

距离继电器动作行为的分析

东北电业管理局技术改进局 王梅义

提 要

本文简要的指出了沿用的“阻抗分析法”的局限性,阐明了距离继电器的基本原理,提出了用“电压向量图法”来分析各种距离继电器在各种运行方式与故障情况下,特别是在故障前带负荷的线路上发生经电阻接地或短路的故障情况下的动作行为。对这种方法的理论基础和运用步序作了详尽的说明。并以常用的几种距离继电器为例,用这种新的方法对它们的主要运行性能进行了分析。也简单的比较了几种接地距离继电器在单相接地时的保护性能。

第一部分 基本原理

第一节:阻抗分析法的局限性

利用距离继电器的阻抗特性,在阻抗平面上研究距离继电器的动作行为,是分析这种继电器最为常用的一种方法。对于那些在阻抗平面上难于直接表示的距离继电器,也都力图在某些特定的条件下找出它的阻抗动作特性,然后据之以进行研究分析。

这种在阻抗平面上研究距离继电器动作行为的方法,用之于单电源线路的故障和双电源全相振荡时的情况,对许多继电器都相当简捷直观,但是也往往只此而已。

阻抗分析法比较明显的局限性和缺陷,表现在用于分析下列问题之时。

- 1) 电压和电流的输入量超过两个的距离继电器。
- 2) 双电源带电阻短路或接地。

这两方面,也是研究距离继电器动作行为时所偏重的问题。

阻抗分析法之所以具有局限性,其原因可简述如下。

用阻抗分析法,要经过下列步序。

第一步,求出距离继电器在阻抗平面上的动作特性。

先以通入两个不同电气量的距离继电器为例,例如通入 \dot{u}_1 及 \dot{u}_2 。

$$\left. \begin{aligned} \dot{u}_1 &= \dot{u}_m - \dot{I}_m Z_{j1}; \\ \dot{u}_2 &= A \dot{u}_m - B \dot{I}_m Z_{j2} \end{aligned} \right\} (1)$$

式中 \dot{u}_m 及 \dot{I}_m 是组成 μ_1 与 μ_2 的输入电压及电流量。 Z_{j1} 与 Z_{j2} 是阻抗向量, A 与 B

是无量纲向量，这四者都是继电器内部的参数。继电器的动作条件是 u_1 与 u_2 间符合某一特定关系，例如：

$$\alpha \leq \arg u_1 - \arg u_2 \leq \beta \quad (2)$$

把 \dot{u}_1 及 \dot{u}_2 都除以 \dot{I}_m ，并令 $\frac{\dot{u}_m}{\dot{I}_m} = Z$ ，则得：

$$\left. \begin{aligned} \frac{\dot{u}_1}{\dot{I}_m} &= Z - Z_{r1} \\ \frac{\dot{u}_2}{\dot{I}_m} &= \dot{A}Z - \dot{B}Z \end{aligned} \right\} (3)$$

继电器的动作条件是：

$$\alpha \leq \arg (Z - Z_{r1}) - \arg (\dot{A}Z - \dot{B}Z_{r2}) \leq \beta \quad (4)$$

当 \dot{A} 与 \dot{B} 及 Z_{r1} 与 Z_{r2} 都是定数时，式(4)只是复变数 Z 的函数，一般都能在阻抗平面上用简单的几何轨迹——直线或圆——表示它的动作边界条件。以最常用的相间方向距离继电器为例， $\dot{A} = 1$ ， $\dot{B} = 0$ ， $\alpha = 90^\circ$ ， $\beta = -90^\circ$ ，它在阻抗平面上的动作轨迹是以 Z_{r1} 为直径经过座标原点的一个圆。

但是如果 \dot{A} 与 \dot{B} 不是常数，那么在(4)式中的变数就不只是复变数 Z ，还有 \dot{A} 与 \dot{B} ，此时的变数数大于2（ Z 本身就占了两个），因此不可能在平面坐标系上用一条单一曲线来表示，而只能固定不同的 \dot{A} 与 \dot{B} ，做成一组曲线族。例如，为了提高相间方向距离继电器在两相短路时的保护性能，一般都在极化电压回路中附加非故障相的电压，此时，以保护 AB 相的为例，

$$\left. \begin{aligned} \dot{u}_1 &= \dot{u}_{AB} - (\dot{I}_A - \dot{I}_B) Z_r \\ \dot{u}_2 &= \dot{u}_{AB} - jn \dot{u}_c \quad (n \ll 1) \end{aligned} \right\} (5)$$

其动作边界条件是：

$$\alpha \leq \arg (Z - Z_r) - \arg (Z - jn \frac{\dot{u}_c}{\dot{I}_A - \dot{I}_B}) \leq \beta \quad (6)$$

在式(6)中， $\frac{\dot{u}_c}{\dot{I}_A - \dot{I}_B}$ 一般不是 Z 的单一函数，所以式(6)在阻抗平面上不是一个单一的几何轨迹，但在特殊情况下，例如单电源线路，当发生 AB 两相短路时，

$$\dot{I}_A - \dot{I}_B = \frac{\dot{E}_A - \dot{E}_B}{Z + Z_s}$$

其中 Z_s 是继电器压安装处的电源阻抗， $\frac{-jn \dot{u}_c}{\dot{I}_A - \dot{I}_B} = \frac{n}{\sqrt{3}} (Z + Z_s)$ ，

$$Z - jn \frac{\dot{u}_c}{\dot{I}_A - \dot{I}_B} = Z + \frac{n}{1 + \frac{n}{\sqrt{3}}} Z_s$$

此时，继电器在阻抗平面上的动作边界是以 Z_r 端

点 $5 \frac{-\frac{n}{\sqrt{3}}}{1 + \frac{n}{\sqrt{3}}} Z_s$ 端联线为直径的一个园点。

又例如，保护相间短路的多相补偿距离继电器，其输入量为：

$$\dot{u}_1 = \dot{u}_{BC} - (\dot{I}_B - \dot{I}_C) Z_I$$

$$\dot{u}_2 = \dot{u}_{AB} - (\dot{I}_A - \dot{I}_B) Z_I$$

它具有四个复变量，或三个独立的复变量，只有当 $\frac{\dot{u}_{AB}}{\dot{u}_{BC}}$ 及 $\frac{\dot{I}_A - \dot{I}_B}{\dot{I}_B - \dot{I}_C}$ 是 $Z = \frac{\dot{u}_{BC}}{\dot{I}_B - \dot{I}_C}$

的线性函数的特殊条件下，继电器才具有固定的动作阻抗轨迹。

以上说明，目前在超高压电网中最常用的距离继电器，除了在类似单电源线路这样最简单的一些情况而外，实际在阻抗平面上都没有固定的动作特性。

第二步，求距离继电器“看到”的阻抗。

求距离继电器“看到”的阻抗，除了一些极简单的情形外，只要短路或接地经过电阻，同时考虑两侧电源电势角摆开的话，它总是一些繁琐复杂的表示式。以最简单的三相对称性短路为例。

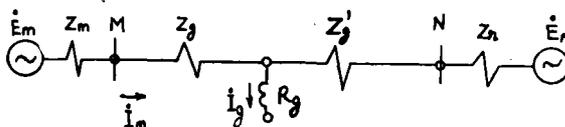


图1 三相对称性短路图

在M侧装设的线路距离继电器“看到”的阻抗是：

$$Z_M = \frac{\dot{u}_m}{\dot{I}_m}$$

$$= Z_g + \left(\frac{\dot{I}_g}{\dot{I}_m} \right) R_g$$

$$= Z_g + \frac{\frac{(Z_n + Z'_g) \dot{E}_m + (Z_m + Z_g) \dot{E}_n}{\dot{E}_m - \dot{E}_n} \cdot R_g}{\frac{Z_n + Z'_g}{Z_m + Z_g + Z'_g + Z_n} \left[\frac{(Z_n + Z'_g) \dot{E}_m + (Z_m + Z_g) \dot{E}_n}{\dot{E}_m - \dot{E}_n} + Z_m + Z_g \right] + R_g}$$

$$\Delta Z = \left(\frac{\dot{I}_g}{\dot{I}_m} \right) R_g$$

由 R_g 产生的M侧距离继电器“看到”的附加阻抗 ΔZ 是故障电阻 R_g 的非线性函数，它与 R_g 的大小，故障点位置，两侧电源电势大小及相位等都有关系。由 ΔZ 的表示

式, 很难直接看出某个因素变化(更不用说同时变化)时 ΔZ 的变化倾向, 和这个倾向对继电器动作性能的影响, 而必须结合具体情况, 代入具体的数字解才能得到结果。

为了研究这样形式的问题, 曾经着重研究过 $\Delta Z = \frac{\dot{A} + \dot{B}k \angle \theta}{\dot{C} + \dot{D}k \angle \delta}$ 这种数字表示式的

几何轨迹问题。当其他因素固定, k 由 $0 \rightarrow \pm \infty$ 间变化, 或者 θ 由 $0^\circ \rightarrow 360^\circ$ 间变化时, 两组轨迹为相互正交的两组圆族。但由于这些圆上的每一点与 ΔZ 原式中的变量(例如 R_g)间的关系成非线性对应, 要在 ΔZ 的圆轨迹上找到相对应的 R_g , 只得又求助于公式运算。因此, 即使在阻抗平面上画出了距离继电器“看到”阻抗的几何轨迹, 打算用以比较确切的说明和解决某些实际问题, 往往总不易得到好的效果。

上面的例子是三相对称短路。可以设想, 在单相接地或两相短路接地时欲求多输入量的距离继电器所“看到”的阻抗表示式, 虽然最终也总可能以 $\Delta Z = \frac{\dot{A} + \dot{B}k \angle \theta}{\dot{C} + \dot{D}k \angle \theta}$ 的

形式出现, 但因因素较多, 表示式本身也会更复杂些。要求从表示中看到某个因素变化时的动作倾向性也会更为困难。

以上说明了阻抗分析法为什么具有局限性。

虽然通过大量的数字计算和详细的归纳分析也可能找出解决各项因素变化时对距离继电器动作性能影响的趋势, 但是尽可能完善的先期的定性分析, 对缩短数字计算与试验研究的逐步摸索过程, 提高效率, 特别是力争避免对某些实用的重要情况疏漏, 是对距离继电器进行理论分析所应实现的任务, 理论分析首先是定性分析, 指出问题的可能所在, 指出可能的倾向, 要具有比较清晰的概念以及系统性与完整性。

用阻抗边界特性来反映距离继电器本身的电气性能, 一直存在着一些具体问题。一般地说, 距离继电器在电气性能上完全和方向继电器一样, 它们的动作边界都是反应通入继电器端子的综合电压的相位关系。而所谓的阻抗动作特性, 只不过是为了适应阻抗分析方法而间接演绎出来的一个抽象概念。距离继电器的动作阻抗特性, 实际只有与线路阻抗角相同的点才有实际意义, 因为这一点决定了继电器在线路发生金属短路时的保护范围。至于边界特性上的其他各点, 只有在某些特殊情况下, 才有理论上的价值。而在实际上, 由于构成继电器时存在不可避免的限制因素, 例如执行元件的起动功率不可能为零, 回路具有非线性等等, 因而实际的动作边界特性总是输入电流与电压的函数, 而不可能是固定的, 同时用一般试验方法所取得的动作边界特性, 例如固定通入电流值的大小所取得的结果, 即使和最简单的单电源情况也不相符合。

第二节 距离继电器的构成

距离继电器有各种的构成方式, 也有各种的分类方法, 但总括来说, 所有距离继电器都是由这样三部分: 即距离测量电压回路, 极化量回路和执行元件回路所组成。

一、距离测量电压

首先研究距离继电器为什么能测量距离。

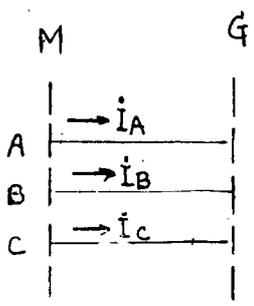


图2 三相线路区段

先分析三相线路区段的电压降。

如图2的三相平衡线路区段，G是故障点（或代表假定的其他任意点），M是母线，在

MG区间的线路阻抗值分别是：

$$\left. \begin{aligned}
 Z_{1L} &: \text{每相自阻抗} & Z_{1L} &= \frac{1}{3} (Z_{10} + 2Z_{11}) \\
 Z_{1M} &: \text{每相相间互感阻抗} & Z_{1M} &= \frac{1}{3} (Z_{10} - Z_{11}) \\
 Z_{11} &: \text{正序阻抗} & Z_{11} &= Z_{1L} - Z_{1M} \\
 Z_{10} &: \text{零序阻抗} & Z_{10} &= Z_{1L} + 2Z_{1M}
 \end{aligned} \right\} (7)$$

当取电流方向为由M向G，电压升的方向为由地向M及G时，则：

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{u}_{gA} &= \dot{u}_{mA} - (\dot{I}_A + 3k\dot{I}_0) Z_{11} \\
 \dot{u}_{gB} &= \dot{u}_{mB} - (\dot{I}_B + 3k\dot{I}_0) Z_{11} \\
 \dot{u}_{gC} &= \dot{u}_{mC} - (\dot{I}_C + 3k\dot{I}_0) Z_{11}
 \end{aligned} \right\} (8)$$

式(8)中， \dot{u}_{gA} 、 \dot{u}_{gB} 、 \dot{u}_{gC} 与 \dot{u}_{mA} 、 \dot{u}_{mB} 、 \dot{u}_{mC} 分别是G点及M点的A、B、C各相的对地电压， $k = Z_{1M}/Z_{11}$ 。只要MG区间没有短路故障或其他相对地或相对相间的分流存在，（请特别注意这个前提），也就是说，只要各相由M点流入线路的电流分别等于该相由线路流出G点的电流，不管这三相电流中的其他两相的电流的大小及相位如何，也不管MG区段外的状态如何，对于每一相自己来说，式(8)永远成立，例如，不管B相或C相是否断线，也不管MG区段外A相状态如何，式(8)中表示的M与G间的A相区段压降总是成立。同样对于B相与C相也成立。即

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{u}_{mGA} &= (\dot{I}_A + ZK\dot{I}_0) Z_{11} \\
 \dot{u}_{mGB} &= (\dot{I}_B + ZK\dot{I}_0) Z_{11} \\
 \dot{u}_{mGC} &= (\dot{I}_C + ZK\dot{I}_0) Z_{11}
 \end{aligned} \right\} (9)$$

上述的式(8)及(9)，对于任何没有短路故障或分流现象存在的三相系统区段，只要假定区段内的正序阻抗与负序阻抗相等，同样也成立。只是此时的 Z_{11} 是这段区间内的每相总正序阻抗， k 是这段区间内每相总互感阻抗与总正序阻抗的比值。

在电压向量图上，如果某一相的 \dot{u}_g 与 \dot{u}_m 为已知，

$\dot{u}_g = \vec{OG}$ ， $\dot{u}_m = \vec{Om}$ ，O是中性点，即确定了G与M两点（OG与Om两个相电压的向量终端）在电压向量图上的相对位置后，因为 Z_{11} 为已知，就可以直接求得由M流向

G 的 $(\dot{I}_\varphi + 3k\dot{I}_0)$ 的向量位置及大小如图3, \dot{I}_φ 代表相电流, $\dot{U}_{ng} = (\dot{I}_\varphi + 3k\dot{I}_0) Z_{11}$, $\theta = \arg Z_{11}$ 。补充说明一点, $(\dot{I}_\varphi + 3k\dot{I}_0)$ 的大小及相位只决定于 \dot{U}_{ng} , 而与 \dot{U}_φ 或 \dot{u}_m 的绝对值无关, 在电压相位图上, 表现为与中性点 O 的位置无关而只与 M 与 G 两点的相对位置有关。

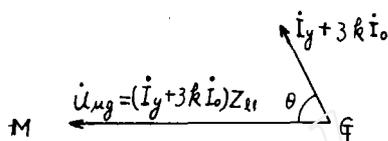


图3 MG 区间的电压降与电流相位

在由母线 M 配出的 MG 线路上, 当向继电器通入线路电流 $(I_\varphi + 3kI_0)$ 及同名相的对地电压 U_φ 以构成补偿电压 u'_φ , 且

$$\dot{u}'_\varphi = \dot{U}_\varphi - (\dot{I}_\varphi + 3k\dot{I}_0) Z_r \quad (10)$$

时, 式 (10) 中 Z_r 是补偿阻抗, $Z_r = n Z_{11}$ 。如果 G 是故障点, 当发生该相的金属性对地短路时, $\dot{u}_g = 0$, 则

$$\dot{U}'_\varphi = (\dot{I}_\varphi + 3k\dot{I}_0) (Z_{11} - Z_r)$$

又如果 Z_r 与 Z_{11} 的阻抗角完全一样, 即 n 为任意实数时, 则此时,

$$\begin{aligned} \dot{u}'_\varphi &= (1 - n) (\dot{I}_\varphi + 3k\dot{I}_0) Z_{11} \\ &= (1 - n) \dot{u}_\varphi \end{aligned} \quad (11)$$

由式 (11) 可见, 当 Z_r 与 Z_{11} 中之一固定, 另一均匀变化时, 当

$$\begin{aligned} Z_r > Z_{11} \text{ 时, } & n > 1, & \dot{u}'_\varphi & \text{与 } \dot{U}_\varphi \text{ 相位差 } 180^\circ \\ Z_r = Z_{11} \text{ 时, } & n = 1, & \dot{u}'_\varphi & = 0 \\ Z_r < Z_{11} \text{ 时, } & n < 1, & \dot{U}'_\varphi & \text{与 } \dot{u}_\varphi \text{ 同相。} \end{aligned}$$

由此可见, 若 Z_r 固定, 当故障点 G 的位置移动时, 虽然 \dot{u}'_φ 的绝对值只是均匀地变化, 但以 $Z_r = Z_{11}$ 为转折点, \dot{u}'_φ 与 \dot{U}_φ 间的相对相位却要发生 180° 的突然变化。具有这样特点的补偿电压 \dot{u}'_φ , 正是一个非常好的可资利用的继电器量, 即跃变量。也正是因为采用了这样的 \dot{u}'_φ , 才有可能在发生故障时使距离继电器的动作反应继电器按装处到故障点的距离。

对于任何保护接地短路的距离继电器, 显然必须具有 \dot{u}'_φ 这样的一个工作量, 因而对任何可能正确测量距离的继电器来说是一个共性的量, 这个补偿电压 \dot{U}'_φ 可以称之为“距离测量电压”, 而 Z_r 则是正比于被保护区段距离的距离继电器的整定阻抗。

对于保护两相短路故障的距离继电器, 因为在故障点只是相间电压为零 (金属短路

情况)而相对地电压不为零,所以必须采用两相距离测量电压的差值。以AB相间为例。

$$\begin{aligned}\dot{U}'_{AB} &= (\dot{u}_A - \dot{u}_B) - (\dot{I}_A - \dot{I}_B) Z_T \\ &= [\dot{u}_A - (\dot{I}_A + 3k\dot{I}_0) Z_T] - [\dot{u}_B - (\dot{I}_B + 3k\dot{I}_0) Z_T] \\ &= \dot{U}'_A - \dot{U}'_B\end{aligned}\quad (12)$$

对于三相短路及两相短路接地,采用相对地或相间距离测量电压都可以实现距离测量。

为了适应某些特殊性能要求,有时有意把 Z_T 与 Z_{L1} 的阻抗角选为不相等,但作为距离测量电压量时,它们间的相位角差都不会过大。

另外,为了某些特殊用途,可以把 Z_T 选为与 Z_{L1} 无关的其他阻抗值,例如用于杂负荷或反应振荡的一种特殊继电器——割线式继电器,它选用的 Z_T 是接近于电阻性的阻抗值,它的作用是用以反应线路功率中的有功分量。当然,它的动作不反应什么“距离”,但在动作原理上都是共通的。

二、极化量

除了距离测量电压外,在构成距离继电器的动作量时,还必须通入另一特定的交流量作为参考向量,以检测当故障发生在保护区内外时的 U' 相位翻转,并通过执行元件分别输出接通或断开的控制讯号。这个被选作参考向量的特定交流量,一般称之为距离继电器的极化量。

由于选用的极化量不同,可以构成各种不同性能的距离继电器,而距离继电器的性能如何,受极化量的影响最大。实际上对距离继电器性能的理论研究,归根结底主要集中在选用什么样的极化量上。

前面已经说明,只有当通入的极化量中只包含与距离测量电压完全相同的输入电流及电压量时,这样的距离继电器才能在理论的阻抗平面上有固定的动作阻抗边界特性,例如以 $\dot{u}_0 + (\dot{I}_0 + 3k\dot{I}_0) Z_T$ 作极化量就构成了包括坐标原点在内的非方向距离继电器,以 $(\dot{I}_0 + 3k\dot{I}_0)$ 或 $(\dot{I}_0 + 3k\dot{I}_0) Z_T$ 为极化量就构成了电抗式距离继电器等等。

但其他任何故障相与非故障相电流与电压的组合都可以作为继电器的极化量,前面谈到在相间方向距离继电器的极化电压中加入非故障相电压量,就是一个最简单的例子。

作为相间距离继电器(或接地距离继电器)常用的一种极化量方式,是以非故障相的距离测量电压为极化量,即对于不同相别的相间(或接地)故障,各相的距离测量电压互为极化量,也有可能再辅之以其他的极化量(例如在接地距离继电器中辅之以 $3\dot{I}_0$)。这种方式的继电器,目前被称为“多相补偿距离继电器”。对于它们在各种情况下的保护性能分析,是一个时期来引人注意的研究内容。

三、执行回路

前已说明,构成距离继电器动作的基本判据是距离测量电压与极化量间的相位变

化。而距离继电器的执行回路，就是把相位角判据转换为接通回路或断开回路的讯号转换和输出环节。

相位角判据是一个角度范围，有两个上下限角 θ_1 及 θ_2 ，若用动作角表示，则继电器的动作条件是

$$\theta_2 \leq \theta \leq \theta_1 \quad (13)$$

按执行元件的原理不同和对距离继电器性能要求不同，可以选用各种不同的 θ_1 及 θ_2 值。实际上选用得较多的是 θ_1 接近于 0° 或 90° ，且 $\theta_1 - \theta_2 = 180^\circ$ 。例如四极园筒型感应式执行元件就是反应极化回路与工作回路电流相角为 0° 、 $\theta_1 - \theta_2 = 180^\circ$ 的一种最常用的执行回路，而四个二极管的整流比相执行元件（也有叫做相灵敏元件的），则是反应极化回路与工作回路电流相角为 $\pm 90^\circ$ ， $\theta_1 - \theta_2 = 180^\circ$ 的另一种最常用的执行回路。

采用整流比相回路和相位比较回路，可以使 θ_1 与 θ_2 是任何数值，而且 $\theta_1 - \theta_2$ 也可以是大于或小于 180° 的其他任何数值。

对于采用同一极化量的距离继电器，因为执行元件反应的动作边界角 θ_1 与 θ_2 不同，也会使距离继电器的动作性能发生变化。反应在阻抗平面上的特性变化，如所谓最大灵敏角移动，动作区为 180° 的直线特性变为大于或小于 180° 的折线特性，园特性变为透镜形式苹果形特性等等。

只要 θ_1 与 θ_2 一样，不管用什么性能的执行元件来构成距离继电器，所得到的动作性能必然完全相同。

在动作角判据选取为 $\pm 90^\circ$ 的特定情况，利用：

\vec{A} \vec{B} $\vec{A} + \vec{B}$ $\vec{A} - \vec{B}$
 $\arg A - \arg B = \pm 90^\circ$ 与 $|\vec{A} + \vec{B}| = |\vec{A} - \vec{B}|$ 等价的几何原理，可以用比较绝对值的动作元件构成距离继电器的执行元件。由此可见，比较绝对值原理的距离继电器是比较相位原理在特殊条件下运用的产物，因此，对所有由这种原理构成的距离继电器，都宜于还原为相位比较的条件来研究它的工作性能，而不直接用绝对值计算的办法。这就是说，对于 $|\vec{C}| = |\vec{D}|$ 型的距离继电器最好用

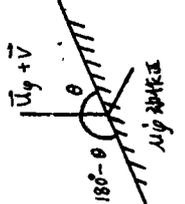
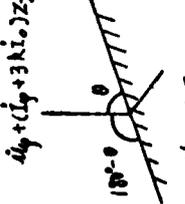
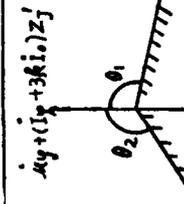
$$\arg(\vec{C} + \vec{D}) - \arg(\vec{C} - \vec{D}) = \pm 90^\circ \quad (14)$$

的边界条件进行分析，实际产品中有的距离继电器把距离测量电压同时引入 \vec{C} 及 \vec{D} 中，有的把距离测量电压的一部分引入 \vec{C} 中，而其余的部分引入 \vec{D} 中，但无论如何， $(\vec{C} + \vec{D})$ 或 $(\vec{C} - \vec{D})$ 两项中必有一项就是距离测量电压，否则它就不能正确测量距离。利用相位比较原理进行分析，较之绝对值直接进行计算而后代入条件式办法简明省力。

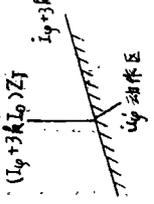
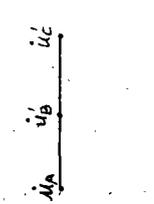
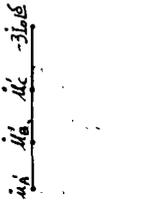
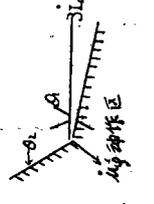
四、常用距离继电器的相位动作特性：

上面已经说明，距离继电器的基本动作特性是极化量与距离测量电压间的相位关系。在表 1 中列出以极化量为基准向量的常用距离继电器的相位动作特性（理想情况）当距离测量电压的相位落入阴影部分的动作区时，继电器动作，而在区外则制动。

