

线路零序电流保护整定计算方法

王广学, 彭 丰, 傅 玲, 王友怀
(湖北省电力调度通信局, 武汉 430077)

摘要: 提出了线路零序电流保护整定计算程序需要解决的几个主要问题, 包括运行方式变化由支路追加修改节点阻抗矩阵的计算方法、线路零序互感耦合分析计算、线路非全相运行零序电流分析计算和零序电流保护范围计算等; 并详细论述了问题的解决方法。

关键词: 电力系统; 零序电流; 整定计算

中图分类号: TM 773

0 引言

随着电力系统网络的不断发展和结构的日益复杂, 系统环网、短线和超短线、T 接线路、大机组和零序互感耦合等问题的出现和继电保护新技术的不断发展, 继电保护整定计算日益复杂, 工作量日益增大。为了提高继电保护整定计算的自动化程度和工作效率, 开发相关应用程序已势在必行。零序电流保护原理简单、动作速度快, 在电力系统中得到了广泛应用。但其受运行方式变化的影响很大, 零序互感线路的存在更增加了其复杂程度, 这些都是零序电流保护整定计算复杂的主要原因。零序电流保护相互配合困难也是其需解决的主要问题之一。随着计算机技术的飞速发展, 尤其是微机在计算速度、存储容量、系统软件等方面的发展, 为继电保护整定计算提供了强有力的计算管理工具。

为了满足湖北电网的发展需要, 我们开发了一套继电保护整定计算程序。该套程序整体设计思路是: 首先根据网络结构和参数形成全网的正序和零序节点阻抗矩阵, 分别存储正序、零序节点阻抗矩阵的上三角阵, 本阻抗矩阵称为基本阻抗矩阵。以后所有运行方式变化都在此基础上进行, 因为某一运行方式只是在此基本阻抗矩阵的基础上检修某些线路和元件, 只要采用支路追加的方法处理即可。这样追加后就可以进行各种类型的短路电流计算, 再进行相应整定计算。

1 节点阻抗矩阵的形成与修改

零序电流保护整定需计算大量的运行方式, 用修改导纳矩阵的方法显然用时太多, 故本程序运行方式变化采用修改节点阻抗矩阵的方法来完成。本

程序在形成节点阻抗矩阵的过程中, 采用节点动态优化编序; 利用导纳矩阵的稀疏性; 在形成导纳矩阵和导纳矩阵求逆的过程中, 对多回有零序互感耦合线路进行了存储单元预留的设计等措施, 有效提高了计算速度, 大大节约了内存。

运行方式的改变是在节点阻抗矩阵的基础上进行修改, 而全阻抗矩阵的容量很大, 即使上三角(或下三角)存储容量也很大。每个运行方式都修改全部的阻抗矩阵元素太耗时, 也无必要。程序会根据计算内容选取相关的节点阻抗矩阵元素进行追加修改。

1.1 相关节点阻抗矩阵元素的选取与排列

如果在某一运行方式下, 要检修 N 个元件, 把要检修支路两侧(电源或接地支路只有一侧)节点顺序排列为下列矩阵向量:

$$\mathbf{I} = [1, 2, \dots, L]^T \quad (1)$$

式中 L 为 N 个元件的节点数, $L \leq 2N$; \mathbf{I} 向量分为正序和零序 2 个向量。

如果检修元件中有非两端共端零序互感耦合线路, 零序 \mathbf{I} 向量中紧接着顺序排列相关互感支路的两侧节点; 然后把故障支路两侧的节点顺序排入, 再把与故障支路有零序互感的非双端共端线路的两侧节点顺序排入 \mathbf{I} 向量; 最后把指定输出支路的节点和相关零序互感支路的节点顺序排入 \mathbf{I} 向量。这样 \mathbf{I} 向量就是一个包含检修支路、故障支路和指定输出支路节点序号的向量。

