

短线接地距离测量元件的探讨

南京自动化研究所 许敬贤

提 要

本文提出的距离测量元件为单系统式,只反应接地短路,不反应相间短路的阻抗元件。在短路阻抗平面上为有限制的电抗型动作特性,能正确测量正方向接地短路,并具有反应接地点过渡阻抗的一定能力;对反方向接地短路具有方向性。必要时,可实现零序互感补偿。

测量元件不反应过负荷,对称性系统振荡和电压回路断线,与系统工作频率变化基本无关。

超高压电网的发展,短线群的不断出现,给继电保护带来了新的课题。目前国内生产的距离保护设备一般适用于中长线路,对短线的保护性能很不理想,对短线的特点很少考虑。如所周知,输电线的故障绝大部分为接地短路。对短线来说,接地零序电流保护显然不能获得良好的速动特性,通常没有瞬时动作段。短线群的选择性配合结果,势必导致阶梯式主保护段的动作时间较长,这对快速切除故障、快速恢复供电极为不利。在短线路干线故障时,邻近大片地区电压普遍下降,必将扩大事故波及面,给国民经济带来较大损失。

短线路上,采用接地距离保护理论上应比零序电流保护具有较好的运行性能。但鉴于大多数接地距离保护的测量元件为方向阻抗特性,它不能与被保护线路接地点过渡阻抗的特征相一致,所以实际运行经验表明,这种接地距离保护的运行性能仍然不能满足生产运行的需要。为此,有必要探讨适用于短线的测量元件的新原则实现方案。

本文提出的接地距离测量元件原则接线只是一种可能的实现方案,理论分析还极初步,热望得到各方批评指正。

(一) 短线特点及对接地距离测量元件的要求

超高压短线的最大特点是被保护线短而接地点过渡阻抗相对很大。随着电网的发展,逐步形成多回路平行短线或构成短线环网群,因此一般说来网络联系比较紧密,动

• 1 •

态情况下线路两侧等值电源电势摆角不会很大。被保护线路首、末端短路时，短路电流水平相差不大。由于变压器接地点比较密集，线路又短，因此短路电流水平较高，在接地短路时，零序分量较大。考虑到短线的事故机率相对较小，为提高保护效能，简化运行整定和接线，减少调试工作量，一般对超高压短线都采用三相一次重合方式。

鉴于以上特点，短线接地距离测量元件应在很小整定阻抗值下具有足够大的反应过渡阻抗能力。在保护范围末端，由于对侧电源对过渡阻抗的助增效应比之保护范围首端的情况更为严重，因此测量元件对反应末端过渡阻抗的能力应该更高，即在阻抗复平面上测量元件最好具有上底大于下底的梯形动作特性。

接地点过渡阻抗包括电弧电阻和等值接地阻抗两部分，后者系由塔身电阻、塔脚电阻、大地电阻和架空地线阻抗组成。等值接地阻抗基本上呈电阻性。电弧电阻的数值主要取决于弧道长度、电弧电流数值、风速和电弧持续时间，它与电弧电流数值基本呈反比。为了与过渡阻抗的如上特征相一致，测量元件反应过渡阻抗的能力应该相应地有所变化。当安装处背侧电源容量较小时（等值阻抗较大），流经过渡阻抗的短路电流值相对较小，过渡阻抗随着电弧电阻的增大而增大；反之，当电源容量较大时（等值阻抗较小），过渡阻抗相对也较大。为了适应过渡阻抗值变化的特征，测量元件反应过渡阻抗的能力还应与安装处背侧等值系统阻抗值成一定线性关系地变化。

本文提出的测量元件接线，同时具备了如上两点基本要求，这正是与方向阻抗测量元件动作特性的主要区别。为了满足具有零序互感的平行短线需要，测量元件还应具有邻线零序电流互感的补偿措施。

测量元件应该力求合理简化，最好采用单系统式。文中提出的元件就是单系统式按脉冲计数原理实现相位比较的补偿型接地阻抗继电器。

当前，系统有功功率严重亏缺，低周运行且工作频率变化不定，距离测量元件应该不受频率变化的影响。这就要求不设电压谐振回路，还应保证具有动作的方向性。本测量元件不必设置电压谐振回路，所以基本不受频率变化的影响。

（二）测量元件的实现原则

测量元件按相位比较原理借助脉冲计数实现。接入电气量为：
被比较电气量

$$V_a' = V_a - (I_a + K 3 I_o) | Z_y | a - 3 I_o' Z_{m0}$$

$$V_b' = V_b - (I_b + K 3 I_o) | Z_y | a - 3 I_o' Z_{m0}$$

$$V_c' = V_c - (I_c + K 3 I_o) | Z_y | a - 3 I_o' Z_{m0}$$

基准电气量

$$V_D = 3 I_o | H |$$

$$V_D' = 3 I_o | H | e^{j\theta_0}$$

其中 $| Z_y | = \sqrt{\frac{2}{3}} | Z_{vac} | \sin \varphi_z$ —— 测量元件的实际整定值，

如图 1, (b) 所示。由此得

$$\overline{Pr} = (1 + K) | I_{ka} Z_k | \text{Sim} \varphi_z$$

$$\overline{Pq} = \overline{Pr} S_{c, 30^\circ} = (1 + K) | Z_k | \left| \text{Sim} \varphi_z \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} | I_{ka} | \right| = (1 + K) | Z_y | | I_{ka} |$$

其中 $| Z_y | = \sqrt{\frac{2}{3}} | Z_{yca} \varphi | \text{Sim} \varphi_z$

所以 $\vec{qp} = (1 + K) | Z_y | | I_{ka} | a = (I_{ka} + k 3 I_0) | Z_y | a$

$\vec{oq} = \vec{op} + \vec{pq} = Va - (I_{ka} + K 3 I_0) | Z_y | a = Va'$

由此看出, 在保护区末端接地时, 补偿后电压 $V'_a \neq 0$, 而是具有一定的数值, 所以理论上没有电压死区但有相位死区。考虑到采用脉冲计数式原理实现, 故相位死区基本上可认为不存在。

由图 1, (b) 看出, 保护区末端接地时, 电压 V'_a 恰好落在电流 I_0 的相位上, 测量元件处在动作边缘条件。在区内接地时, 出现过补偿, V'_a 滞后于 I_0 的相位; 区外接地时, 出现欠补偿, V'_a 超前于 I_0 的相位。

B、C 相电压 V_b 与 V_c 间的相角 ψ 决定于接地点负序与零序网络输入阻抗的相对比值。在接地点 ψ 角的变化范围为 $60^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$, 在测量元件安装处, 则 $60^\circ < \psi < 180^\circ$, 所以保护区末端接地时的向量图如图 2 所示。

对以 V_D 为基准电压的测量元件, V_b' 和 V_c' 总是落在动作区内, 所以保护区内接地由于 A 相过补偿的结果, 使 V'_a 落到动作区内, 测量元件便动作, 给出输出信号; 在保护区外接地时, 由于 A 相欠补偿, V'_a 仍落在制动区内, 故测量元件不会动作。

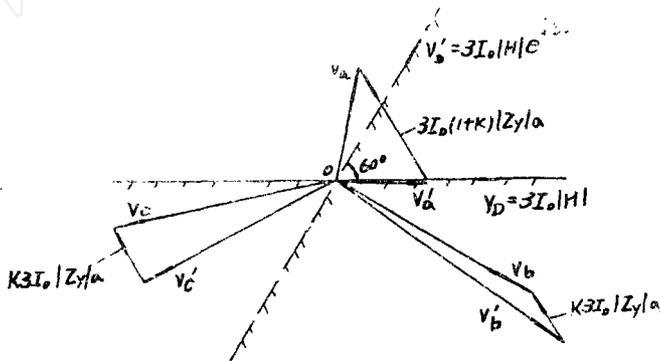


图 2

对以 V_D' 为基准电压的测量元件, 一般 V'_a 是落在动作区内, V_b' 总是在动作区内, 而 V_c' 则在制动区内, 所以测量元件不动作。只有当保护区内接地而 I_0 很大时, V_c' 才能落进动作区, 所以测量元件的实际动作范围缩短, 甚至没有正向保护区。

图 3, (a) 示出单侧电源单回路线路的反方向发生 A 相金属性接地, 同上原则可作出图 3, (b) 的向量图。从图中看出, 对以 V_L 为基准电压的测量元件, V_b' 和 V_c' 均落在制动区内; 对以 V_D' 为基准电压的测量元件, V_b' 落在制动区内, 所以两种情况下测量元件都不会失去方向性。

当图 1, (a) 发生 BC 两相金属性接地而不计负荷电流影响时, 接地点短路电流 I_{kb} 与 I_0 间的相角 ψ' 的变化范围为 $60^\circ < \psi' \leq 180^\circ$, 因此向量图如图 4, (a) 所示。

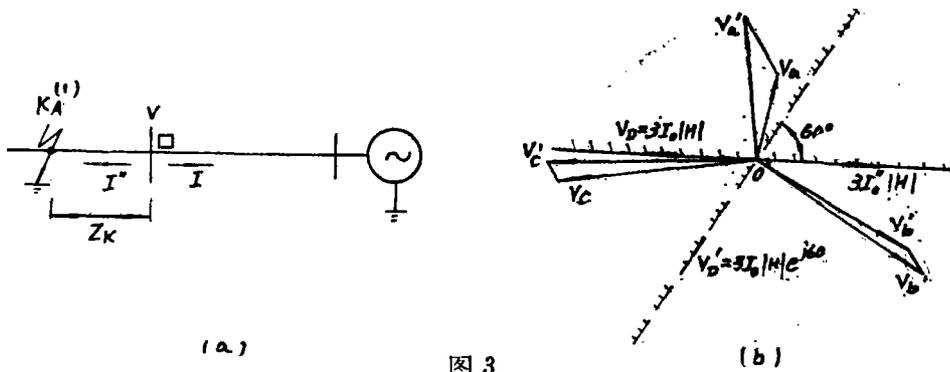


图 3

对以 V_D 为基准电压的测量元件, V_a' 、 V_c' 落在动作区内, V_b' 落在制动区内, 故测量元件不动作。

对以 V_D' 为基准电压的测量元件, V_a' 、 V_c' 落在动作区内, V_b' 取决于补偿电压的大小。在保护区末端接地时, V_b' 恰好落在动作边缘; 保护区内接地时, 由于过补偿而进入动作区; 保护区外接地时, 由于欠补偿而落在制动区内。

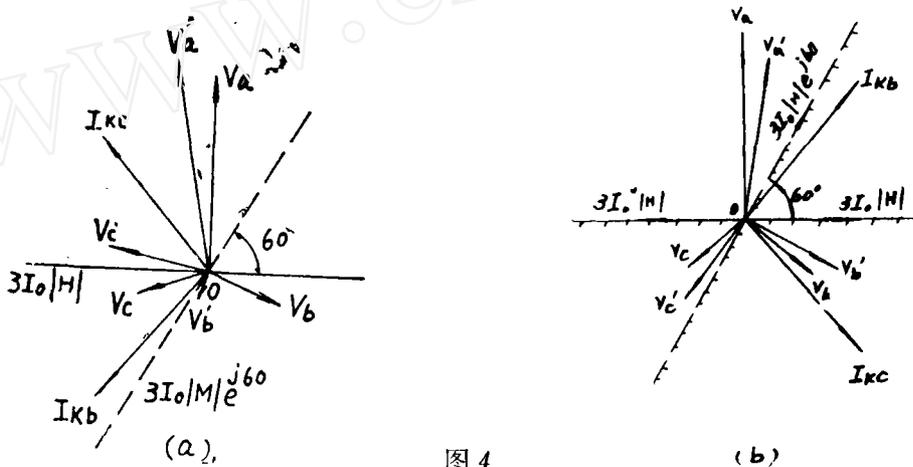


图 4

当图 3, (a) 发生 BC 两相金属性接地时的向量图如图 4、(b) 所示。对以 V_D 为基准电压的测量元件, V_a' 落在制动区内, V_b' 、 V_c' 落在动作区内, 测量元件不会失去方向性; 对以 V_D' 为基准电压的测量元件, V_a' 、 V_c' 落在制动区内, V_b' 落在动作区内, 测量元件同样地不会失去方向性。

综上所述, 正方向接地时, 测量元件能正确测量接地点; 反方向接地时, 不会失去方向性。

应该指出, 正常情况下发生对称振荡、过负荷、交流电压回路断线, 由于不存在零序电流分量, 特别在前两种情况下, 三个被比较电压又总是处在互差 120° 的相位上, 所以测量元件不可能误动。

(2) 实现测量元件的逻辑方框

为使测量元件能正确反应单相和两相接地, 测量元件应具有两个判别电路, 其一是以 V_b 作为基准电压, 主要用以反应单相接地; 其二是以 $V_{b'}$ 作为基准电压, 主要用以反应两相接地。两判别电路经“或”门输出, 如图5、(a)所示。图5、(b)示出判别电路的逻辑方框。

为减少测量元件的交流铁芯数量, 基准电压 V_b 与 $V_{b'}$ 合用一个交流输入回路, 即 $3I_0$ 输入后产生电压为 $3I_0 |H| e^{j0^\circ}$, 经“波形变换”后的矩形脉冲送入“脉冲延迟”电路。对工作频率为50周而言, 延迟时间为3.3毫秒, 这就相当于获得电压为 $3I_0 |H|$ 所建立的矩形脉冲。运用这两者的矩形脉冲波去控制“判别电路”中的“传输门”。

如前所述, 在系统对称振荡时, 测量元件不反应。但在系统出现纵向或横向不对称且伴随系统振荡时, 在一定电势摆角下测量元件可能动作(参见以下第(三)之(7)节), 为此在基准电压的脉冲形成回路中应设置“鉴别阀”电路, 其动作值理应大于上述情况下分流到本测量元件的三倍零序电流值。“鉴别阀”可由鉴幅和脉冲鉴宽环节构成, 后者用以提高其抗干扰能力。

被比较电压 $V_{c'}$ 、 $V_{c''}$ 、 $V_{c''}$ 分别由各自的“电压形成”回路形成, 然后经“滤波”、“波形变换”、“微分”环节获得尖脉冲, 通过“传输门”送入“计数器”电路(二进制计数代码11), 再经“脉冲展宽”去推动下一级, 从而实现计数原理的相位判别电路。

在保护区内接地时, “传输门”开放时间内通过三个补偿电压形成的尖脉冲, “计数器”给出输出信号; 在保护区外或反方向接地时, 计数触发的脉冲数必然小于3, “计数器”没有输出, 测量元件不动作。

最后指出, 在双回路具有零序互感影响时, 可接入邻线三倍零序电流对互感阻抗 Z_m 予以补偿, 使之测量元件仍反应接地点至安装处的等值正序阻抗。为了防止测量元件瞬时动作段可能发生的超越误动, 对架空地线上感应电流的影响以及相邻一回线断开并两侧接地时感应电流的影响, 都通过本线零序电流补偿系数 K 值进行补偿。

(三) 测量元件在各种状态下工作行为的分析

为了取得比较明晰的定性和定量分析结果, 本文运用张旭俊同志提出的在短路阻抗复平面上分析单系统阻抗元件动作特性的方法。在此只列出最终结果解析式, 有关推导可参见附录。

众所周知, 电网各种可能出现的因素同时加以考虑, 势必导致解析式十分繁复, 而不能引出必要的概念性结果。为此对这些可能因素给予分别探讨, 以加深对本测量元件工作行为的理解和认识是必要的。推导过程中作了某些实用上的假定, 主要是:

$$\text{正、负序阻抗 } Z_1 = Z_2$$

$$\text{零序阻抗 } Z_0 = nZ_1 \quad (n \text{ 为正实数})$$

$$\text{线路两侧等值电源电势的模数 } |E'| = |E''|, \text{ 幅角差 } \text{Arg}\left(\frac{E'}{E''}\right) = 0$$

线路负荷电流 $I_L = 0$

除个别场合专门探讨某一因素的影响时，予以单独说明外，其余均遵循上述假定。

如前已述，测量元件的工作可单独分析各相（三只）的相比器动作特性，然后运用逻辑积确定其实际动作范围和制动范围，探讨其工作性能。

(1) 正向经过渡阻抗接地

等值系统接线如图 6 所示。

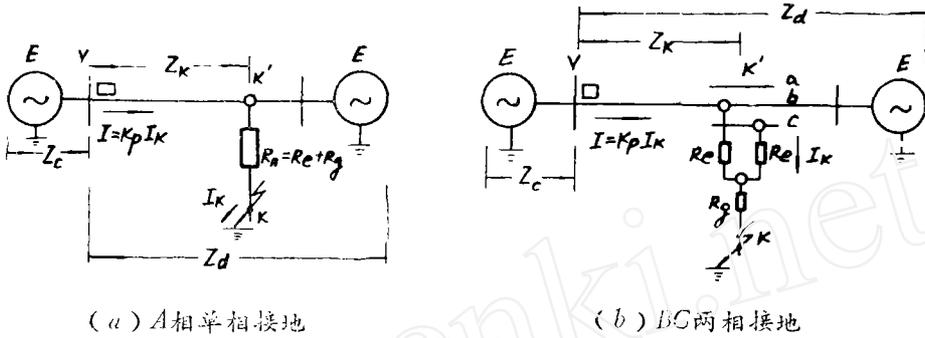


图 6

a、A相单相接地

$$V_a' = (2+n)(Z_k + |Z_c| a) I_k + 3R_n I_k$$

$$V_b' = (2+n)a^2 \left[Z_k + Z_c - \frac{n-1}{n+2} a(Z_c + |Z_y| a) \right] I_k + 3R_n a^2 I_k$$

$$V_c' = (2+n)a \left[Z_k + Z_c - \frac{n-1}{n+2} a^2(Z_c + |Z_y| a) \right] I_k + 3R_n a I_k$$

$$V_D = 3I_k |H|$$

$$V_E' = 3I_k |H| e^{0^\circ}$$

引入零序电流分支系数 K_{p0} 后，三个相比器的特征向量分别为

$$F_{Va} = \frac{V_a'}{V_D} = \frac{2+n}{3|H|} \left[Z_k + |Z_y| a + \frac{3R_n}{(n+2)K_{p0}} \right] = \frac{2+n}{3|H|} [Z_k - K_p]$$

$$F_{Vb} = \frac{V_b'}{V_D} = \frac{2+n}{3|H|} a^2 \left[Z_k + Z_c - \frac{n-1}{n+2} a(Z_c + |Z_y| a) + \frac{3R_n}{(n+2)K_{p0}} \right]$$

$$= \frac{2+n}{3|H|} a^2 [Z_k - M_p]$$

$$F_{Vc} = \frac{V_c'}{V_D} = \frac{2+n}{3|H|} a \left[Z_k + Z_c - \frac{n-1}{n+2} a^2(Z_c + |Z_y| a) + \frac{3R_n}{(n+2)K_{p0}} \right]$$

$$= \frac{2+n}{3|H|} a [Z_k - N_p]$$

其中 $K_p = |Z_y| a - \frac{3R_n}{(n+2)K_{p0}} = K - \frac{3R_n}{(n+2)K_{p0}}$

$$M_p = -Z_c + \frac{n-1}{n+2} a(Z_c + |Z_y| a) - \frac{3R_n}{(n+2)K_{p0}} = M - \frac{3R_n}{(n+2)K_{p0}}$$

$$N_n = -Z_c + \frac{n-1}{n+2} a^2 (Z_c + |Z_y| a) - \frac{3R_n}{(n+2)K_{po}} = N - \frac{3R_n}{(n+2)K_{po}}$$