表 1 常见的各种距离继电器的参数反动作特性

编号	名称	极化量	动作条件
1	方向距离继电器 (注)	$\dot{M}_\varphi + \dot{V}$ (\dot{V} 非故障相电压)	
2	非方向距离继电器 (注)	$\dot{M}_\varphi + (i_g + 3ki_0)Z_f'$	
3	特殊(透动形) 非方向距离继电器(注)	$\dot{M}_\varphi + (i_g + 3ki_0)Z_f'$	

注: 这些距离继电器当用于保护接地故障时, \dot{U}'_0 , \dot{U}'_1 , \dot{U}'_2 等均取每相值; 当用于保护相间故障时, \dot{U}'_0 , \dot{U}'_1 , \dot{U}'_2 等均取相间值。

4	电抗型距离继电器	$i_g + 3ki_0$ 或 $(i_g + 3ki_0)Z_f'$	
5	相角多相补偿 距离继电器	非故障相间 \dot{U}'_φ	
6	接地多相补偿 距离继电器	非故障相间 \dot{U}'_φ 及 $3i_0 Z_0$	
7	零序电流 极化接地 距离继电器	$3i_0$	

第三节 用电压向量图法分析距离继电器的动作行为

一、方法的简述:

所谓的“电压向量图”法，就是求出故障时电网各点的三相电压向量和通入继电器的 μ 与极化量的向量关系，直接带入继电器的动作条件（表 1）来研究继电器的动作行为，其法如下：

1. 按给定的系统运行方式，绘出故障前三相电压的电压全图（对某些对称方式，可以用单相方式代表）。
2. 按给定的故障点及故障方式求出故障点的各相电压或相间电压的向量位置。
3. 由电源电压与故障点电压的相对向量关系求得继电器安装处的各相电压或相间电压。
4. 利用图 3 及式（10），分别求得各相的距离测量电压及各极化量的向量位置。
5. 以继电器的极化量为标准，画出继电器的 μ 动作区域（如表 1）。
6. 从而判定在这样的系统与故障情况下这种距离继电器的动作行为。

下面按上述的程序逐个研究每一步骤的具体方法。并统一利用图 4 这样的系统图。 M 与 N 是装继电器处的母线，一般取 M 为送端， N 为受端， G 是故障点，两侧电源阻抗和线路阻抗的补偿系数各不相同，线路的不加任何注脚，即 $k = \frac{Z_{l0} - Z_{l1}}{3 Z_{l1}}$ 而两侧电

源的则各加注脚表明 $k_m = \frac{Z_{m0} - Z_{m1}}{3 Z_{m1}}$, $k_n = \frac{Z_{n0} - Z_{n1}}{3 Z_{n1}}$

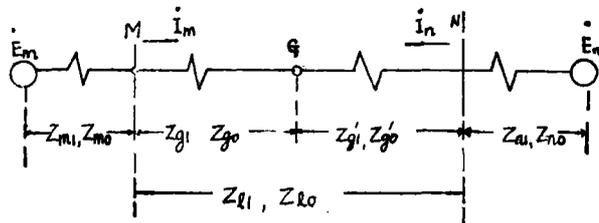


图 4 计算用系统图

二、故障前的各相电压全图

这是故障前的运行情况。各点三相电压完全对称，相互间差 120° 。为了清楚起见，把三相电压全部画出如图 5。

由图 5，可以找到故障点在故障前的三相电压，即各相 G 点的电压。图中 E_m 侧是送电侧， E_n 侧是受电侧， $\angle E_{m0} O E_{n0}$ 是电源电势间夹角，即送电角。装在 M 处向 N 侧方向的距离继电器是送电侧的继电器，装在 N 处向 M 侧方向的距离继电器是受电侧的继电器。

正常情况下，如果电源阻抗与线路阻抗的阻抗角不相等，则 E_m, M, N, E_n 四点

将形成折线，各点间的关系满足如下方程。

$$\overrightarrow{E_n E_n} : \overrightarrow{E_n M} : \overrightarrow{MN} : \overrightarrow{NE_n} = (Z_{n1} + Z_n + Z_{l1}) : Z_{n1} : Z_{l1} : Z_{n1}$$

已知 $E_n E_n$ 的距离和 Z_{n1} 、 Z_{l1} 与 Z_{n1} 的数值，可以用几何相似形的作图方法求得 E_n 、 M 、 N 与 E_n 四点的相对位置，从而求得图 5。

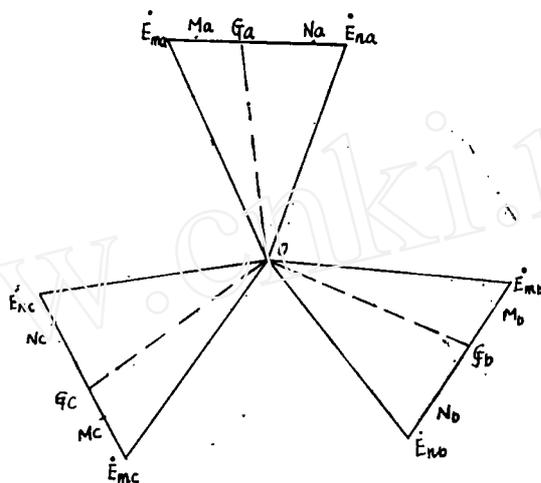


图 5 正常运行时的三相电压向量图

图 5 中 MN 的长度与线路的长度成正比，因此，根据给定故障点的位置，可以按比例直接在 MN 线上定出 G 点，从而求得故障点 G 在故障前的三相电压相对位置如图。

三、求故障点处的各相电压及相间电压

不管系统网络如何复杂，从故障点看来总是一个最简单的三相单电源系统，这个三相系统的空载电势就是故障点在故障点前的正常运行电压 \dot{U}_{ca} 、 \dot{U}_{cb} 及 \dot{U}_{cc} 。在发生短路故障后，根据故障性质的不同，在这个空载电势的作用下，经过各相电网的综合自阻抗 $Z_{\Sigma L}$ 与各相电网的综合相间互感阻抗 $Z_{\Sigma M}$ 产生了总的故障电流，同时在故障点形成了故障后的各相电压与相间电压。这种计算故障分量的办法，本来是计算一切短路电流的基础，只是在一般的短路电流计算中，人为地把故障点的电流与电压分为正、负、零三个相序分量，然后算出来总的流入故障点的各序电流而已。

在这里所用的计算中，都采取了电网的正序阻抗等于负序阻抗的基本假定，这样我们就可以利用故障点见到的每相综合自阻抗 $Z_{\Sigma L}$ 与单一的每相综合相间互感阻抗 $Z_{\Sigma M}$ 来代替故障点见到的系统综合正序阻抗 $Z_{\Sigma 1}$ 及综合零序阻抗 $Z_{\Sigma 0}$ ，进行故障点故障电流及电压的计算，这两组阻抗之间的关系和线路的情况一样，即

$$\left. \begin{aligned} Z_{\Sigma L} &= \frac{1}{3} (2Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 0}) \\ Z_{\Sigma M} &= \frac{1}{3} (Z_{\Sigma 0} - Z_{\Sigma 1}) \end{aligned} \right\} (15)$$

所谓的正序阻抗与负序阻抗相等,是指各相的相间互感阻抗相等,例如 $Z_{AB} = Z_{BA} = Z_{CA} = Z_{AC} = Z_{BC} = Z_{CB}$ 。对于静止元件如线路,变压器等(当然都是指完全对称的条件),这个关系是完全正确的。但对于旋转电机,一般只有 $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA}$ 及 $Z_{BA} = Z_{AC} = Z_{CB}$,而这两组互感则各各不等,从而产生了正序与负序阻抗的不相等,如果考虑这个因素,在故障点也有两组综合相间互感阻抗,一组是正相序关系的,即, $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$,另一组是反相序关系的,即 $A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$ 。前者的值是 $Z_{\Sigma M}^{(+)} = \frac{1}{3}(Z_{\Sigma 0} - Z_{\Sigma 1})$, 后者的值是 $Z_{\Sigma M}^{(-)} = \frac{1}{3}(Z_{\Sigma 0} + Z_{\Sigma 2})$, 式中的 $Z_{\Sigma 2}$ 是故障点看到的系统综合负序阻抗。一般 $Z_{\Sigma 1}$ 与 $Z_{\Sigma 2}$ 十分相近,可以认为它们相等。从严格的意义来说,作这样的假定将使所得的故障点电压向量有某些小的偏差,但用以分析装在线路上的距离继电器的动作行为将是正确的,同时还可以使计算结果稍为简单些。

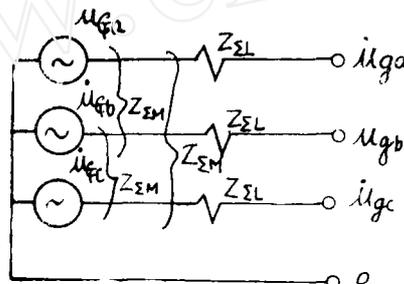


图6 故障点的等价计算回路

由故障点看来,为求故障点的电流及电压量的等价计算回路如图6。在以后的标号中,以大写字母注脚G代表故障前的故障点电压向量,即 \dot{U}_{Ga} , \dot{U}_{Gb} 与 \dot{U}_{Gc} ; 而以小写字母注脚g代表故障后的故障点电压向量,即 \dot{U}_{ga} , \dot{U}_{gb} 与 \dot{U}_{gc} 。

特别需要说明的是,建立故障点看到的综合自阻抗及综合互感阻抗的概念,完全是为了解故障点的电流及电压量,因而它们只能唯一地由故障点综合正序阻抗及综合零序阻抗求得,它和故障点两侧的每相自阻抗和每相互感阻抗并无任何直接联系。例如,若由故障点看到两侧的自阻抗与互感阻抗分别为 Z_L, Z'_L 及 Z_M, Z'_M 时,则:

$$\left. \begin{aligned} Z_{\Sigma L} &\doteq \frac{Z_L Z'_L}{Z_L + Z'_L} \\ Z_{\Sigma M} &\doteq \frac{Z_M Z'_M}{Z_M + Z'_M} \end{aligned} \right\} (16)$$

利用故障点等价计算回路(图6)的根据,是运用戴维南定理和叠加原理。我们研究的是故障点的电流及电压量,感兴趣的是故障点的三个相和地,共四个点,在发生故障之前,故障点三相之间和三相对地之间都没有电源,三个相对地电压是故障点的正常运行

电压，它也就是等价计算回路图 6 中产生故障点故障量的等价电源电势，由故障点的四个点向系统看出的综合阻抗分别是 $Z_{\Sigma L}$ 与 $Z_{\Sigma M}$ 。为了证明图 6 等价计算回路的正确性，推导如下：

按短路电流计算方法，可以得到 A 相的故障点电压变化量（取电压升）为

$$\begin{aligned} \Delta \dot{u}_{ga} &= - (\dot{I}_{a1} Z_{\Sigma 1} + \dot{I}_{a2} Z_{\Sigma 1} + \dot{I}_{a0} Z_{\Sigma 0}) \\ &= - [(\dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}) Z_{\Sigma 1} + \dot{I}_{a0} (Z_{\Sigma 0} - Z_{\Sigma 1})] \\ &= - [\dot{I}_a Z_{\Sigma 1} + \frac{1}{3} (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) (Z_{\Sigma 0} - Z_{\Sigma 1})] \\ &= - [\dot{I}_a \cdot \frac{1}{3} (Z_{\Sigma 0} + 2Z_{\Sigma 1}) + (\dot{I}_b + \dot{I}_c) \cdot \frac{1}{3} (Z_{\Sigma 0} - Z_{\Sigma 1})] \\ &= - [\dot{I}_a Z_{\Sigma L} + (\dot{I}_b + \dot{I}_c) Z_{\Sigma M}] \end{aligned}$$

同理，

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{u}_{gb} &= - [\dot{I}_b Z_{\Sigma L} + (\dot{I}_a + \dot{I}_c) Z_{\Sigma M}] \\ \Delta \dot{u}_{gc} &= - [\dot{I}_c Z_{\Sigma L} + (\dot{I}_a + \dot{I}_b) Z_{\Sigma M}] \end{aligned} \right\} (17)$$

上述各式中的 \dot{I}_a 、 \dot{I}_b 及 \dot{I}_c 是流入故障点的各相总故障电流。满足上述关系的等价回路就是图 6。

以下分别求发生各种短路故障时故障点的各电压量及接地电源 $3\dot{I}_{\Sigma 0}$ 。

1. A 相接地 (图 7)

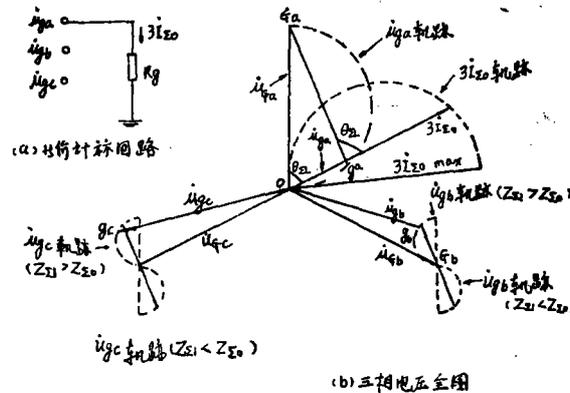


图 7 单相经电阻接地时的故障点电压向量全图

由图 6，当发生单相接地时，等价计算回路如图 7-(a) 由此求得故障点的各个量为：

$$\begin{aligned}
 3\dot{I}_{\Sigma 0} &= \frac{1}{Z_{\Sigma L} + R_g} \dot{U}_{G_a} \\
 \dot{u}_{G_a} &= \frac{R_g}{Z_{\Sigma L} + R_g} \dot{U}_{G_a} \\
 \dot{u}_{G_b} &= \dot{u}_{G_b} - 3\dot{I}_{\Sigma 0} Z_{\Sigma M} \\
 &= \dot{u}_{G_b} - \frac{Z_{\Sigma M}}{Z_{\Sigma L} + R_g} \dot{U}_{G_a} \\
 \dot{u}_{G_c} &= \dot{u}_{G_c} - 3\dot{I}_{\Sigma 0} Z_{\Sigma M} \\
 &= \dot{u}_{G_c} - \frac{Z_{\Sigma M}}{Z_{\Sigma L} + R_g} \dot{U}_{G_a}
 \end{aligned} \tag{18}$$

u_{G_a} 的轨迹是一个圆弧，其弦为 u_{G_a} 、园周角是 $180^\circ - \theta_{\Sigma L}$ ， $\theta_{\Sigma L}$ 是 $Z_{\Sigma L}$ 的阻抗角。在这个园上， $\overrightarrow{oga} = 3\dot{I}_{\Sigma 0} R_g$ ， $\overrightarrow{g_a G_a} = 3\dot{I}_{\Sigma 0} Z_{\Sigma L}$ ，故

$$R_g = \left| \frac{\overrightarrow{oga}}{g_a G_a} Z_{\Sigma L} \right|$$

因为 $Z_{\Sigma L}$ 已知，由上式，图 7 中 \overrightarrow{oga} 代表的故障点所经过的电阻值也就确定，因而 $\triangle o g_a G_a$ 也是一个定量的三角形。

$3\dot{I}_{\Sigma 0}$ 的轨迹也是一个圆弧，当 $R_g = 0$ 时最大，此时的 $3\dot{I}_{\Sigma 0}$ 与 \dot{u}_{G_a} 轨迹圆弧在原点相切，其值为 $3\dot{I}_{\Sigma 0 \max} = \frac{1}{Z_{\Sigma L}} \dot{U}_{G_a}$ 。当 R_g 变化时， $3\dot{I}_{\Sigma 0}$ 的终端在圆弧轨迹上变化，

这个圆弧以 $3\dot{I}_{\Sigma 0 \max}$ 为弦，园周角也是 $180^\circ - \theta_{\Sigma L}$ 。

\dot{u}_{G_b} 与 \dot{u}_{G_c} 之所以较故障前的 \dot{U}_{G_b} 与 \dot{u}_{G_c} 有变化，完全是由于故障后产生的 $3\dot{I}_{\Sigma 0}$ 流过 A 相的综合自阻抗后，在 B 相及 C 相的原有电压上叠加了一个由 $Z_{\Sigma M}$ 产生的感应电势。这个感应电势的大小及方向决定于 $Z_{\Sigma M}$ 的值。当 $Z_{\Sigma 1} > Z_{\Sigma 0}$ 时， $Z_{\Sigma M}$ 为负，即感应的附加电压将基本与由 $3\dot{I}_{\Sigma 0}$ 在 $Z_{\Sigma L}$ 上产生的压降同方向，当 $Z_{\Sigma 1} < Z_{\Sigma 0}$ 时， $Z_{\Sigma M}$ 为正，感应的附加电压将基本与在 $Z_{\Sigma L}$ 上产生的压降反方向，而当 $Z_{\Sigma 1} = Z_{\Sigma 0}$ 时，该附加电势为零，图 7 中，

$$\begin{aligned}
 \overrightarrow{g_b G_b} &= \overrightarrow{g_c G_c} = 3\dot{I}_{\Sigma 0} Z_{\Sigma M} \\
 &= \frac{Z_{\Sigma M}}{Z_{\Sigma L}} \overrightarrow{g_a G_a}
 \end{aligned} \tag{19}$$

故 g_b 与 g_c 的轨迹也是与 g_a 轨迹相似一个圆弧。它们间的比例是 $\overrightarrow{g_b G_b} : \overrightarrow{g_c G_c} : \overrightarrow{g_a G_a} = Z_{\Sigma L} : Z_{\Sigma M} : Z_{\Sigma M}$ 这个比例是故障点位置的函数。

当 A 相接地时，由式 (18) 可求得故障点各相间电压值如下：

$$\begin{aligned}
 \dot{u}_{gab} &= \dot{u}_{ga} - \dot{u}_{gb} \\
 &= \frac{Z_{\Sigma M} + R_g}{Z_{\Sigma L} + R_g} \dot{U}_{Ga} - \dot{u}_{Gb} \\
 \dot{u}_{gbc} &= \dot{U}_{Gbc} \\
 \dot{u}_{gca} &= \dot{u}_{Gc} - \frac{Z_{\Sigma M} + R_g}{Z_{\Sigma L} + R_g} \dot{U}_{Ga}
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

2. BC两相短路(图8)

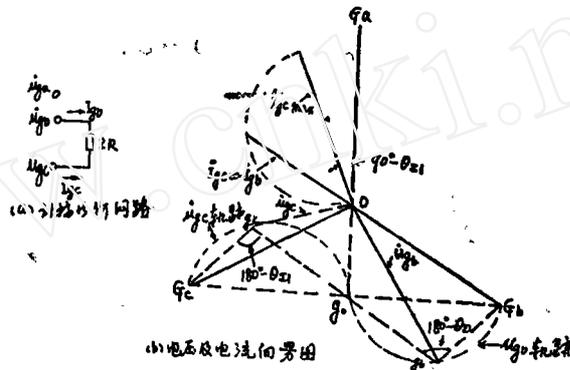


图8 BC两相短路时的电压向量图

由图6及图8-(a)的等价计算网路可得BC两相短路时的各电流及电压值如下,

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_{gb} &= -\dot{I}_{gc} = \frac{1}{2} \frac{(\dot{U}_{Gb} - \dot{U}_{Gc})}{(Z_{\Sigma L} - Z_{\Sigma M}) + R} \\
 \dot{U}_{gb} &= -\dot{U}_{Gb} - Z_{\Sigma L} \dot{I}_{gb} - Z_{\Sigma M} \dot{I}_{gc} \\
 &= \frac{1}{2} (\dot{U}_{Gb} + \dot{U}_{Gc}) + \frac{R}{(Z_{\Sigma L} - Z_{\Sigma M}) + R} \cdot \frac{1}{2} (\dot{U}_{Gb} - \dot{U}_{Gc}) \\
 \dot{U}_{gc} &= \dot{U}_{Gc} - Z_{\Sigma L} \dot{I}_{gc} - Z_{\Sigma M} \dot{I}_{gb} \\
 &= \frac{1}{2} (\dot{U}_{Gb} + \dot{U}_{Gc}) - \frac{R}{(Z_{\Sigma L} - Z_{\Sigma M}) + R} \cdot \frac{1}{2} (\dot{U}_{Gb} - \dot{U}_{Gc}) \\
 \dot{U}_{ga} &= \dot{U}_{Ga} - Z_{\Sigma M} \dot{I}_{gb} - Z_{\Sigma M} \dot{I}_{gc} = \dot{U}_{Ga}
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

由式(21)的关系,画出BC两相短路时故障点的各相电压如图8(b)。

\dot{U}_{gb} 与 \dot{U}_{gc} 的轨迹分别是在 $\frac{1}{2}(\dot{U}_{Gb} + \dot{U}_{Gc}) = -\frac{1}{2}\dot{U}_{Ga}$ 的电压上叠加一个以 $\frac{1}{2}(\dot{U}_{Gb} - \dot{U}_{Gc})$ 或 $-\frac{1}{2}(\dot{U}_{Gb} - \dot{U}_{Gc})$ 为弦的一个圆弧,其圆周角都是 $180^\circ - \theta_{\Sigma 1}$ 。 $\theta_{\Sigma 1}$ 是故障点综合正序阻抗 $Z_{\Sigma 1} = Z_{\Sigma M} - Z_{\Sigma L}$ 的阻抗角。当 $R=0$ 时, g_b 与 g_c 落在同一点 g_o ,此时 $\dot{U}_{gb} = \dot{U}_{gc} = -\frac{1}{2}\dot{U}_{Gao}$ 。

\dot{I}_{sb} 与 \dot{I}_{sc} 的轨迹也是一个圆弧, 当 $R=0$ 时, 其值最大, $\dot{I}_{scmax} = \frac{1}{2} \frac{\dot{U}_{Gb} - \dot{U}_{Gc}}{Z_{\Sigma L} - Z_{\Sigma M}}$

在图8(b)中, $\vec{gogb} = R \cdot \dot{I}_{sb}$, $\vec{gogc} = R \cdot \dot{I}_{sc}$, $\vec{gbG_b} = I_{sb}(Z_{\Sigma L} - Z_{\Sigma M})$, $\vec{gcG_c} = \dot{I}_{sc}(Z_{\Sigma L} - Z_{\Sigma M})$ 。

由式(21), 可求得BC两相短路时的故障点相间电压如下:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{gca} &= \frac{R}{(Z_{\Sigma L} - Z_{\Sigma M}) + R} (\dot{U}_{Gb} - \dot{U}_{Gc}) = \frac{R}{Z_{\Sigma 1} + R} \dot{U}_{Gbc} \\ \dot{U}_{gbc} &= \dot{U}_{Gc} + \frac{1}{2} \frac{Z_{\Sigma 1}}{Z_{\Sigma 1} + R} (\dot{U}_{Gb} - \dot{U}_{Gc}) - \dot{U}_{Ga} \\ &= \dot{U}_{Gca} + \frac{1}{2} \frac{Z_{\Sigma 1}}{Z_{\Sigma 1} + R} \dot{U}_{Gbc} \\ \dot{U}_{gab} &= \dot{U}_{Ga} - \dot{U}_{Gb} + \frac{1}{2} \frac{Z_{\Sigma 1}}{Z_{\Sigma 1} + R} \dot{U}_{Gbc} \\ &= \dot{U}_{Gca} + \frac{1}{2} \frac{Z_{\Sigma 1}}{Z_{\Sigma 1} + R} \dot{U}_{Gbc} \end{aligned} \right\} (22)$$

3、BC两相短路接地(图9)

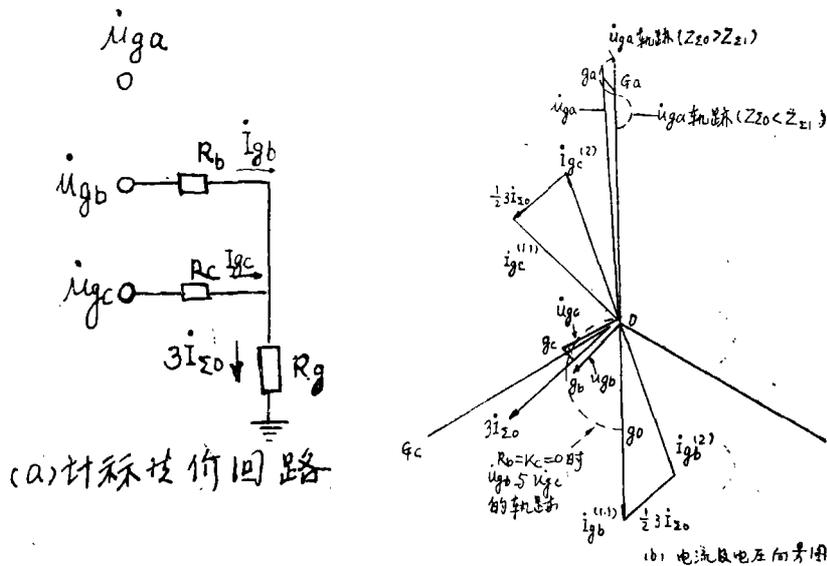


图9、BC两相短路接地时的电压向量全图

按图6及图9(a)的计算网路, 可以列出BC两相短路接地的联立方程以求解 \dot{I}_{sb} 及 \dot{I}_{sc} 。

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Gb} &= (Z_{\Sigma L} + R_b + R_g) \dot{I}_{sb} + (Z_{\Sigma M} + R_g) \dot{I}_{sc} \\ \dot{U}_{Gc} &= (Z_{\Sigma M} + R_g) \dot{I}_{sb} + (Z_{\Sigma L} + R_c + R_g) \dot{I}_{sc} \end{aligned}$$

