即 $L' = 0$, $L = 0.8 \Sigma L$, $L'' = 0.2 \Sigma L$ 时,

$$\dot{I}_A = - \frac{0.56 (\dot{E}_C - \dot{E}_A)}{Z_1 \Sigma L}$$

而在 $L \approx 0$, $L' = 0.8 \Sigma L$, $L'' = 0.2 \Sigma L$ 时

$$\dot{I}_A = - \frac{0.688 (\dot{E}_C - \dot{E}_A)}{Z_1 \Sigma L}$$

二者比较, 相位相同, 而绝对值后者比前者增加 $(0.688 - 0.56) = 0.128$

即在 $L \approx 0$ 时, $I_A Z_1$ 过补偿 0.128

再分析 I_0 的情况: 在 $L' = 0$, $L = 0.8 \Sigma L$, $L'' = 0.2 \Sigma L$ 时

$$I_0 = \frac{0.56 (\dot{E}_C - \dot{E}_A)}{Z_1 \Sigma L}$$

而在 $L \approx 0$, $L' = 0.8 \Sigma L$, $L'' = 0.2 \Sigma L$ 时:

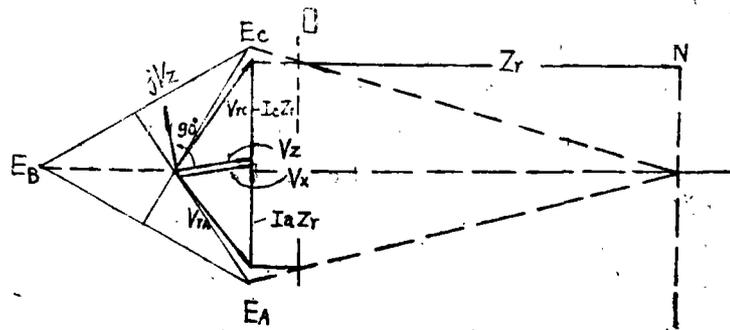
$$I_0 = \frac{0.45 (\dot{E}_C - \dot{E}_A)}{Z_1 \Sigma L}$$

二者相比较, 相位相同, 而绝对值比前者减少。 $(0.56 - 0.45) = 0.11$

即 $L \approx 0$ 时, $I_0 Z_1$ 欠补偿 0.11

由于 $0.128 \approx 0.11$

其电压分布图如第 5 图所示, $\frac{j V_z}{V_x}$ 的相角差正好等 90° , 进入相敏 90° 相位比较器的动作边缘, 虽然不是真的两相短路, $\frac{j V_z}{V_x}$ 继电器的动作确像两相短路, 故前边称之为类同。



第 5 图

其他相别两点接地而 $I_0 = 0$, 都会得出上述结果, $\frac{j V_z}{V_x}$ 继电器滤掉零序电压

后,继电器动作特性与两相短路类同。上述的推论并不十分严谨,但还能说明问题。

在第1图的结线中 $\frac{jV_z}{V_x}$ 的出口没有 I_0 的否回路,由于在 $I_0 \neq 0$ 时的两点接地故障,

使 $\frac{jV_z}{V_x}$ 继电器不起作用,以免误动作。

总结上边关于 $\frac{jV_z}{V_x}$ 继电器的分析,其可以正确的切除两相短路(a-b, b-c, c-a)故障,同样也能正确切除两点接地($I_0 = 0$ 时)故障,对于三相短路和振荡不动作。

2. 方向阻抗元件

第1图的结线图中a相接入一个方向阻抗元件 $\frac{V_x}{V_{ra}}$, C相接入另一个方向阻抗元件 $\frac{V_z}{V_{rc}}$ 。它们两个担负两点接地和三相短路故障的切除。方向阻抗元件也是用相位比较原理构成的,以下仅讨论C相的方向阻抗元件 $\frac{V_z}{V_{rc}}$,另一相的 $\frac{V_x}{V_{ra}}$ 原理与之相同,

就不必重复。

(I) 三相短路故障时, $\frac{V_z}{V_{rc}}$ 的特性方程。

$$\frac{V_z}{V_{rc}} = \frac{V_{rc} - (I_c + K I_0) Z_r}{V_{rc}} = \frac{V_{rc}}{I_c + K I_0} - Z_r \quad (27)$$

上式与(II-3)式比较则知: $A = Z_r$, $B = 0$, $\alpha = 0$, $\beta = \beta_c - \alpha = 90^\circ - 0^\circ$

$$W = \frac{V_{rc}}{I_c + K I_0}$$

将上边的各量代入附录II的式(II-3)得到:

$$W = B + \frac{A-B}{2} \text{COSEC} \beta \angle 90^\circ - \beta + \frac{A-B}{2} \text{COSEC} \beta \angle \theta$$

$$\frac{V_{rc}}{I_c + K I_0} = 0 + \frac{Z_r - 0}{2} \text{COSEC} 90^\circ \angle 0^\circ + \frac{Z_r - 0}{2} \text{COSEC} 90^\circ \angle \theta$$

$$\text{则 } \frac{V_{rc}}{I_c + K I_0} = \frac{Z_r}{2} + \frac{Z_r}{2} \angle \theta \quad (28)$$

三相短路时 $I_0 = 0$, $V_{rc} = I_c Z_{L1}$ 则 $\frac{V_{rc}}{I_c + K I_0} = \frac{V_{rc}}{I_c} = Z_{L1}$

故(28)式变为:

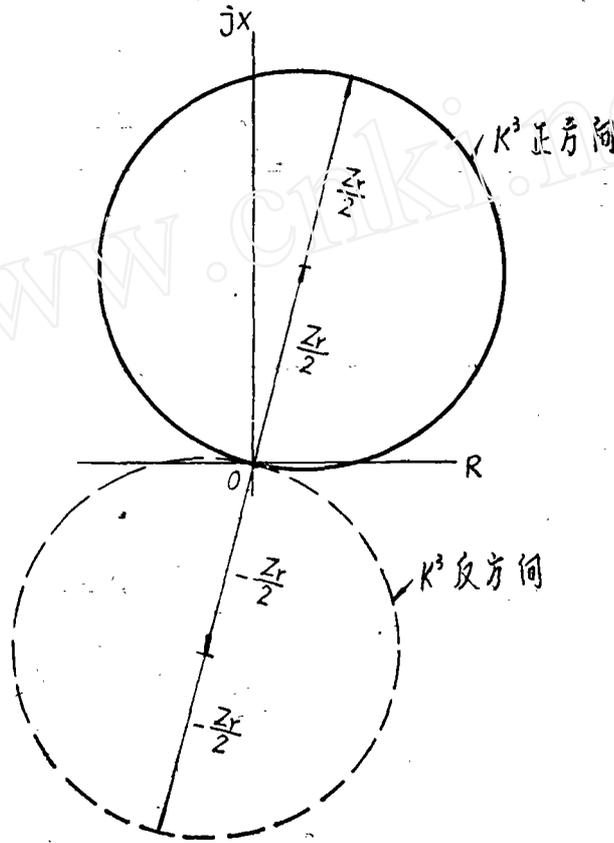
$$Z_{L1} = \frac{Z_r}{2} + \frac{Z_r}{2} \angle \theta \quad (29)$$

