

多互感输电线路接地距离保护 I 段 整定计算的研究

湖北省电力局中调所 龚序 刘江平

摘要 本文对运行在多互感输电线路上的接地距离保护 I 段，在相邻线路出口发生接地故障，可能超越误动的原因，从理论上进行了较详细的分析，提出并应用增值阻抗的概念导出了避免这种误动的整定计算方法。

1 问题的提出

对于中性点直接接地运行的电网，当多回相互之间具有零序互感的输电线路（简称：多互感输电线路）上采用接地距离保护，由于存在着较大的零序互感，因此在相邻线路出口发生接地故障，接地距离保护 I 段按部颁《110~220kV 电网继电保护及安全自动装置运行条例》（简称：“条例”）整定计算，就可能发生超越误动。本文就多互感输电线路接地距离保护 I 段如何整定计算这个问题来进行研究。

2 多互感输电线路零序阻抗的求取

图 1 为 n 回多互感输电线路的零序序网图（仅画出一相）。

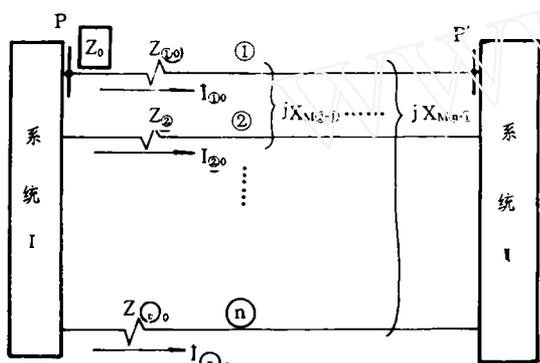


图 1

图 1 中：

①②……①——分别表示 n 回多互感输电线路；

$Z_{10}Z_{20}……Z_{n0}$ ——分别表示 n 回多互感输电线路的零序阻抗；

$I_{10}I_{20}……I_{n0}$ ——分别表示 n 回多互感输电线路中流过的零序电流（电流的流向为假定方向）；

P、P' ——分别表示线路①两端的母线；

$jX_{M_{21}}、jX_{M_{31}}……jX_{M_{n1}}$ ——分别为②~①回输电线路与线路①之间的零序互感；

零序网络 I、II ——具有变压器中性点直接接地的零序网络；

在图 1 中有一点必须指出：为了分析问题的明了起见，其它线路之间存在的零序互感我们未表示出来。

则线路①PP' 两端的零序电压为：

$$U_{pp'} = I_{10}Z_{10} \pm 3I_{20}jX_{M_{21}} \pm 3I_{30}jX_{M_{31}} \pm \dots \pm 3I_{n0}jX_{M_{n1}} \quad (1)$$

上式中：

$\pm 3I_{20}jX_{M_{21}}；\pm 3I_{30}jX_{M_{31}}；\dots；\pm 3I_{n0}jX_{M_{n1}}$ ，当②~①回线路零序电流的实际流向与其假定方向一致时取“+”号，反之取“-”号；

“ $3I_0jX_M$ ”代表②~①回三相输电线路对线路①的零序互感抗电势。

线路①总的零序阻抗为：

$$Z_{\text{①}0\Sigma} = U_{\text{opp}} / I_{\text{①}0} \\ = Z_{\text{①}0} \pm 3jX_{M\text{②}\text{①}} I_{\text{②}0} I_{\text{①}0} / I_{\text{①}0} \pm 3jX_{M\text{③}\text{①}} I_{\text{③}0} / I_{\text{①}0} \pm \dots \pm 3jX_{M\text{n}\text{①}} I_{\text{n}0} / I_{\text{①}0}$$

令：

$C_2 = I_{\text{②}0} / I_{\text{①}0}$ ； $C_3 = I_{\text{③}0} / I_{\text{①}0}$ ； $\dots C_n = I_{\text{n}0} / I_{\text{①}0}$ ，则上式可写为：

$$Z_{\text{①}0\Sigma} = Z_{\text{①}0} \pm 3j (C_2 X_{M\text{②}\text{①}} + C_3 X_{M\text{③}\text{①}} + \dots + C_n X_{M\text{n}\text{①}}) \quad (2)$$

假设 n 回输电线路的零序阻抗角相同，且连接它们两端系统的零序阻抗角亦相等，则 $C_2 C_3 \dots C_n$ 均为自然数。(2) 式可写为：

$$Z_{\text{①}0\Sigma} = Z_{\text{①}0} \pm 3j (C_2 X_{M\text{②}\text{①}} + C_3 X_{M\text{③}\text{①}} + \dots + C_n X_{M\text{n}\text{①}})$$

又令：

$jX_{\text{OM}\Sigma} = 3j (C_2 X_{M\text{②}\text{①}} + C_3 X_{M\text{③}\text{①}} + \dots + C_n X_{M\text{n}\text{①}})$ ，则线路①总的零序阻抗表达式最终可写为：

$$Z_{\text{①}0\Sigma} = Z_{\text{①}0} \pm jX_{\text{OM}\Sigma} \quad (3)$$

从 (3) 式不难看出，②~①回输电线路的零序互感，对线路①影响最严重为如下两种方式：

(1). ②~①回输电线路实际流过的零序电流与线路①零序电流的方向一致，则线路①总的零序阻抗为：

$$Z_{\text{①}0\Sigma} = Z_{\text{①}0} + jX_{\text{OM}\Sigma}$$

(2). ②~①回输电线路实际流过的零序电流与线路①零序电流的方向相反，则线路①总的零序阻抗为：

$$Z_{\text{①}0\Sigma} = Z_{\text{①}0} - jX_{\text{OM}\Sigma}$$

下面，我们就选取以上两种方式来分析、研讨零序互感对接地距离保护 I 段的影响。

3 零序互感引起接地距离 I 段超越的分析

假设图 1 中：PP' 线路的正序阻抗 $Z_{\text{①}1} = |Z_{\text{①}1}| \angle \varphi$ ；P 侧装有接地距离保护。