或 $F_{D'a'} = \frac{V_{a'}}{V_{D'}} = \frac{2+n}{3|H|} e^{-i60^\circ} [Z_k - Z_n]$

$$F_{D'b'} = \frac{V_{b'}}{V_{D'}} = -\frac{2+n}{3|H|} [Z_k - M_n]$$

$$F_{D'c'} = \frac{V_{c'}}{V_{D'}} = \frac{2+n}{3|H|} e^{i60^\circ} [Z_k - N_n]$$

由于特征向量 F 的动作范围是当其幅角处在 $0^\circ \rightarrow (-180^\circ)$ ，故在短路阻抗 Z_k 的复平面上相比器的动作特性系一直线，如图 7 所示。划斜线的部分为其动作区，其余部分为制动区，图中虚线表示金属性接地，实线表示经过渡阻抗接地。以下同此，不另说明。

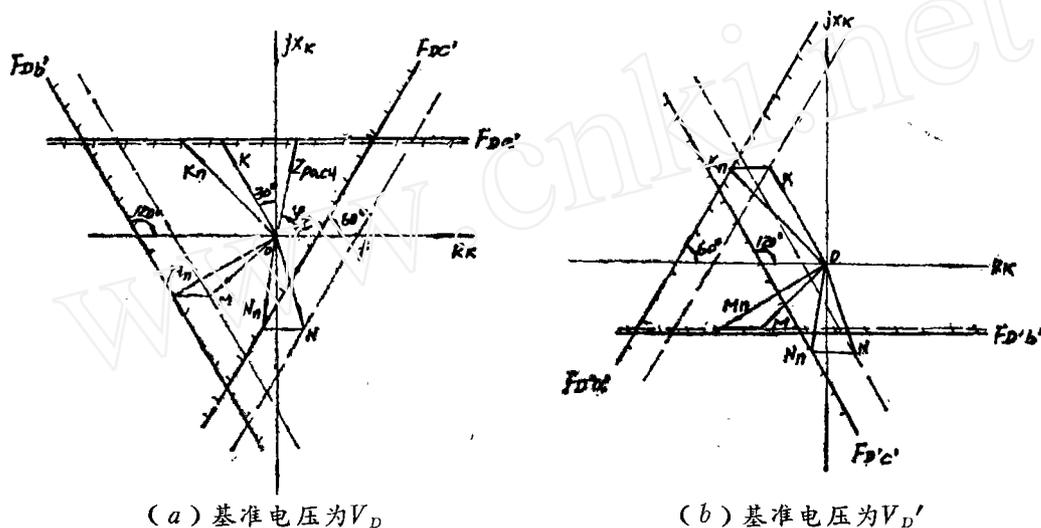


图 7

从图 7，(a) 看出，划斜线的三角形面积系测量元件的动作区，接地故障相的相比器工作特性起控制测量的作用，越前相的相比器工作特性起限制过渡电阻的作用，而保护范围的计算阻抗 Z_{pac} 末端恰好落在故障相的工作特性上。换言之，测量元件的动作范围就等于计算阻抗 Z_{pac} 。显然，在短路阻抗复平面上，如线路没有串联电容补偿装置，则第二、三、四象限都没有实际意义，但它说明这种测量元件不存在出口死区。测量元件的工作特性相当于有限制的电抗型特性。

当 K' 点发生理想金属性接地时，过渡电阻 $R_k = 0$ ，这相当于 $F_{Da'}$ 的特性不变， $F_{Db'}$ 和 $F_{Dc'}$ 的特性朝 $+R_k$ 轴平移 $\frac{3R_n}{(n+2)K_{po}}$ 。此时，特性直线 $F_{Dc'}$ 与 $+R_k$ 轴的交点距离为

$$\overline{of} = -R_k + \frac{n}{n+2} \sqrt{3} X_c + \frac{n-1}{n+2} |Z_y|$$

一般等值电源的等值阻抗 Z_c 总是具有感性特性，且 $X_c > R_c$ 。对短线来说， $|Z_y|$ 又不

大，故线段 \overline{of} 主要决定于测量元件安装处背侧等值电源的电抗值，这对反应接地点电弧电阻分量是极有利的。

从图7，(b)看出，经过渡阻抗接地时，测量元件没有正向动作区；金属性接地时，一般也没有正向动作区，个别场合下可能出现缩短正向动作区的情况。

b. BC两相接地

$$\begin{aligned} V_{a'} &= -(2n+1) \left[Z_K + \frac{3n}{2n+1} Z_C + \frac{n-1}{2n+1} |Z_Y| a \right] I_0 - \frac{3(Re+2Rg)}{Kp_0} I_0 \\ V_{b'} &= -(2n+1) a^2 \left[Z_K - |Z_Y| a \right] I_0 + \frac{3(Re+2Rg) + j\sqrt{3}(2n+1)Re}{2Kp_0} I_0 \\ V_{c'} &= -(2n+1) a \left[Z_K - |Z_Y| a \right] I_0 + \frac{a^2}{2Kp_0} \{ 3(nRe-Rg) + j\sqrt{3} [(n+2)Re + 3Rg] \} I_0 \end{aligned}$$

三个相比器的特征向量分别为

$$\begin{aligned} F_{D'a'} &= \frac{V_{a'}}{V_{D'}} = -\frac{2n+1}{3|H|} e^{-j60^\circ} \left\{ Z_K + \frac{3n}{2n+1} Z_C + \frac{n-1}{2n+1} |Z_Y| a + \frac{3(Re+2Rg)}{(2n+1)Kp_0} \right\} = -\frac{2n+1}{3|H|} e^{-j60^\circ} [Z_K - K'n] \\ F_{D'b'} &= \frac{V_{b'}}{V_{D'}} = \frac{2n+1}{3|H|} \left\{ Z_K - |Z_Y| a - \frac{3(Re+2Rg) + j\sqrt{3}(2n+1)Re}{2(2n+1)Kp_0} e^{j120^\circ} \right\} = \frac{2n+1}{3|H|} [Z_K - M'n] \\ F_{D'c'} &= \frac{V_{c'}}{V_{D'}} = -\frac{2n+1}{3|H|} e^{j60^\circ} \left\{ Z_K - |Z_Y| a - \frac{3(nRe-Rg) + j\sqrt{3}[(n+2)Re+3Rg]}{2(2n+1)Kp_0} e^{j120^\circ} \right\} = -\frac{2n+1}{3|H|} e^{j60^\circ} [Z_K - N'n] \end{aligned}$$

其中 $K'n = - \left[\frac{3n}{2n+1} Z_C + \frac{n-1}{2n+1} |Z_Y| a \right] - \frac{3(Re+2Rg)}{(2n+1)Kp_0} = K' - \frac{3(Re+2Rg)}{(2n+1)Kp_0}$

$$\begin{aligned} M'n &= |Z_Y| a + \frac{3(Re+2Rg) + j\sqrt{3}(2n+1)Re}{2(2n+1)Kp_0} e^{j120^\circ} \\ &= M' + \frac{3(Re+2Rg) + j\sqrt{3}(2n+1)Re}{2(2n+1)Kp_0} e^{j120^\circ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N'n &= |Z_Y| a + \frac{3(nRe-Rg) + j\sqrt{3}[(n+2)Re+3Rg]}{2(2n+1)Kp_0} e^{j120^\circ} \\ &= N' + \frac{3(nRe-Rg) + j\sqrt{3}[(n+2)Re+3Rg]}{2(2n+1)Kp_0} e^{j120^\circ} \end{aligned}$$

或

$$\begin{aligned} F_{Da'} &= \frac{V_{a'}}{V_D} = -\frac{2n+1}{3|H|} [Z_K - K'n] \\ F_{Db'} &= \frac{V_{b'}}{V_D} = \frac{2n+1}{3|H|} e^{j60^\circ} [Z_K - M'n] \\ F_{Dc'} &= \frac{V_{c'}}{V_D} = -\frac{2n+1}{3|H|} a [Z_K - N'n] \end{aligned}$$

在短路阻抗复平面上的动作特性如图 8 所示。

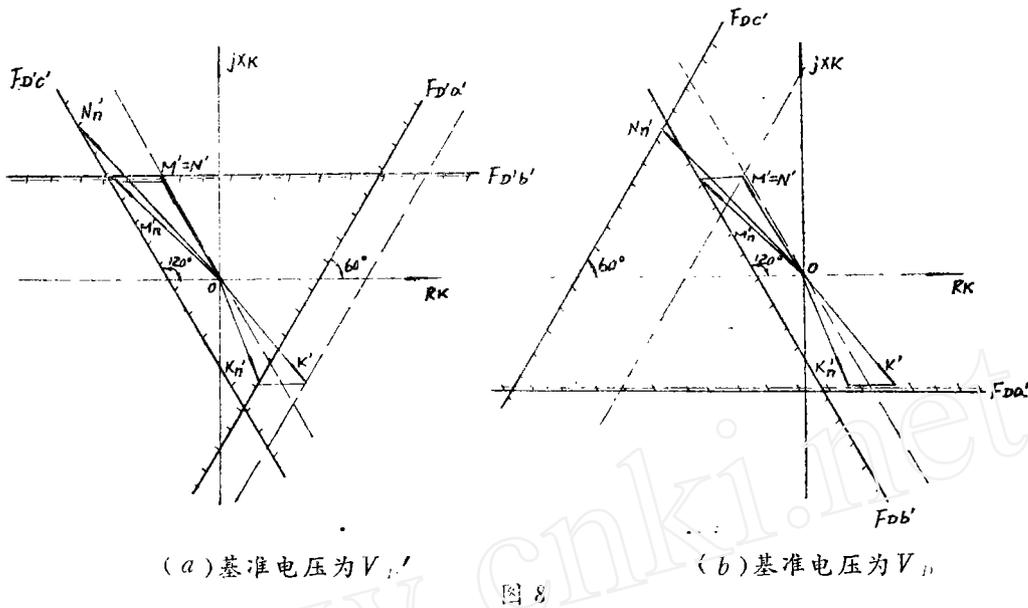


图 8

分析图 8(a) 可以看出, 理想金属性两相接地时, 对非故障相的相比器 $F_{D'a'}$, 其动作特性将比经过渡阻抗的动作特性在 $+R_K$ 轴上增大 $\frac{3(Re + 2Rg)}{2(2n + 1)K_{po}}$, 故障越前相的相比器 $F_{D'b'}$ 动作特性决定测量元件的保护区不变, 仍为计算阻抗 Z_{pac} 。但在具有过渡阻抗接地时, 保护区可能伸长或短缩, 只有当 $3Rg = (n - 1)Re$ 的特定条件下保护区不变。分析 M_n' 向量的第二项组成部分不难看出, $\left[\frac{3(Re + 2Rg)}{2(2n + 1)K_{po}} a \right]$ 是与 $|Z_r| a$ 同相, 它将导致保护区增长; $\left[\frac{\sqrt{3}Re}{2K_{po}} e^{j210^\circ} \right]$ 是越前 $|Z_r| a$ 向量为 90° , 它将导致保护区缩短。上述向量关系如图 9 所示。

保护区增长的条件为

$$\frac{3(Re + 2Rg)}{2(2n + 1)K_{po}} \cos 30^\circ > \frac{\sqrt{3}Re}{2K_{po}} \cos 60^\circ$$

即 $3Rg > (n - 1)Re$

同理, 保护区缩短的条件为: $3Rg < (n - 1)Re$, 所以 Rg 的影响是使保护区增长, Re 的影响是使保护区缩短。

对测量元件瞬时动作段, 一般 Re 不大, 为防止超越误动, 应力求减小 Rg 值, 例如采用铝包钢线作为架空地线。对短线路而言, 所增造价不致过大。地线用铝包钢线比之钢线的 Rg 值大约可降低 3 倍。对带时限动作段, 由于电弧电阻 R_c 逐渐增大, 保护区缩短是可能的, 这在灵

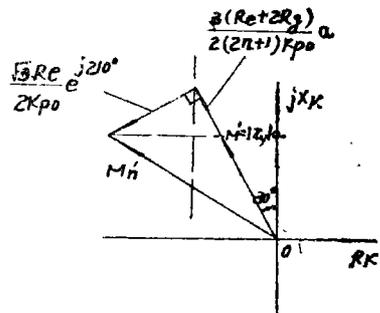


图 9

敏度校验中已经计及, 不会造成严重后果。

对故障滞后相的相比器 $F_{l'}c'$, 从 Nn' 向量的第二项组成部分

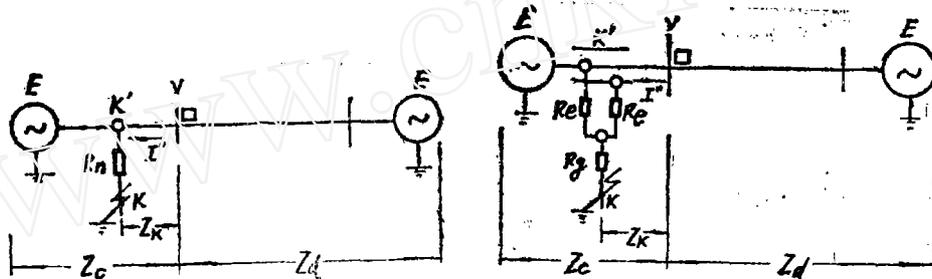
$$\frac{3(nRe - Rg) + j\sqrt{3}[(n+2)Re + 3Rg]}{2(2n+1)Kpo}$$

看出, 当 $nRe \geq Rg$ 时均呈感性阻抗; $nRe = Rg$ 时为纯感抗。一般说来, 其幅角落在 $0^\circ \rightarrow 90^\circ$ 间, 所以 Re 和 Rg 的存在都是导致使 $F_{l'}c'$ 的动作特性通过复平面的第三象限, 使测量元件没有出口死区, 这点至为重要。因为被保护线路发生两相接地时, 即使 $Re = 0$, 但 Rg 必然存在, 所以实用上不可能出现两相接地出口拒动的现象。

对理想金属性两相接地, $Re = Rg = 0$, 相比器 $F_{l'}c'$, 动作特性穿过复平面的坐标原点, 如图8、(a)中虚线所示。

由图8、(b)看出, 无论经过渡阻抗或理想金属性两相接地, 测量元件都没有正向动作区。

(2) 反向经过渡阻抗接地
等值系统接线如图10所示。



(a) A相单相接地

图10

(b) BC两相接地

a A相单相接地

$$V'a = (2+n)(Z_k + |Z_l| a) I_0'' + \frac{3Rn}{Kpo} I_0''$$

$$V'b = (2+n)a^2 \left[Z_k + Z_d - \frac{n-1}{n+2} a (Z_d - |Z_l| a) \right] I_0'' + \frac{3Rn}{Kpo} a^2 I_0''$$

$$Vc' = (2+n)a \left[Z_k + Z_d - \frac{n-1}{n+2} a^2 (Z_d - |Z_l| a) \right] I_0'' + \frac{3Rn}{Kpo} a I_0''$$

$$V_D = -3 I_0'' |H|$$

$$V_{D'} = -3 I_0'' |H| e^{j60^\circ}$$

三个相比器的特征向量分别为

$$F_{l'a'} = \frac{V'a'}{V_D} = -\frac{2+n}{3|H|} \left[Z_l + |Z_l| a + \frac{3Rn}{(n+2)Kpo} \right] = -\frac{2+n}{3|H|} \left[Z_l - K_{\Gamma} n \right]$$

$$F_{l'b'} = \frac{V'b'}{V_D} = -\frac{2+n}{3|H|} a^2 \left[Z_l + Z_d - \frac{n-1}{n+2} a (Z_d - |Z_l| a) + \frac{3Rn}{(n+2)Kpo} \right]$$

$$= -\frac{2+n}{3|H|} a^2 [Z_k - M_{\Gamma} n]$$

$$F_{Dc'} = \frac{V_{c'}}{V_D} = -\frac{2+n}{3|H|} a \left[Z_k + Z_d - \frac{n-1}{n+2} a^2 (Z_d - |Z_Y| a) + \frac{3Rn}{(n+2)K_{po}} \right]$$

$$= -\frac{2+n}{3|H|} a [Z_k - N_{rn}]$$

$$\text{其中 } K_{rn} = -|Z_Y| a - \frac{3Rn}{(n+2)K_{po}} = K_r - \frac{3Rn}{(n+2)K_{po}}$$

$$M_{rn} = -Z_d + \frac{n-1}{n+2} a (Z_d - |Z_Y| a) - \frac{3Rn}{(n+2)K_{po}} = M_r - \frac{3Rn}{(n+2)K_{po}}$$

$$N_{rn} = -Z_d + \frac{n-1}{n+2} a^2 (Z_d - |Z_Y| a) - \frac{3Rn}{(n+2)K_{po}}$$

$$= N_r - \frac{3Rn}{(n+2)K_{po}}$$

$$\text{或 } F_{D'a'} = \frac{V_{a'}}{V_{D'}} = \frac{2+n}{3|H|} e^{j120^\circ} [Z_k - K_{rn}]$$

$$F_{D'b'} = \frac{V_{b'}}{V_{D'}} = \frac{2+n}{3|H|} [Z_k - M_{rn}]$$

$$F_{D'c'} = \frac{V_{c'}}{V_{D'}} = \frac{2+n}{3|H|} e^{-j120^\circ} [Z_k - N_{rn}]$$

在短路阻抗复平面上的动作特性如图11所示。

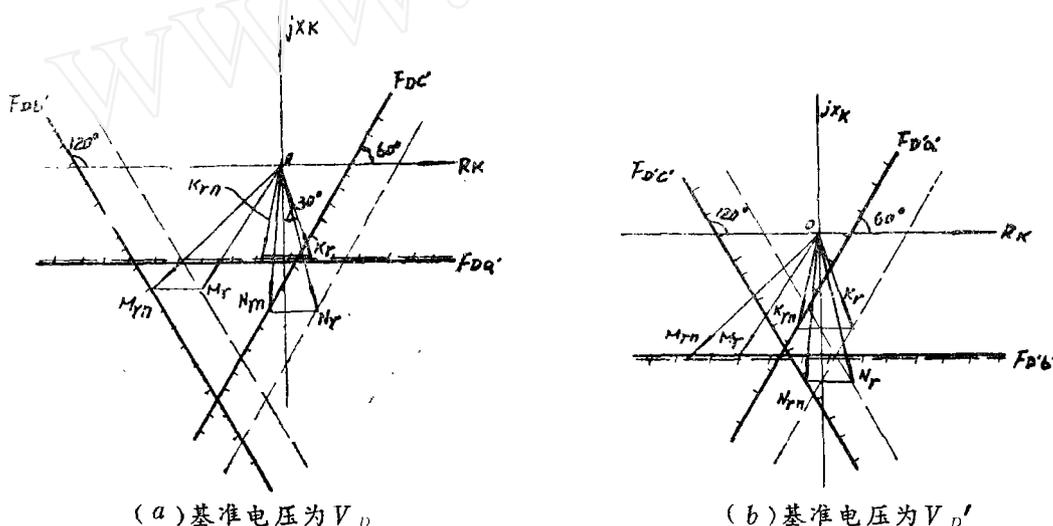


图11

从图11, (a)看出, 经过渡阻抗接地与理想金属性接地时, 相比器 $F_{D'a'}$ 的动作特性不变, $F_{D'b'}$ 和 $F_{D'c'}$ 的动作特性在 R_k 轴上相差 $\frac{3Rn}{(n+2)K_{po}}$, 但在复平面上没有任何一点能使三个相比器同时处于动作状态。显然在反方向接地时, 短路阻抗 Z 只能落在第一象限或第四象限(经串联电容补偿装置时)内, 所以测量元件工作具有方向性, 对反方向单相接地不会失去方向性。

