

不受接地电阻影响的接地距离继电器

南京电力学校继电保护组 许正亚

在零序电流过零瞬间，本文以比较相补偿电压和相极化电压极性的方法，构成的分相式接地距离继电器，具有良好的保护单相接地故障的性能，保护区稳定且不受接地电阻和负荷电流的影响。若在短线路上使用时，可解决短线路接地保护中所遇到的困难问题。

一、问题的提出

高压电力线路的故障中，单相接地故障次数最多，约占总故障次数的90%左右。但就目前用于接地保护的电网零序电流和阻抗型接地保护来说，遇到的主要困难是保护区受电网运行方式、变压器中性点接地方式的变化和故障点的接地电阻（包括弧光电阻在内，下同）的影响较大，致使保护区出现伸、缩现象，可能失去选择性，严重时失去保护作用。特别是较短的线路，因本身线路阻抗小，问题更突出。因此，正确解决好电网的接地保护，具有十分重要的现实意义。

对接地阻抗继电器来说，影响的主要因素是故障点的接地电阻（还有负荷电流）。而接地电阻在一般情况下的变化范围是很广的，从零点几欧到数十欧。

先简要分析接地电阻的影响。

作为传统式的接地阻抗继电器，引入的电压是母线相电压，引入的电流是带零序电流补偿的被保护线路电流。这种形式的接地阻抗继电器，如作为阻抗测量元件，接地电阻的影响将使测量阻抗增大或缩小，从而造成保护区的不稳定，严重时将造成不正确动作。

设在图1的D点A相发生了经接地电阻 R_{gd} 的故障，则装设在M侧的A相接地阻抗继电器测量到的阻抗为：

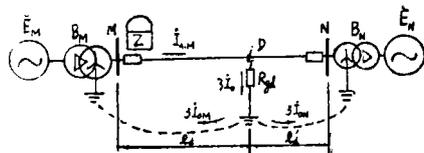


图1 双电源电力系统

$$Z_{CL(A)} = \frac{\dot{U}_{MA}}{I_{AM} + 3KI_{0M}} = Z_1 l_d + \Delta Z_A \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{而 } \Delta Z_A = \frac{3\dot{I}_0}{I_{AM} + 3KI_{0M}} \times R_{gd} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中 K —零序电流补偿系数， $K = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_0}$

Z_1 、 Z_0 —被保护线路单位长度的正序、零序阻抗。

由(1)、(2)式可见,测量阻抗除由故障点位置决定的正序阻抗 $Z_1 l_d$ 外,还存在附加测量阻抗 ΔZ_A ; ΔZ_A 和 R_{gd} 有关,分析表明,继电器处送电侧时,附加测量阻抗 ΔZ_A 呈容性,继电器处受电侧时, ΔZ_A 呈感性。图2示出了A相接地故障时故障相继电器的测量阻抗,其中 $Z_{CL(A)1}$ 为保护区末端附近故障时的测量阻抗, $Z_{CL(A)2}$ 为线路正向出口附近故障时的测量阻抗。由图可见,对于保护区末端附近的单相接地故障,由于 ΔZ_A 的影响,使送电侧继电器测量阻抗减小,从而有超范围动作的可能性,严重时将发生非选择性动作;同样由于 ΔZ_A 的影响,使受电侧继电器测量阻抗增大,保护区缩短,从而降低了继电器的动作灵敏度。上述这两种情况,当N侧电源容量愈大时,影响也愈显著。对于线路出口附近的单相接地故障,因 $Z_{CL(A)2} \approx \Delta Z_A$,送电侧继电器测到阻抗呈容性,有可能造成拒动。

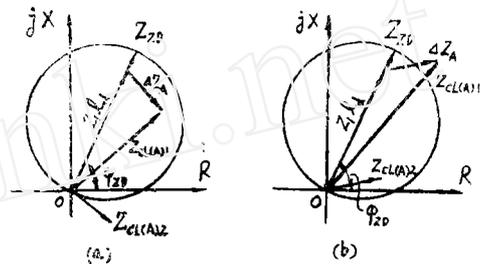


图2 A相经 R_{gd} 接地故障时的测量阻抗 (a)继电器处送电侧; (b)继电器处受电侧

再看图1 D点BC两相经接地电阻 R_{gd} 的故障,为容易得到结论,假设N侧没有电源,即单电源线路的情况,比时装设在M侧的故障相阻抗继电器的测量阻抗分别为

$$Z_{CL(B)} = \frac{\dot{U}_B}{\dot{I}_B + 3KI_0} = Z_1 l_d + \Delta Z_B \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$Z_{CL(C)} = \frac{\dot{U}_C}{\dot{I}_C + 3KI_0} = Z_1 l_d + \Delta Z_C \quad \dots\dots\dots(4)$$

而 $\Delta Z_B = \frac{3\dot{I}_0}{\dot{I}_B + 3KI_0} \times R_{gd} \quad \dots\dots\dots(5)$

$$\Delta Z_C = \frac{3\dot{I}_0}{\dot{I}_C + 3KI_0} \times R_{gd} \quad \dots\dots\dots(6)$$

根据故障电流分析,作出电流间向量关系如图3(a)所示,当 R_{gd} 由零变化到无穷大时,电流向量 \dot{I}_{A1} 、 \dot{I}_0 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C 端点的变化轨迹如图中的半圆所示。由图可见, $\dot{I}_B + 3KI_0$ 超前 $3\dot{I}_0 R_{gd}$,所以附加测量阻抗 ΔZ_B 为容性;而 $\dot{I}_C + 3KI_0$ 落后 $3\dot{I}_0 R_{gd}$,所以附加测量阻抗 ΔZ_C 为感性。根据(3)~(6)式,作出测量阻抗如图3(b)所示。由图可见,由于 R_{gd} 的存在,即使在单电源的情况下,使超前相(两故障相比较)测量阻抗减小,滞后相测量阻抗增大。这样,当在保护区末端附近故障时,滞后相动作灵敏度将降低,超前相动作区将有所伸长;当在线路出口附近故障时,超前相测量阻抗呈容性,造成故障不能快速切除。上述情况,N侧存在电源且容量愈大时,情况愈加严重。

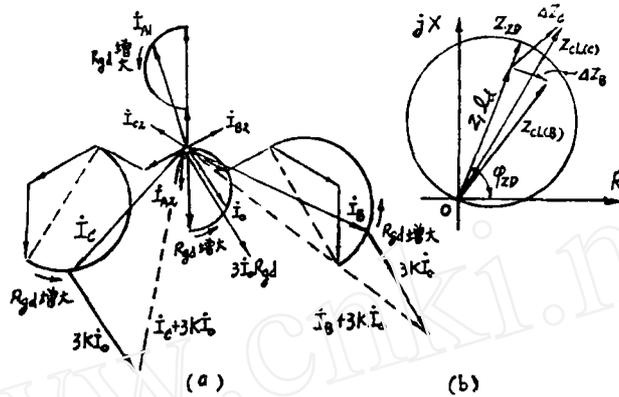


图3 BC两相经 R_{gd} 接地故障时的电流向量和继电器测量阻抗
(a)电流向量; (b)测量阻抗

在设置综合自动重合闸的线路上，假若上述型式的接地阻抗继电器作为选相元件，则当线路一侧经接地电阻发生单相接地故障时，由于接地电阻的影响，两侧选相元件可能出现纵续动作，在此期间，动作了的相差动高频保护的比相元件可能返回，造成比相元件和选相元件动作上的不协调，从而使保护接线复杂或延迟故障的切除。当线路的一侧发生两相经接地电阻的故障时，由于一侧的两个选相元件可能相继动作，也造成重合闸回路接线的复杂性。

另外，分析表明，当线路出口单相接地故障时，因负荷电流和非故障相中零序电流的影响，非故障相的阻抗选相元件有可能误动作，反向出口经接地电阻故障时，也有误动作的可能性。

