

基于补偿法的电网图形化开断分析

尹亮, 蔡泽祥

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 电网开断分析在整定计算及运行方式设定具有重要意义, 该文通过电网图形局部拓扑分析, 采用后补偿模式只对部分支路进行修正, 大大提高了整定效率, 并根据此原理在整定计算程序中对各种电网开断方式进行了研究。

关键词: 后补偿; 开断计算; 注入电流; 附加导纳; 电网图形拓扑; 零序互感

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)15-0041-04

0 引言

整定计算程序中, 不仅要进行基本运行方式的计算, 还需进行开断方式(检修方式)的计算。计算开断方式时, 程序编制上当然可重新形成导纳矩阵, 分解因子表, 这样处理计算速度慢, 为提高速度, 在编程中采用了补偿法的原理, 利用基本运行方式时的节点导纳矩阵及因子表进行开断方式计算, 当节点数目变化时可直接修改因子表。实践表明, 当网络注入电流不变, 而一次开断支路不很大时, 使用补偿法在计算速度上可以获得很高的效益。基于对具体补偿量的计算, 这里采用了后补偿的计算模式。

1 电网图形拓扑分析

图形化平台提供了一个从一次系统主接线图绘制到运行方式设定, 数据库存储, 形成元件间的拓扑连接关系, 形成导纳矩阵, 进行各种计算(包括开断计算)的可视化环境。该平台能够用标准的图元方便快捷地绘制和修改主接线图, 添加系统的设备数据; 能够灵活地设置系统设备的运行方式和开断类型; 主接线图的绘制数据、网络的拓扑连接数据(自动生成)、运行方式数据、各种计算的结果都存储到后台的数据库(这里运用了 access 数据库)中。

一次系统主接线图是由几何图形的坐标信息自动形成拓扑的, 并引入了独特的基于“捕捉点”的拓扑形成的三层模型, 使其与绘图程序实现图形和拓扑数据的同步关联。首先, 根据“设备—捕捉点连接模型”形成设备的连接关系; 然后将设备抽象为节点和线段, 并将连通的节点抽象为母线, 将连通的线段抽象为支路, 形成“简化了的厂站层设备连接模型”; 最后, 对形成的厂站子网图和输电线路子图做连通性分析, 形成“全网的母线—支路等值拓扑

模型”。据此可以形成全网的“母线—支路”关联矩阵, 进而可以形成节点导纳矩阵和节点阻抗矩阵, 在故障计算中得到实际应用。

电网的开断计算和电力系统一次主接线图及整定计算紧密结合在一起, 是基于图形化平台来进行的。电网中开断操作反映于开关元件的操作, 主要是断路器的操作, 这意味着电网拓扑结构发生改变, 需要实现实时的网络拓扑跟踪。当计算程序初始化时, 拓扑处理程序必须处理每一个断路器信息来决定初始拓扑, 形成最初的节点导纳矩阵及其因子表, 当断路器状态改变时, 程序只跟踪处理拓扑发生变化的厂站, 采用局部拓扑快速跟踪法, 这样可以通过补偿法对已生成的节点导纳矩阵及其因子表进行修正, 避免重新优化排序和对角化。值得注意的是, 这种计算是在电网注入电流不变的情况下进行的。

由图 1 可以看出断路器操作对全网等值拓扑的改变, 正常运行时 L_{d2} 接于 bus2 上, L_{d3} 接于 bus1 上。breaker 4 ~ 13 操作则开合支路, 可直接修正导纳矩阵对应项; breaker 14 闭合, 则 L_{d2} 和 L_{d3} 可视为接于同一节点上, 如果开断则增加一个节点, L_{d2} 和 L_{d3} 分别接于不同节点, 导纳矩阵增加一行一列并修改对应项。

2 补偿量计算

依计算补偿量的先后次序不同有 3 种计算模式, 即后补偿、前补偿和中补偿。本文采用后补偿计算模式, 即先计算原网络方程的解, 再计算补偿项。由于对已有网图保存了其正常运行方式下的节点导纳矩阵及其因子表, 故不用再求原网络方程的解, 后补偿有很大的优势。