解之得

$$\begin{aligned} \dot{I}_{gb} &= \frac{1}{\Delta} \left[(Z_{\Sigma L} + R_g) \dot{U}_{Gb} - (Z_{\Sigma M} + R_g) \dot{U}_{Gc} + R_c \dot{U}_{Gb} \right] \\ \dot{I}_{gc} &= \frac{1}{\Delta} \left[(Z_{\Sigma L} + R_g) \dot{U}_{Gc} - (Z_{\Sigma M} + R_g) \dot{U}_{Gb} + R_b \dot{U}_{Gc} \right] \\ \Delta &= (Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M} + 2R_g) \cdot (Z_{\Sigma L} - Z_{\Sigma M}) + (R_b + R_c) Z_{\Sigma L} \\ &\quad + (R_b + R_c) R_g + R_b R_c \end{aligned}$$

一般在研究这种类型的故障时，都认为 R_b 和 R_c 的数值不大，而着重研究 R_g 变化时的情况。如果先取 $R_b = R_c = 0$ ，则此时，

$$\begin{aligned} \dot{I}_{gb} &= \frac{1}{\Delta} \left[(Z_{\Sigma L} + R_g) \dot{U}_{Gb} - (Z_{\Sigma M} + R_g) \dot{U}_{Gc} \right] \\ \dot{I}_{gc} &= \frac{1}{\Delta} \left[(Z_{\Sigma L} + R_g) \dot{U}_{Gc} - (Z_{\Sigma M} + R_g) \dot{U}_{Gb} \right] \\ \Delta &= (Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M} + 2R_g) (Z_{\Sigma L} - Z_{\Sigma M}) \\ \dot{U}_{gb} = \dot{U}_{gc} &= (\dot{I}_{gb} + \dot{I}_{gc}) R_g \\ &= \frac{R_g}{\frac{1}{2}(Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M}) + R_g} \left[\frac{\dot{U}_{Gb} + \dot{U}_{Gc}}{2} \right] \\ 3 \dot{I}_{x0} &= \frac{1}{\frac{1}{2}(Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M}) + R_g} \left[\frac{\dot{U}_{Gb} + \dot{U}_{Gc}}{2} \right] \\ \dot{U}_{ga} &= \dot{U}_{Ga} - (\dot{I}_{gb} + \dot{I}_{gc}) Z_{\Sigma M} \\ &= \dot{U}_{Ga} - 3 \dot{I}_{x0} \cdot Z_{\Sigma M} \end{aligned} \quad (23)$$

在图9(b)中， $\vec{og} = 3 \dot{I}_{x0} R_g$ ， $\vec{ggo} = 3 \dot{I}_{x0} \cdot \frac{1}{2} (Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M})$

$$\frac{\vec{og}}{\vec{ggo}} = \left| \frac{R_g}{\frac{1}{2}(Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M})} \right|, \vec{gaG_a} = 3 \dot{I}_{x0} Z_{\Sigma M} = \frac{Z_{\Sigma M}}{\frac{1}{2}(Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M})} \vec{ggo}$$

由上述表示式可见，当 $R_b = R_c = 0$ 时， U_{gb} 与 U_{gc} 的轨迹是以 $\frac{1}{2}(\dot{U}_{Gb} + \dot{U}_{Gc}) = -\frac{1}{2}\dot{U}_{Ga}$ 为弦的一个圆弧，是 $-\frac{1}{2}\dot{U}_{Ga}$ 电压作用在 $\frac{1}{2}(Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M})$ 与 R_g 串联回路上 R_g 的那部分压降，在图9(b)中用 \vec{og} 表示 $\vec{og} = -\frac{1}{2}\dot{U}_{Ga}$ 。

在两相短路接地时， \dot{I}_{gb} 与 \dot{I}_{gc} 可以分为两个部分，一部分是当 $R_g \rightarrow \infty$ 时，即两相短路情况下的故障电流 $\dot{I}_{gb}^{(2)}$ 及 $\dot{I}_{gc}^{(2)}$ 当 $R_b = R_c$ 时，此时的 $\dot{U}_{gb}^{(2)}$ 及 $\dot{U}_{gc}^{(2)}$ 按式(21)求得，另一部分是由 $-\frac{1}{2}\dot{U}_{Ga}$ 作用经 R_b 及 R_c (假定相等)产生的接地电流 $3 \dot{I}_{x0}^{(1.1)}$ 在两相中的分流。两部分之和就是总的故障电流 $\dot{I}_{gb}^{(1.1)}$ 及 $\dot{I}_{gc}^{(1.1)}$ 。

$$\begin{aligned} \dot{I}_{gb}^{(2)} &= -\dot{I}_{gc}^{(2)} = \frac{\dot{U}_{Gb} - \dot{U}_{Gc}}{2(Z_{\Sigma L} - Z_{\Sigma M} + R)} \\ 3\dot{I}_{\Sigma 0}^{(1 \cdot 1)} &= \frac{1}{R_g + \frac{1}{2}(Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M} + R)} \left(-\frac{1}{2}\dot{U}_{Ga} \right) \\ \dot{I}_{gb}^{(1 \cdot 1)} &= \dot{I}_{gb}^{(2)} + \frac{1}{2} \cdot 3\dot{I}_{\Sigma 0}^{(1 \cdot 1)} \\ \dot{I}_{gc}^{(1 \cdot 1)} &= \dot{I}_{gc}^{(2)} + \frac{1}{2} \cdot 3\dot{I}_{\Sigma 0}^{(1 \cdot 1)} \end{aligned}$$

上述关系式也可以直接由前面的式子导出，但是利用叠加原理可以使所得结果在物理概念上更为明确，这个关系，在图9(b)中清楚的指示着

当 R_b 及 R_c 不相等但相对很小的情况下， \dot{I}_{gb} 与 \dot{I}_{gc} 和 $3\dot{I}_{\Sigma 0}$ 的大小及相位都不会有什么变化，只是 \dot{U}_{gb} 与 \dot{U}_{gc} 各自增加了一个相电阻的电压降 $R_b \dot{I}_{gb}^{(1 \cdot 1)}$ 及 $\dot{I}_{gc}^{(1 \cdot 1)} R_c$ ，这种情况也直接明白地标示在图9(b)中。

当然如果考虑 R_b 及 R_c 各不相等而且数值又很大的情况就只有根据上述的完全表达式来作图。

在BC两相短路接地时的故障点各相间电压，可由式(23)求得如下($R_b = R_c$ 的情况)。

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{abc} &= \frac{R}{(Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M} + R)} (\dot{U}_{Gb} - \dot{U}_{Gc}) \\ \dot{U}_{sca} &= \dot{I}_{sc}^{(1 \cdot 1)} \cdot R + (\dot{I}_{sc}^{(1 \cdot 1)} + \dot{I}_{gb}^{(1 \cdot 1)}) R_g - \dot{U}_{Ga} + 3\dot{I}_{\Sigma 0}^{(1 \cdot 1)} \cdot Z_{\Sigma M} \\ &= -\frac{R}{2(Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M} + R)} (\dot{U}_{Gb} - \dot{U}_{Gc}) \\ &\quad - \left[1 + \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{R}{2} + R_g + Z_{\Sigma M} \right)}{R_g + \frac{1}{2}(Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M} + R)} \right] \dot{U}_{Ga} \\ \dot{U}_{sba} &= \dot{U}_{Ga} - 3\dot{I}_{\Sigma 0}^{(1 \cdot 1)} Z_{\Sigma M} - \dot{I}_{gb}^{(1 \cdot 1)} R + (\dot{I}_{gb}^{(1 \cdot 1)} + \dot{I}_{sc}^{(1 \cdot 1)}) R_g \\ &= \left[1 + \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{R}{2} + R_g + Z_{\Sigma M} \right)}{R_g + \frac{1}{2}(Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M} + R)} \right] \dot{U}_{Ga} \\ &\quad - \frac{R}{2(Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M} + R)} (\dot{U}_{Gb} - \dot{U}_{Gc}) \end{aligned} \right\} (24)$$

4、对称三相短路(图10)

这是最简单的一种短路故障，可以用单相表示如图10:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{\Sigma \varphi} &= \frac{\dot{U}_G}{(Z_{\Sigma L} - Z_{\Sigma M}) + R} \\ \dot{U}_{\Sigma} &= \dot{I} R \end{aligned} \right\} (25)$$

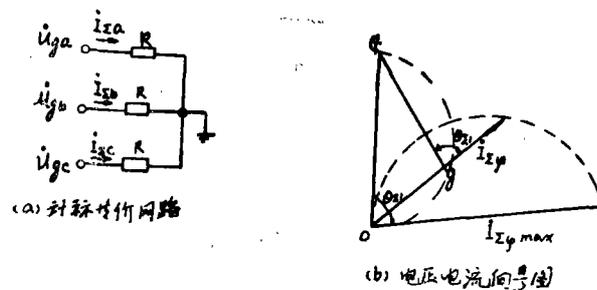


图10、三相对称短路

$\vec{U}_F = \vec{U}_E$, $\vec{U}_G = (Z_{XL} - Z_{XM}) \dot{I}_{\Sigma\varphi}$, \vec{U}_F 与 $\dot{I}_{\Sigma\varphi}$ 的轨迹都是以 $120^\circ - \theta_{X1}$ 为圆周角的圆弧。

如果需要研究三相电阻不相等的情况，就需要在图10(a)中分别代入 R_a 、 R_b 和 R_c 进行计算，并画出完整的三相电压向量全图。

四、求网络中各母线电压和继电器的距离测量电压的向量位置。

1、两种计算方法

由于在故障点发生了某种类型的故障，系统中各支路的电流和各点的电压都要发生变化，在求这些电流和电压的变化时，一般都是利用叠加原理。

在一般的短路电流计算法中，把故障点的电气量分为正序，负序及零序三个分量。系统中各支路的故障后电流，等于故障前电流（即正常负荷电流，只有正序分量）与故障分量电流之和，而故障后系统中各点的电压，则等于故障前的正常运行电压与由于流过故障分流电流后产生的电压变化两者之和（这里指的电压变化量用电位升来表示），如果用公式表示，就可以写成

$$\dot{I} = \dot{I}_{FH} + \Delta \dot{I}$$

$$\dot{U} = \dot{U}_{FH} + \Delta \dot{U}$$

$$\text{而 } \Delta \dot{U} = -\Delta \dot{I} Z$$

上式中， \dot{I} 与 \dot{U} 都是故障后的量， \dot{I}_{FH} 及 \dot{U}_{FH} 则是故障前的量， $\Delta \dot{I}$ 是流向故障点的故障分量电流， $\Delta \dot{U}$ 是电压变化量， Z 是电源到计算点的阻抗。当用对称分量计算时，上式成为：

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{FH1} + \Delta \dot{I}_1$$

$$\dot{I}_2 = \Delta \dot{I}_2$$

$$\dot{I}_0 = \Delta \dot{I}_0$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{FH1} - \Delta \dot{I}_1 Z_1$$

$$\dot{U}_2 = -\Delta \dot{I}_2 Z_2$$

$$\dot{U}_0 = -\Delta \dot{I}_0 Z_0$$

对称分量计算法的特点，感兴趣的首先是电流量，而首先是故障点的电流量。计算的程序是一切为了先求得电流量，然后根据电流量或电流量的变化去求各点的电压。

采用图6等价计算回路和在以下的计算方法中，感兴趣的首先是电压量。计算的程序是一切为了先求得电压量。在已知各点电压量的前提下，如果需要某个分支电流，可以直接利用相邻两点的电压量求得需要的数值如图3及式(8)。

用两种不同的计算方法，求解所需的电气量以分析距离继电器的动作行为时，其繁简程序有很大的差别，前已说明，对距离继电器来说，通入继电器的工作量主要是电压量而非电流量。而所用的电流量，若非 $\dot{I}_0 + 3k\dot{I}_0$ 量即系 $3\dot{I}_0$ 量。用对称分量法计算 $\dot{I}_0 + 3k\dot{I}_0$ 必须经过先分解然后再综合的复杂程序，而用以计算电压时，同样也必须经过先分解后综合的手续，更不用说求继电器“看到”的阻抗的繁琐程度了。而如果先求得各点电压时，则 $\dot{I}_0 + 3k\dot{I}_0$ 及其相应的量如 $(\dot{I}_0 + 3k\dot{I}_0)Z_1$ 就可以直接求得，如式(8)所表示的那样。而又若用电压向量图法时，只要求得两支点的向量位置， $\dot{I}_0 + 3k\dot{I}_0$ 及 $(\dot{I}_0 + 3k\dot{I}_0)Z_1$ 向量就可以直接画出，这在今后各节中将明显可见。

在新的分析方法中， $3\dot{I}_0$ 量是必要的。求得了故障点的总零序电流 $3\dot{I}_0$ 后，利用零序阻抗回路就可以方便的求得各支路中的 $3\dot{I}_0$ 值。所以在新的分析方法中仍然保留了零序分量的概念，这样可以给计算和分析工作带来方便。

2. 求母线电压向量

图5是正常运行时的三相电压向量全图，由它可以找到故障点G在故障前的三相电压向量位置 \dot{U}_{Ga} 、 \dot{U}_{Gb} 及 \dot{U}_{Gc} 。以它为基础，按故障的性质，把故障后的 \dot{U}_{Ga} 、 \dot{U}_{Gb} 及 \dot{U}_{Gc} ，套入同一图5中，就找到了在该种运行情况下发生某一特定故障时的故障点电压与电源电势的电压向量关系，为了求得故障后的三相电压全图，还需要由这个关系去求得打算在同一图上标明的各相母线的电压向量位置。

以任一相的任一侧为例，例如已知故障点电压 \dot{U}_{Ga} 及电源电势 \dot{E}_{Ma} ，欲求母线M的电压向量 \dot{U}_{Ma} ，其法如下，参看图11。

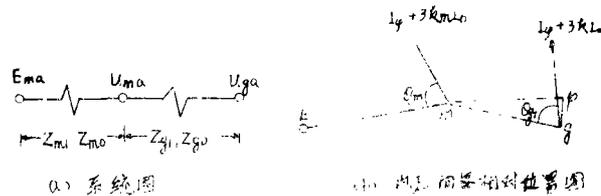


图11、求母线电压向量的相对位置

在电压向量图中,已知的是 E_{ma} 与 U_{ga} 的相对位置。用公式表示各点电压向量关系为:

$$\dot{E}_{ma} - \dot{U}_{ma} = (\dot{I}_a + 3k_m \dot{I}_0) Z_{g1}$$

$$\text{及 } \dot{U}_{ma} - \dot{U}_{ga} = (\dot{I}_a + 3k \dot{I}_0) Z_{g1}$$

在上两式中,电流的正方向都选为由 E 向 g , $k_m = \frac{Z_{m0} - Z_{m1}}{3Z_{m1}}$, $k = \frac{Z_{g1} - Z_{g0}}{3Z_{g1}}$ 。由于 $R_m \neq R$, 所以虽然在实际上 EM 段与 Mg 段都通过完全相同的电流,但在电压向量图上却不能把 Eg 间的电压降(即联线 Eg)按 Z_{m1} 与 Z_{g1} 的比例分段来决定 m 点的位置。把 E 到 g 间的电压降 U_{Eg} 改写为下列形式,

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Eg} &= (\dot{I}_a + 3K_m \dot{I}_0) Z_{m1} + (\dot{I}_a + 3k \dot{I}_0) Z_{g1} \\ &= (\dot{I}_a + 3K_m \dot{I}_0) (Z_{m1} + Z_{g1}) + (K - K_m) Z_{g1} 3 \dot{I}_0. \end{aligned} \quad (26)$$

如果在电压向量图 11(b) 中,取 $gp = (K - K_m) Z_{g1} 3 \dot{I}_0$, 然后把 EP 按 Z_{m1} 与 Z_{g1} 的比例关系,利用几何相似形的方法,考虑 Z_{m1} 与 Z_{g1} 的阻抗角不同,就可以定出 m

点,或者用计算方法来定 m 点, $\overrightarrow{EP} : \overrightarrow{EM} : \overrightarrow{MP} = (Z_{m1} + Z_{g1}) : Z_{m1} : Z_{g1}$

剩下的问题是求 P 点的位置。

当故障点及系统结线已定,就可以由零序网路求得通过本线路的零序电流分配系数 K_0 , $3 \dot{I}_0 = K_0 3 \dot{I}_{\Sigma 0}$ 。在发生接地故障时的电压向量图中,每一相有一个电压量正比于 $3 \dot{I}_{\Sigma 0}$, 例如,在 A 相接地时的图 7 中,

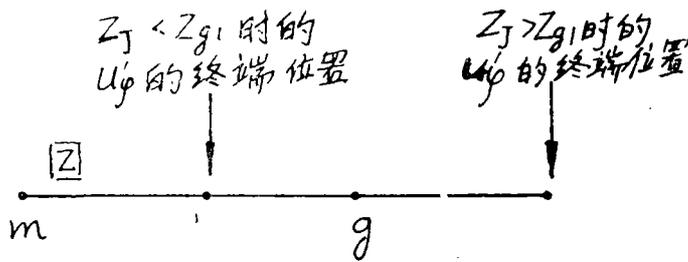
$\overrightarrow{gaGa} = 3 \dot{I}_{\Sigma 0} Z_{\Sigma L}$, $\overrightarrow{gbGb} = \overrightarrow{gcGc} = 3 \dot{I}_{\Sigma 0} Z_{\Sigma M}$, 在 BC 两相短路接地的图 9 中, $\overrightarrow{gg0} = 3 \dot{I}_{\Sigma 0} \cdot \frac{1}{2} (Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M})$, $\overrightarrow{gaGa} = 3 \dot{I}_{\Sigma 0} Z_{\Sigma M}$ 。因此,图 11(b) 的 $gp = (k - k_m) Z_{g1} 3 \dot{I}_0$ 是这些电压向量的简单线性函数,很容易按向量比例由 g 点找到 p 点的具体位置,这一点在下面举的例子都要谈到。

在这里,引入了 m 与 g 两个符号。为了在电压向量图位置图上表示清楚,我们把故障前的母线定名为 M 及 N , 故障点定名为 G , 而在故障后,它们的位置都要发生变化,换用 mn 与 g 来标示,以资区别。这个规则,在本文中将继续沿用。

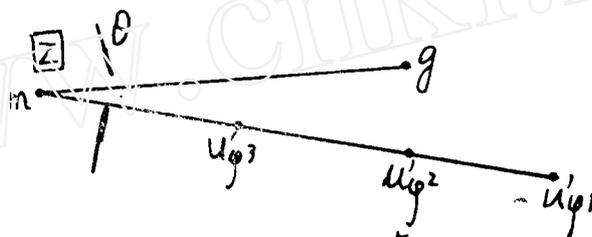
3、求距离测量电压 U'_g 的向量位置。

根据已知的故障点与继电器装设处母线的电压向量关系,可以很方便的求得距离测量电压 U'_g 的向量位置。其法如下:(注意,图中只画出了各向量的终端位置,而未画出中性点)

(1)、正方向故障(图 12)



(a) $\angle Z_J = \angle Z_{g1}$ 情况



(b) $\angle Z_J \neq \angle Z_{g1}$ 情况

图12、求 U_{ϕ}' 的向量终端位置 M 侧继电器正方向故障

假定 mg 间的正序阻抗为 Z_{s1} ，距离继电器装在 M 侧，保护 mg 方向，整定阻抗是 Z_J ，
则

$$\dot{U}_{\phi}' = \dot{U}_m - (\dot{I}_{\phi} + 3k\dot{I}_0)Z_J$$

$$\text{因 } \dot{I}_{\phi} + 3k\dot{I}_0 = \frac{\dot{U}_m' - \dot{U}_s}{Z_{s1}}$$

$$\text{故 } \dot{U}_{\phi}' = \dot{U}_m - \frac{Z_J}{Z_{s1}} (\dot{U}_m - \dot{U}_s)$$

(1) — 1 区内故障， $Z_J > Z_{s1}$

如果 Z_J 与 Z_{s1} 的阻抗角相等，则 U_{ϕ}' 的终端将在 mg 线段 g 侧的延长线上，如图12(a)，

其比例关系是 $\overline{mu_{\phi}'} : \overline{mg} = Z_J : Z_{s1}$

(1) — 2 整定值边缘故障， $Z_J = Z_{s1}$

U_{ϕ}' 点与 g 点叠合

(1) — 3 区外故障， $Z_J < Z_{s1}$

U_{ϕ}' 在 mg 线段上， $\overline{mu_{\phi}'} : \overline{mg} = Z_J : Z_{s1}$

如果 Z_J 与 Z_{s1} 的阻抗角不相等，则 u_{ϕ}' 的终端点将在与 mg 相差一相位角的直线上，
如图12(b)中的 $U_{\phi}'_1$ 、 $U_{\phi}'_2$ 及 $U_{\phi}'_3$ 。

(2)、反方向故障

当在保护方向的反方向故障时、如果继电器按装处到对侧母线间没有分流支路, 则距离测量电压的向量终端位置将在按装继电器的母线至对侧母线的方向上。在图13中, 距离继电器: 装在母线 W , 保护方向为线路 mn , g 是故障点, n 是对侧母线位置, 假定 Z_1 与 Z_{g1} 阻抗角相等, 则 U_{ϕ}' 的向量终端位置在 mn 的联线上(当 $Z_1 < Z_{g1}$ 时为 $U_{\phi}'_1$)或在其 n 侧的延长线上(当 $Z_1 > Z_{g1}$ 时, 为 $U_{\phi}'_2$)。 U_{ϕ} 的向量终端位置, 按 mn 线段的长度与 Z_1/Z_{g1} 的比例关系直接求得, 如果 Z_1 与 Z_{g1} 的阻抗角不等, 则 U_{ϕ}' 的向量终端将在与 mn 成一固定角度的直线上, 类似图12(b)那样。

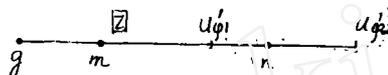


图13、求 U_{ϕ}' 的向量终端位置(M侧继电器, 反方向故障)

请注意, 在推导图12及图13时, 显见与 U_m 及 U_n 各自的绝对向量无关, 它们中的任一个都可以为零或其他任何数值, m 与 n 也可以是故障点, 也可以不是故障点, 所谓的正方向或反方向一切都以流过继电器的电流方向为准。记住了这个原则, 在电压向量全图中, 一旦 U_m 及 U_n 既定, 就很容易的直接找出 U_{ϕ}' 的向量位置。

五、求电压向量全图举例

所以称之为电压向量全图, 是因为把在特定的系统条件, (即系统网路已定和电源电势间的相位套角已定)和特定的故障条件下的故障后全系统中各点的各相(也可以同时包括各相间)电压向量全部同时标示在一个向量图上。也许以为这样的电压向量全图必然十分复杂, 其实完全不如此, 用两个具体的例子来说明电压向量全图的制作方法。

1、送端M侧出口发生A相接地故障(图15)

系统接线如图4, 各阻抗参数的标么值如下:

$$\begin{aligned} E_m &= 1 \cdot 1, & E_n &= 1 \cdot 0, & \angle E_m, E_n &= 35^\circ \\ Z_{m1} &= Z_n = j0.05, & Z_{n0} &= Z_{n\infty} &= j0.04 \\ Z_{g1} &= 0.2 \angle 80^\circ, & Z_{g0} &= 0.6 \angle 80^\circ \end{aligned}$$

在M侧出口发生经电阻接地的A相故障。

(1)先画出送受端电源电势 E_m 与 E_n 的三相向量图, 即各电源本身三相电压差 120° , 两测相互差 35° , E_m 领前 E_n 。

(2)求正常运行时的母线M与N的位置。

取任意长 AB 代表 Z_{m1} , 按 AB 比例画出代表 Z_{n1} 的 BC 、然后又画出代表 Z_{g1} 的 CD , 得折线 $ABCD$ 如图14。这个折线与欲求的折线 $E_m M N E_n$ 相似, 由上一步序, $E_m E_n$ 的长度为已知, 即可按相似形关系求得折线 $E_m M N E_n$ 。

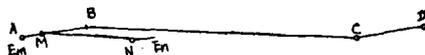


图14、几何相似形方法

在电压向量全图中(图15),只画出了A相的正常运行折线 $E_{m0}M_0N_0E_{n0}$,这是为了求尔后作图时的比例关系所必需的,为了清晰计,其他两相只画了 M_b 与 M_c ,以作求解故障点B相与C相电压的基准。

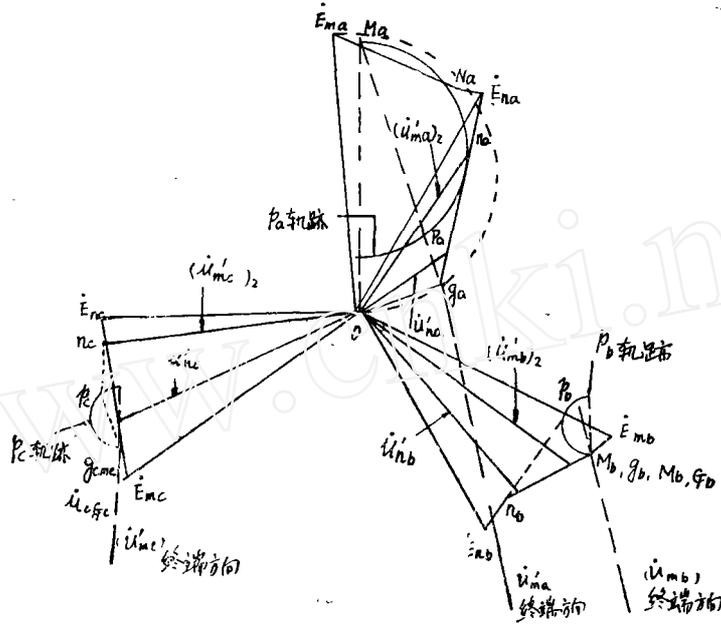


图15、M侧出口A相接地时的电压向量全图
(注:因 $Z_{\Sigma M}$ 很小,故图中 m_b 与 M_b 及 m_c 与 M_c 无法区分)