综上所述，接地电阻对接地阻抗继电器的影响可归纳如下：

1. 单相接地故障时，送电侧继电器保护区将伸长，严重时引起非选择性动作，受电侧继电器保护区将缩短，降低动作灵敏性，送电侧出口附近故障时，有拒动可能性。
2. 两相接地故障时，超前相继电器保护区伸长，滞后相继电器保护区缩短。
3. 反向出口故障时，有误动作可能性。
4. 如作为选相元件，将有可能出现与相差动高频保护的比相元件工作不协调的问题。
5. 在双电源线路上，由于附加测量阻抗不是纯电阻，采用电抗继电器，其保护区仍是不稳定的。
6. 在较短的线路上，由于附加测量阻抗和线路阻抗可相比较，致使接地阻抗继电器的正确运行遇到很大的困难（注意，在这种较短线路上，零序电流保护也不能发挥作用），有时将失去保护作用。

因此，寻求保护区不受接地电阻和负荷电流影响的接地距离继电器，具有重要的现实意义。

二、新型接地距离继电器构成原理

在图 1 中, 设 D 点 A 相发生了经接地电阻 R_{gd} 的接地故障, 则有以下几个特点:

接地电阻 R_{gd} 是客观存在的, 而且变化范围可能很大;

R_{gd} 中的电流仅是零序电流 $3I_0$, 正序、负序分量电流不通过 R_{gd} ;

故障点 D 的位置是不能预测的, 变化是无规律的, 因此想用保护安装处电气量的变化来反应 R_{gd} 的大小在原理上是行不通的;

根据(2)、(5)、(6)式, 附加测量阻抗均与 $3I_0$ 有关, 因此一般的阻抗型接地继电器都无法避免受 R_{gd} 的影响。

根据以上几个特点, 要正确测量接地故障点的距离, 继电器必须要不反应 $3I_0 R_{gd}$, 而在接地故障时, $3I_0$ 和 R_{gd} 是必然存在的。显而易见, 继电器在测量接地故障点的距离时, 应在 $3I_0$ 过零瞬间测量, 这样可免受 R_{gd} 的影响。但是, 要做到这一点, 第一个问题是 I_0 的过零瞬间如何获得? 假若 I_0 过零瞬间获得后, 继电器又将如何构成? 也即在 I_0 过零瞬间如何正确测量接地故障点的距离, 这是第二个问题。当然, 上述两个问题解决后, 继电器就能正确测量接地故障点的距离, 而不受 R_{gd} 的影响。

(一) 第一个问题, I_0 过零瞬间的获得。

在图 1 的 D 点 A 相经 R_{gd} 接地故障时, 复合序网如图 4 所示。图中 Z_1 、 Z_2 、 Z_0 为输电线路单位长度的正序、负序、零序阻抗, 其中 Z_0 包括零序电流在地中流动时的阻抗值; Z_{M1} 、 Z_{M2} 、 Z_{M0} 为母线 M 左侧的等值正序、负序、零序阻抗; Z_{N1} 、 Z_{N2} 、 Z_{N0} 为母线 N 右侧的等值正序、负序、零序阻抗; E_{MA} 、 E_{NA} 为母线 M 、 N 侧的等值 A 相电势。

由图 4 可见, 保护安装处 (M 侧) 的零序电流 I_{0M} 和故障点的零序电流 I_0 的相互关系, 仅和零序网络、故障点位置有关, 其关系式为:

$$I_{0M} = I_0 \times \frac{Z_0 l'_d + Z_{N0}}{Z_{M0} + Z_{N0} + Z_0(l_d + l'_d)}$$

$$\therefore \arg \left[\frac{I_{0M}}{I_0} \right] = \arg \left[\frac{Z_0 l'_d + Z_{N0}}{Z_{M0} + Z_{N0} + Z_0(l_d + l'_d)} \right] \quad \dots\dots\dots(7)$$

由(7)式可见, I_{0M} 与 I_0 间的相位关系, 和 Z_{M0} 、 Z_{N0} 、 $Z_0(l_d + l'_d)$ 间的关系以及故障点位置有关。为此先分析零序阻抗的特性。

1. 输电线路的零序阻抗 Z_0 :

理论分析表明, 输电线路的零序阻抗可用下列公式来表示:

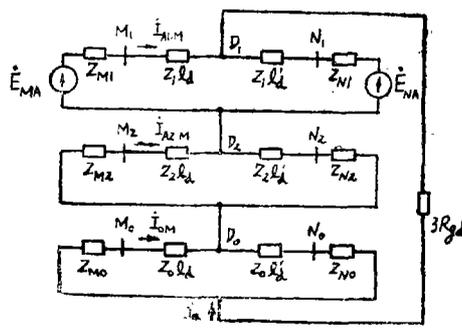


图 4 D 点 A 相经 R_{gd} 接地故障时的复合序网

* 对单回路三相架空线路, 零序阻抗为:

$$Z_0 = (r_1 + 0.15 + j0.4335l_s \frac{D_s}{D_s}) \text{ 欧/公里} \quad \dots\dots\dots(8)$$

式中 r_1 —导线单位长度的电阻;

D_s —导线与大地回路的等效深度, $D_s = 71\sqrt{\frac{S}{f}}$ 米, 其中 f 为频率(50赫), S 为土壤电阻系数(欧厘米), 一般情况下, $D_s \approx 1000$ 米;

D_s —三相导线的几何平均半径, $D_s = \sqrt[3]{r' D_m^2}$, 其中 r' 为导线的几何平均半径, 对直径为 $2r$ 的钢芯铝线, $r' = 0.95r$, D_m 为三相导线的几何平均距离, $D_m = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ca}}$ 。

* 对平行双回路, 如两回路相同, 则每回路的零序阻抗为:

$$Z_0^{(2)} = Z_0 + Z_{(I-I)} \quad \dots\dots\dots(9)$$

式中 Z_0 —独立一回路的零序阻抗, 由(8)式确定;

$Z_{(I-I)}$ —两回路间零序互阻抗, $Z_{(I-I)} = 0.15 + j0.4335l_s \frac{D_s}{D_{I-I}}$ 欧/公里, 而

$D_{I-I} = \sqrt[6]{D_{aa'} D_{ab'} D_{ac'} D_{ba'} D_{bb'} D_{bc'} D_{ca'} D_{cb'} D_{cc'}}$ 为六根导线之间距离的几何平均值。

* 对具有接地避雷线的单回路架空线路, 其零序阻抗为:

$$Z_0^{(w)} = Z_0 - \frac{Z_{cw0}^2}{Z_{w0}} \quad \dots\dots\dots(10)$$

式中 Z_{w0} —接地避雷线的零序自阻抗(两根避雷线), $Z_{w0} = \frac{3r_w}{2} + 0.15 + j0.4335l_s$

$\frac{D_s^2}{D_{sw}}$ 欧/公里, 而 $D_{sw} = \sqrt{r_w' D_w}$, 其中 r_w 为避雷线单位长度电阻, r_w' 为接地避雷线的平均几何半径, D_w 为避雷线间距离;

Z_{cw0} —三相导线和接地避雷线间的零序互阻抗, $Z_{cw0} = 0.15 + j0.4335l_s \frac{D_s}{D_{cw}}$ 欧/公里, 其中 D_{cw} 为两根避雷线与线路三相导线间的几何平面距离, $D_{cw} = \sqrt[6]{D_{aw1} D_{bw1} D_{cw1} D_{aw2} D_{bw2} D_{cw2}}$ 。

※ 对具有接地避雷线的双回路三相架空线, 如两回路相同, 则每回路的零序阻抗为:

$$Z^{(2, w)} = Z_0^{(2)} - \frac{Z_{cw0}^2}{Z_{w0}} \quad \dots\dots\dots(11)$$

根据以上公式, 对 110^kV 、 220^kV 不同类型的输电线路的零序阻抗进行计算, 其每公里的零序阻抗值可归纳如表 1 所示。

表 1 架空输电线路每公里的零序阻抗

	每公里零序阻抗值	阻抗角
单回路无接地避雷线	1.4 欧	75°~80°
单回路有接地避雷线	1.3 欧	
双回路无接地避雷线	2.3 欧	
双回路有接地避雷线	2.2 欧	

