

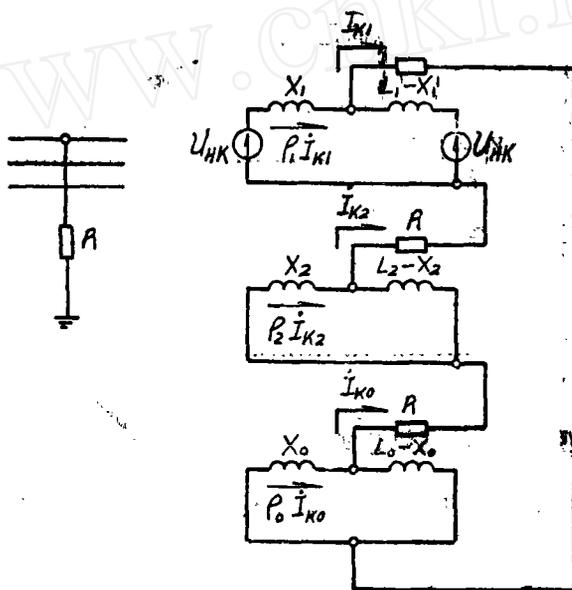
用正弦逻辑向量理论谈各种阻抗参数的应用(下)

江西供电局 张旭俊

四、“双补偿”阻抗继电器在K¹故障时的行为

(一) 当正向K¹故障时阻抗元件的动作方程式

如图七，画出了K¹故障支接弧阻F，其故障分量相序网络图。



图七

此时有：

$$\dot{I}_{K1} = \dot{I}_{K2} = \dot{I}_{K0} = \frac{\dot{U}_{HK}}{Z_{X1} + Z_{X2} + Z_{X0} + 3R} = \frac{\dot{U}_{HK}}{\rho_1 X_1 + \rho_2 X_2 + \rho_0 X_0 + 3R} \dots\dots (4.1)$$

将其代入(2.17)——(2.19)可得：

$$\dot{S}_1 = -j \frac{Q(\rho_1 X_1 + \rho_2 X_2 + \rho_0 X_0 + 3R) - (\rho_1 Y_1 + \rho_2 Y_2 + \rho_0 Y_0)}{Q(\rho_1 X_1 + \rho_2 X_2 + \rho_0 X_0 + 3R) - (\rho_1 Y_1 - \rho_2 Y_2) - j\sqrt{3}\rho_0 Y_0} \dots\dots (4.2)$$

$$\dot{S}_2 = +j \frac{Q(\rho_1 X_1 + \rho_2 X_2 + \rho_0 X_0 + 3R) - (\rho_1 Y_1 + \rho_2 Y_2 + \rho_0 Y_0) + 3\rho_0 X_0}{Q(\rho_1 X_1 + \rho_2 X_2 + \rho_0 X_0 + 3R) - (\rho_1 Y_1 - \rho_2 Y_2)} \dots\dots (4.3)$$

$$\dot{S}_s = -j \frac{Q(\rho_1 X_1 + \rho_2 X_2 + \rho_0 X_0 + 3R) - (\rho_1 Y_1 + \rho_2 Y_2 + \rho_0 Y_0)}{Q(\rho_1 X_1 + \rho_2 X_2 + \rho_0 X_0 + 3R) - (\rho_1 Y_1 - \rho_2 Y_2) + j\sqrt{3}\rho_0 Y_0} \dots\dots\dots (4.4)$$

注意 $Z_{X0} = nZ_X$, $Z_{Y0} = nZ_Y$, 引用系统等值阻抗 Z_{C*} 的定义如下:

$$Z_{C*} = \frac{\rho_1 Z_{C1} + \rho_2 Z_{C2} + \rho_0 Z_{C0}}{\rho_1 + \rho_2 + n\rho_0} \dots\dots\dots (4.5)$$

就可引出 K^1 故障时的各简化符号如下:

$$\left. \begin{aligned} X_* &= \frac{\rho_1 X_1 + \rho_2 X_2 + \rho_0 X_0}{\rho_1 + \rho_2 + n\rho_0} = Z_{C*} + Z_X \\ Y_* &= \frac{\rho_1 Y_1 + \rho_2 Y_2 + \rho_0 Y_0}{\rho_1 + \rho_2 + n\rho_0} = Z_{C*} + Z_Y \\ \rho_s &= \frac{\rho_1 + \rho_2 + n\rho_0}{3} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.6)$$

K^1 故障下等值 K 变数的定义如下:

$$K = X_* + \frac{R}{\rho_n} \dots\dots\dots (4.7)$$

于是 (4.2) —— (4.4) 式可以简化为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_1 &= -j \frac{QK - Y_*}{QK - jB} \\ \dot{S}_2 &= -j \frac{QK - Y_* + \sqrt{3}B}{QK} \\ \dot{S}_3 &= -j \frac{QK - Y_*}{QK + jB} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.8)$$

其中

$$B = \frac{\sqrt{3}\rho_0 Y_0}{3\rho_s} \dots\dots\dots (4.9)$$

(二) 临界弧阻 R 的通解公式

依 (4.2) —— (4.4) 可见, 它仍符合 (3.4) 的一般形式, 因而 R 的通解公式同 (3.6), 故不再述。

(三) 简化系统模型、 Z_X 变数法

对 K^1 故障而言, 简化系统模型的条件要比 K^2 故障复杂些, 因为多了另序网。现分述如下:

1. 不计振荡, 即令 $Q = 1$ 。
2. 序网相似, 此处把正序网和负序网近似地看作相同, 即 $X_1 = X_2$, $Y_1 = Y_2$, $\rho_1 = \rho_2$ 。

为了使 (4.8) 式中 K 是唯一的参变数, 除了假定 $Q = 1$ 外, 还必须设法使 B 和 Z_X , R 都无关才行。为此要求如下比值 $\frac{\rho_0}{\rho_1}$ 也是和 Z_X , R 都无关的常数, 这只有当 Z_{C0}