接地距离保护电压相角动作方程为：

$$90^\circ \leq \arg \frac{\dot{u}_\varphi^*}{\dot{u}_\varphi - \dot{u}_{\varphi j}} \leq 270^\circ \quad (4)$$

上式中：

\dot{u}_φ^* —— 装置的参考电压（带记忆），其值为： $(I_\varphi + 3KI_0) K' Z_{1(x)}$ ；

\dot{u}_φ —— 装置的测量电压，其值为： $(I_\varphi + 3KI_0) Z_{1(x)}$ 。

$\dot{u}_{\varphi j}$ —— 装置的模拟电压，其值为： $(I_\varphi + 3KI_0) Z_{1j}$ 。

保护的电压相角动作方程也可表示为：

$$90^\circ \leq \arg \frac{(I_\varphi + 3KI_0) K' Z_{1(x)}}{(I_\varphi + 3KI_0) Z_{1(x)} - (I_\varphi + 3KI_0) Z_{1j}} \leq 270^\circ \quad (5)$$

将 (5) 式分子、分母同除以 $(I_\varphi + 3KI_0)$ ，可得保护阻抗动作方程：

$$90^\circ \leq \arg \frac{Z_{1(x)}^*}{Z_{1(x)} - Z_{1j}} \leq 270^\circ \quad (6)$$

上式中：

$Z_{1(x)}^*$ —— 装置动作的参考阻抗，其值为： $K' Z_{1(x)}$ ， K' 为记忆常数；

$Z_{1(X)}$ ——故障时装置的测量阻抗；

Z_{1j} ——装置的整定阻抗，或称：“模拟阻抗”。

当 P 侧接地距离 I 段整定值为 0.7 的线路正序阻抗即： $Z_{1j} = 0.7Z_{Q1}$ ，其阻抗动作特性圆见图 2。我们就相邻线路出口 G 点发生各类金属性接地故障来分析。

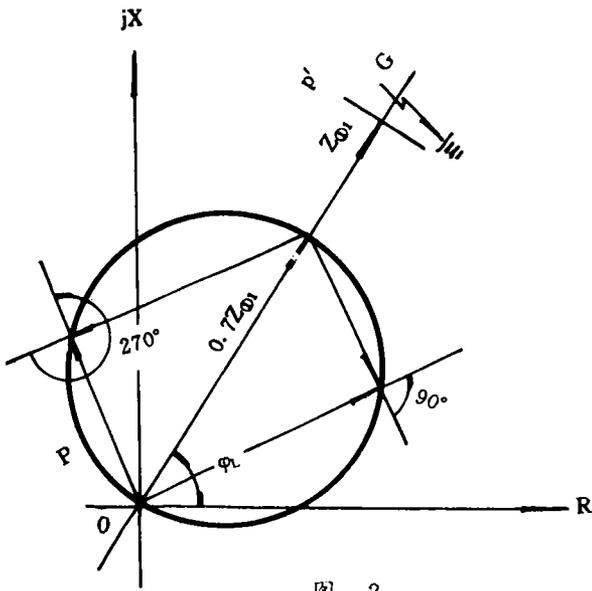


图 2

假设：线路①正序阻抗等于负序阻抗；
流入故障点正、负、零序电流分别为： $I_{D\Sigma 1}$ 、 $I_{D\Sigma 2}$ 、 $I_{D\Sigma 0}$ ；线路①的正序、零序电流分支系数分别为： C_{PP1} 、 C_{PP0} ，且正、负序分支系数相等。则线路①P 侧流入故障点的正、负、零序电流分别为：

$$\begin{cases} I_{Q11} = C_{PP1} \cdot I_{D\Sigma 1} \\ I_{Q12} = C_{PP1} \cdot I_{D\Sigma 2} \\ I_{Q10} = C_{PP0} \cdot I_{D\Sigma 0} \end{cases}$$

为了分析问题的明了起见，在下面的分析过程中，均忽略短路点 G 至 P' 母线的距离。

(I) 流过①~②线路的零序电流与其假定正向一致；

保护安装处 P 母线上所测量到的 A

相故障残压为：

$$\begin{aligned} \dot{u}_{\varphi A} &= I_{Q11}Z_{Q1} + I_{Q12}Z_{Q2} + I_{Q10}(Z_{Q0} + jX_{0M\Sigma}) \\ &= I_{Q11}Z_{Q1} + I_{Q12}Z_{Q2} + I_{Q10}Z_{Q1} - I_{Q10}Z_{Q1} + I_{Q10}(Z_{Q0} + jX_{0M\Sigma}) \\ &= (I_{Q11} + 3KI_{Q10})Z_{Q1} + I_{Q10}jX_{0M\Sigma} \end{aligned} \quad (7)$$

上式中：

I_{Q11} ——线路①P 侧 A 相的短路电流，其值为： $I_{1A1} + I_{1A2} + I_{1A0}$ ；

K——零序电流补偿系数，其值为： $(Z_{Q0} - Z_{Q1}) / 3Z_{Q1}$ 。

P 侧接地距离保护 A 相的测量阻抗为：

$$\begin{aligned} Z_{1(X)} &= Z(A) \\ &= \dot{u}_{\varphi A} / (I_{Q11} + 3KI_{Q10}) \\ &= Z_{Q1} + I_{Q10}jX_{0M\Sigma} / (I_{Q11} + 3KI_{Q10}) \end{aligned} \quad (8)$$

如果线路①及其两端系统的正、负、零序阻抗角相同，则单相接地故障， I_{Q10} 与 $(I_{Q11} + 3KI_{Q10})$ 同相即： $\arg [I_{Q10} / (I_{Q11} + 3KI_{Q10})] = 0^\circ$ ，如果令： $D = I_{Q10} / (I_{Q11} + 3KI_{Q10})$ ； $Z_{0M\Sigma(A)} = jDX_{0M\Sigma}$ ，则 (8) 式可写为：

$$\begin{aligned} Z_{1(X)} &= Z(A) \\ &= Z_{Q1} + jDX_{0M\Sigma} \\ &= Z_{Q1} + Z_{0M\Sigma(A)} \end{aligned} \quad (9)$$