注:

1. 避雷线为钢绞线;
2. 双回路系同杆架设

需要指出, 接地避雷线的影响, 不仅使零序阻抗值有所减小, 而且使阻抗角也略有减小; 另外, 电压等级愈高, 阻抗角也略有所增大, 趋近上限值。

2. 母线侧的零序阻抗 Z_{MO} 、 Z_{NO} :

对中性点直接接地的系统说, 图 1 中母线 M 、 N 侧的零序阻抗 Z_{MO} 、 Z_{NO} , 当母线 M 、 N 上没有转接线路时, 由变压器 B_M 、 B_N 的零序阻抗确定, 如果 B_M 或 B_N 为自耦变压器且中压侧 (高压侧) 存在零序电流时, 则 Z_{MO} 或 Z_{NO} 由 B_M 或 B_N 的零序阻抗和中压侧 (高压侧) 方面的零序阻抗确定; 当母线 M 、 N 上具有转接输电线路时, Z_{MO} 、 Z_{NO} 还要考虑转接输电线路方面的零序阻抗。

对电力变压器来说, 其零序阻抗值取决于变压器的磁路结构和绕组的联接方式。电力系统中的变压器, 几乎都具有三角形绕组, 而具有三角形绕组的电力变压器, 实际上零序阻抗值和正序阻抗值是相等的。对不同容量和型号的电力变压器, 根据 $R = \frac{P_K U_e^2}{1000 S_e^2}$ 欧、 $X = \frac{U_K \% U_e^2}{100 S_e}$ 欧 (P_K 为变压器短路损耗, 千瓦; U_e 为变压器的额定电压, 千伏; S_e 为变压器额定容量, 兆伏安; $U_K \%$ 为变压器短路电压百分值; R 、 X 为变压器高低压绕组的总电阻)、总电抗, 其零序阻抗值计算如表 2 所示。

由表 2 可见, 对大型电力变压器说, 零序阻抗角约在 $85^\circ \sim 87^\circ$ 之间, 变压器容量愈大, 其值趋近上限。

表 2 变压器的零序阻抗

变压器容量(兆伏安)	变 比	联 接 组	零 序 阻 抗
5.6	121 ^{KV} /38.5 ^{KV}	Y _o /Δ	228.2 83.9°
30	110 ^{KV} /38.5 _{KV} /11 ^{KV}	Y _o /Y/Δ	83.2 84.9°
50	121 ^{KV} /10.5 ^{KV}	Y _o /Δ	25.4 87.3°
60	121 ^{KV} /38.5 _{KV} /10.5 ^{KV}	Y _o /Y _o /Δ	21.2 87.3°
90	220 ^{KV} /121 ^{KV} /38.5 ^{KV}	0—Y _o /Δ	91.4 87.9°
360	236 ^{KV} /18 ^{KV}	Y _o /Δ	19.1 87.6°

注: 阻抗值以本变压器额定容量为基准并折算到高压侧

实际上 Z_{M0} 、 Z_{N0} 不完全取决于变压器的零序阻抗，当母线 M 、 N 上有转接输电线，或自耦变压器中压侧（高压侧）存在零序电流时， Z_{M0} 、 Z_{N0} 的阻抗角要比变压器的零序阻抗角小，与线路的零序阻抗角接近。

3. I_{OM} 与 I_0 的相位关系：

由前述分析可见，电力变压器的零序阻抗角比架空线路的零序阻抗角要略大一些。当电力系统中发生接地故障时，实际上变压器中的零序磁通要在油箱壁中感应涡流而产生附加有功损耗，致使变压器零序阻抗角比前述计算值略小。在极端情况下， Z_{M0} 、 Z_{N0} 均由变压器零序阻抗组成，阻抗角设为 85° 。对输电线路，零序阻抗角取平均值 77° 。如果取 $|Z_{M0}| = |Z_{N0}| = 50 \Omega$ ，则在不同长度线路情况下，也即线路阻抗和 Z_{M0} 、 Z_{N0} 不同比值下，在不同位置接地故障时，线路始端零序电流与通过故障点的零序电流间的相位差由(7)式求得如表3所示。

表3 不同位置接地故障时的 $\arg[I_{OM}/I_0]$ 值

线路长度	接 地 故 障 位 置				
	0%	40%	80%	90%	100%
20 公里	-1.1°	-0.3°	0.9°	1.3°	1.6°
50 公里	-1.4°	-0.4°	1.5°	2.2°	3.1°
100 公里	-1.2°	-0.3°	1.8°	2.9°	4.5°
150 公里	-1.1°	-0.3°	1.8°	3.0°	5.3°
200 公里	-0.9°	-0.3°	1.7°	3.0°	5.8°

由表3可见，对于不同长度的输电线路，始端故障时， I_{OM} 将滞后 I_0 相角 1° 左右，在线路末端附近故障时， I_{OM} 将超前 I_0 相位 $2^\circ \sim 3^\circ$ 。

对于中性点直接接地系统，因 Z_{M0} 、 Z_{N0} 不完全是变压器的零序阻抗，所以 I_{OM} 和 I_0 的相角差是很小的，可以认为是接近同相的，特别对于短线路。对于中、长线路，在 I 段保护区内接地故障时， I_{OM} 超前 I_0 的相角最大也只有 $2^\circ \sim 3^\circ$ （注意，相邻线路 I 段范围内接地故障时，即 N 侧转接线故障，因远离 M 母线的故障点一侧存在输电线路，故 I_{OM} 和 I_0 的相角差不会增大反倒减小）。这样， I_0 的过零瞬间也就是 I_{OM} 的过零瞬间（相位不完全相同的影响，分析见后），而 I_{OM} 是很容易测量到的，从而获得了 I_0 的过零瞬间，解决了第一个问题。

(二) 第二个问题，接地故障点距离的测量。

接地故障时， I_0 过零瞬间获得后，如何正确测量故障点的距离？这是构成新型接地距离继电器的又一关键问题。

设在图1中的 D 点 A 相经 R_g 发生了接地故障，则母线 M 上的 A 相电压为：

$$\dot{U}_{MA} = 3\dot{I}_O R_{gd} + \dot{I}_{A1.M} Z_1 l_d + \dot{I}_{A2.M} Z_2 l_d + \dot{I}_{OM} Z_0 l_d$$

应当指出, 只要 MD 间无分支线, 而不管其他两相状态如何以及 MD 线段外系统的状态如何, 上式始终是成立的。计及 $Z_1 = Z_2$ 后, 上式可写成:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{MA} &= 3\dot{I}_O R_{gd} + \left[\dot{I}_{A1.M} + \dot{I}_{A2.M} + \dot{I}_{OM} \frac{Z_0}{Z_1} \right] Z_1 l_d \\ &= (\dot{I}_{A.M} + 3K\dot{I}_{OM}) Z_1 l_d + 3\dot{I}_O R_{gd} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(12)$$

对故障相继电器, 若极化电压量 (A 相) 取为:

$$\dot{U}_K^a = (\dot{I}_{A.M} + 3K\dot{I}_{OM}) Z_1 l_{zd} \quad \dots\dots\dots(13)$$

式中 $Z_1 l_{zd}$ — 继电器的整定阻抗, 其中 l_{zd} 为相应的保护区。于是, 相补偿电压 (距离测量电压) 由 (12)、(13) 式可得:

$$\dot{U}'_{MA} = \dot{U}_{MA} - \dot{U}_K^a = (\dot{I}_{A.M} + 3K\dot{I}_{OM}) Z_1 (l_d - l_{zd}) + 3\dot{I}_O R_{gd} \quad \dots\dots\dots(14)$$

