

电力系统大接地电流网络 零序保护整定计算应用软件的研究

华中工学院电力系 言 昭

湖北省电力中心调度所 王珍珍
王广学

摘 要

本文详细地介绍了复杂电力系统网络保护整定计算应用软件研制中有关的几个主要问题。对于各种具有零序互感耦合的线路,在非全相运行、相继动作和线路挂检等状态下,采取了有效的数学处理及计算公式。相对地区网络而言,结构复杂庞大的外部系统,如何简化等值,获得一个等效简明的地区网络,提出了具体概念与算法。使用包括预先考虑零序互感支路注入元在内的节点动态自动优化编序及省零稀疏技巧,以扩大解题规模,提高计算速度。所有这些算式、算法和程序,经多种算例检验。均证实计算结果正确,功效显著。

一、前 言

对于110kV—220kV—500kV的大接地电流网络,发生接地故障的几率较高,因而网络的零序保护是目前电力系统中重要的主保护。但是,由于电力系统的不断发展,网络结构及系统运行方式的变化,都给电力系统的继电保护整定计算工作带来了更加繁重而复杂的计算任务,还会引起一些常规计算难以解决的问题。计算技术及微机在电力系统中的应用,为解决这些复杂而困难的计算创造了有利条件。与常规计算工具相比,在计算精度、计算速度、可靠性、解题规模及对复杂的零序网络结构、故障类型、地点的适应性等方面,均具有绝对的优势。我们结合湖北500—220—110kV大接地电流网络的具体工程,研制了整套零序电流保护整定校验的计算机程序。在研制过程中,为了扩大程序的适应性和灵活性,将程序内容扩充分为四部分,即:电力系统全网各点的节点总阻抗程序;电力系统分块等值简化程序;电力系统故障计算程序;零序方向保护整定校验程序。现介绍程序的功能、特点及三个主要技术问题的处理解决——对各种具有零序互感耦合的线路,在各种工况下的数学处理;外部复杂网络效应简化等值的求取;考虑零序互感支路结构后的节点动态优化自动编序。

二、程序的功能及特点

在该套程序的研究过程中,采用了一些有效的技术方法,因而具有下述八个方面的一些功能和特点。

(一)程序按“模块”方式构成,可分别独立或联合运行,其中包括:

(1)可单独进行求解不同运行方式下全网节点阻抗矩阵的各元素,提供各节点的总阻抗,为继电保护整定、电气设备选择、校验等方面使用。

(2)可按照需要进行网络分割,将复杂的外部网络等效化简,求得简明的局

部地区的网络结构和参数。

(3) 可进行各种运行方式和工况下、在任何地点发生各种不同故障类型的故障电量计算。如有必要,也可同时考虑故障点的过渡电阻及元件参数的电阻分量。

(4) 可进行零序电流保护整定计算,下一步将扩充到接地距离保护方面的整定计算。

(二) 能有效地处理各种不同结构的零序互感线路。互感组的线路回数不受限制,可能是二回、三回、甚至四回或五回;互感组的两端可能共端点,或一端共端点、或两端均不共端点;在母线端点或互感线路上的任一地点发生各种工况和故障,均能自行处理。

(三) 能将规模庞大而复杂的电力系统,以保留某局部地区网络为中心,对网络其余部分进行分割化简,求解出简化等值的网络结构,为地区局部网络的保护整定计算提供依据。然后,地区网络无论使用常规的计算工具或微机,均显得十分灵活、简便和迅速。

(四) 能计算复杂电力系统中一般连支、地支、各种零序互感耦合的线路组中,纵向或横向、对称或不对称情况下任意支路电流值或节点电压值。还可考虑相间及接地电弧电阻阻值变化的影响。其计算结果可用表格打印输出,或将支路中电流变化值用曲线绘图输出。

(五) 程序计算速度较快,内存佔用较少。由于在求全网节点阻抗矩阵中,采用了动态优化措施,包括考虑零序互感支路可能新增的注入元,使三角分解过程中,注入元尽量地减少,以求保持导纳阵的稀疏性。并采用节零存贮和省零计算方法,以及将整型数和实型数分开运算,以加快计算速度,减少内存需要量。

(六) 程序中有防止原始数据编写时、因疏忽引起出错的防错措施。例如:在复杂网络中,经常有漏编节点号的疏忽,程序能自动识别检出。程序原始数据通用。同一程序还采取多重算法,提高程序的可靠性和灵活性。