图 1、图 2 所示是本例的正序和零序网络图, ①~⑤是节点编号, (1)~(9)是支路序号。零序网中(1)和(2)、(4)和(9)有零序互感。

假定故障支路(9)的一侧节点⑤接地短路故障, 支路(2)和(7)检修, 指定输出支路为(3)。形成正序和零序 \mathbf{I} 向量如式(2)。

正序和零序的 \mathbf{I} 向量形成后, 按顺序从阻抗矩阵中取出对应元素分别形成正序和零序的上三角矩

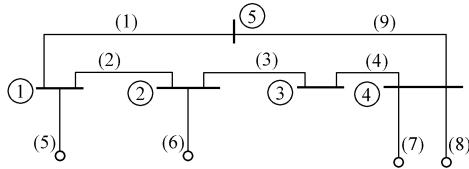


图 1 正序网络图

Fig. 1 Positive-sequence network diagram

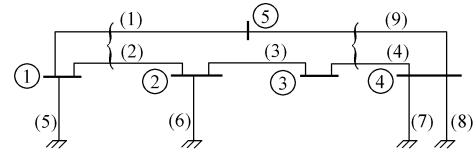


图 2 零序网络图

Fig. 2 Zero-sequence network diagram

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{\text{正序}} = [1, 2, \dots, 4, \dots, 5, 4, \dots, 2, 3] \\ \quad \text{支路(2)两侧节点} \quad \text{支路(7)一侧节点} \quad \text{故障支路(9)两侧节点} \quad \text{指定输出支路(3)两侧节点} \\ \quad \text{支路(2)} \quad \text{支路(7)} \quad \text{与支路(2)有互感} \\ \quad \text{两侧节点} \quad \text{一侧节点} \quad \text{支路(1)两侧节点} \\ I_{\text{零序}} = [1, 2, \dots, 4, \dots, 1, 5, \dots, 5, 4, \dots, 2, 3, \dots, 3, 4] \\ \quad \text{故障支路(9)} \quad \text{指定输出支路(3)} \quad \text{与支路(9)有互感} \\ \quad \text{两侧节点} \quad \text{两侧节点} \quad \text{支路(4)两侧节点} \end{array} \right. \quad (2)$$

阵 Z , 如式(3)所示。 Z 矩阵的主对角元素是对应 I 向量中各节点的自阻抗, 每行的非对角元素为该节点与对应节点的转移阻抗, Z 矩阵中元素下标是其所在行和列的序号。

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1L} & \cdots & Z_{1i} & Z_{1j} & \cdots & Z_{1s} \\ Z_{21} & Z_{22} & & Z_{2L} & & Z_{2i} & Z_{2j} & & Z_{2s} \\ \cdots & & & Z_{LL} & & Z_{Li} & Z_{Lj} & & Z_{Ls} \\ & & & \cdots & & & & \vdots & \\ & & & Z_{ii} & Z_{ij} & & Z_{is} \\ & & & Z_{jj} & \cdots & Z_{js} \end{bmatrix} \quad (3)$$

L 为检修支路的节点总数(上例 $L = 3$); $L \sim i$ 之间是与检修支路有互感的支路的节点(上例为与检修支路(2)有互感的支路(1)的两侧节点 1, 5, 正序就没这两节点); i, j 为故障支路两侧节点在 I 向量中的次序号(上例正序: $i = 4, j = 5$; 零序: $i = 6, j = 7$); $j + 1 \sim s$ 为指定输出支路两侧节点(上例的 2, 3)及与故障支路和指定输出支路有互感支路的两侧节点(上例指定输出支路为无互感支路, 而故障支路与支路(4)有互感, 故只有支路(4)的两侧节点 3, 4, 正序就没这两节点); s 为 I 向量的长度(上例正序 $s = 7$, 零序 $s = 11$)。