(II) 流过②~③线路的零序电流与其假定正向相反：

保护安装处 P 母线上所测量到的 A 相故障残压为：

$$\dot{u}_{\varphi A} = (I_{Q11} + 3KI_{Q10})Z_{Q1} - I_{Q10}jX_{0M\Sigma} \quad (10)$$

P 侧接地距离保护 A 相的测量阻抗为：

$$\begin{aligned} Z_{1(X)} &= Z_{(A)} \\ &= Z_{\text{①}} - Z_{0M\Sigma(A)} \end{aligned} \quad (11)$$

以 $(I_{\text{①}\varphi A} + 3KI_{\text{①}\varphi 0})$ 为参考矢量，根据 (9)、(11) 式可作出故障时接地距离保护 A 相的测量阻抗矢量图 3。

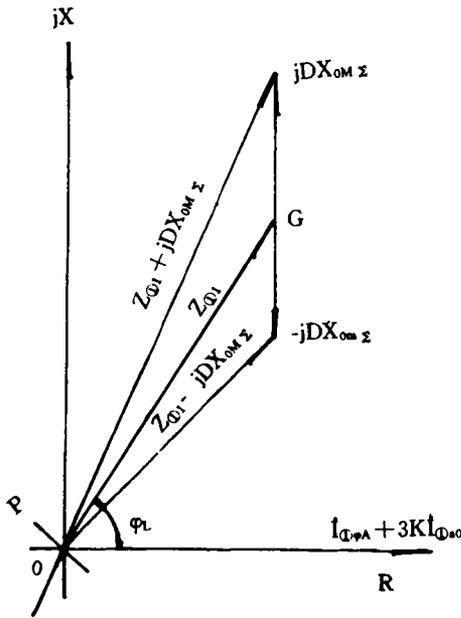


图 3

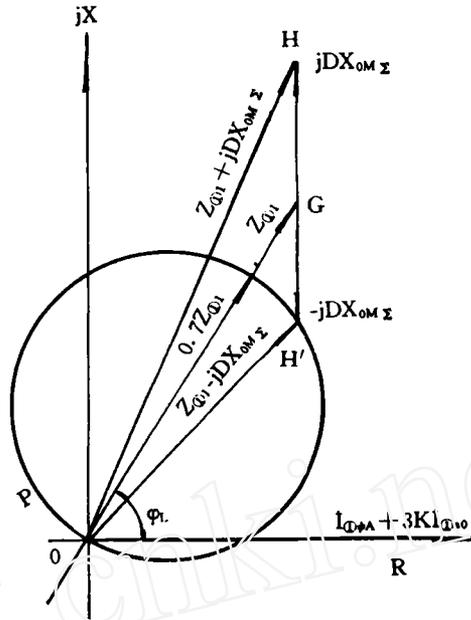


图 4

将 G 点发生单相接地故障，接地距离保护 A 相所测量到的阻抗作于其 I 段整定的动作圆中，见图 4。我们可以发现：

(1) G 点发生单相接地故障，接地距离保护测量到的阻抗是：故障点至该保护安装处的线路正序阻抗与由零序互感产生的一个阻抗 $Z_{0M\Sigma(A)}$ （以下简称：互感增值阻抗）的叠加。

(2) G 点发生单相接地故障，②~③回输电线路在线路①中产生的零序互感抗，对其线路正序阻抗来说为纯感性或纯容性。

(3) 当互感增值阻抗为纯容性，将使线路①P 侧的接地距离 I 段的保护范围发生超越，当互感增值为纯感性，将使线路①P 侧的接地距离 I 段的保护范围缩短。

(4) 当互感增值阻抗为纯容性，其值大于 H' 点，便进入线路①P 侧的接地距离 I 段动作区，在相邻线路开关跳闸的同时，本线路开关也将越级误动。

BC 相发生接地故障：

系统在各种运行方式下发生两相接地故障时，流过线路①的各序电流大小无非如下三种情况：

- 1) $I_{\text{①}a1} = -(I_{\text{①}a2} + I_{\text{①}a0})$
- 2) $I_{\text{①}a1} > -(I_{\text{①}a2} + I_{\text{①}a0})$
- 3) $I_{\text{①}a0} > -(I_{\text{①}a1} + I_{\text{①}a2})$ (注： $I_{\text{①}a2}$ 与 $I_{\text{①}a1}$ 极性相反，且 $|I_{\text{①}a2}|$ 恒小于 $|I_{\text{①}a1}|$ 。

我们就以第一种情况来作出 BC' 相发生金属性接地故障时，流过线路①P 侧故障相电流矢量图。见图 5 所示。

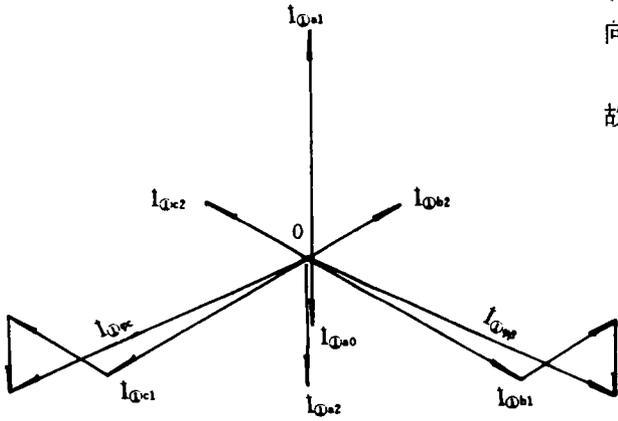


图 5

(I) 流过线路①~③的零序电流与其假定正向一致

保护安装处 P 母线上所测量到的 B 相故障残压为:

