

基于图形化主接线图的电气连通性分析和研究

尹亮

(广东电网公司中山供电局, 广东 中山 528400)

摘要: 电气元件的连通性判别是图形化分析的基础, 从主接线图中各电气元件之间的连接性及其属性之间的匹配性入手, 综合分析了元件连通性的判别方法。通过把母线/开关和接地点/变压器描述的物理模型转化为节点/支路描述的网络模型, 提出了分序网图分别进行电气连通性分析的新思路, 这种方法对序分量及序网分析有重要指导意义。同时, 结合图论方法和网络模型, 通过比较已有的分析方法, 改进了节点矩阵法的计算流程, 使它在运算次数上大大减少, 计算速度也明显提高。

关键词: 主接线图; 电气连通性; 捕捉点; 网络模型; 图论; 节点矩阵法

Study and improved arithmetic about electrical connectedness of main electrical scheme

YIN Liang

(Zhongshan Power Supply Branch, Guangdong Power Grid Corporation, Zhongshan 528400, China)

Abstract: The electrical connectedness is a base of graphical analysis. Based on the connection of elements and the matching of their property in main electrical scheme, this paper synthetically analyses the discriminance of electrical connectedness. Through changing the physical model that be described by generatrix and transformer into the network model that be described by note and spur track, a new thought about analyzing electrical connectedness according to the order net is brought forward. This thought has important meaning to analysis of the order net. At the same time, combining the theorem of graph theory and the network model, and comparing with the known methods, the farther study is put forward and the counting flow chart of the node matrix method is improved in the paper. This method decreases the counting times greatly and improves the counting speed clearly.

Key words: main electrical scheme; electrical connectedness; snap points; network model; graph theory; node matrix

中图分类号: TM75 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)15-0065-04

0 引言

图形化的分析方式已经广泛应用到现代电力系统的控制、调度、辅助决策等各个方面。对于一次主接线图系统来说, 图形化平台的关键问题就是电网的拓扑表示。本文从图元绘制的“元件—捕捉点连接模型”入手, 通过元件自身特点分析, 形成全网的“母线—支路”拓扑结构。

很多文献对电气连通性进行了多方面的研究, 不过都仅仅是在数据结构和计算流程上进行了阐述。本文将网图绘制为出发点, 考虑了元件连接性及其属性匹配关系, 力求对电气连通性进行更为全面的分析。同时, 根据图形化电气主接线图的特点, 本文在已有算法的基础上, 对电网电气连通性在计算方法上进行了优化设计, 并用于图形化分析软件的开发之中。

1 元件的连接判断

在图形化分析中, 常常会设计一个图形绘制模

块。主接线图绘制的正确与否, 直接影响到电气连通性的分析。元件—捕捉点连接模型在图形上可以表示为元件与元件之间的关联, 它是通过捕捉图形的位置关联来实现的。从元件的连接关系及其在主接线图的体系看, 判断两个元件是否相连, 需要判断这两个元件的引线端点是否重合, 母线为多端元件, 可视为一个长条形端点。对于这种可以根据坐标位置判断是否相连的端点, 称为“捕捉点”, 它是元件连接判断的依据。

主接线图所代表的元件拓扑连接关系是由绘图信息中的元件连接关系产生的, 即拓扑分析是在绘制主接线图的过程中同步完成, 不需要另外输入。显然这种拓扑输入方法能够有效地提高主接线图拓扑结构输入的效率, 拓扑修改也灵活方便。已有的连通性判断方法都是通过全网拓扑分析后, 基于全网等值的点边关系的, 因此, 本文提出从元件连接性入手进行连通性分析, 主要从以下三个方面进行判断:

(1) 判断相邻点的连接关系时, 设定一定的灵

敏度，对于相距小于一定值的点判断为连接；

(2) 在主接线图上分别着色显示已经连接或者尚未连接的点；

(3) 在主接线图编辑时判断当前移动点，如果该点与某一点的间距小于一定值的时候，该点自动移到相邻点重合的位置，并判断为连接。

通过以上方法，我们确保了主接线图各元件的正确绘制，但从电气角度看，它们是否连通呢？还要从三个方面考虑：

(1) 支路的开关状态。开关状态可以通过图形化界面设置，根据开关状态的变化来判断电气连通性，开关合上则是连通的，反之为非连通。

(2) 节点电压等级的匹配。节点电压等级的匹配性需要分析节点之间的支路属性，如一个 220 kV 母线节点和一个 110 kV 母线节点通过变压器支路相连，则需要分析判断该变压器各侧电压等级与母线电压等级匹配性，如果匹配，则两母线节点之间在电气上是连通的，否则为非连通，并发出错误警告。