上式即为 $\frac{V_z}{V_{rc}}$ 方向阻抗元件,正方向的特性方程。反方向的特性方程只要把式(29)中的 Z_r 变负号即得:

$$\text{反方向特性方程: } Z_{L1} = -\frac{Z_r}{2} - \frac{Z_r}{2} \angle \theta \quad (30)$$

根据式(29)和式(30)两特性方程式,可以绘出阻抗特性园图,正方向者用实线,反方向者用虚线画的。

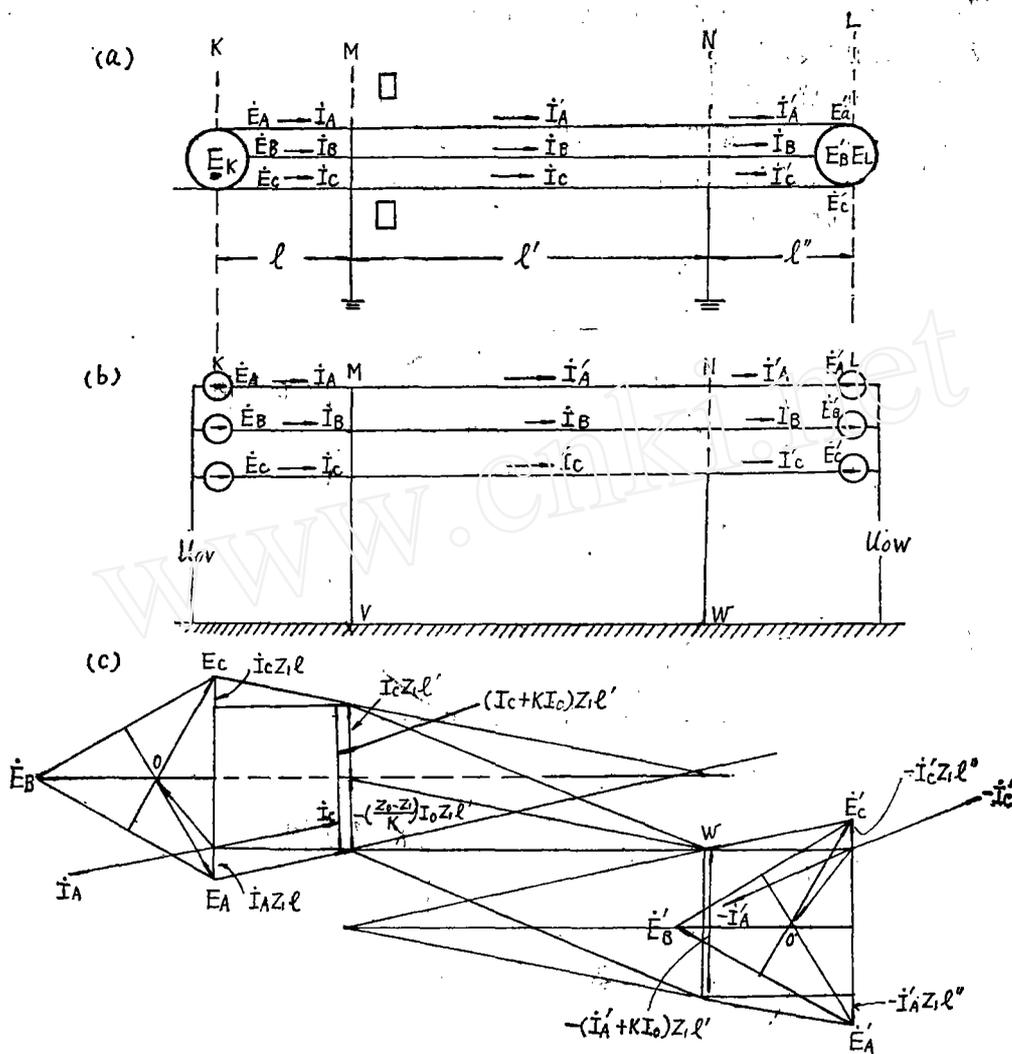
这种以短路阻抗为变数的在阻抗平面上的特性园图,与系统阻抗有关,并以短路方向为参考向量,即正方向短路,计算时以之为参考向量,而计算反方向短路时又以反方向作为参考向量,故在阻抗平面上,正方向短路阻抗画在阻抗平面上的第1象限内,反方向短路阻抗也同样在第一象限中。



第 6 图

而决定继电器动作正方向或反方向,只根据补偿阻抗的极性。正方向 Z_r 前取正号,反方向 Z_r 前取负号。继电器接线已定,极性似乎是不变的,这里指的极性是补偿电压的补偿方向。上图的反方向阻抗园图用虚线画出,不经过第1象限,故有方向性。

(2) 两点接地故障时 $\frac{V_z}{V_{rc}}$ 与 $\frac{V_x}{V_{ra}}$ 两方向阻抗元件的动作行为,设如下图的不接地系统于M点a相接地,于N点c相接地。