同理,从图11, (b)看出,测量元件对反方向单相接地绝不会失去方向性。

b、BC两相接地

$$V_{a'} = -(2n+1) \left[Z_k + \frac{3n}{2n+1} Z_d - \frac{n-1}{2n+1} |Z_Y| a \right] I_0'' - \frac{3(Re+2Rg)}{K_{po}} I_0''$$

$$V_{b'} = -(2n+1) a^2 [Z_k + |Z_Y| a] I_0'' + \frac{3(Re+2Rg) + j\sqrt{3}(2n+1)Re}{2K_{po}} I_0''$$

$$V_{c'} = -(2n+1) a [Z_k + |Z_Y| a] I_0'' + \frac{3(nRe-Rg) + j\sqrt{3}[(n+2)Re+3Rg]}{2K_{po}} a^2 I_0''$$

三个相量器的特征向量分别为

$$F_{D'a'} = \frac{V_{a'}}{V_{D'}} = \frac{2n+1}{3|H|} e^{-j60^\circ} \left[Z_k + \frac{3n}{2n+1} Z_d - \frac{n-1}{2n+1} |Z_Y| a + \frac{3(Re+2Rg)}{(2n+1)K_{po}} \right] = \frac{2n+1}{3|H|} e^{-j60^\circ} [Z_k - K'rn]$$

$$F_{D'b'} = \frac{V_{b'}}{V_{D'}} = -\frac{2n+1}{3|H|} [Z_k + |Z_Y| a - \frac{3(Re+2Rg) + j\sqrt{3}(2n+1)Re}{2(2n+1)K_{po}} a]$$

$$= -\frac{2n+1}{3|H|} [Z_k - M'rn]$$

$$F_{D'c'} = \frac{V_{c'}}{V_{D'}} = \frac{2n+1}{3|H|} e^{j60^\circ} \left[Z_k + |Z_Y| a - \frac{3(nRe-Rg) + j\sqrt{3}[(n+2)Re+3Rg]}{2(2n+1)K_{po}} a \right] = \frac{2n+1}{3|H|} e^{j60^\circ} [Z_k - N'rn]$$

其中 $K'rn = \frac{3n}{2n+1} Z_d + \frac{n-1}{2n+1} |Z_Y| a - \frac{3(Re+2Rg)}{(2n+1)K_{po}} = K'_{r} - \frac{3(Re+2Rg)}{(2n+1)K_{po}}$

$$M'rn = -|Z_Y| a + \frac{3(Re+2Rg) + j\sqrt{3}(2n+1)Re}{2(2n+1)K_{po}} a =$$

$$M'_{r} + \frac{3(Re+2Rg) + j\sqrt{3}(2n+1)Re}{2(2n+1)K_{po}} a$$

$$N'rn = -|Z_Y| a + \frac{3(nRe-Rg) + j\sqrt{3}[(n+2)Re+3Rg]}{2(2n+1)K_{po}} a =$$

$$N'_{r} + \frac{3(nRe-Rg) + j\sqrt{3}[(n+2)Re+3Rg]}{2(2n+1)K_{po}} a$$

或 $F_{D'a'} = \frac{V_{a'}}{V_{D'}} = \frac{2n+1}{3|H|} [Z_k - K'rn]$

$$F_{D'b'} = \frac{V_{b'}}{V_{D'}} = \frac{2n+1}{3|H|} a^2 [Z_k - M'rn]$$

$$F_{D'c'} = \frac{V_{c'}}{V_{D'}} = \frac{2n+1}{3|H|} a [Z_k - N'rn]$$

在短路阻抗复平面上的动作特性如图12所示。

从图12, (a)看出,反向经过渡阻抗两相接地时,故障滞后相的相量器 $F_{D'c'}$ 实际起到闭锁作用,保证短路阻抗落在第一象限内时,不会失去方向性。在理想金属性反向

两相接地时，相比器 F_{bc}' 的动作特性恰好通过坐标原点，即使接地点位在反向出口，处于临界动作状态，测量元件也不会误动。

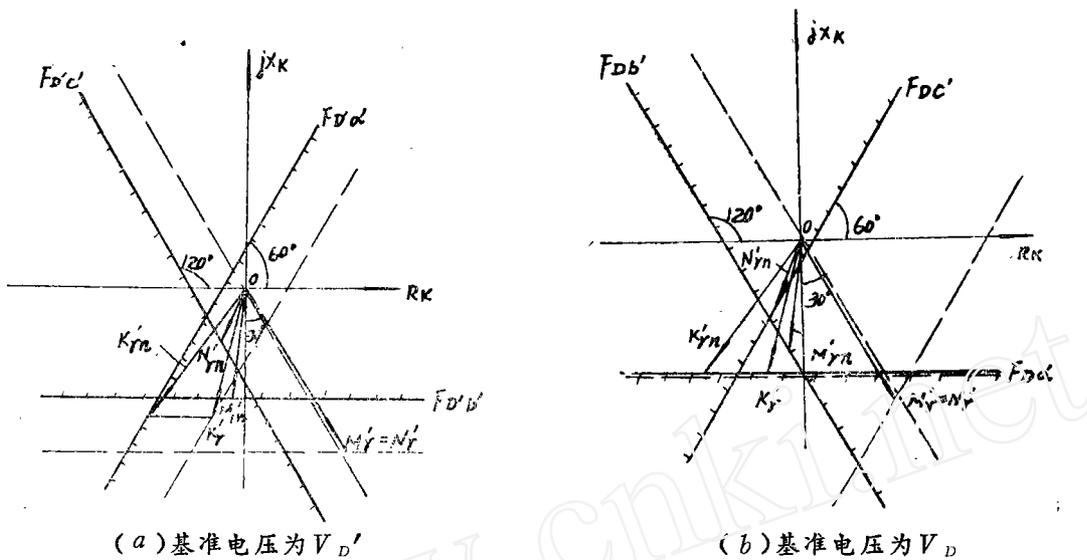


图12

应该指出，在实际系统中发生两相接地时，等值接地电阻 R_g 总是存在的，所以测量元件不可能工作在临界动作状态，而总是处在制动状态。

图12, (b)同样说明类似情况，反向金属性或经过渡阻抗两相接地时，非故障相的相比器 F_{bc}' 实际起闭锁作用，保证测量元件不会失去方向性。

综上所述可得出如下结论：无论是金属性或经过渡阻抗接地，测量元件均能比较理想地反应接地点距离，只是当基准电压为 V_D' 且经过渡阻抗正向两相接地时，测量元件动作区的大小取决于 R_c 与 R_g 的数值关系。在 $R_c = \frac{3}{n-1}R$ 时，保护区不变。 R_c 的影响是使保护区缩短， R_g 的影响是使保护区增长。对反方向接地，测量元件具有方向性，接地点的过渡阻抗将进一步提高测量元件避越反向接地的可靠性。

在此补充说明一下采用 $|Z|a$ 向量进行补偿的必要性。如按经典补偿法原则，对被比较量以 $(I_b + K 3 I_0)Z_{bc}$ 进行补偿，而基准量为 I_0 时，则在两相接地故障下反应过渡阻抗的能力很差；当基准量为 $I_0 e^{j60^\circ}$ 时，上述情况下将出现较大范围的正向金属性两相接地死区。当将 Z_{bc} 改为 $|Z_r|a$ ，即按幅角 120° 的阻抗进行补偿，便可消除这种正向两相接地死区，使测量元件的动作特性穿过短路阻抗复平面的原点。应该看到，单纯从消除两相接地死区来说，幅角取为大于 120° 更为有利，但这必将导致反向两相接地失去方向性，所以是不可取的。

(3) 系统参数中零序阻抗与正序阻抗比值不等的的影响。

以上分析均假定系统参数中各元件的零序阻抗与正序阻抗比值 n 都相同，实际系统中是不可能的。为此，有必要讨论其比值各各不同时对测量元件动作特性的影响。

现以正向单相金属性接地为例, 讨论基准量为 I_0 的工作行为。系统等值接线如图 13 所示, 图中带括号者表示零序阻抗。

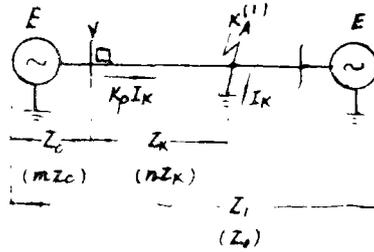


图 13

$$V_{a'} = \left(\frac{2K_{p1}}{K_{p0}} + n \right) (Z_K - |Z_Y| a) I_0$$

$$V_{b'} = \left(\frac{2K_{p1}}{K_{p0}} + n \right) a^2 \left[Z_K + \frac{(2+a) \frac{K_{p1}}{K_{p0}} + m(1-a)}{\frac{2K_{p1}}{K_{p0}} + n} Z_C + \frac{\left(\frac{K_{p1}}{K_{p0}} - n \right) |Z_Y| a^2}{\frac{2K_{p1}}{K_{p0}} + n} \right] I_0$$

$$V_{c'} = \left(\frac{2K_{p1}}{K_{p0}} + n \right) a \left[Z_K + \frac{(2+a^2) \frac{K_{p1}}{K_{p0}} + m(1-a^2)}{\frac{2K_{p1}}{K_{p0}} + n} Z_C + \frac{\left(\frac{K_{p1}}{K_{p0}} - n \right) |Z_Y|}{\frac{2K_{p1}}{K_{p0}} + n} \right] I_0$$

$$V_D = 3 I_0 |H|$$

三个相比器的特征向量分别为

$$F_{Da'} = \frac{V_{a'}}{V_D} = \frac{\frac{2K_{p1}}{K_{p0}} + n}{3 |H|} [Z_K - |Z_Y| a]$$

$$F_{Db'} = \frac{V_{b'}}{V_D} = \frac{\frac{2K_{p1}}{K_{p0}} + n}{3 |H|} a^2 \left[Z_K + \frac{(2+a) \frac{K_{p1}}{K_{p0}} + m(1-a)}{\frac{2K_{p1}}{K_{p0}} + n} Z_C + \frac{\left(\frac{K_{p1}}{K_{p0}} - n \right) |Z_Y| a^2}{\frac{2K_{p1}}{K_{p0}} + n} \right]$$

$$= \frac{\frac{2K_{p1}}{K_{p0}} + n}{3 |H|} a^2 [Z_K - M_{nc} - M'_{nc}]$$

$$F_{Dc'} = \frac{V_{c'}}{V_D} = \frac{\frac{2K_{p1}}{K_{p0}} + n}{3 |H|} a \left[Z_K + \frac{(2+a^2) \frac{K_{p1}}{K_{p0}} + m(1-a^2)}{\frac{2K_{p1}}{K_{p0}} + n} Z_C + \frac{\left(\frac{K_{p1}}{K_{p0}} - n \right) |Z_Y|}{\frac{2K_{p1}}{K_{p0}} + n} \right]$$

$$= \frac{\frac{2K_{p1}}{K_{p0}} + n}{3 |H|} a [Z_K - N_{nc} - N'_{nc}]$$

分析 $F_{Da'}$ 不难看出, 控制测量元件动作范围的 $F_{Da'}$ 动作特性与 K_{p1} 和 K_{p0} 比值无关, 仍为通过 $|Z_Y| a$ 向量末端而与 R_k 轴平行的直线。在接地点位置变动时, $\frac{K_{p1}}{K_{p0}}$ 值总是正

实数, $F_{Db'}$ 和 $F_{Dc'}$ 等式的中括弧内第二项分母系数为正, 第三项主要取决于 $\frac{K_{p1}}{K_{p0}}$ 与 n 的关系。当 $\frac{K_{p1}}{K_{p0}} > n$ 时, 第三项分别相当于向量 $|J| a^2$ 和 $|J|$; 当 $\frac{K_{p1}}{K_{p0}} < n$ 时, 则相当于向量 $|J| e^{j60^\circ}$ 和 $|J| e^{j180^\circ}$; 在 $\frac{K_{p1}}{K_{p0}} = n$ 时, 第三项为零, 所以随着 $\frac{K_{p1}}{K_{p0}}$ 的增大, 向量 M_{nc} 将朝逆时针向旋转到向量 $(M_{nc} + M'_{nc})$ 的位置, 向量 N_{nc} 则朝顺时针向旋转到向量 $(N_{nc} + N'_{nc})$ 的位置, 因此 $F_{Db'}$ 和 $F_{Dc'}$ 的动作特性相对于 $\frac{K_{p1}}{K_{p0}} = n$ 时的特性朝复平面坐标原点平移 (如图14所示), 其结果是降低测量元件反应过渡阻抗的能力。反之, 随着 $\frac{K_{p1}}{K_{p0}}$ 的降低, 则提高了反应过渡阻抗的能力。

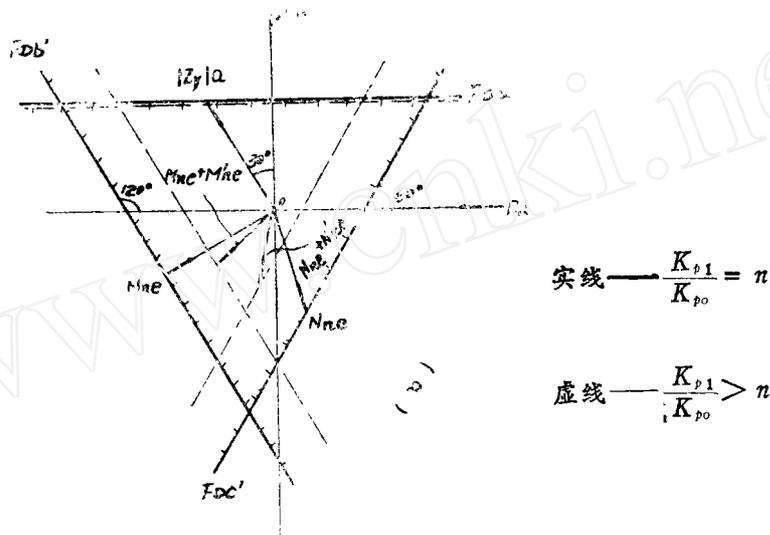


图14

(4) 对侧母线具有助增 (汲出) 电源的影响

为简化计, 现以单侧电源电网正向 A 相金属性接地, 分析 $F_{Dc'}$ 相比器的特性为例加以说明, 从中看出测量元件感受阻抗值, 以便相互配合整定用。系统等值接线如图15所示。

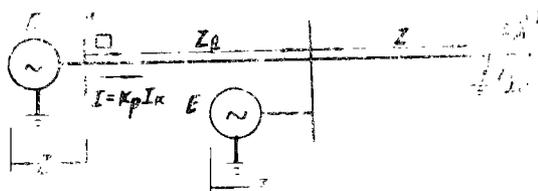


图15

$$V_{D'} = (2 + n) \left[Z_l + \frac{Z}{K_{r1}} - |Z_r| a \right] I_0$$

$$V_D = 3 I_0 |H|$$

所以
$$F_{Da}' = \frac{V_{a'}}{V_D} = \frac{2+n}{3|H|} \left[Z_l + \frac{Z}{K_{p1}} - |Z_Y| a \right] = \frac{2+n}{3|H|} [Z_K - |Z_Y| a]$$

其中
$$Z_K = Z_l + \frac{Z}{K_{p1}}$$

在短路阻抗复平面上， F_{Dc}' 的动作特性是通过向量 $|Z_Y| a$ 末端而与 R_k 轴平行的直线，测量元件感受阻抗 Z_K 末端落在动作直线上，恰好处于临界动作状态，所以测量元件的感受阻抗等于被保护线路阻抗 Z_l 与相邻被配合计算的阻抗 Z ，经电流分支系数归算所得阻抗之和，这表明这种测量元件的整定配合算法与经典算法相同。

(5) 具有旁路联系时的影响

假设旁路联系为双回线中的另一回线，两线路间不存在零序互感影响，等值系统接线如图16所示。

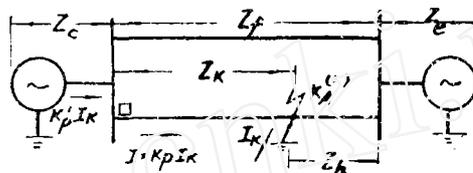


图16

$$V_{a'} = (2+n)(Z_K - |Z_Y| a) I_0$$

$$V_{b'} = (2+n)a^2 \left[Z_K + \frac{K_{p0}'}{K_{p0}} Z_C - \frac{(n-1)a}{n+2} \left(\frac{K_{p0}'}{K_{p0}} Z_C + |Z_Y| a \right) \right] I_0$$

$$V_{c'} = (2+n)a \left[Z_K + \frac{K_{p0}'}{K_{p0}} Z_C - \frac{(n-1)a^2}{n+2} \left(\frac{K_{p0}'}{K_{p0}} Z_C + |Z_Y| a \right) \right] I_0$$

$$V_D = 3 I_0 |H|$$

三个相比器的特征向量分别为

$$F_{Da}' = \frac{V_{a'}}{V_D} = \frac{2+n}{3|H|} (Z_K - |Z_Y| a)$$

$$F_{Db}' = \frac{V_{b'}}{V_D} = \frac{2+n}{3|H|} a^2 \left[Z_K + \frac{K_{p0}'}{K_{p0}} Z_C - \frac{(n-1)a}{n+2} \left(\frac{K_{p0}'}{K_{p0}} Z_C + |Z_Y| a \right) \right]$$

$$F_{Dc}' = \frac{V_{c'}}{V_D} = \frac{2+n}{3|H|} a \left[Z_K + \frac{K_{p0}'}{K_{p0}} Z_C - \frac{(n-1)a^2}{n+2} \left(\frac{K_{p0}'}{K_{p0}} Z_C + |Z_Y| a \right) \right]$$