(3) 变压器接线方式和接地点的设置。变压器接线方式和接地点都是影响零序分量的主要因素，从零序网图的角度看，如果变压器接线方式为 Y_0/Δ 且接地，则判断该变压器在电气零序分量上是连通的，反之则为非连通。

2 主接线图的网络模型

网络电气连通性分析的主要任务是根据开关状态的变化和接地点的设置，形成网络元件之间的连接关系，其实质是把母线/开关和接地点/变压器描述的物理模型转化为节点/支路描述的网络模型。电

网的主体部分是由变压器、母线、开关等设备通过输电线连接组成的，在结构上具有明显的“点一边一点”特征，用图论方法来分析是最合理的。文献[3,4]提出的网络模型都是针对正序的，本文提出分序建模的思路，主要是为了进一步研究序分量的特殊性，对序网图的分析有重要的指导意义。

对于图 1 所示的主接线简化图，分序建立便于图论分析的网络模型，其基本思路是将母线和接地点看作是一个电气节点；断路器、闸刀、接地闸刀、变压器等可以看作是连接电气节点的支路，节点之间由支路相连，支路是否连通则取决于开关的状态和变压器的接地点设置。

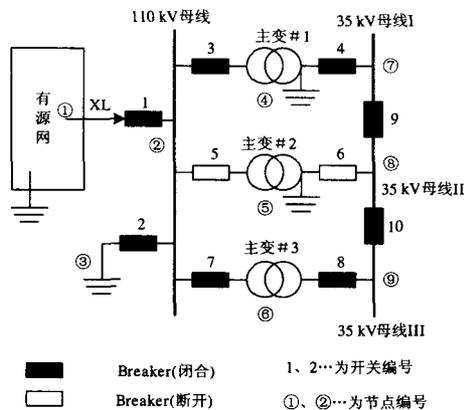


图 1 一次主接线简化图

Fig.1 Schematic diagram of the main electrical scheme

图 2 为一次主接线的网络模型，其节点编号与支路编号与图 1 一一对应。对于图 2 (b)，假如图 1 高压侧母线发生故障时，由于主变#3 没有设置接地点，支路 7、8 和 4 都为非连通。这种分序建模的思想便于对各序网进行分析。

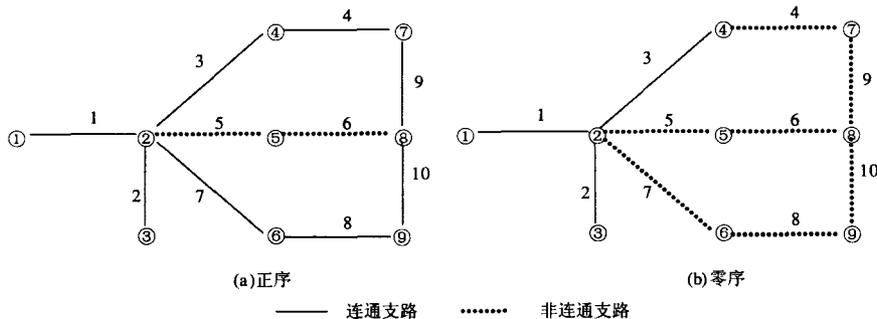


图 2 一次主接线的网络模型

Fig.2 Network model of the main electrical scheme

3 电气连通性分析方法的改进

3.1 已有的连通性分析方法

文献[1]提出了判断图的连通性的一种融合顶点法：从图中某个顶点开始，融合所有与其邻接的

顶点, 然后再继续融合新增加的与其邻接的顶点, 此种过程一直进行到没有新增加的邻接顶点时为止。这表示一个连通片已经融合为一个单一的顶点。如果图中每个顶点都可以融合, 该图就是连通的。否则, 从另一个连通片的某个新的顶点开始, 重新进行顶点的融合过程。