(3) 求故障后的母线m与n的位置

现在给定的故障点是M侧出口,对于系统电压向量来说,图7中的G点就是现在的M点。以M点的正常电压为基准,按图7,以具体参数代入得。

$$Z_{\Sigma 1} = 0.0416 / 88.7^\circ = 0.001 + j0.0416$$

$$Z_{\Sigma 0} = 0.0377 / 89.45^\circ = j0.0377$$

$$Z_{\Sigma L} = 0.001 + j0.0403 = 0.0403 / 88.6^\circ$$

$$Z_{\Sigma M} = -j0.0013 = 0.0013 / 90^\circ$$

K_{m0} 、 K_{n0} 分别是M侧和N侧的零序电流分流系数。

$$K_{m0} = \frac{Z_{\Sigma 0}}{Z_{m0}} = 0.943, \quad K_{n0} = \frac{Z_{\Sigma 0}}{Z_{n0} + Z_{m0}} = 0.059 / 8.8^\circ$$

$$k - k_n = k - k_m = \frac{0.6 - 0.2}{3 \times 0.2} - \frac{0.04 - 0.05}{3 \times 0.05} = 0.733$$

$$K_{m0} (k - k_m) \frac{Z_{m1}}{Z_{\Sigma L}} = 0.858 / 1.4^\circ$$

$$K_{n0} (k - k_n) \frac{Z_{n1}}{Z_{\Sigma L}} = 0.215 / 0.2^\circ$$

(3) — 1 求故障 A 点相电压

$$\dot{U}_{ga} = \overrightarrow{oga}$$

$$R_g = \left| \frac{\overrightarrow{oga}}{gaGa} Z_{\Sigma L} \right|, \text{如图, 图上量得} \left| \frac{\overrightarrow{oga}}{gaGa} \right| = 0.36,$$

所以图15中表示的是故障点经 $0.36 \times 0.0403 = 0.0145$, 标么值的电阻接地。

(3) — 2、求 N 侧母线 A 相电压。

$$\overrightarrow{E}_{na} = -(\dot{I}_{na} + 3k_n \dot{I}_{no}) (Z_{n1} + Z_{l1}) - (k - k_n) 3 \dot{I}_{no} \cdot Z_{l1}$$

$$\text{取, } \overrightarrow{gapa} = (k - k_n) 3 \dot{I}_{no} \cdot Z_{l1}$$

$$= K_{no} (k - k_n) \frac{Z_{l1}}{Z_{\Sigma L}} \cdot (3 \dot{I}_{no} \cdot Z_{\Sigma L})$$

$$= K_{no} (k - k_n) \frac{Z_{l1}}{Z_{\Sigma L}} (\overrightarrow{gaMa}) = 0.215 / 0.2^\circ \overrightarrow{gaMa}$$

$$\therefore \overrightarrow{E}_{n_a p_a} = -(\dot{I}_{na} + 3k_n \dot{I}_{no}) (Z_{n1} + Z_{l1})$$

把 $E_{na}P_a$ 按 Z_{n1} 与 Z_{l1} 的比例, 用几何相似形办法分段, 就可以求 N 侧母线 A 相电压向量终端 n_a 的位置, 从而求得故障后 g_a 到 E_{na} 间的各点电压分布线 $E_{na}n_a g_a$, 例如此

时的 N 侧母线电压 $\dot{U}_{na} = \overrightarrow{ON_a}$ 等等。

(3) — 3, 求两侧 B 相与 C 相母线电压向量终端位置 m_b 、 n_b 及 m_c 、 n_c 。

$$\overrightarrow{gbGb} = \overrightarrow{gcGc} = \frac{Z_{\Sigma M}}{Z_{\Sigma L}} \overrightarrow{gaGa} = 0.032 / 178.6^\circ \overrightarrow{gaGa}$$

$$\overrightarrow{E}_{n_b g_b} = -(\dot{I}_{nb} + 3k_n \dot{I}_{no}) (Z_{n1} + Z_{l1}) - (k - k_n) 3 \dot{I}_{no} \cdot Z_{l1}$$

$$\text{取, } \overrightarrow{gapa} = (k - k_n) 3 \dot{I}_{no} \cdot Z_{l1} = \overrightarrow{gapa} = 0.215 / 0.2^\circ \overrightarrow{gaMa}$$

$$\therefore \overrightarrow{E}_{n_b p_b} = -(\dot{I}_{nb} + 3k_n \dot{I}_{no}) (Z_{n1} + Z_{l1})$$

把 $E_{n_b}P_b$ 按 Z_{n1} 与 Z_{l1} 比例分段, 求得 n_b , 从而求得故障后 g_b 到 E_{n_b} 间各点的电压分布

线 $E_{n_b}n_b g_b$, 如 $\dot{U}_{n_b} = \overrightarrow{on_b}$ 等等。

同理, 取 $\overrightarrow{g_c P_c} = \overrightarrow{g_b P_b}$

$$\text{则, } \overrightarrow{E}_{n_c p_c} = -(\dot{I}_{nc} + 3k_n \dot{I}_{no}) (Z_{n1} + Z_{l1})$$

将 $E_{n_c}P_c$ 按 Z_{n1} 与 Z_{l1} 比例分段, 求得电压分布线 $E_{n_c}n_c g_c$ 如 $\dot{U}_{n_c} = \overrightarrow{on_c}$ 等等。

(3) — 4、几点补充说明,

对于 M 侧, 有两种情况

(a)、M侧出口故障,从母线电压的观点来说,M点故障后的位置m与故障点G在故障点后的位置g重合,但是对于装在M侧的继电器说来,m与g是显然不同的两个点。而对于除M侧所装的继电器外,对电网的其他继电器说来,m与g就是一片,

(b)、M侧母线故障,此时包括M侧所装继电器在内,m与g就是一片,

对于N侧,所举的例子是在当线路上某一点故障时如何求得各相母线的故障后向量终端位置。所列举的计算式与作图方法是普遍适用的。例如,当在线路中某一点发生故障,欲求M侧各母线在故障后的向量终端位置时,只要注意到本例中所列的 $Z_{\Sigma 1}$ 是欲求向量终端位置的母线到故障点的正序阻抗,而 $Z_{\Sigma 1}$ 则是欲求向量终端位置的母线到本测电源的正序阻抗,并把有关表达式中的 K_{n0} 、 k_n 等换为M侧的数值 K_{m0} 、 k_m 等,就可以根据此时故障点的有关数据 $Z_{\Sigma L}$ 、 $Z_{\Sigma M}$ 等求得M侧所需要的 P_a 、 P_b 及 P_c ,从而求得 m_a 、 m_b 与 m_c 。

由图7可知,故障点各相 g_a 、 g_b 与 g_c 的轨迹都是相似的圆弧,在本例中,为求各相故障后的母线位置所需要的 P_a 、 P_b 与 P_c 的轨迹也同样是与 g_a 轨迹相似的圆弧。这些圆弧的情况如下,以N侧为例。

关于 p_a : $\vec{p_a M a} = \left[1 - K_{n0} (k - k_n) \frac{Z_{11}}{Z_{\Sigma L}} \right] \vec{g_a G a}$, 因为 $\left[1 - K_{n0} (k - k_n) \frac{Z_{11}}{Z_{\Sigma L}} \right]$ 是一个与 R_g 无关的常数(可能是复数)故 p_a 的轨迹是以过Ma点以向量 $\left[1 - K_{n0} (k - k_n) \frac{Z_{11}}{Z_{\Sigma L}} \right] \vec{o G a}$ 为弦而与 g_a 的轨迹相似的圆弧。

关于 p_b : $\vec{G_b p_b} = \vec{G_b g_b} + \vec{g_b p_b} = -\frac{Z_{\Sigma M}}{Z_{\Sigma L}} \vec{g_a G a} + K_{n0} (k - k_n) \cdot \frac{Z_{11}}{Z_{\Sigma L}} \vec{g_a G a} = \frac{1}{Z_{\Sigma L}} \left[K_{n0} (k - k_n) Z_{11} - Z_{\Sigma M} \right] \vec{g_a G a}$, 当 $R_g = 0$ 时, $\vec{G_b p_b}$ 有最大值 $\frac{1}{Z_{\Sigma L}} \left[K_{n0} (k - k_n) Z_{11} - Z_{\Sigma M} \right] \vec{o G a}$, 因而 p_b 的轨迹是由 G_b 点引出的 $\vec{G_b p_b}$ 最大值为弦, 而与 g_a 轨迹相似的一个圆弧。

关于 P_c : 同 P_b 一样,是从 G_c 点引出的与 P_b 轨迹完全相同而且平行的一个圆弧。

其实,在本例中,当 k_g 变化时,各个电压向量终端位置变化的轨迹都将是与 g_a 轨迹相似的一个圆弧,因为这时唯一的变数是 k_g ,影响变化的是故障点电压的大小及相位,其他各点的电压向量都是故障点电压的线性函数,所有其它各点的电压向量终端的变化轨迹将与故障点电压向量终端的变化轨迹相似。利用电压向量终端的轨迹变化,在定性分析 R_g 变化对距离继电器动作行为的影响倾向性,往往特别直观和方便。

(4)求故障后的各项距离继电器 $U_{\phi'}$ 的向量终端位置。

为了具体说明如何求得各项距离继电器的距离测量电压 $U_{\phi'}$ 的向量位置,以三个继电器为例,如图16。对应于距离继电器 Z_1 是正方向出口故障、对应于距离继电器 Z_2 是反方向母线故障对应于距离继电器 Z_3 则是正方向故障。都假定整数值为 $Z_i = 0.8Z_{11}$,

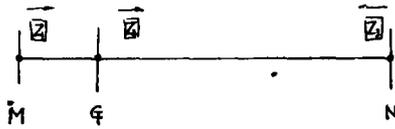


图16 说明M侧出口故障时求 U_g' 的继电器按装位置图

(4)-1, 对于距离继电器 Z_1

(4)-1-1, 求A相的 \dot{U}'_a , 用符号 $(\dot{U}'_a)_1$, 表示。

$$\begin{aligned} \overrightarrow{E_{m_0}g_a} &= -(\dot{I}_{m_a} + 3k_m \dot{I}_{m_0}) Z_{m_1}, \quad \overrightarrow{og_a} = \dot{U}_{m_0}, \\ (\dot{U}'_a)_1 &= \dot{U}_{m_0} - (\dot{I}_{m_a} + 3k_m \dot{I}_{m_0}) Z_1 \\ &= \dot{U}_{m_0} + \left[-(\dot{I}_{m_a} + 3k_m \dot{I}_{m_0}) Z_{m_1} - (k - k_m) 3 \dot{I}_{m_0} \cdot Z_{m_1} \right] \frac{Z_1}{Z_{m_1}} \end{aligned}$$

$$\therefore 3 \dot{I}_{m_0} = K_{m_0} \cdot 3 \dot{I}_{\Sigma 0} = -K_{m_0} \frac{G_a g_a}{Z_{\Sigma L}}$$

$$\begin{aligned} \therefore (\dot{U}'_a)_1 &= \overrightarrow{og_a} + \left[\overrightarrow{E_{m_0}g_a} + K_{m_0} (k - k_m) \frac{Z_{m_1}}{Z_{\Sigma L}} G_a g_a \right] \frac{Z_1}{Z_{m_1}} \\ &= \overrightarrow{og_a} + \left[\overrightarrow{E_{m_0}g_a} + 0.858/1.4^\circ G_a g_a \right] 3.2/-10^\circ \end{aligned}$$

(4)-1-2, 求B相及C相的 \dot{U}'_b 分别用 $(\dot{U}'_b)_1$ 及 $(\dot{U}'_c)_1$ 表示。

$$\begin{aligned} \overrightarrow{E_{m_0}g_b} &= -(\dot{I}_{m_b} + 3k_m \dot{I}_{m_0}) Z_{m_1}, \quad \dot{U}_{m_0} = \overrightarrow{og_b} \\ (\dot{U}'_b)_1 &= \dot{U}_{m_0} - (\dot{I}_{m_b} + 3k_m \dot{I}_{m_0}) Z_1 \\ &= \dot{U}_{m_0} + \left[-(\dot{I}_{m_b} + 3k_m \dot{I}_{m_0}) Z_{m_1} - (k - k_m) \cdot 3 \dot{I}_{m_0} \cdot Z_{m_1} \right] \frac{Z_1}{Z_{m_1}} \\ &= \overrightarrow{og_b} + \left[\overrightarrow{E_{m_0}g_b} + K_{m_0} (k - k_m) \frac{Z_{m_1}}{Z_{\Sigma L}} G_a g_a \right] \frac{Z_1}{Z_{m_1}} \\ &= \overrightarrow{og_b} + \left[\overrightarrow{E_{m_0}g_b} + 0.858/1.4^\circ G_a g_a \right] 3.2/-10^\circ \end{aligned}$$

同样,

$$(\dot{U}'_c)_1 = \overrightarrow{og_c} + \left[\overrightarrow{E_{m_0}g_c} + 0.858/1.4^\circ G_a g_a \right] 3.2/-10^\circ$$

从 $(\dot{U}'_a)_1$ 、 $(\dot{U}'_b)_1$ 与 $(\dot{U}'_c)_1$ 的最后表示式, 可以发现只要把某些注脚 a 、 b 、 c 转换, 就得到了其他一相的表示式。这对于作图很方便。

(4)-2、对于距离继电器 Z_2

对继电器 Z_2 来说, g 就是它安装处的母线。它的保护方向是由安装母线到对侧 n

母线的线路, 因此, 它的 \dot{U}'_g 的向量终端位置是在由 g 点算起, 沿 g_n 线正比于 $\frac{Z'_{I1}}{Z_{I1}}$ 的位置处, 本例中取 $\frac{Z'_{I1}}{Z_{I1}} = 0.8$, 把继电器 Z_2 的各项距离测量电压终端定名为 $(\dot{U}'_{ma})_2$ 、

$(\dot{U}'_{mb})_2$ 及 $(\dot{U}'_{mc})_2$, 画在图15中

(4)—3、对于距离继电器 Z_3 。

就继电器 Z_3 说来, g 是它的对侧母线, 它保护方向由 n 向 g , 因而它的 \dot{U}'_g 是由 n 点算起, 沿 ng 线正比于 $\frac{Z'_{I1}}{Z_{I1}}$ 的位置 (本例中, $Z_{g1} = Z_{I1}$) 处, 例中取 $\frac{Z'_{I1}}{Z_{I1}} = 0.8$, 把它的各相距离测量电压终端定名为 \dot{U}'_{na} 、 \dot{U}'_{nb} 及 \dot{U}'_{nc} , 也画在图15中。

当 Z_I 变化时, (继电器 Z_2 及 Z_3 的各相 \dot{U}'_g 终端位置将分别在各相的 n_g 联线上移动, 而对于向量 \dot{U}'_g 本身 (即 on'_{na} 、 on'_{nb} 等), 来看, 主要的表现是相位发生了转动, 或沿顺时针方向或沿反时针方向转动, Z_I 的变化并不影响极化量的相位和由极化量相位决定的继电器的 \dot{U}'_g 相位动作区, 从而就很方便的看出了 Z_I 变化时, \dot{U}'_g 本身相位变化的倾向, 以及对动作性能影响的倾向。

2. 受端 N 侧出口发生 BC 相间短路接地故障 (图17)

系统结线及参数与图15的情况完全一样, 正常运行时的三相电压向量图也完全一样。

在 N 侧出口故障时, 与故障点有关的参数是:

$$Z_{\Sigma 1} = 0.0416/88.7^\circ = 0.001 + j0.0416$$

$$Z_{\Sigma 0} = 0.0377/89.45^\circ = j0.0377$$

$$Z_{\Sigma L}' = 0.001 + j0.0403 = /88.6^\circ$$

$$Z_{\Sigma M}' = -j0.0013 = 0.0013/-90^\circ$$

$$K_{n0} = \frac{Z_{\Sigma 0}}{Z_{n0}} = 0.943, \quad K_{m0} = \frac{Z_{\Sigma 0}}{Z_{m0} + Z_{I0}} = 0.059/8.8^\circ$$

$$k - k_m = k - k_n = 0.733$$

$$K_{n0} (k - k_m) \frac{Z_{I1}}{\frac{1}{2} (Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M})} = 1.11/0.4^\circ$$

$$K_{n0} (k - k_n) \frac{Z_{n1}}{\frac{1}{2} (Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M})} = 1.11/1.5^\circ$$

(1)、求故障后的各相 m 及 n 母线位置。

(1)—1、故障点 B 相及 C 相电压,

$$\dot{U}_{gb} = \overrightarrow{ogb}, \quad \dot{U}_{gc} = \overrightarrow{ogc}, \quad R_g = \frac{\overline{og}}{ggo} \left| \frac{1}{2} (Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M}) \right|$$

(1) — 2、求M侧B相及C相母线位置。

$$\begin{aligned} \vec{E}_{mb}g_b &= - (I_{mb} + 3k_m I_{m0}) Z_{m1} - (I_{mb} + 3k_m I_{m0}) Z_{l1\Sigma} \\ &= - (I_{mb} + 3k_m I_{m0}) (Z_{m1} + Z_{l1\Sigma}) - (k - k_m) 3I_{m0} Z_{l1\Sigma} \end{aligned}$$

$$\text{取, } \vec{g}_b p_b = (k - k_m) 3 \dot{I}_{m0} Z_{l1\Sigma} = K_{m0} (k - k_m) 3 \dot{I}_{\Sigma 0} \cdot \frac{1}{2} (Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M}) \cdot \frac{Z_{l1\Sigma}}{\frac{1}{2} (Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M})}$$

$$= K_{m0} (k - k_m) \frac{Z_{l1\Sigma}}{\frac{1}{2} (Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M})} \cdot \vec{g}_{g0}$$

$$= 1.11/0.4^\circ \vec{g}_{g0}$$

$$\therefore \vec{E}_{mb} p_b = - (I_{mb} + 3k_m I_{m0}) (Z_{m1} + Z_{l1\Sigma})$$

同样, 取, $\vec{g}_c p_c = \vec{g}_b p_b$

$$\therefore \vec{E}_{mc} p_c = - (I_{mc} + 3k_m I_{m0}) (Z_{m1} + Z_{l1\Sigma})$$

把 $\vec{E}_{mb} p_b$ 与 $\vec{E}_{mc} p_c$ 分别按 Z_{m1} 与 $Z_{l1\Sigma}$ 的向量比例分段, 就可以分别求得故障后的B相与C相的M侧母线 m_b 与 m_c 的向量位置。

(1) — 3、求故障点A相电压。

$$\begin{aligned} \dot{U}_{g_a} &= \vec{og}_a = \vec{OG}_a + G_a g_a \\ &= \vec{OG}_a - \frac{Z_{\Sigma M}}{\frac{1}{2} (Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M})} \vec{g}_{g0} = \vec{OG}_a + 0.067/0.5^\circ \vec{g}_{g0} \end{aligned}$$

(1) — 4、求M侧的故障后A相母线 m_a 的向量位置。和求 m_b 的方法完全一样, 只

要把脚注 b 换为 a , 取 $\vec{g}_a p_a = \vec{g}_b p_b$, 则

$$\vec{E}_{m_a} p_a = - (I_{m_a} + 3k_m I_{m0}) (Z_{m1} + Z_{l1\Sigma})$$

把 $\vec{E}_{m_a} p_a$ 按 Z_{m1} 与 $Z_{l1\Sigma}$ 的向量比例分段, 就求得故障后的M侧A相母线的向量位置 m_a 。

(2) 求故障后的继电器各相 \dot{U}'_r 的向量终端位置。

同样以三个继电器为例, 如图18。对于继电器 Z_2 是母线故障它的 \dot{U}'_r 在 m_m 线上由 g 算起与 $\frac{Z_l}{Z_{l1}}$ 成比例的位置处, 用 $(\dot{U}'_{ra})_2$ 、 $(\dot{U}'_{rb})_2$ 及 $(\dot{U}'_{rc})_2$ 表示,

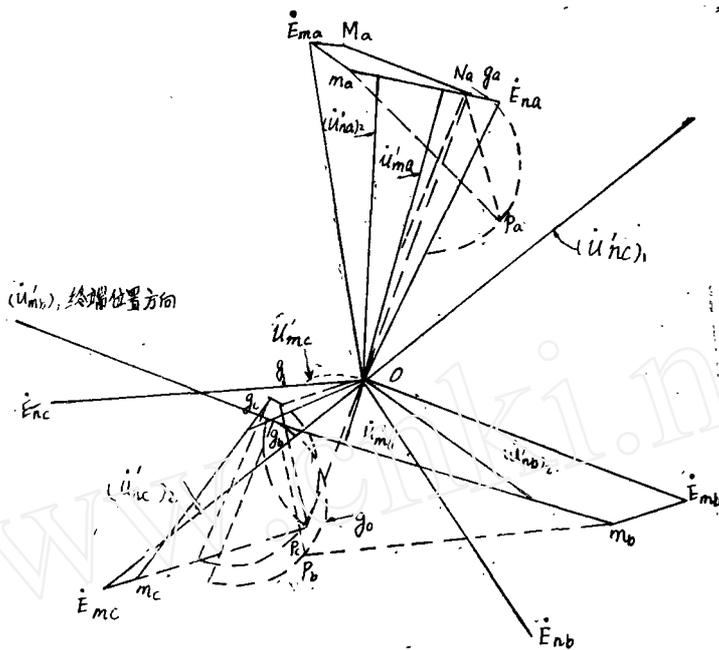


图17 N侧出口BC两相短路接地时的电压向量全图 (R_b 与 R_c 均不为零)

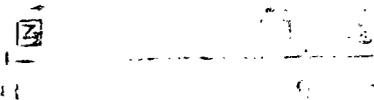


图18 说明N侧出口故障时求 \dot{U}'_g 的继电器按装位置图

对于继电器 Z_3 , 是线路故障, 它的 \dot{U}'_g 在 m_g 线上由 m 算起与 $\frac{Z_f}{Z_{11}}$ 成比例的位置处, 用 \dot{U}'_{m_a} , \dot{U}'_{m_b} 及 \dot{U}'_{m_c} 表示。

对于继电器 Z_1 , 是出口正方向故障, 它的各相 \dot{U}'_g 终端位置的求法如下, 分别以 $(\dot{U}'_{n_a})_1$, $(\dot{U}'_{n_b})_1$ 及 $(\dot{U}'_{n_c})_1$ 表示。

$$\begin{aligned} \overrightarrow{E_{n_a g_a}} &= -(\dot{I}_{n_a} + 3k_n \dot{I}_0) Z_{n1} \\ (\dot{U}'_{n_a})_1 &= \dot{U}_{n_a} - (\dot{I}_{n_a} + 3k_n \dot{I}_0) Z_{n1} \\ &= \dot{U}_{n_a} + \left[-(\dot{I}_{n_a} + 3k_n \dot{I}_0) Z_{n1} - (k - k_n) 3 \dot{I}_0 Z_{n1} \right] \frac{Z_{n1}}{Z_n} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{但, } (k - k_n) 3 \dot{I}_0 Z_{n1} &= K_{n0} \cdot (k - k_n) \frac{Z_{n1}}{\frac{1}{2}(Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M})} \left[\frac{1}{2} (Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M}) 3 \dot{I}_{\Sigma 0} \right] \\ &= K_{n0} (k - k_n) \frac{|Z_{n1}|}{\frac{1}{2} (Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M})} \overrightarrow{g g_0} = 1.11 / 1.5^\circ \overrightarrow{g g_0} \end{aligned}$$

$$\therefore (\dot{U}'_{na}) = \overrightarrow{og_a} + \left[\overrightarrow{E_{nag_a}} - 1.11/1.5^\circ \overrightarrow{gg_o} \right] 3.2/-10^\circ$$

同理,

$$(\dot{U}'_{nb})_1 = \overrightarrow{og_b} + \left[\overrightarrow{E_{nbg_b}} - 1.11/1.5^\circ \overrightarrow{gg_o} \right] 3.2/-10^\circ$$

$$(\dot{U}'_{nc})_1 = \overrightarrow{og_c} + \left[\overrightarrow{E_{ncg_c}} - 1.11/1.5^\circ \overrightarrow{gg_o} \right] 3.2/-10^\circ$$

六、断相加短路故障时的电压向量图。

1. 简单的A相断线。

如图5的正常运行情况下,由M流入N的三相电流的向量关系如图19,这是正常的负荷电流,每一相的电流都等于该相的 $(\dot{E}_m - \dot{E}_n)$ 除以串联总正序阻抗 ΣZ_1 。

在图5表示的系统条件下,假如发生了单独的A相断线,此时假定电源电势角依旧不变,这时的A相电流立即降为零。B相与C相的电流也立即发生变化,但是从式(8)及式(9)可知,除了A相断线而外,B相与C相各自的两侧联系关系完全与A相断线前一样,所以原来的B相与C相负荷电流现在就原封不动地(大小与相位均不变)变成 $\dot{I}_b + 3k \dot{I}_0$ 与 $\dot{I}_c + 3k \dot{I}_0$,这里的 k_Σ 是全线串联正序阻抗 ΣZ_1 与全线串联零序阻抗 ΣZ_0 的函数, $k_\Sigma = \frac{\Sigma Z_0 - \Sigma Z_1}{3 \Sigma Z_1}$ 。这种情况也表示在图19上。

回路中出现的 $3 \dot{I}_0$,完全是由于A相断线产生的,可以求得由M向N方向的 $3 \dot{I}_0$ 为:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{mb} - \dot{E}_{nb} &= \dot{I}_b \Sigma Z_L + \dot{I}_c \Sigma Z_M \\ \dot{E}_{mc} - \dot{E}_{nc} &= \dot{I}_c \Sigma Z_L + \dot{I}_b \Sigma Z_M \\ \therefore 3 \dot{I}_0 &= \dot{I}_b + \dot{I}_c \\ &= \frac{-\dot{E}_{ma} + \dot{E}_{na}}{\Sigma Z_L + \Sigma Z_M} \end{aligned} \quad (27)$$