第 7 图

上图靠近M点处a相装方向阻抗元件 $\frac{V_z}{V_{ra}}$, c相装 $\frac{V_z}{V_{rc}}$ 。

① c相 $\frac{V_z}{V_{rc}}$ 继电器, 靠近M点, $I_0 \neq 0$ 的特性。

第7图MN线段的C相电压 V_{rc} , 用对称分量推导比较简便。设N点的电压以对称分量表之为 U_{N1} 、 U_{N2} 、 U_{N0} (a相为参考)。则M点的电压以对称分量表示为:

$$U_{M1} = iMN_1 Z_{1L}' + U_{N1} \quad (31)$$

$$U_{M2} = iMN_2 Z_{2L}' + U_{N2} \quad (32)$$

$$U_{M0} = iMN_0 Z_{0L}' + U_{N0} \quad (33)$$

M点的c相电压: $U_{Mc} = aU_{M1} + a^2U_{M2} + U_{M0}$

$$aU_{M1} = a i_{MN1} \cdot Z_1 L' + U_{N1}$$

$$a^2 U_{M2} = a^2 i_{MN2} \cdot Z_2 L' + a^2 U_{N2}$$

$$U_{M0} = i_{MN0} Z_0 L' + U_{N0}$$

$$\begin{aligned} \text{则: } U_{M0} &= aU_{M1} + a^2 U_{M2} + U_{M0} = a i_{MN1} Z_1 L' + a U_{N1} \\ &\quad + a^2 i_{MN2} Z_2 L' + a^2 U_{N2} \\ &\quad + i_{MN0} Z_0 L' + U_{N0} \\ &= i_{MN0} Z_1 L' + i_{MN0} (Z_0 L' - Z_1 L') + 0 \end{aligned}$$

$$\text{则 } U_{MNC} = U_{rc} = \left[i_c + i_{MN0} \frac{Z_0 L' - Z_1 L'}{Z_1 L'} \right] Z_1 L'$$

参阅第7图(c)之电压分布

$$K = \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1}, i_{MN0} = I_0 \quad \text{则 } U_{rc} = (I_c + KI_0) Z_1 L' \quad (34)$$

$$\begin{aligned} V_z \text{ 为故障的电压, 则 } V_z &= U_{rc} - (I_c + KI_0) Z_r \\ &= U_{rc} - (I_{MNC} + KI_{MN0}) Z_r \quad (35) \end{aligned}$$

$$\frac{V_z}{V_{rc}} = \frac{V_{rc} - (I_{MN0} + KI_{MN0}) Z_r}{V_{rc}} \quad (36)$$

以 $(I_{MNC} + KI_{MN0})$ 除上式的分子与分母,

$$\frac{V_z}{V_{rc}} = \frac{\frac{V_{rc}}{(I_{MNC} + KI_{MN0})} - Z_r}{\frac{V_{rc}}{(I_{MNC} + KI_{MN0})} - 0}$$

$$\text{而 } \frac{V_{rc}}{(I_{MNC} + KI_{MN0})} = Z_1 L' = Z_{L1}$$

其阻抗特性方程可用述的同样方法得到:

$$\text{正方向: } Z_{L1} = \frac{Z_r}{2} + \frac{Z_r}{2} \angle \theta \quad (37)$$

$$\text{反方向: } Z_{L1} = -\frac{Z_r}{2} - \frac{Z_r}{2} \angle \theta \quad (38)$$

绘出阻抗园图如第6图者一样。

② a 相的继电器 $\frac{V_x}{V_{ra}}$, 因为极性相反不动作。

③ $\frac{V_z}{V_{rc}}$ 与 $\frac{V_x}{V_{ra}}$ 继电器的极性和接线方法。

相敏 90° 相位比较器, 比较相位的两电压必需在下图的角度范围内始动作,

$$-90^\circ < \beta < +90^\circ.$$

由上表的分析, 为 $\frac{2}{3}$ 的机会切除一个接地故障点。表中的电流方向, 可视为向故障点流。

⑤当两点接地故障而 $I_0 = 0$ 时, $\frac{V_x}{V_{ra}}$ 与 $\frac{V_z}{V_{rc}}$ 两元件的动作行为, 在这种情况下, 零序电压已被滤掉。 $\frac{V_x}{V_{ra}}$ 与 $\frac{V_z}{V_{rc}}$ 所看到故障宛若相间短路, 而继电器得到 V_{ra} 与 V_{rc} 为相电压, (中性点并未移动到地电位), 而补偿电压与故障相间电压同相位, 例如a、b相故障, 则补偿电压与 $\dot{E}_a - \dot{E}_b = \dot{E}_{ab}$ 相位相同, 与a相继电器的 V_{ra} 并不同相, 故 $\frac{V_x}{V_{ra}}$ 不会动作, $\frac{V_z}{V_{rc}}$ 同理也不会动作。

三、第二与第三段阻抗保护的实现方式

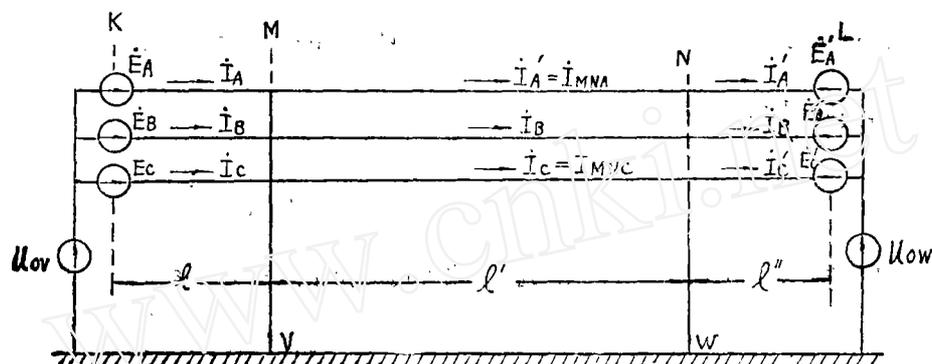
如第1图所示, 第二段的实现用切换方式(t_2 切换接点变更 T_{HA} 与 T_{HC} 的线圈抽头), 这种方式是我国广泛采用的。第三段保护也是用 $\frac{V_x}{V_{ra}}$, $\frac{V_z}{V_{rc}}$ 及 $\frac{JV_z}{V_{rc}}$ 构成的, 其整定小变压器与零序电压滤掉是和第一段共用 T_{HA} 、 T_{HB} 、 T_{HC} , 这样增加第三段阻抗保护只需要增加4个III₁₅铁心。

四、结 语

1. 通过详细的分析这个结线方案在技术原理方面是正确的。
2. 这个结线方案的主要优点, 已把切换继电器搞掉, 即可适用于整流型也适用于晶体管型保护。
3. 结线方案中由于充分的综合使用小变压器与电抗变压器的线圈, 铁心用的数目比较少, 回路简洁, 易于达到造价低, 性能好, 调试方便, 运行可靠的目标。
4. 最后根据此方案作出来的保护装置的质量水平, 及性能指标水平, 那是下一步要着手解决的问题。

