电力系统接地短路故障点的分析计算方法

湖北省电力中心调度所　　王广学

提　要

本文主要论述了在已知电力系统中接地故障元件两侧或单侧零序电流时，分析计算故障点的位置。尤其对有互感耦合的元件，进行了详尽的分析。

通过计算机编程计算，证明本方法精确度高、简单，使用方便、灵活可靠。

一、问题的提出

电力系统的故障绝大部分是接地短路故障，如果是永久性故障，需尽快排除故障点，恢复供电，即使是瞬间故障，故障线路也可能带着创伤。对电力系统安全运行有一定的威胁。远距离输电线路，往往要经过地形较复杂的地区，找到并排除故障点是很困难的，也给巡线工人带来了不少困难，尤其是要耗费大量的时间，对电力系统经济运行有一定的影响。故应解决这一课题，减轻巡线工人的负担，提高电力系统的运行水平。

目前国内高压电网均装设有故障录波器，可给我们提供足够的运算数据。由于电力系统零序网络运行方式变化较小，故采用零序电流对故障点的位置进行分析计算。

以下对已知故障线路两侧或单侧零序电流分别进行分析。

---

4. 生产厂家和教科书上，论述系统参数频率变化对继电保护的影响时，常给出最简单的公式 $Z_0=\frac{Z_{Zd}}{\cos\beta}$。从本文可知，这只是假定$K_{K1}=K_{K2}$，$K_{Y1}=K_{Y2}$时的特例。从本文分析可知，此时圆心轨迹双曲线两分支合拢为一直线，且正好是准线，实际上由于继电器制造误差，理论上不可能全等，故准确分析应为本文（４—２）式所述。

5. 生产上需要的继电器特性是多种多样的，例如为了躲避负荷电流，可利用本文图1（b）的 $\beta=0\sim90°$的双曲线左上分支的阻抗特性圆，因其特性向左上倾斜，又如发电机失磁保护需要第三，四象限内的阻抗特性圆，也可用变参数来实现。

6. 本文分析仍采用经典理论来论证，因为这样才能获得特性的全部轨迹圆形，其它分析方法是无能为力的，虽然这样，对于$Z_0=\frac{\sqrt{a^2+b^2-2ab\cos\beta}}{c+\cos\beta}$的作图，还是比较困难的，欢迎有兴趣的同志，共同来参加研究，以取得更简洁明瞭的公式和作图方法，这是作者所万分企望的。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

二、巳知故障线路两侧零序电流量

在故障线路两侧故障录波都完好的情况下，分析计算故障点的位置与接地故障类型，过渡电阻无关，只与故障线路两侧零序电流的比值以及零序网络的结构有关。对于零序网络，我们采用零序网的结点阻抗元素分析。

如图１所示线路中间发生故障，可求得故障点K的自阻抗为：

$$Z_{kk(i)} = (1-r)^2 Z_{ii(i)} + r^2 Z_{ij(i)} + 2r(1-r) Z_{ij(i)} + r(1-r) X_{ij(i)} \quad \cdots\cdots(1)$$

式中：下角标（i）代表各序的意思　即i＝０，１，２。

Z_{ii}，Z_{jj}，Z_{ij}分别为i、j两点的自阻抗和转移阻抗，X_{ij}为线路的支路阻抗。

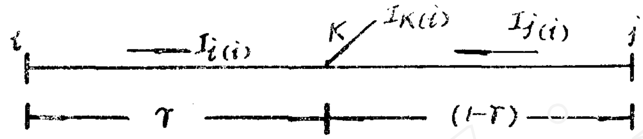

图１

故障点k和结点i之间的转移阻抗为：

$$Z_{ki(i)} = (1-r) Z_{ii(i)} + r Z_{ij(i)} \quad \cdots\cdots(2)$$

在故障点k的总注入电流为：

$$I_{k(i)} = -(I_{i(i)} + I_{j(i)}) \quad \cdots\cdots(3)$$

１、一般无互感支路

众所周知，在故障点k注入$I_{K(0)}$电流，可求得$I_{i(0)}$如下：

$$I_{i(0)} = (Z_{ki(0)} - Z_{KK(0)}) I_{K(0)} / (r x_{ij(0)}) \quad \cdots\cdots(4')$$