由 (13)、(14) 式, 消去 $\dot{I}_{A.M} + 3K\dot{I}_{OM}$, 得到:

$$\dot{U}'_{MA} = \dot{U}_{MA} - \dot{U}_K^a = \dot{U}_K^a \frac{l_d - l_{zd}}{l_{zd}} + 3\dot{I}_O R_{gd} \quad \dots\dots\dots(15)$$

在 \dot{I}_O (\dot{I}_{OM}) 过零瞬间, $3\dot{I}_O R_{gd} = 0$ 故有:

$$\left(\frac{\dot{U}'_{MA}}{\dot{U}_K^a} \right)_{\dot{I}_O \text{过零时}} = \left(\frac{\dot{U}_{MA} - \dot{U}_K^a}{\dot{U}_K^a} \right)_{\dot{I}_O \text{过零时}} = \frac{l_d - l_{zd}}{l_{zd}} \quad \dots\dots\dots(16)$$

由此式可得到重要结论: 保护区内故障时, $l_d < l_{zd}$, \dot{U}'_{MA} 与 \dot{U}_K^a 有相反的极性; 保护区末端故障时, $l_d = l_{zd}$,

处临界状态; 保护区外故障时, $l_d > l_{zd}$, \dot{U}'_{MA} 与 \dot{U}_K^a 有相同的极性。可见,

在 \dot{I}_{OM} 过零瞬间判断 \dot{U}'_{MA} 与 \dot{U}_K^a 的极性, 就可测量

A 相故障点的距离, 即 \dot{U}'_{MA} 与 \dot{U}_K^a 同极性, 故障

在区外, 继电器不应动作, \dot{U}'_{MA} 与 \dot{U}_K^a 反极性,

故障在区内, 继电器应动作。这样, 接地电阻的大小, 不会影响继电器的正确

动作, 也即接地电阻的大小, 不影响继电器对故障点距离的测量。图 5 示

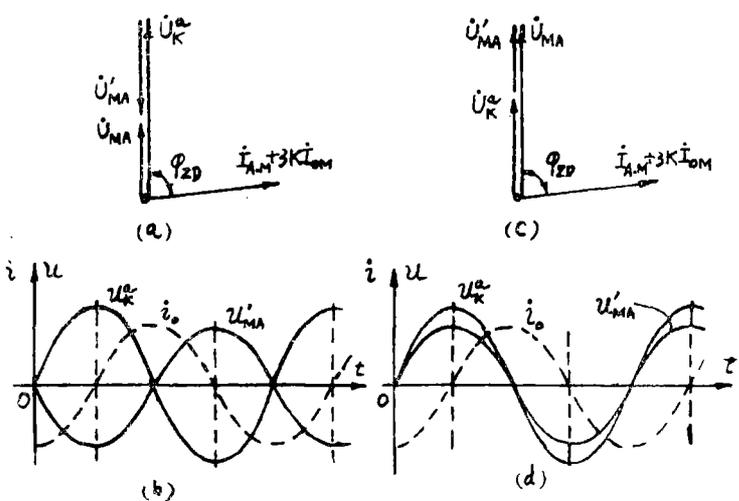


图 5 A 相接地故障时, \dot{U}'_{MA} 与 \dot{U}_K^a 向量关系和形波关系 (a)、(b) — 区内故障; (c)、(d) — 区外故障

出了保护区内、外接地故障时，继电器的向量关系和波形关系。

三、 新型接地距离继电器的构成

由上分析可见，在 \dot{I}_{OM} 过零瞬间，比较极化电压（如 \dot{U}_K^a ）和相补偿电压（如 \dot{U}_{MA}^a ）的极性，就能正确测量接地故障点（如 A 相）的距离，并不受接地电阻的影响。在现代

的电子技术中要做到这一点，是十分方便的。图 6 示出了 A 相接地距离继电器的逻辑方框图。 \dot{U}_{MA}^a 、 \dot{U}_K^a 、 $3\dot{I}_{OM}$ 分别经方波变换后，正半周为高电位，负半周为低电位。对于 \dot{U}_{MA}^a 、 \dot{U}_K^a 的方波电压 $[\dot{U}_{MA}^a]$ 、 $[\dot{U}_K^a]$ 经反相器 F_1 、 F_2 后送入与门 Y_1 、 Y_2 。对于 $3\dot{I}_{OM}$ 的方波，经微分器 d_1 、 d_2 后，获得对应于 $3\dot{I}_{OM}$ 过零时的正脉冲，经或门 H_1 进入与门 Y_1 、 Y_2 ，显然 H_1 的输出正窄脉冲对应于 $3\dot{I}_{OM}$ 的过零瞬间。根据上述逻辑图，A 相继电器的输出 L_A 为：

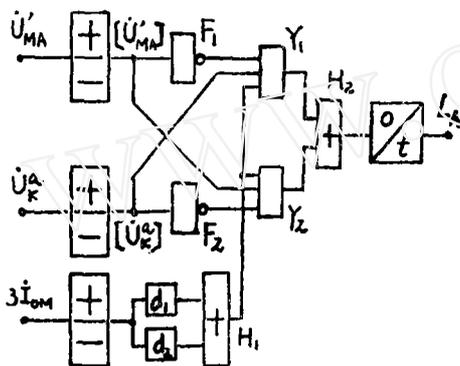


图 6 A 相接地距离继电器的逻辑图

$$L_A = Y_1 + Y_2 = H_1 \cdot \{ [\dot{U}_{MA}^a] \cdot [\dot{U}_K^a] + [\dot{U}_K^a] \cdot [\dot{U}_{MA}^a] \}$$

$$= H_1 \cdot \{ [\dot{U}_{MA}^a] \oplus [\dot{U}_K^a] \} \quad \dots\dots\dots (17)$$

式中 $[\dot{U}_K^a]$ 、 $[\dot{U}_{MA}^a]$ — \dot{U}_K^a 、 \dot{U}_{MA}^a 对应的方波电压。

正向区内 A 相接地故障时， $[\dot{U}_{MA}^a]$ 与 $[\dot{U}_K^a]$ 互非，故有 $[\dot{U}_{MA}^a] \oplus [\dot{U}_K^a] = "1"$ ，在 $3\dot{I}_{OM}$ ($3\dot{I}_O$) 过零瞬间， $H_1 = "1"$ ，所以 $L_A = "1"$ ，继电器动作；正向区外接地故障时，因为 $[\dot{U}_{MA}^a] \oplus [\dot{U}_K^a] = "0"$ ，所以 $L_A = "0"$ ，继电器不动作。显然，继电器仅在 $3\dot{I}_{OM}$ 过零瞬间测量接地故障点的距离，故继电器不受故障点接地电阻的影响。自然，当无零序电流时，因 $H_1 = "0"$ ，继电器是不可能动作的。

对于 \dot{U}_{MA}^a 、 \dot{U}_K^a 的获得，用常规方法即可。

四、 继电器性能分析

1. \dot{I}_{OM} 与 \dot{I}_O 不完全同相的影响：

上述这种新型接地距离继电器正确测量接地故障点距离的方法，是建立在 \dot{I}_{OM} 和 \dot{I}_O 过零瞬间相同的基础上的，也即同相的基础上的。如果过零瞬间不同，则保护区将有所伸长或缩短。

由表 3 可见, 在线路始端部分接地故障时, \dot{I}_{OM} 略滞后 \dot{I}_O (1° 左右), 因故障在保护区的始端, 这种对保护区的极小的缩短, 是不影响继电器的正确动作的。我们感兴趣的是在保护区末端附近接地故障时, \dot{I}_{OM} 略超前 \dot{I}_O 而引起的保护区的伸长。兹分析如下。