式(27)中 ΣZ_L 是全线串联的相自感阻抗总和, ΣZ_M 是全线串联的相互感阻抗总和。

为求A相断线后B相与C相母线的电压变化,参考图20,M与N是断线前的母线位

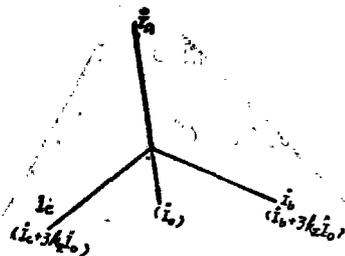


图19 图5的三相电流向量关系图
(括号内是A相断线后的电流量)

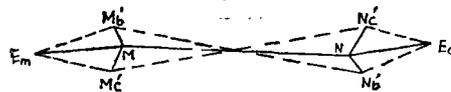


图20 求A相断线后,B相与C相母线电压的变化

置。此时 $\overrightarrow{E_m M} : \overrightarrow{MN} : \overrightarrow{NE_n} = Z_{m1} : Z_{11} : Z_{n1}$ 当发生A相断线后，仍假定 \dot{E}_m 与 \dot{E}_n 的相对关系未变，断线前的B相与C相的电流向量 \dot{I}_φ 而今变为 $\dot{I}_\varphi + 3k_\Sigma \dot{I}_0$ ，如果各段的k值相同，都等于 k_Σ 的话，那么B相与C相的 E_m 、M、N、 E_n 四点的位置将仍然保持不变，假定电流为由M向N的方向即 $\overrightarrow{E_m M} = -(\dot{I}_\varphi + 3k_\Sigma \dot{I}_0) Z_{m1}$ ， $\overrightarrow{NE_n} = -(\dot{I}_\varphi + 3k_\Sigma \dot{I}_0) Z_{n1}$ 。但实际上， E_m 与M间、M与N间和N与 E_n 间的k值分别是 k_m 、 k 及 k_n 。A相断线后的B相与C相的母线位置应满足（假定电流以M向N为正方向）；

$$\left. \begin{aligned} \overrightarrow{E_m M'} &= -(\dot{I}_\varphi + 3k_m \dot{I}_0) Z_{m1} \\ &= -(\dot{I}_\varphi + 3k_\Sigma \dot{I}_0) Z_{m1} - (k_m - k_\Sigma) 3 \dot{I}_0 Z_{m1} \\ &= \overrightarrow{E_m M} - (k_m - k_\Sigma) 3 \dot{I}_0 Z_{m1} = \overrightarrow{E_m M} - \frac{(k_\Sigma - k_m) Z_{m1}}{\Sigma Z_L + \Sigma Z_M} (\dot{E}_{m0} - \dot{E}_{n0}) \\ \overrightarrow{E_n N'} &= \overrightarrow{E_n N} + (k_n - k_\Sigma) 3 \dot{I}_0 Z_{n1} \\ &= \overrightarrow{E_n N} + \frac{k_\Sigma - k_n}{\Sigma Z_L + \Sigma Z_M} (\dot{E}_{n0} - \dot{E}_{m0}) Z_{n1} \end{aligned} \right\} (28)$$

图20中把B相与C相的母线位置变化画在一起，用以说明A相断线后的情况。

至于两侧的A相各点电压，可由下式求得，因 $I_a = 0$

$$\left. \begin{aligned} \therefore U_a^{(G)} &= \dot{E}_{m0} - (\dot{I}_{mb} + \dot{I}_{mc}) Z_{M(G)} \\ &= \dot{E}_{m0} - \frac{Z_{M(G)}}{\Sigma Z_L + \Sigma Z_M} (\dot{E}_{m0} - \dot{E}_{n0}) \\ \dot{u}_a^{(G)} &= \dot{E}_{n0} + \frac{Z_{M(G)'}}{\Sigma Z_C + \Sigma Z_M} (\dot{E}_{n0} - \dot{E}_{m0}) \end{aligned} \right\} (29)$$

式中的 $Z_{M(G)}$ 与 $Z_{M(G)'}$ 分别是电势 E_{m0} 和电势 E_{n0} 到待求电压点的相互感阻抗，

$\dot{u}_a^{(G)}$ 及 $\dot{u}_a^{(G)'}$ 分别是M侧与N侧待求点的电压。

由式(28)及式(29)，就可求得A相断线后的三相电压向量全图，如图21、 M_L' 、 N_L' 、 M_C' 、 N_C' 表示的分别是断线后B与C相母线位置。至于A相母线位置，M侧为

$$\dot{E}_{m0} - \frac{1}{3} \frac{(Z_{m1} - Z_{n0})}{\Sigma Z_L + \Sigma Z_M} (\dot{E}_{m0} - \dot{E}_{n0}) = \dot{E}_{m0} - 0.006 \angle 8^\circ (\dot{E}_{m0} - \dot{E}_{n0}),$$

N侧为 $\dot{E}_{n0} + 0.006 \angle 8^\circ (\dot{E}_{m0} - \dot{E}_{n0})$ 。基本与电源电势同一位置。N侧断线的线路末端线路的N侧断口处电压及M侧断线的线路末端（线路的M侧断口处）电压分别标示在图21上。分别由 M_a' 及 N_a' 到线路末端的连线，就是在该种A相断线情况下的沿线的电压分布线。

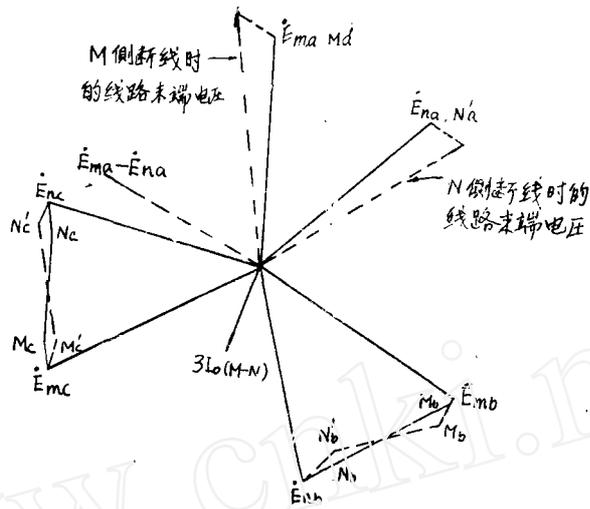


图21 简单的A相断线情况下的三相电压向量全图

$$Z_{m1} = Z_m = j0.05, \quad Z_{n0} = Z_{m0} = j0.04, \quad Z_{l1} = 0.2 \angle 80^\circ$$

$$Z_{l0} = 0.6 \angle 80^\circ, \quad k_m = k_n = -0.067, \quad k = 0.667$$

$$k_s = 0.42 \angle -3.9^\circ, \quad \Sigma Z_L + \Sigma Z_M = 0.554 \angle 82^\circ$$

2、A相断线，A相再接地。

计算的基础是重叠原理，把单独的A相断线作为这种计算的正常情况，就可以由图21求得故障点在故障前的正常运行电压 u_{Ga} 、 u_{Gb} 及 u_{Gc} 。这个电压，当然和全相运行时的同一故障点的正常运行电压不一样。

在A相再发生接地后，故障相的电压变为 $3I_{\Sigma 0} K_g$ ，变化量是 $(\dot{u}_{Ga} - 3\dot{I}_{\Sigma 0} R_g)$ 。因此，A相再接地所引起的系统电压及电流的变化，是由于 $(\dot{u}_{Ga} - 3\dot{I}_{\Sigma 0} R_g)$ 的作用产生的。计算由此引起变化量的计算系统如图22。

取接地点如图，左侧与右侧的相自阻抗及相互感阻抗分别为 Z_L 、 Z_C' 及 Z_M 、 Z_M' ，可列下列方程，

$$\dot{I}_a Z_L + 2\dot{I} Z_M = \dot{u}_{Ga} - \dot{I}_a R_g$$

$$\dot{I}_a Z_M + \dot{I} (Z_L + Z_L' + Z_M + Z_M') = 0$$

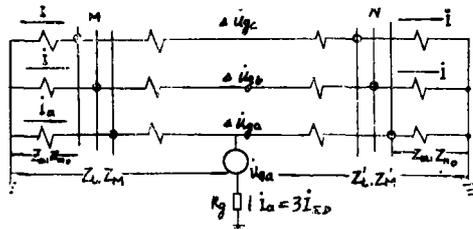


图22 计算A相再接地时变化量的等价回路图

由以上两方程解得

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{u}_{G_a}}{R_g + Z_L - 2 \frac{Z_M^2}{Z_L + Z_L' + Z_M + Z_M'}} - \frac{Z_M}{Z_L + Z_L' + Z_M + Z_M'} \dot{u}_{G_a}$$

$$\dot{I} = \frac{-\frac{Z_M}{Z_L + Z_L' + Z_M + Z_M'}}{R_g + Z_L - 2 \frac{Z_M^2}{Z_L + Z_L' + Z_M + Z_M'}} \dot{u}_{G_a}$$

取 $\Delta \dot{u}_{gL}$ 与 $\Delta \dot{u}_{gC}$ 都是电压升, \dot{I} 是 g 流向 E_n ;

故 $\Delta \dot{u}_{gb} = \Delta \dot{u}_{gC}$

$$= \dot{I} (Z_L' + Z_M')$$

$$= \frac{-\frac{Z_M}{Z_L + Z_L' + Z_M + Z_M'} (Z_L' + Z_M')}{R_g + Z_L - 2 \frac{Z_M^2}{Z_L + Z_L' + Z_M + Z_M'}}$$

$$\therefore \dot{u}_{ga} = \frac{R_g}{R_g + Z_C - \frac{2 Z_M^2}{Z_L + Z_L' + Z_M + Z_M'}} \dot{u}_{G_a}$$

$$\rightarrow g_a G_a = \frac{Z_L - 2 \frac{Z_M^2}{Z_L + Z_L' + Z_M + Z_M'}}{k_g + Z_L - \frac{2 Z_M^2}{Z_L + Z_L' + Z_M + Z_M'}} \dot{u}_{G_a}$$

$$\dot{u}_{gO} = \dot{u}_{Gb} + \Delta \dot{u}_{gL}$$

$$= \dot{u}_{Cb} - \frac{\frac{Z_M (Z_L' + Z_M')}{Z_L + Z_L' + Z_M + Z_M'}}{Z_L - \frac{2 Z_M^2}{Z_L + Z_L' + Z_M + Z_M'}} \rightarrow g_a G_a$$

$$\dot{u}_{gC} = \dot{u}_{GC} + \Delta \dot{u}_{gC}$$

$$= \dot{u}_{CC} - \frac{\frac{Z_M (Z_L' + Z_M')}{Z_L + Z_L' + Z_M + Z_M'}}{Z_L - \frac{2 Z_M^2}{Z_L + Z_L' + Z_M + Z_M'}} \rightarrow g_a G_a$$

(30)

M 侧的总零序电流 ΣI_{m0} 是断线与故障增量之和

$$\Sigma \dot{I}_{m0} = \frac{-(\dot{E}_{m_a} - \dot{E}_{n_a})}{3(Z_L + Z_L' + Z_M + Z_M')} + \frac{1 - \frac{2 Z_M}{Z_L + Z_L' + Z_M + Z_M'}}{3 \left[(R_g + Z_L) - \frac{2 Z_M^2}{Z_L + Z_L' + Z_M + Z_M'} \right]} \dot{u}_{G_a}$$

$$= \frac{-(E_{m_a} - E_{n_a})}{3(Z_L + Z_L' + Z_M + Z_M')} + \frac{1 - \frac{2 Z_M}{Z_L + Z_L' + Z_M + Z_M'}}{3 \left(Z_L - \frac{2 Z_M^2}{Z_L + Z_L' + Z_M + Z_M'} \right)} \rightarrow g_a G_a \quad (31)$$

M侧母线各相电压的变化(均取为电压升)

$$\begin{aligned}
 \Delta \dot{u}_{ma} &= \frac{1}{3} (Z_{m0} + 2Z_{m1}) \dot{I}_a - \frac{1}{3} (Z_{m0} - Z_{m1}) 2\dot{I} \\
 &= \frac{-(Z_{m0} + 2Z_{m1}) + \frac{2Z_M}{Z_L + Z'_L + Z_M + Z'_M} (Z_{m0} - Z_{m1})}{3 \left[Z_L - 2 \frac{Z_M^2}{Z_L + Z'_L + Z_M + Z'_M} + R_g \right]} \dot{u}_{Ga} \\
 \dot{u}_{ma} &= \dot{u}_{Ma} + \Delta \dot{u}_{ma}, \quad \dot{u}_b = \dot{u}_{Mb} + \Delta \dot{u}_{mb}, \quad \dot{u}_{mc} = \dot{u}_{Mc} + \Delta \dot{u}_{mc} \\
 \Delta \dot{u}_{mb} &= \Delta \dot{u}_{mc} \\
 &= -\frac{1}{3} (Z_{m0} + 2Z_{m1}) \dot{I} - \frac{1}{3} (Z_{m0} - Z_{m1}) (\dot{I} + \dot{I}_a) \\
 &= \frac{-(Z_{m0} - Z_{m1}) + \frac{2Z_M}{Z_L + Z'_L + Z_M + Z'_M} (2Z_{m0} + Z_{m1})}{3 \left[Z_L - \frac{2Z_M^2}{Z_L + Z'_L + Z_M + Z'_M} + R_g \right]} \dot{u}_{Ga}
 \end{aligned} \tag{32}$$

N侧零序电流 ΣI_{n0} 是断线与故障增量之和, 取方向为N流向M为正时, 则,

$$\begin{aligned}
 \Sigma \dot{I}_{n0} &= \frac{\dot{E}_{m0} - \dot{E}_{n0}}{3(Z_L + Z'_L + Z_M + Z'_M)} + \frac{\frac{2Z_M}{Z_L + Z'_L + Z_M + Z'_M} \dot{u}_{Ga}}{3 \left(R_g + Z_L - \frac{2Z_M^2}{Z_L + Z'_L + Z_M + Z'_M} \right)} \dot{u}_{Ga} \\
 &= \frac{\dot{E}_{m0} - \dot{E}_{n0}}{3(Z_L + Z'_L + Z_M + Z'_M)} + \frac{\frac{2Z_M}{Z_L + Z'_L + Z_M + Z'_M} \dot{u}_{Ga}}{3 \left(Z_L - \frac{2Z_M^2}{Z_L + Z'_L + Z_M + Z'_M} \right)} \dot{u}_{Ga}
 \end{aligned}$$

图23(a)是按图22的条件, N侧A相断线, 再在线路中点A相接地时的电压向量图, 而图23(b)则是M侧A相断线, 再在线路中点A相接地时的电压向量图。按图2²的标示符号, 图23(a)中

$$\begin{aligned}
 Z_L + Z'_L + Z_M + Z'_M &= 0.077 + j0.548 = 0.554 \angle 82^\circ \\
 Z_M &= 0.0115 + j0.0628, \quad Z_L = 0.029 + j0.209 \\
 Z_L - \frac{2Z_M^2}{Z_L + Z'_L + Z_M + Z'_M} &= 0.029 + j0.202 = 0.204 \angle 82.1^\circ \\
 \frac{Z_M}{Z_L + Z'_L + Z_M + Z'_M} &= 0.115 \angle -25^\circ \\
 \dot{u}_{Ga} &= \dot{u}_{Ga} = \frac{R_g}{R_g + 0.204 \angle 82.1^\circ} \dot{u}_{Ga} \\
 \dot{u}_{Ga} &= \frac{0.204 \angle 82.1^\circ}{K_r + 0.204 \angle 82.1^\circ} \dot{u}_{Ga} \\
 \dot{u}_{Gb} &= \Delta \dot{u}_{gb} = -0.155 \angle -23^\circ \dot{u}_{Ga}
 \end{aligned}$$

$$\vec{G}_c g_c = \Delta \dot{u}_{gc} = -0.155 \angle -23^\circ g_a G_a$$

$$\vec{M}_a m_a = \Delta \dot{u}_{ma} = -0.23 \angle 8.2^\circ g_a G_a$$

$$\vec{M}_b m_b = \Delta \dot{u}_{mb} = 0.04 \angle 8.2^\circ g_a G_a$$

$$\vec{M}_c m_c = \Delta \dot{u}_{mc} = 0.04 \angle 8.2^\circ g_a G_a$$

$$\Delta \dot{u}_{na} = N_a n_a = 0.004 \angle 5.7^\circ g_a G_a$$

$$\Delta \dot{u}_{nb} = N_b n_b = -0.025 \angle 5.7^\circ g_a G_a$$

$$\Delta \dot{u}_{nc} = N_c n_c = -0.025 \angle 5.7^\circ g_a G_a$$

图23 (b) 的计算数值与图23 (a) 相似。

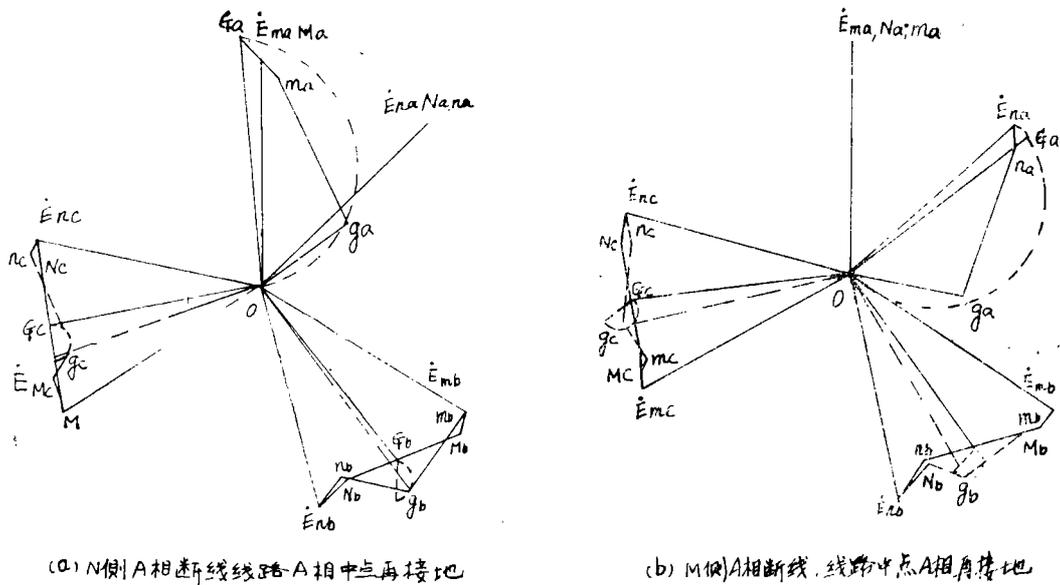
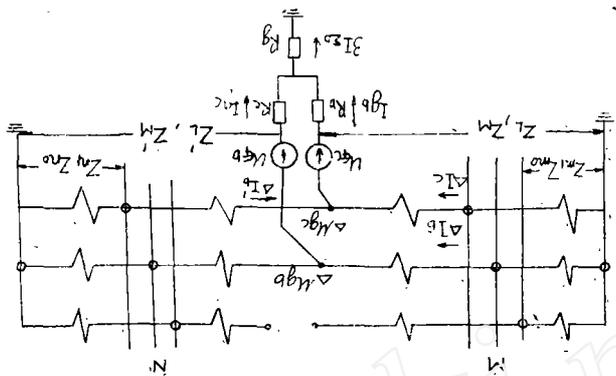


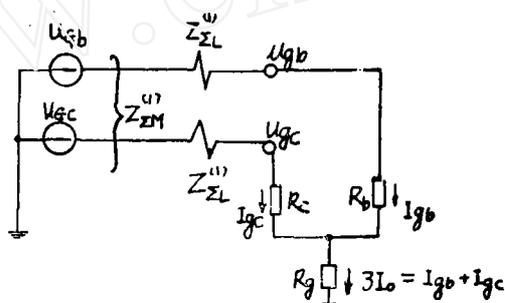
图23 A相断线A相接地时的电压向量全图

3. A相断线, B与C相再故障。

计算方法仍以单独A相断线时的情况为正常运行情况, 叠加以BC故障后变化的电气量以求得最终的电气量, 计算变化量的等价回路如图24。



(a) 计算A相断线, BC相再故障时变化量的等价回路。



(b) 计算A相断线, BC相再故障时故障点BC电压的等价回路。

图24 计算A相断线, BC相再故障的计算回路

问题是求故障点B与C看到的系统等价计算阻抗 $Z_E^{(1)}$ 及 $Z_M^{(1)}$ 而它和全相运行时的数值有很大的不同。

以 $\Delta \dot{u}_{sb}$ 及 $\Delta \dot{u}_{sc}$ 为电源, 计算图24(a)左侧 $\Delta \dot{I}_b$ 及 $\Delta \dot{I}_c$ 得($\Delta \dot{u}_{sL}$ 与 $\Delta \dot{u}_{sC}$ 均取为电位升)

$$\begin{aligned}
 -\Delta \dot{I}_b Z_L - \Delta \dot{I}_c Z_M &= \Delta \dot{u}_{sb} \\
 -\Delta \dot{I}_b Z_M - \Delta \dot{I}_c Z_L &= \Delta \dot{u}_{sc} \\
 \therefore \Delta \dot{I}_b &= \frac{1}{Z_L^2 - Z_M^2} [-Z_L \Delta \dot{u}_{sb} + Z_M \Delta \dot{u}_{sc}] \\
 \Delta \dot{I}_c &= \frac{1}{Z_L^2 - Z_M^2} [-Z_L \Delta \dot{u}_{sc} + Z_M \Delta \dot{u}_{sb}]
 \end{aligned}$$

同理可求得 $\Delta \dot{I}'_b$ 及 $\Delta \dot{I}'_c$, 解得

$$\dot{I}_{gb} = \Delta \dot{I}_b + \Delta \dot{I}'_b = f(\Delta \dot{u}_{sb}, \Delta \dot{u}_{sc})$$

$$\dot{I}_{gC} = \Delta \dot{I}_C + \Delta \dot{I}'_C = f(\Delta \dot{u}_{gb}, \Delta \dot{u}_{gC})$$

然后反求 $\Delta \dot{u}_{gb} = f(\dot{I}_{gb}, \dot{I}_{gC})$ 及 $\Delta \dot{u}_{gC} = f(\dot{I}_{gb}, \dot{I}_{gC})$, 最后得:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{u}_{gb} &= - (Z_{\Sigma L}^{(1)} \dot{I}_{gb} + Z_{\Sigma M}^{(1)} \dot{I}_{gC}) \\ \Delta \dot{u}_{gC} &= - (Z_{\Sigma M}^{(1)} \dot{I}_{gb} + Z_{\Sigma L}^{(1)} \dot{I}_{gC}) \end{aligned} \right\} (33)$$

式(33)中:

$$Z_{\Sigma L}^{(1)} = \frac{\left(\frac{Z_L}{Z_L^2 - Z_M^2} + \frac{Z'_L}{Z_L'^2 - Z_M'^2} \right)}{\left(\frac{1}{Z_L + Z_M} + \frac{1}{Z'_L + Z'_M} \right) \left(\frac{1}{Z_L - Z_M} + \frac{1}{Z'_L - Z'_M} \right)}$$

$$Z_{\Sigma M}^{(1)} = \frac{\left(\frac{Z_M}{Z_L^2 - Z_M^2} + \frac{Z'_M}{Z_L'^2 - Z_M'^2} \right)}{\left(\frac{1}{Z_L + Z_M} + \frac{1}{Z'_L + Z'_M} \right) \left(\frac{1}{Z_L - Z_M} + \frac{1}{Z'_L - Z'_M} \right)}$$

$Z_{\Sigma L}^{(1)}$ 与 $Z_{\Sigma M}^{(1)}$ 是专用以计算 A 相断线, B 与 C 相再故障时的故障点综合阻抗。

由式(33), 即可求得故障点 B 与 C 相等价计算回路如图 24(b)

利用图 24(b), 可求得故障点 B 相与 C 相变化的电压量。

$$\Delta \dot{u}_{gb} = \dot{u}_{gb} - \dot{u}_{Gb}$$

$$\Delta \dot{u}_{gC} = \dot{u}_{gC} - \dot{u}_{GC}$$

又由图 24(a) 可以求得故障点左侧与右侧的零序电流故障增量 $\Delta \dot{I}_{m0}$ 及 $\Delta \dot{I}_{n0}$, 从而求得故障后的总零序电流 $\Sigma \dot{I}_{m0}$ 及 $\Sigma \dot{I}_{n0}$ (其方向均为由电源流向故障点) 分别为

$$\left. \begin{aligned} \Sigma \dot{I}_{m0} &= \frac{-(\dot{E}_{m0} - \dot{E}_{n0})}{3(Z_L + Z'_L + Z_M + Z'_M)} - \frac{\Delta \dot{u}_{gb} + \Delta \dot{u}_{gC}}{3(Z_L + Z_M)} \\ \Sigma \dot{I}_{n0} &= \frac{(\dot{E}_{m0} - \dot{E}_{n0})}{3(Z_L + Z'_L + Z_M + Z'_M)} - \frac{\Delta \dot{u}_{gb} + \Delta \dot{u}_{gC}}{3(Z'_L + Z'_M)} \end{aligned} \right\} (33)$$

故障点 A 相电压变化 $\Delta \dot{u}_{gA}$ (也是电位升) 是:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{u}_{gA} &= -(\Delta \dot{I}_b + \Delta \dot{I}_c) Z_M \\ &= \frac{Z_M}{Z_L + Z_M} (\Delta \dot{u}_{gb} + \Delta \dot{u}_{gC}) \end{aligned}$$