将（１）、（２）代入（４）有：

$$\begin{aligned} I_{i(0)} &= [(1-r) Z_{ii(0)} - r Z_{jj(0)} + (2r-1) Z_{ij(0)} - (1-r) x_{ij(0)}] I_{K(0)} / x_{ij(0)} \\ &= [Z_{ii(0)} - Z_{ij(0)} - x_{ij(0)} - (Z_{ii(0)} + Z_{jj(0)} - 2 Z_{jj(0)} - x_{ii(0)}) r] \cdot I_{K0} / x_{ij(0)} \end{aligned} \quad \cdots\cdots(4)$$

$$令：\begin{cases} A = Z_{ii(0)} + Z_{jj(0)} - 2 Z_{ij(0)} - x_{ij(0)} \\ B = Z_{ii(0)} - Z_{ij(0)} - x_{ij(0)} \end{cases} \quad \cdots\cdots(5)$$

代入（４）得：

$$I_{i(0)} \cdot x_{ij(0)} / I_{K(0)} = B - Ar$$

将（３）式代入得：

$$\begin{aligned} r &= \left[B + \frac{1}{1+\eta} x_{ij(0)}\right. / A \\ &= C/A \end{aligned} \quad \cdots\cdots(6)$$

其中：

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\begin{cases}\eta = I_{j(0)}/I_{i(0)} \\ C = B + x_{ij(0)}/(1+\eta)\end{cases}$$

这样就求出了故障点的位置。

2、互感平行线路：

如图2是一组任意回互感平行线路，假定故障线路是其中的一回，我们不妨定为i j结点连接的支路。我们解求出结点i、j、 $\underline{p}$、$\underline{q}$ 与故障点k的转移阻抗为：

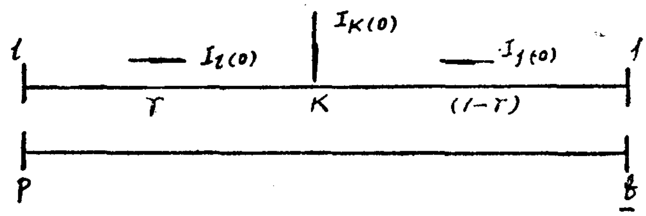

图 2

$$\left.\begin{aligned} Z_{ki(0)} &= (1-r)Z_{ii(0)} + rZ_{ij(0)} \\ Z_{kj(0)} &= (1-r)Z_{ij(0)} + rZ_{jj(0)} \\ \underline{Z}_{Kp(0)} &= (1-r)\underline{Z}_{jp(0)} + r\underline{Z}_{jp(0)} \\ \underline{Z}_{Kq(0)} &= (1-r)\underline{Z}_{iq(0)} + r\underline{Z}_{iq(0)} \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

式中：$\underline{Z}_{Kp(0)}$、$\underline{Z}_{Kq(0)}$是故障k对p、q两组结点转移阻抗列矩阵。

$\underline{Z}_{ip}$、$\underline{Z}_{iq}$、$\underline{Z}_{jp}$、$\underline{Z}_{jq}$ 分别是结点i、j对p、q两组结点的转移阻抗列向量。

字母下有横线的、代表是矩阵。

由如图2写出支路电压方程：

$$\begin{cases} v_{i(0)} - v_{K(0)} = r x_{ij(0)} I_{i(0)} + r\underline{x}_{ij-pq(0)}\underline{I}_{pq(0)} \\ v_{j(0)} - v_{K(0)} = (1-r)x_{ij(0)} I_{i(0)} + (1-r)\underline{x}_{ij-pq(0)}\underline{I}_{pq(0)} \\ \underline{v}_{p(0)} - \underline{v}_{q(0)} = r\underline{x}_{pq-ij(0)} I_{i(0)} - (1-r)\underline{x}_{pq-ij(0)} I_{j(0)} + r\underline{x}_{pq-pq(0)}\underline{I}_{pq(0)} \\ I_{j(0)} + I_{i(0)} + I_{K(0)} = 0 \end{cases}$$

$$\cdots\cdots (8)$$

式中：$x_{ij(0)}$——故障线路的零序支路阻抗

$\underline{x}_{ij-pq(0)}$ ——故障线路与本组其它支路间互阻抗行向量。

$\underline{x}_{pq-ij(0)}$——故障线路与本组其它支路间互阻抗列向量：即$\underline{x}_{ij-pq(0)} = \underline{x}_{pq-ij(0)}$

