

用电压矢量图法分析距离继电器的动作行为

西安交通大学 朱 声 石

自从多相补偿距离继电器问世以来就开始用电压矢量图法分析距离继电器的动作行为。但这些分析只限于单侧电源线路上的直接短路（过渡电阻为零）。文献 1 提出的分析方法可以适用于双侧电源线路上经过渡电阻（由零到无限大）短路的情况。当线路两侧母线之间无其他连系（如平行线的另一回线或环网等）时文献 1 所提出的方法十分简单。本文提出对于线路两侧母线之间有其他连系时的作图法，实际上适用于任何结构的网络。因此，本文是对文献 1 的补充，所以关于“电压矢量图法”的基本问题读者可阅读文献 1，除必要的地方本文不再重复。

假设系统图如图 1 所示。我们分析的是线路 MN 的 M 侧保护。F 点为短路点。在短路点的电流为 I_F 。流经保护的短路电流附加分量为 $C I_F$ ，流经电源的短路电流附加分量为 $C_S I_F$ 。C, C_S 就是短路附加状态（或空载状态）的电流分配系数。0, 1, 2 各序电流的分配系数表示为 C_0, C_1, C_{0s} ,

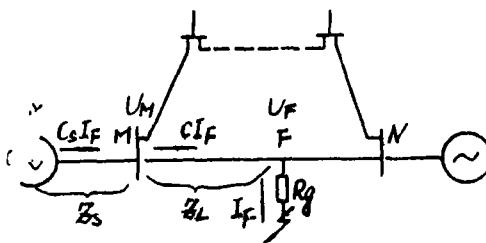


图 1 系统图

C_{1s} 等等。由于在母线 M 和 N 之间有其他连系，故 $C \neq C_S$ 。显然图 1 为一般的情况，有普遍的适用性。

以下介绍具体计算和作图的步骤和方法。

一、求电压矢量图的步骤

1. 作短路前的电压矢量图，求出短路点 F 的电压 $U_{F(0)}$ 。
2. 假设短路处的过渡电阻 R_g 的值，求短路点的电压 $U_F = R_g I_F$ 。实际上作出 R_g 由 $0 \rightarrow \infty$ 时 U_F 矢量末端的变化轨迹。
3. 求短路后的母线电压 U_M
4. 若母线 M 到短路点 F 之间的线路正序阻抗为 Z_{1L} ，则 $U_M - U_F = Z_{1L}(I_Y + k I_0)$ 。 I_Y 为故障相相电流， I_0 为线路零序电流， k 为零序补偿系数

$$k = \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{Z_{1L}}$$
。 Z_{0L} 为线路零序阻抗。
5. 求补偿电压 $U' = U_M - Z_Y(I_Y + k I_0)$ 。
6. 根据继电器的比相条件判断继电器是否动作。

作为文献1的补充,本文主要提出求母线电压 U_M 的方法。其次是在出口短路时补偿电压 U' 的求法。为了便于读者阅读,将适当重复短路点电压 U_F 的求法。为了简单起见仅分析单相和两相短路接地。三相及两相短路比较简单故从略。

二、求短路点电压 U_F 文献1中有详述,仅扼要叙述如下:

1. A相短路接地 假设接地电阻为 R_g ,则

$$I_{Fg} = 3 I_{OF} = \frac{U_{F|O|}}{\frac{2Z_{1FF} + Z_{OFF}}{3} + R_g} = \frac{U_{F|O|}}{Z_{1FF} + R_g} \quad (1)$$

接地电阻上压降为

$$U_{Fg} = 3 I_{OF} R_g = \frac{R_g}{Z_{1FF} + R_g} U_{F|O|} \quad (2)$$

式中 $U_{F|O|}$ ——短路前短路点F的电压

Z_{1FF} 、 Z_{OFF} ——归算到短路点F的系统正序及零序阻抗。

$Z_{1FF} = \frac{2Z_{1FF} + Z_{OFF}}{3}$ ——归算到短路点F的系统自阻抗。

2. BC两相短路接地 假设相电弧电阻为 $R_b = R_c = R$, 接地电阻为 R_g 。计算分两步进行。第一步是两相短路不接地。此时短路点的短路电流为:

$$I_{FC}^{(2)} = -I_{Fb}^{(2)} = \frac{1}{Z_{1FF} + R} \left(j \frac{\sqrt{3}}{2} U_{F|O|} \right) \quad (3)$$

电弧电阻 R_b 和 R_c 上的压降 $U_{Fb}^{(2)}$ 和 $U_{Fc}^{(2)}$ 为

$$U_{Fc}^{(2)} = -U_{Fb}^{(2)} = \frac{R}{Z_{1FF} + R} \left(j \frac{\sqrt{3}}{2} U_{F|O|} \right) \quad (4)$$