M 母线各相电压变化 (电位升) 是:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{u}_{mA} &= \frac{Z_{m0} - Z_{m1}}{3(Z_L + Z_M)} (\Delta \dot{u}_{gb} + \Delta \dot{u}_{gC}) \\ \Delta \dot{u}_{mB} &= \frac{1}{3} (Z_{m0} + 2Z_{m1}) \Delta \dot{I}_b - \frac{1}{3} (Z_{m0} - Z_{m1}) \Delta \dot{I}_c \\ \Delta \dot{u}_{mC} &= -\frac{1}{3} (Z_{m0} - Z_{m1}) \Delta \dot{I}_b - \frac{1}{3} (Z_{m0} + 2Z_{m1}) \Delta \dot{I}_c \end{aligned}$$

同理, N 母线各相电压变化 (电位升) 是

$$\Delta \dot{u}_{na} = \frac{Z_{n0} - Z_{n1}}{3(Z_L' + Z_M')} (\Delta \dot{u}_{sL} + \Delta \dot{u}_{sC})$$

$$\Delta \dot{u}_{sb} = \frac{1}{3} (Z_{n0} + 2Z_{n1}) \Delta \dot{I}'_b - \frac{1}{3} (Z_{n0} - Z_{n1}) \Delta \dot{I}'_c$$

$$\Delta \dot{u}_{sc} = -\frac{1}{3} (Z_{n0} - Z_{n1}) \Delta \dot{I}'_b - \frac{1}{3} (Z_{n0} + 2Z_{n1}) \Delta \dot{I}'_c$$

以上所列电压变化量都取电位升方向，是为了把这一向量求得后，直接由原电压终端加这一向量就可得变化后的该相电压，例如 $\dot{u}_{ma} = \dot{u}_{Ma} + \Delta \dot{u}_{ma}$ ， \dot{u}_{ma} 是故障后的量， \dot{u}_{Ma} 是故障前的量，而 $\Delta \dot{u}_{ma}$ 是变化的电位升的电压量。

第二部分 分析举例

在这一部分中，利用本文第一部分论述的计算分析方法，对现在常用的某些距离继电器在某些特殊故障情况下的动作行为进行分析，目的是为了进一步说明，这种分析方法如何具体运用。掌握了分析方法，不难对各种距离继电器在不同的故障情况下的动作行为进行分析。

第一节 相间方向距离继电器

一、相间方向距离继电器的动作边界条件。

这种继电器采用相间距离测量电压，用同名相间电压和附加不大的第三相电压作为极化量，例如 AB 相。

$$\dot{u}'_{Lq} = \dot{u}_{ab} - (\dot{I}_a - \dot{I}_b) Z_f$$

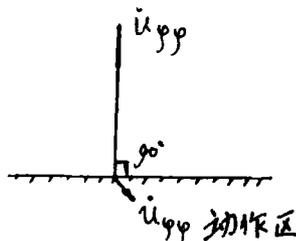
$$= \dot{u}'_a - \dot{u}'_b$$

$$\dot{u}_f = \dot{u}_{ab} - jn \dot{u}_c \quad (n \ll 1)$$

它的动作边界，为了举例取为一般情况，

$$-90^\circ \geq \arg \dot{u}_f - \arg \dot{u}'_{Lq} \geq 90^\circ$$

其动作向量图如下，



二、正方向三相短路。

为了说明极化回路记忆作用的效能, 并进行送受端情况的对比, 假定送受端的电源阻抗相同, 在线路中点故障, 有一定送电角, 如图25。

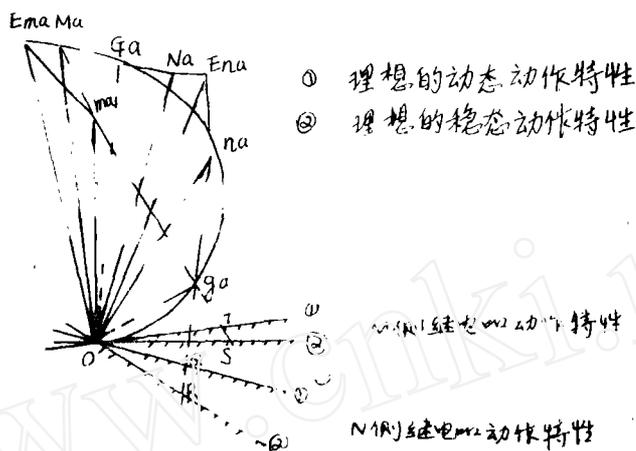


图25 中点附近三相短路时的电压向量图

假定极化量中 n 很小, 故障前通入两侧继电器的极化电压分别是 \vec{OM}_a 及 \vec{ON}_a , 故障后通入两侧继电器的端子电压分别是 \vec{om}_a 与 \vec{on}_a 。由于极化回路的记忆作用, 在 $t=0$ 时, 其动作时性将以 \vec{OM}_a 为基准, 得动作边界线①, 随着时间的推移, 作用于 M 侧继电器执行元件的极化量将以 O 为轴心由 \vec{OM}_a 沿着 $M_a m_a$ 线旋转至 \vec{om}_a , 作用于 N 侧继电器的则由 \vec{ON}_a 旋转至 \vec{on}_a , 继电器的动作边界也由动态的边界线①逐渐转动到稳态的边界线②。

由此可见, 极化回路记忆作用对继电器动作行为的效能, 表现为影响继电器的动作边界的角度(相对距离测量电压来说)。由图25可以推论, 若 G 移到按装继电器的母线, 则 \vec{OG} 是故障前母线电压, \vec{Og}_a 是故障后母线电压, 它们之间的相位差远大于 \vec{OM}_a 与 \vec{om}_a 的相位差, 说明故障点愈近母线, 记忆作用的效能愈显著; 而离母线愈远, 效能则愈差。

在图25中, $\overline{m_a g_a}$ 代表了故障后由 m 到 g 的距离, 延长 $m_a g_a$, 交 M 侧继电器的特性边界于 T 与 S 两点, 说明在 $t=0$ 时, 只要 $Z_i^{(0)} = \frac{\overline{m_a T}}{m_a g_a} Z_{s1}$, 继电器就动作, 而当 $t=\infty$ 则要 $Z_i^{(\infty)} = \frac{\overline{m_a S}}{m_a g_a} Z_{s1}$ 继电器才能动作, 显见 $Z_i^{(0)} < Z_i^{(\infty)}$ 。而如果继电器整定值为 $Z_i^{(\infty)}$, 对于动作边界线①的情况, 将较动作边界线②允许有较大的 $\overline{Og_a}$ ($\overline{Og_a}$ 代表故障点的电阻值, $\overline{Og_a} : \overline{g_a G_a} = R : |Z_{s1}|$)。因而距离继电器极化回路的记忆作

用能使它保护电阻的能力增强。 G 愈近母线，作用愈大，但如果 Z_{m1} 愈小，则 \vec{OM}_a 与 \vec{OM}_a 的相位愈靠拢，记忆作用的效果愈小，当 $Z_{m1} = 0$ 时， \vec{OM}_a 与 \vec{om}_a 叠合，记忆作用效果为零，这相当于无穷大电源情况。

从图25,对两侧继电器都取动作特性②为基础。 $\vec{g_a T}$ 与 $\vec{g_a R}$ 代表由于故障点有了电阻 M 侧与 N 侧必须增大的整定值 $\frac{\vec{g_a T}}{m_a g_a}$ 与 $\frac{\vec{g_a R}}{m_a g_a}$ 分别代表欲使继电器动作所必须增加的整定百分数。显见， $\frac{\vec{g_a T}}{m_a g_a} < \frac{\vec{g_a R}}{n_a g_a}$ ，即送端继电器受电阻的影响较受端继电器小。

三、母线三相对称短路。

假定母线经电阻对称短路，送电侧母线短路时，如图26(a)装在送端出口的方向距离继电器总是不会误动作，无论 $t = 0$ 时的动态特性或 $t = \infty$ 时的稳态情况都是这样。但在受电侧反方向三相短路时，在稳态情况下总要误动作，除非这个电阻达到相当大的数值，使 $\vec{og_a}$ 落后 $\vec{m_a g_a}$ 的夹角小于 90° ，稳态特性②才与 $\vec{g_a m_a}$ 没有交点，继电器才不动作。在图中 $\vec{ON_a}$ 代表额定电压， $\vec{og_a}$ 代表残余电压，由图可见，如果 Z 比较大，例如用于高频闭锁距离保护的情况， $\vec{og_a}$ 可能高达额定电压25%或以上才能不动作。但反方向的误动作不是瞬时的，图 $t = 0$ 时的动态特性①保证了不动作。随着时间推移，极化量以 O 为轴心沿 $\vec{N_a g_a}$ 线，依极化回路的衰减时间常数 T 旋转到 \vec{og} 垂直于 $\vec{g_a m_a}$ 之后才可能开始与 $\vec{m_a g_a}$ 有交点，一直旋转到 $\vec{u_a}$ 的终端进入继电器动作区，继电器才开始误动作。到达 g 所经历的时间 t 为 $T \ln \frac{N_a g_a}{\xi g_a}$ 。

如果极化回路的谐振频率与系统频率不相同(频率差 Δf)以图26(b)情况为例，其一，影响继电器的动作边界线不复与极化电压垂直而是差了一个角度；其二，极化回路工作电压终端轨迹 $N_a g_a$ 不是固定不动的直线，而是以 g_a 为轴心，用频差 Δf 的速度旋转，同时由 N_a 逐渐衰减到 g_a 的曲线。

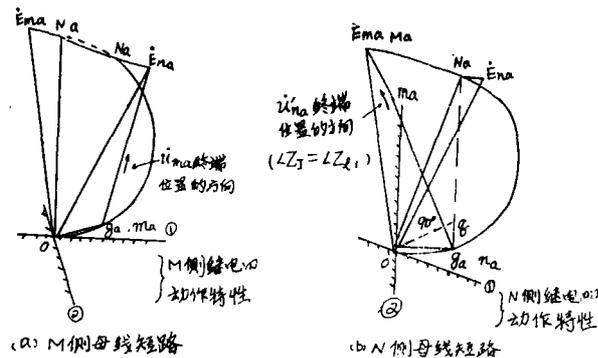


图26 母线三相短路时的电压向量图

因为讨论的是三相短路，所以凡是保护正方向三相短路且装在受电侧的任何距离继电器，都不可避免要出现所述的误动作，唯一可资利用以区别正反方向三相故障的，是继电器的动作时间。当极化回路的时间常数愈大时，反方向误动作延迟的时间愈长，但要求极化回路谐振频率与系统频率十分接近。

由图26(b)也可见，以下措施也有利于防止误动作(但影响其他情况下的性能需另作分析)，如。

(1) 继电器的动作范围小于 180° 。

(2) 有意的改变继电器内部参数，改变动作边界线的起始角，使边界线②相对极化电压 \overline{on}_e 向反时针方向旋转一个角度。

(3) 取 $\arg Z_1 < \arg Z_{11}$ ，则距离测量电压 u'_m 的终端将落在落后 $\overline{g_m}$ 的直线上。

四、经串联电容短路。

1. 正方向短路。

供说明这种短路的系统图如图27(a)；

在正方向出口装有串联电容器时，只要 $X_c < X_{M1}$

则在正常运行情况下，G点的位置将在 \dot{E}_m 与M之间。在G点故障时，G变至g，M变至m，如图27(b)，而继电器的距离测量电压 \dot{u}'_m 的终端位置是由M向N，即在g向m的外侧。在 $t=0$ 时， \dot{u}'_m 在理想动态特性①的动作区，继电器可以动作保护这样的故障。

在故障过程中，通入继电器内部的极化工作量，由OM沿 \overline{Mm} 逐渐衰减到Om，继电器的动作特性由理想的动态特性①以原点为轴心向顺时针方向旋转而逐渐使 \dot{u}'_m 越出动作区然后到达稳定动作特性②，继电器逐渐由动作转为制动。当已知极化回路衰减时间常数时，即可求得继电器具有动作力矩的时间。例如当极化工作量由OM旋转到og时恰巧与距离测量电压 ou_m 垂直，此时为动作边缘区， \overline{Mm} 向量衰减到 \overline{gm} 的时间

$$t = T \ln \frac{\overline{Mm}}{\overline{gm}}, \text{ 即为所求。}$$

但是这种继电器保护正方向串联电容的能力是有限度的。若 $X_c > X_{M1}$ 时，则正常运行的G点将在 $\overline{ME_M}$ 的 E_M 侧延长线上。即 E_M 点在G与M间，当在G点发生故障时，

m点和由 $\overline{E_m m}$ 引出的 $\overline{U'_M}$ 点都将在 $\overline{g E_m}$ 联线的g的异侧，继电器不能动作。但由图27(b)及(c)也可以发现，当 $X_c < X_{M1}$ 时，故障前后的母线电压相位要翻转 180° ，如果 X_c 接近于 X_{M1} ，则 $\overline{Om} \gg \overline{OM}$ ，系统产生过电压，而当 $X_c > X_{M1}$ 时，故障前后的母线电压相位不会翻转，但也会出现 $om \gg \overline{OM}$ 的情况。必须有过电压保护将串联电容短路。这就说明，带有记忆作用的方向阻抗继电器，实际上可以保护所有经串联电容

的出口短路而无需附加条件。

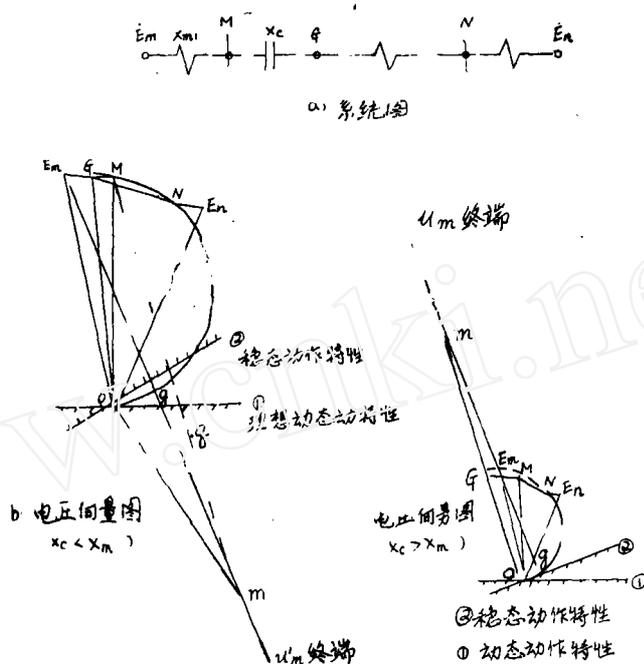


图27 正方向经串联电容短路

2. 反方向短路。

供说明用的等价系统如图28(a)，图28(b)是相对应的电压向量全图。由图28(b)可见，反方向经串联电容短路时，方向距离继电器会失去方向性。而极化回路的记忆作用，能延迟误动作时间的到来，延迟时间的计算法与前类同。

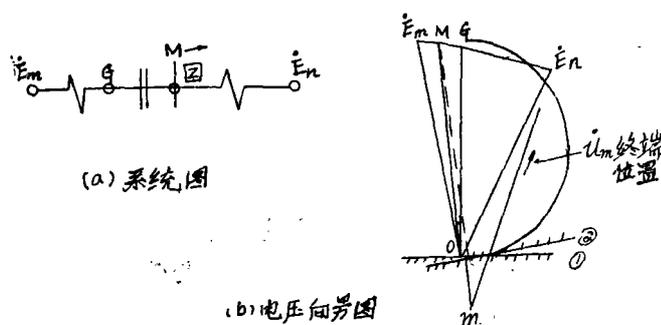


图28 反方向经串联电容短路

五、正方向单相接地。

在采用单相重合闸的线路中，不允许在单相接地时，因相间距离继电器的动作而误

切三相。可行的办法是利用零序分量电压（或电流）断开相间距离继电器的动作回路，或者采用特殊动作条件的相间距离继电器以躲开单相接地时的可能动作。这些都要求了解相间距离继电器在单相接地时的动作行为究竟如何。

制作在所述故障情况下的电压向量图的一个基本原则是，因极化量取相间电压，故宜选用以相间电压为基础的电压向量图，并在同时把必需的相电量画入。依据式（18）式（20），得图如图29。

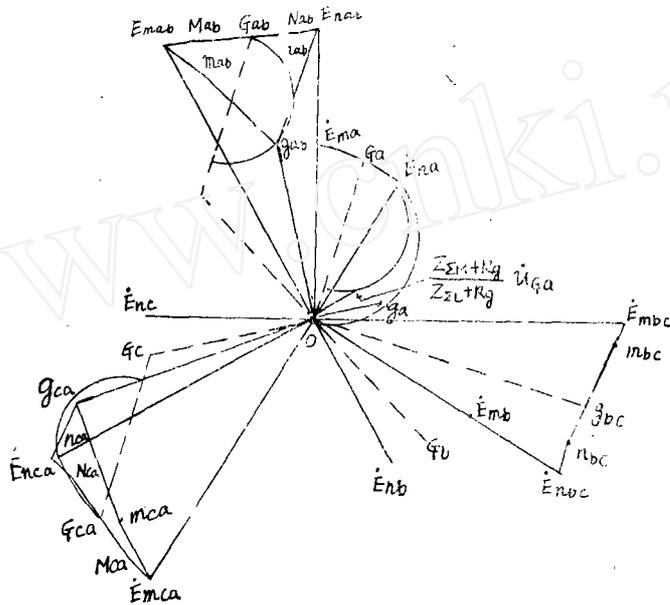


图29 A相接地时的电压向量全图
(标示的 g_{ab} 、 g_{bc} 、 g_{ca} 、 g_a 等都是对应于同一 R_g 的值)

在图29中，由式（20）可求得故障点的 \dot{U}_{gab} 、 \dot{U}_{gbc} 及 \dot{U}_{ga} 然后按正序阻抗的分配关系分别求得各母线的相间电压向量终端位置 m_{ab} 、 n_{ab} ……等，并据此以求相间继电器的动作行为。例如M侧AB相继电器（ M_{ab} ）的极化电压是 $\overrightarrow{om_{ab}}$ ，距离测量电压 \dot{U}'_{ac} 的终端位置在 $\overline{m_{ab}g_{ab}}$ 延长线的外侧（ $Z_f > Z_{g1}$ ）或在 $\overline{m_{ab}g_{ab}}$ 线上（ $Z_f < Z_{g1}$ ）。以 $\overrightarrow{om_{ab}}$ 为基准，代入继电器的动作边界特性，就可以判定继电器（ M_{ab} ）的动作行为如何。

以下对A相接地，送端继电器（ M_{ab} ），（ M_{ca} ）与受端继电器（ N_{ab} ），（ N_{ca} ）的动作情况予以分析。

（1）出口金属接地。

为了便于比较，固定故障点的电压向量不动。在此无负荷条件下，图29中的各电源相间电压将分别与故障点的故障前相间电压重合。因为是出口故障，一般 $\frac{Z_{\Sigma M}}{Z_{\Sigma E}}$ 很小，假定取为零，由图29即可导出继电器（ M_{ab} ）与（ M_{ca} ）及（ N_{ab} ）与（ N_{ca} ）的有关

向量关系如图30。用不带括号的符号表示无负荷情况，由图可见，当继电器的动作角为 90° 及 $\arg z_j = \arg z_{c1}$ 时， (M_{ab}) 与 (M_{ca}) 的动作情况一样。

在送负荷情况（图30中用带括弧的符号表示）。送端电源电势与受端电源电势沿不同方向离开了无负荷的位置，由图30明显可见，继电器 (M_{ab}) 及 (N_{ca}) 较无负荷情况易于动作，而 (M_{ca}) 及 (N_{ab}) 反而较不易动作。

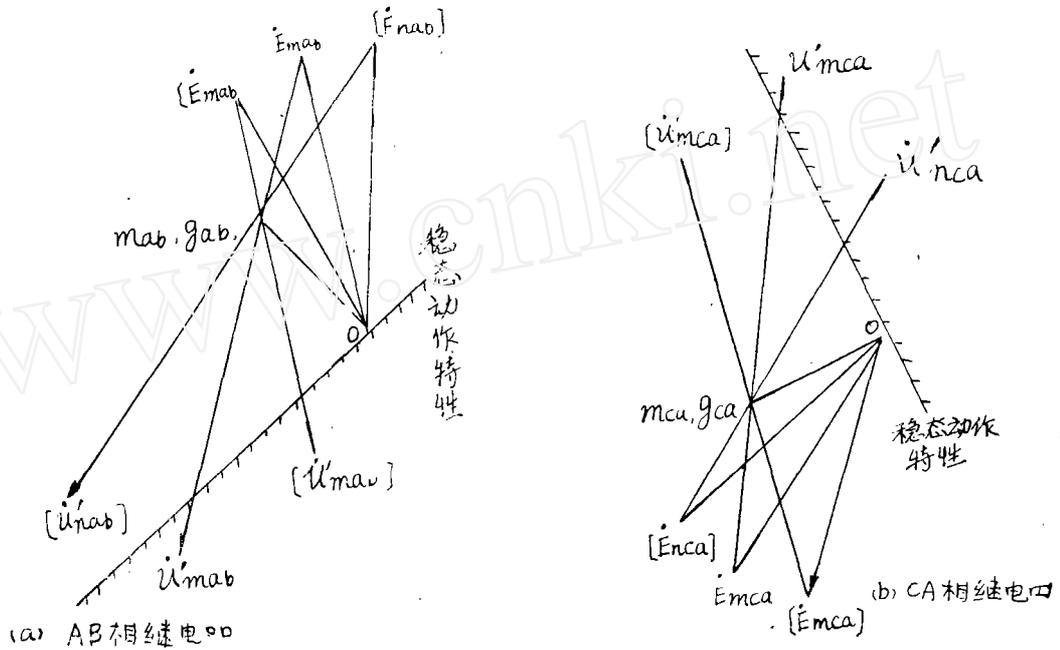


图 30 出口 A 相接地的电压向量图

无括号的符号表示无负荷时情况。 有括号的符号表示有负荷时情况。

(2) 出口经电阻接地。

对照图29，当故障点经过不太大的电阻时， \dot{U}_{gab} 向量向顺时针方向旋转，其绝对值可能稍有所减小，而 \dot{U}_{gca} 向量向反时针方向稍向前移，但绝对值有所增大。把这一结果套到图30，其综合结果对相间继电器的动作情况影响不大。当然，当 R_g 继续增大时，相应继电器就不易动作了。

以上考虑的都是稳态动作情况，如果考虑极化回路的记忆作用，则图30中的 AB 相继电器的动态特性将较稳态特性往顺时针方向转一角度，而 CA 相继电器的动态特性将较稳态特性往反时针方向转一角度，都将使继电器易于动作。

(3) 中点附近故障。

着眼于最易动作的情况，只研究金属性接地时继电器 (M_{ab}) 的动作行为，而且考虑 $t = 0$ 时的理想动态特性。把图29中有关继电器 (M_{ab}) 的部分，画在图31中。

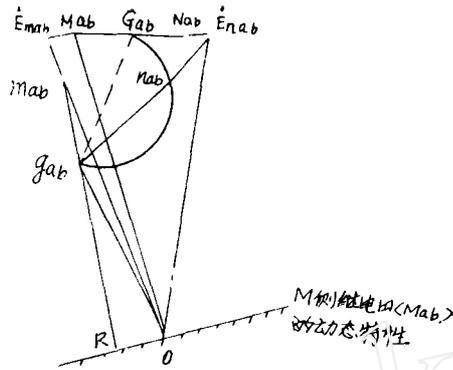


图31 中点附近接地时的AB相间电压向量图

在图31中，延长 $\overline{m_{ab}g_{ab}}$ 交动态特性于 R，则当继电器的整定值 $Z_J \geq \frac{\overline{m_{ab}R}}{\overline{m_{ab}g_{ab}}} Z_{g1}$

时，继电器动作。

由式(20)，当 $R_g = 0$ 时， $|\dot{u}_{gab}| = og_{ab} \approx \dot{U}_\varphi$ ，而 $\overline{OE_{mab}} = \sqrt{3} \dot{u}_\varphi$ ，故由图31可近似计算动作边缘的 Z_J 如下：

$$\frac{\overline{OE_{mab}}}{og_{ab}} \approx \sqrt{3}$$

$$\approx \frac{\overline{E_{mab}R}}{\overline{g_{ab}R}} = \frac{Z_{m1} + Z_J}{Z_J - Z_{g1}}$$

得 $Z_J \approx 1.4 Z_{m1} + 2.4 Z_{g1}$

式 $Z_{g1} \approx 0.42 Z_J - 0.58 Z_{m1}$

六、特殊结线方式的相间方向距离继电器

使用中的特殊结线方式的相间方向距离继电器有如下两种，以AB相为例

$$(1) \dot{u}_{AB}, \dot{u}_{AB} + 2 \dot{I}_B Z_J$$

$$(2) \dot{u}_{AB}, \dot{u}_{AB} - 2 \dot{I}_A Z_J$$

1. 在正常运行情况下， $-\dot{I}_B = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_{AB} e^{j30^\circ}$ ， $\dot{I}_A = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_{AB} e^{j30^\circ}$ 。

这两种继电器在正常运行和三相短路时的距离测量电压分别是，

$$\dot{u}_{AB} - \frac{2}{\sqrt{3}} \dot{I}_{AB} Z_J e^{j30^\circ} \quad \text{及} \quad \dot{u}_{AB} - \frac{2}{\sqrt{3}} \dot{I}_{AB} e^{-j30^\circ}$$