设在保护区末端附近 A 相经 R_{gd} 接地故障, 因故障相各序电流同相, 所以如以 \dot{I}_{OM} 为参考向量, 即 $i_{OM} = \sqrt{2} I_{OM} \sin \omega t$, 则 $\dot{I}_{A1.M}$ 、 $\dot{I}_{A2.M}$ 、 \dot{I}_O 可写成:

$$\dot{I}_{A1.M} = I_{A1.M} e^{j\omega t}, \quad \dot{I}_{A2.M} = I_{A2.M} e^{j\omega t}, \quad \dot{I}_O = I_O e^{-j\alpha} \dots \dots (18)$$

式中 α — \dot{I}_O 落后 \dot{I}_{OM} 的相角, 其最大约为 $2^\circ \sim 3^\circ$ 。

计及上式及 $Z_1 = |Z_1| e^{j\varphi_1}$ (φ_1 为被保护线路的正序阻抗角), (14) 式可写成:

$$u'_{MA} = [\sqrt{2} I_{A1.M} + \sqrt{2} I_{A2.M} + \sqrt{2} (1 + 3K) I_{OM}] \sin(\omega t + \varphi_1) \times \\ \times |Z_1| (l_d - l_{zd}) + 3 \sqrt{2} I_O \sin(\omega t - \alpha) \times R_{gd}$$

继电器在临界动作条件下, 有 $\dot{U}'_{MA} / \dot{U}_K = 0$, 即 $u'_{MA} = 0$; 又继电器在 \dot{I}_{OM} 过零瞬间测量故障点距离, 同时假定在 $\omega t = 0$ 时继电器进行测量。由此, 上式可简化为:

$$[I_{A1.M} + I_{A2.M} + (1 + 3K) I_{OM}] \sin \varphi_1 |Z_1| (l_d - l_{zd}) = 3 I_O \sin \alpha R_{gd}$$

$$\therefore l_d = l_{zd} + \frac{3 R_{gd} \sin \alpha}{|Z_1| [K_{1f} + K_{2f} + (1 + 3K) K_{of}] \sin \varphi_1} \dots \dots (19)$$

$$\text{或} \quad \Delta l_d = \frac{3 R_{gd} \sin \alpha}{|Z_1| [K_{1f} + K_{2f} + (1 + 3K) K_{of}] \sin \varphi_1} \dots \dots (20)$$

式中 K_{1f} 、 K_{2f} 、 K_{of} — 保护安装侧正序、负序、零序电流的分布系数, $K_{1f} = \frac{I_{A1.M}}{I_O}$ 、

$K_{2f} = \frac{I_{A2.M}}{I_O}$ 、 $K_{of} = \frac{I_{OM}}{I_O}$; Δl_d — 由 \dot{I}_{OM} 超前 \dot{I}_O 的相角 α 引起的保护区的伸长, $\Delta l_d = l_d - l_{zd}$ 。

由 (20) 式可见, 在保护区末端附近故障时, 因 $\alpha > 0^\circ$, 有 $\Delta l_d > 0$, 即继电器的实际动作范围大于 l_{zd} , 保护区将伸长。若取 $K_{1f} = K_{2f} = 0.5$ 、 $K_{of} = 0.2$ 、 $K = 0.7$ 、 $\varphi_1 = 78^\circ$ 、 $|Z_1| = 0.4$ 欧/公里。又取 $R_{gd} = 20$ 欧、 $\alpha = 3^\circ$ 则有:

$$\Delta l_d = \frac{3 \times 20 \times \sin 3^\circ}{0.4 [0.5 + 0.5 + (1 + 3 \times 0.7) \times 0.2] \sin 78^\circ} = 4.95 \text{ (公里)}$$

在中、长线路上, 这样大小的超范围动作是完全允许的。应当指出, 在较短的线路上, 因 $\alpha \approx 0^\circ$, 动作区的伸长实际上在 1~2 公里以内。可见, 单相接地故障时, 继电器的保护区是十分稳定的, 并不随 R_{gd} 而变化。

当 BC 两相经接地电阻 R_{gd} 故障时, 继电器的临界动作条件 (在 \dot{I}_{OM} 过零瞬间) 为

$$\left[\frac{\dot{U}'_{MB}}{\dot{U}_K^b} \right]_{\dot{I}_{OM} \text{过零时}} = 0, \quad \left[\frac{\dot{U}'_{MC}}{\dot{U}_K^c} \right]_{\dot{I}_{OM} \text{过零时}} = 0 \quad \dots \dots (21)$$

根据复合序网, 可求得 B 相、C 相继电器的极化电压 \dot{U}_K^b 、 \dot{U}_K^c 如下:

$$\begin{aligned} \dot{U}_K^b &= [\dot{I}_{B1.M} + \dot{I}_{B2.M} + (1+3K)\dot{I}_{OM}] |Z_1| e^{j\varphi_1} l_{Zd} \\ &= |A| \cdot |Z_1| \cdot l_{Zd} \cdot \dot{I}_O \cdot e^{j(\varphi_A + \varphi_1)} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (22a)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_K^c &= [\dot{I}_{C1.M} + \dot{I}_{C2.M} + (1+3K)\dot{I}_{OM}] |Z_1| e^{j\varphi_1} l_{Zd} \\ &= |A| \cdot |Z_1| \cdot l_{Zd} \cdot \dot{I}_O \cdot e^{-j(\varphi_A - \varphi_1)} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (22b)$$

式中 $A = \sqrt{[(1+3K)K_{of} + \frac{1}{2}K_{1f}]^2 + [\sqrt{3}K_{1f}(\frac{1}{2} + \frac{3R_{gd} + Z_{0z}}{Z_{2z}})]^2}$
 $\varphi_A = \arctg \left\{ \frac{\sqrt{3}[\frac{1}{2} + (3R_{gd} + Z_{0z})/Z_{2z}]}{\frac{1}{2} + (1+3K)K_{of}/K_{1f}} \right\}$

其中 Z_{0z} 、 Z_{2z} 为故障点系统的零序、负序综合阻抗。

在 \dot{I}_{OM} 过零瞬间，计及 (22a)、(22b) 两式，由 (15) 式可得：

$$\left[\frac{\dot{U}_{MB}}{\dot{U}_K^b} \right]_{\dot{I}_{OM} \text{过零时}} = \frac{l_d - l_{Zd}}{l_{Zd}} - \frac{3R_{gd} \text{Sin} \alpha}{|A| |Z_1| l_{Zd} \text{sin}(\varphi_A + \varphi_1 - \alpha)} \quad \dots\dots\dots (23a)$$

$$\left[\frac{\dot{U}_{MC}}{\dot{U}_K^c} \right]_{\dot{I}_{OM} \text{过零时}} = \frac{l_d - l_{Zd}}{l_{Zd}} + \frac{3R_{gd} \text{Sin} \alpha}{|A| |Z_1| l_{Zd} \text{sin}(\varphi_A - \varphi_1 + \alpha)} \quad \dots\dots\dots (23b)$$

借助 (21) 式，可得到 B、C 两相继电器实际的动作范围分别为：

$$l_d = l_{Zd} + \frac{3R_{gd} \text{Sin} \alpha}{|A| |Z_1| \text{Sin}(\varphi_A + \varphi_1 - \alpha)} \quad (\text{B相}) \quad \dots\dots (24a)$$

$$l_d = l_{Zd} - \frac{3R_{gd} \text{Sin} \alpha}{|A| |Z_1| \text{Sin}(\varphi_A - \varphi_1 + \alpha)} \quad (\text{C相}) \quad \dots\dots\dots (24b)$$

所以，两故障相继电器保护区的变化分别为：

$$\Delta l_{d(\text{B相})} = \frac{3R_{gd} \text{Sin} \alpha}{|A| |Z_1| \text{Sin}(\varphi_A + \varphi_1 - \alpha)} \quad \dots\dots\dots (25a)$$

$$\Delta l_{d(\text{C相})} = - \frac{3R_{gd} \text{Sin} \alpha}{|A| |Z_1| \text{Sin}(\varphi_A - \varphi_1 + \alpha)} \quad \dots\dots\dots (25b)$$