$$\begin{aligned} \dot{u}_{\varphi B} &= I_{Qb1}Z_{Q1} + I_{Qb2}Z_{Qr} + I_{Qb0}(Z_{Q0} + jX_{0M\Sigma}) \\ &= (I_{Q\varphi B} + 3KI_{Qa0})Z_{Q1} + I_{Qa0}jX_{0M\Sigma} \\ \text{P 侧接地距离保护 B 相的测量阻抗为:} \\ Z_{1(X)} &= Z_{(B)} \\ &= \dot{u}_{\varphi B} / (I_{Q\varphi B} + 3KI_{Qa0}) \\ &= Z_{Q1} + I_{Qa0}jX_{0M\Sigma} / (I_{Q\varphi B} + 3KI_{Qa0}) \end{aligned} \quad (12)$$

当选 I_{Qa0} 为参考矢量即:

$I_{Qa0} = |I_{Qa0}| \angle 0^\circ$, 根据图 5 可写出 P 侧 B 相故障电流表达式为:

$$\begin{aligned} I_{Q\varphi B} &= I_{Qa0} + |I_{Qa1}| \angle 60^\circ + |I_{Qa2}| \angle 120^\circ \\ &= I_{Qa0} + |I_{Qa1}| \left(\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) + |I_{Qa2}| \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \end{aligned}$$

令: $Y_1 = |I_{Qa1}| / |I_{Qa0}|$; $Y_2 = |I_{Qa2}| / |I_{Qa0}|$, 则上式可写为:

$$\begin{aligned} I_{Q\varphi B} &= I_{Qa0} + I_{Qa0}Y_1 \left(\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) + I_{Qa0}Y_2 \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \\ &= I_{Qa0} [1 + (Y_1 - Y_2) / 2 + j\sqrt{3} (Y_1 + Y_2) / 2] \\ &= \frac{1}{2} I_{Qa0} [(2 + Y_1 - Y_2) + j\sqrt{3} (Y_1 + Y_2)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{I_{Qa0}jX_{0M\Sigma}}{I_{Q\varphi B} + 3KI_{Qa0}} &= \frac{I_{Qa0}jX_{0M\Sigma}}{\frac{1}{2}I_{Qa0}[(2 + Y_1 - Y_2) + j\sqrt{3}(Y_1 + Y_2)] + 3KI_{Qa0}} \\ &= \frac{2jX_{0M\Sigma}}{(2 + 6K + Y_1 - Y_2) + j\sqrt{3}(Y_1 + Y_2)} \\ &= \frac{2X_{0M\Sigma}}{\sqrt{(2 + 6K + Y_1 - Y_2)^2 + 3(Y_1 + Y_2)^2}} \angle 90^\circ - \tan^{-1} \frac{\sqrt{3}(Y_1 - Y_2)}{2 + 6K + Y_1 - Y_2} \end{aligned} \quad (13)$$

令:

$$\tan^{-1} \frac{\sqrt{3}(Y_1 + Y_2)}{2 + 6K + Y_1 - Y_2} = \beta; \quad \frac{2X_{0M\Sigma}}{\sqrt{(2 + 6K + Y_1 - Y_2)^2 + 3(Y_1 + Y_2)^2}} = |Z_{0M\Sigma(B)}|;$$

$$|Z_{0M\Sigma(B)}| \angle 90^\circ - \beta = Z_{0M\Sigma(B)}$$

则 13 式可写为:

$$\begin{aligned} \frac{I_{Qa0}jX_{0M\Sigma}}{I_{Q\varphi B} + 3KI_{Qa0}} &= |Z_{0M\Sigma(B)}| \angle 90^\circ - \beta \\ &= Z_{0M\Sigma(B)} \end{aligned} \quad (14)$$

上式中:

$(90^\circ - \beta)$ 为 jI_{Qa0} 超前 $(I_{Q\varphi B} + 3KI_{Qa0})$ 的角度, 亦即 $Z_{0M\Sigma(B)}$ 超前 $(I_{Q\varphi B} + 3KI_{Qa0})$ 的角度。

因为发生两相接地故障等式: $Y_1 - Y_2 > 0$ 恒成立, 则有:

$$0^\circ < \operatorname{tg}^{-1} \frac{\sqrt{3}(Y_1 + Y_2)}{2 + 6K + Y_1 - Y_2} < 90^\circ$$

或: $0 < \beta < 90^\circ$

互感增值阻抗 $Z_{0M\Sigma(B)}$ 相对于 $(I_{\text{D}\varphi B} + 3KI_{\text{D}a0})$ 的角度变化范围为:

$$0^\circ < (90^\circ - \beta) < 90^\circ$$

将 (14) 式代入 (12) 式, 则故障时 P 侧接地距离 B 相所测量到的阻抗为:

$$\begin{aligned} Z_{(B)} &= Z_{\text{D}1} + |Z_{0M\Sigma(B)}| \angle 90^\circ - \beta \\ &= Z_{\text{D}1} + Z_{0M\Sigma(B)} \end{aligned} \quad (15)$$

保护安装处 P 母线上所测量到的 C 相故障残压为:

$$\begin{aligned} \dot{u}_{\varphi C} &= I_{\text{D}C1} Z_{\text{D}1} + I_{\text{D}C2} Z_{\text{D}1} + I_{\text{D}a0} (Z_{\text{D}0} + jX_{0M\Sigma}) \\ &= (I_{\text{D}\varphi C} + 3KI_{\text{D}a0}) Z_{\text{D}1} + I_{\text{D}a0} jX_{0M\Sigma} / (I_{\text{D}\varphi C} + 3KI_{\text{D}a0}) \end{aligned}$$