(七) 计算结果可靠。程序计算结果与手工计算、直流台或复故障台计算结果反复校核,结果一致。其中经过多种例题试算、小网试调、大网核算等多重方式反复调试,核对计算结果。证实该程序算法正确可靠。

(八) 程序采用较新的适合工程计算用的高级语言FORTRAN—77编制,便于推广使用。

三、各种零序互感支路的处理

对各种零序互感耦合线路,在不同工况下的处理是零序保护整定计算中的一个关键问题,它关系到程序的适应性、复杂性和计算结果的准确度。经过多种分析比较,并参考文献〔1〕中所介绍的方法,从而得到较为适当的数学处理。其计算公式简单,通用性强,且可避免K回线路,在断开其中一回耦合线路时,需进行K+1阶互感参数的求逆过程〔2〕。

当具有零序互感的线路,在发生非全相运行;切除某一回互感线;相继动作或线路挂检等工况时,对零序互感线路的处理过程及修改节点阻抗矩阵的算式简述如下。

设原有网络中pq、rs为一对具有零序互感 X_{mo} 耦合的线路,若要求在p q线路的p侧断开时,处理过程和概念是这样:

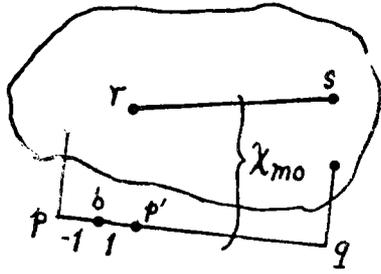


图1 在p q线上增加b及p'两个节点

(一) 在p侧增加两个节点(b和p'), 使p b之间阻抗值为-1, b p'之间阻抗值为1。因此, 增加两个节点后, p'点仍相当于p点。但由于增加p'点, 原n阶的节点阻抗矩阵应扩大一阶, 其中各元素的值为:

$$Z_{i'p} = Z_{ip} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

$$Z_{p'p'} = Z_{pp} \quad (2)$$

式中: n为原网络中节点总数

(二) 增加b点阻抗矩阵再扩大一阶, 其有关元素的计算分属为三种情况——原网络中任一点j与b点的互阻抗; p'点与b点的互阻抗及b点的自阻抗。

(1) 原网络中任一点(例如j点)对b点的互阻抗 Z_{bj} 。

在j点注入单位电流时, 在b点产生的电压为:

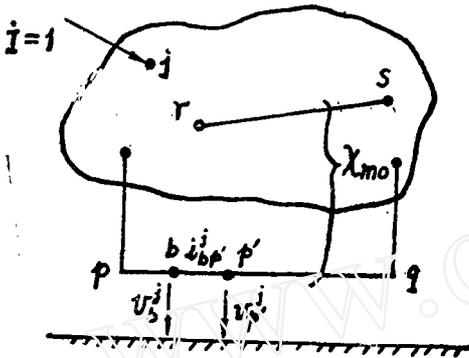


图2、j点注入单位电流时, 求 Z_{bj} 元素

$$v_b^j = v_{b'p'}^j + v_p^j \quad (3)$$

由于bp'两点间阻抗为1, 故:

$$v_{b'p'}^j = i_{b'p'}^j \quad (4)$$

j点注入单位电流时, 在p'点产生的电压为:

$$v_{p'}^j = Z_{p'j} \quad (5)$$

将(4)、(5)及(1)的关系代入(3)并注意节点阻抗矩阵元素的物理含义:

$$Z_{bj} = v_b^j = i_{b'p'}^j + Z_{p'j} = i_{p'q}^j + Z_{p'j} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

(2) p'点对b点的节点互阻抗 $Z_{b'p'}$ 。

在p'点注入单位电流时, 则:

$$i_{p'p'}^1 = i_{p'q}^1 - 1 \quad (7)$$

由于b和p'间为单位阻抗, 故:

$$v_{b'p'}^1 = i_{p'q}^1 - 1 \quad (8)$$

这时b点电压为:

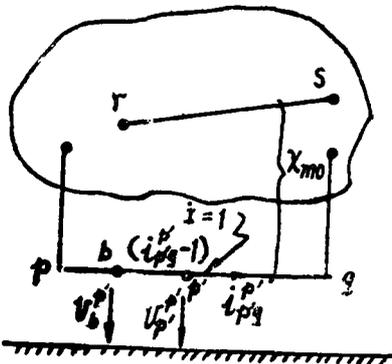


图3、p'点注入单位电流时, 求 $Z_{b'p'}$ 元素

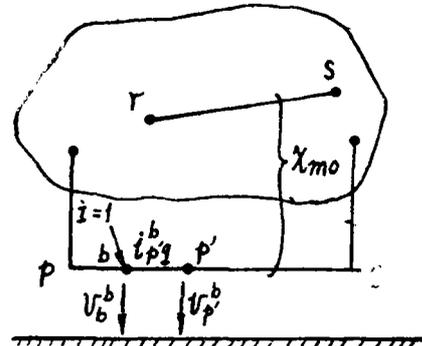


图4、在b点注入单位电流时求 Z_{bb} 元素

$$Z_{ip(new)} = Z_{ip(oLd)} - \frac{Z_{iL} Z_{pL}}{Z_{LL}} \quad (i = 1, 2, \dots, n, p') \quad (18)$$

$$Z_{ip'(new)} = Z_{ip'(oLd)} - \frac{Z_{iL} Z_{p'L}}{Z_{LL}} \quad (i = 1, 2, \dots, n, p') \quad (19)$$

有了上述(15)~(19)式作基础,无论是求互感耦合线路非全相运行时的断口阻抗;或者切除某条互感耦合线后的节点阻抗;以及互感耦合线路的相继动作;或者线路挂检时,对节点阻抗阵的修改均可进行。应该注意的是在进行p—q线路挂检计算时,在p与p'点断开后,又用同样方法在q侧加上b'和q'两个节点,再将q与q'断开,此时在计算L行、L列参数的过程中,应同时将p'与q'点接地,即令:

$Z_{p',m} = Z_{q',m} = 0; m = 1, 2, \dots, n, p', q'$,即可得p—q支路挂检时,全网节点阻抗阵。

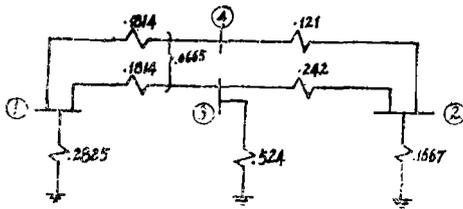


图6、算例简图

点阻抗阵。

以图6的简单网络为例,上述修改节点阻抗矩阵计算结果,与用常规网络办法计算上述四种情况下的等值节点阻抗完全一致。还以此网络为例,按文献[2]、[3]所述方法进行以上计算,计算结果也完全一致。但按(15)~(19)式的算法最为简明。

当然对两端共端点的互感线组,其中一回线路挂检时,也可采用追加某一等值参数支路的方法处理。

四、外部网络等值化简

一个规模庞大、结构复杂的网络,可以按照需要来进行等值分割^[4]。例如图7所示,一个互相连接的统一的电力系统网络,可以分割简化为等值的两部分或几部分。其中B可表示为某一局部地区网络,该局部地区网络中的r, s, t节点代表与外部网络直接邻接的相关节点。分割简化后的等值网络B,其原内部的地区网络结构可以完整地保持不变,其余外部网络的等值效应只是反映在邻接节点r, s, t上,如虚线所示。反之,也一样, B网络对A网络的效应,也只是反映在A网络的o, p, q等邻接节点上。

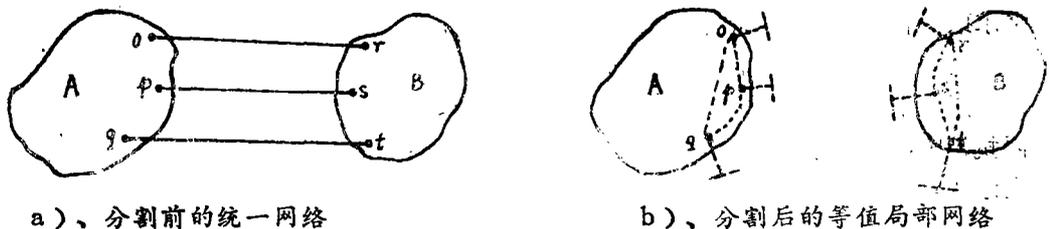


图7、大型网络的等值分割示意图

由于电力系统继电保护的整定计算,都是根据节点电流电压的线性模型进行的,可采用高斯消去法直接对网络进行等值简化。设原整个的网络方程可以分块简明表示为:

$$\begin{pmatrix} Y_s & Y_{sc} & \vdots & 0 \\ Y_{sc}^T & Y_c & \vdots & Y_{cd} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & Y_{cd}^T & \vdots & Y_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_s \\ V_c \\ \cdots \\ V_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_s \\ I_c \\ \cdots \\ I_d \end{pmatrix} \quad (20)$$