分析看出相比器 F_{Da}' 的动作特性与 $\frac{K_{p0}'}{K_{p0}}$ 值无关，即测量元件动作范围不变。对相比器

F_{Db}' 和 F_{Dc}' 的动作行为可分以下三种情况讨论：

a. 在正向出口附近接地时， Z_l 支路中的电流流向测量元件安装侧母线，即 $\frac{K_{p0}'}{K_{p0}} < 1$ ，所以 F_{Db}' 和 F_{Dc}' 的动作特性直线分别朝着复平面坐标原点渐渐平移；

b. 在正向被保护线路对侧母线附近接地时， Z_l 支路中的电流流向对侧母线，即 $\frac{K_{p0}'}{K_{p0}} > 1$ ，所以 F_{Db}' 和 F_{Dc}' 的动作特性直线分别背离复平面坐标原点渐渐平移；

c. 在被保护线路上总能找到某一点接地时, Z_1 支路中的电流为零, 即 $\frac{K_{po}'}{K_{po}} = 1$, F_{Db}' 和 F_{Dc}' 的特性直线将介于上述两种情况之间, 如图17所示。

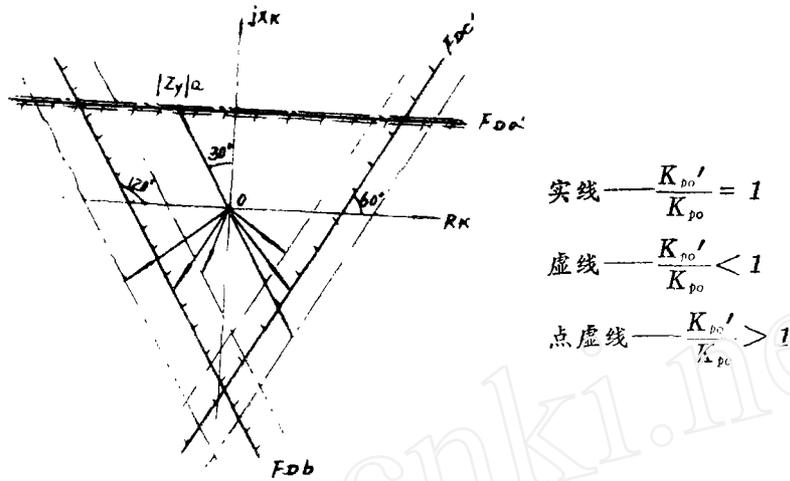


图17

由此看出, 随着 $\frac{K_{po}'}{K_{po}}$ 的减小, 测量元件反应过渡阻抗的能力降低; 反之, 则增高。所以在测量元件安装处出口附近接地时, 接地点容许的过渡电阻值相对地为最小。

(6) 负荷电流对测量元件工作的影响

实际运行中, 负荷功率可能出现四种情况, 从测量元件安装侧看, 可能是: a、送有功、送无功; b、受有功、受无功; c、送有功、受无功; d、受有功、送无功。情况 a 和 c 属于测量元件安装在送电侧; b 和 d 属于安装在受电侧。现以两侧电源等值系统被保护线路发生单相金属性接地为例, 分析起控制作用的故障相比器 F_{Dc}' 的工作行为。

系统等值接线如图18所示。

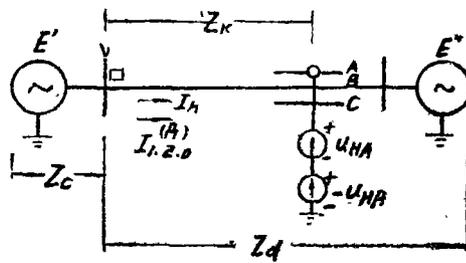


图18

运用重迭原理, 将接地前负荷状态迭加随之而来的事故状态, 可得被比较电压 V_a' 为

$$V_a' = [I_{HA} + (2 + n) I_0^{(\Pi)}] (Z_k - |Z| a)$$

因为负荷状态没有零序电流存在，所以基准电压 V_D 为

$$V_D = 3 I_0 |H| = 3 I_0^{(\pi)} |H|$$

相比器的特征向量为

$$F_{D_a'} = \frac{V_{a'}}{V_D} = \frac{1}{3 |H|} \left[\frac{I_{HA}}{I_0} + (2+n) \right] (Z_K - |Z_Y| a)$$

1. 一般短线群的网络，被保护线路末端接地时，流经测量元件的零序电流势将大于负荷电流， $\left| \frac{I_{HA}}{I_0} \right| \ll (2+n)$ ，这样 $F_{D_a'} \approx (2+n)(Z_K - |Z_Y| a)$ ，所以无论测量元件装在送电侧或受电侧，其保护范围基本不受负荷电流的影响。

2. 如测量元件安装侧等值电源的零序阻抗很大，致使 $|I_0| \ll |I_{HA}|$ ，则负荷电流将对测量元件的工作有一定影响。在此假设负荷的功率因数较高，且网络中各阻抗元件的阻抗角均为 φ_z 。以下讨论测量元件分别装在各侧时的工作情况。

a. 送电侧（送有功及无功）

其向量关系如图19(a)所示， I_{HA} 落在第四象限内，近似地可认为 $E_{A'}$ 、 I_{HA} 、 U_{HA} 接近同相，而 $I_0^{(\pi)}$ 近似地滞后 I_{HA} 为 φ_z 角，这样

$$F_{D_a'} \approx \frac{1}{3 |H|} \left| \frac{I_{HA}}{I_0} \right| e^{j\varphi_z} (Z_K - |Z_Y| a)$$

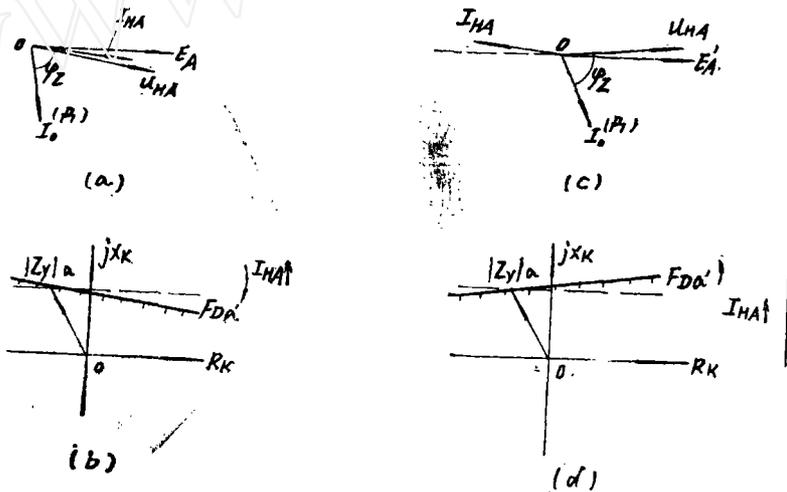


图19

在短路阻抗复平面上，相比器 $F_{D_a'}$ 的动作特性如图19，(b)所示，它将变为通过 $|Z_Y| a$ 向量末端而与 R_K 轴倾角为 $(180^\circ - \varphi_z)$ 的直线，直线左下方为动作区。为此，负荷电流 I_{HA} 的影响是使动作特性向顺时针向旋转，从而缩短了测量元件的正向动作区。

b. 受电侧（受有功及无功）

向量关系如图19，(c)所示， I_{HA} 落在第二象限内。近似地可认为 $E_{A'}$ 与 U_{HA} 接近同相，而 I_{HA} 接近反相，所以 I_{HA} 越前于 $I_0^{(\pi)}$ 约为 $(180^\circ + \varphi_z)$ 角，这样

$$F_{Da}' = \frac{I}{3 |H|} \left| \frac{I_{HA}}{I_0} \right| e^{j(180^\circ + \varphi_z)} (Z_k - |Z_Y| a)$$

相比器 F_{Da}' 的动作特性如图19, (d)所示, 它将变为通过 $|Z_Y| a$ 向量末端而与 R_k 轴倾角为 $(180^\circ - \varphi_z)$ 的直线, 直线右下方为动作区。为此, 负荷电流 I_{HA} 的影响是使动作特性向逆钟向旋转, 从而增长了测量元件的正向动作区。

c. 送电侧 (送有功, 受无功)

其向量关系如图20, (a)所示, I_{HA} 落在第一象限内。近似地可认为 $E_{A'}$ 、 I_{HA} 、 U_{HA} 接近同相, 而 $I_0^{(A)}$ 近似地滞后 I_{HA} 为 φ_z 角, 所以负荷电流 I_{HA} 的影响是与送有功及无功的送电侧特性类似。随着 I_{HA} 的增大, F_{Da}' 的动作特性将向顺钟向旋转, 使正向动作范围缩小。

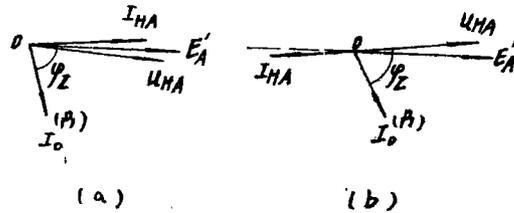


图20

d. 受电侧 (受有功, 送无功)

其向量关系如图20, (b)所示, I_{HA} 落在第三象限内。近似地可认为 $E_{A'}$ 与 U_{HA} 接近同相, 而 I_{HA} 接近反相, 所以负荷电流 I_{HA} 的影响是与受有功及无功的受电侧特性类似。随着 I_{HA} 的增大, F_{Da}' 的动作特性将向逆钟向旋转, 使正向动作范围增长。

综上所述分析看出, 当 $\left| \frac{I_{HA}}{I_0} \right| \ll (2+n)$ 时, 负荷电流的影响可以忽略, 测量元件的保护区不变。在 $\left| \frac{I_{HA}}{I_0} \right| \gg (2+n)$ 的情况下, 线路负荷电流对送电侧测量元件的影响是使其正向动作区缩短; 对受电侧测量元件, 则使其正向动作区增长。

(7) 金属性接地伴随系统振荡的影响

在此只讨论A相金属性接地伴随系统振荡时, 以 V_D 为基准量的测量元件工作行为。系统等值接线如图21所示, 假设 $E' = \frac{1}{P} E'' e^{j\delta}$, 即 $|E''| = P |E'| = P |E|$, E' 越前 E'' 的相角为 δ , 其中 P 为正实数。

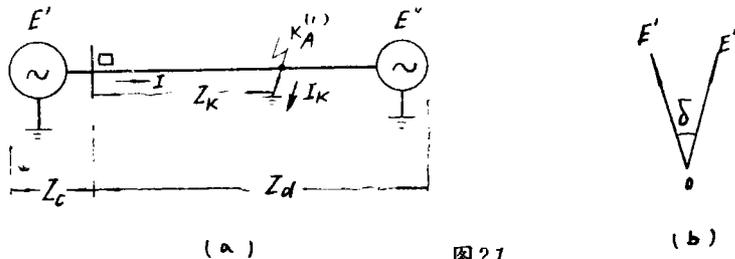


图21

测量元件的工作取决于三个相比器的逻辑积, 故可分别探讨各相比器的工作行为

a. A相的相比器

$$F_{Da}' = \frac{V_c'}{V_D} = \frac{2+n}{3 |H|} \left[1 + \frac{(Z_c + Z_k)(e^{j\delta} - P)}{(Z_d - Z_k)e^{j\delta} + P(Z_c + Z_k)} \right] (Z_k - |Z_Y| a)$$

令 $\frac{Z_c - Z_r}{Z_c + Z_k} = \lambda$ 在网络中各阻抗元件的阻抗角相等情况下, λ 为实数。于是

$$F_{D_a}' = \frac{(2+n)(\lambda+1)}{3|H|\lambda} (Z_k - |Z_r| a) \frac{e^{j\delta}}{e^{j\delta} + \frac{P}{\lambda}}$$

为简化计, 只讨论 $Z > Z_k$ 的情况, 亦即 λ 为正实数 ($\lambda > 0$), 当测量元件装在送电侧时, $0 < P < 1$; 装在受电侧时, $P > 1$ 。以下分保护区内(保护区末端)和保护区外接地两种情况分别讨论。

1. 保护区内接地

当 $|Z_k|$ 从 $0 \rightarrow |Z_{pcc}|$ 变化时, $(Z_k - |Z_r| a)$ 的幅角 φ 从 $(-60^\circ) \rightarrow 0^\circ$ 。

①保护区出口接地, 取 $\varphi = -60^\circ$ 。

令 $\beta = \frac{(2+n)(\lambda+1)}{3|H|\lambda} |Z_k - |Z_r| a|$, $B = \frac{P}{\lambda}$, 则

$$F_{D_a}' = \beta e^{-j60^\circ} \frac{e^{j\delta}}{e^{j\delta} - B}$$

因为特征向量 F_{D_a}' 的动作角为 $0^\circ \rightarrow (-180^\circ)$, 故 $\frac{e^{j\delta}}{e^{j\delta} - B}$

的动作角是 $60^\circ \rightarrow (120^\circ)$ 。在极坐标平面上, $\frac{e^{j\delta}}{e^{j\delta} - B}$ 的动

作特性是一圆, 数值 B 为其一条弦, 圆内是制动区, 圆外是动作区, 如图22所示。

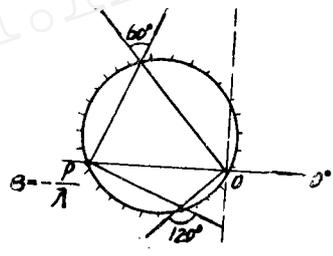


图22

因为 $Z_k = 0$, 故 $\lambda = \frac{Z_c}{Z_r}$, $|B| = \left| \frac{Z_c E''}{Z_r E'} \right|$ 。如两侧等值电势的模数偏离额定值为 5%, 则对送电侧测量元件, 其 $\left| \frac{E''}{E'} \right| = 0.9$, 对受电侧则为 $\left| \frac{E''}{E'} \right| = 1.1$, 所以 $|B| = (0.9 \sim 1.1) \left| \frac{Z_c}{Z_r} \right|$

(1) 当 $|Z_c| > \frac{1}{0.9 \sim 1.1} |Z_r|$ 时, $|B| > 1$, F_{D_a}' 的动作圆和 $e^{j\delta}$ 向量的变化轨迹如图23, (a)所示。当 $-\delta_2 > \delta > \delta_1$ 时, F_{D_a}' 被制动。

(2) 当 $|Z_c| < \frac{1}{0.9 \sim 1.1} |Z_r|$ 时, $|B| < 1$, F_{D_a}' 的动作圆和 $e^{j\delta}$ 向量的变化轨迹如图23, (b)所示。复数向量 $e^{j\delta}$ 末端不可能落进 F_{D_a}' 的制动区内, 所以 δ 处在 $0^\circ \rightarrow 360^\circ$ 范围内变化时, F_{D_a}' 决不会发生拒动。

b 保护区末端接地, 取 $\varphi = 0^\circ$, 则

$$F_{D_a}' = \beta \frac{e^{j\delta}}{e^{j\delta} - B}$$

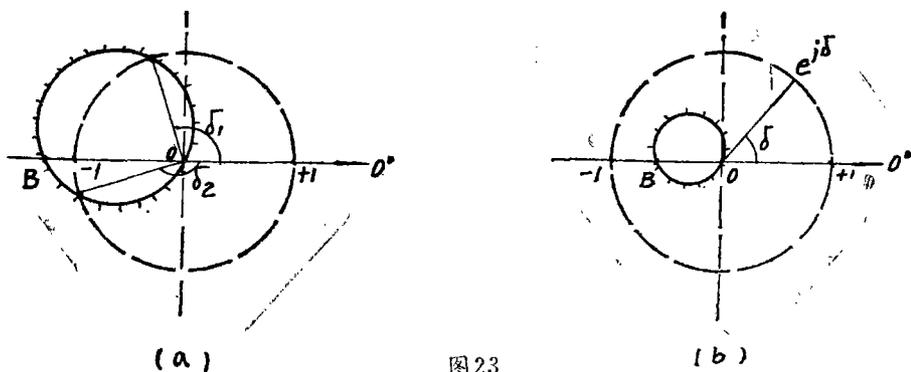


图23

这样 $\frac{e^{j\delta}}{e^{j\delta} - B}$ 的动作角是 $0^\circ \rightarrow (-180^\circ)$ 。在极坐标平面上， $\frac{e^{j\delta}}{e^{j\delta} - B}$ 的动作特性是通过原点与 B 点的一条直线，直线下部为动作区，上部为制动区，如图24所示。

$$\text{因为 } Z_K = Z_{poc} \varphi, \text{ 故 } \lambda = \frac{Z_d - Z_{poc} \varphi}{Z_c + Z_{poc} \varphi},$$

于是 $|B| \approx (0.9 \sim 1.1) \left| \frac{Z_c + Z_{poc} \varphi}{Z_d - Z_{poc} \varphi} \right|$ 。无论 $|B| \geq 1$,

F_{Da}' 拒动的范围都是 δ 从 $0^\circ \rightarrow 180^\circ$ ，显然送电侧测量元件比之受电侧者更易发生拒动。

对照上述两种情况看出，随着接地点向保护区末端移动时， F_{Da}' 的动作特性圆的圆心沿纵轴向上移动，同时圆半径增大。在保护区末端接地时，圆半径变为无限大，圆心在无穷远处，此时动作特性变为极坐标的原始轴。

2. 保护区外接地

当 $|Z_K|$ 从 $|Z_{poc} \varphi| \rightarrow |Z_d|$ 变化时， $(Z_K - |Z_Y| a)$ 的幅角 φ 从 $0 \rightarrow \varphi_d$ ，其中

$$\varphi_d = \text{tg}^{-1} \frac{2 |Z_d| \sin \varphi - \sqrt{3} |Z_Y|}{2 |Z_d| \cos \varphi + |Z_Y|}$$

显然， $\varphi_d < 90^\circ$ 。保护区外在 $|Z_K|$ 接近于 $|Z_d|$ 处接地时， λ 为无限小的正值 ε 。令

$$B' = -\frac{P}{\varepsilon}, \quad \beta' = \frac{(2+n)(\varepsilon+1)}{3 |H| \varepsilon} |Z_K - |Z_Y| a|, \text{ 则}$$

$$F_{Da}' = \beta' e^{j\varphi_d} \frac{e^{j\delta}}{e^{j\delta} - B'}$$

所以 $\frac{e^{j\delta}}{e^{j\delta} - B'}$ 的动作角是 $(-\varphi_d) \rightarrow -(180^\circ + \varphi_d)$ 。在极坐标平面上，

$\frac{e^{j\delta}}{e^{j\delta} - B'}$ 的动作特性是一圆，数值 B' 为其一条弦。圆内是动作区，圆外是制动区，

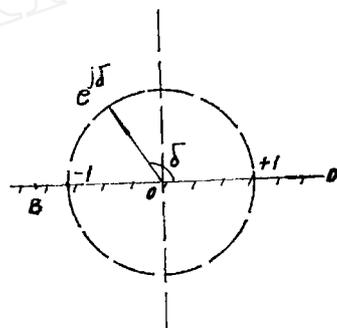


图24

如图25, (a)所示。实际 $|B'|$ 是一个接近无限大的值, 从图 25, (b) 看出, 当 $-\delta_2' > \delta > \delta_1'$ 时, F_{D_0}' 将发生误动。