附录 I 两点接地故障算式的推导及电流电压分布图的绘制

如下图的不接地系统于M点a相接地，于N点c相接地，接地点设过渡电阻等于另，并设另序阻抗的阻抗角与正序阻抗者同。两点接地故障发生后系统两侧电源的中性点皆位移到地的电位，宛若系统左侧电源加零序电压 U_{0v} ，右侧电源加另一零序电压 U_{0w} 。



第 I--1 图

根据上图可列出下列方程式：

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0 \quad (1-1)$$

$$\dot{I}'_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = -3I_0 \quad (1-2)$$

$$\dot{I}'_A + \dot{I}_B + \dot{I}'_C = 0 \quad (1-3)$$

$$U_{0v} = -\dot{E}_A + \dot{I}_A Z_1 L \quad (1-4)$$

$$U_{0w} = -\dot{E}_C - \dot{I}'_C Z_1 L'' \quad (1-5)$$

$$U_{0v} - U_{0w} = \dot{I}_A Z_1 L + (\dot{I}_B + \dot{I}_C) Z_M L' + \dot{I}'_A Z_e L'' + \dot{I}'_A Z_1 L'' \quad (1-6)$$

$$U_{0v} - U_{0w} = \dot{I}_B Z_1 L + (\dot{I}_C + \dot{I}'_A) Z_M L' + \dot{I}_B Z_e L'' + \dot{I}_B Z_1 L'' \quad (1-7)$$

$$U_{0v} - U_{0w} = \dot{I}_C Z_1 L + (\dot{I}'_A + \dot{I}_B) Z_M L' + \dot{I}_C Z_e L'' + \dot{I}'_C Z_1 L'' \quad (1-8)$$

$$3(U_{0v} - U_{0w}) = (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) Z_1 L + 2(\dot{I}'_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) Z_M L' + (\dot{I}'_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) Z_e L'' + (\dot{I}'_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) Z_1 L'' - (\dot{I}'_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) \{2Z_M + Z_e\} L'$$

$$\text{但 } \dot{I}'_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 3I_0, \quad Z_0 = Z_e + 2Z_M$$

$$\text{故 } 3(U_{0v} - U_{0w}) = 3I_0 \cdot Z_0 \cdot L'$$

$$\text{即 } U_{0v} - U_{0w} = I_0 \cdot Z_0 \cdot L' \quad (1-9)$$

\dot{I}_A 式的推导，利用上边的式(II-6)(II-1)(II-2)(II-3)的关系，以下逐步推导：

自式(II-6):

$$\begin{aligned}
 U_{0v} - U_{0w} &= \dot{I}_A Z_1 L + (\dot{I}_F + \dot{I}_c) Z_M L' + \dot{I}'_A Z_e L + \dot{I}'_A Z_1 L'' \\
 &= \dot{I}_A Z_1 L - \dot{I}_A Z_M L' + (3 \dot{I}_0 + \dot{I}_A) (Z_e L' + Z_1 L'') \\
 &= \dot{I}_A Z_1 L - \dot{I}_A Z_M L' + 3 \dot{I}_0 (Z_e L' + Z_1 L'') + \dot{I}_A Z_e L' + \dot{I}_A Z_1 L'' \\
 &= \dot{I}_A Z_1 L + \dot{I}_A Z_1 L'' + \dot{I}_A L' (Z_e - Z_M) + 3 \dot{I}_0 (Z_0 L' + Z_1 L'') \\
 &= \dot{I}_A (L + L' + L'') Z_1 + \frac{3 (U_{0v} - U_{0w})}{Z_0 L'} (Z_e L' + Z_1 L'') \\
 (U_{0v} - U_{0w}) - \frac{3 (U_{0v} - U_{0w})}{Z_0 L'} (Z_e L' + Z_1 L'') - \dot{I}_A (L + L' + L'') Z_1 \\
 \frac{Z_0 L' (U_{0v} - U_{0w}) - 3 (U_{0v} - U_{0w}) (Z_e L' + Z_1 L'')}{Z_0 L'} &= \dot{I}_A (L + L' + L'') Z_1 \\
 \dot{I}_A (L + L' + L'') Z_1 &= - \frac{(U_{0v} - U_{0w}) 2 Z_1 L' + 3 (U_{0v} - U_{0w}) Z_1 L''}{Z_0 L'} \\
 &= - \frac{(U_{0v} - U_{0w}) \{ 2 Z_1 L' + 3 Z_1 L'' \}}{Z_0 L'} \\
 \dot{I}_A &= - \frac{(U_{0v} - U_{0w}) \cdot (2 L' + 3 L'') Z_1}{Z_0 L' (L + L' + L'')}
 \end{aligned}$$

令 $\Sigma L = L + L' + L''$ 则:

$$\dot{I}_A = - \frac{U_{0v} - U_{0w}}{Z_0 L'} \cdot \frac{2 L' + 3 L''}{(L + L' + L'')} = - \frac{U_{0v} - U_{0w}}{Z_0 \Sigma L} \left(2 + \frac{3 L''}{L'} \right) \quad (1-10)$$

\dot{I}_c 的公式的推导:

取式(1-8):

$$\begin{aligned}
 U_{0v} - U_{0w} &= \dot{I}_c Z_1 L + \dot{I}_c Z_e L' + (\dot{I}_B + \dot{I}_A) Z_M L' + \dot{I}_c Z_1 L'' \\
 &= \dot{I}_c Z_1 L + \dot{I}_c Z_e L' + (3 \dot{I}_0 - \dot{I}_c) Z_M L' - (3 \dot{I}_0 - \dot{I}_c) Z_1 L''
 \end{aligned}$$

式中 $Z_1 = (Z_e - Z_M)$, $= \dot{I}_c Z_1 L + \dot{I}_c L' (Z_e - Z_M) + 3 \dot{I}_0 (Z_M L' - Z_1 L'')$

$$\begin{aligned}
 Z_M &= \frac{Z_0 - Z_1}{3} = \dot{I}_c Z_1 (L + L' + L'') + \frac{3 (U_{0v} - U_{0w})}{Z_0 L'} \left\{ \left(\frac{Z_0 - Z_1}{3} \right) - L' - Z_1 L'' \right\} \\
 &= \dot{I}_c Z_1 (L + L' + L'') + \frac{3 (U_{0v} - U_{0w})}{Z_0 L'} \left(\frac{Z_0 L'}{3} - \frac{Z_1 L'}{3} - Z_1 L'' \right) \\
 &= \dot{I}_c Z_1 (L + L' + L'') + (U_{0v} - U_{0w}) - \frac{(U_{0v} - U_{0w})}{Z_0 L'} Z_1 L' - 3 \frac{(U_{0v} - U_{0w})}{Z_0 L'} Z_1 L''
 \end{aligned}$$