1.2 对 Z 矩阵支路追加修改

1.2.1 追加第 1 条支路

1.2.1.1 非电源支路

如果是非电源支路, Z 矩阵的前两行分别为第 1 条支路两侧节点的自阻抗和与 I 向量中其他节点之间的转移阻抗。 Z 矩阵元素从第 3 行第 3 列开始追加修改, 计算公式为:

$$Z_{pq}' = Z_{pq} - \frac{(Z_{1p} - Z_{2p})(Z_{1q} - Z_{2q})}{Z_{11} + Z_{22} - 2Z_{12} - X_1} \quad (4)$$

$$3 \leq p \leq j, p \leq q \leq s$$

式中 s 为 Z 矩阵的列数, 在以下追加公式中意义相同; X_1 为第 1 条检修支路的正序或零序阻抗参数; Z_{pq}' 为追加第 1 条支路后, Z 矩阵 p 行 q 列阻抗元素; Z_{pq} 为追加第 1 条支路前, Z 矩阵 p 行 q 列阻抗元素; Z_{1p}, Z_{2p} 为追加第 1 条支路前, Z 矩阵第 1 行、第 2 行的 p 列阻抗元素; Z_{1q}, Z_{2q} 为追加第 1 条支路前, Z 矩阵第 1 行、第 2 行的 q 列阻抗元素; Z_{11}, Z_{22}, Z_{12} 为追加第 1 条支路前, 第 1 条检修支路两侧节点的自阻抗和转移阻抗。

式(4)是正序支路或零序没有零序互感耦合支路的追加计算公式。当追加有零序互感支路时, 分两种情况处理。

a. 当追加支路为双端共端零序互感支路时, 无论是零序互感支路断开还是挂地线检修, 都可以等效地在线路两侧追加一条参数不同的链支, 其参数由第 2 节式(8)~式(14)分析结果决定。追加时, 式(4)中 X_1 被式(8)~式(14)分析的参数所代替进行追加计算。

b. 当追加支路为非双端共端零序互感支路时, 无论是零序互感支路断开还是挂地线检修追加计算都非常复杂。本程序采用在断开互感支路一侧增加两个虚拟节点(见第 2 节分析), 首先根据式(15)将 Z 矩阵第 1 行、第 2 行的第 3 列以后的元素替换为对应节点与虚拟节点 s, t 之间的转移阻抗。式(15)中所需的与检修支路有互感的支路两侧节点在形成 Z 矩阵时已预先考虑好。 Z_{11}, Z_{22}, Z_{12} 分别用式(16)的 Z_{ss}, Z_{tt}, Z_{st} 所代替, 这样, 互感支路断开就可以用式(4)进行追加计算, 式(4)中的 X_1 用 X 代替。当互感支路挂地线检修时, 在断开的基础上, 再在 t 与 j 两节点之间追加一条参数为 0 链支即可。实际上, 追加过程中的中间结果在另外数组中存储, 受篇幅所限, 叙述略。

1.2.1.2 电源支路

如果第 1 条检修支路是电源支路(含接地支), 则从 Z 矩阵第 2 行第 2 列开始追加修改, 即

$$Z'_{pq} = Z_{pq} - \frac{Z_{1p}Z_{1q}}{Z_{11} - X_k} \quad (5)$$

$$2 \leq p \leq j, p \leq q \leq s$$

1.2.2 追加第 k 条支路

假定追加第 k 条支路前已追加了 t 条非电源支路和 r 条电源支路。

1.2.2.1 非电源支路

追加第 k 条非电源支路从 Z 矩阵 $2t + r + 3$ 行开始追加修改, 追加计算公式如下:

$$Z'_{pq} = Z_{pq} - \frac{(Z_{Lp} - Z_{Mp})(Z_{Lq} - Z_{Mq})}{Z_{LL} + Z_{MM} - 2Z_{LM} - X_k} \quad (6)$$