本文通过电网图形的等值拓扑分析, 以单支路开断为基础, 运用叠加原理和关联矩阵来处理各种

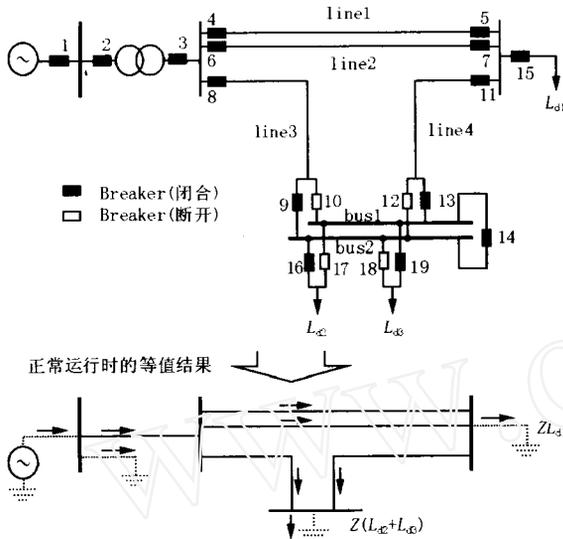


图 1 正常运行时图形化主接线图的等值拓扑

Fig 1 Equivalent topology of the main wiring diagram on normal operation

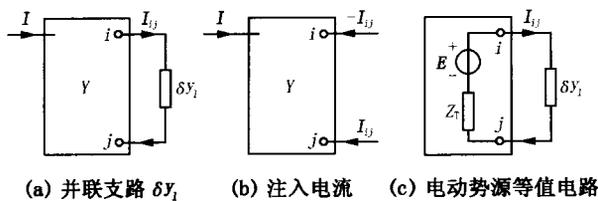


图 2 补偿量计算原理图

Fig 2 Block diagram of the compensation quantity calculation

开断情况,下面以开断一条单支路为例,说明本文在开断计算中运用的补偿量计算原理。

设网络 N 的导纳矩阵已经生成,并已形成相应的因子表。若在节点 i, j 之间断开支路 l , 可视为在 i, j 之间并联一条附加导纳(负值)支路,如图 2(a), 即 $y_l = -y_l$ 。这样原网络结构不变,注入电流也不变,在节点 i, j 上注入电流 $-I_{ij}$ 和 I_{ij} , 如图 2(b), 这个电流 I_{ij} 就是在原网络上并联 y_l 之后在该支路上流过的电流。只要求出 I_{ij} , 把它注入到节点 i, j 上, 再加上原来的注入电流矢量 I 作为开断前网络的注入电流, 就可以求解出变化后网络的节点电压 U 。这里可利用等值电动势源求出 I_{ij} , 如图 2(c) 为求注入电流的等值电路。考虑到图中电流的正方向, 则

$$I_{ij} = E / c^{-1} = dM^T Y^{-1} I = (y_l^{-1} + M^T Y^{-1} M)^{-1} M^T Y^{-1} I \quad (1)$$

$$I = \begin{bmatrix} -I_{ij} \\ I_{ij} \end{bmatrix} = -M I_{ij} = -M dM^T Y^{-1} I \quad (2)$$

当开断 m 条支路时, 则式 (2) 中 $c = (y^{-1} + M^T Y^{-1} M)^{-1}$, 其中 y 是 $m \times n$ 阶由支路导纳参数组成的对角线矩阵, M 是和发生变化的元件相对应的 $n \times m$ 阶节点支路关联矩阵。再根据后补偿法求出各节点的电压向量。

3 电网开断算法分析

对于现有的网图, 其各线路特性参数以及相应的正常运行方式下的节点导纳矩阵和因子表都已存于数据库中。当要进行开断计算, 断开某一条或者几条线路时首先要分析所开断线路的特性, 包括是母线还是支路, 是否含有变压器, 是否存在互感, 是单回支路还是双回支路等等, 对于 T 型和星型接线的支路, 每条分支当作一条支路来处理。下面就几种情况进行分析。

3.1 开断一般支路

对于一般支路(包括变压器支路), 各开断线路之间无互感时, 采用面向支路的修正方法来构造 c , 此时:

$$M^T = \begin{cases} [1 & -1] & \text{无变压器支路} \\ [1 & -\frac{1}{l}] & \text{变压器支路} \end{cases}$$

对一条支路开断, M 是 $n \times 1$ 列矢量, 只在开断支路两个段节点处有非零元。 y 是标量, 其值是支路导纳, 对支路开断取负值, 对添加支路(线路断路器开关合并)取正值。当开断 m 条支路时原理也是一样, 只是 M 为 $n \times m$ 阶矩阵。

3.2 开断两端有充电电容支路的支路

考虑线路两端有充电电容支路时, 该支路开断引起导纳矩阵的变化是

$$y = - \begin{bmatrix} y_l + y_c & -y_l \\ -y_l & y_l + y_c \end{bmatrix}_{n \times n} \begin{matrix} i \\ j \end{matrix}$$