= nZ_d 时才可能。依：

$$\frac{\rho_0}{\rho_1} = \frac{(Z_{d_0} - nZ_X)(Z_C + Z_d)}{(Z_{C_0} + Z_{d_0})(Z_d - Z_X)} = a \dots\dots\dots (4.10)$$

代入 $Z_{d_0} = nZ_d$ 关系，于是有：

$$a = \frac{n(Z_C + Z_d)}{Z_{C_0} + Z_{d_0}} \dots\dots\dots (4.11)$$

它相当于另序网和正序网要求半边相似的条件，此时有：

$$\left. \begin{aligned} Z_{C^*} &= \frac{2Z_C + aZ_{C_0}}{2 + na} \\ \rho_* &= \frac{2 + na}{3} \rho_1 \\ B &= \frac{\sqrt{3}a}{2 + na} (Z_{C_0} + nZ_X) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.12)$$

将 $Q = 1$ 的条件代入 (4.8) 式，并引用等值阻抗 Z_X 的定义为：

$$Z_X = Z_X + \frac{R}{\rho_*} \dots\dots\dots (4.13)$$

(4.8) 式可以改写为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_1 &= -j \frac{Z_X - Z_Y}{Z_X + Z_{C^*} - jB} \\ \dot{S}_2 &= -j \frac{Z_X - Z_Y + \sqrt{3}B}{Z_X + Z_{C^*}} \\ \dot{S}_3 &= -j \frac{Z_X - Z_Y}{Z_X + Z_{C^*} + jB} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.14)$$

可见在 Z_X 平面上， \dot{S}_1 、 \dot{S}_2 、 \dot{S}_3 三个动作特性是圆。若所有阻抗 Z_C 、 Z_d 、 Z_{C_0} 、 Z_{d_0} 、 Z_Y 都具有相同的阻抗角，则上述三圆正好共交于 $-Z_{C^*}$ 一点，因令 $Z_X = -Z_{C^*}$ 时可有：

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_1 &= -\frac{Z_{C^*} + Z_Y}{B} \\ \dot{S}_2 &= \infty \\ \dot{S}_3 &= \frac{Z_{C^*} + Z_Y}{B} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.15)$$

其中 \dot{S}_1 、 \dot{S}_3 的虚部为另， \dot{S}_2 无定义，根据正弦逻辑向量理论说明它们都处于边界情况，故知其共交于 $-Z_{C^*}$ 这点。

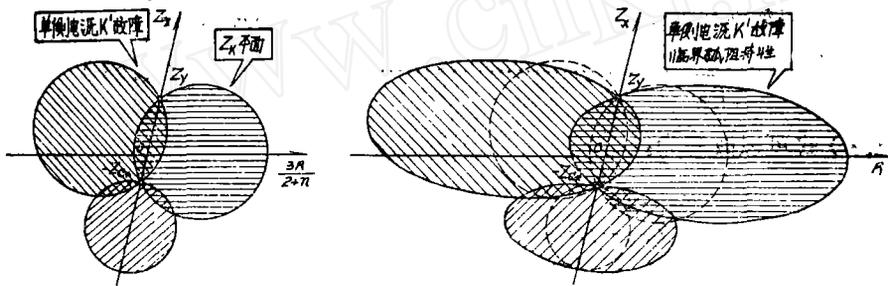
下面分别讨论两种特例情况：

1. 单侧电源 K^1 故障

此时有 $\rho_1 = \rho_2 = \rho_0 = 1$ ，于是有：

$$\left. \begin{aligned}
 Z_{C\bar{*}} &= \frac{2Z_C + Z_{CO}}{2+n} \\
 \rho_0 &= \frac{2+n}{3} \\
 Z_K &= Z_X + \frac{3R}{2+n} \\
 B &= \frac{\sqrt{3}}{2+n} (Z_{CO} + nZ_Y)
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.16)$$

注意单侧电源 K^1 故障下阻抗继电器的动作方程式的结果是完全准确的，它不附带任何简化条件，在等值 Z_K 平面上它的动作区域是三个圆图的总和。如果要把它转化到 (Z_X, R) 坐标上，只需将斜角坐标的横向放大 ρ_0 倍就行，由于此时 ρ_0 为定数，可以证明最后得出的临界弧阻特性为三个椭圆，这种情况“ ρ 镜横变”的情况，详细表示在图八中。



图八 单侧电源 K^1 故障时的动作区分析

2. 简化系统中 K^1 故障

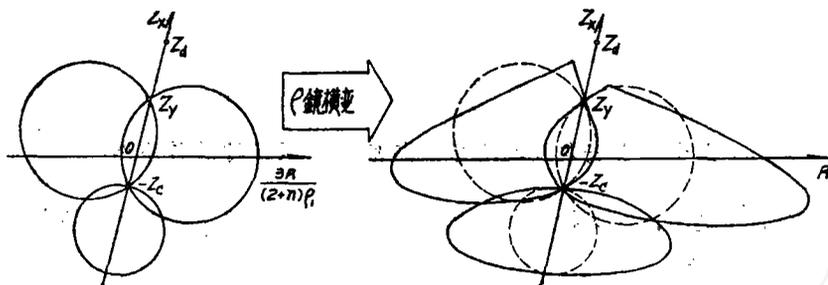
在文〔2〕中假定另序网和正序网完全相似，即 $Z_{CO} = nZ_C$, $Z_{L0} = nZ_L$ ，并有 $\rho_1 = \rho_2 = \rho_0$ ，于是有：

$$\left. \begin{aligned}
 Z_{C\bar{*}} &= Z_C \\
 \rho_0 &= \frac{2+n}{3} \rho_1 \\
 Z_K &= Z_X + \frac{3R}{(2+n)\rho_1} \\
 B &= \frac{\sqrt{3}n}{2+n} (Z_C + Z_Y^2)
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.17)$$

将 (4.17) 结果代入 (4.14) 式，就可得到和文〔2〕一样的结果，可知〔2〕中对 K^1 故障采取了过严的限制。就文〔2〕而言，它是为了和 $K^{1,1}$ 故障所需的假定统一，因而一律假定另序网和正序网完全相似。