若取 $K=0.7$ 、 $K_{1f}=0.5$ 、 $K_{of}=0.2$ ，当 $(3R_{gd} + Z_{0z})/Z_{2z} = 0.8 \sim 1$ 时，则 $A=1.42 \sim 1.56$ ， $\varphi_A = 52.3^\circ \sim 56.2^\circ$ ；计及 $\varphi_1 = 78^\circ$ 、 $\alpha = 3^\circ$ 、 $R_{gd} = 20$ 欧、 $|Z_1| = 0.4$ 欧/公里，由 (25) 式得到

$$\begin{aligned} \Delta l_{d(\text{B相})} &= \frac{3 \times 20 \times \text{Sin} 3^\circ}{(1.42 \sim 1.56) \times 0.4 \times \text{Sin} [(52.3^\circ \sim 56.2^\circ) + 78^\circ - 3^\circ]} \\ &= 6.9 \sim 6.68 (\text{公里}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta l_{d(\text{C相})} &= - \frac{3 \times 20 \times \text{Sin} 3^\circ}{(1.42 \sim 1.56) \times 0.4 \times \text{Sin} [(52.3^\circ \sim 56.2^\circ) - 78^\circ + 3^\circ]} \\ &= 14.3 \sim 15.6 (\text{公里}) \end{aligned}$$

可见，保护区末端附近经 R_{gd} 两相接地故障时，保护区均有所伸长。在短线路上，同样因 $\alpha \approx 0^\circ$ ，保护区的伸长在 2~3 公里内。应当指出，由于 A 值和 φ_A 角受到系统运行方式的影响，在个别情况下动作区的伸长可能是明显的，必要时，当发生两相接地故障的

时候，可解除此接地距离继电器的工作。

2. 继电器的动作特性：

因继电器在 $3 \dot{I}_{OM}$ 过零瞬间测量接地故障点距离，由 (16) 式可得，区内故障时，有 $l_d < l_{zd}$ ，对 A 相继电器， \dot{U}_K^a 与 $\dot{U}_{MA} - \dot{U}_K^a$ 应有相反极性，于是继电器的动作条件为：

$$\left[\frac{\dot{U}_{MA} - \dot{U}_K^a}{\dot{U}_K^a} \right]_{\dot{I}_{OM} \text{过零时}} \leq 0$$

也可以写成

$$90^\circ \leq \arg \left[\frac{\dot{U}_{MA} - \dot{U}_K^a}{\dot{U}_K^a} \right]_{\dot{I}_{OM} \text{过零时}} \leq 270^\circ$$

计及 (12)、(13) 式，上式可写成：

$$90^\circ \leq \arg \left[\frac{Z_d - Z_{zd}}{Z_{zd}} \right] \leq 270^\circ \dots\dots (26)$$

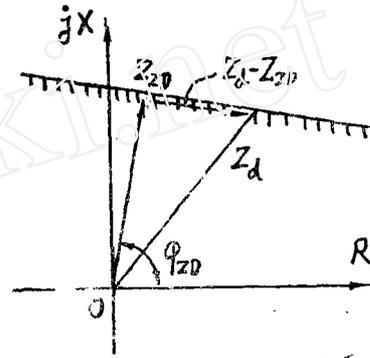


图7 继电器的动作特性

式中 Z_d —故障点到保护安装点线路正序阻抗， $Z_d = Z_1 l_d$ ， Z_{zd} —整定阻抗， $Z_{zd} = Z_1 l_{zd}$ 。

根据 (26) 式，作出继电器的动作特性如图 7 所示，特性为过整定阻抗 Z_{zd} 端点垂直向量 Z_{zd} 的一条直线，其中带影阴线的一侧为动作区。

应当指出，图 7 所示的继电器的动作特性，是在 $3 \dot{I}_{OM}$ 过零瞬间获得的，只要 Z_d 落入动作区，继电器即动作，而 Z_d 和 R_{gd} 是无关系的 (Z_d 不包括 R_{gd} 在内)，也即继电器不受 R_{gd} 的影响，这和一般的电抗继电器动作特性是有本质上的区别，因后者受 R_{gd} 的影响。

3. 负荷电流的影响：

设在图 1 的 D 点 A 相经 R_{gd} 接地故障，应用迭加原理，当系统中各序阻抗幅角近似相等时，可求得母线 M 上 A、B、C 三相继电器的相补偿电压分别为：

$$\begin{aligned} \dot{U}_{MA} &= \dot{U}_{MA} - (\dot{I}_{A \cdot M} + 3K \dot{I}_{OM}) Z_1 l_{zd} \\ &= 3 \dot{I}_O R_{gd} + Z_1 (l_d - l_{zd}) \left\{ \dot{I}_{f_{h \cdot A}} + \dot{I}_{A1 \cdot M} + \dot{I}_{A2 \cdot M} + (1 + 3K) \dot{I}_{OM} \right\} \\ &= 3 \dot{I}_O R_{gd} + Z_1 (l_d - l_{zd}) \left\{ \dot{I}_{f_{h \cdot A}} + [K_{1f} + K_{2f} + (1 + 3K) K_{Of}] \dot{I} \right\} \\ &= \frac{3 \dot{I}_{OM} R_{gd}}{K_{Of}} + Z_1 (l_d - l_{zd}) \left\{ \dot{I}_{f_{h \cdot A}} + \left[\frac{K_{1f} + K_{2f}}{K_{Of}} + 1 + 3K \right] \dot{I}_{OM} \right\} \\ &\dots\dots\dots (27) \end{aligned}$$

$$\dot{U}'_{MB} = \dot{U}_{MB} - (\dot{I}_{B \cdot M} + 3K \dot{I}_{OM}) Z_1 l_{zd}$$

$$\begin{aligned}
&= \dot{E}_{MB} - \dot{I}_{fh.B} Z_{M1} - \dot{I}_{B1.M} Z_{M1} - \dot{I}_{B2.M} Z_{M2} - \dot{I}_{OM} Z_{MO} - \\
&- (\dot{I}_{B.M} + 3K \dot{I}_{OM}) Z_1 l_{zd} \\
&= \dot{E}_{MB} - (Z_{M1} + Z_1 l_{zd}) \dot{I}_{fh.B} + \left\{ \left(\frac{K_{1f}}{K_{Of}} Z_{M1} - Z_{MO} \right) + \left[\frac{K_{1f}}{K_{Of}} \right. \right. \\
&- (1 + 3K) \left. \left. \right] Z_1 l_{zd} \right\} \dot{I}_{OM} \quad \dots\dots\dots (28)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{U}'_{MC} &= \dot{E}_{MC} - (Z_{M1} + Z_1 l_{zd}) \dot{I}_{fh.C} + \left\{ \left(\frac{K_{1f}}{K_{Of}} Z_{M1} - Z_{MO} \right) + \right. \\
&+ \left. \left[\frac{K_{1f}}{K_{Of}} - (1 + 3K) \right] Z_1 l_{zd} \right\} \dot{I}_{OM} \quad \dots\dots\dots (29)
\end{aligned}$$

上三式中 $\dot{I}_{fh.A}$ 、 $\dot{I}_{fh.B}$ 、 $\dot{I}_{fh.C}$ —故障线通过的A、B、C相负荷电流；
 Z_{M1} 、 Z_{MO} —母线M左侧等值正序、零序阻抗；
 \dot{E}_{MB} 、 \dot{E}_{MC} —母线M左侧等值B、C相电势。