其中: y_l 是支路导纳, y_c 是充电电容, 针对这类型的支路, 如果采用面向支路的修正, $m = 3$, M 是 $n \times 3$ 列矢量, 为了降低 M 的维数, 本文采用面向节点的修正, 则

$$M^T = \begin{bmatrix} i & j \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_{2 \times n}$$

显然, 这时 $m = 2$, 面向节点的修正更简单。当开断 m 条支路时原理也是一样, 只是 M 为 $n \times 2m$ 阶矩阵。

3.3 开断互感支路

在实际电网中, 任意两条输电线路, 只要它们不

是相互垂直,就应该有“互感”作用。其中,当两回线路平行时,支路互感最大。在进行开断操作时,互感的影响要根据电网序网图的不同分别计算,尤其是零序网络。

相邻支路的零序互感对零序电流、电压的数值有很大影响,当其中一回支路检修并两端接地,或一回支路发生接地短路,一侧断路器先跳开后,双回支路中零序电流方向相反而产生去磁作用,零序电抗减小,零序电流增大。因此,有零序互感的平行支路,零序附加导纳 y 需要综合考虑。下面以同一电压等级的双回支路来说明零序互感的影响,如图 1 中的 line1 和 line2,其零序回路电抗为 $X_{原} = \frac{U_{MN}}{I_{01} + I_{02}} =$

$$\frac{X_{01}X_{02} - X_0^2}{X_{01} + X_{02} - 2X_0} \text{ (如图 3)。}$$

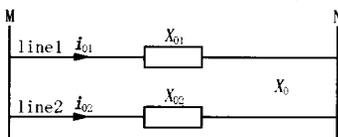


图 3 双回支路零序回路

Fig 3 Zero-sequence loop of double circuit

由于一般实际开断检修都是接地进行的,考虑到线路故障,双回线的操作主要有两类情况: 断开其中一条支路,并两端接地; 双回支路全断。

对于第一类情况,不妨假设回路 line1 断开并接地,如图 4。

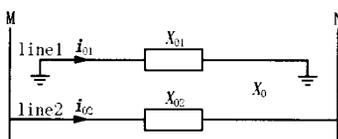


图 4 开断 L_1 回路并接地

Fig 4 Break loop L_1 and earth it

现在的零序回路电抗为:

$$X_{现} = \frac{U_{MN}}{I_{02}} = \frac{X_{01}X_{02} - X_0^2}{X_{01}}$$

$$y = \frac{1}{X_{现}} - \frac{1}{X_{原}} = \frac{2X_0 - X_{02}}{X_{01}X_{02} - X_0^2}$$

对于第二类情况

$$y = -\frac{1}{X_{原}} = \frac{2X_0 - X_{01} - X_{02}}{X_{01}X_{02} - X_0^2}$$

开断互感支路可以采用面向支路的修正方法来构造 M^T ,但要区分是开断一回还是两回支路。

3.4 开断母线

开断母线一般意味着母线节点的增加,包括厂

站母联开关或 3/2 接线中开关等零阻抗元件的开断等。如断开图 1 中的 breaker14,则其等值拓扑变为如图 5 所示。

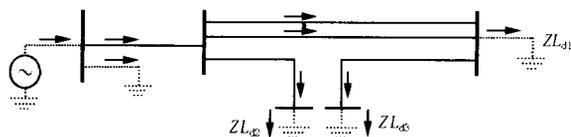


图 5 断开 breaker14 后的等值拓扑

Fig 5 Equivalent topology after opening breaker 14

增加母线节点时,其编号按递增顺排下去,对应导纳矩阵最后一行一列,矩阵维数增加;减少母线节点时,其各项保留在导纳矩阵中,只是将对应项的值设为零,矩阵维数不变,这样可以避免对节点的重新排序,也无需重新生成因子表。

对于一个有 n 个节点的网络(假设编号最大也为 n),分割母线节点 i 对导纳矩阵的修正分以下三步完成:

1) 增加一个节点 $n+1$, 对应导纳矩阵增加一行一列。

2) 搜索增加前与节点 i 有支路关联的节点在增加节点后与 i 的关联性,对于不再关联的节点,采用开断一般支路的方法修正导纳矩阵,如果有互感影响的支路则采用开断互感支路的方法来修正。

3) 搜索与新增节点 $n+1$ 有支路关联的节点,采用增加一般支路或者增加互感支路的方法来修正,此时,只要将附加导纳取负值即可用开断时的公式。

虽然增减节点时的节点编号处理增加了因子表的维数,但其算法速度上的快速性是追求因子表稀疏带来的计算耗时所不能比拟的。

4 结论

由于形成一次因子表的运算量远大于求解一次网络节点方程运算量,本程序采用后补偿,通过局部拓扑快速跟踪法,大大减少了运算量,提高了计算速度,使开断计算及后面的故障计算、整定计算工作更为便捷。

参考文献:

- [1] 张伯明,陈寿孙. 高等电力网络分析 [M]. 北京:清华大学出版社,1999.
- ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun Analysis of Advanced Power Network [M]. Beijing: Qsinghua University Press, 1999.