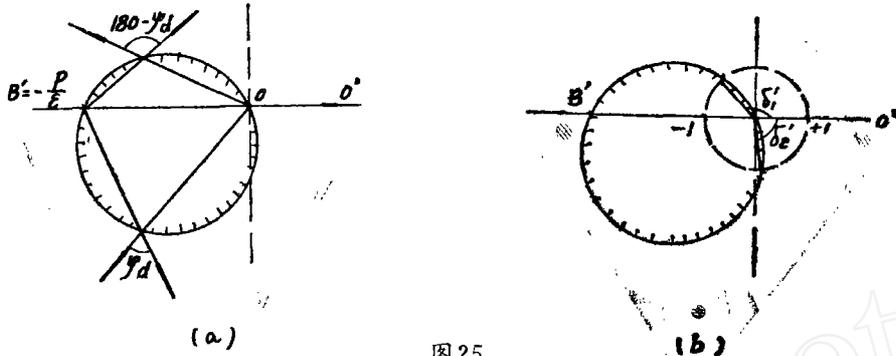


图25

b. B相的相比器

$$F_{D_b}' = \frac{2+n}{3|H|\lambda} a^2 \left[(Z_k - |Z_Y| a) \frac{e^{j\delta} - A}{e^{j\delta} - B} + \lambda (Z_k + M) \right]$$

其中 $A = P$, $B = -\frac{P}{\lambda}$, $M = |M| e^{j\varphi_M} = -Z_C + \frac{n-1}{n+2} a (Z_C + |Z_Y| a)$

$$\lambda = \frac{Z - Z_K}{Z_C + Z_K} \quad (\text{在 } Z_K < Z_d \text{ 情况下, } \lambda > 0)$$

$$\text{即 } \frac{3|H|\lambda}{2+n} F_{D_b}' a + \lambda (M - Z_K) = (Z_K - |Z_Y| a) \frac{e^{j\delta} - A}{e^{j\delta} - B}$$

1. 保护区内接地

@保护区出口接地

$Z_K = 0$, 特性方程可写为

$$\frac{1}{|Z_Y|} \left(\frac{3|H|\lambda}{2+n} F_{D_b}' a + \lambda M \right) e^{j60^\circ} = \frac{e^{j\delta} - A}{e^{j\delta} - B}$$

设 $F_{D_b}' = |F_{D_b}'| e^{j\theta}$, 则上式变为

$$|W_{b1}| e^{j(\varphi_M + 60^\circ)} - |T_{b1}| e^{j\theta} = \frac{e^{j\delta} - A}{e^{j\delta} - B}$$

$$\text{其中 } |W_{b1}| = \frac{\lambda |M|}{|Z_Y|}, \quad |T_{b1}| = \frac{3|H|\lambda |F_{D_b}'|}{(2+n) |Z_Y|}$$

因为 F_{D_b}' 的动作范围 $\theta = 0^\circ \rightarrow (-180^\circ)$, 在 θ 变化时, 上列等式左边的综合向量末端便沿着图26的圆弧变化。由此看出, F_{D_b}' 特征向量的动作条件为

$$I_m \left(\frac{e^{j\delta} - A}{e^{j\delta} - B} \right) \geq I_m \left[|W_{b1}| e^{j(\varphi_m + 60^\circ)} \right]$$

$$\text{即 } P \left(1 + \frac{1}{\lambda} \right) \sin \delta = \frac{2P}{\lambda} |W_{b1}| \sin(\varphi_m + 60^\circ) \cos \delta \geq (1 + B^2) |W_{b1}| \sin(\varphi_m + 60^\circ)$$

所以两侧电源等值电势夹角 δ 满足上列不等式的角度范围, 都是反应 F_{D_b}' 能动作的范围。

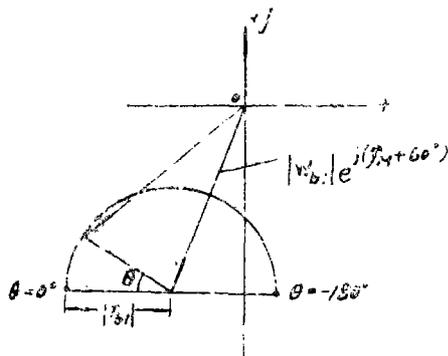


图26

b. 保护区末端接地

$Z_K = Z_{pac}\alpha$, 此时幅角 $\varphi = 0^\circ$ 。同理, 可写出特性方程为

$$|W_{b2}| e^{j(\gamma_2 - 120^\circ)} + |T_{b2}| e^{j\theta} = a \frac{e^{j\delta} - A}{e^{j\delta} - B}$$

其中 $|W_{b2}| = \frac{\lambda |M - Z_{pac}\alpha|}{|Z_{pac}\alpha - |Z_Y| a|}$, $|T_{b2}| = \frac{3 |H| \lambda |F_{rb}'|}{(2+n) |Z_{pac}\alpha - |Z_Y| a|}$

$$\gamma_2 = \text{Arg}(M - Z_{pac}\alpha)$$

F_{Db}' 的动作条件为

$$I_m \left[a \frac{e^{j\delta} - A}{e^{j\delta} - B} \right] \leq I_m \left[|W_{b2}| e^{j(\gamma_2 - 120^\circ)} \right]$$

即 $\frac{1}{1 - 2B\cos\delta + B^2} \left\{ -\frac{1}{2}(A - B)\sin\delta - \frac{\sqrt{3}}{2}[1 + AB - (A + B)\cos\delta] \right\} \leq |W_{b2}| \sin(\gamma_2 - 120^\circ)$

所以电势夹角 δ 满足上列不等式的角度范围都是反应 F_{Db}' 能动作的范围。

2. 保护区外远处接地

$Z_K = Z_d$, 此时幅角 $\varphi = \varphi_d$, ($\varphi_d < 90^\circ$) λ 为无限小的正值 ε , 而特性方程为

$$|W_{b3}| e^{j(\gamma_3 - 120^\circ)} + |T_{b3}| e^{j\theta} = e^{j(\varphi_d - 120^\circ)} \frac{e^{j\delta} - A}{e^{j\delta} - B}$$

其中 $|W_{b3}| = \frac{\varepsilon |M - Z_d|}{|Z_d - |Z_Y| a|}$, $|T_{b3}| = \frac{3 |H| \varepsilon |F_{rb}'|}{(2+n) |Z_d - |Z_Y| a|}$

$$\gamma_3 = \text{Arg}(M - Z_d)$$

F_{Db}' 的动作条件为

$$I_m \left[e^{j(\varphi_d - 120^\circ)} \frac{e^{j\delta} - A}{e^{j\delta} - B} \right] \leq I_m \left[|W_{b3}| e^{j(\gamma_3 - 120^\circ)} \right]$$

即 $\frac{1}{1 - 2B\cos\delta + B^2} \left\{ (A - B) \cos(\varphi_d - 120^\circ) \sin\delta + \sin(\varphi_d - 120^\circ) [1 + AB - (A + B)\cos\delta] \right\} \leq |W_{b3}| \sin(\gamma_3 - 120^\circ)$

电势夹角 δ 满足上列不等式的角度范围都是反应 F_{Dc}' 要误动作的范围。

c. c 相的相比器

$$F_{Dc}' = \frac{2+n}{3} \frac{|H|}{|a|} \left[(Z_K - |Z_Y| a) \frac{e^{j\delta} - A}{e^{j\delta} - B} + \lambda (Z_K - N) \right]$$

其中 $N = |N| e^{j\varphi_N} = -Z_C + \frac{n-1}{n+2} a^2 (Z_C + |Z_Y| a)$, 其余各符号代表值与以上 B 相者相同。

即
$$\frac{3}{2+n} \frac{|H|}{|a|} \lambda F_{Dc}' a^2 + \lambda (N - Z_K) = (Z_K - |Z_Y| a) \frac{e^{j\delta} - A}{e^{j\delta} - B}$$

设 $F_{Dc}' = |F_{Dc}'| e^{j\theta}$, 同上所述, 类似地可写出以下各种情况的特性方程:

1. 保护区内接地

a. 保护区出口接地

$$|W_{c1}| e^{j(\varphi_N + 120^\circ)} + |T_{c1}| e^{j\theta} = e^{j60^\circ} \frac{e^{j\delta} - A}{e^{j\delta} - B}$$

其中 $|W_{c1}| = \frac{\lambda |N|}{|Z_Y|}$, $|T_{c1}| = \frac{3 |H| \lambda |F_{Dc}'|}{(2+n) |Z_Y|}$

F_{Dc}' 的动作条件为

$$I_m \left[e^{j60^\circ} \frac{e^{j\delta} - A}{e^{j\delta} - B} \right] \leq I_m \left[|W_{c1}| e^{j(\varphi_N + 120^\circ)} \right]$$

即
$$\frac{1}{1 - 2B \cos \delta + B^2} \left\{ \frac{1}{2} (A - B) \sin \delta + \frac{\sqrt{3}}{2} [1 + AB - (A + B) \cos \delta] \right\} \leq |W_{c1}| \sin(\varphi_N + 120^\circ)$$

电势夹角 δ 满足上列不等式的角度范围都是反应 F_{Dc}' 能动作的范围。

b. 保护区末端接地

$$|W_{c2}| e^{j(\xi_2 + 120^\circ)} + |T_{c2}| e^{j\theta} = a \frac{e^{j\delta} - A}{e^{j\delta} - B}$$

其中 $|W_{c2}| = \frac{\lambda |N - Z_{pac}|}{|Z_{pac} - |Z_Y| a|}$, $|T_{c2}| = \frac{3 |H| \lambda |F_{Dc}'|}{(2+n) |Z_{pac} - |Z_Y| a|}$

$$\xi_2 = A_{rg}(N - Z_{pac})$$

F_{Dc}' 的动作条件为

$$I_m \left[a \frac{e^{j\delta} - A}{e^{j\delta} - B} \right] \leq I_m \left[|W_{c2}| e^{j(\xi_2 + 120^\circ)} \right]$$

即
$$\frac{1}{1 - 2B \cos \delta + B^2} \left\{ -\frac{1}{2} (A - B) \sin \delta + \frac{\sqrt{3}}{2} [1 + AB - (A + B) \cos \delta] \right\} \leq |W_{c2}| \sin(\xi_2 + 120^\circ)$$

电势夹角 δ 满足上列不等式的角度范围都是反应 F_{Dc}' 能动作的范围。

2. 保护区外远处接地

$$|W_{c3}| e^{j(\xi_3 + 120^\circ)} + |T_{c3}| e^{j\theta} = e^{j(\varphi_d + 120^\circ)} \frac{e^{j\delta} - A}{e^{j\delta} - B}$$

其中 $|W_{c3}| = \frac{\varepsilon |N - Z_n|}{|Z_d - |Z_Y| a|}$, $|T_{c3}| = \frac{3 |H| \varepsilon F_{cc'}}{(2+n) |Z_d - |Z_Y| a|}$

$$\xi_3 = \text{Arg}(N - Z_n)$$

$F_{cc'}$ 的动作条件为

$$I_m \left[e^{j(\varphi_d + 120^\circ)} \frac{e^{j\delta} - A}{e^{j\delta} - B} \right] \leq I_m \left[|W_{c3}| e^{j(\xi_3 + 120^\circ)} \right]$$

即
$$1 - 2 \frac{1}{B \cos \delta + B^2} \left\{ (A - B) \cos(\varphi_d + 120^\circ) \sin \delta + \sin(\varphi_d + 120^\circ) [1 + AB - (A + B) \cos \delta] \right\} \leq |W_{c3}| \sin(\xi_3 + 120^\circ)$$

电势夹角 δ 满足上列不等式的角度范围都是反应 $F_{cc'}$ 要误动作的范围。

由于测量元件的动作行为决定于向量 $F_{d'}$ 、 $F_{d''}$ 、 $F_{cc'}$ 的逻辑积，所以对保护区内接地，对应于这三个向量均能动作的 δ 值变化范围才是测量元件的 δ 动作角；对保护区外接地，只要其中有一个及以上向量不会动作的总的 δ 值变化范围都是测量元件的 δ 制动角。

同样推理可知，当相邻线路（或本线路）非全相运行时，两侧等值电势夹角摆开到一定程度下，测量元件也可能发生不正确动作。

(8) 平行线零序互感的补偿

为了补偿平行线间零序互感的影响，接入测量元件的三个被比较电压中应分别加接零序互感补偿电压，正如第（二）节中所述，接入的补偿电压为 $3 I_0' Z_{m0}$ 。

现以两侧电源双回路线路末端发生单相金属性接地，基准量为 I_0 的情况加以说明。等值系统接线如图27所示。

对一般短线路：

$$Z_n \ll 2 (Z_c + Z_c')$$

$$|Z_Y| \ll |Z_c + Z_c'|$$

而 $Z_{m0} = 0.5 Z_K$

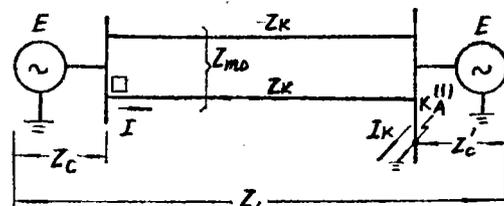


图27

所以
$$V_{a'} = \left[2 + n + \frac{3 Z_{m0}}{n (Z_c + Z_c' + \frac{Z_K}{2})} \right] (Z_K - |Z_l| a) I_0$$

$$V_{b'} = (2+n) a^2 \left\{ Z_K + 2 Z_l - \frac{n-1}{n-2} a (2 Z_c + |Z_Y| a) + \frac{3 \sqrt{3} Z_{m0}}{n+2} e^{-j30^\circ} \left[\frac{Z_c}{n (Z_c + Z_c')} e^{j60^\circ} + 1 \right] \right\} I_0$$

$$V_{c'} = (2+n) a \left\{ Z_l + 2 Z - \frac{n-1}{n+2} a^2 (2 Z_c + |Z_l| a) + \frac{3 \sqrt{3} Z_{m0}}{n+2} e^{j30^\circ} \right\}$$

$$\left\{ \frac{Z_c}{n(Z_c + Z_c')} e^{-j60^\circ} + 1 \right\} I_0$$

$$V_D = 3 I_0 |H|$$

三个相比器的特征向量分别为

$$F_{D_a}' = \frac{V_a'}{V_D} = \frac{1}{3 |H|} \left[2 + n + \frac{3 Z_{m0}}{n(Z_c + Z_c' + \frac{Z_K}{2})} \right] (Z_K - |Z_Y| a)$$

$$= \frac{1}{3 |H|} \left[2 + n + \frac{3 Z_{m0}}{n Z_1} \right] (Z_K - |Z_Y| a)$$

$$F_{D_b}' = \frac{V_b'}{V_D} = \frac{2+n}{3 |H|} a^2 [Z_K - (S+G)]$$

$$F_{D_c}' = \frac{V_c'}{V_D} = \frac{2+n}{3 |H|} a [Z_K - (S'+G')]$$

其中 $S = -2 Z_c + \frac{n-1}{n+2} a (2 Z_c + |Z_1| a)$

$$G = - \frac{3 \sqrt{3} Z_{m0}}{n+2} e^{-j30^\circ} \left[\frac{Z_c}{n(Z_c + Z_c')} e^{j60^\circ} + 1 \right]$$

$$S' = -2 Z_c + \frac{n-1}{n+2} a^2 (2 Z_c + |Z_1| a)$$

$$G' = - \frac{3 \sqrt{3} Z_{m0}}{n+2} e^{j30^\circ} \left[\frac{Z_c}{n(Z_c + Z_c')} e^{-j60^\circ} + 1 \right]$$

在超高压线路上, Z_{m0} 与 Z_1 的阻抗角相差不多, 因此方程式 F_{D_a}' 中 $\frac{3 Z_{m0}}{n Z_1}$ 接近一正实数, 于是 F_{D_a}' 的动作范围仍与不存在零序互感情况下的动作范围一致, 即测量元件的保护范围不变。

零序互感对 F_{D_b}' 和 F_{D_c}' 动作特性的影响, 主要表现在复数向量 G 和 G' 上。随着 Z_c 与 Z_c' 的不同比值关系, 其影响亦不同, 现取两种极端情况进行讨论:

a. 当 $Z_c' \ll Z_c$, 则

$$G_1 = - \frac{3 \sqrt{3} Z_{m0}}{n+2} e^{-j30^\circ} \left(\frac{1}{n} e^{j60^\circ} + 1 \right)$$

$$G_1' = - \frac{3 \sqrt{3} Z_{m0}}{n+2} e^{j30^\circ} \left(\frac{1}{n} e^{-j60^\circ} + 1 \right)$$

在短路阻抗复平面上, F_{D_b}' 和 F_{D_c}' 的动作特性如图28,(a)所示。随着 Z_{m0} 的增大, 动作特性更加背离坐标原点。

b. 当 $Z_c' \ll Z_c$, 则

$$G_2 = - \frac{3 \sqrt{3} Z_{m0}}{n+2} e^{-j30^\circ}$$

$$G_2' = - \frac{3 \sqrt{3} Z_{m0}}{n+2} e^{j30^\circ}$$

同样在短路阻抗复平面上, F_{D_b}' 和 F_{D_c}' 的动作特点是随着 Z_{m0} 的增大而更加背离坐标原点, 如图28,(b)所示。

综上所述,不论 Z_c 与 Z'_c 的比值关系如何,零序互感阻抗 Z_{m0} 的增大,总是有利于测量元件提高反应过渡阻抗的能力,而对双回线外穿越性接地,测量元件的测量仍是正确的。对双回线内接地以及纵续先切除一侧断路器后,如何保证测量元件瞬动段不会发生超越误动,这借助于合理的整定计算解决。

(9) 小结

根据以上分析,可以看出这种线的测量元件具有某些特点,较比适用于当前系统周率不断变化情况下的短线路上,其特点主要是:

a. 测量元件为单系统接地距离元件,它只反应接地故障,不反应相间故障。正方向接地能正确测量,反方向接地具有方向性;

b. 测量元件反应的阻抗值系接地点至安装处的正序阻抗,但对测量元件的实际整定值 $|Z_Y|$ 应按计算值 $|Z_{pac\varphi}|$ 进行换算,即

$$|Z_Y| = \frac{2}{\sqrt{3}} |Z_{pac\varphi}| \sin \varphi_Z$$

其中 φ_Z 为 $Z_{pac\varphi}$ 的幅角

c. 具有一定的反应接地点过渡阻抗的能力,它与整定值大小关系不大,而主要取决于安装处背侧的等值系统抗值;

d. 反应过渡阻抗能力的特性与接地点电弧电阻的特性以及接地点远近的特性相吻合;

e. 在测量元件保护区边缘接地时,被比较电压值不会降到零,所以工作比较明确。

f. 测量元件无需设置电压谐振回路,因此其工作特性基本与系统频率变化无关;

g. 具有零序互感补偿措施,可适用于有零序互感影响的平行线路;

h. 受负荷电流影响较小,只有当零序电流显著小于负荷电流时,测量元件才感受负荷的影响;

i. 对称系统振荡、过负荷、电压回路断线,测量元件均不反应;