$$L + 2 \leq p \leq j, p \leq q \leq s$$

式中 $L = 2t + r + 1; M = L + 1; X_k$ 为第 k 条检修支路的正序或零序阻抗参数。

式(6)是正序支路或零序无互感支路的追加计算公式, 对于零序网有互感支路的处理方法请参阅文献[1]。

1.2.2.2 电源支路

追加第 k 条支路是电源支路(含接地支)时, 从 Z 矩阵 $2t + r + 2$ 行开始追加修改, 计算公式为:

$$Z'_{pq} = Z_{pq} - \frac{Z_{Lp}Z_{Lq}}{Z_{LL} - X_k} \quad (7)$$

$$L + 1 \leq p \leq j, p \leq q \leq s$$

式中 L 和 X_k 的含义与式(6)同。

除互感支路外, 以上追加计算均在 Z 矩阵内进行, 追加计算后放回原位, 占用内存少, 计算量小, 这是本程序提高速度的关键。

2 零序互感支路的处理方法

2.1 两端均共端点零序互感线路

如图 3 所示, 本程序采用的是一种既简单又特殊的处理方法^[1]。

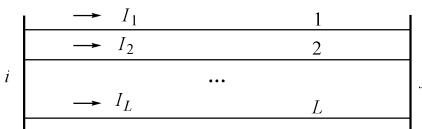


图 3 L 回双端共端互感线路

Fig. 3 L two-side common point zero-sequence mutual inductance lines

根据图 3 有下式:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1L} \\ Z_{12} & Z_{22} & \cdots & Z_{2L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{1L} & Z_{2L} & \cdots & Z_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_L \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 $U_1 = U_2 = \cdots = U_L = U$; U 为 i, j 两节点之间电压差。

由式(8)可有:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1L} \\ Z_{12} & Z_{22} & \cdots & Z_{2L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{1L} & Z_{2L} & \cdots & Z_{LL} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_L \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1L} \\ y_{12} & y_{22} & \cdots & y_{2L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{1L} & y_{2L} & \cdots & y_{LL} \end{bmatrix} U = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_L \end{bmatrix} U \quad (9)$$

式中 $Y_m = \sum_{k=1}^L y_{mk}; 1 \leq m \leq L$ 。

从式(9)可知, i, j 两节点之间 L 条互感支路的总电流为: $I = I_1 + I_2 + \cdots + I_L = U \sum_{m=1}^L Y_m = YU$ 。这样就可很容易求出 i, j 两节点之间 L 条互感支路的等值阻抗为 $1/Y$ 。

2.1.1 断开第 L 条互感支路

为分析方便, 假定断开第 L 条互感支路。 L 支路断开时, $I_L = 0$, 有

$$\begin{bmatrix} U_1, U_2, \dots, U_{L-1}, U_L \end{bmatrix}^T =$$

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1,L-1} & Z_{1L} \\ Z_{12} & Z_{22} & \cdots & Z_{2,L-1} & Z_{2L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ Z_{1,L-1} & Z_{2,L-1} & \cdots & Z_{L-1,L-1} & Z_{L-1,L} \\ Z_{1L} & Z_{2L} & \cdots & Z_{L-1,L} & Z_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{L-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} I_1, I_2, \dots, I_{L-1} \end{bmatrix}^T =$$

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1,L-1} \\ Z_{12} & Z_{22} & \cdots & Z_{2,L-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{1,L-1} & Z_{2,L-1} & \cdots & Z_{L-1,L-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} U \\ U \\ \vdots \\ U \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1,L-1} \\ y_{12} & y_{22} & \cdots & y_{2,L-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{1,L-1} & y_{2,L-1} & \cdots & y_{L-1,L-1} \end{bmatrix} U = \begin{bmatrix} Y'_1 \\ Y'_2 \\ \vdots \\ Y'_{L-1} \end{bmatrix} U \quad (11)$$