另外，可求得继电器的极化电压 \dot{U}_K^a 、 \dot{U}_K^b 、 \dot{U}_K^c 分别为：

$$\begin{aligned}
\dot{U}_K^a &= (\dot{I}_{A.M} + 3K \dot{I}_{OM}) Z_1 l_{zd} \\
&= \left\{ \dot{I}_{fh.A} + \left[\frac{K_{1f} + K_{2f} + 1 + 3K}{K_{Of}} \right] \dot{I}_{OM} \right\} Z_1 l_{zd} \quad \dots\dots\dots (30)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{U}_K^b &= (\dot{I}_{B.M} + 3K \dot{I}_{OM}) Z_1 l_{zd} \\
&= \left\{ \dot{I}_{fh.B} + \left[1 + 3K - \frac{K_{1f}}{K_{Of}} \right] \dot{I}_{OM} \right\} Z_1 l_{zd} \quad \dots\dots\dots (31)
\end{aligned}$$

$$\dot{U}_K^c = \left\{ \dot{I}_{fh.C} + \left[1 + 3K - \frac{K_{1f}}{K_{Of}} \right] \dot{I}_{OM} \right\} Z_1 l_{zd} \quad \dots\dots\dots (32)$$

对于故障相继电器，在 \dot{I}_{OM} 过零瞬间，由(27)、(30)式可得：

$$\begin{aligned}
\left[\frac{\dot{U}'_{MA}}{\dot{U}_K^a} \right]_{\dot{I}_{OM} \text{过零时}} &= \frac{Z_1 (l_d - l_{zd}) \left\{ \dot{I}_{fh.A} + \left[\frac{K_{1f} + K_{2f} + 1 + 3K}{K_{Of}} \right] \dot{I}_{OM} \right\}}{\left\{ \dot{I}_{fh.A} + \left[\frac{K_{1f} + K_{2f} + 1 + 3K}{K_{Of}} \right] \dot{I}_{OM} \right\} Z_1 l_{zd}} = \frac{l_d - l_{zd}}{l_{zd}} \\
&\dots\dots\dots (33)
\end{aligned}$$

与(16)式完全一致。即负荷电流的大小不影响故障相继电器对故障点距离的正确测量，这是继电器又一个良好的性能。

对于非故障相上的继电器，先看超前相（指非故障相中）B相继电器的情况。如果系统中之元件各序阻抗角均为 φ_1 ，在 \dot{I}_{OM} 过零瞬间，由(28)、(31)式可得：

$$\begin{aligned}
\left[\frac{\dot{U}'_{MB}}{\dot{U}_K^b} \right]_{\dot{I}_{OM} \text{过零时}} &= \frac{\dot{E}_{MB} - |Z_{M1} + Z_1 l_{zd}| \dot{I}_{fh.B} e^{j\varphi_1} + \dot{I}_{OM} e^{j\varphi_1} \left\{ \frac{K_{1f}}{K_{Of}} |Z_{M1}| - |Z_{MO}| + \left[\frac{K_{1f}}{K_{Of}} - (1 + 3K) \right] |Z_1| l_{zd} \right\}}{|Z_1| l_{zd} \cdot \dot{I}_{fh.B} \cdot e^{j\varphi_1}} \quad \text{取瞬时值}
\end{aligned}$$

$$= \left[\frac{\dot{U}_{MB \cdot 0} - \dot{I}_{fh \cdot B} Z_1 l_{zd}}{\dot{I}_{fh \cdot B} Z_1 l_{zd}} + \frac{I_{OM}}{\dot{I}_{fh \cdot B}} \times \left\{ \frac{K_{1f} |Z_{M1}| - |Z_{M0}|}{|Z_1| l_{zd}} + \frac{K_{1f} - (1+3K)}{K_{0f}} \right\} \right]_{\text{取瞬时值}} \dots \dots \dots (34)$$

式中 $\dot{U}_{MB \cdot 0}$ —故障发生前母线M上的B相电压。

根据继电器的动作条件，当 $\left[\frac{\dot{U}'_{MB}}{\dot{U}'_K} \right]_{I_{OM} \text{过零时}} \leq 0$ 时继电器动作。借助向量图可分析B相继电器的动作情况。图8示出了正向A相接地故障时的向量关系，其中图(a)为送电侧向量图 (\dot{E}_M 超前 \dot{E}_N)，图(b)为受电侧向量图 (\dot{E}_M 落后 \dot{E}_N)。当接地电阻 R_{gd} 的大小变化时，零序电流 \dot{I}_0 (\dot{I}_{OM}) 落后故障点D故障前故障相电压 $\dot{U}_{DA \cdot 0}$ 的角度相应变化，当 R_{gd} 增大时， \dot{I}_0 向量沿图中虚线半圆移动 (如图中箭头所示)。

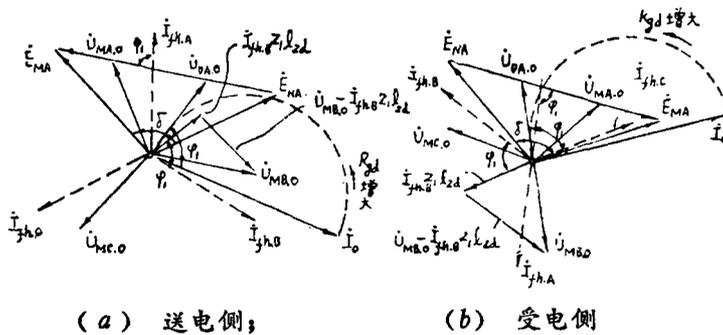


图8 正向A相接地时向量关系

由向量图可见，当负荷电流变化时， $\dot{U}_{MB \cdot 0} - \dot{I}_{fh \cdot B} Z_1 l_{zd}$ 与 $\dot{I}_{fh \cdot B} Z_1 l_{zd}$ 的相位关系在很大范围内变化，如在送电侧，向量 $\dot{U}_{MB \cdot 0} - \dot{I}_{fh \cdot B} Z_1 l_{zd}$ 落后 $\dot{I}_{fh \cdot B} Z_1 l_{zd}$ ，在受电侧，向量 $\dot{U}_{MB \cdot 0} - \dot{I}_{fh \cdot B} Z_1 l_{zd}$ 超前 $\dot{I}_{fh \cdot B} Z_1 l_{zd}$ ，也即 (34) 式第一项的瞬时值大小以及其正负值随负荷电流 $\dot{I}_{fh \cdot B}$ 的变化是很大的。

同样理由， $\dot{I}_{fh \cdot B}$ 与参考向量 \dot{I}_0 (\dot{I}_{OM}) 间的相位差也在很大的范围内变化；另外，(34) 式中第二项大括弧内为一实数，其正负号随故障点位置 (影响 K_{1f} 、 K_{0f})、系统运行方式而定。因此 (34) 式中第二项瞬时值的正负随负荷电流、系统运行方式、故障点位置而变化。

由上分析可见， $\left[\frac{\dot{U}'_{MB}}{\dot{U}'_K} \right]_{I_{OM} \text{过零时}}$ 的值有可能出现负值，也即B相继电器可能发生动作。

再看滞后相（指非故障相中）C相继电器的情况。在 \dot{I}_{OM} 过零瞬间，由（29）、（32）式可得：

$$\left[\frac{\dot{U}'_{MC}}{\dot{U}_K^c} \right]_{\dot{I}_{OM} \text{过零时}} = \left[\frac{\dot{U}_{MC \cdot 0} - \dot{I}_{fh \cdot C} Z_1 l_{zd}}{\dot{I}_{fh \cdot C} Z_1 l_{zd}} + \frac{\dot{I}_{OM}}{\dot{I}_{fh \cdot C}} \times \left\{ \frac{\frac{K_{lf}}{K_{of}} |Z_{M1}| - |Z_{M0}|}{|Z_1| l_{zd}} + \frac{\frac{K_{lf}}{K_{of}} - (1 + 3K)}{1} \right\} \right]_{\text{取瞬时值}} \dots\dots\dots (35)$$