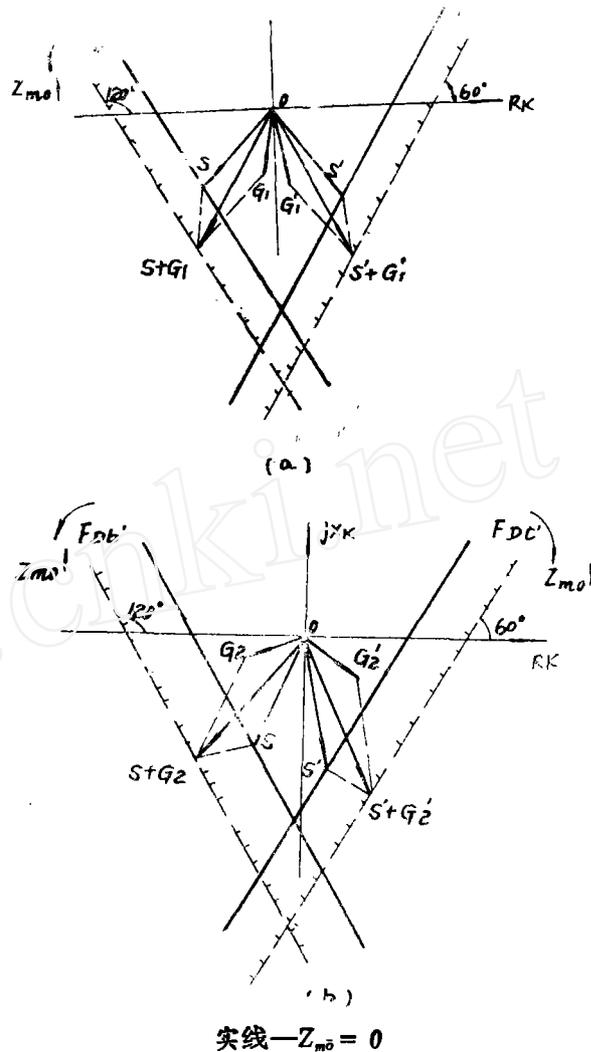


图28

i. 当系统出现横向或纵向不对称又伴随发生振荡时, 在一定的电势摆角下, 测量元件将不正确工作;

k. 测量元件的交流输入变压器数量相对地较少。

(四) 计算示例

对本测量元件反应过渡阻抗能力以及接地伴随振荡时工作性能有比较明确的概念, 现举实例计算说明。

图29示出某系统220千伏电网中的双侧电源线路, 假设两侧均装设本测量元件。系统参数如图所示, 标么值的基准量为

$$S_6 = 100 \text{ MVA}, U_6 = 230 \text{ KV}, I_6 = 252^\circ, Z_6 = 530^\circ$$

$$\text{零序与正序阻抗比 } n = \left| \frac{Z_0}{Z_1} \right| = 3$$

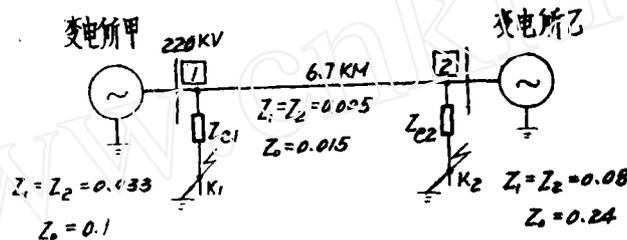


图29

已知条件:

1. 线路两侧等值电源的阻抗角与线路阻抗角相同, $\varphi_z = 75^\circ$;

2. 正常时变电所甲向变电所乙输送负荷电流600安;

3. 线路的架空地线为钢芯铝线, 每基塔的接地电阻为9欧;

4. 碍子串长度为2米, 风速为9米/秒。测量元件第二段动作时间 $t^{\text{II}} = 1$ 秒, 动作阻抗按线路末端金属性接地具有1.5倍灵敏度选定。

试求: 1. 被保护线路末端经过渡阻抗接地时, 第二段能否拒动?

2. K_2 点单相金属性接地伴随两侧电势角度摆开时, 1号测量元件瞬动第一段发生误动的电势角差是多少? (计算时, 变电所甲侧等值电势为1.05, 变电所乙侧为1)。

计算:

(1) 第一、二段整定值

$$|Z_C^{\text{I}}|_{s.1} = |Z_C^{\text{I}}|_{s.2} = 0.8 \times 0.005 \times 530 = 2.12 \Omega / \phi$$

$$|Z_Y^{\text{I}}|_{s.1} = |Z_Y^{\text{I}}|_{s.2} = \frac{2}{\sqrt{3}} |Z_C^{\text{I}}|_{s.1} \sin \varphi_z = \frac{2}{\sqrt{3}} \times 2.12 \times \sin 75^\circ = 2.36 \Omega / \phi$$

$$\text{相当于 } |Z_Y^{\text{I}}|_* = \frac{2.36}{530} = 0.00445$$

$$|Z_{13.1}| = |Z_{13.2}| = 1.5 \times 0.005 \times 530 = 3.98 \Omega / \phi$$

$$|Z_{11.1}| = |Z_{11.2}| = \frac{2}{\sqrt{3}} \times 3.98 \times \sin 75^\circ = 4.45 \Omega / \phi$$

(2) 等值接地电阻

根据每基塔的接地电阻为 9 欧, 故等值接地电阻约为 $R_g = 2.84 \Omega$

(3) K_1 点经过渡电阻单相接地的短路电流在两侧电势同相且相等, 计及过渡电阻的短路电流计算得 $|I_{K(1)}| = 4500$ 安。

在 $t = 0$ 时的电弧电阻

$$R_{e0} = 1500 \times \frac{2}{4500} = 0.667 \Omega$$

$t = 1$ 秒时电弧电阻

$$R_e = 0.667 \left(1 + \frac{2.05 \times 9 \times 1}{2} \right) = 6.81 \Omega$$

故总接地过渡电阻

$$R_n = 6.81 + 2.84 = 9.65 \Omega$$

流经 2 号测量元件的零序电流分支系数

$$K_{p0} = 0.28$$

(4) 变电所乙侧的电源阻抗

$$|Z_c| = 0.08 \times 530 = 42.4 \Omega$$

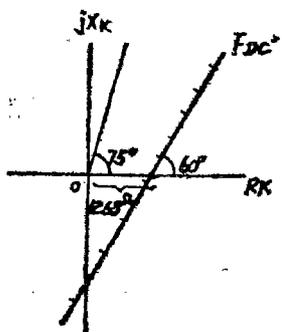
其中 $R_c = 42.4 \cos 75^\circ = 11 \Omega$

$$X_c = 42.4 \sin 75^\circ = 41 \Omega$$

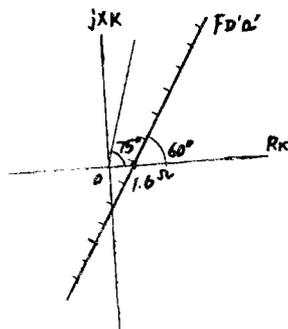
(5) 测量元件 2 第二段的 $F_{m'}$ 动作特性与 R_n 轴交点横坐标为

$$\begin{aligned} R^{(1)} &= -R_c + \frac{n}{n+2} \sqrt{3} X_c + \frac{n-1}{n+2} |Z_{11.2}| - \frac{3R_n}{n+2} \cdot \frac{1}{K_{p0}} \\ &= -11 + \frac{3}{3+2} \sqrt{3} \times 41 + \frac{3-1}{3+2} \times 4.45 - \frac{3 \times 9.65}{3+2} \cdot \frac{1}{0.28} = 12.68' > \end{aligned}$$

如图 30, (a) 所示, 故第二段不会拒动。



(a)



(b)

图 30

(6) K_1 点经过渡电阻两相接地的短路电流
 计及过渡电阻的短路电流计算得 $|I_k^{(1.1)}| = 6500$ 安
 在 $t = 0$ 时的电弧电阻

$$R_c = 1500 \times \frac{2}{6500} = 0.462 \Omega$$

$t = 1$ 秒时电弧电阻

$$R = 0.462 \left(1 + \frac{2.05 \times 9 \times 1}{2} \right) = 4.72 \Omega$$

(7) 测量元件 2 第二段的 $F_{p'}$ 动作特性

a. 使 $F_{p'}$ 特性上升的向量为

$$\frac{3(R_c + 2R_g)}{2(2n+1)K_p} = \frac{3(4.72 + 2 \times 2.84)}{2(2 \times 3 + 1) \times 0.28} = 7.95$$

对应 X_k 轴上的上升部分为

$$7.95 \cos 30^\circ = 6.89$$

b. 使 $F_{p'}$ 特性下降的向量为

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{R_c}{K_p} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{4.72}{0.28} = 14.6$$

对应 X_k 轴上的下降部分为

$$14.6 \cos 60^\circ = 7.3$$

c. 实际对应 X_k 轴上的综合下降部分为

$$7.3 - 6.89 = 0.41$$

对应 X 轴上的动作值为

$$\left| Z_{s.2}^I \right| \cos 30^\circ - 0.41 = 4.45 \cos 30^\circ - 0.41 = 3.44$$

d. 反应在短路阻抗线上, 动作区约缩短的值为

$$\frac{\left| Z_{c_{s.2}}^{\parallel} \right| - 3.44 \sec 15^\circ}{\left| Z_{c_{s.2}}^{\parallel} \right|} = \frac{3.98 - 3.44 \sec 15^\circ}{3.98} = 10.5\%$$

因为 $3.44 \sec 15^\circ > 0.005 \times 530 = 2.66$, 所以线路末端经过渡电阻两相接地仍能可靠动作。

(8) 测量元件 2 第二段的 $F_{p'}$ 动作特性与 R 轴交点横座标为

$$\begin{aligned} R^{(1.1)} &= \frac{1}{2n+1} \left[\sqrt{3}nX_c - 3nR_c + (n-1) \left| Z_{s.2}^I \right| \right] - \frac{3(R_c + 2R_g)}{(2n+1)K_p} \\ &= \frac{1}{2 \times 3 + 1} \left[\sqrt{3} \times 3 \times 41 - 3 \times 3 \times 11 + (3-1) \times 4.45 \right] \\ &\quad - \frac{3(4.72 + 2 \times 2.84)}{(2 \times 3 + 1) \times 0.28} \\ &= 1.6 \Omega > 0 \end{aligned}$$

如图30, (b)所示, 故第二段不会拒动。

(9) K_2 点经过渡电阻单相接地的短路电流
计及过渡电阻的短路电流计算得 $|I_s^{(1)}| = 4000$ 安

$$t = 0 \text{ 时电弧电阻 } R_a = 0.75 \Omega$$

$$t = 1 \text{ 秒时电弧电阻 } R_a = 7.68 \Omega$$

$$\text{总接地过渡电阻 } R_s = 2.84 + 7.68 = 10.52 \Omega$$

流经1号测量元件的零序电流分支系数 $K_{b0} = 0.677$

(10) 变电所甲侧的电源阻抗

$$|Z_c| = 0.033 \times 530 = 17.5 \Omega$$

$$\text{其中 } R_c = 17.5 \cos 75^\circ = 4.53 \Omega$$

$$X_c = 17.5 \sin 75^\circ = 16.9 \Omega$$

(11) 测量元件1第二段的 F_{Ic}' 动作特性与 R_s 轴交点横座标为

$$R^{(1)} = -4.53 + \frac{3}{5} \sqrt{3} \times 16.9 + \frac{2}{5} \times 4.45 - \frac{3 \times 10.52}{5} \cdot \frac{1}{0.677} = 5.43 \Omega > 0$$

故第二段不会拒动。

(12) K_2 点经过渡电阻两相接地的短路电流计及过渡电阻的短路电流计算得

$$|I_s^{(1,1)}| = 6500 \text{ 安}$$

$$t = 0 \text{ 时电弧电阻 } R_{c0} = 0.462 \Omega$$

$$t = 1 \text{ 秒时电弧电阻 } R_c = 4.72 \Omega$$

(13) 测量元件1第二段的 $F_{D' b'}$ 动作特性

a. 使 $F_{D' b'}$ 特性上升的向量为

$$\frac{3(4.72 + 2 \times 2.84)}{2 \times 7 \times 0.677} = 3.28$$

对应应在 X 轴上的上升部分为

$$3.28 \cos 30^\circ = 2.84$$

b. 使 $F_{D' b'}$ 特性下降的向量为

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{4.72}{0.677} = 6.04$$

对应应在 X 轴上的下降部分为

$$6.04 \cos 60^\circ = 3.02$$

c. 实际对应应在 X 轴上的综合下降部分为

$$3.02 - 2.84 = 0.18$$

对应应在 X 轴上的动作值为

$$4.45 \cos 30^\circ - 0.18 = 3.67$$

d. 反应在短路阻抗线上, 动作区约缩短的值为

$$\frac{3.98 - 3.67 \text{Sec} 15^\circ}{3.98} = 4.52\%$$

因为 $3.67 \text{Sec} 15^\circ > 0.005 \times 530 = 2.66$, 所以线路末端经过渡电阻两相接地仍能可靠动作。

(14) 测量元件 1 第二段的 F_{Da}' 动作特性与 R_k 轴交点横坐标为

$$R^{(1,1)} = \frac{1}{7} \left[\sqrt{3} \times 3 \times 16.9 - 3 \times 3 \times 4.53 + 2 \times 4.45 \right] - \frac{3(4.72 + 2 \times 2.84)}{7 \times 0.677}$$

$$= 1.4 \Omega > 0$$

故第二段不会拒动。

(15) K_2 点单相金属性接地伴随系统振荡时, 测量元件 1 的第一段工作行为等值系统如图 31 所示。正常负荷状态下, 两侧电势相位差为

$$\delta_H = 2 \text{Sin}^{-1} \frac{|I_* (Z_c + Z_d)_*|}{2} = 2 \text{Sin}^{-1} \frac{600 (0.033 + 0.085)}{252} = 16^\circ$$

从已知条件得

$$P = \left| \frac{E''}{E'} \right| = \frac{1}{1.05} = 0.952$$

于是

$$\lambda = \frac{Z_d - Z_k}{Z_c + Z_k} = \frac{0.085 - 0.005}{0.033 + 0.005} = 2.11$$

$$\varphi_k = \text{tg}^{-1} \frac{2 |Z_k| \text{Sin} \varphi_z - \sqrt{3} |Z_Y^I|}{2 |Z_k| \text{Cos} \varphi_z + |Z_Y^I|}$$

$$= \text{tg}^{-1} \frac{2 \times 0.005 \text{Sin} 75^\circ - \sqrt{3} \times 0.00445}{2 \times 0.005 \text{Cos} 75^\circ + 0.00445} = 15.4^\circ$$

a. F_{Da}' 相比器的工作

$$B' = -\frac{P}{\lambda} = -\frac{0.952}{2.11} = -0.451$$

$$\beta' = \frac{(2+n)(\lambda+1)}{3|H|\lambda} \left| Z_k - |Z_Y^I| a \right|$$

$$= \frac{5(2.11+1)}{3 \times 2.11 \times |H|} \left| 0.005 e^{j75^\circ} - 0.00445 a \right| = \frac{0.0095}{|H|}$$

$$F_{Da}' = \frac{0.0095}{|H|} e^{j15.4^\circ} \frac{e^{j\delta}}{e^{j\delta} + 0.451}$$

因为 F_{Da}' 的动作角为 $0^\circ \rightarrow (-180^\circ)$, 所以 $\frac{e^{j\delta}}{e^{j\delta} + 0.451}$ 的动作角应为 $(-15.4^\circ) \rightarrow$

(-195.4°) , 从极坐标上作圆图可找出 δ 角落在下列范围 $-52^\circ > \delta > 201^\circ$ 时, F_{Da}' 要误动。

b. F_{Db}' 相比器的工作

$$A = P = 0.952, \quad B = -\frac{P}{\lambda} = -0.451$$

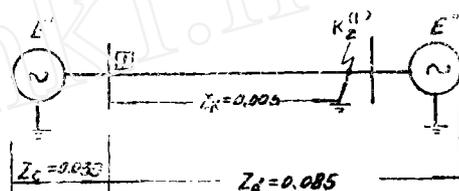


图 31

$$M = -Z_c + \frac{n-1}{n+2} a(Z_i + |Z_y| a) = -0.033e^{j75^\circ} + \frac{2}{5} a(0.033e^{j75^\circ} + 0.00445a)$$

$$\cong -0.0412e^{j58.9^\circ}$$

$$r_3 = \text{Arg}(M - Z_k) = \text{Arg}(-0.0412e^{j58.9^\circ} - 0.005e^{j75^\circ}) = 240.6^\circ$$

$$|W_{k3}| = \frac{\lambda |M - Z_k|}{|Z_i - |Z_y'| a|} = \frac{2.11 |-0.0412e^{j58.9^\circ} - 0.005e^{j75^\circ}|}{|0.005e^{j75^\circ} - 0.00445e^{j120^\circ}|} \cong 26.6$$

F_{Dc}' 相比器误动的条件是

$$\frac{1}{1 - 2B\cos\delta + B^2} \left\{ (A-B)\cos(\varphi_k - 120^\circ)\sin\delta + \sin(\varphi_k - 120^\circ) [1 + AB - (A+B)\cos\delta] \right\} \leq |W_{k3}| \sin(\gamma_3 - 120^\circ)$$

$$\text{即 } \frac{1}{1 + 2 \times 0.45 |\cos\delta + 0.45|^2} \left\{ (0.952 + 0.451)\cos(15.4^\circ - 120^\circ)\sin\delta + \sin(15.4^\circ - 120^\circ) [1 - 0.952 \times 0.451 - (0.952 - 0.451)\cos\delta] \right\} \leq 26.6 \sin(240.6^\circ - 120^\circ)$$

$$\text{即 } 0.362\sin\delta + 20.32\cos\delta + 28.25 \geq 0$$

δ 在任意值下, 上列不等式全成立, F_{Dc}' 都将误动作。

c. F_{Dc}' 相比器工作

$$N = -Z_c + \frac{n-1}{n+2} a^2(Z_i + |Z_y'| a) = -0.033e^{j75^\circ} + \frac{2}{5} a^2(0.033e^{j75^\circ} + 0.00445a) \cong -0.0412e^{j91.1^\circ}$$

$$\zeta_3 = \text{Arg}(N - Z_k) = \text{Arg}(-0.0412e^{j91.1^\circ} - 0.005e^{j75^\circ}) \cong 270^\circ$$

$$|W_{k3}| = \frac{\lambda |N - Z_k|}{|Z_i - |Z_y'| a|} = \frac{2.11 |-0.0412e^{j91.1^\circ} - 0.005e^{j75^\circ}|}{|0.005e^{j75^\circ} - 0.00445e^{j120^\circ}|} \cong 26.8$$