$\underline{x}_{pq-pq(0)}$——非故障互感之路的支路自阻抗方阵。

将（8）式前3个方程整理得：

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$
\begin{cases}
v_{i(o)} - v_{j(o)} = v_{ij(o)} = x_{ij(o)}\left[(1-r)I_{k(o)} + I_{i(o)}\right] + \\
\underline{v}_{p(o)} - \underline{v}_{q(o)} = \underline{v}_{pq(o)} = \underline{x}_{pq-ij(o)}\left[(1-r)I_{K(o)} + I_{ij(o)}\right] +
\end{cases}
$$

$$
\begin{cases}
+\underline{x}_{ij-pq(o)}\,\underline{I}_{pq(o)} \\
+\underline{x}_{pq-pq(o)}\,\underline{I}_{pq(o)}
\end{cases}
\qquad \cdots\cdots(9)
$$

将（9）式写成矩阵形式为：

$$
\begin{pmatrix} v_{ij(o)} \\ \underline{v}_{pq(o)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{ij(o)} & x_{ij-pq(o)} \\ \underline{x}_{pq-ij(o)} & \underline{x}_{pq-pq(o)} \end{pmatrix}
$$

$$
\begin{pmatrix} (1-r)I_{k(o)} + I_{i(o)} \\ I_{pq(o)} \end{pmatrix} \qquad \cdots\cdots(10')
$$

$$
= \underline{x}\ \underline{I}
$$

从方程（10′）不难发现，$\underline{x}$矩阵就是互感支路的支路阻抗矩阵，$x_{ij(o)}$、$\underline{x}_{ij-pq(o)}$、$\underline{x}_{pq-ij(o)}$、$\underline{x}_{pq-pq(o)}$为$\underline{x}$的子矩阵或分块矩阵。

从方程（10′）不难求得：

$$
I_{i(o)} + (1-r)I_{K(o)} = y_{ij(o)}v_{ij(o)} + \underline{y}_{ij-pq(o)}\underline{v}_{pq(o)} \qquad (10)
$$

其中：

$$
\begin{pmatrix} y_{ij(o)} & y_{ij-pq(o)} \\ \underline{y}_{pq-ij(o)} & y_{pq-pq(o)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{ij(o)} & \underline{x}_{ij-pq(o)} \\ \underline{x}_{pq-ij(o)} & \underline{x}_{pq-pq(o)} \end{pmatrix}^{-1} \qquad (11)
$$

因为：

$$
\left.\begin{aligned}
v_{ji(o)} &= v_{kj(o)} - v_{kj(o)} = (Z_{ki(o)} - Z_{kj(o)})I_{K(o)} \\
\underline{v}_{pq(o)} &= \underline{v}_{Kp(o)} - \underline{v}_{Kq(o)} = (\underline{Z}_{Kp(o)} - \underline{Z}_{Kq(o)})I_{k(o)}
\end{aligned}\right\} \qquad (11')
$$

将（7）代入（11′）得：

$$
\begin{cases}
v_{ij(o)} = \left[(1-r)Z_{ii(o)} + rZ_{ij(o)} - (1-r)Z_{ij(o)}\right. \\
\underline{v}_{pq(o)} = \left[(1-r)\underline{Z}_{jp(o)} + r\underline{Z}_{jp(o)} - (1-r)\underline{Z}_{iq(o)}\right.
\end{cases}
$$

$$
\begin{cases}
\left.-rZ_{jj(o)}\right]I_{k(o)} \\
\left.+r\underline{Z}_{jq(o)}\right]I_{k(o)}
\end{cases}
\qquad \cdots\cdots(12)
$$

将（12）代入（10）整理可得：

$$
\begin{aligned}
\frac{I_{i(o)}}{I_{k(o)}} + (1-r) = {} & \left[y_{ij(o)}(Z_{ii(o)} - Z_{ij(o)}) + \right. \\
& \left. + \underline{y}_{ij-pq(o)}(\underline{Z}_{jp(o)} - \underline{Z}_{jq(o)})\right] \times (1-r) \\
& + r\left[y_{ij(o)}(Z_{ij(o)} - Z_{jj(o)}) + \underline{y}_{ij-pq(o)}(\underline{Z}_{jp(o)}\right. \\
& \left. - Z_{iq(o)})\right] \qquad \cdots\cdots(13)
\end{aligned}
$$