从式(11)可求出 i, j 两节点间 $L - 1$ 条互感支路的等值阻抗为 $1/Y'$, 其中:

$$Y' = \sum_{m=1}^{L-1} \sum_{k=1}^{L-1} y_{mk} \quad (12)$$

这样 L 支路断开时, 在 i, j 两节点间追加一条阻抗参数为 $1/(Y' - Y)$ 链支即可。

2.1.2 挂检 L 互感支路

如图 3 所示, 当 L 互感支路挂地线检修时,

$U_L = 0$, 有式(13)和式(14):

$$[U_1, U_2, \dots, U_{L-1}, 0]^T =$$

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1,L-1} & Z_{1L} \\ Z_{12} & Z_{22} & \cdots & Z_{2,L-1} & Z_{2L} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ Z_{1,L-1} & Z_{2,L-1} & \cdots & Z_{L-1,L-1} & Z_{L-1,L} \\ Z_{1L} & Z_{2L} & \cdots & Z_{L-1,L} & Z_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{L-1} \\ I_L \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$[I_1, I_2, \dots, I_{L-1}, I_L]^T =$$

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1,L-1} & Z_{1L} \\ Z_{12} & Z_{22} & \cdots & Z_{2,L-1} & Z_{2L} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ Z_{1,L-1} & Z_{2,L-1} & \cdots & Z_{L-1,L-1} & Z_{L-1,L} \\ Z_{1L} & Z_{2L} & \cdots & Z_{L-1,L} & Z_{LL} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_{L-1} \\ 0 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1,L-1} \\ Y_{12} & Y_{22} & \cdots & Y_{2,L-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{1,L-1} & Y_{2,L-1} & \cdots & Y_{L-1,L-1} \\ Y_{1L} & Y_{2L} & \cdots & Y_{L-1,L} \end{bmatrix} U = \begin{bmatrix} Y_1'' \\ Y_2'' \\ \vdots \\ Y_{L-1}'' \\ Y_L'' \end{bmatrix} \quad (14)$$

同理可求得 i, j 两节点间 $L - 1$ 条互感支路在第 L 条支路挂检后的等值阻抗为 $1/Y''$ 。其中:

$$Y'' = \sum_{i=1}^{L-1} Y_i'', \quad Y_i'' = \sum_{j=1}^{L-1} y_{ij}$$

故第 L 条支路挂检时, 在 i, j 两节点之间追加一条阻抗参数为 $1/(Y'' - Y)$ 的链支即可。

值得注意的是, L 支路断开和挂检基本方法相同, 差别是: 一个是 $L - 1$ 阶导纳矩阵求逆, 另一个是 L 阶导纳矩阵求逆。

2.2 非两端共端点零序互感线路

图 4 是一组有零序互感耦合的线路。

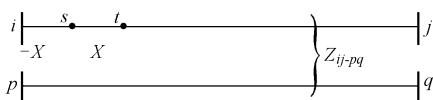


图 4 非双端共端多回零序互感线路

Fig. 4 Non two-side common point zero-sequence mutual inductance lines

对于非双端共端点零序互感线路的追加处理, 程序采用在断开或挂检互感支路一侧增加 2 个虚拟节点 s 和 t , 即 i, s 之间支路的阻抗参数为 $-X$; t, s 之间支路的阻抗参数为 X 。增加 2 个虚拟节点后, 系统各节点的自阻抗和转移阻抗不变, 即对系统等效。所以只需求出 s, t 两节点的自阻抗和 s, t 两节点与系统中其他节点之间的转移阻抗就可以进行互感支路的断开和挂检处理。具体公式如下:

$$Z_{sm} = Z_{im} + X[Y_{ij}(Z_{im} - Z_{jm}) + Y_{ij-pq}(Z_{pm} - Z_{qm})] \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{st} = Z_{si} - X \\ Z_{tt} = Z_{ii} \\ Z_{ss} = Z_{st} - X[Y_{ij}(Z_{si} - Z_{sj}) + Y_{ij-pq}(Z_{sp} - Z_{sq})] \end{array} \right. \quad (16)$$