对比一下 (4.12) 和 (4.17) 式可知，“另、正序网”的半边相似与完全相似，事

实质上只引起量的变化，并无质的变化。它们在等值 Z_x 平面上的动作区域都是园图，如果把它转到 (Z_x, R) 平面上，它们都将畸变为具有上尖下大的特点，犹如三只搭配着的桃子，这种“ ρ 镜横变”的情况，详细表示在图九中，它是按“完全相似”这种假定画出的。



图九 简化系统模型中 K^1 故障时的动作区分析

由图可见， K^1 故障时其允许弧阻的“弹性区”大为扩大。

(四) 两侧电源相角摆开影响的估价

由 (4.8) 式可知，振荡函数 Q 的影响和 K^2 时情况相仿。在 QK 为组合参变数的平面上，(4.8) 式是三个园图，经过“ Q 镜扭变”将它转换到 K 平面上，其图形有了扭变，在相同的例题下， Q 值仍是表一的数值，因而扭变的特点是完全相仿的。然后经过“ ρ 镜横变”就可得到 K 平面上的临界弧阻特性，此不赘述。

(五) 系统振荡伴随故障时阻抗继电器的分析， ε 或 σ 变数法

从 (4.2) —— (4.4) 式可知，当 Q 用 (2.15) 式的关系代入时，它们都是 ε 或 σ 变数的一次有理分式，根据正弦逻辑向量理论可知，不论对 ε 或 σ 变数平面上它们都是园图，情况仿前，此不赘述。

(六) 正向相反向 K^1 故障时，简化系统模型条件的异同

已如前述对正向 K^1 故障而言，简化系统模型的条件是：

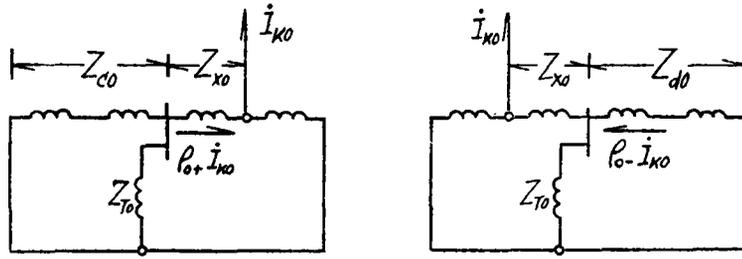
1. 不计振荡
2. 负序网和正序网相同，另序网和正序网只要求半边相似，即 $Z_{d0} = nZ_d$ 。

而对反向 K^1 故障而言，简化系统模型的条件是：

1. 不计振荡
2. 负序网和正序网相同，另序网和正序网也只要求半边相似，但它应是 $Z_{c0} = nZ_c$ 。

看起来这似乎是一个矛盾，一个另序网它能否做到在正向 K^1 故障时只使对侧序网和正序网相似，而在反向 K^1 故障时只使本侧序网和正序网相似呢！其实这样的简化模

型是存在的, 请参看图十。



图十 当安装处具有中点接地的变压器时的另序网

在图十的另序网中, 在保护安装处具有中点接地变压器, 它的另序阻抗为 Z_{T0} , 下面分别讨论两种情况:

(1) 在正向 K^1 故障时, 流过安装处的另序电流为:

$$\dot{I}_{A0} = \frac{Z_{d0} - nZ_X}{Z_{c0} \parallel Z_{T0} + Z_{d0}} \dot{I}_{K0} \dots \dots \dots (4.18)$$

它相当于正向 K^1 时的另序分配系数 ρ_{0+} 为:

$$\rho_{0+} = \frac{Z_{d0} - nZ_X}{Z_{c0} \parallel Z_{T0} + Z_{d0}} \dots \dots \dots (4.19)$$

为了使 $\frac{\rho_{0+}}{\rho_1}$ 与 Z_X 无关, 则需要满足 $Z_{d0} = nZ_d$, 此时有:

$$a_+ = \frac{\rho_{0+}}{\rho_1} = \frac{(Z_{d0} - nZ_X)(Z_c + Z_d)}{(Z_{c0} \parallel Z_{T0} + Z_{d0})(Z_d - Z_X)} = \frac{n(Z_c + Z_d)}{Z_{c0} \parallel Z_{T0} + Z_{d0}} \dots \dots \dots (4.20)$$

如果将它折合到图二另序网, 它相当于本侧另序系统阻抗 Z_{c0}^{\oplus} 为:

$$Z_{c0}^{\oplus} = Z_{c0} \parallel Z_{T0} = Z_{c0} \left(\frac{Z_{T0}}{Z_{c0} + Z_{T0}} \right) \dots \dots \dots (4.21)$$

(2) 在反向 K^1 故障时, 流过安装处的另序电流为:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A0} &= \frac{Z_{c0} - nZ_X}{Z_{d0} \parallel Z_{T0} + Z_{c0}} \left(\frac{Z_{T0}}{Z_{d0} + Z_{T0}} \right) \dot{I}_{K0} \\ &= \frac{Z_{c0} - nZ_X}{Z_{c0} + Z_{d0} \left(1 + \frac{Z_{c0}}{Z_{T0}} \right)} \dot{I}_{K0} \dots \dots \dots (4.22) \end{aligned}$$

它相当于反向 K^1 时的另序分配系数 ρ_{0-} 为

$$\rho_{0-} = \frac{Z_{c0} - nZ_X}{Z_{c0} + Z_{d0} \left(1 + \frac{Z_{c0}}{Z_{T0}} \right)} \dots \dots \dots (4.23)$$

为了使 $\frac{\rho_{0-}}{\rho_1}$ 与 Z_X 无关, 则需要满足 $Z_{c0} = nZ_c$, 此时有:

$$a_- = \frac{\rho_{0-}}{\rho_1} = \frac{(Z_{c0} - nZ_X) \cdot (Z_c^R + Z_d)}{\left[Z_{c0} + Z_{d0} \left(1 + \frac{Z_{c0}}{Z_{T0}} \right) \right] (Z_c - Z_X)}$$

$$= \frac{n(Z_c + Z_d)}{\left[Z_{CO} + Z_{d0} \left(1 + \frac{Z_{CO}}{Z_{TO}} \right) \right]} \dots\dots\dots (4.24)$$