树搜索法主要有广度优先搜索法和深度优先搜索法, 但文献[3]提出, 该方法对变电所和环状网络的适应性较差, 同时由于深度优先搜索法需要回溯, 使得该方法在搜索过程中搜索的节点数比实际网络含有的节点数多, 而影响了计算的速度。

文献[3]还提到一种邻接矩阵法, 这里不妨叫节点矩阵法, 它是采用节点-节点关联矩阵来描述拓扑图中两点之间的连通关系的, 直观性比较好。但由于程序中的数据存储空间开销与节点数 n 的平方成正比。在时间开销上, 它的运算次数是 n 的平方级的。因此, 当网络规模不大时, 现有算法尚可承受; 而当网络规模充分大时, 用于连通性检查的运算时间将随节点数 n 的平方增长, 这种算法将难以承受。

文献[6]对节点矩阵法进行了简化和加速: 将行列间的布尔乘改为行行间的布尔乘; 只对零元素进行循环; 对节点进行优化编号; 消去中间节点和开关支路。

本文针对节点矩阵法的缺点, 在文献[6]的基础上对计算流程做了改进, 使它在运算次数上大大减少, 时间开销也大为缩短。

3.2 节点矩阵法的改进

由网络的拓扑知识, 如果节点 i 与节点 j 相连接, 而节点 j 又与节点 k, l, \dots, n 相连接, 则节点 i 也与节点 k, l, \dots, n 相连接。一个有 n 节点的图, 对零元素 c_{ij} 进行第 i 行第 j 列的布尔乘, 若结果为 0, 说明节点 i 和节点 j 不连接, 从矩阵的乘法看, 这两行对应列的元素不能同时为 1; 如果结果为 1, 说明节点 i 和节点 j 相连接, 从矩阵的乘法看, 这两行必有一列或者几列的对应元素同时为 1。根据这个特点, 可以通过判断这两行对应列元素是否同时为 1, 来代替两行间的布尔乘。同时, 若新的 $c_{ij} = 1$, 原来的 $c_{ik} = 0$, $c_{jk} = 1 (j < k \leq n)$, 说明节点 i 与节点 j 相连接, 而节点 j 又与节点 k 相连接, 节点 i 与节点 k 也是相连接的, 这时, 则将满足条件的 c_{ik} 全部变为 1。该处理方法的计算流程如

图 3 所示。

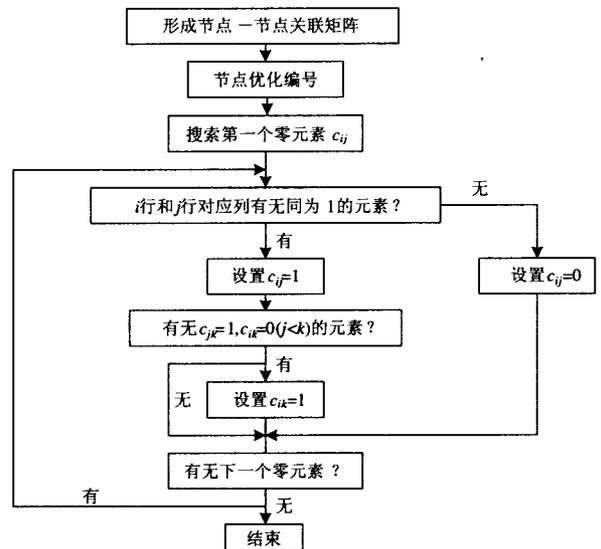


图 3 改进的节点矩阵法计算流程图

Fig.3 Flow chart for the improved node incidence matrix arithmetic

通过这种处理, 使得运算次数进一步减少了。在文献[4]提出的算法中, 若 i 行中有 $m (1 \leq m \leq n)$ 个零元素, 对其中每一个零元素要进行 n 次布尔乘和 $n-1$ 次布尔加, 则 i 行中的 m 个零元素的运算总次数为 $m(2n-1)$ 。运用本文的方法, 计算 i 行 j 列零元素时, 判断 i 行和 j 行对应元素是否全为 1, 最多进行 n 次判断, i 行又有 $l_j (l_j \leq m, j < n)$ 个变为 1, 则运算的次数为 $n+l_j$; 再寻找 i 行下一个零元素, 如此进行了 $x (x \leq m)$ 次计算, 则 i 行中零元素运算的总次数 $x(n+l)$, 其中 $l = \max(l_1, \dots, l_n)$ 。由上可见, 运算次数明显少于 $m(2n-1)$ 。