式中 Y_{ij} 为 ij 支路的自导纳; Y_{ij-pq} 为 ij 支路与本组其他支路 pq 的互感的导纳向量; Z_{pm}, Z_{qm} 分别为系统任意节点 m 对 p, q 两组节点的转移阻抗列向量, 当 pq 是一条互感线路时, p, q 就是其两侧节点, Z_{pm}, Z_{qm} 就不再是向量, 而是 m 与 p, q 之间的转移阻抗; Z 的下标是节点序号, 表示两节点之间的转移阻抗; $Z_{si}, Z_{sj}, Z_{sp}, Z_{sq}$ 可由式(15)求得; 式(15)、式(16)的详细推导见文献[2]。

当 ij 互感支路断开时, 可直接在 s, t 之间追加一条参数为 $-X$ 的链支。

当 ij 互感支路挂地线检修时, 可在以上断开的基础上直接在 j, t 之间追加一条参数为 0 的链支。这样就避免了直接追加互感支路, 非常容易实现。

3 线路非全相运行零序电流计算

线路保护采用综合重合闸或单相重合闸时, 需计算非全相零序电流。线路非全相运行零序电流精确计算很困难。常规整定计算采用在非全相运行线路断口直接加入 $2E \sin(\delta/2)$ 等值电势的算法, 这种算法只适用于简单的双端电源线路, 对于复杂的多电源系统本算法计算结果很不合理, 整定无法使用。经多年研究和反复论证, 我们提出了一套等值新算法, 并在程序中采用。经在湖北多年使用, 计算结果正确合理。简述如下。

对于任意复杂的电网, 均可把正序网等值为如图 5 所示的网络。

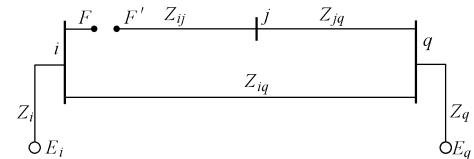


图 5 线路非全相计算模型图
Fig. 5 Model of non-three-phase operation line

在图 5 中, 节点 j 为与非全相运行线路相邻且只有 2 回出线的无正序电源节点。如果非全相运行线路无此类节点, $Z_{jq} = 0$ 。假定 E_i, E_q 幅值为 1, 从图 5 不难得求得 FF' 的等值开路电势为:

$$U_{FF'} = \frac{2Z_{iq}\sin \frac{\delta}{2}}{Z_i + Z_q + Z_{iq}} \quad (17)$$

式中 δ 为 E_i, E_q 两电势摆开角度。

按式(17)求出开口等值电势后,就可根据网络结构进行零序电流的详细计算,有关互感线路非全相运行计算的推导参阅文献[3]。

4 I 段保护范围计算

如图 6 所示, i 侧零序电流 I 段定值为 I_{set} , 求取保护范围 r 。

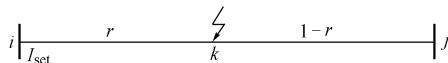


图 6 保护范围计算

Fig. 6 Calculation of protection range

在故障点注入单位电流可求得 k 点的正序和零序总阻抗为:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{kk(1)} = (1-r)^2 Z_{ii(1)} + r^2 Z_{jj(1)} + \\ \quad 2r(1-r)Z_{ij(1)} + r(1-r)X_{ij(1)} \\ Z_{kk(0)} = (1-r)^2 Z_{ii(0)} + r^2 Z_{jj(0)} + \\ \quad 2r(1-r)Z_{ij(0)} + r(1-r)X_{ij(0)} \end{array} \right. \quad (18)$$

式中 $Z_{kk(1)}, Z_{kk(0)}$ 分别为故障点 k 的正序和零序自阻抗; $X_{ij(1)}, X_{ij(0)}$ 分别为线路 ij 的正序和零序阻抗; 下标(1),(0)分别表示正序和零序。