如果将它折合到图二另序网，它相当于对侧另序系统阻抗 Z_{d0}^{\ominus} 为：

$$Z_{d0}^{\ominus} = Z_{d0} \left(1 + \frac{Z_{CO}}{Z_{TO}} \right) \dots\dots\dots (4.25)$$

由此可知对 K^1 故障而言，简化系统模型的实际条件可概括为：

1. 不计振荡
2. 序网相似

负序网和正序网完全相同，即 $Z_{C1} = Z_{C2}$ ； $Z_{d1} = Z_{d2}$ 。

另序网和正序网基本相似，即 $Z_{CO} = nZ_C$ ； $Z_{d0} = nZ_d$ ，但还允许在安装处支接一个另序阻抗 Z_{TO} 。正是这个 Z_{TO} ，它使简化系统模型能比较地符合实际，也正是它使得 K^1 故障对序网只要求半边相似这一宽缓条件，能得以充份利用。

由(4.20)和(4.24)可知，安装处支接 $-Z_{TO}$ 后会使 a_+ 增大，使 a_- 减小。由(4.12)可知 a_+ 增大将使 ρ_{++} 增大，根据“ ρ 镜横变”的原理可知，这将使正向 K^1 故障所允许的弧阻“弹性区”扩大，显然这是十分有利的。同样依(4.12)可知 a_- 减小将使 ρ_{--} 减小，根据“ ρ 镜横变”的原理可知，这将使反向 K^1 故障所允许的弧阻“弹性区”缩小，这同样是有利的。由于反向 K^1 故障时“双补偿”继电器事实上没有动作区，因而这个好处事实上是当 K^1 故障伴随振荡时，使反向 K^1 故障的误动区缩小。

如令 $Z_{TO} \rightarrow \infty$ ，此时有 $a_+ = a_- = 1$ ，相当于“正、另序网完全相似”这一苛刻条件，它就是作者在文〔2〕中的结果。

五、“双补偿”阻抗继电器在 $K^{1 \cdot 1}$ 故障时的行为

(一) 当正向 $K^{1 \cdot 1}$ 故障时阻抗元件的动作方程式

如图十一，画出了 $K^{1 \cdot 1}$ 故障支接弧阻下，其故障分量相序网络图。

为在简便，引用简化符号

$$\left. \begin{aligned} \Sigma_1 &= \rho_1 X_1 + R & \nabla_1 &= \rho_1 Y_1 \\ \Sigma_2 &= \rho_2 X_2 + R & \nabla_2 &= \rho_2 Y_2 \\ \Sigma_0 &= \rho_0 X_0 + R + 3R_0 & \nabla_0 &= \rho_0 Y_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.1)$$

其中：

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{K1} &= -(\dot{I}_{K2} + \dot{I}_{K0}) \\ \dot{I}_{K2} &= -\dot{I}_{K1} \frac{\Sigma_0}{\Sigma_2 + \Sigma_0} \\ \dot{I}_{K0} &= -\dot{I}_{K1} \frac{\Sigma_2}{\Sigma_2 + \Sigma_0} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.2)$$

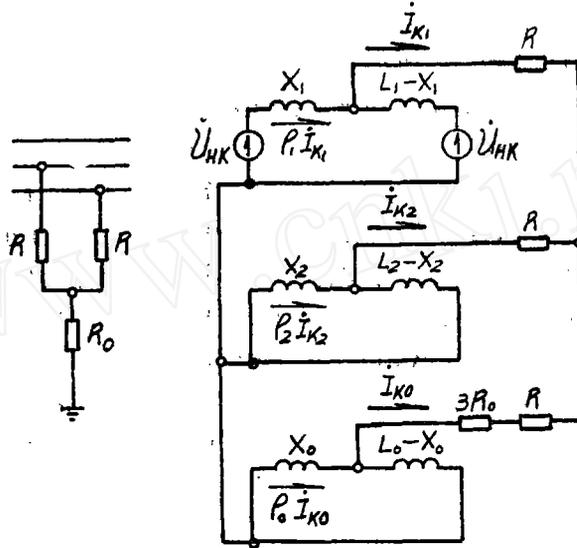
$$\dot{U}_{HK} = \dot{I}_{K1} \left(\Sigma_1 + \frac{\Sigma_2 \Sigma_0}{\Sigma_2 + \Sigma_0} \right) \dots\dots\dots (5.3)$$

将(5.1)——(5.3)代入(2.17)——(2.19)式,经化简后可得:

$$\dot{S}_1 = -j \frac{Q(\Sigma_1 \Sigma_2 + \Sigma_2 \Sigma_0 + \Sigma_2 \Sigma_1) - \nabla_1(\Sigma_2 + \Sigma_0) + \nabla_2 \Sigma_0 + \nabla_0 \Sigma_2}{Q(\Sigma_1 \Sigma_2 + \Sigma_2 \Sigma_0 + \Sigma_0 \Sigma_1) - \nabla_1(\Sigma_2 + \Sigma_0) - \nabla_2 \Sigma_0 + j\sqrt{3} \nabla_0 \Sigma_2} \dots\dots\dots (5.4)$$

$$\dot{S}_2 = -j \frac{Q(\Sigma_1 \Sigma_2 + \Sigma_2 \Sigma_0 + \Sigma_0 \Sigma_1) - \nabla_1(\Sigma_2 + \Sigma_0) + \nabla_2 \Sigma_0 - 2 \nabla_0 \Sigma_2}{Q(\Sigma_1 \Sigma_2 + \Sigma_2 \Sigma_0 + \Sigma_0 \Sigma_1) - \nabla_1(\Sigma_2 + \Sigma_0) - \nabla_2 \Sigma_0} \dots\dots\dots (5.5)$$

$$\dot{S}_3 = -j \frac{Q(\Sigma_1 \Sigma_2 + \Sigma_2 \Sigma_0 + \Sigma_0 \Sigma_1) - \nabla_1(\Sigma_2 + \Sigma_0) + \nabla_2 \Sigma_0 + \nabla_0 \Sigma_2}{Q(\Sigma_1 \Sigma_2 + \Sigma_2 \Sigma_0 + \Sigma_0 \Sigma_1) - \nabla_1(\Sigma_2 + \Sigma_0) - \nabla_2 \Sigma_0 - j\sqrt{3} \nabla_0 \Sigma_2} \dots\dots\dots (5.6)$$