P 侧接地距离保护 C 相的测量阻抗为:

$$\begin{aligned} Z_{1(X)} &= Z_{(C)} \\ &= \dot{u}_{\varphi C} / (I_{\text{D}\varphi C} + 3KI_{\text{D}a0}) \\ &= Z_{\text{D}1} + I_{\text{D}a0} jX_{0M\Sigma} / (I_{\text{D}\varphi C} + 3KI_{\text{D}a0}) \end{aligned} \quad (16)$$

当选 $I_{\text{D}a0}$ 为参考矢量即: $I_{\text{D}a0} = |I_{\text{D}a0}| \angle 0^\circ$, 根据图 5 P 侧线路①C 相故障电流表达式可写为:

$$\begin{aligned} I_{\text{D}\varphi C} &= I_{\text{D}a0} + |I_{\text{D}a0}| \angle -60^\circ + |I_{\text{D}a2}| \angle -120^\circ \\ &= I_{\text{D}a0} + Y_1 I_{\text{D}a0} \left(\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) + Y_2 I_{\text{D}a0} \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \\ &= \frac{1}{2} I_{\text{D}a0} [(2 + Y_1 - Y_2) - j\sqrt{3}(Y_1 + Y_2)] \\ \frac{I_{\text{D}a0} jX_{0M\Sigma}}{I_{\text{D}\varphi C} + 3KI_{\text{D}a0}} &= \frac{2jX_{0M\Sigma}}{(2 + 6K + Y_1 - Y_2) - j\sqrt{3}(Y_1 + Y_2)} \\ &= \frac{2X_{0M\Sigma}}{\sqrt{(2 + 6K + Y_1 - Y_2)^2 + 3(Y_1 + Y_2)^2}} \angle 90^\circ - \operatorname{tg}^{-1} \frac{\sqrt{3}(Y_1 + Y_2)}{2 + 6K + Y_1 - Y_2} \end{aligned} \quad (17)$$

上式中:

$$\operatorname{tg}^{-1} \frac{\sqrt{3}(Y_1 + Y_2)}{2 + 6K + Y_1 - Y_2} = -\beta$$

令:

$|Z_{0M\Sigma(C)}| \angle 90^\circ + \beta = Z_{0M\Sigma(C)}$ ($|Z_{0M\Sigma(B)}| = |Z_{0M\Sigma(C)}|$) 则 (17) 式可写为:

$$\begin{aligned} \frac{I_{\text{D}a0} jX_{0M\Sigma}}{I_{\text{D}\varphi C} + 3KI_{\text{D}a0}} &= |Z_{0M\Sigma(C)}| \angle 90^\circ + \beta \\ &= Z_{0M\Sigma(C)} \end{aligned} \quad (18)$$

上式中:

$(90^\circ + \beta)$ 为 $jI_{\text{D}a0}$ 超前 $(I_{\text{D}\varphi C} + 3KI_{\text{D}a0})$ 的角度, 亦即 $Z_{0M\Sigma(C)}$ 超前 $(I_{\text{D}\varphi C} + 3KI_{\text{D}a0})$ 的角度。

因为: $0^\circ < \beta < 90^\circ$, 则互感增值阻抗 $Z_{0M\Sigma(C)}$ 相对于 $(I_{\text{D}\varphi C} + 3KI_{\text{D}a0})$ 的角度变化范围为:

$$90^\circ < (90^\circ + \beta) < 180^\circ$$

将 (18) 式代入 (16) 式, 则故障时接地距离 C 相所测量到的阻抗为:

$$\begin{aligned} Z_{(C)} &= Z_{\text{D}1} + |Z_{0M\Sigma(C)}| \angle 90^\circ + \beta \\ &= Z_{\text{D}1} + Z_{0M\Sigma(C)} \end{aligned} \quad (19)$$

(II) 流过线路②~③的零序电流与其假定正向相反

保护安装处 P 侧所测量到的 B 相故障残压为:

$$\begin{aligned} u_{\varphi B} &= I_{\text{Dh1}} Z_{\text{D1}} + I_{\text{Dh2}} Z_{\text{D1}} + I_{\text{Dh0}} (Z_{\text{D0}} - jX_{0M\Sigma}) \\ &= (I_{\text{D}\varphi B} + 3KI_{\text{D}\varphi 0}) Z_{\text{D1}} - I_{\text{D}\varphi 0} jX_{0M\Sigma} \end{aligned}$$

P 侧接地距离保护 B 相的测量阻抗为:

$$\begin{aligned} Z_{1(X)} &= Z_{(B)} \\ &= u_{\varphi B} / (I_{\text{D}\varphi B} + 3KI_{\text{D}\varphi 0}) \\ &= Z_{\text{D1}} - I_{\text{D}\varphi 0} jX_{0M\Sigma} / (I_{\text{D}\varphi B} + 3KI_{\text{D}\varphi 0}) \\ &= Z_{\text{D1}} - |Z_{0M\Sigma(B)}| \angle 90^\circ - \beta \\ &= Z_{\text{D1}} - Z_{0M\Sigma(B)} \end{aligned} \quad (20)$$

保护安装处 P 侧所测量到的 C 相故障残压为:

$$\begin{aligned} \dot{u}_{\varphi C} &= I_{\text{Dc1}} Z_{\text{D1}} + I_{\text{Dc2}} Z_{\text{D1}} + I_{\text{Dc0}} (Z_{\text{D0}} - jX_{0M\Sigma}) \\ &= (I_{\text{D}\varphi C} + 3KI_{\text{D}\varphi 0}) Z_{\text{D1}} - I_{\text{D}\varphi 0} jX_{0M\Sigma} \end{aligned}$$

P 侧接地距离保护 C 相的测量阻抗为:

$$\begin{aligned} Z_{1(X)} &= Z_{(C)} \\ &= \dot{u}_{\varphi C} / (I_{\text{D}\varphi C} + 3KI_{\text{D}\varphi 0}) \\ &= Z_{\text{D1}} - I_{\text{D}\varphi 0} jX_{0M\Sigma} / (I_{\text{D}\varphi C} + 3KI_{\text{D}\varphi 0}) \\ &= Z_{\text{D1}} - |Z_{0M\Sigma(C)}| \angle 90^\circ + \beta \\ &= Z_{\text{D1}} - Z_{0M\Sigma(C)} \end{aligned} \quad (21)$$