所以有人叫它们是“+30°结线方式”与“-30°结线方式”。

正常运行时的电压向量关系见图32。由图32(a)可见：

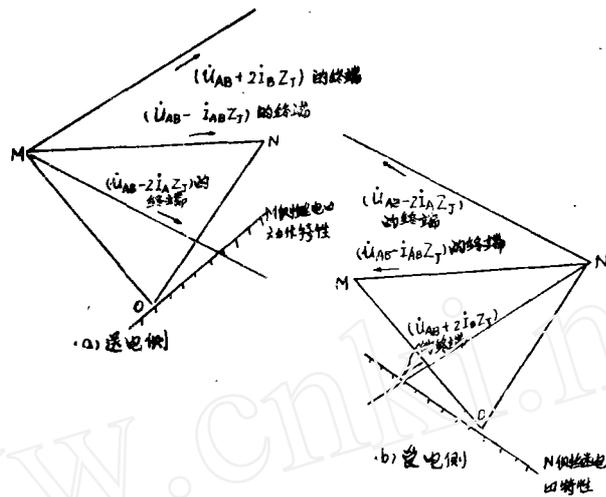


图32 正常运行情况下的电压向量图

送端M侧，以 $\dot{u}_{AB} + 2\dot{I}_B Z_T$ 作距离测量电压的距离继电器躲负荷性能较正常以 $\dot{u}_{AB} - \dot{I}_{AB} Z_T$ 作距离测量电压的继电器好，但若取 $\dot{u}_{AB} - 2\dot{I}_A Z_T$ 作距离测量电压时，反而更糟糕，由图32(b)可见，要提高受端继电器躲负荷的性能，应选用 $\dot{u}_{AB} - 2\dot{I}_A Z_T$ 作距离测量电压，若错选为 $\dot{u}_{AB} + 2\dot{I}_B Z_T$ ，反而更坏。

2. 三相短路情况。

图33是M侧的情况。当电阻短路时，两种继电器的动作情况相差很大，图中标示的是两种继电器具有同一整定值的情况。由图33可以推论，只有当 $R=0$ ，继电器的特性为 $\pm 90^\circ$ 的直线（以极化量为标准）时，这两种继电器才能在三相短路时正确测量距离，但此时若特性边界不是 $\pm 90^\circ$ ，将可能出现超越误差。

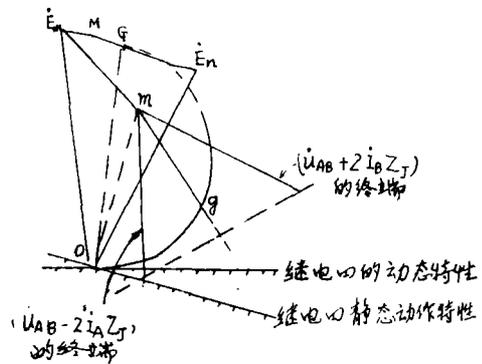


图33 送电侧继电器的动作行为

3. 两相短路情况

研究BC金属短路情况。短路后的

电压向量关系如图34，由于故障前有负荷，产生了一个显著的特点， $\overline{m_{bg}} > \overline{m_{cg}}$ 及 $\overline{n_{cg}} > \overline{n_{bg}}$ ，而在无负荷情况下，它们是各自相等的。

对于继电器 (M_{bc})，假定继电器整定值正好保护到图34的故障点。

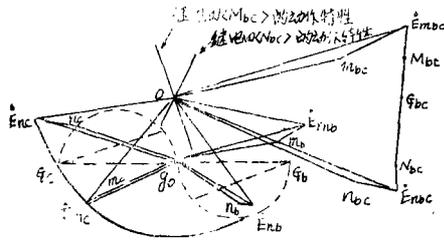


图34 BC两相短路时的电压向量图

则,

$$\overline{om_{bc}} = \overline{m_c g_o} + \overline{g_o m_b} = \dot{I}_{bc} Z_{g1}$$

而 $\overline{m_c g_o} = -\dot{I}_c Z_f$, $\overline{g_o m_b} = \dot{I}_b Z_f$

如果距离继电器采用 $\dot{U}_{bc} - \dot{I}_{bc} Z_f$ 的正常接线方式, 则 $Z_f = Z_{g1}$ 。而今 $2\dot{I}_b Z_f = 2\overline{g_o m_b} > \overline{om_{bc}}$, 同时还略差了一个角度, 故 $\dot{U}_{bc} - 2\dot{I}_b Z_f = \overline{om_{bc}} - 2\overline{g_o m_b}$ 将在 $\overline{om_{bc}}$ 连线 O 侧的延长线上, 相当于继电器的区内故障 $Z_f > Z_{g1}$ 的情况。说明继电器 (M_{bc}) 有超越误差。同理 用 $\dot{U}_{bc} + 2\dot{I}_c Z_f$ 作距离测量电压时, 将缩短保护范围。

对于继电器 (N_{bc}), 由于同样理由, 用 $\dot{U}_{bc} + 2\dot{I}_c Z_f$ 的要发生超越, 用 $\dot{U}_{bc} - 2\dot{I}_b Z_f$ 的要缩短保护范围。

所以这种特殊结线的距离继电器不能用作距离测量元件。

当经电阻短路时, 超越情况有所改善, 但另一方面保护范围缩短得更严重, 这些都不难直接由图34推导出。

七、不带短路的全相振荡 (M 侧例)

图35研究距离继电器在不带短路的全相振荡时的动作情况, 为了反应振荡条件, 把按正序阻抗分配的各点电压向量的终端位置固定不变, 即固定 E_m 、M、N 及 E_n 四点。振荡的情况用变化中性点 O 的位置来表示。当两侧电流电势绝对值之比为一常数, 即 O 点到 E_m 及 E_n 两定点距离之比恒定时, 其轨迹为以 $E_m E_n$ 联线的定比内外分点作直径的圆, 当定比为 1 时, 圆转化为两定点联线的中垂线。

从图35, 距离测量电压 \dot{u}'_m 与非方向距离继电器的极化电压的终端位置也是固定的。变化着的将是极化量的相位, 从而随之而变的是继电器的动作边界线, 当 O 运动到使 \dot{u}'_m 掉入动作区时, 继电器就开始动作。

以 M 侧方向距离继电器为例。继电器的动作区是 $-(180 - \theta) \geq \arg u'_m - \arg u'_m \geq \theta$, 因此继电器动作时所要求的中性点 O 的轨迹在以 $M\mu'_m$ 为弦, 园周角为 θ 的一个园弧上。中性点运动轨迹与这一轨迹的交点 O_2 , 即所欲求的中性点位置。继电器在两侧电势角

大于 $\angle E_m O_2 E_n$ 和小于 $\angle E_m O_2' E_n$ 的范围内动作。同理，可以求得其他继电器在全相振荡时的两侧电源电势摆角范围。这些都在图35中标示着。

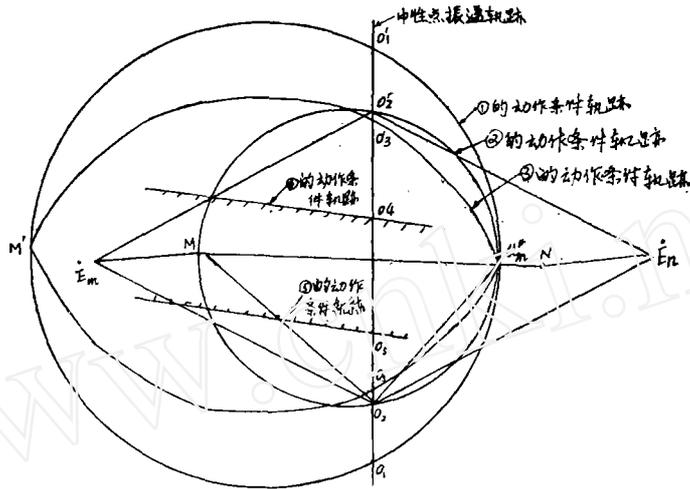
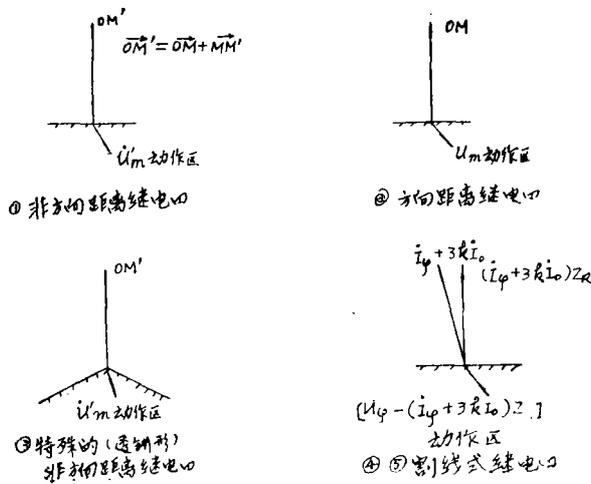


图35 图中表示两侧电源电势角摆开到超过 $\angle E_m O_2 E_n$ 时，继电器②开始动作，到超过 $\angle E_m O_2' E_n$ 时开始不动作。

注：各种继电器动作特性如下



第二节 保护相间短路的多相补偿距离继电器

一、继电器的接线方式及动作条件。

最常用的接线方式是，

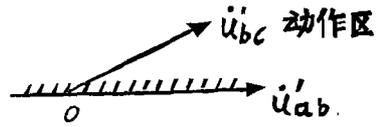
$$\dot{u}'_{ab} = \dot{u}_{ab} - \dot{I}_{ab} Z_f, \quad \dot{u}'_{bc} = \dot{u}_{bc} - \dot{I}_{bc} Z_f$$

动作条件是,

或 $\dot{u}'_a, \dot{u}'_b, \dot{u}'_c$ 按反相序旋转。

边界是 $\dot{u}'_a, \dot{u}'_b, \dot{u}'_c$ 在一直线上。

这种继电器的接线方式不只一种, 只要动作条件一样, 继电器的有关性能也就一样。这种继电器不反应三相短路, 在正常运行情况时也不会动作, 因为在这些情况下 $\dot{u}'_a, \dot{u}'_b, \dot{u}'_c$ 永远为正相序。



二、两相短路

图36 是BC两相短路时的相间电压向量全图, 具体标示的是 $R = 0, Z_f = 2Z_{g1}$ 的情况。

1. 正方向短路:

由图可见, 当 $Z_f > Z_{g1}$ 时, M侧与N侧的继电器都动作; 当 $Z_f = Z_{g1}$, \dot{u}'_{mbc} 及 \dot{u}'_{nbc} 的终端都正好缩到原点, 而 \dot{u}_{mab} 及 \dot{u}'_{nab} 的终端则与 g_{ab} 重合, 这是继电器的边界条件, 而当 $Z_f < Z_{g1}$ 时, \dot{u}'_{nbc} 及 \dot{u}'_{mbc} 的终端将分别在 $\overline{m_{bc}O}$ 线上及 $\overline{n_{bc}O}$ 线上, 而 \dot{u}_{mab} 与 \dot{u}'_{nab} 的终端将分别在 $\overline{m_{ab}g_{ab}}$ 线上及 $\overline{n_{ab}g_{ab}}$ 线上, 继电器不动作。

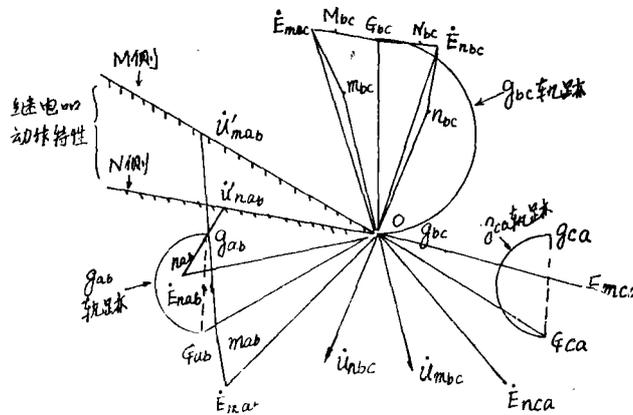


图36 BC两相短路时的相间电压向量图
(标示的是 $R = 0, Z_f = 2Z_{g1}$ 情况)

当AB或CA两相短路时, $\dot{u}'_a, \dot{u}'_b, \dot{u}'_c$ 的顺序与BC两相短路一样, 只要把注脚轮换就得到同图36一样的向量关系。而边界条件总是对应 $g_{ab}, O, g_{bc}, g_{ca}$ 在一直线上。这说明用这样一个继电器可以保护三种两相短路故障, 而且能正确测量距离。

由图36可以推导出, 当经过电阻两相短路时, g_{ab}, g_{bc}, g_{ca} 与O不复在一直线上。

仍以BC相短路为例，当距离测量电压正好补偿到与 g_{ab} ， g_{bc} ， g_{ca} 重合时，即在整定距离处短路，此时的 $\overline{og_{bc}}$ 领前 $\overline{og_{ab}}$ 的相角已大于 180° ，已经离开了动作区，说明这种继电器将因故障电阻而缩短保护范围。受端与送端的情况都如此。

当故障点向母线靠拢时，例如向M母线靠拢，则 m_{bc} 与 m_{ab} 将分别向 g_{bc} 与 g_{ab} 靠拢，
 \longrightarrow
 此时 $ou'_{m_{bc}}$ 除绝对值增长外，其相位变化不大。只要 Z_I 的数值不过大，而且 \dot{E}_m 与 \dot{E}_s
 \longrightarrow \longrightarrow
 的相角差不过大时， $ou'_{m_{ab}}$ 总是稍领前 $OE_{m_{ab}}$ ，仍保持着如图36的关系，因此，这种继电器在出口两相短路时没有死区。

当出口经故障电阻短路时， $\frac{\overline{OE_{m_{bc}}}}{\overline{og_{bc}}} = \frac{Z_{m1}}{K}$ ，在图上同一大小的 $\overline{og_{bc}}$ 代表与 Z_{m1} 成正

比的故障电阻值， Z_{m1} 愈大时， $\overline{og_{bc}}$ 代表的R也愈大。同时 $\frac{\overline{E_{m_{bc}g_{bc}}}}{g_{bc}^2 u_{m_{bc}}} = \frac{\overline{E_{m_{ab}g_{ab}}}}{g_{ab}^2 U'_{m_{ab}}} = \frac{Z_{m1}}{Z_I}$ ，

同一 Z_I 值时， Z_{m1} 愈大。 $\overline{g_{bc}u'_{m_{bc}}}$ 与 $\overline{g_{ab}u'_{m_{ab}}}$ 愈短。只要 $\overline{og_{bc}}$ 不过大；由图可见 $\overline{g_{bc}u'_{m_{bc}}}$
 \longrightarrow \longrightarrow
 和 $\overline{g_{ab}u'_{m_{ab}}}$ 成比例的缩短，将使 $ou'_{m_{bc}}$ 领前（以小于 180° 为标准） $ou'_{m_{ab}}$ 的角度变小。

Z_{m1} 增大造成 $\overline{og_{bc}}$ 代表的R增大和 $ou'_{m_{bc}}$ 相对 $ou'_{m_{ab}}$ 的相位向顺时针方向移动（向动作区移动），说明 Z_{m1} 愈大时，这种继电器在出口附近故障保护故障电阻的效能愈好。

如果 Z_{m1} 为零，相当于无穷大电源，保护出口短路故障电阻的能力为零。以上情况与带记忆作用的方向阻抗继电器的动态特性相似，但这种继电器的性能没有动态稳态的区别，这是这类继电器最突出特点之一。

2. 母线两相短路。

当发生反方向母线两相金属短路时，对于装在M侧的线路保护，图36中的 G_{bc} 就是母线 M_{bc} ，发生故障后，它的各相间距离测量电压 $\dot{u}'_{\varphi\varphi}$ 的向量终端将分别在各相间的 \overline{gn} 线上。由图36可见，此时因 $ou_{m_{bc}}$ （ $\dot{u}'_{m_{bc}}$ 终端在 $\overline{on_{bc}}$ 线上或其 n_{bc} 侧延线上）落后 $ou'_{m_{ab}}$ （ $\dot{u}'_{m_{ab}}$ 终端在 $\overline{g_{ab}n_{ab}}$ 线上或其 n_{ab} 外侧延长线上）的角度必然小于 180° ，所以继电器不动作，对于装在N侧的继电器，此时的 G_{bc} 就是 N_{bc} ，发生故障后 $ou'_{n_{bc}}$ （ $\dot{u}'_{n_{bc}}$ 终端在 $\overline{om_{bc}}$ 线上或其 m_{bc} 外侧延线上）落后 $ou'_{n_{ab}}$ （ $\dot{u}'_{n_{ab}}$ 的终端在 $\overline{g_{ab}m_{ab}}$ 线上或其 m_{ab} 外侧的延长线上）的角度小于 180° ，所以也不动作。就是说，这种继电器对反方向两相短路有明确的方向性。当经电阻短路时，这个结论同样正确。

3. 当正方向经串联电容两相短路时，如图37

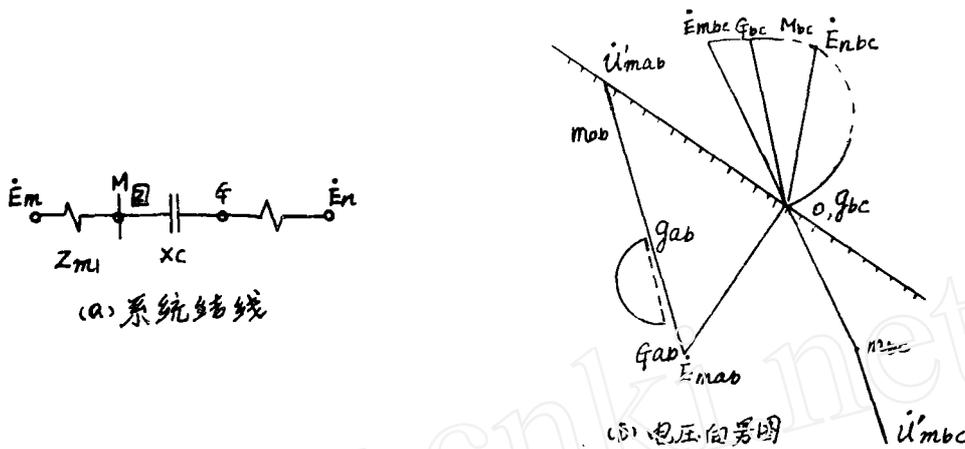


图37 正方向经串联电容两相短路

在出口经串联电容短路时，故障前 G_{bc} 在 \dot{E}_{mbc} 与 M_{bc} 之间，故障后 \dot{E}_{mbc} 与 m_{bc} 分别在 g_{bc} 的异侧，继电器的 \dot{U}'_{mab} 及 \dot{u}'_{mbc} 的终端位置如图37 (b)，故继电器可靠动作。和带记忆作用的方向阻抗继电器的理想动态特性相似。其限制条件也是 $XC < X_{m1}$ 。

4. 当反向经串联电容短路时，仍以M侧为例，如图38。

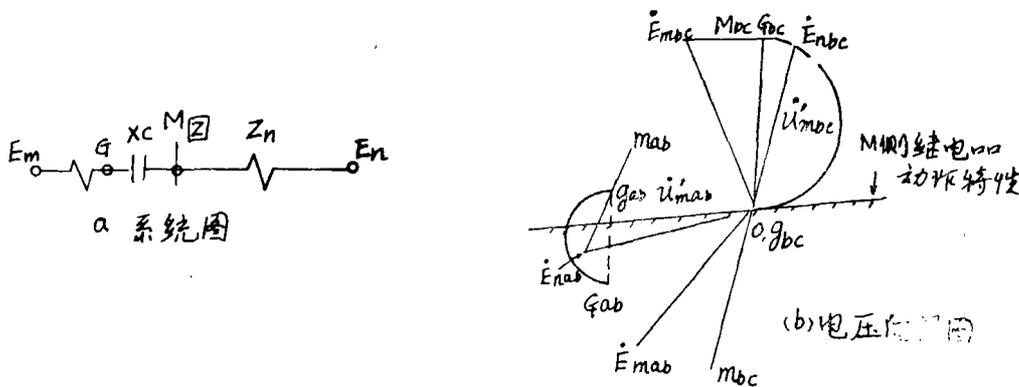


图38 反方向经串联电容短路时的电压向量图

当在G点短路时，G，M与 \dot{E}_n 三点的向量位置关系总是 m 与 \dot{E}_n 处于 g_{bc} 的两侧。当 $Z_n > X_c$ 时， \dot{U}'_m 的终端位置在 g_{bc} 的联线上或在 \dot{E}_n 外侧的延线上，由图可见，继电器不动作，可以保证选择性。但若 $Z_n < X_c$ ， \dot{u}'_m 将在 \overline{mg} 线上，继电器要误动作，又若 $Z_n < X_c$ 时， \dot{E}_n 处于 m 与 g 间时，同样也要失去方向性。

5. 两侧电源电势摆开时发生两相短路。

为说明计，以M侧为例图39表示的 $\dot{\mu}'_{m, bc}$ 及 $\dot{\mu}'_{m, ab}$ 是区内故障的情况，即 $Z_f > Z_{s1}$ 。但由图可见， $ou'_{m, ab}$ 领先 $ou'_{m, bc}$ 小于 180° ，继电器却不能动作，即区内故障拒动。如果其他条件不变，只是减少继电器的整定值 Z_f ，则 $Z'_{m, ab}$ 及 $\dot{U}'_{m, bc}$ 逐渐回缩，继电器动作特性沿原点向反时针方向旋转。当 $Z_f = Z_{s1}$ 时，仍然不动作，继续减少 Z_f ，此时对继电器来说已是区外故障，但只要 $Z_f < Z_{s1}$ ， $ou'_{m, bc}$ 就要倒转方向，使向量关系成为 $ou'_{m, ab}$ 落后 $ou'_{m, bc}$ 小于 180° ，继电器动作，即区外故障误动。当 Z_f 继续减小， $\dot{U}'_{m, ab}$ 跨过 om_{bc} 连线后，继电器的动作特性也同时越过此线，于是 $ou'_{m, bc}$ 又落在动作区外，又恢复了区外故障不动作。由图研究N侧继电器也将发现类似的情况。在两侧电源电势角摆开较大时，区内拒动，区外误动，是这类继电器的另一种重要特点。

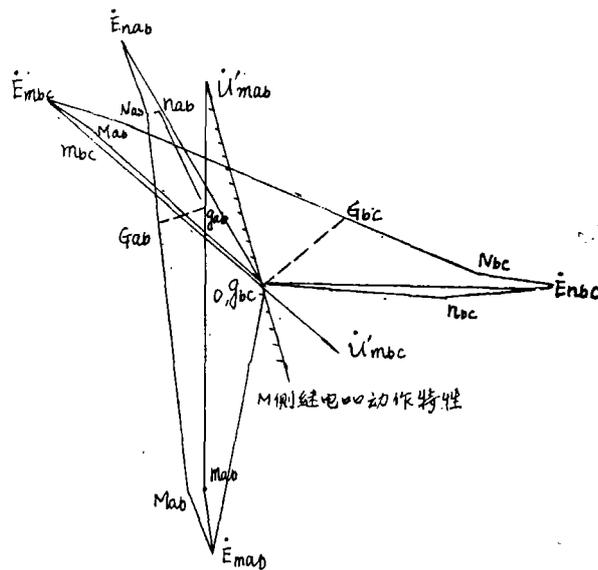


图39 两侧电源电势角摆开时，继电器的不正确动作 $R = 0$ 情况。

只有当继电器的整定距离躲开振荡中心时，才能完全防止这样的拒绝动作和误动作。

6. 单相接地

以无负荷情况下A相单相接地为例说明（其他相单相接地时，继电器的动作行为相同）。电压向量只取BC及AB有关部分。

无负荷正方向单相接地情况的电压向量见图40。

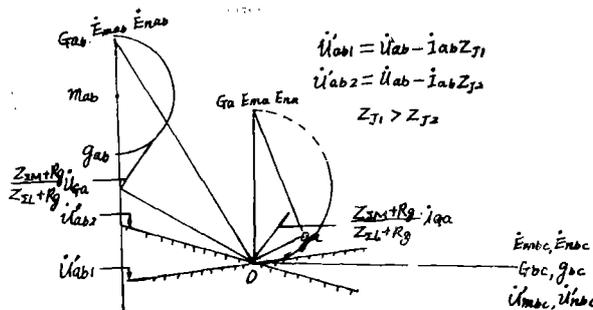


图40 无负荷情况下的相间电压向量图

由图40可见，这种继电器可以保护单相接地故障，由于无负荷，不论故障点在何处，也不论 Z_J 大小如何，此时的 \dot{E}_{mbc} 、 $\dot{E}_{'nbc}$ 、 \dot{G}_{bc} 、 \dot{g}_{bc} 、 \dot{u}'_{mbc} 和 \dot{u}'_{ncb} 的终端都在同一点。当故障点由出口向外移时，或者整定值 Z_J 减小时，图中 \vec{ou}'_{ab1} 向量将由第三象

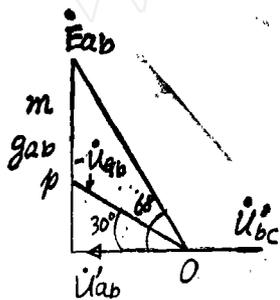


图41 求保护单相接地范

围(无负荷情况)

限向顺时针方向旋转，故当故障点移至使 ou'_{ab2} 超过水平轴时，继电器不动作。但这时的 \dot{U}'_{ab} 终端还在 $\overline{m_{ab}g_{ab}}$ 联线 g_b^0 的外侧，即故障点仍在整定的保护范围内。就是说。这种继电器在单相接地时要缩短保护范围，但对于出口附近的单相接地能够动作。在无负荷情况下，可以保护的金属性单相接地范围可由图40求得，并改画在图41中。

$$\begin{aligned} & (Z_{m1} + Z_{J3}) : (Z_{m1} + Z_{g1}) \\ &= \frac{E_{ab} u'_{ab}}{E_{ab} g_{ab}} \\ &= 1.5 \dot{u}_{ca} : \left(1 - \frac{Z_{\Sigma M}}{Z_{\Sigma L}}\right) \dot{u}_{ca} \end{aligned}$$

$$\therefore Z_J = \frac{1.5 Z_{\Sigma L}}{Z_{\Sigma L} - Z_{\Sigma M}} (m_1 + Z_{g1}) - Z_{m1}$$