节点 i 与 k 点之间的正序、零序转移阻抗为:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{ik(1)} = (1-r)Z_{ii(1)} + rZ_{ij(1)} \\ Z_{ik(0)} = (1-r)Z_{ii(0)} + rZ_{ij(0)} \end{array} \right. \quad (19)$$

假定正序电势为 1, k 点单相和两相接地时, 零序网 k 点注入零序电流分别为:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{k(0)} = \frac{-1}{Z_{kk(0)} + 2Z_{kk(1)}} \\ I_{k(1)} = \frac{-1}{Z_{kk(1)} + 2Z_{kk(0)}} \end{array} \right. \quad (20)$$

假定 k 点短路 i 侧零序电流为 I_{set} , 可有:

$$I_{\text{set}} = \frac{Z_{ik(0)} - Z_{kk(0)}}{rX_{ij(0)}} I_{k(0)} \quad (21)$$

将式(18)~式(20)分别代入式(21)整理有:

$$C_1r^2 + C_2r + C_3 = 0 \quad (22)$$

式(22)可解出保护范围 r , 舍去不合理的根就行了。 C_1, C_2, C_3 是与系统结构、故障类型、线路有无互感和 I_{set} 的大小有关的系数, 这里不再列出, 可参

阅文献[4]的详细推导。本算法在湖北电网程序中使用多年, 计算结果和沿线逼近计算相同, 因本算法只需解一个一元二次方程, 计算精度和速度要高得多。

5 结语

本程序自动化程度高, 计算速度快, 经湖北省电网使用, 效果很好。原来湖北网 220 kV 和 110 kV 线路零序电流保护整定由几个人完成, 目前由一个人就可轻松完成, 不仅大大提高了工作效率, 而且整定质量也上了一个台阶。湖北电网 400 个节点, 300 多个开关, 大约几十万个方式, 整定和相互配合在 10 min 内可完成。本程序已经过湖北省电力公司组织的技术鉴定, 获湖北省电力局科技进步二等奖和华中集团公司科技进步三等奖。

参考文献

- 王广学(Wang Guangxue). 电力系统零序互感耦合对接地保护影响的分析研究(Analysis and Research for Influence of Zero-Sequence Mutual Inductive Coupling on Earth Protection in Electrical Power System). 继电器(Relay), 1990(4).
- 王广学, 王珍珍(Wang Guangxue, Wang Zhenzhen). 电力系统计算机分析计算中有关零序互感的分析研究(Analysis and Research of Calculating Power Line Zero-Sequence Mutual Inductance). 继电器(Relay), 1986(2).
- 王广学, 王珍珍(Wang Guangxue, Wang Zhenzhen). 电力系统非全相运行分析计算方法的研究(Two Methods of Analysis and Computation for Non-Three-Phase Operation in Power Systems). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1987, 11(6).
- 王广学(Wang Guangxue). 电力系统接地故障点分析计算方法(Analysis and Computation of Fault Location for Power Lines on the Basis of Zero-Sequence Current). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1986, 10(4).

王广学, 男, 教授级高级工程师, 研究方向是继电保护整定计算及运行管理。

彭丰, 男, 高级工程师, 总工程师, 研究方向是继电保护整定计算及运行管理。

俸玲, 女, 工程师, 研究方向是继电保护整定计算及运行管理。

STUDY ON LINE PROTECTION SETTING PROGRAM FOR POWER SYSTEM ZERO-SEQUENCE CURRENT

Wang Guangxue, Peng Feng, Feng Ling, Wang Youhuai
(Hubei Electric Power Dispatching & Telecommunication Bureau, Wuhan 430077, China)

Abstract: A line protection setting program for power system zero-sequence current is developed in which several problems are solved: the calculation method for changing operating mode by modifying impedance matrix, the analysis of zero-sequence mutual coupling of lines, zero-sequence analysis in the course of non-three-phase operation and the calculation for protection range of zero-sequence current.

Keywords: power systems; zero-sequence current; setting program