根据 (15)、(20)、及 (19)、(21) 式可分别作出 B、C 相发生金属性接地故障，线路① P 侧接地距离测量阻抗图，见图 6、图 7 所示。图中阴影部分为 $Z_{0M\Sigma(B)}$ ($Z_{0M\Sigma(C)}$) 或 $-Z_{0M\Sigma(B)}$ ($-Z_{0M\Sigma(C)}$) 的动作区。

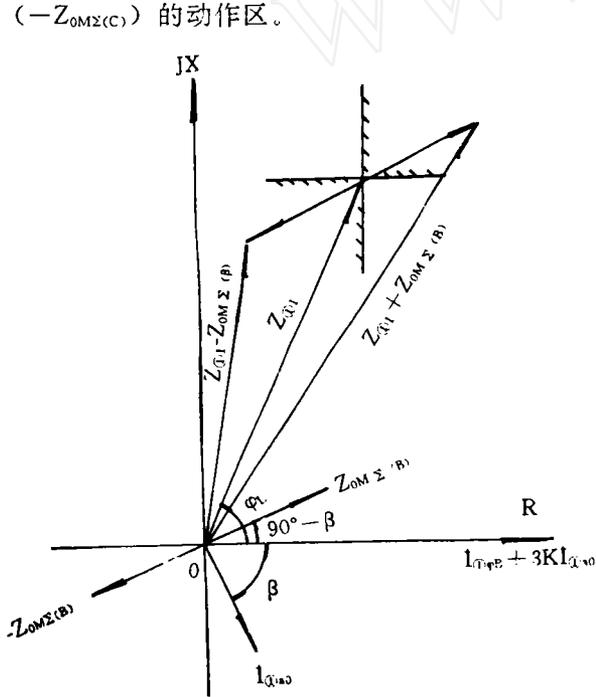


图 6

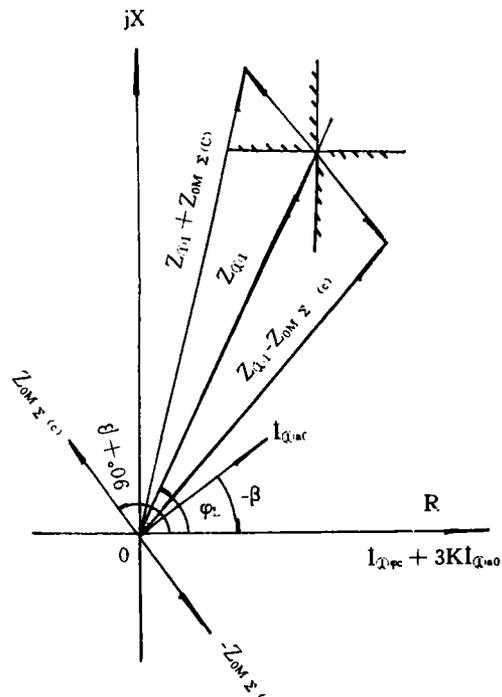


图 7

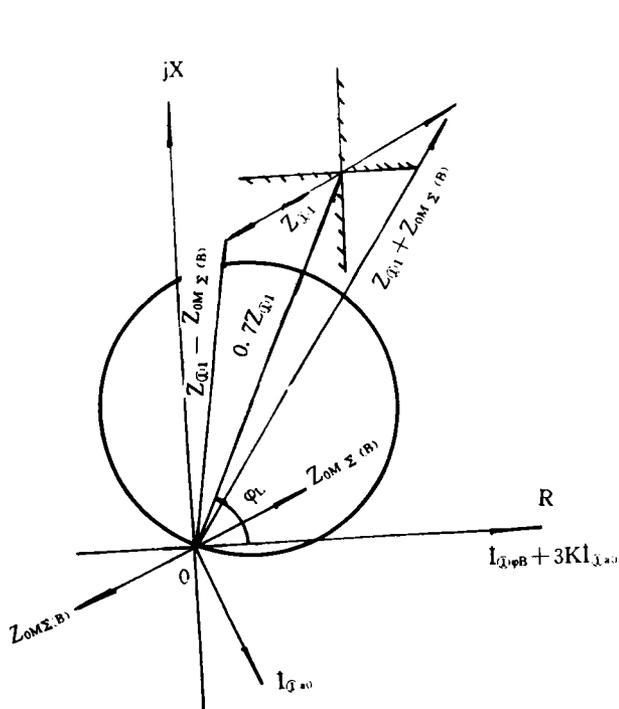


图 8

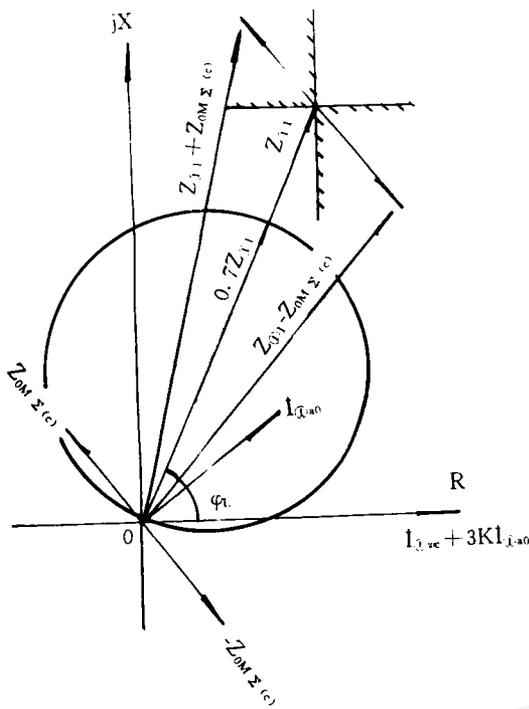


图 9

将线路①G点发生BC相接地故障，P侧接地距离所测量到的阻抗分别画于其I段整定动作圆中，见图8及图9，我们可以发现：

(1) G点发生两相接地故障，接地距离保护故障相的测量阻抗中均增加了一个由零序互感产生的增值阻抗 $Z_{0M\Sigma}$ 。

(2) G点发生两相接地故障时，②~③回输电线路在线路①中产生的零序互感抗，对其正序阻抗来说，不再是一个纯容抗或纯感抗，而是一个阻容性或阻感性的阻抗。

(3) 当互感增值阻抗为阻容性，线路①P侧的接地距离保护I段范围可能发生超越，当互感增值阻抗为阻感性、线路①P侧的接地距离保护I段范围可能发生缩短。

(4) G点发生两相接地故障时，故障超前相比故障落后相发生超越误动的可能性更大。

4 接地距离I段整定公式的确定

4.1 整定公式的确定：

根据前面的分析，运行在多互感输电线路上的接地距离保护整定计算公式，应考虑零序互感的影响，则该保护第一段的整定计算公式为：

$$Z_{1j} = K_k (Z_{Q1} - Z_{0M\Sigma})$$

$$\varphi_j = \varphi_1$$

上式中：

K_k ——可靠系数。一般取：0.7~0.8；

Z_{Q1} ——本线路正序阻抗；

$Z_{0M\Sigma}$ ——本线路零序互感产生的增值阻抗；

φ_j ——接地距离保护整定的动作灵敏角；

φ_1 ——本线路的正序阻抗角。

4.2 方式选择原则：

根据运行在多互感输电线路上的接地距离保护，区外故障发生超越误动的必要条件，接地距离保护第一段整定计算方式的选择原则为：本线路末端发生接地故障时，尽可能使得流过其它零序互感输电线路的零序电流与本线路流过的零序电流方向相反且最大。换句话说：在本线路末端发生接地故障时，必须保证本线路互感增值阻抗为负值。

4.3 $-Z_{0M\Sigma}$ 的选取：

我们已经知道，运行在多互感输电线路上的接地距离保护，在相同的系统运行方式条件下，区外同一点发生各类接地故障，即使它们的互感增值阻抗均为负值，但存在着角度差。为了计算方便起见，我们视它们为同相位，且与本线路正序阻抗角相差 180° ，则 $-Z_{0M\Sigma}$ 求取方式如下：

单相接地故障：