同理可写出 F_{Dc}' 相比器误动的条件是

$$\frac{1}{1 + 2 \times 0.45 |\cos\delta + 0.45|^2} \left\{ (0.952 + 0.451)\cos(15.4^\circ + 120^\circ)\sin\delta + \sin(15.4^\circ + 120^\circ) [1 - 0.952 \times 0.451 - (0.952 - 0.451)\cos\delta] \right\} \leq 26.8 \sin(270^\circ + 120^\circ)$$

$$\text{即 } \sin\delta + 12.45\cos\delta + 15.7 \geq 0$$

δ 在任意值下, 上列不等式全成立, F_{Dc}' 都将误动作。

综合 F_{Da}' 、 F_{Db}' 、 F_{Dc}' 的工作情况可看出, F_{Da}' 误动的 δ 角值范围就是测量元件第一段的误动范围, 即

$$-52^\circ > \delta > 201^\circ$$

正常负荷状态, E' 是越前 E'' 的, 即 $\delta > 0$ 。当发生 $K_2^{(1)}$ 以后, 送电侧电源输出有功要降低, 于是相对 E'' 要加速旋转, 必须待 δ 达到 201° 时才可能导致测量元件 1 的第一段误动。实际在稳定运行下, 摆角一般不可能超过 140° , 所以出现这种误动情况的机率是极小的。

附录 相比器特征向量解析式的推导

在此, 仅对某些主要事故状态下, 决定测量元件工作特性的相比器特征向量解析式写出推演过程, 以资查阅。

(1) 经过渡阻抗单相接地

等值系统接线已如图 6, (a) 和图 10, (a) 所示。

a. 正方向接地时

$$I_1 = I_2 = I_0, \quad I_1 = I_2 = I_c = K_p I_{sk}$$

短路点电流

$$I_{sk} = \frac{E}{(2+n)Z_{1\Sigma} + 3R_n}$$

流经测量元件的电流

$$I_0 = \frac{Z_{1\Sigma}}{Z + Z} \cdot \frac{E}{(2+n)Z_{1\Sigma} + 3R_n} = \frac{E}{(Z + Z_K) \left(2 + n + \frac{3R_n}{Z_{1\Sigma}} \right)}$$

所以
$$E = \left(2 + n + \frac{3R_n}{Z_{1\Sigma}} \right) (Z + Z_K) I_0$$

被比较电压

$$\begin{aligned} V'_a &= V_1 + V_2 + V_0 - (I_1 + I_2 + nI_0) | Z_Y | a = E - I_1 Z_c - I_2 Z_c - I_0 n Z_c \\ &- (2+n)I_0 | Z | a = \left(2 + n + \frac{3R_n}{Z_{1\Sigma}} \right) (Z + Z_K) I_0 - (2+n) Z I_0 - (2+n) I_0 | Z_Y | a \\ &= \left[(2+n) (Z_K - | Z_Y | a) + \frac{3R_n}{K_p} \right] I_0 \\ V'_b &= a^2 V_1 + a V_2 + V_0 - (a^2 I_1 + a I_2 + n I_0) | Z | a = a^2 (E - I_1 Z_c) - a I_2 Z_c \\ &- n I_0 Z_c - (a^2 + a + n) I_0 | Z_Y | a = a^2 \left(2 + n + \frac{3R_n}{Z_{1\Sigma}} \right) (Z_c + Z_K) I_0 \\ &- a^2 I_0 Z_c - a I_0 Z_c - n I_0 Z_c - (n-1) I_0 | Z_Y | a = a^2 \left(2 + n + \frac{3R_n}{Z_{1\Sigma}} \right) (Z_c + Z_K) I_0 \\ &- (n-1) I_0 Z - (n-1) I_0 | Z_Y | a = (2+n) a^2 (Z_c + Z_K) I_0 - (n-1) (Z_c + | Z_Y | a) I_0 \\ &+ \frac{3R_n a^2}{K_p} I_0 = (2+n) a^2 \left[Z_K + Z - \frac{n-1}{n+2} a (Z_c + | Z_Y | a) + \frac{3R_n}{(n+2) K_p} \right] I_0 \end{aligned}$$

将上式中的运算符 $a^2 \rightarrow a$, $a \rightarrow a^2$ 即得

$$V_{c'} = (2+n)a \left[Z_K + Z_C - \frac{n-1}{n+2} a^2 (Z_C + |Z_Y| a) + \frac{3R_n}{(n+2)K_{po}} \right] I_0$$

所以

$$F_{Da'} = \frac{2+n}{3|H|} \left[Z_K - |Z_Y| a + \frac{3R_n}{(n+2)K_{po}} \right]$$

$$F_{Db'} = \frac{2+n}{3|H|} a^2 \left[Z_K + Z_C - \frac{n-1}{n+2} a (Z_C + |Z_Y| a) + \frac{3R_n}{(n+2)K_{po}} \right]$$

$$F_{Dc'} = \frac{2+n}{3|H|} a \left[Z_K + Z_C - \frac{n-1}{n+2} a^2 (Z_C + |Z_Y| a) + \frac{3R_n}{(n+2)K_{po}} \right]$$

$$F_{D'a'} = \frac{2+n}{3|H|} e^{-j60^\circ} \left[Z_K - |Z_Y| a + \frac{3R_n}{(n+2)K_{po}} \right]$$

$$F_{D'b'} = \frac{2+n}{3|H|} e^{j180^\circ} \left[Z_K + Z_C - \frac{n-1}{n+2} a (Z_C + |Z_Y| a) + \frac{3R_n}{(n+2)K_{po}} \right]$$

$$F_{D'c'} = \frac{2+n}{3|H|} e^{j60^\circ} \left[Z_K + Z_C - \frac{n-1}{n+2} a^2 (Z_C + |Z_Y| a) + \frac{3R_n}{(n+2)K_{po}} \right]$$

b. 反方向接地时

只需将上列被比较电压中 $|Z_Y| a \rightarrow (-|Z_Y| a)$, $Z_C \rightarrow Z_d$, $I_0 \rightarrow I_0''$, 故

$$V_{a''} = \left[(2+n)(Z_K + |Z_Y| a) + \frac{3R_n}{K_{po}} \right] I_0''$$

$$V_{b''} = (2+n)a^2 \left[Z_K + Z_d - \frac{n-1}{n+2} a (Z_d - |Z_Y| a) + \frac{3R_n}{(n+2)K_{po}} \right] I_0''$$

$$V_{c''} = (2+n)a \left[Z_K + Z_d - \frac{n-1}{n+2} a^2 (Z_d - |Z_Y| a) + \frac{3R_n}{(n+2)K_{po}} \right] I_0''$$

基准电压变为

$$V_D = -3I_0'' |H|$$

$$V_{D'} = -3I_0'' |H| e^{j60^\circ}$$

所以

$$F_{Da''} = -\frac{2+n}{3|H|} \left[Z_K + |Z_Y| a + \frac{3R_n}{(n+2)K_{po}} \right]$$

$$F_{Db''} = -\frac{2+n}{3|H|} a^2 \left[Z_K + Z_d - \frac{n-1}{n+2} a (Z_d - |Z_Y| a) + \frac{3R_n}{(n+2)K_{po}} \right]$$

$$F_{Dc''} = -\frac{2+n}{3|H|} a \left[Z_K + Z_d - \frac{n-1}{n+2} a^2 (Z_d - |Z_Y| a) + \frac{3R_n}{(n+2)K_{po}} \right]$$

$$F_{D'a''} = \frac{2+n}{3|H|} e^{j120^\circ} \left[Z_K + |Z_Y| a + \frac{3R_n}{(n+2)K_{po}} \right]$$

$$F_{D'b''} = \frac{2+n}{3|H|} \left[Z_K + Z_d - \frac{n-1}{n+2} a (Z_d - |Z_Y| a) + \frac{3R_n}{(n+2)K_{po}} \right]$$

$$F_{D'c''} = \frac{2+n}{3|H|} e^{-j120^\circ} \left[Z_K + Z_d - \frac{n-1}{n+2} a^2 (Z_d - |Z_Y| a) + \frac{3R_n}{(n+2)K_{po}} \right]$$

(2) 经过渡阻抗两相接地

等值系统接地已如图 6, (b) 和图 10, (b) 所示。

a. 正方向接地时

$$I_{1K} + I_{2K} + I_{0K} = 0$$

因为 $K_{p1} = K_{p2} = K_{p0}$, 所以 $I_1 + I_2 + I_0 = 0$

短路点电压

$$E - (Z_{1\Sigma} + R_c)I_{1K} = -(Z_{1\Sigma} + R_c)I_{2K} = -(nZ_{1\Sigma} + R_c + 3R_k)I_{0K}$$

$$\text{故 } I_{2K} = \frac{nZ_{1\Sigma} + R_c + 3R_k}{Z_{1\Sigma} + R_c} I_{0K}$$

$$\begin{aligned} E &= (Z_{1\Sigma} + R_c)(I_{1K} - I_{2K}) = (Z_{1\Sigma} + R_c)(I_{1K} + I_{2K} - 2I_{2K}) \\ &= (Z_{1\Sigma} + R_c) \left(-I_{0K} - 2I_{0K} \frac{nZ_{1\Sigma} + R_c + 3R_k}{Z_{1\Sigma} + R_c} \right) \\ &= -[(1 + 2n)Z_{1\Sigma} + 3(R_c + 2R_k)] I_{0K} \end{aligned}$$

被比较电压

$$\begin{aligned} V_a' &= E - I_1 Z_c - I_2 Z_c - I_0 n Z_c - [I_1 + I_2 + I_0 + 3I_0] |Z_Y| a \\ &= E - K_{p0} Z_c (I_{1K} + I_{2K}) - n Z_c K_{p0} I_{0K} - 3 K K_{p0} I_{0K} |Z_Y| a \\ &= E - (n-1) K_{p0} Z_c I_{0K} - 3 K K_{p0} I_{0K} |Z_Y| a \\ &= -[(1 + 2n)Z_{1\Sigma} + 3(R_c + 2R_k) + (n-1)K_{p0} Z_c + 3 K K_{p0} |Z_Y| a] I_{0K} \\ &= -[(2n+1)K_{p0}(Z_c + Z_k) + 3(R_c + 2R_k) + (n-1)K_{p0} Z_c \\ &\quad + (n-1)K_{p0} |Z_Y| a] I_{0K} \\ &= -(2n+1)K_{p0} \left\{ Z_k + \frac{3n}{2n+1} Z_c + \frac{n-1}{2n+1} |Z_Y| a + \frac{3(R_c + 2R_k)}{(2n+1)K_{p0}} \right\} I_{0K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_b' &= a^2 V_1 + a V_2 + V_0 - [a^2 I_1 + a I_2 + n I_0] |Z_Y| a = a^2 (U_{1K} + I_{1K} R_c + K_{p0} I_{1K} Z_k) \\ &\quad + a (U_{2K} + I_{2K} R_c + K_{p0} I_{2K} Z_k) + (U_{0K} + I_{0K} R_c + I_{0K} 3R_s + K_{p0} I_{0K} n Z_k) \\ &\quad - K_{p0} [a^2 I_{1K} + a I_{2K} + n I_{0K}] |Z_Y| a = a^2 I_{1K} (R_c + K_{p0} Z_k - K_{p0} |Z_Y| a) \\ &\quad + a I_{2K} (R_c + K_{p0} Z_k - K_{p0} |Z_Y| a) + I_{0K} (R_c + 3R_s + n K_{p0} Z_k - n K_{p0} |Z_Y| a) \\ &= K_{p0} (Z_k - |Z_Y| a) (a^2 I_{1K} + a I_{2K} + n I_{0K}) + R_c (a^2 I_{1K} + a I_{2K} + I_{0K}) + 3R_s I_{0K} \end{aligned}$$

在 $Z_{1\Sigma} \gg R_c$, $nZ_{1\Sigma} \gg 3R_s$ 的情况下, 可认为

$$I_{2K} = \frac{nZ_{1\Sigma} + R_c + 3R_s}{Z_{1\Sigma} + R_c} I_{0K} \approx n I_{0K}$$

$$\begin{aligned} \text{故 } V_b' &= K_{p0} (Z_k - |Z_Y| a) [-a^2 (I_{2K} + I_{0K}) + a I_{2K} + n I_{0K}] + R_c [-a^2 (I_{2K} + I_{0K}) \\ &\quad + a I_{2K} + I_{0K}] + 3R_s I_{0K} = K_{p0} (Z_k - |Z_Y| a) [(a-a^2)n + n-a^2] I_{0K} \\ &\quad + R_c [(a-a^2)n + 1 - a^2] I_{0K} + 3R_s I_{0K} = \{K_{p0} (Z_k - |Z_Y| a) [-a^2 (2n+1)] \\ &\quad + a^2 R_c [(a^2 - 1)n + a - 1] + 3R_s\} I_{0K} \\ &= -a^2 (2n+1) K_{p0} \left\{ Z_k - |Z_Y| a - \frac{R_c}{(2n+1)K_{p0}} (a^2 - 1)n + a - 1 \right\} \\ &\quad - \frac{3R_s a}{(2n+1)K_{p0}} \left\} I_{0K} \\ &= -a^2 (2n+1) K_{p0} \left\{ Z_k - |Z_Y| a - \frac{\sqrt{3} R_e a}{(2n+1)K_{p0}} (jn + e^{j30^\circ}) \right. \\ &\quad \left. - \frac{3R_s a}{(2n+1)K_{p0}} \right\} I_{0K} \end{aligned}$$

$$= -a^2(2n+1)K_{p0} \left\{ Z_K - |Z_Y| a - \frac{a}{2(2n+1)K_{p0}} \left[3(R_c + 2R_g) + j\sqrt{3}R(2n+1) \right] \right\} I_{0K}$$

将 $V_{b'}$ 中 $a^2 \rightarrow a$, 置换后即得

$$\begin{aligned} V_{c'} &= -a(2n+1)K_{p0} \left\{ Z_K - |Z_Y| a - \frac{R_c}{(2n+1)K_{p0}} [(a-1)n + a^2 - 1] - \frac{3R_c a^2}{(2n+1)K_{p0}} \right\} I_{0K} \\ &= -a(2n+1)K_{p0} \left\{ Z_K - |Z_Y| a - \frac{\sqrt{3}R_c a}{(2n+1)K_{p0}} (ne^{j30^\circ} + j1) - \frac{3R_c a^2}{(2n+1)K_{p0}} \right\} I_{0K} \\ &= -a(2n+1)K_{p0} \left\{ Z_K - |Z_Y| a - \frac{3(nR_c - R_c) + j\sqrt{3}[R_c(n+2) + 3R_c]}{2(2n+1)K_{p0}} a \right\} I_{0K} \end{aligned}$$

所以

$$\begin{aligned} F_{D'a'} &= -\frac{2n+1}{3|H|} e^{-j60^\circ} \left\{ Z_K + \frac{3n}{2n+1} Z_c + \frac{n-1}{2n+1} |Z_Y| a + \frac{3(R_c + 2R_g)}{(2n+1)K_{p0}} \right\} \\ F_{D'b'} &= \frac{2n+1}{3|H|} \left\{ Z_K - |Z_Y| a - \frac{3(R_c + 2R_g) + j\sqrt{3}R(2n+1)}{2(2n+1)K_{p0}} e^{j120^\circ} \right\} \\ F_{D'c'} &= -\frac{2n+1}{3|H|} e^{j60^\circ} \left\{ Z_K - |Z_Y| a - \frac{3(nR_c - R_c) + j\sqrt{3}[R_c(n+2) + 3R_c]}{2(2n+1)K_{p0}} e^{j120^\circ} \right\} \\ F_{D'a''} &= -\frac{2n+1}{3|H|} \left\{ Z_K + \frac{3n}{2n+1} Z_c + \frac{n-1}{2n+1} |Z_Y| a + \frac{3(R_c + 2R_g)}{(2n+1)K_{p0}} \right\} \\ F_{D'b''} &= \frac{2n+1}{3|H|} e^{j60^\circ} \left\{ Z_K - |Z_Y| a - \frac{3(R_c + 2R_g) + j\sqrt{3}R(2n+1)}{2(2n+1)K_{p0}} e^{j120^\circ} \right\} \\ F_{D'c''} &= -\frac{2n+1}{3|H|} e^{j120^\circ} \left\{ Z_K - |Z_Y| a - \frac{3(nR_c - R_c) + j\sqrt{3}[R_c(n+2) + 3R_c]}{2(2n+1)K_{p0}} e^{j120^\circ} \right\} \end{aligned}$$

b. 反方向接地时

只需将上列被比较电压中 $|Z_Y| a \rightarrow (-|Z_Y| a)$, $Z_c \rightarrow Z$, $I_{0K} \rightarrow I''_{0K}$, 故

$$\begin{aligned} V_{a''} &= -(2n+1)K_{p0} \left\{ Z_K + \frac{3n}{2n+1} Z_c - \frac{n-1}{2n+1} |Z_Y| a + \frac{3(R_c + 2R_g)}{(2n+1)K_{p0}} \right\} I''_{0K} \\ V_{b''} &= -a^2(2n+1)K_{p0} \left\{ Z_K + |Z_Y| a - \frac{a}{2(2n+1)K_{p0}} [3(R_c + 2R_g) + j\sqrt{3}R(2n+1)] \right\} I''_{0K} \\ V_{c''} &= -a(2n+1)K_{p0} \left\{ Z_K + |Z_Y| a - \frac{3(nR_c - R_c) + j\sqrt{3}[R_c(n+2) + 3R_c]}{2(2n+1)K_{p0}} a \right\} I''_{0K} \end{aligned}$$

基准电压为变

$$\begin{aligned} V_{D'a''} &= -3K_{p0} I''_{0K} |H| e^{j60^\circ} \\ V_{D'b''} &= -3K_{p0} I''_{0K} |H| \end{aligned}$$

所以

$$\begin{aligned} F_{D'a''} &= \frac{2n+1}{3|H|} e^{-j60^\circ} \left\{ Z_K + \frac{3n}{2n+1} Z_c - \frac{n-1}{2n+1} |Z_Y| a + \frac{3(R_c + 2R_g)}{(2n+1)K_{p0}} \right\} \\ F_{D'b''} &= -\frac{2n+1}{3|H|} \left\{ Z_K + |Z_Y| a - \frac{a}{2(2n+1)K_{p0}} [3(R_c + 2R_g) + j\sqrt{3}R(2n+1)] \right\} \end{aligned}$$

$$E_{D'c}' = \frac{2n+1}{3|H|} e^{j60^\circ} \left\{ Z_K + |Z_V| a - \frac{3(nR_c - R) + j\sqrt{3}[R(n+2) + 3R]}{2(2n+1)K_p} a \right\}$$

$$E_{D'c}' = \frac{2n+1}{3|H|} \left\{ Z_K + \frac{3n}{2n+1} Z - \frac{n-1}{2n+1} |Z_V| a + \frac{3(R_c + 2R)}{(2n+1)K_p} \right\}$$

$$E_{D'c}' = \frac{2n+1}{3|H|} a^2 \left\{ Z_K + |Z_V| a - \frac{a}{2(2n+1)K_p} [3(R_c + 2R) + j\sqrt{3}R(2n+1)] \right\}$$

$$E_{D'c}' = \frac{2n+1}{3|H|} a \left\{ Z_K + |Z_V| a - \frac{3(nR_c - R) + j\sqrt{3}[R(n+2) + 3R]}{2(2n+1)K_p} a \right\}$$