移项后得到:

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_c (L + L' + L'') &= \frac{U_{0v} - U_{0w}}{Z_0 L'} (Z_1 L' + 3 Z_1 L'') \\
 \dot{I}_c &= \frac{U_{0v} - U_{0w}}{Z_0 L'} \cdot \frac{Z_1 (L' + 3 L'')}{Z_1 (L + L' + L'')} \\
 &= \frac{(U_{0v} - U_{0w})}{Z_0 L'} \cdot \frac{(L' + 3 L'')}{(L + L' + L'')} \quad (1-11)
 \end{aligned}$$

$$\text{或 } \dot{I}_c = \frac{U_{0v} - U_{0w}}{Z_0 \Sigma L} \left(1 + \frac{3 L''}{L'} \right) \quad (1-12)$$

\dot{i}'_A 的公式推导

自式(1-3)知: $\dot{i}'_A = 3\dot{i}_0 - (\dot{i}_B + \dot{i}_C)$

式中 $\dot{i}_B = \frac{U_{0V} - U_{0W}}{Z_0 L'} \left(\frac{L'}{\Sigma L} \right)$

$$\begin{aligned} \dot{i}'_A &= 3 \frac{U_{0V} - U_{0W}}{Z_0 L'} - \frac{U_{0V} - U_{0W}}{Z_0 L'} \left\{ \frac{L'}{\Sigma L} + \frac{L' + 3L''}{\Sigma L} \right\} \\ &= 3 \frac{(U_{0V} - U_{0W})}{Z_0 L'} - \frac{U_{0V} - U_{0W}}{Z_0 L'} \left(\frac{2L' + 3L''}{\Sigma L} \right) \\ &= \frac{U_{0V} - U_{0W}}{Z_0 L'} \left\{ 3 - \frac{2L' + 3L''}{\Sigma L} \right\} = \frac{U_{0V} - U_{0W}}{Z_0 L'} \left\{ \frac{3L + 3L' + 3L'' - 3L'' - 2L'}{\Sigma L} \right\} \\ &= \frac{U_{0V} - U_{0W}}{Z_0 L'} \left\{ \frac{L' + 3L}{\Sigma L} \right\} \quad (1-13) \end{aligned}$$

或 $\dot{i}'_A = \frac{U_{0V} - U_{0W}}{Z_0 \Sigma L} \left\{ 1 + \frac{3L}{L'} \right\} \quad (1-14)$

\dot{i}_B 的推导

$$\begin{aligned} \dot{i}_B &= -(\dot{i}'_A + \dot{i}_C) = - \left\{ - \frac{U_{0V} - U_{0W}}{Z_0 L'} \left(\frac{2L' + 3L''}{\Sigma L} \right) + \frac{U_{0V} - U_{0W}}{Z_0 L'} \left(\frac{L' + 3L''}{\Sigma L} \right) \right\} \\ &= \frac{U_{0V} - U_{0W}}{Z_0 L'} \left\{ \frac{2L' + 3L''}{\Sigma L} - \frac{L' + 3L''}{\Sigma L} \right\} \end{aligned}$$

$$\dot{i}_B = \frac{U_{0V} - U_{0W}}{Z_0 L'} \left(\frac{L' + 0}{\Sigma L} \right) = \frac{U_{0V} - U_{0W}}{Z_0 L'} \left(\frac{L'}{\Sigma L} \right) \quad (1-15)$$

或 $\dot{i}_B = \frac{U_{0V} - U_{0W}}{Z_0 \Sigma L} \quad (1-16)$

\dot{i}'_C 的推导

自式(1-3): $\dot{i}'_C = -(\dot{i}'_A + \dot{i}_B)$

$$\begin{aligned} \dot{i}'_C &= - \left\{ \frac{U_{0V} - U_{0W}}{Z_0 L'} \left(\frac{L' + 3L}{\Sigma L} \right) + \frac{U_{0V} - U_{0W}}{Z_0 L'} \left(\frac{L'}{\Sigma L} \right) \right\} \\ &= - \frac{U_{0V} - U_{0W}}{Z_0 L'} \left(\frac{2L' + 3L}{\Sigma L} \right) \quad (1-16) \end{aligned}$$

或 $\dot{i}'_C = - \frac{U_{0V} - U_{0W}}{Z_0 \Sigma L} \left(2 + 3 \frac{L}{L'} \right) \quad (1-17)$

$(U_{0V} - U_{0W})$ 的推导

$$U_{0V} = -\dot{E}_A + \dot{I}_A Z_1 L, \quad U_{0W} = -\dot{E}_C - \dot{I}'_C Z_1 L''$$

$$\text{故 } (U_{0V} - U_{0W}) = (\dot{E}_C - \dot{E}_A) + \dot{I}_A Z_1 L + \dot{I}'_C Z_1 L''$$

$$= (\dot{E}_C - \dot{E}_A) - \frac{U_{0V} - U_{0W}}{Z_0 L'} \left(\frac{2L' + 3L''}{\Sigma L} \right) Z_1 L$$

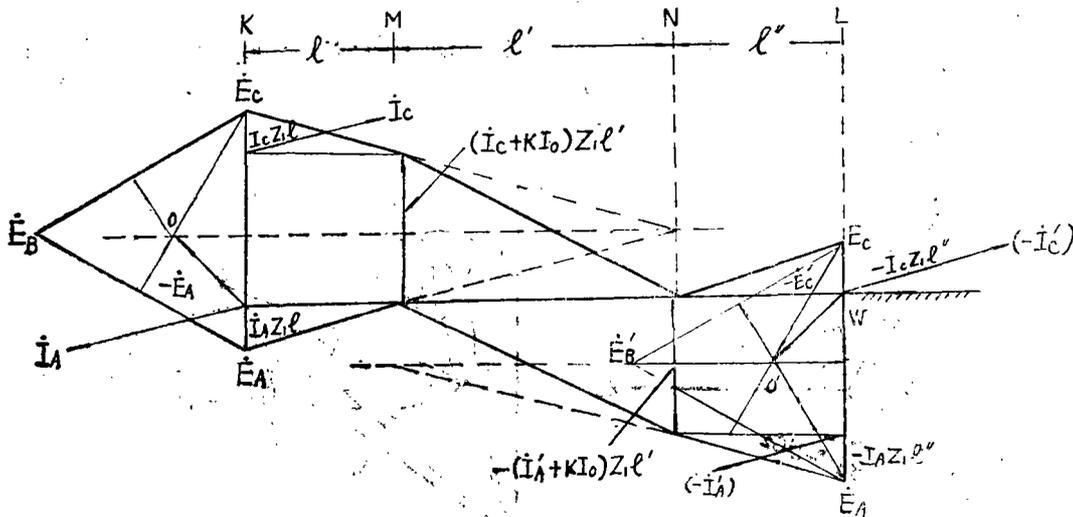
$$- \frac{U_{0V} - U_{0W}}{Z_0 L'} \left(\frac{2L' + 3L}{\Sigma L} \right) Z_1 L''$$