令：

$$
\begin{cases}
I_{io}' = y_{ij(o)}(Z_{ii(o)} - Z_{ij(o)}) + \\
I_{jo}' = y_{ii(o)}(Z_{ij(o)} - Z_{jj(o)}) +
\end{cases}
$$

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\begin{cases} +\underline{y}_{ij-pq(0)}(\underline{Z}_{ip(0)}-\underline{Z}_{iq(0)}) \\ +\underline{y}_{ij-pq(0)}(Z_{jp(0)}-\underline{Z}_{jq(0)}) \end{cases} \quad \cdots\cdots(14)$$

可以证明I_{io}'、I_{jo}'的物理意义是：分别在结点i和j注入单位电流，流经i—j支路的电流。

将（14）代入（10）得：

$$-1/(1+\eta)+(1-r)=(1-r)I_{io}'+rI_{jo}'$$

故可求得

$$r=(1-1/(1+\eta)-I_{io}')/(1-I_{io}'+I_{jo}') \quad \cdots\cdots(15)$$

这样，在已知故障线路两侧零序电流的情况下可求解出故障点的位置。

三、只知单侧零序电流：

在电力系统中往往由于某种原因使故障录波一侧不完整，或一侧根本没起动录波，故应解决这种情况下故障点位置求取的问题。

因为只知一侧零序电流，须知故障类型是单相接地还是两相接地。

1　一般无互感线路

i）单相接地故障：

因为单相接地故障是串联型复合序网，故在零序网故障点注入电流为：

$$I_{K(0)}=-1/(Z_{KK(0)}+2Z_{KK(1)}) \quad \cdots\cdots(16)$$

由（1）式可求得正序、零序网故障点的自阻抗为：

$$Z_{KK(1)}=(1-r)^2Z_{ii(1)}+r^2Z_{jj(1)}+2r(1-r)Z_{ij(1)}$$
$$+r(1-r)x_{ij(1)}$$
$$Z_{KK(0)}=(1-r)^2Z_{ii(0)}+r^2Z_{jj(0)}+2r(1-r)Z_{ij(0}$$
$$+r(1-r)x_{ij(0)}$$

代入（16）可得：

$$I_{K(0)}=-1/[(1-r)^2Z_{ii}+r^2Z_{jj}+2r(1-r)Z_{ij}$$
$$+r(1-r)x_{ij}] \quad \cdots\cdots(18)$$

其中：
$$\begin{cases} Z_{ii}=Z_{ii(0)}+2Z_{ii(1} \\ Z_{jj}=Z_{jj(0)}+2Z_{jj(1)} \\ Z_{ij}=Z_{ij(0)}+2Z_{ij(1)} \\ x_{ij}=x_{ij(0)}+2x_{ij(0)} \end{cases} \quad \cdots\cdots(19)$$

将（18）代入（4）可得：

$$I_{i(0)}x_{ij(0)}=[(1-r)Z_{ii(0)}-rZ_{jj(0)}-(1-2r)Z_{ij(0)}$$
$$-(1-r)x_{ij(0)}]I_{K(0)}$$
$$=\frac{(Z_{ii(0)}+Z_{jj(0)}-2Z_{ij(0)}-x_{ij(0)})r-}{(Z_{ii}+Z_{jj}-2Z_{ji}-x_{ji})r^2-}$$
$$\frac{-(Z_{ii(0)}-Z_{ij(0)}-x_{ij(0)})}{-(2Z_{ij}-2Z_{ij}-x_{ii})r+Z_{ii}}$$

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$= \frac{A_0 r - B_0}{Ar^2 - Cr + D} \qquad \cdots\cdots (20)$$

式中：
$$\begin{cases} A_0 = Z_{ii(0)} + Z_{jj(0)} - 2Z_{ij(0)} - x_{ij(0)} \\ B_0 = Z_{ii(0)} - Z_{ij(0)} - x_{ij(0)} \\ A = Z_{ii} + Z_{jj} - 2Z_{ij} - x_{ij} \\ C = 2(Z_{ii} - Z_{ij}) - x_{ij} \\ D = Z_{ii} \end{cases}$$