(3) 正方向 A 相金属性接地伴随系统振荡

等值系统接线已如图 21 所示。复合相序网络如图 32, (a) 所示。对正序网络可用戴维南定理等值为图 32, (b), 其中

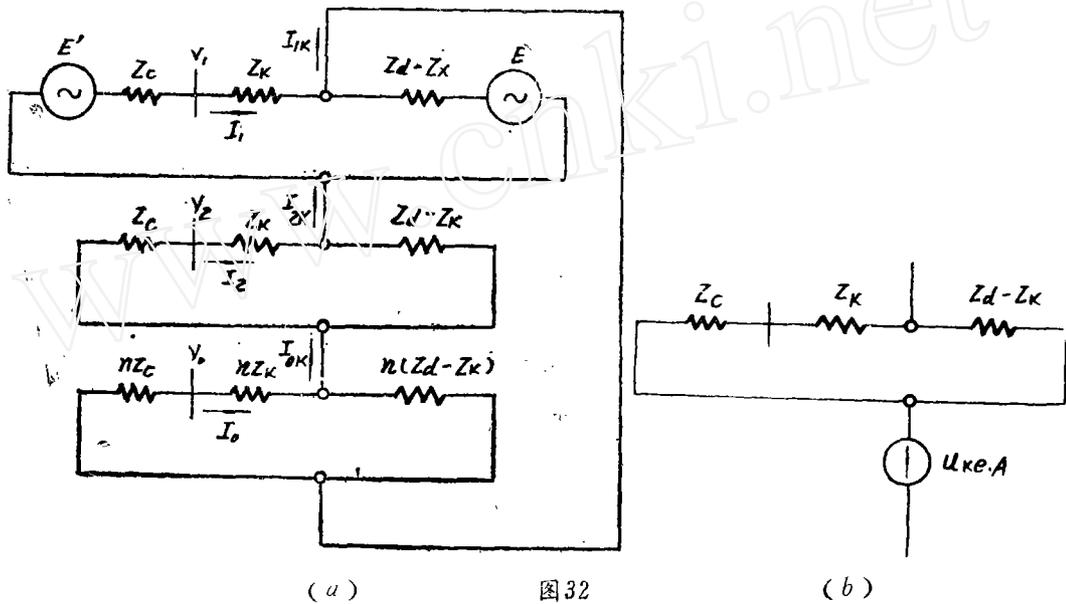


图 32

$$U_{Kc.A} = \frac{E_{D'c}'(Z_d - Z_k) + E_{D'c}''(Z_c + Z_k)}{Z_c + Z_d}$$

故
$$I_{1K} = I_{2K} = I_{DK} = \frac{U_{Kc.A}}{(2+n)Z_{1\Sigma}}$$

$$I_2 = I_0 = K_{p0} I_{0K}, \quad K_{p0} = \frac{Z_{1\Sigma}}{Z_c + Z_k}$$

发生接地前振荡状态下流经测量元件的电流为

$$I_{1,1} = \frac{E'_{D'c} - E''_{D'c}}{Z_c + Z_d}$$

运用重迭原理, 即将接地前振荡状态迭加随之而来的事故状态便可写出被比较电压值。

由于事故分量 $I_{1K}^{(II)} = I_{2K}^{(II)} = I_{0K}^{(II)}$, 所以 $I_1^{(II)} = I_2^{(II)} = I_0^{(II)}$

而故 $U_{1K}^{(\pi)} + U_{2K}^{(\pi)} + U_{0K}^{(\pi)} = -U_{KsA}$

$$\begin{aligned}
 V_a' &= V_1 + V_2 + V_0 - (I_1 + I_2 + nI_0) |Z_i| a = V_{YA} + V_1^{(\pi)} + V_2^{(\pi)} + V_0^{(\pi)} \\
 &- [I_{YA} + I_1^{(\pi)} + I_2^{(\pi)} + nI_0^{(\pi)}] |Z_i| a = E_A' - I_{YA}Z_c + U_{1K}^{(\pi)} \\
 &+ I_1^{(\pi)}Z_K + U_{2K}^{(\pi)} + I_2^{(\pi)}Z_K + U_{0K}^{(\pi)} + I_0^{(\pi)}nZ_K - [I_{YA} + (2+n)I_0^{(\pi)}] |Z_Y| a \\
 &= E_A' - I_{YA}Z_c - U_{KsA} + (2+n)Z_K I_0^{(\pi)} - [I_{YA} + (2+n)I_0^{(\pi)}] |Z_Y| a = I_Y(Z_c + Z_K) - I_{YA}Z_c + (2+n)Z_K I_0^{(\pi)} \\
 &- [I_{YA} + (2+n)I_0^{(\pi)}] |Z_Y| a = (Z_K - |Z_i| a) [I_{YA} + (2+n)I_0^{(\pi)}] \\
 &= (Z_K - |Z_Y| a) \left[(2+n) + \frac{I_{YA}}{K_{po}I_{0K}} \right] I_0^{(\pi)} \\
 &= (Z_K - |Z_Y| a) \left[(2+n) + \frac{E_A' - E_A''}{(Z_c + Z_d) K_{po} I_{0K}} \right] I_0^{(\pi)}
 \end{aligned}$$

设 $E' = \frac{1}{P} E'' e^{j\delta}$, 即 $|E_A''| = P |E_A'| = P |E|$, 则

$$\begin{aligned}
 V_a' &= (Z_K - |Z_i| a) \left[(2+n) + \frac{|E| (e^{j\delta} - P)}{(Z_c + Z_d) \frac{U_{Ks}}{(Z_c + Z_K)(2+n)}} \right] I_0^{(\pi)} \\
 &= (2+n)(Z_K - |Z_Y| a) \left[1 + \frac{|E| (e^{j\delta} - P)}{(Z_c + Z_K) U_{Ks}} \right] I_0^{(\pi)} \\
 &= (2+n)(Z_K - |Z_i| a) \left[1 + \frac{(Z_c + Z_d) |E| (e^{j\delta} - P)}{(Z_c - Z_K) |E| e^{j\delta} + (Z_c + Z_K) P} \right] I_0^{(\pi)}
 \end{aligned}$$

令 $\lambda = \frac{Z_c - Z_K}{Z_c + Z_K}$, 则

$$\begin{aligned}
 V_a' &= (2+n)(Z_K - |Z_Y| a) \left[1 + \frac{e^{j\delta} - P}{\lambda e^{j\delta} + P} \right] I_0^{(\pi)} \\
 &= \frac{(2+n)(\lambda + 1)}{\lambda} (Z_K - |Z_Y| a) \frac{e^{j\delta}}{e^{j\delta} + \frac{P}{\lambda}} I_0^{(\pi)}
 \end{aligned}$$

所以 $F_{D_s}' = \frac{(2+n)(\lambda + 1)}{3 |H| \lambda} (Z_K - |Z_Y| a) \frac{e^{j\delta}}{e^{j\delta} + \frac{P}{\lambda}}$

$$\begin{aligned}
 V_b' &= a^2 V_1 + a V_2 + V_0 - (a^2 I_1 + a I_2 + n I_0) |Z_Y| a = a^2 (E_A' - I_1 Z_c) - a I_2 Z_c - I_0 n Z_c \\
 &- (a^2 I_1 + a I_2 + n I_0) |Z_i| a = a^2 E_A' - a^2 I_1 (Z_c + |Z_i| a) - a I_2 (Z_c + |Z_i| a) \\
 &- n I_0 (Z_c + |Z_Y| a) = a^2 E_A' - (Z_c + |Z_i| a) [a^2 I_1 + (a+n) I_0] = a^2 E_A' \\
 &- (Z_c + |Z_i| a) [a^2 (I_{YA} + I_0) + (a+n) I_0] = a^2 E_A' - (Z_c + |Z_i| a) [a^2 I_{YA} \\
 &+ (n-1) I_0]
 \end{aligned}$$

因为 $E_A' = I_1 (Z_c + Z_K) + I_{0K} (1+n) Z_{i0} = I_1 (Z_c + Z_K) + I_{0K} (1+n) K_{i0} (Z_c + Z_K)$
 $= (Z_c + Z_K) [I_{YA} + I_0 + (1+n) I_0] = (Z_c + Z_K) [I_{YA} + (n+2) I_0]$

所以 $V_b' = a^2 (Z_c + Z_K) [I_{YA} + (n+2) I_0] - (Z_c + |Z_i| a) [a^2 I_{YA} + (n-1) I_0]$
 $= a^2 I_{YA} (Z_K - |Z_Y| a) + a^2 I_0 [(n+2)(Z_c + Z_K) - a(n-1)(Z_c + |Z_Y| a)]$

由于
$$\frac{I_{YA}}{I_0} = \frac{E_A' - E_A''}{(Z_C + Z_d)K_{p0}I_{0K}} = \frac{(n+2)(Z_C + Z_K)(E_A' - E_A'')}{(Z_C + Z_d)U_{KdA}}$$

$$= \frac{(n+2)(Z_C + Z_K)|E|(e^{j\delta} - P)}{(Z_d - Z_K)|E|e^{j\delta}(Z_C + Z_K)P|E|} = \frac{(n+2)(Z_C + Z_K)(e^{j\delta} - P)}{(Z_d - Z_K)e^{j\delta} + P(Z_C + Z_K)}$$

$$= \frac{(n+2)(e^{j\delta} - P)}{\lambda e^{j\delta} + P}$$

故
$$F_{Db'} = \frac{a^2}{3|H|} \left\{ \frac{I_{YA}}{I_0} (Z_K - |Z_Y|a) + [(n+2)(Z_C + Z_K) - a(n-1)(Z_C + |Z_Y|a)] \right\}$$

$$= \frac{(n+2)a^2}{3|H|} \left\{ (Z_K - |Z_Y|a) \frac{e^{j\delta} - P}{\lambda e^{j\delta} + P} + \left[Z_C + Z_K - \frac{n-1}{n+2}a(Z_C + |Z_Y|a) \right] \right\}$$

$$= \frac{n+2}{3|H|\lambda} a^2 \left\{ (Z_K - |Z_Y|a) \frac{e^{j\delta} - P}{e^{j\delta} + \frac{P}{\lambda}} + \lambda \left[Z_K + Z_C - \frac{n-1}{n+2}a(Z_C + |Z_Y|a) \right] \right\}$$

将 V'_0 中 $a^2 \rightarrow a$, $a \rightarrow a^2$ 置换后即得

$$V_{c'} = aI_{YA}(Z_K - |Z_Y|a) + aI_0 [(n+2)(Z_C + Z_K) - a^2(n-1)(Z_C + |Z_Y|a)]$$

所以
$$F_{Dc'} = \frac{n+2}{3|H|\lambda} a \left\{ (Z_K - |Z_Y|a) \frac{e^{j\delta} - P}{e^{j\delta} + \frac{P}{\lambda}} + \lambda \left[Z_K + Z_C - \frac{n-1}{n+2}a^2(Z_C + |Z_Y|a) \right] \right\}$$

(4) 平行线实现零序互感补偿

等值系统接线已如图27所示。被保护线路末端A相金属性接地时的复合相序网络如图33所示。

被比较电压

$$V_a' = V_1 + V_2 + V_0 - (I_1 + I_2 + nI_0)|Z_Y|a - 3I_0Z_{m0} = E - 2I_1Z_c - 2I_2Z_c - 2I_0nZ_c$$

$$- (2I_1 + nI_0)|Z_Y|a - 3I_0Z_{m0} = (2Z_{1\Sigma} + Z_{0\Sigma})I_{0K} - 4I_1Z_c - 2I_0nZ_c$$

$$- (2I_1 + nI_0)|Z_Y|a - 3I_0Z_{m0} = 2I_1(2Z_c + Z_K) + (2nZ_c + nZ_K + 3Z_{m0})I_0 - 4I_1Z_c$$

$$- 2I_0nZ_c - (2I_1 + nI_0)|Z_Y|a - 3I_0Z_{m0} = 2I_1(Z_K - |Z_Y|a) + nI_0(Z_K - |Z_Y|a)$$

$$(Z_K - |Z_Y|a)(2I_1 + nI_0) - (Z_K - |Z_Y|a) \left(2 \frac{K_{p0}}{K_{p0}} + n \right) K_{p0}I_{0K} = (Z_K - |Z_Y|a)$$

$$\left[2 \cdot \frac{Z_c'}{2(Z_c + Z_c') + Z_K} \cdot \frac{2n(Z_c + Z_c') + nZ_K + 3Z_{m0}}{nZ_c'} + n \right] K_{p0}I_{0K}$$

$$= (Z_K - |Z_Y|a) \left[2 + n + \frac{3Z_{m0}}{n(Z_c + Z_c' + \frac{Z_K}{2})} \right] K_{p0}I_{0K}$$

所以
$$F_{Da'} = \frac{1}{3|H|} \left[2 + n + \frac{3Z_{m0}}{n(Z_c + Z_c' + \frac{Z_K}{2})} \right] (Z_K - |Z_Y|a)$$

$$\begin{aligned}
V_1' &= a^2 V_1 + a V_2 + V_0 - (a^2 I_1 + a I_2 + n I_0) |Z| a - 3 I_0 Z_{m0} = a^2 (E - 2 I_1 Z_c) \\
&\quad - 2 a I_1 Z - 2 I_0 n Z - [(a^2 + a) I_1 + n I_0] |Z| a - 3 I_0 Z_{m0} = a^2 [2 Z_{1x} \\
&\quad + Z_{0x}] I_0 - 2 I_1 Z - 2 a I_1 Z - 2 I_0 n Z - [-I_1 + n I_0] |Z| a - 3 I_0 Z_{m0} \\
&= a^2 [2 I_1 (Z_c + Z_K) + (2 n Z + n Z_K + 3 Z_{m0}) I_0 - 2 I_1 Z] - 2 a I_1 Z - 2 I_0 n Z \\
&\quad + (I_1 - n I_0) |Z| a - 3 I_0 Z_{m0} = \frac{K_{11}'}{K_{11}} I_0 [2 a^2 (Z_c + Z_K) - 2 a Z_c + |Z_Y| a] \\
&\quad + n I_0 [a^2 Z_K - |Z_Y| a] + (a^2 - 1) I_0 (2 n Z + 3 Z_{m0}) \\
&= I_0 \left\{ \frac{Z_c'}{2(Z_c + Z_c') + Z_Y} \cdot \frac{2 n (Z_c + Z_c') + n Z_K + 3 Z_{m0}}{n Z_c'} \cdot [2 a^2 (Z_c + Z_K) \right. \\
&\quad \left. - 2 a Z_c + |Z_Y| a] + n (a^2 Z_K - |Z_Y| a) + (a^2 - 1) (2 n Z + 3 Z_{m0}) \right\}
\end{aligned}$$

再进一步简化可变为

$$\begin{aligned}
V_1' &= I_0 \left\{ (2 Z_c + Z_K) a^2 (2 + n) - (n - 1) (2 Z_c + |Z_Y| a) \right. \\
&\quad \left. + 3 Z_{m0} \left[\frac{2 a^2 (Z_c + Z_K) - 2 a Z_c + |Z_Y| a}{2 n (Z_c + Z_c' + \frac{Z}{Z_c})} + (a^2 - 1) \right] \right\}
\end{aligned}$$

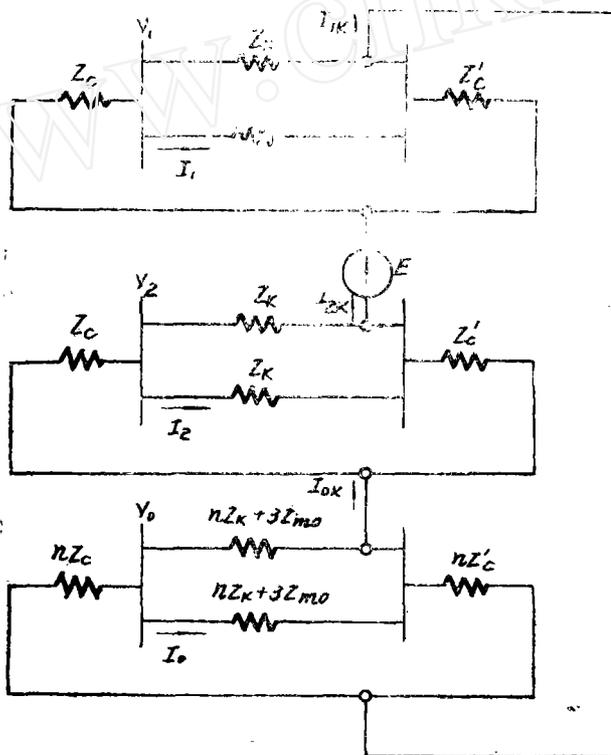


图33

对一般短线路 $Z_c \ll 2(Z_c + Z_c')$, $Z_{m0} \approx 0.5 Z_c$, $|Z| \ll |Z_c + Z_c'|$ 所以

$$V_1' \approx I_0 \{ 2 a^2 (2 + n) Z_c + (2 + n) a^2 Z_K - (n - 1) (2 Z_c + |Z_Y| a) + 3 Z_{m0} \}$$

$$\begin{aligned}
 & \cdot \left\{ 2 a^2 Z_c + \frac{2 Z_c (a^2 - a) + |Z_Y| a}{2n(Z_c + Z_c')} + (a^2 - 1) \right\} = (2 + n) a^2 I_0 \left\{ Z_k \right. \\
 & \left. + 2 Z_c - \frac{n-1}{n+2} a (2 Z_c + |Z_Y| a) + \frac{3 \sqrt{3} Z_{m0}}{n+2} e^{-j30^\circ} \left[\frac{Z_c}{n(Z_c + Z_c')} e^{j60^\circ} + 1 \right] \right\} \\
 F_{Dh}' &= \frac{2+n}{3|H|} a^2 \left\{ Z_k + 2 Z_c - \frac{n-1}{n+2} a (2 Z_c + |Z_Y| a) + \frac{3 \sqrt{3} Z_{m0}}{n+2} e^{-j30^\circ} \right. \\
 & \left. \left[\frac{Z_c}{n(Z_c + Z_c')} e^{j60^\circ} + 1 \right] \right\}
 \end{aligned}$$

同理可推得

$$\begin{aligned}
 V_{c'} &= I_0 (2 + n) a \left\{ Z_k + 2 Z_c - \frac{n-1}{n+2} a (2 Z_c + |Z_Y| a) + \right. \\
 & \left. \frac{3 \sqrt{3} Z_{m0}}{n+2} e^{j30^\circ} \left[\frac{Z_c}{n(Z_c + Z_c')} e^{-j60^\circ} + 1 \right] \right\}
 \end{aligned}$$

所以

$$\begin{aligned}
 F_{Vc}' &= \frac{2+n}{3|H|} a \left\{ Z_k + 2 Z_c - \frac{n-1}{n+2} a (2 Z_c + |Z_Y| a) + \frac{3 \sqrt{3} Z_{m0}}{n+2} e^{j30^\circ} \right. \\
 & \left. \left[\frac{Z_c}{n(Z_c + Z_c')} e^{-j60^\circ} + 1 \right] \right\}
 \end{aligned}$$