$$= (\dot{E}_C - \dot{E}_A) - \frac{U_{0V} - U_{0W}}{Z_0 L'} \left\{ \frac{(2L' + 3L'') Z_1 L + (2L' + 3L) Z_1 L''}{\Sigma L} \right\}$$

移项,

$$\begin{aligned} & \frac{(U_{0v}-U_{0w})Z_0L'}{Z_0L'} + \frac{(U_{0v}-U_{0w})}{Z_0L'} \left\{ \frac{(2L'+3L'')Z_1L+(2L'+3L')Z_1L''}{\Sigma L} \right\} - (\dot{E}_c - \dot{E}_A) \\ & \frac{(U_{0v}-U_{0w})}{Z_0L'} \{ Z_0L'+1 \} \left\{ \frac{(2L'+3L'')Z_1L+(2L'+3L')Z_1L''}{\Sigma L} \right\} - (\dot{E}_c - \dot{E}_A) \\ & (U_{0v}-U_{0w}) = \frac{(\dot{E}_c - \dot{E}_A)Z_0L'}{(Z_0L'+1) \frac{(2L'+3L'')Z_1L+(2L'+3L')Z_1L''}{\Sigma L}} \\ & U_{0v}-U_{0w} = \frac{\dot{E}_c - \dot{E}_A}{\frac{(Z_0L'+1)Z_1}{Z_0L'} \left\{ \frac{2L'L'+3L''L-2L'L''-3LL''}{L+L'+L''} \right\}} \\ & = \frac{\dot{E}_c - \dot{E}_A}{(Z_0L'+1) \frac{2Z_1}{Z_0L'} \left\{ \frac{L'(L+L'')+3LL''}{\Sigma L} \right\}} \\ & = \dot{I} + \frac{2Z_1}{Z_0L'} \left(\frac{L'(L+L'')+3LL''}{\Sigma L} \right) \quad (1-18) \end{aligned}$$

根据上边的公式可以绘制电流电压分布图, 如次:



第 I-2 图

上图 \$\dot{I}'_A\$ 与 \$\dot{I}'_C\$ 皆取的 \$-\dot{I}'_A\$ 与 \$-\dot{I}'_C\$, 意思是其电流方向于原假设者不同, 即把原来假设的电流方向转 \$180^\circ\$。

根据上边的诸公式, 与这个图相结合, 各部分的电流电压皆能计算出来。上图只是定性的示出其主要部分。公式推导基本上是逐步写出演算过程。所以这样, 意在便于阅读。算式只示出了 a、c、相两点接地的电流电压计算, 而其他相别两点接地故障, 可用同样办法去计算。似乎很麻烦, 别的方法也不简单, 故采用了这种办法, 主要我们继电保护专业人员对于这种算法还比较熟悉。

附录 II 两个向量比较相位的基本算式的推导

两个向量比较相位的基础原理，设 \dot{I}_1 和 \dot{I}_2 是继电器安装处的两个正弦电气量有效值，经过形成回路转换为 Q_1 与 Q_2 ，将其引入相位比较器，比较相位，可以下式表示，

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{K_1 \dot{I}_1 - K_2 \dot{I}_2}{K_3 \dot{I}_1 - K_4 \dot{I}_2}$$

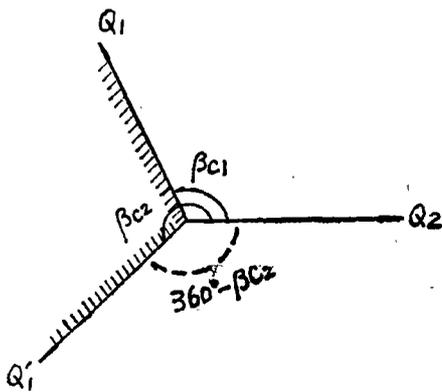
$$= \left(\frac{K_2}{K_4} \right) \frac{\left(\frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} - \frac{K_1}{K_2} \right)}{\left(\frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} - \frac{K_3}{K_4} \right)} = \lambda e^{j\alpha} \frac{W-A}{W-B} \quad (\text{II-1})$$

$$\text{或 } \frac{Q_1}{Q_2} = \lambda K e^{j(\alpha + \beta)} \quad (\text{II-2})$$

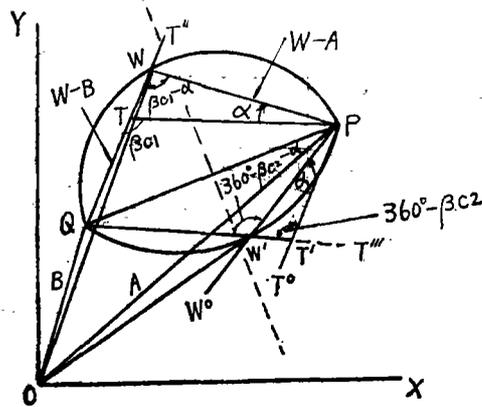
这里 $W = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1}$, $A = \frac{K_1}{K_2}$, $B = \frac{K_3}{K_4}$, $\lambda = \frac{K_2}{K_4}$, $\alpha = \arg \frac{K_2}{K_4}$

$$\beta = \arg \frac{W-A}{W-B}, K = \left| \frac{W-A}{W-B} \right|$$

A 、 B 、 λ 和 α 等，当 K_1, K_2, K_3, K_4 的数值指定后即为给定的数值。 W 由电力系统的 \dot{I}_1 与 \dot{I}_2 而定。自式 (II-2) 可以看出， Q_1, Q_2 即可以比较相位，也可以比较幅值，因而根据此式可作成相位比较器，及幅值比较器。