但 $Z_{\Sigma L}$ 及 $Z_{\Sigma M}$ 都是故障点位置的函数，式中的 $Z_{\Sigma L}$ 及 $Z_{\Sigma M}$ 是适在此时的故障点所得的值。

由图40可见，当故障点经电阻时，向量 og_{ab} 向顺时针方向旋转，使同一故障点时的 \vec{ou}'_{ab} 向量也向顺时针方向旋转，使继电器的保护范围更为缩短。

在送负荷时的情况与上述的情况相类似。

同时，这种继电器对反方向的单相接地故障有明确的方向性，不详述。

对于这种故障，当两侧电源电势角摆开时，这种继电器同样存在区内拒动区外误动的情况。

7. 两相短路接地

以A相为例,

$$\dot{u}'_a = \dot{u}_a - (\dot{I}_a + 3R \dot{I}_0) Z,$$

一般极化回路都带记忆作用, 有的还附加了非故障相电压作极化量。研究如下两种极化量,

①: $\dot{u}'_j = \dot{u}_a$; ②: $\dot{u}'_j = \dot{u}_a - j0.25\dot{U}_c$ 。在本节的讨论中, 前一种叫继电器①, 后者叫继电器②。

二、单相接地故障:

1. 单相接地时, 故障相的动作行为。

在正方向发生单相金属接地时, 这种继电器可以正确测量。当经过电阻接地时, 受端继电器缩短的保护范围较送端继电器严重, 同时当在受端母线单相经电阻接地时, 继电器①将失去方向性, 这些都和相间方向距离继电器在三相故障时的情况一样。

由于继电器②增加了附加的非故障相电压, 增强了正方向保护接地电阻的能力, 消除出口死区, 也防止了受端母线单相接地时的误动作, 用图43予以说明。

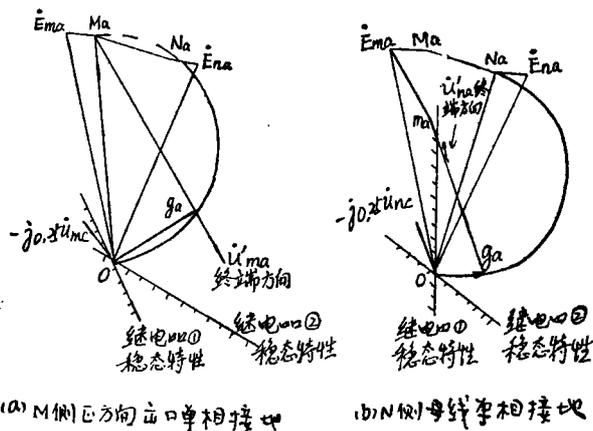
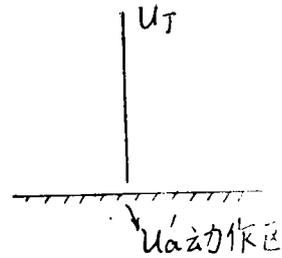


图43 说明附加非故障相极化电压的效果

由图43可见, 非故障相电压的作用是使继电器动作特性向反时针方向旋转了很大一个角度, 故障相残压愈低, 旋转角度愈大。而动作特性作这样的转动, 恰是改善在单相接地时的保护性能所需要的。

2. 单相接地时, 非故障相的动作行为。

这种接地方向距离继电器普遍用作选相元件, 但当用于长线路, 而两侧电源电势摆角又较大时, 有可能失去选择性。

当在M侧出口发生单相接地时, 此时的故障点电压就是M的母线电压, 参照图7可得图44。

$$\vec{g}_b M_b = \vec{g}_c M_c^{fg} = \frac{Z_{c \rightarrow M}}{Z_{\Sigma L}} \vec{g}_a M_a$$

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_{mb} &= \dot{O}g_b = \dot{O}M_b + M_b \dot{g}_b = \dot{O}M_b + \frac{Z_{\Sigma M}}{Z_{\Sigma L}} M_a g_a \\
 \dot{E}_{mb} g_b &= -(\dot{I}_{mb} + 3k_m \dot{I}_{m0}) Z_{m1} \\
 &= \dot{E}_{mb} M_b + M_b \dot{g}_b = \dot{E}_{mb} M_b + \frac{Z_{\Sigma M}}{Z_{\Sigma L}} M_a g_a \\
 \dot{O}U'_{mb} &= \dot{U}_{mb} - (\dot{I}_{mb} + 3k_m \dot{I}_{m0}) Z_I \\
 &= \dot{U}_{mb} + \left[-(\dot{I}_{mb} + 3k_m \dot{I}_{m0}) Z_{m1} - (k - k_m) 3 \dot{I}_{m0} Z_{m1} \right] \frac{Z_I}{Z_{m1}} \\
 &= \dot{O}M_b + \left\{ \dot{E}_{mb} M_b + \left[\left(1 + \frac{Z_{m1}}{Z_I}\right) \frac{Z_{\Sigma M}}{Z_{\Sigma L}} + k_{m0} (k - k_m) \right] \frac{Z_{m1}}{Z_{\Sigma L}} \right\} \frac{Z_I}{Z_{m1}}
 \end{aligned}$$

同理,

$$\begin{aligned}
 \dot{O}U'_{mc} &= \dot{O}M_c + \left\{ \dot{E}_{mc} M_c + \left[\left(1 + \frac{Z_{m1}}{Z_I}\right) \frac{Z_{\Sigma M}}{Z_{\Sigma L}} + k_{m0} (k - k_m) \right] \frac{Z_{m1}}{Z_{\Sigma L}} \right\} \frac{Z_I}{Z_{m1}}
 \end{aligned}$$

图44的系统参数是,

$$\begin{aligned}
 Z_{m1} &= Z_{n1} = j0.05, & Z_{m0} &= Z_{n0} = j0.04, \\
 Z_{\Sigma 1} &= 0.2/80^\circ, & Z_{\Sigma 0} &= 3Z_{\Sigma 1}, \\
 Z_{\Sigma L} &= 0.0403/88.6^\circ, & Z_{\Sigma M} &= -j0.00\beta, \quad k_{m0} = 0.943
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{O}U'_{mb} &= \dot{U}_{mb} + \left[\dot{E}_{mb} M_b + 0.83 M_a g_a \right] \frac{Z_I}{Z_{m1}} \\
 \dot{O}U'_{mc} &= \dot{U}_{mc} + \left[\dot{E}_{mc} M_c + 0.83 M_a g_a \right] \frac{Z_I}{Z_{m1}}
 \end{aligned}$$

在图44中, 取 $Z_I = 0.3/80^\circ$ 时 $\frac{Z_I}{Z_{m1}} = 6.0/-10^\circ$, 画出了B相与C相接地方向距离

继电器的距离测量电压 $\dot{O}U'_{mb}$ 及 $\dot{O}U'_{mc}$ 的轨迹及相应的继电器动作特性。

由图可见以下各点:

1) 继电器②较继电器①易于躲开C相的误选相, 而对于B相, 这两种继电器的情况正好和C相的情况相反。

2) 对于B相, 最易误动作的条件是 $R_g = 0$ 时, 而对于C相, 最易误动作的条件是在某一电阻值附近时, 并可由图44估算这个数值。

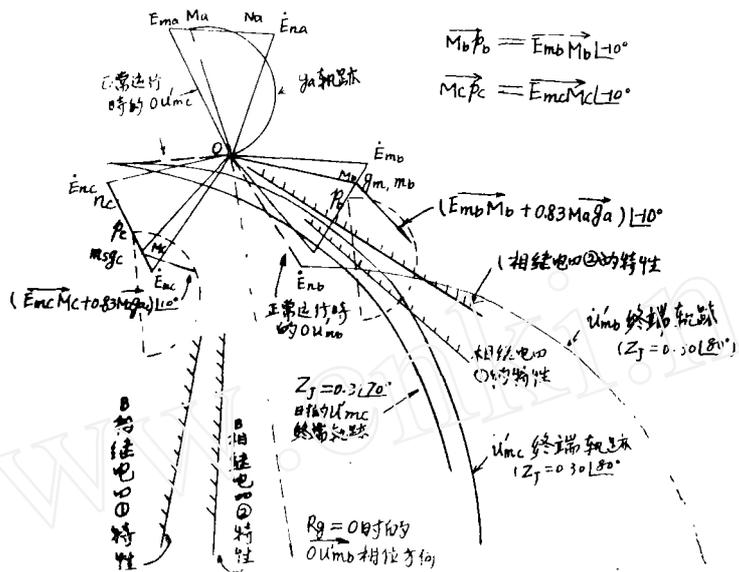


图44 M侧出口A相接地时非故障相选相元件的动作行为分析图

$$\angle E_m O E_n = 45^\circ$$

3) 若 $\arg Z_f \neq \arg Z_{c1}$ 。在同一值下,就B相和C相的选相性能来说,对一个有利,对另一个不利。当 $\arg Z_f < \arg Z_{c1}$ 时,有利于C相正确选相,而不利于B相;当 $\arg Z_f > \arg Z_{c1}$ 时,则有利于B相而不利于C相。这一结论,可由 $\frac{Z_f}{Z_{m1}} = \left| \frac{Z_f}{Z_{m1}} \right| \angle \arg Z_f - \arg Z_{m1}$ 的关系导出。为了举例,在图44中画了 $\arg Z_f = 70^\circ$ 时的 ou'_{mc} 终端轨迹以资说明。

4) 当 Z_f 过大或 $\angle E_m O E_n$ 再增大时, \dot{U}'_{mc} 的终端轨迹将以 M_c 为轴心,把原点 O 包在园内。此时,当 R_g 变化时, OU'_{mc} 变化的相位接近 270° 。因此实际任何动作范围 (不小于 $120^\circ \sim 150^\circ$) 的距离继电器都要误选相。

分析说明,受端N侧出口单相接地时,若继电器是标准特性,非故障相C相的选相性能较送端稍好。例如,当 $\angle E_m O E_n = 60^\circ$, $Z_f = 0.3 | 80^\circ$ 时, M侧的C相继电器已不可避免要误选相,而在同一条件下,受端的C相继电器②尚能有选择性, B相也有较好的选择性。

三、正方向两相短路接地故障。

图45是BC两相短路接地时, B相与C相继电器①与②的动作行为分析图。

对于C相, 因为 \dot{u}'_{nc} 的终端位于以 g_c 轨迹圆的两侧。但其继电器①的特性与B相相同, 不会误动作。继电器②中附加非故障相电压量不能过小, 应该考虑 R_g 增大到使 g_b 位于圆弧 $\widehat{og_c}$ 中点时的情况。此时B相的残余电压垂直于 $\overline{og_c}$ 的分量约为 $\frac{1}{2} |\overline{og_c}|$ (在母线短路时, $\widehat{og_c}$ 基本是一个半圆), 但 $|\overline{og_c}| = \frac{1}{2} \dot{U}_c$ 。 $-j\dot{U}_{nc}$ 垂直于 $\overline{og_c}$ 。因而附加的a相电压绝对值应约为25%才能保证 OU'_{nb} 在继电器②的动作特性外, 如图47。

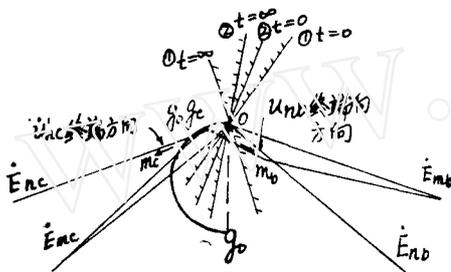


图46 受端母线两相短路接地时的电压向量图

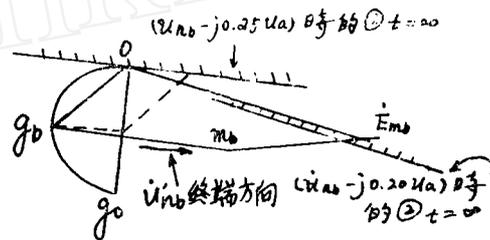


图47 继电器②中非故障相电压量大小的影响

由图47也可以发现, 当 $\arg Z_1 < \arg Z_{c1}$ 时, 也有利于躲这样的反方向误动作。

五、两相短路。

在正方向两相短路时, 这种继电器具有一定的保护能力, 但保护范围缩短。

在送端母线两相短路时, 如果 Z_1 较大, 送电角也较大时 (例如长线路用高频闭锁距离保护方式), 落后相可能失去方向性。以上两种情况, 统一用图48说明 $R_g = \infty$ 就是金属性两相短路。M母线故障, 对N侧保护为正方向故障, 这一受端继电器的例子说明C相缩短的范围不大, B相缩短范围较严重。附加非故障相极化量使保护范围更为缩短。

对于M侧继电器, 这是反方向故障。母线残余电压为 $\overline{og_b}$, $\overline{og_c}$ 由图可见, 如果 Z_1 较大, 或 $\angle E_m E_n$ 更大时, M侧C相继电器都会失去方向性, 但是记忆作用将延迟这一误动作的到来。继电器②较①稍好。

由图48也可以发现, 只要 R_g 不是无穷大, 则M侧的残余电压要向顺时针方向转一角度, R_g 愈小, M侧C相继电器愈不易误动作, 而只有当 R_g 大到相当数值后, 即当通入继电器的 $3I_0$ 相当小时, 这种反方向误动作才会出现。

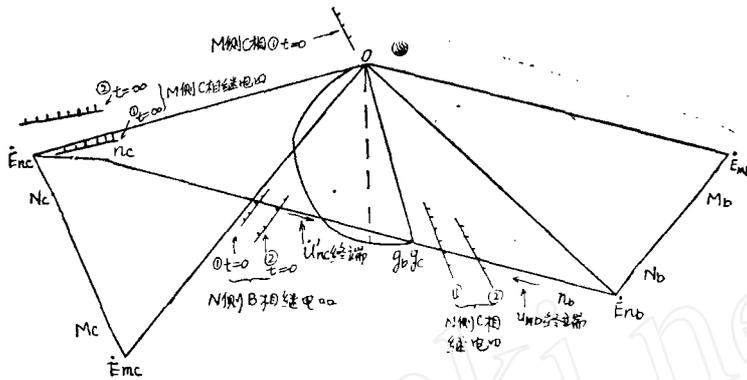


图48 送端M母线BC两相短路时的电压向量图

第四节 其他的例子

为了进一步说明这种计算分析法的具体运用，再举出稍为特殊的某些接地距离继电器的个别动作行为为例，予以说明。

一、接地方向距离继电器之二。

这种接地方向距离继电器的动作原理是，

$$|\dot{V}_{W_0}| \geq |\dot{V}_{XN}|, |\dot{V}_{YN}| \text{ 或 } |\dot{V}_{ZN}| \text{ 三者中的最小者。}$$

其中：

$$|\dot{V}_{W_0}| = \dot{U}_0 - \dot{I}_0 \frac{Z_{l_0}}{Z_{l_1}} Z_f$$

$$|\dot{V}_{XN}| = (\dot{V}_{a_1} + \dot{V}_{a_2}) - (\dot{I}_{a_1} + \dot{I}_{a_2}) Z_f$$

$$|\dot{V}_{YN}| = (\dot{V}_{b_1} + \dot{V}_{b_2}) - (\dot{I}_{b_1} + \dot{I}_{b_2}) Z_f$$

$$|\dot{V}_{ZN}| = (\dot{V}_{c_1} + \dot{V}_{c_2}) - (\dot{I}_{c_1} + \dot{I}_{c_2}) Z_f$$

一般地说， $|\dot{V}_{XN}|$ 、 $|\dot{V}_{YN}|$ 与 $|\dot{V}_{ZN}|$ 三个量中，基本以故障相的那个量为最小，所以当A相接地时动作方程是，

$$|\dot{U}_0 - \dot{I}_0 \frac{Z_{l_0}}{Z_{l_1}} Z_f| \geq |(\dot{V}_{a_1} + \dot{V}_{a_2}) - (\dot{I}_{a_1} + \dot{I}_{a_2}) Z_f|$$

其相位等价动作特性是：

$$\arg(\dot{V}_{W_0} + \dot{V}_{XN}) - \arg(\dot{V}_{XN} - \dot{V}_{W_0}) = \pm 90^\circ$$

但，

$$\begin{aligned} \dot{V}_{W_0} + \dot{V}_{XN} &= \dot{U}_{a_1} + \dot{U}_{a_2} + \dot{U}_{a_0} - (\dot{I}_{a_1} + \dot{I}_{a_2} + \frac{Z_{l_0}}{Z_{l_1}} \dot{I}_{a_0}) Z_f \\ &= \dot{U}_a - (\dot{I}_a + 3k \dot{I}_0) Z_f = \dot{U}'_a \end{aligned}$$

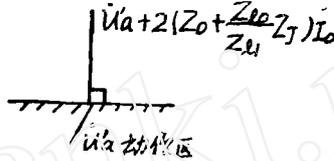
$$\dot{V}_{XN} - \dot{V}_{W0} = \dot{U}'_a - 2 \left(\dot{U}_0 - \dot{I}_0 \frac{Z_{10}}{Z_{11}} Z_I \right)$$

对应计算系统图 4，则两侧的 $(V_{XN} - V_{W0})$ 值为

$$(\dot{V}_{XN} - \dot{V}_{W0})_M = \dot{U}'_{m0} + 2 \left(Z_{m0} + \frac{Z_{10}}{Z_{11}} Z_I \right) \dot{I}_{m0}$$

$$(\dot{V}_{XN} - \dot{V}_{W0})_N = \dot{U}'_{n0} + 2 \left(Z_{n0} + \frac{Z_{10}}{Z_{11}} Z_I \right) \dot{I}_{n0}$$

动作特性相位关系是：



一般的接地距离继电器在正方向两相短路接地时，如果经过相电阻，总是使保护范围缩短，但这种继电器恰好在这种情况下发生超越。见图 49。

图 49 的系统参数是 $\angle E_m O E_n = 0$ ， $E_m = E_n = 1$ 。

$$Z_{m1} = Z_{n1} = j0.05, Z_{m0} = Z_{n0} = j0.04, Z_{111} = 0.2/80^\circ, Z_{103} = 3Z_{111}$$

当在 N 侧母线 BC 两相短路接地时，另序分流系数 $K_{m0} = 0.059/8.8^\circ$ 。

$$Z_{\Sigma L} = 0.0403/88.6^\circ, Z_{\Sigma M} = -j0.0013,$$

基于这种继电器的动作特点，在 BC 两相短路接地故障时，首先应决定通入的制动量是 \dot{U}_{YN} 或 \dot{U}_{ZN} 。当 $Z_I = Z_{11}$ 时， \dot{U}'_{mb} 与 g_b 重合， \dot{U}'_{mc} 与 g_c 重合，

$$\begin{aligned} \dot{U}_{YN} &= \dot{U}'_{mb} - \left(\dot{U}_{m0} - \dot{I}_{m0} \frac{Z_{10}}{Z_{11}} Z_I \right) \\ &= \dot{U}'_{mb} + \frac{1}{3} K_{m0} \frac{Z_{m0} + \frac{Z_{10}}{Z_{11}} Z_I}{\frac{1}{2} (Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M})} g_{g0} = \dot{U}'_{mb} + 0.655 g_{g0} \\ \dot{U}_{ZN} &= \dot{U}'_{mc} + \frac{1}{3} K_{m0} \frac{Z_{m0} + \frac{Z_{10}}{Z_{11}} Z_I}{\frac{1}{2} (Z_{\Sigma L} + Z_{\Sigma M})} g_{g0} = \dot{U}'_{mc} + 0.655 g_{g0} \end{aligned}$$

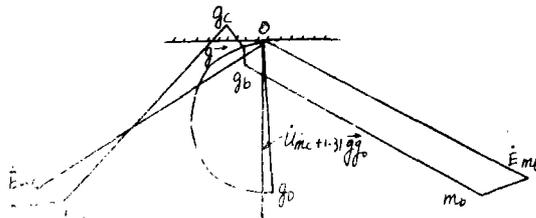


图 49 BC 两相短路接地时的电压向量图。

由图49可见，在 \vec{OU}'_{mb} 与 \vec{OU}'_{mc} 分别与 $0.655 ggo$ 相加而得 \vec{U}_{YN} 及 \vec{U}_{ZN} 时，显然以 $|\vec{U}_{ZN}|$ 较小。故通入继电器的制动量是 \vec{U}_{ZN} ，通入继电器的等价极化量是 $(\vec{U}'_{mc} + 1.31 ggo)$ ，从而求得动作特性如图。由图可见， g_c ($Z_I = Z_{II}$ 时即为 \vec{U}'_{mc}) 已落入动作区，即继电器有超越。

为了躲开这样的超越，当两相短路接地时，应将此继电器停用或恰当的自动缩短整定值。

二、几种接地距离继电器在单相接地时的性能比较。

把下列几种接地距离继电器在单相接地时的保护性能相比较，各距离继电器的特性如下：

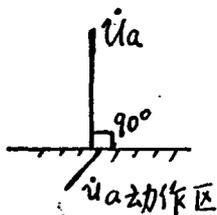
① 接地方向距离继电器：

$$\vec{U}_{Ia} = -(\vec{U}_b + \vec{U}_c) + n \dot{u}_a, \quad n < \angle 1$$

② 接地方向距离继电器：

$$\vec{U}_{Ia} = \vec{U}_b e^{j150^\circ} + \vec{U}_c e^{-j150^\circ} + n \dot{u}_a$$

$$n < \angle 1$$

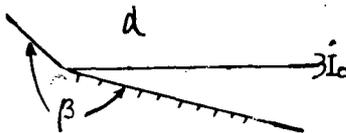


③ 接地方向距离继电器：

$$\vec{U}_{Ia} = \vec{U}_a$$

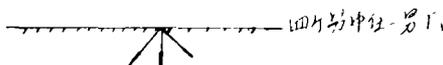
④ $3I_0$ 极化接地方向距离继电器：

$\vec{U}'_a, \vec{U}'_b, \vec{U}'_c$ 三者均在此同一区动作。

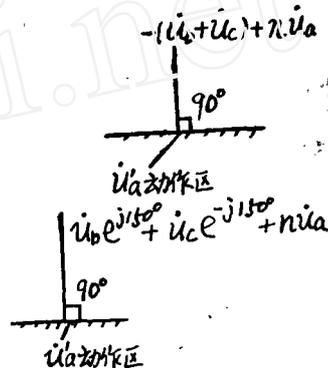


⑤ 多相补偿接地距离继电器：

$\vec{U}'_a, \vec{U}'_b, \vec{U}'_c, 3I_0 / \underline{\delta}$ 在一半平面内动作。



其他三个量在此同一区内动作



⑥ 非方向接地距离继电器:

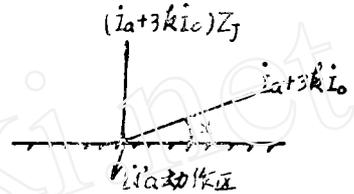
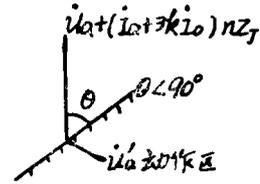
$$\dot{U}_{r,a} = \dot{U}_a + (\dot{I}_a + 3k\dot{I}_o) n Z_T$$

⑦ 接地距离继电器:

由两部份组成,

⑦-1, $\dot{U}_{r,a} = (\dot{I}_a + 3k\dot{I}_o) Z_T$

⑦-2, 专用的R轴保护限制



⑧ 本节前半部份所述的那种接地距离继电器。

以上几种距离继电器中, ③⑥⑦三种在阻抗平面上有固定的动作特性, 为了与旧的概念对比, 绘于图50。其中⑦-2在阻抗平面上也没有固定特性。其工作量为 $\dot{U}_a - \dot{I}_a Z_R$
 $= \dot{U}'_a + K_o \cdot 3 \dot{I}_o \cdot k Z_R$, 其极化量为 $\dot{I}_a Z_R$
 $= (\dot{I}_a + 3k \dot{I}_o) Z_R - k_o \cdot 3 \dot{I}_o \cdot k Z_R$

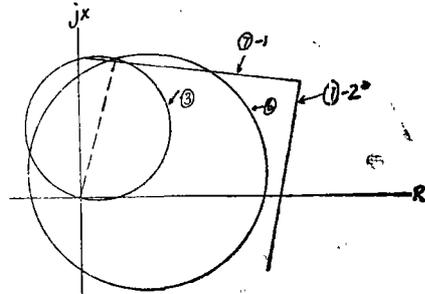


图50 几种接地距离继电器的阻抗动作特性

为了便于比较, 选择同样的系统条件和整定值。

系统接线如图4, 各阻抗标么值如下:

$$E_m = 1.1, E_n = 1.0, \angle E_m O E_n = 35^\circ$$

$$Z_{m1} = Z_{n1} = j0.05, Z_{m0} = Z_{n0} = j0.04,$$

$$Z_{l1} = 0.2 / 80^\circ, Z_{l0} = 3 Z_{l1}, Z_f = 0.17 / 80^\circ, \text{在线路中点短路。}$$

继电器的其他整定值如下:

①、②: $n = 0.05$; ④: $\alpha = 10^\circ, \beta = 200^\circ$; ⑤ $\delta = 10^\circ$;

⑥: $\theta = 60^\circ, n = 0.5$ 。

⑦-1, $\alpha = 6^\circ$ ⑦-2: 按躲最大负荷整定 $Z_R = 0.3 / 0^\circ$

制作图51时, 已经考虑了零序分流系数等的影响在内, 在所述短路情况下, 两侧零序电流都与故障点零序电流同相。

由图51可得如下结论:

(1) 继电器⑦-1, 即一般所谓的电抗型距离继电器, 在双电源情况下的性能不