第二步是在两相短路的状态又发生接地短路。此时流过 R_g 的电流是 $3 I_{OF}$ 。此电流在 R_b 和 R_c 中均分,故可认为 $3 I_{OF}$ 流过 $\frac{1}{2} R + R_g$ 。当 R_g 断开时F点电压为 $-\frac{1}{2} U_{F|O|}$,因此有,

$$I_{OF} = \frac{-\frac{1}{2} U_{F|O|}}{\frac{Z_{1FF} + 2Z_{OFF}}{2} + (1.5R + 3R_g)} \quad (5)$$

接地电流 $3 I_{OF}$ 在BC两相的短路点 F_b 和 F_c 形成电压 $U_{Fb}^{(0)} = U_{Fc}^{(0)}$

$$U_{Fb}^{(0)} = U_{Fc}^{(0)} = \frac{1.5R + 3R_g}{\frac{Z_{1FF} + 2Z_{OFF}}{2} + 1.5R + 3R_g} \left(-\frac{1}{2} U_{F|O|} \right) \quad (6)$$

将两种状态叠加起来,得两相短路接地时短路点 F_b 和 F_c 的电压为

$$\left. \begin{aligned} U_{Fb} &= U_{Fb}^{(2)} + U_{Fb}^{(0)} \\ U_{Fc} &= U_{Fc}^{(2)} + U_{Fc}^{(0)} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

三、求母线电压 U_M

由短路电流求母线电压的一般表达式为

$$\begin{aligned} U_{Ma} &= E_{Ma} - Z_{1S} I_{1S} - Z_{2S} I_{2S} - Z_{0S} I_{0S} \\ U_{Mb} &= E_{Mb} - a^2 Z_{1S} I_{1S} - a Z_{2S} I_{2S} - Z_{0S} I_{0S} \\ U_{Mc} &= E_{Mc} - a Z_{1S} I_{1S} - a^2 Z_{2S} I_{2S} - Z_{0S} I_{0S} \end{aligned} \quad (8)$$

而各序电流为

$$\begin{aligned} I_{1S} &= I_{10} + C_{1S} I_{1F} \\ I_{2S} &= C_{2S} I_{2F} \\ I_{0S} &= C_{0S} I_{0F} \end{aligned} \quad (9)$$

式中 I_{10} ——短路前流经保护的电流

以下分别讨论单相及两相短路接地两种情况

1. A相单相短路接地

由短路边界条件有

$$I_{1F} = I_{2F} = I_{0F} \quad (10)$$

代入式(8)可得

$$\begin{aligned} U_{Ma} &= U_{Ma|0} - (2C_{1S} Z_{1S} + C_{0S} Z_{0S}) I_{0F} \\ U_{Mb} &= U_{Mb|0} - (C_{0S} Z_{0S} - C_{1S} Z_{1S}) I_{0F} \\ U_{Mc} &= U_{Mc|0} - (C_{0S} Z_{0S} - C_{1S} Z_{1S}) I_{0F} \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $U_{Ma|0}$, $U_{Mb|0}$, $U_{Mc|0}$ 分别为短路前母线A、B、C三相电压

由式(2)在矢量图上已找到 $3R_g I_{0F}$, 和 $3Z_{1FF} I_{0F} = U_{F|0} - 3R_g I_{0F}$ 的矢量, 所以按阻抗比例即可求出式(8)、(9)中电 I_{0F} 在各阻抗上压降的矢量。因而可作出 U_M 的矢量。

2. BC两相短路接地

求短路边界条件。此时短路电流包含两相短路分量

$$\begin{aligned} I_{Fa}^{(2)} &= 0, \\ I_{Fb}^{(2)} &= -I_{Fc}^{(2)}, \end{aligned} \quad (12)$$

和接地短路分量

$$\begin{aligned} I_{Fa}^{(0)} &= 0, \\ I_{Fb}^{(0)} &= I_{Fc}^{(0)} = \frac{3}{2} I_{0F} \end{aligned} \quad (13)$$

将上述各分量分解为对称分量, 并相加得

$$\begin{aligned} I_{1F} &= I_{1F}^{(2)} - \frac{1}{2} I_{0F} \\ I_{2F} &= I_{2F}^{(2)} - \frac{1}{2} I_{0F} \\ I_{0F} &= I_{0F} \end{aligned} \quad (14)$$

其中两相短路分量有

$$I_{1F}^{(2)} + I_{2F}^{(2)} = 0. \quad (15)$$

将短路边界条件代入式(9), 和式(8), 经整理可得

$$\left. \begin{aligned} U_{Ma} &= U_{Ma|O|} - (C_{OS} Z_{OS} - C_{1S} Z_{1S}) I_{OF} \\ U_{Mb} &= U_{Mb|O|} - C_{1S} Z_{1S} I_{Fb}^{(2)} - \left(\frac{1}{2} C_{1S} Z_{1S} + C_{OS} Z_{OS} \right) I_{OF} \\ U_{Mc} &= U_{Mc|O|} - C_{1S} Z_{1S} I_{Fc}^{(2)} - \left(\frac{1}{2} C_{1S} Z_{1S} + C_{OS} Z_{OS} \right) I_{OF} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