第 II-1 图



第 II-2 图

两个输入量的相位比较器的特性

两个输入量的相位比较器的一般特性是非对称的，而对称的是一般特性中的特殊情况。所谓对称的特性，与整定角有关，相位比较器动作角度 β ，必需限制在 $\beta_{c1} < \beta < \beta_{c2}$ 的条件下， β_{c1} 与 β_{c2} 称为整定角，当 $\beta_{c1} = 360 - \beta_{c2}$ 时称为对称。当 β_{c1} 与 β_{c2} 皆减去 α 角时则相位比较器的动作范围变为：

$$\beta_{c1} - \alpha < \beta < \beta_{c2} - \alpha. \text{ 若 } \beta_{c1} - \alpha = 360 - \beta_{c2} - \alpha \text{ 则称为对称。}$$

设给出 \dot{A} , \dot{B} , β_{c1} , β_{c2} 及 α , 绘满足 $\beta_{c1} - \alpha < \beta < \beta_{c2} - \alpha$ 条件的包络曲线图的方法。

首先在 XY 平面上, 绘出向量 \dot{A} 和向量 \dot{B} , 得 Q 点与 P 点, $\overline{PQ} = \dot{A} - \dot{B}$, 在 \overline{PQ} 上侧任意点 T'' 作 $\overline{QT''}$ 直线, 再自 P 点作直线与 $\overline{QT''}$ 夹角为 β_{c1} , 二线相交于 T 点, 则 $\angle QTP = \beta_{c1}$ 。以 P 点为轴以 TP 线为参考顺时针转 α 角作直线与 $\overline{QT''}$ 交于 W 点, 则 $\angle QWP = \beta_{c1} - \alpha$, 通过 Q, W, P 三点作园得园弧 \widehat{QWP} , 若 W 点在 \widehat{QWP} 上移动到任意位置 $\angle QWP$ 皆等于 $\beta_{c1} - \alpha$ 。在 \overline{QP} 弦下侧任意点 T''' 作 $\overline{QT'''}'$ 直线, 作 $\overline{PT'}$ 使其与 $\overline{QT'''}'$ 夹角为 $(360^\circ - \beta_{c2})$ 相交于 T' 点, 则 $\angle PT'Q = 360^\circ - \beta_{c2}$ 。顺时针方向以 P 点为轴, 以 $\overline{PT'}$ 为参考转 α 角作 $\overline{PW'}$ 直线, 与 $\overline{QT'''}'$ 相交与 W' 点, 则 $\angle PW'Q = 360^\circ - \beta_{c2} - \alpha$, 通过 P, W', Q 三点作园, 得园弧 $\widehat{QW'P}$, 则 W' 在 $\widehat{QW'P}$ 弧上移动任意位置时 $\angle QW'P$ 皆等于 $360^\circ - \beta_{c2} - \alpha$ 。不难看出在 \widehat{QWP} 与 $\widehat{QW'P}$ 两园弧包络面积内的所有各点若以 W 表示, 令 $\angle QWP = \beta$, 则 $\beta > \beta_{c1} - \alpha$, $\beta < 360^\circ - \beta_{c2} - \alpha$ 。故 \widehat{QWP} 与 $\widehat{QW'P}$ 包络的面积内, 为相位比较器的动作区。

相位比较器动作方程的推导

设相位比较器的动作范围规定为 $\beta_{c1} - \alpha < \beta < \beta_{c2} - \alpha$, 而给出 A, B, β_{c1} , β_{c2} 及 α , 求此相位比较器的动作方程如下:

①先推导 $\beta = \beta_{c1} - \alpha$ 的方程。

根据给定的 A, B, β_{c1} 及 α , 可以令 $\beta = \beta_{c1} - \alpha$, 而作出下图, 令 \overline{W} 为所求的向量方程以 $\angle\theta$ 为变数的函数, 则

$$\dot{W} = \dot{B} + \frac{\dot{A} - \dot{B}}{2} \operatorname{cosec} \beta \angle 90^\circ - \beta + \left| \frac{\dot{A} - \dot{B}}{2} \operatorname{cosec} \beta \right| \angle \theta \quad (\text{II-3})$$

\dot{A} , \dot{B} 已知, 则可画出 Q 点与 P 点, $\overline{PQ} = \dot{A} - \dot{B}$, $\frac{\dot{A} - \dot{B}}{2} = \overline{CQ}$, 自 C 点作垂线垂直于 \overline{PQ} , 根据上节所用的同样方法可绘出 \widehat{QWP} , 而 \widehat{QWP} 园弧与 \overline{PQ} 的中点垂线相交与 W, 把 WP 与 WQ 之间的夹角 $(\beta_{c1} - \alpha) = \beta$, 则得第 II-3 图 (a)

$\overleftarrow{O'Q} = \frac{\dot{A} - \dot{B}}{2} \operatorname{cosec} \beta \angle 90^\circ - \beta$ 所以乘以 $\angle 90^\circ - \beta$, 因为以 \overleftarrow{PQ} 为参考, 而 $\overleftarrow{WO'}$ 的绝对值 $\left| \overleftarrow{O'W} \right| = \left| \frac{\dot{A} - \dot{B}}{2} \operatorname{cosec} \beta \right|$ 。

$$\begin{aligned} \text{故 自坐标原点 } \dot{W} &= \overleftarrow{QO} + \overleftarrow{O'Q} + \left| \overleftarrow{WO'} \right| \angle \theta \\ &= \dot{B} + \frac{\dot{A} - \dot{B}}{2} \operatorname{cosec} \beta \angle 90^\circ - \beta + \left| \frac{\dot{A} - \dot{B}}{2} \operatorname{cosec} \beta \right| \angle \theta \end{aligned}$$

上式中 $\operatorname{cosec}\beta = \frac{1}{\sin\beta}$ 从而式(II-3)得到证明。

②推导 $\beta = 360^\circ - \beta_{c2} - \alpha$ 的向量方程,

令 $\beta = \beta_{c2} - \alpha$, 根据已知的 A 、 B 、 β_{c2} 及 α , 可作出第 II-3 图 (b), 为求出 $\angle QXP$ 角作辅助线 QX 和 XP , 自几何定理,