$$\begin{cases} -Z_{0M\Sigma} = DX_{0M\Sigma} \\ D = I_{\text{①}0} / (I_{\text{①}\varphi} + 3KI_{\text{①}0}) \\ X_{0M\Sigma} = 3(C_2X_{M\text{②}\text{①}} + C_3X_{M\text{③}\text{①}} + \dots + C_nX_{M\text{⑤}\text{①}}) \\ C_2 = I_{\text{②}0} / I_{\text{①}0}; C_3 = I_{\text{③}0} / I_{\text{①}0}; \dots; C_n = I_{\text{⑤}0} / I_{\text{①}0} \\ K = (Z_{\text{①}0} - Z_{\text{①}1}) / 3Z_{\text{①}1} \end{cases}$$

上联式中：

$I_{\text{①}0}$ —— 流经本线路的零序电流；

$I_{\text{②}0} \sim I_{\text{⑤}0}$ —— 流经与本线路存在着零序互感线路的零序电流。当流向与本线路一致时取正值，反之取负值。

$I_{\text{①}\varphi}$ —— 本线路故障相的短路电流；

$Z_{\text{①}0}$ 、 $Z_{\text{①}1}$ —— 本线路的零序及正序阻抗。

$X_{M\text{②}\text{①}}; X_{M\text{③}\text{①}} \dots X_{M\text{⑤}\text{①}}$ —— ②~⑤回线路与线路①之间存在的零序互感（单相）。

两相接地故障：

$$\begin{cases} -Z_{0M\Sigma} = 2X_{0M\Sigma} / \sqrt{(2+6K+Y_1-Y_2)^2 + 3(Y_1+Y_2)^2} \\ Y_1 = |I_{\text{①}1}| / |I_{\text{①}0}| \\ Y_2 = |I_{\text{①}2}| / |I_{\text{①}0}| \\ X_{0M\Sigma} \text{ 与单相接地故障同} \\ C_2, C_3, \dots, C_n \text{ 与单相接地故障同} \end{cases}$$

上联式中：

$I_{\text{①}1}$ 、 $I_{\text{①}2}$ 、 $I_{\text{①}0}$ —— 分别为本线路正、负、零序电流。

$-Z_{0M\Sigma}$ 应选取单相及两相接地故障绝对值大者。

按照上述方法整定出来的接地距离保护 I 段定值，比按考虑互感增值阻抗实际角度整定计算出来的定值略小点，但其可靠性增加了，这在实际运行中是允许的。

5 接地距离保护 I 段整定举例：

图 10 为湖北电网中某一实际四回互感输电线路的供电系统。线路①P 侧装有接地距离保护。

图中：

线路①的正、零序阻抗分别为 $Z_{\text{①}1} = 8.19\Omega$ 、 $Z_{\text{①}0} = 21.37\Omega$ ，线路正序阻抗角为 $\varphi_1 = 76^\circ$ ；