式中 $\dot{U}_{MC \cdot 0}$ —故障发生前母线M上的C相电压。

很明显，（35）式中的第一项与（34）式中的第一项有完全相同的幅角；另外，由图8可见， $\dot{I}_{fh \cdot C}$ 与参考向量 \dot{I}_0 （ \dot{I}_{OM} ）间的相位差随负荷电流也在很大范围内变化。因此同B相继电器相同， $\left[\frac{\dot{U}'_{MC}}{\dot{U}_K^c} \right]_{\dot{I}_{OM} \text{过零时}}$ 的值有可能出现负值，也即C相继电器也有可能发生动作。

综上所述，经 R_{gd} 单相接地故障时，故障继电器能正确测量故障点的距离，并不受 R_{gd} 和负荷电流的影响，而非故障相继电器的动作情况，受到负荷电流、系统运行方式、接地点位置等的影响，可能也发生动作。为此，继电器应采用选相元件闭锁之。

再分析经 R_{gd} 两相接地故障时的情况。设在图1的D点BC两相经 R_{gd} 发生了接地故障，则故障继电器的两个相补偿电压分别求得为：

$$\dot{U}'_{MB} = \frac{3 \dot{I}_{OM} R_{gd}}{K_{of}} + \left[\dot{I}_{fh \cdot B} + \dot{I}_{B1 \cdot M} + \dot{I}_{B2 \cdot M} + (1 + 3K) \dot{I}_{OM} \right] Z_1 (l_d - l_{zd})$$

$$\dot{U}'_{MC} = \frac{3 \dot{I}_{OM} R_{gd}}{K_{of}} + \left[\dot{I}_{fh \cdot C} + \dot{I}_{C1 \cdot M} + \dot{I}_{C2 \cdot M} + (1 + 3K) \dot{I}_{OM} \right] Z_1 (l_d - l_{zd})$$

另外，求得故障继电器的两个极化电压分别为：

$$\dot{U}_K^b = \left[\dot{I}_{fh \cdot B} + \dot{I}_{B1 \cdot M} + \dot{I}_{B2 \cdot M} + (1 + 3K) \dot{I}_{OM} \right] Z_1 l_{zd}$$

$$\dot{U}_K^c = \left[\dot{I}_{fh \cdot C} + \dot{I}_{C1 \cdot M} + \dot{I}_{C2 \cdot M} + (1 + 3K) \dot{I}_{OM} \right] Z_1 l_{zd}$$

在 \dot{I}_{OM} 过零瞬间，由以上几式可得：

$$\left[\frac{\dot{U}'_{MB}}{\dot{U}_K^b} \right]_{\dot{I}_{OM} \text{过零时}} = \frac{l_d - l_{zd}}{l_{zd}} \qquad \left[\frac{\dot{U}'_{MC}}{\dot{U}_K^c} \right]_{\dot{I}_{OM} \text{过零时}} = \frac{l_d - l_{zd}}{l_{zd}}$$

可见，故障相的两个继电器也能正确测量故障点的距离（应注意 \dot{I}_{OM} 和 \dot{I}_0 不完全同相的影响）。

4. 继电器的保护性能：

由图6可见，继电器动作的必要条件是存在零序电流分量，故继电器不反应相间故

障, 仅反应接地故障。

对保护区内的单相接地故障, 根据前述分析, 故障相继电器能正确测量接地故障点的距离, 并不受接地电阻和负荷电流的影响, 即使在单相重合闸的线路上, 一侧单相跳闸后, 另一侧的故障相继电器不受影响仍能正确测量故障点的距离; 对于非故障相的继电器, 分析表明了可能发生误动作, 因此继电器应采用选相元件闭锁之。

为防止选相元件受接地电阻的影响, 在中、长线路上可采用相电流差突变量选相元件进行选相; 在短线路上, 大电源侧可用相电流元件作选相元件, 小电源侧可用相电压元件作选相元件。

对保护区内的两相接地故障, 因故障相各序电流的相位不同, 由于 \dot{I}_{OM} 与 \dot{I}_0 不完全同相而引起的保护区的伸长, 可能是明显的。经过计算, 若保护区伸长会危及继电器动作的选择性, 则当两个选相元件动作时, 可解除接地距离继电器的工作。

另外, 当反向接地故障时, 由于相应的极化电压变号, 致使继电器误判为区内接地故障, 失去方向性而发生误动作。为此, 还需采用零序功率方向元件进行闭锁。

5. 电力系统振荡时继电器的行为:

当电力系统全相振荡时, 即使振荡中心落在保护区内, 因无零序分量, 继电器可靠不动作, 即继电器不反应全相振荡。

当电力系统出现非全相振荡时, 系统中出现零序电流分量, 无论是全相运行线路还是非全相运行线路上的零序功率方向继电器, 均判为正方向接地故障, 故动作; 分析表

明, 以 $\left[\frac{\dot{U}'_{MA}}{\dot{U}_K^a} \right]_{\dot{I}_{OM} \text{过零时}} \leq 0$ 、 $\left[\frac{\dot{U}'_{MB}}{\dot{U}_K^b} \right]_{\dot{I}_{OM} \text{过零时}} \leq 0$ 、 $\left[\frac{\dot{U}'_{MC}}{\dot{U}_K^c} \right]_{\dot{I}_{OM} \text{过零时}} \leq 0$ 、为动作

判据的分相式接地距离继电器动作与否, 与两侧电势摆开的角度、系统运行方式、继电器整定阻抗等因素有关, 故在非全相振荡时有误动作的可能; 对于起闭锁作用的选相元件, 如采用相电压继电器或相电流继电器, 因在非全相振荡时有可能发生误动作, 因此在这种情况下, 为防止接地距离继电器的误动作, 可通过振荡闭锁控制。如采用相电流差突变量选相元件闭锁, 因非全振荡时不会误动作, 故接地距离继电器不必经振荡闭锁控制。

五、几点结论

1. 在中性点直接接地的110千伏、220千伏或更高电压级的电力系统中, 架空线路和变压器的零序阻抗角是相近的。正因为有这个关系, 在短线路上接地故障时, 线路两端的零序电流和故障点的零序电流实际上是同相的; 在长线路上接地故障时, 线路一端的零序电流和末端附近故障点的零序电流间的相位差不会超过 $2^\circ \sim 3^\circ$ 。

2. 在 \dot{I}_{OM} 过零瞬间, 以每相的补偿电压 (\dot{U}'_{MA} 、 \dot{U}'_{MB} 、 \dot{U}'_{MC}) 和每相的极化电压 (\dot{U}_K^a 、 \dot{U}_K^b 、 \dot{U}_K^c) 出现相反极性动作而构成的分相式接地距离继电器, 即以

$$\left[\frac{\dot{U}_{MA}}{U_K^a} \right]_{I_{OM} \text{过零时}} \leq 0, \quad \left[\frac{\dot{U}'_{MB}}{U_K^b} \right]_{I_{OM} \text{过零时}} \leq 0, \quad \left[\frac{\dot{U}'_{MC}}{U_K^c} \right]_{I_{MO} \text{过零时}} \leq 0 \quad \text{为动作判据的接地距离}$$

继电器，能正确测量单相接地故障的距离，具有稳定的保护区，而不受接地电阻和负荷电流的影响，具有良好的保护单相接地故障的性能，且不受被保护线路长度的影响，解决了短线路接地保护中的困难问题。

3. 以上述原理构成的分相式接地距离继电器，在反方向接地故障时会失去方向性，因而需用零序功率方向元件闭锁；在单相接地故障时，非故障相的接地距离继电器可能会误动作，故需选相元件闭锁。可见，这种接地距离继电器并不能独立工作。

4. 上述原理构成的分相式接地距离继电器不反应全相振荡，但非全相振荡时可能发生误动作，若用来闭锁的选相元件不是相电流差突变量选相元件，则继电器需经振荡闭锁控制。

5. 这种分相式接地距离继电器具有动作速度快、结构简单、调试方便的特点。

主要参考资料：

1. 南京工学院：《电力系统》1980。
2. 沈阳变压器厂：《变压器试验》1973。