整理（20）可得：

$$C_1 r^2 + C_2 r + C_3 = 0 \qquad \cdots\cdots (22)$$

式中：
$$\begin{cases} C_1 = A \\ C_2 = -A_0/(I_{i(0)} x_{ij(0)}) - C \\ C_3 = D + B_0/(I_{i(0)} x_{ij(0)}) \end{cases} \qquad \cdots\cdots (23)$$

ii〉两相接地短路：

两相接地短路是并联型复合序网，也不难推出（22）、（23）式。仅有的区别是：（19）式写为：

$$\begin{cases} Z_{ii} = Z_{ii(1)} + 2Z_{ii(0)} \\ Z_{jj} = Z_{jj(1)} + 2Z_{jj(0)} \\ Z_{ij} = Z_{ij(1)} + 2Z_{ij(0)} \\ x_{ij} = x_{ij(1)} + 2x_{ij(0)} \end{cases} \qquad \cdots\cdots (24)$$

这里不再赘叙。

2、平行互感线路的分析

i〉单相接地短路：

在已知故障线路两侧零序电流的分析中，已经推导出（13）式，把（10）式代入（13）式可得：

$$I_{i(0)} = [(1-r)I_{i0}' + rI_{j0}' + r - 1]I_{K(0)}$$
$$= \frac{r(I_{j0}' - I_{i0}' - 1)}{r^2(Z_{ii} + Z_{jj} + 2Z_{ij} + x_{ij})} \frac{+ I_{i0}' - 1}{-(2Z_{ii} - 2Z_{ij} - x_{ij})r + Z_{ii}} \qquad \cdots\cdots (25)$$

令
$$\begin{cases} A' = I_{j0}' - I_{i0}' - 1 \\ B = I_{i0}' - 1 \\ A = Z_{ii} + Z_{jj} + 2Z_{ij} + x_{ij} \\ C = 2(Z_{ii} - Z_{ij}) - x_{ij} \end{cases}$$

故（25）可写成：

$$I_{i(0)} = \frac{A'r + B}{Ar^2 - Cr + Z_{ii}} \qquad \cdots\cdots (26)$$

可整理为：

$$C_1 r^2 + C_2 r + C_3 = 0 \qquad \cdots\cdots (27)$$

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

继电保护装置中用的有源滤波器

东北电力设计院　梁懋

采用集成运算放大器构成各种继电保护装置，使装置在各方面的性能大大得到提高。例如在保护装置中采用有源滤波器，既可使保护装置不受各种暂态谐波分量和非周期直流分量的影响，也可以不受邻近高压直流输电线路所产生的较大的各次谐波分量的影响。

本文介绍几种经试验验证，抗干扰性能强，暂态特性好的有源滤波器。

一、带通滤波器

带通滤波器的传递函数可用下式表示

$$K(p)=\frac{K_P\alpha\omega_0 p}{p^2+\alpha\omega_0 p+\omega_0^2} \tag{1}$$

为求带通滤波器的幅频特性，将$P=j\omega$代入上式得：

$$K(j\omega)=\alpha\frac{K_P}{1+j\frac{1}{\alpha}\left(\frac{\omega}{\omega_0}-\frac{\omega_0}{\omega}\right)} \tag{2}$$

由上式可求出带通滤波器的幅频特性$K(\omega)$和相频特性$\varphi(\omega)$

式中：
$$\begin{cases}C_1=A\\ C_2=-(C+A'/I_{i(0)})\\ C_3=Z_{ii}-B/I_{i(0)}\end{cases}\quad\cdots\cdots(27')$$

ii）两相接地短路：

两相接地短路，和单相接地完全一致，只是单相接地取（19）式，两相短路接地取（24）式。

在求得（27）或（22）以后，可以解出r的值，一般这是容易解出的。根据电力系统的特点。r的根有两个，即，一个正的根，一个负的根。舍去负的就行了，这里不再论证这个问题。

四、结束语：

通过以上分析可知：在已知两侧零序电流的情况下判定故障点位置是比较适用的。如果只知一侧零序电流，计算出的结果略受过渡电阻的影响。但对于求解某开关零序电流保护第I段的保护范围，只能采用此种方法，故可用于大电流接地网络零序电流保护整定程序的设计中。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net