由式(4)在矢量图上找到 $R I_{Fb}^{(2)}$ 和 $Z_{1FF} I_{Fb}^{(2)}$ 的矢量。由式(6)在矢量图上找到 $(1.5R + 3R_g) I_{OF}$ 和 $\frac{Z_{1FF} + 2Z_{OFF}}{2} I_{OF}$ 的矢量。因而不难按式(16)作出 U_M 的矢量。

四、求补偿电压 U'

求得 U_M 和 U_F 后则可求得矢量

$$Z_{1L}(I_F + kI_0) = U_M - U_F \quad (17)$$

于是按阻抗比例关系很容易求得补偿电压

$$U' = U_M - Z_Y(I_F + kI_0) \quad (18)$$

需要补充的是当在出口短路时 $Z_L = 0$, M 和 F 点重合, 此时如何求 U' 。

三相补偿电压为

$$\left. \begin{aligned} U'_a &= U_{Ma} - Z_Y(I_A + kI_0) \\ U'_b &= U_{Mb} - Z_Y(I_B + kI_0) \\ U'_c &= U_{Mc} - Z_Y(I_C + kI_0) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

在计算中应用叠加原理分解为短路前分量和短路附加分量。以 A 相为例

$$U'_a = U_{Ma|O|} + \Delta U_{Ma} - Z_Y I_{A|O|} - Z_Y [\Delta I_1 + I_2 + (1+k)I_0] \quad (20)$$

在计算时可将第一、二两项合并

$$U'_a = U_{Ma} - Z_Y I_{A|O|} - Z_Y [\Delta I_1 + I_2 + (1+k)I_0] \quad (21)$$

对于 A 相单相短路接地有

$$U'_a = U_{Ma} - Z_Y I_{A|O|} - Z_Y [2C_1 + (1+k)C_0] I_{OF} \quad (22)$$

式中 U_{Ma} 为母线电压已求出。由短路前的电压矢量图上可找到 $I_{A|O|}$ 在线路 MN 的阻抗上的压降, 从而按比例可求出 $Z_Y I_{A|O|}$ 的矢量。由短路点的电压矢量图可求出 $Z_Y [2C_1 + (1+k)C_0] I_{OF}$ 的矢量。

在计算时还可以将式(20)中的第一、三两项合并,

$$U'_a = U_{Ya|O|} + \Delta U_{Ma} - Z_Y [\Delta I_1 + I_2 + (1+k)I_0] \quad (23)$$

对于 A 相单相短路接地, 考虑到式(1)的关系

$$U'_a = U_{Ya|O|} - \{ 3Z_{1FF} + [2C_1 + (1+k)C_0] Z_Y \} I_{OF} \quad (24)$$

当 Z_Y 小于线路阻抗时 $U_{Ya|O|}$ 即短路前保护范围末端 Y 点的 A 相电压。当 Z_Y 大于线路阻抗时 $U_{Ya|O|}$ 按 $U_{Ma|O|} - Z_Y I_{A|O|}$ 算出。上式中第二项由 I_{OF} 产生的压降的矢量的

方法前已多次述过。

按上述方法导出的结果如下

1. A相短路接地

$$\left. \begin{aligned} U'_a &= U_{Ya|0|} - \{3Z_{1FF} + [2C_1 + (1+k)C_0] Z_Y\} I_{OF} \\ U'_b &= U_{Yb|0|} - \{3Z_{MFF} + [(1+k)C_0 - C_1] Z_Y\} I_{OF} \\ U'_c &= U_{Yc|0|} - \{3Z_{MFF} + [(1+k)C_0 - C_1] Z_Y\} I_{OF} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

式中 $Z_{MFF} = \frac{Z_{OFF} - Z_{1FF}}{3}$ 为系统归算到短路点F的相间等效互阻抗。

2. BC两相短路接地

$$\left. \begin{aligned} U'_a &= U_{Ya|0|} - [(1+k)C_0 - C_1] Z_Y I_{OF} \\ U'_b &= U_{Yb|0|} - (Z_{1FF} + C_1 Z_Y) I_{Fb}^2 - \left\{ \frac{1}{2} Z_{1FF} + Z_{OFF} + \right. \\ &\quad \left. + \left[\frac{1}{2} C_1 + (1+k)C_0 \right] Z_Y \right\} I_{OF} \\ U'_c &= U_{Yc|0|} - (Z_{1FF} + C_1 Z_Y) I_{Fc}^2 - \left\{ \frac{1}{2} Z_{1FF} + Z_{OFF} + \right. \\ &\quad \left. + \left[\frac{1}{2} C_1 + (1+k)C_0 \right] Z_Y \right\} I_{OF} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

显然,这种方法也适用于线路两侧母线M和N之间无其他连系的情况。那时 $C_s = C$ 。和文献1的方法相比,需要多计算正序电流的分配系数 C_1 。

此文王梅义同志已阅,特此致谢。

参 考 文 献

1. 王梅义 距离继电器动作行为的分析继电器 1979、4、