全网节点导纳矩阵按虚线分块，左上角表示待保留的局部网络的节点导纳矩阵的元素，其余表示待消去的矩阵元素。

式中 V_s, I_s ——分别表示待保留的局部网络中与外部网络非直接邻接节点的节点电压向量与节点注入电流向量；

V_c, I_c ——分别表示待保留的局部网络中与外部网络直接邻接的节点电压向量与节点注入电流向量；

V_d, I_d ——待消去的外部网络的节点电压向量与注入电流向量。

$$\text{由 } [Y_{cd}^T] [V_c] + [Y_d] [V_d] = [I_d]$$

$$\text{即 } [V_d] = - [Y_d]^{-1} [Y_{cd}^T] [V_c] + [Y_d]^{-1} [I_d] \quad (21)$$

代入消元后得：

$$\begin{pmatrix} Y_s & Y_{sc} \\ Y_{sc}^T & Y_c' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_s \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_s \\ I_c' \end{pmatrix} \quad (22)$$

$$\text{其中 } [Y_c'] = [Y_c] - [Y_{cd}] [Y_d]^{-1} [Y_{cd}^T] \quad (23)$$

$$[I_c'] = [I_c] - [Y_{cd}] [Y_d]^{-1} [I_d] \quad (24)$$

(22)式则为新的等值的局部网络方程，其中网络导纳矩阵中的绝大部分元素保持不变，如分块表示的 Y_s, Y_{sc}, Y_{sc}^T 部分。只是与外部网络邻接节点的导纳元素按(23)式作部分修改，它反映外部网络的等值效应。

至于外部网络简化后等效局部地区网络中 $[Y_c']$ 小块元素的求取，可采用下面这样一些办法：

(1) 基于(23)式的关系，采用逐点消去；

(2) 利用已获得的待消部分的节点阻抗矩阵 $[Y_d]^{-1}$ ，整批消去^[3]；

(3) 利用已有的全网节点阻抗矩阵，从中选出保留节点的节点阻抗元素。

$$\begin{pmatrix} Z_s & Z_{sc} \\ Z_{sc}^T & Z_c \end{pmatrix}$$

来求取简化后直接邻接节点的分块导纳矩阵^[4]。即：

$$[Y_c'] = [Z_c - Z_{sc}^T Z_s^{-1} Z_{sc}]^{-1} \quad (25)$$

因为根据等值的原则，就是要求简化等值得的节点导纳矩阵，而由它形成的节点阻抗矩阵的各元素，与全网求得的有关保留节点的阻抗矩阵元素，分别对应相等。算式表示为：

$$\begin{pmatrix} Y_s & Y_{sc} \\ Y_{sc}^T & Y_c' \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} Z_s & Z_{sc} \\ Z_{sc}^T & Z_c \end{pmatrix} \quad (26)$$

$$\text{即：} \begin{pmatrix} Y_s & Y_{sc} \\ Y_{sc}^T & Y_c' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_s & Z_{sc} \\ Z_{sc}^T & Z_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (27)$$

按块展开有:

$$[Y_{s'c}^T Z_s + Y_c' Z_{s'c}^T] = [0] \quad (28)$$

$$[Y_{s'c}^T Z_{s'c} + Y_c' Z_c] = [1] \quad (29)$$

将(28)式

$$Y_{s'c}^T = -Y_c' Z_{s'c}^T Z_s^{-1}$$

代入(29)可得

$$[Y_c'] = [Z_c - Z_{s'c}^T Z_s^{-1} Z_{s'c}]^{-1}$$

此即求取 $[Y_c']$ 的关系式(25)

(4)也可利用邻接节点及待消节点最优编序及三角分解求得的有关节点阻抗矩阵,即相当:

$$\begin{pmatrix} Y_c & Y_{cD} \\ \dots & \dots \\ Y_{cD}^T & Y_D \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} Z_1 & Z_2 \\ \dots & \dots \\ Z_2^T & Z_3 \end{pmatrix} \quad (30)$$