图十一

(二) 临界弧阻R,的通解公式

为了简便,假定负序网和正序网相同,且不计系统振荡,即令 $Q = 1$; $\Sigma_1 = \Sigma_2$; $\nabla_1 = \nabla_2$,于是有:

$$\dot{S}_1 = -j \frac{\Sigma_1 [(\Sigma_1 - \nabla_1) + 2\Sigma_0 + \nabla_0]}{(\Sigma_1 - \nabla_1)(\Sigma_1 + 2\Sigma_0) + j\sqrt{3} \nabla_0 \Sigma_1} \dots\dots\dots (5.7)$$

$$\dot{S}_2 = -j \frac{\Sigma_1 [(\Sigma_1 - \nabla_1) + 2(\Sigma_0 - \nabla_0)]}{(\Sigma_1 - \nabla_1)(\Sigma_1 + 2\Sigma_0)} \dots\dots\dots (5.8)$$

$$\dot{S}_3 = -j \frac{\Sigma_1 [(\Sigma_1 - \nabla_1) + 2\Sigma_0 + \nabla_0]}{(\Sigma_1 - \nabla_1)(\Sigma_1 + 2\Sigma_0) - j\sqrt{3} \nabla_0 \Sigma_1} \dots\dots\dots (5.9)$$

注意(5.1)式的结果,将(5.7)——(5.9)写成一般形式有:

$$\dot{S}_1 = -j \frac{(\rho_1 X_1 + R)[\rho_1(X_1 - Y_1) + \rho_0(2X_0 + Y_0) + 3R + 6R_0]}{[\rho_1(X_1 - Y_1) + R](\rho_1 X_1 + 2\rho_0 X_0 + 3R + 6R_0) + j\sqrt{3} \rho_0 Y_0 (\rho_1 X_1 + R)} \dots\dots\dots (5.10)$$

$$\dot{S}_2 = -j \frac{(\rho_1 X_1 + R)[\rho_1(X_1 - Y_1) + 2\rho_0(X_0 - Y_0) + 3R + 6R_0]}{[\rho_1(X_1 - Y_1) + R](\rho_1 X_1 + 2\rho_0 X_0 + 3R + 6R_0)} \dots\dots\dots (5.11)$$

$$\dot{S}_s = -j \frac{(\rho_1 X_1 + R)[\rho_1(X_1 - Y_1) + \rho_0(2X_0 + Y_0) + 3R + 6R_0]}{[\rho_1(X_1 - Y_1) + R](\rho_1 X_1 + 2\rho_0 X_0 + 3R + 6R_0) - j\sqrt{3}\rho_0 Y_0(\rho_1 X_1 + R)} \dots\dots\dots (5.12)$$

下面分别讨论两种情况:

1. 以地过渡电阻 R_0 为变数, 求 R_{0r} 的临界解, 由 (5.10) —— (5.12) 式可知, 它具有如下一般形式, 即:

$$\dot{S} = -jH \frac{R_0 - A}{R_0 - B} \overset{\textcircled{1}}{=} -je^{i\delta} \frac{R_0 - A}{R_0 - B} \dots\dots\dots (5.13)$$

根据经弦转角定理, 上式还可以改写为:

$$\begin{aligned} \dot{S} &\overset{\textcircled{1}}{=} -j \frac{R - \left[B + \frac{A - B}{\cos\delta} e^{i\delta} \right]}{R - B} = -j \frac{R - [B + (A - B)(1 + jtg\delta)]}{R - B} \\ &= -j \frac{R - M}{R - B} \dots\dots\dots (5.14a) \end{aligned}$$

为了简化, 引出符号 M , 且:

$$\begin{aligned} M &= M_x + jM_y = B + (A - B)(1 + jtg\delta) \\ &= (B_x + jB_y) + [(A_x - B_x) + j(A_y - B_y)](1 + jtg\delta) \\ &= [A_x - (A_y - B_y)tg\delta] + j[A_y + (A_x - B_x)tg\delta] \dots\dots\dots (5.14b) \end{aligned}$$

由 (5.14a) 可知, 这时临界弧阻的动作方程完全和 K^2 故障时相同, 因而就可直接套用前面的结果, 于是可得临界电阻通解为:

$$\begin{aligned} R_{0r} &= \frac{1}{2} \left[(A_x + B_x) - (A_y - B_y)tg\delta \right. \\ &\quad \left. \pm \sqrt{[A_x - B_x - (A_y - B_y)tg\delta]^2 - 4B_y [A_y + (A_x - B_x)tg\delta]} \right] \dots\dots\dots (5.15) \end{aligned}$$

2. 以相过渡电阻 R 为变数, 求 R_r 的临界解, 由 (5.10) —— (5.12) 式可知, 它具有如下一般形式, 即:

$$\begin{aligned} \dot{S} &= -j \frac{R^2 + AR + B}{R^2 + CR + D} \overset{\textcircled{1}}{=} -j (R^2 + AR + B) (R^2 + \overset{*}{C}R + \overset{*}{D}) \\ &= -j [R^4 + (A + \overset{*}{C})R^3 + (B + \overset{*}{D} + A\overset{*}{C})R^2 + (\overset{*}{B}\overset{*}{C} + A\overset{*}{D})R + B\overset{*}{D}] \dots\dots\dots (5.16) \end{aligned}$$