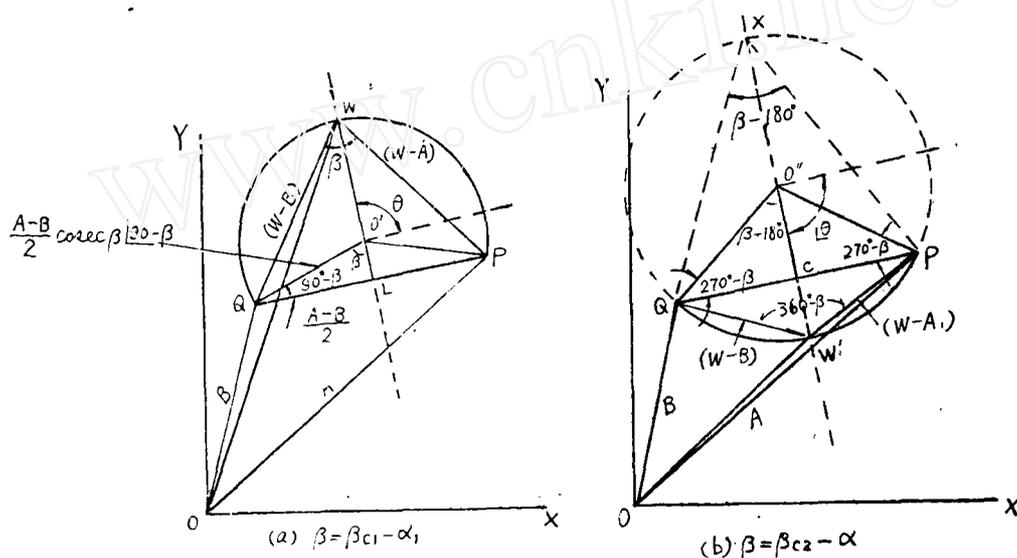
$$(360^\circ - \beta) + \angle QXP = 180^\circ$$

$$\angle QXP = 180^\circ - (360^\circ - \beta) = \beta - 180^\circ$$

$$\text{而 } \angle QO''P = 2(\beta - 180^\circ)$$

$$\therefore \angle QO''C = \beta - 180^\circ$$

$$\angle O''QC = \angle O''PC = 90^\circ - (\beta - 180^\circ) = 270^\circ - \beta.$$



第 II-3 图

$$\begin{aligned} W' &= \overrightarrow{QO} + \overrightarrow{O''Q} + |\overrightarrow{W'O''}| \angle \theta \\ &= B + \frac{A-B}{2} \operatorname{cosec}(\beta - 180^\circ) \angle 270^\circ - \beta + \left| \frac{A-B}{2} \operatorname{cosec}(\beta - 180^\circ) \right| \angle \theta \\ &= B + \frac{A-B}{2} (-) \operatorname{cosec}\beta (-) \angle 90^\circ - \beta + \left| \frac{A-B}{2} \operatorname{cosec}\beta \right| \angle \theta \\ &= B + \frac{A-B}{2} \operatorname{cosec}\beta \angle 90^\circ - \beta + \left| \frac{A-B}{2} \operatorname{cosec}\beta \right| \angle \theta. \end{aligned}$$

即 $W' = W$ 。

$$\text{故 } W = B + \frac{A-B}{2} \operatorname{cosec}\beta \angle 90^\circ - \beta + \left| \frac{A-B}{2} \operatorname{cosec}\beta \right| \angle \theta \text{ 即为 } \beta = \beta_{c1} - \alpha \text{ 的向量方程, 也能满足 } \beta = \beta_{c2} - \alpha \text{ 的动作方程。}$$

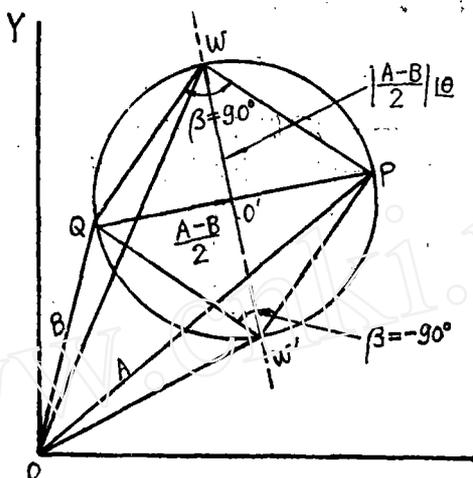
相敏 90° 相位比较器的动作方程

相敏 90° 相位比较器的动作方程

$\alpha = 0, \beta = 90^\circ$, (即 $\beta_{c1} = 90^\circ, \beta_{c2} = -90^\circ$) 代入式(II-3)得到,

$$W = B + \frac{A-B}{2} \angle \theta + \left| \frac{A-B}{2} \right| \angle \theta \quad (\text{II-4})$$

上之方程图形如次:



第 II-4 图

符号和标字释意表

A、B、C 或 a、b、c	——为我们习惯用的三相标字。
V_{fa} 、 V_{fb} 、 V_{fc}	——在故障点处的相电压。
V_{ra} 、 V_{rb} 、 V_{rc}	——在保护安装处，电压互感器二次侧的相电压。
E_A 、 E_B 、 E_C 或 E_a 、 E_b 、 E_c	——电源处电压互感器二次侧的相电势。
V_x 、 V_y 、 V_z	——在保护安装处 a 相、b 相、c 相的补偿电压。
I_a 、 I_b 、 I_c	——a 相、b 相、c 相的相电流。
Z_L 、 Z_S 、 Z_r	——线路阻抗，电源侧阻抗，补偿阻抗(或称模拟阻抗)
Z_1 、 Z_2 、 Z_0	——线路单位长度的正序、负序、另序阻抗；有时代表，回路的正序、负序、另序总阻抗。
1、2、0	——当标在的字脚下时，分别表示正序、负序、另序分量。

n	—— $\frac{Z_{L0}}{Z_{L1}}$
K	—— $K = n - 1 = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}} = \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1}$
P	—— $P = \frac{V_{x0}}{V_{x2}}$
a、j	—— $a = \angle 120^\circ$ ， $j = \angle 90^\circ$
Q_1 、 Q_2	——相位比较器的输入向量。
K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4	——复数系数。
\dot{I}_1 、 \dot{I}_2	——电力系统中某种电气向量。
λ	—— $\lambda = \left \frac{K_2}{K_4} \right $
α	—— $\alpha = \arg \frac{K_2}{K_4}$
W	—— $W = \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2}$
A、B、K、 β	—— $A = \frac{K_1}{K_2}$ ， $B = \frac{K_3}{K_4}$ ， $K = \left \frac{W - A}{W - B} \right $ ， $\beta = \arg \frac{W - A}{W - B}$
β_0	——相位比较器的整定角。
θ	——角变数。

其他符号和标字不包括上表之内者，将随用随解释。