- [2] Kruglinski D J, 等. Programming Visual C++ 6.0 技术内幕 (第五版) [M]. 北京: 北京希望电子出版社, 1999.
Kruglinski D J, et al. Technique Core of Programming Visual C++ 6.0, Fifth Edition [M]. Hope Book Editing Studio, Trans Beijing: Publishing House of Hope Electronics, 1999.
- [3] 孙鸣, 单永梅. 补偿法在继电保护整定计算中的应用 [J]. 电网技术, 2003, 27(7): 28-31.
SUN Ming, SHAN Yong-mei Application of Compensation Algorithm in Setting Software for Line Protection [J]. Power System Technology, 2003, 27(7): 28-31.
- [4] 高艳萍. 补偿法在零序保护整定计算程序中的应用 [J]. 电力自动化设备, 1997, 17(2): 28-31.
GAO Yan-ping Application of Compensation Method in the Program for Zero-sequence Relay Setting [J]. Electric Power Automation Equipment, 1997, 17(2): 28-31.
- [5] 王春, 柳焕章. 一种用于线路开断修改节点阻抗矩阵的简便方法 [J]. 继电器, 1997, 25(4): 12-16.
WANG Chun, LIU Huan-zhang A Convenient Method for Modifying Node Impedance Matrix after a Line Being Disconnected [J]. Relay, 1997, 25(4): 12-16.
- [6] 曹国臣, 宋家骅. 网络分析中计算节点合并与分割的补偿法 [J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(3): 171-175.
CAO Guo-chen, SONG Jia-hua The Compensation Method for Manipulating Node Combinations and Separations in Network Analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(3): 171-175.
- [7] 柳焕章, 王春, 陈允平. 用于线路开断修改节点阻抗矩阵的新算法 [J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 30(1): 57-59.
LIU Huan-zhang, WANG Chun, CHEN Yun-ping New Algorithm for Modifying Node Impedance Matrix after a Line Being Disconnected [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1997, 30(1): 57-59.
- [8] 宛力, 谷水清. 输电线路模拟开断的一种算法 [J]. 东北电力技术, 2000, 12(1): 17-19.
WAN Li, GU Shui-qing A Method for Analogous Breaking of Transmission Lines [J]. North East Electric Power, 2000, 12(1): 17-19.
- [9] 王士和. 长输电线开断过程的分析 [J]. 电气开关, 2001, 2(1): 12-16.
WANG Shi-he A Process Analysis for Breaking of Long Transmission Lines [J]. Switchgear, 2001, 2(1): 12-16.
- [10] 王涛, 王春生. 计算机专家系统在电网补偿度整定计算中的应用 [J]. 锦州师范学院学报 (自然科学版), 2003, 24(3): 30-32.
WANG Tao, WANG Chun-sheng The Application of Computer Expert System in Power System Compensation [J]. Journal of Jinzhou Normal University, Natural Science, 2003, 24(3): 30-32.

收稿日期: 2004-11-10; 修回日期: 2005-01-08

作者简介:

尹亮 (1979 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护安全与监控; Email: epyinliang@163.com

蔡泽祥 (1960 -), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统继电保护、电力系统稳定与控制的教学和研究工作。

Break analysis of power network graphics based on compensation algorithm

YN Liang, CAI Ze-xiang

(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In setting calculation and setting up the running mode, the break analysis of power network is very important. Through the partial topology analysis of power network graphics, using the back compensation mode on partial branches only are needed to modify. Using this method the efficiency of setting is advanced. According to this principle, various break pattern of power network in setting program is studied.

Key words: back compensation; break calculation; injecting current; accessional admittance; power network graphic topology; zero-sequence mutual inductance

(上接第 32 页 continued from page 32)

Abstract: This paper presents a weighted least squares method for state estimation based on block Jacobian matrix. In the proposed method, whole injection measurements, highly weighted virtual measurements and a few essential flow measurements make up measures which can be used for resolving all state variables of a power system, while other flow measurements are considered redundant to resolve state variables. In the following, the Jacobian matrix is divided into two blocks and the iterative formula is introduced. The experiment proves that the proposed algorithm can reduce calculation in normal redundant level of measure configure and has good numerical stability.

Key words: power system; state estimation; numerical stability; block Jacobian matrix