令 $I_m(\dot{S}) = 0$, 可得有关 R 的四次方程

$$R^4 + aR^3 + bR^2 + cR + d = 0 \dots\dots\dots (5.17)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} a &= I_m(A + \overset{*}{C}) \\ b &= I_m(B + \overset{*}{D} + A\overset{*}{C}) \\ c &= I_m(\overset{*}{B}\overset{*}{C} + A\overset{*}{D}) \\ d &= I_m(B\overset{*}{D}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.18)$$

这种解算只有采用电子计算机较好。

(三) 简化系统模型、 Z_K 变数法。

对 $K^{1.1}$ 故障而言, 关系最为复杂, 下面我们考察为引出 Z_K 变数而需要的条件, 现分述如下:

1. 不计振荡, 即令 $Q = 1$ 。

2. 序网相似:

负序网和正序网完全相同; 另序网和正序网完全相似。于是有 $X_1 = X_2 = \frac{1}{n} X_0$,
 $\rho_1 = \rho_2 = \rho_0$

3. 弧阻定比: 即 $3R_0 + R = nR$

将上述三个条件代入(5.7)——(5.9)式, 或代入(5.10)——(5.12)式中可得如下各式。其中以 \dot{S}_1 为例说明过程:

$$\dot{S}_1 = -j \frac{(\rho_1 X_1 + R)[\rho_1(X_1 - Y_1) + n\rho_1(2X_1 + Y_1) + R + 2nR]}{[\rho_1(X_1 - Y_1) + R](\rho_1 X_1 + 2n\rho_1 X_1 + R + 2nR) + j\sqrt{3}\rho_1 n Y_1 (\rho_1 X_1 + R)} \dots\dots (5.19)$$

引出等值 Z_K 变数的定义如下:

$$Z_K = Z_X + \frac{R}{\rho_1} \dots\dots\dots (5.20)$$

将此代入(5.19)式可得:

$$\begin{aligned} \dot{S}_1 &= -j \frac{(Z_C + Z_K)(Z_K - Z_Y + n(2Z_K + 3Z_C + Z_Y))}{(Z_K - Z_Y)[(2n + 1)(Z_C + Z_K)] + j\sqrt{3}n(Z_C + Z_Y)(Z_C + Z_K)} \\ &= -j \frac{Z_K + Z_C + \left(\frac{n-1}{2n+1}\right)(Z_C + Z_Y)}{Z_K - Z_Y + j\sqrt{3}\left(\frac{n}{2n+1}\right)(Z_C + Z_Y)} \dots\dots\dots (5.21) \end{aligned}$$

同理可得:

$$\dot{S}_2 = -j \dots\dots\dots (5.22)$$

$$\dot{S}_3 = -j \frac{Z_K + Z_C + \left(\frac{n-1}{2n+1}\right)(Z_C + Z_Y)}{Z_K - Z_Y - j\sqrt{3}\left(\frac{n}{2n+1}\right)(Z_C + Z_Y)} \dots\dots\dots (5.23)$$

可以证明 \dot{S}_1 、 \dot{S}_3 两个动作园都通过 Z_Y 点, 只要令 $Z_K = Z_Y$ 就可得:

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_1 &= -\sqrt{3} \\ \dot{S}_3 &= \sqrt{3} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.24)$$

可见 \dot{S}_1 、 \dot{S}_3 的虚部均为另, 因而是边界。用正弦逻辑向量理论可以证明(5.21)——(5.23)式的结果和文〔2〕中关于“双补偿”阻抗继电器在正向 $K^{1.1}$ 故障时的动作方程完全相当, 即在等值 Z_K 平面上它们的动作区域完全相同。下面证明如下:

$$\dot{S}_1 = \frac{Z_K + Z_C + \left(\frac{n-1}{2n+1}\right)(Z_C + Z_Y)}{j(Z_K - Z_Y) - \sqrt{3}\left(\frac{n}{2n+1}\right)(Z_C + Z_Y)} = \frac{(Z_K - Z_Y) + \left(\frac{3n}{2n+1}\right)(Z_C + Z_Y)}{j(Z_K - Z_Y) - \sqrt{3}\left(\frac{n}{2n+1}\right)(Z_C + Z_Y)}$$

$$\textcircled{6} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & \sqrt{3} \end{bmatrix} = \frac{Z_K + Z_C + \left(\frac{n-1}{2n+1}\right)(Z_C + Z_Y)}{(1 + j\sqrt{3})(Z_K - Z_Y)}$$

$$\textcircled{1}\textcircled{3} \alpha^2 = \frac{Z_K - Z_Y}{Z_K + Z_C + \left(\frac{n-1}{2n+1}\right)(Z_C + Z_Y)} \dots\dots\dots (5.25)$$

$$\dot{S}_3 = \frac{Z_K + Z_C + \left(\frac{n-1}{2n+1}\right)(Z_C + Z_Y)}{j(Z_K - Z_Y) + \sqrt{3}\left(\frac{n}{2n+1}\right)(Z_C + Z_Y)} = \frac{(Z_K - Z_Y) + \left(\frac{3n}{2n+1}\right)(Z_C + Z_Y)}{j(Z_K - Z_Y) + \sqrt{3}\left(\frac{n}{2n+1}\right)(Z_C + Z_Y)}$$

$$\textcircled{6} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & \sqrt{3} \end{bmatrix} = \frac{Z_K + Z_C + \left(\frac{n-1}{2n+1}\right)(Z_C + Z_Y)}{(-1 + j\sqrt{3})(Z_K - Z_Y)}$$

$$\textcircled{1} \alpha^2 = \frac{Z_K + Z_C + \left(\frac{n-1}{2n+1}\right)(Z_C + Z_Y)}{Z_K - Z_Y} \dots\dots\dots (5.26)$$