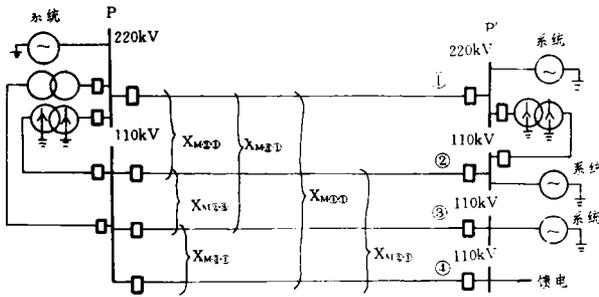


图 10

线路①~④回之间的零序互感分别为： $X_{M②①}=X_{M①②}=5.29\Omega$ ， $X_{M③①}=X_{M①③}=5.29\Omega$ ， $X_{M④①}=X_{M①④}=13\Omega$ ， $X_{M②③}=X_{M③②}=20.7\Omega$ ， $X_{M③①}=X_{M①③}=5.28\Omega$ ， $X_{M②①}=X_{M①②}=5.28\Omega$ （各输电线路之间零序互感参数来源于理论计算。）；线路①零序电流补偿系数 $K = (Z_{10} - Z_{01}) / 3Z_{01} = (21.37 - 8.19) / 3 \times 8.19 \approx 0.536$ 。求线路①P侧接地距离保护 I 段整定值。

已知：

按本文介绍的方式选择原则，P' 母线上发生金属性接地故障，经微机计算出来的有关故障电流如下：

单相接地故障：

$$I_{QF} = 5731A; I_{Q0} = 1996A; I_{Q2} = -152A; I_{Q3} = -149A; I_{Q4} = -1257A.$$

两相接地故障：

$$I_{Q0} = 1792A; I_{Q2} = 2325A; I_{Q1} = 4000A;$$

$$I_{Q3} = -137A; I_{Q4} = -134A; I_{Q5} = -1150A;$$

5.1 互感增值阻抗 $-Z_{0M\Sigma}$ 的求取：

单相接地故障：

$$D = I_{Q0} / (I_{QF} + 3KI_{Q0})$$

$$= 1996 / (5731 + 3 \times 0.536 \times 1996)$$

$$= 0.223$$

$$X_{0M\Sigma} = 3 (C_2 X_{M②①} + C_3 X_{M③①} + \dots + C_n X_{M④①})$$

$$= 3 \left(\frac{-152}{1996} \times 5.29 + \frac{-149}{1996} \times 5.29 + \frac{-1257}{1996} \times 13 \right)$$

$$\approx -26.9\Omega$$

$$-Z_{0M\Sigma} = DX_{0M\Sigma}$$

$$= 0.223 \times (-26.9\Omega)$$

$$\approx -6\Omega$$

两相接地故障：

$$X_{0M\Sigma} = 3 (C_2 X_{0M②①} + C_3 X_{0M③①} + \dots + C_n X_{0M④①})$$

$$= 3 \left(\frac{-137}{1792} \times 5.29 + \frac{-134}{1792} \times 5.29 + \frac{-1150}{1792} \times 13 \right)$$

$$= -27.4\Omega$$

$$Y_1 = |I_{Q1}| / |I_{Q0}|$$

$$= 4000 / 1792$$

$$= 2.23$$

$$Y_2 = |I_{Q2}| / |I_{Q0}|$$

$$= 2325 / 1792$$

$$= 1.3$$

当前高压线路保护中的几个焦点问题

电力部南京自动化研究所 朱声石

1 关于测距式的距离保护

微机保护可以进行数值计算, 不仅计算出电流、电压还可算出阻抗。因此很自然想到把测距功能和保护功能合在一起, 这就是测距式的距离保护, 但是测距属于仪表的功能, 保护属于继电器的功能。众所周知仪表和继电器的输出对输入关系曲线和图 1 所示, 两者完全不同。为了测距准确, 不论故障点的远近, 在故障发生后都要精确计算, 因而不能以特高速切除出口故障。如果采用继电器特性, 在大容量电站出口故障时继电器的动作判据很容易得到满足, 从而可以特高速切除出口故障, 也就是说可以得到如图 2 所示的理想的轻微反时限特性。这种特性既能快速切除近处故障, 又能有效地避免超越。目前测距原理的距离保护一般都采用缩短保护范围和简化数字滤波的方法(称为 0 段和 I 段)快速切除故障。这种方法虽然改善了保护的性能但却降低了测距的精度, 仍然未能将两者圆满地结合起来。因此微机保护的主程序应当优先实现保护功能, 仅在发出跳闸命令后才转入测距程序, 由于测距无需快速, 完全可以采用精确算法以保证测距的精度。

$$\begin{aligned} -Z_{0M\Sigma} &= 2X_{0M\Sigma} / \sqrt{(2+6K+Y_1-Y_2)^2 + 3(Y_1+Y_2)^2} \\ &= 2 \times (-27.4\Omega) / \sqrt{(2+6 \times 0.536+2.23-1.3)^2 + 3(2.23+1.3)^2} \\ &= -6.32\Omega \end{aligned}$$

取: $-Z_{0M\Sigma} = -6\Omega$

5.2 接地距离保护 I 段整定:

$$Z_{I1} = K_k (Z_{\text{①1}} - Z_{0M\Sigma})$$

当取 $K_k = 0.75$, 则:

$$\begin{aligned} Z_{I1} &= 0.75 \times (8.19 - 6) \\ &= 1.64\Omega \end{aligned}$$

$$\varphi_{I1} = \varphi_{\text{①1}} = 76^\circ$$

结论:

a) 接地距离保护 I 段整定值为 1.64Ω , 其动作灵敏角为 76° 。

b) 线路①P 侧接地距离保护, 在最严重的运行方式下线末 P' 母线上发生单相接地故障, 由于受②~①回输电线路零序互感的影响较强, 该保护 I 段要保证不发生超越误动, 其保护 I 段的整定值几乎无保护范围。

c) 线路①P 侧接地距离保护 I 段, 若按目前部颁“条例”要求来整定: $Z_{I1} = K_k Z_{\text{①1}} = (0.7 \sim 0.8) Z_{\text{①1}} = 5.733 \sim 6.552\Omega$, 在相邻线路出口发生接地故障时, 本线路均有越级误动的可能。