如图 2 (a) 所示的连接图, 可知其节点-节点矩阵为 C_1

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

如果对 c_{14} 进行计算, 由于 $c_{12} = c_{42} = 1$, 则 $c_{14} = 1$, 同时 $c_{17} = 0$, $c_{47} = 1$, 则 c_{17} 变为 1, 这样就减少了一次对 c_{17} 的判断, 结果变为

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

经过 3 次全矩阵的循环, 便可以得到如下结果, 很明显, 除了节点⑤外, 其他各节点都是连通的。

$$C_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

4 结束语

一次主接线图的电气连通性分析在电力管理系统中占有非常重要的地位, 对其进行研究具有重要的应用价值。本文结合一次主接线图的特点, 对电气连通性作了更为全面的分析, 并进行了算法改进:

- (1) 从图形化平台入手, 通过判断元件的连接性及其属性的匹配性来分析电气连通性;
- (2) 提出了分序建立网络模型, 进行电气连通性分析的思想;
- (3) 在总结原来节点矩阵法的基础上, 对计算方法进行了优化。

分析表明, 该算法提高了电气连通性分析的速度, 同时为电气连通性分析的应用开发提供了新的思路。

参考文献

[1] 陈树柏. 网络图论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
 [2] 陈惠开. 应用图论—图与电网络[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1990.

[3] 罗日成, 李卫国. 配电网电气连通性分析的快速算法研究[J]. 电网技术, 2004, 28(24): 52-56.
 LUO Ri-cheng, LI Wei-guo. Research on High-speed Algorithm for Electrical Connectivity Analysis of Distribution Networks[J]. Power System Technology, 2004, 28(24): 52-56.
 [4] 储俊杰. 变电所一次主接线电气连通性分析的数学模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(1): 31-33, 48.
 CHU Jun-jie. Mathematical Model for Analyzing Electrical Connectedness of Main Electrical Scheme in Substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(1): 31-33, 48.
 [5] 陆鸣盛, 沈成康. 图的连通性快速算法[J]. 同济大学学报, 2001, 29(4): 436-439.
 LU Ming-sheng, SHEN Cheng-kang. Speedy Algorithm for Connexity of Graph[J]. Journal of Tongji University, 2001, 29(4): 436-439.
 [6] 王湘中, 黎晓兰. 基于关联矩阵的电网拓扑辨识[J]. 电网技术, 2001, 25(2): 10-12, 16.
 WANG Xiang-zhong, LI Xiao-lan. Topology Identification of Power Network Based on Incidence Matrix[J]. Power System Technology, 2001, 25(2): 10-12, 16.
 [7] 王萍, 吴雪, 路志英, 等. 基于关系型数据库的电力网连通性判断[J]. 天津大学学报, 2002, 35(4): 501-505.
 WANG Ping, WU Xue, LU Zhi-ying, et al. Connectivity Judgement for Electrical Power Network Based on Relation Data Base[J]. Journal of Tianjin University, 2002, 35(4): 501-505.
 [8] 贾进章, 刘剑, 宋寿森. 基于邻接矩阵图的连通性判定准则[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22(2): 158-160.
 JIA Jing-zhang, LIU Jian, SONG Shou-sen. Judgement Criterion of Graph Connectivity Based on Adjacent Matrix[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2003, 22(2): 158-160.
 [9] 李元左. 关于网络广义连通性的探讨[J]. 系统工程, 1995, 13(3): 55-61.
 LI Yuan-zuo. The Generalized Connectivity of the Graph[J]. Systems Engineering, 1995, 13(3): 55-61.
 [10] 朱文东, 刘广一, 于尔铿, 等. 电力网络局部拓扑的快速算法[J]. 电网技术, 1996, 20(3): 30-33.
 ZHU Wen-dong, LIU Guang-yi, YU Er-keng, et al. The Fast Calculation Method of Local Power Network Topology[J]. Power System Technology, 1996, 20(3): 30-33.
 [11] 董张卓, 秦红霞, 孙启宏, 等. 采用面向对象技术和方法的电力系统网络拓扑的快速跟踪(一) [J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(3): 178-181.