阻抗继电器在 Z_K 平面上的园图如图十二所示,这儿 Z_K 平面也就是 $(Z_x, \frac{R}{\rho_1})$ 的斜角坐标平面。如果一定要画出 (Z_x, R) 斜角坐标平面上的临界弧特性,只需要将横向放大 ρ_1 倍,亦即只要进行“ ρ 镜横变”就可得到,它也具有上尖下大的特点,如图十二右侧所示。

(四) “相过渡电阻 R ”和“地过渡电阻 R_0 ”影响的估价

我们先看两种特例:

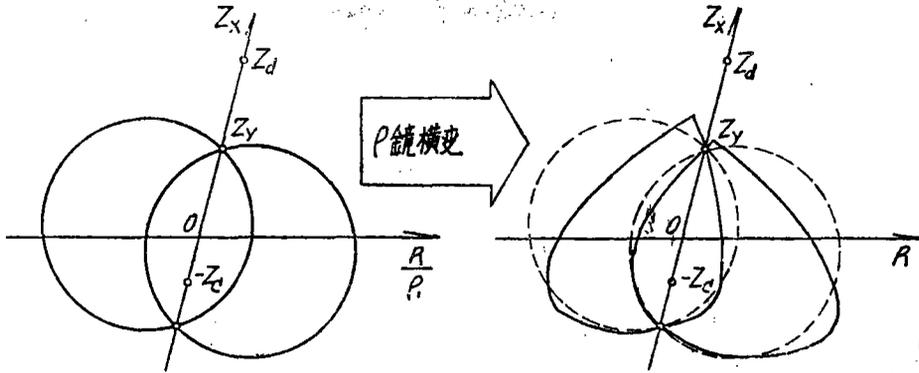
1. 令 $R_0 \rightarrow \infty$, 此时 $K^{1.1}$ 故障就转变为 K^2 故障, 它的特性我们在第三节中已作了详细讨论

2. 令 $R_0 = \frac{n-1}{3}R$, 这就是简化系统模型中符合弧阻定比的情况, 它的特性已在图十二中画出。

“地过渡电阻 R_0 ”包括杆塔、接地电阻等数值一般偏大, 而“相过渡电阻 R ”只是弧阻, 故数值较小, 一般均有 $R_0 > R$ 的条件。

为了估价“相、地过渡电阻”的影响, 上述两种特例正好指明了两个边端情况, 当弧阻比率 $\infty > \frac{R_0}{R} > \frac{n-1}{3}$ 范围内时, 其 $K^{1.1}$ 故障的特性, 在等值 Z_K 平面上看, 大致也间于上述两种动作区域之间。

由此可知简化系统模型和等值 Z_K 变数法,在 $K^{1.1}$ 这样复杂的故障分析中,也给我们提供了虽则简略,但十分清晰的概念,这是非常可贵的。



图十二 简化系统模型中 $K^{1.1}$ 故障时的动作区分析

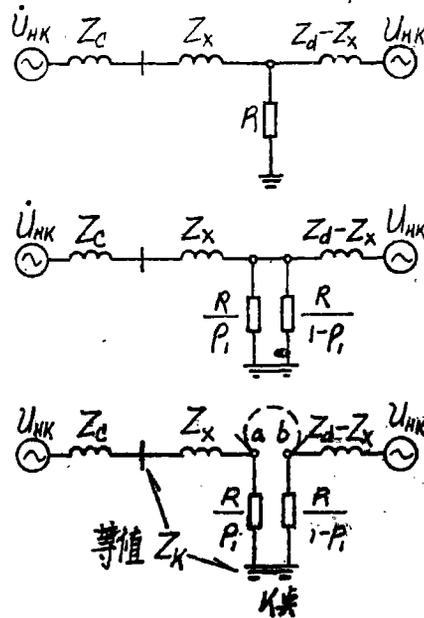
六、等值 Z_K 变数的含义

通过前述各节的叙述,已经充分阐明了简化系统模型和等值 Z_K 变数的含义。

作者在文〔2〕中所指的 Z_K 变数法的本意也是如此,当时由于文〔2〕肩负任务巨大,新概念层出不穷,篇幅有限,为了避免节外生枝,不致分散读者的注意力,故对 Z_K 变数的矛盾和回避矛盾的办法,只是在文字上作了一段阐述〔见文〔2〕第23页〕,未能有本文这样完整的论证。对于 Z_K 变数的优点,特别指明了它能反映继电器对弧电阻允许范围的大小。当两侧电源 K^3 故障时,等值弧阻的效应可用增助作用来反映〔见文〔2〕第9页〕。

在文〔2〕的计算网络中,没有直接画出支接电阻,其实它是内含在短路阻抗 Z_K 的文字阐述中,而且这样做对简化系统模型而言不但可行,其实它还更为简便,本节为此将进一步予以说明。下面以图十三为例,说明在简化系统模型中,为什么支接弧阻能被融合到短路阻抗 Z_K 中去的道理。为了简便,以 K^3 、 K^2 为例:

1. 如图十三(a)画出了两侧电源支接弧阻 R 下的系统接线图,由于不计振荡,两侧电势均为 \dot{U}_{HK} 。



图十三 等值 Z_K 变数含义的剖析

2. 在图十三(b)中, 我们将弧阻 R 分成两个电阻 $\frac{R}{\rho_1}$ 和 $\frac{R}{1-\rho_1}$ 的并联。由于:

$$\frac{R}{\rho_1} \parallel \frac{R}{1-\rho_1} = \frac{\left(\frac{R}{\rho_1}\right) \cdot \left(\frac{R}{1-\rho_1}\right)}{\frac{R}{\rho_1} + \frac{R}{1-\rho_1}} = R$$