从中选出 $[Z_1]$ 块矩阵求逆即得

$$[Y_c'] = [Z_1]^{-1} \quad (31)$$

该关系的证明也与上面相似,由(30)式

$$\begin{pmatrix} Z_1 & Z_2 \\ Z_2^T & Z_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_c & Y_{cD} \\ Y_{cD}^T & Y_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (32)$$

$$[Z_1 Y_{cD} + Z_2 Y_D] = [0] \quad (33)$$

$$[Z_1 Y_c + Z_2 Y_{cD}^T] = [1] \quad (34)$$

由(33)式

$$Z_2 = -Z_1 Y_{cD} Y_D^{-1}$$

代入(34)

$$[Z_1] [Y_c - Y_{cD} Y_D^{-1} Y_{cD}^T] = [1]$$

$$[Z_1]^{-1} = Y_c - Y_{cD} Y_D^{-1} Y_{cD}^T$$

此即(23)式中待求的 $[Y_c']$ 。

例如,原湖北系统142个节点,193条连支,111条地支、12组双回零序互感耦合线路和一组三回零序互感耦合线路的环套环的复杂网络,作保留整个黄石地区系统,求解全系统对黄石地区的外部等值化简计算。即求出全系统中仅保留黄石地区系统的等值网络。此时可得18个节点、25条连支,22条地支和四组双回零序互感耦合线路的简明等值网络图。它清楚地表明:其外部网络等值化简的参数仅体现在邻接节点间的连支及地支参数变化上。这样给地区网络的保护整定计算工作带来极大的方便。

五、节点编序的动态优化

节点导纳矩阵是极为稀疏的,例如一个200个节点的网络,零元素占98%以上。在对节点导纳矩阵进行三角分解求因子矩阵过程中,导纳矩阵的稀疏性能否保持,是加快计算速度、节省内存的关键。参照文献[5]中的办法,采用动态优化节点编序,效果

很好。即顺序对出线数最少的节点进行编号，在编号过程中因消去该节点后，它所联的节点中有出线数减为最少者，立即优先编号。曾对湖北142个节点的正序网络，试用按静态优化节点编序和按动态优化节点编序的两种方案比较，计算的结果表明，动态优化的时间与静态优化的时间近乎相等，但动态优化方法的注入元又比静态优化方法减少64.4%，动态优化的效果显著。

在对零序网络进行动态优化节点编序之前，为了更进一步地充分估计注入元的增加情况，事先对零序互感耦合线路组，采用消去互感的等值支路代替，然后修改原始数据中的节点出线数和节点间的连支信息，再进行动态优化节点编序。即考虑零序互感组中的新增连支后的动态优化。这样可做到注入元达到最少，并为节零存贮，省零运算的稀疏矩阵求解技巧提供有利条件，可大大地节约内存和机时。

六、结束语

为适应电力系统的日益发展，研制复杂网络主要保护整定计算的计算机应用的软件，是当前电力系统继电保护工作的当务之急。为了提高应用软件的质量，适应网络结构和工况的多种变化，简化计算、节约内存和机时，提高计算速度，扩大实用范围，我们在研制中都作了一些有效的探讨。该软件经过对较为复杂的湖北电力系统的试算，证实对多种零序互感耦合线路，在不同工况下的处理和计算，较为简便，算式正确，适应性广；将局部地区网络以外的复杂网络进行等效化简，概念清晰、算法正确，所得等值网络的结构紧密简明，较为实用；考虑包括零序互感组新增支路在内的动态优化的自动节点编序方法，效果较好。通过今后运行实践的检验，将会使该软件更趋完善。

参考文献

- [1]、Tarsi, D.C., "Simultaneous Solution of Line-Out and Open-End Line-to-Ground Short Circuits" IEEE Trans. Power App. and Syst., Vol. PAS-89, No. 6, 1970
- [2]、电子数字计算机的应用——电力系统计算 水利电力出版社 1978
- [3]、电力系统分析 华中工学院出版社 1985
- [4]、HaPP, H.H., Piecewise Methods and Applications to Power Systems. John Wiley and Sons, New York, 1980
- [5]、电力系统潮流计算——利用导纳矩阵稀疏性的牛顿法
何仰赞，王珍珍 1977.