方法等方面比较了 IEC60909 与 PSASP 短路计算的相似与不同, 并通过算例进行了进一步说明。综上所述, 可以得到以下结论:

1) IEC60909 提供的是在满足工程精度的条件下, 对系统短路电流进行“估算”的方法。这种方法在参数取值、计算算法等方面较为简便, 但在因数计算和对复杂电网的处理方面比较麻烦。

2) PSASP 基于潮流的短路计算采用的是理论上较为完备的元件数学模型和计算方法, 计算结果对应于系统一个确定状态。这种方法对复杂电网的处理比较方便, 计算精度较高, 结果可以直接用于暂态稳定计算, 但参数取值较为麻烦。如果希望得到系统的最大短路电流, 需要进行多个运行方式的计算, 而运行方式的选取还有待于确定一个理论上较为完备的规则。

3) PSASP 计算的是在远端短路条件下, 初始对称短路电流有效值 I_k^* 。IEC60909 提供了短路过程中更为丰富的各种变量的计算方法。

4) IEC60909 与 PSASP 短路算法在本质上相类似, 对于一个确定的电网, 两者故障点短路电流计算结果差别不大。

参考文献

[1] International Standard Short-circuit Currents in Three-phase a.c. Systems-Part 0: Calculation of Currents[S]. IEC, 2001.

[2] International Standard Short-circuit Currents in Three-phase a.c. Systems-Part 1: Factors for the Calculation of Short-circuit Currents According to IEC 60909-0[S]. IEC, 2002.

[3] Electrical Equipment-Data for Short-circuit Current Calculations in Accordance with IEC 909(1988)[S]. IEC, 1992.

[4] International Standard Short-circuit Currents in Three-phase a.c. Systems-Part 3: Currents During two Separate Simultaneous Line-to-earth Short Circuits and

Partial Short-circuit Currents Flowing Through Earth[S]. IEC, 2003.

[5] International Standard Short-circuit Currents in three-phase a.c. Systems-Part 4: Examples of Short-circuit Currents[S]. IEC, 2001.

[6] GB/T 15544-1995, 三相交流系统短路电流计算[S].

[7] 电力系统分析综合程序(6.1版)暂态稳定计算用户手册[Z]. 北京: 中国电力科学研究院电网数字仿真技术研究所, 2001.

[8] 电力系统分析综合程序(6.1版)短路计算用户手册 [Z]. 北京: 中国电力科学研究院电网数字仿真技术研究所, 2001.

[9] 何仰赞, 温增银, 汪馥瑛, 等. 电力系统分析, 修订版上册[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996.

[10] 周孝信, 李汉香, 吴中习. 电力系统分析[M]. 北京: 中国电力科学研究院, 1989.

[11] 李亚楼, 周孝信, 吴中习. 一种可用于大型电力系统数字仿真的复杂故障并行计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 1-5.
LI Ya-lou, ZHOU Xiao-xin, WU Zhong-xi. A Parallel Complex Fault Computation Algorithm for Large Scale Power System Digital Simulation[J]. China Electric Power Research Institute, 2003, 23(12): 1-5.

[12] 电力系统分析综合程序(6.1版)基础数据库用户手册[Z]. 北京: 中国电力科学研究院电网数字仿真技术研究所, 2001.

[13] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.

收稿日期: 2008-09-13

作者简介:

黄彦浩 (1978 -), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统计算与分析; E-mail: hyhao@epri.ac.cn

施浩波 (1977 -), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统计算与分析;

安宁 (1978 -), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为电力系统计算与分析。

(上接第 68 页 continued from page 68)

DONG Zhang-zhuo, QIN Hong-xia, SUN Qi-hong, et al. Object-oriented to Fast Tracking of Topology for Power System(Part 1) [J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(3): 178-181.

[12] 董张卓, 秦红霞, 孙启宏, 等. 采用面向对象技术和方法的电力系统网络拓扑的快速跟踪(二) [J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(4): 283-287.

DONG Zhang-zhuo, QIN Hong-xia, SUN Qi-hong, et al.

Object-oriented to Fast Tracking of Topology for Power System(Part 2)[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(4): 283-287.

收稿日期: 2008-05-16

作者简介:

尹亮 (1979-), 男, 工程师, 主要从事电网继电保护维护定检工作。E-mail: epyinliang@163.com