由此可见图十三(a)和(b)是完全等效的。

3. 如图十三(c), 由于本侧短路电流为 $\rho_1 \dot{I}_K$, 故 $\dot{U}_{aK} = \dot{I}_K R$; 对侧短路电流为 $(1-\rho_1) \dot{I}_K$ 故 $\dot{U}_{bK} = \dot{I}_K R$ 。由此可知 a 和 b 点的电位差等于另, 因而 $a b$ 之间的虚线, 可以联通, 也可以断开。当 $a b$ 之间联通时, 它完全和图十三(b)相当。当将 $a b$ 之间虚线拆去时, 支接电阻不见了, 它被融合到短路阻抗 Z_K 中去, 此时 K 点是金属性短路点, $Z_K = Z_X + \frac{R}{\rho_1}$ 它就是等值 Z_K 变数。由于两侧电势相同, 非故障相没有传送电流, 因而在整个系统联络阻抗中增加了 $\left(\frac{R}{\rho_1} + \frac{R}{1-\rho_1}\right)$ 将不会发生影响, 在故障相由于 a 、 b 两点没有电位差, 所以它事实上和 $a b$ 联通完全一样。由此可知〔2〕中方法的特点是:

(1) 当以等值 Z_K 作变数时, 两侧电势必须相同, 或说 $Q = 1$, 此时 $Z_K = Z_X + \frac{R}{\rho_1}$ 。

(2) 当以 \dot{e} 作变数而分析系统振荡伴随故障的动作特性时, 必须令支接弧阻 $R = 0$, 或说此时 $Z_K = Z_X$ 。

只要我们认清这两点, 文〔2〕中叙述的等值 Z_K 变数法就处处可行。为了说明文〔2〕中等值 Z_K 变数的全含义, 在表二中详细列出单侧电源和双侧电源支接弧阻下, 等值 Z_K 变数的表式和各种故障下所需的简化系统模型的条件。

本文是为了答复陈德树同志的文章而作, 因而在公式形式上力求能和文(1)相呼

表二

故障种类	单侧电源		双侧电源 支接弧阻	
	假定条件	等值 Z_K 表式	假定条件	等值 Z_K 表式
K^3		$Z_K = Z_X + R$		$Z_K = Z_X + \frac{R}{\rho_1}$
K^2		$Z_K = Z_X + R$	不计振荡 $Q = 1$ 序网相似 $\rho_1 = \rho_2$	$Z_K = Z_X + \frac{R}{\rho_1}$
K^1		$Z_K = Z_X + \frac{3R}{2+n}$	不计振荡 $Q = 1$ 序网相似 $\rho_1 = \rho_2 = \rho_0$	$Z_K = Z_X + \frac{3R}{(2+n)\rho_1}$
$K^{1.1}$	序网相似 $Z_{CO} = nZ_C$ 弧阻定比 $R_0 = \frac{n-1}{3} R$	$Z_K = Z_X + R$	不计振荡 $Q = 1$ 序网相似 $\rho_1 = \rho_2 = \rho_0$ 弧阻定比 $R_0 = \frac{n-1}{3} R$	$Z_K = Z_X + \frac{R}{\rho_1}$

应, 致使有的表式从简化系统模型而言, 还没有做到最佳最简的形式, 建议读者直接参见文〔2〕应用等值 Z_K 变数的分析法。

最近《继电器》杂志78年2期发表了许敬贤同志所写“短线接地距离测量元件的探讨”一文〔以下简称文〔4〕〕, 这是一个别具匠心的新颖设计。文〔4〕虽然采用了文〔2〕中提出的简化系统模型条件, 但该文中的标记字母“ Z_K ”还只相当于本文中的线路阻抗 Z_x , 而不是等值 Z_K 变数, 这一点必须引起注意。如果在文〔4〕中采用本文指出的等值 Z_K 变数法, 该文在公式和图示方面还能更为简洁, 概念亦更确切。

文〔4〕的方案, 在等值 Z_K 变数平面上看, 不论是 K^1 或 $K^{1.1}$ 故障, 其有效的保护区域都具有“倒三角”的形状, 因而它属于“电抗”继电器一类。由于文〔4〕方案中的整定阻抗为 $|Z_Y|\alpha$, 它和实际的保护范围阻抗 $Z_{p.acu}$ 有着一定的水平距离, 这将使系统振荡伴随金属性故障时的保护范围有所伸缩, 这一点可以从前面分析振荡函数 Q 的特点而看到, 总之这个方案具有四边形保护的类似优缺点, 但在结构上文〔4〕方案是三相接地全能继电器, 因而还算是简单的。

七、结 论

本文应用正弦逻辑向量理论详谈了各种阻抗参变数的应用。

阻抗继电器的动作特性, 在 (Z_x, R) 斜角坐标平面上, 大多都为非园曲线。为了避免不必要的麻烦, 我们需要根据不同问题的提法, 采用不同的分析方法, 主要分三种:

1. ε 或 σ 参变数法

它适用于分析系统振荡伴随故障下阻抗继电器特性分析, 在 ε 或 σ 平面上阻抗继电器动作边界轨迹仍是园图, 这是它的优点。

2. 临界弧阻 R_f 通解公式

它适用于研究 $\varepsilon \neq 1$ 时, 发生突然短路初瞬时阻抗继电器特性分析, 在 (Z_x, R) 斜角坐标上阻抗继电器动作边界轨迹是非园曲线, 因而需要逐点计算, 方法较繁, 但能适应各种复杂情况的分析。

3. 简化系统模型、等值 Z_K 变数法

它适于阻抗继电器的设计探索和方案对比的研究, 在等值 Z_K 平面上阻抗继电器的动作边界轨迹是园图, 因而分析简便。应用“ ρ 镜横变”的映像, 我们同样可以看到阻抗继电器在 (Z_x, R) 平面上的非园曲线。由于“ ρ 镜横变”的映像一般无需作出也能领知, 因而等值 Z_K 变数法是一十分简洁的分析手段。

所谓 Z_K 变数的概念, 它是由单侧电源 K^3 故障下引出。而等值 Z_K 变数的概念, 它是在两侧电源支接弧阻情况下, 符合简化系统模型条件而引出的组合变数。通过本文阐述来历已明, 为了今后简洁语言, 一律简呼为 Z_K 变数法。

本文批驳了有些文章对 Z_K 变数法采取全盘否定的态度。

本文对 Z_K 变数法的含义与价值作了充分说明, 显然这对今后阻抗继电器分析的动向关系十分重大。