

基于GIS的10 kV配电网电气连通性分析

周云成, 付立思, 许童羽, 朴在林

(沈阳农业大学信息与电气工程学院, 辽宁 沈阳 110161)

摘要: 为了能在GIS系统上对复杂配电网进行直观且高效的网络分析, 采用在变电站馈出口处虚设电源点的方式对复杂配电网进行简化, 提出了一种基于唯一编码的、且利于数据库实现的描述简化配电网电气设备连接关系的网络拓扑模型。提出将开关、线路分歧连接处、电源点-线路连接处转换为支路, 电源点和由开关分割的线路连通段转换为节点的网络节点划分方法, 该方法可降低网络节点数量。采用邻接矩阵法对网络进行连通性分析, 详细描述了从网络拓扑数据中提取节点邻接矩阵所需的网络节点和连接支路的算法。描述了由节点邻接矩阵通过运算生成节点连通矩阵, 进而判断节点连通关系的矩阵运算方法, 以及确定配电网停电范围的算法。算例表明, 提出的网络拓扑模型和邻接矩阵生成及运算方法, 可以进行复杂配电网的连通性分析以及停电范围分析。

关键词: 配电网; GIS; 邻接矩阵; 连通性; 连通矩阵; 停电范围分析

Electric connectivity analyzing for 10 kV distribution network based on GIS

ZHOU Yun-cheng, FU Li-si, XU Tong-yu, PIAO Zai-lin

(College of Information and Electrical Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

Abstract: In order to intuitively and quickly analyze power grid based on GIS, a network topology model based on unique identifier code which can be applied to picture linking relation of electrical equipment of distribution network is proposed in this study, and it can be implemented to database easily. Certainly, a technique that a virtual power source point is placed at every exit of feeder lines of substation is taken to simplify the complexity of distribution network in this paper. Switches, bifurcations of lines and junction points of power source points and lines are seen as branches; moreover the line sections divided by switches are regarded as nodes. This treatment method can convert distribution network to graph, meanwhile can reduce the count of graph nodes. The adjacency matrix of nodes is used to support connexity analysis. An algorithm which extracts graph data that can be applied to construct adjacency matrix from topology database of GIS is presented clearly. This paper also describes the method that transforms adjacency matrix to connectivity matrix through calculating, as well as to determine the scope of power interruption. Calculation example shows that the network topology model and methods of adjacency matrix formulation and calculation can be used to analyze the network connexity and the scope of power interruption.

This work is supported by National Natural Science Foundation of Liaoning Province(No. 20042102).

Key words: distribution network; geographic information system; adjacency matrix; connexity; connectivity matrix; scope analysis of power interruption

中图分类号: TM645.1; TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)10-0083-06

0 引言

10 kV配电网存在着线路规模庞大, 设备众多等特点, GIS(地理信息系统)作为一种信息技术手段可为配电网资源信息的高效管理提供支持。单纯建设配电网地理信息系统, 而不考虑配电网

网络的拓扑问题, 则配电网GIS在电力企业中只能承担电子地图或MIS(管理信息系统)的角色, 不能充分发挥GIS的分析优势。随着经济发展对供电可靠性要求的提高, 在配电网中双电源供电、环网供电和网格供电的模式越来越普遍, 这对配电网的运行管理提出了更高的要求。在GIS图形化展示的基础上, 对配电网拓扑结构进行辨识, 以及对开关分合动作下配电网电气连通性及停电范围进行

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(20042102)

分析, 可有效地对配电网的运行管理提供辅助决策支持。

由于配电网的复杂性, 使其空间拓扑关系很难反映配电网的电气元件连接关系^[1], 这就要求在配电网 GIS 中除了空间数据、设备属性数据之外, 还要有描述配电网拓扑结构的拓扑数据, 通常以关联表的形式存储于数据库中^[2-3]。描述配电网拓扑结构的数据库模型要有较高的性能, 且要利于配电网拓扑结构的修改。由于网格供电等供电模式的存在, 基于树形结构的搜索法很难用于网络的连通性分析^[4-6], 而基于图论的邻接矩阵法及其衍生方法可用于复杂配电网的连通性分析^[7-11]。本文主要探讨如何描述复杂配电网的拓扑结构, 以及将配电网拓扑结构动态转换为节点邻接矩阵并进行连通性分析的方法。

1 配电网拓扑模型

10 kV 配电网主要由接引自变电站内母线的馈线组成, 线路上包括开关、配电变压器等各种设备。线路通过导线架设于杆塔上, 或通过电缆敷设于地下、穿行于管网。变电站内的主接线具有点线特性, 可用邻接矩阵法分析其电气连通性^[8], 为简化分析, 本文不考虑变电站内的电气连通性。

在变电站的各馈出口处虚设一电源点, 各馈线接引相应的电源点, 电源点是否带电受控于变电站内部主接线的电气连通性。此时, 线路的电气连通性取决于电源点的带电状态, 以及线路上各开关的开合状态。环网或双电源供电的线路被简化成了线路两端连接两个电源点的线路。线路上的开闭站箱、变压器箱、电缆井(桩)等改变线路走向的设备点均被简化为杆塔设备。图 1 所示为简化的省略了部分配电变压器的配电网。

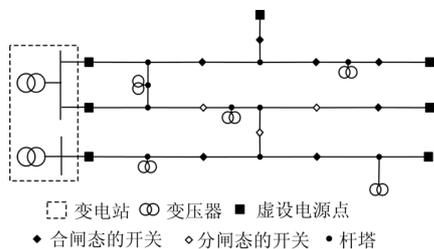


图 1 简化的配电网结构图

Fig.1 Schematic diagram of the distribution network

对简化的 10 kV 配电网做电气连通性分析, 需要记录电源点、线路及线上设备之间的电气连接关系, 即配电网的拓扑结构数据, 以备根据拓扑数据生成邻接矩阵。在设计配电网 GIS 空间数据库结构

时, 为每种元件的数据表增加编码字段, 并限制编码字段的唯一性。其次, 如果元件之间为多对多的关系(如线路与线路之间的接引, 同杆架设时的线路与杆塔之间的关系), 则相应增加维护其连接关系的以元件编码为关联字段的拓扑表。具体数据模型如下:

线路 Line (线路编码 id, 线路名称 name);

电源点 PS (电源点编码 id, 电源点名称 name, 电源点状态 state, 所属变电站 eps, 出线编码 lid, 接线路首端 begin);

杆塔 Pole (杆塔编码 id, 杆号 pn);

开关 Switch (开关编码 id, 开关名称 name, 开关状态 state, 所控线路编码 lid, 所在杆塔编码 pid);

配电变压器 DT (变压器编码 id, 变压器名称 name, 授电线路编码 lid, 所在杆塔编码 pid);

线路架设 LP (线路编码 lid, 杆塔编码 pid, 杆塔在线路上的顺序号 pno);

线路连接 LL (主线路编码 tid, 支线路编码 bid, 分歧杆塔编码 pid, 接支线首端 begin)。

在网格供电等复杂供电模式下, 线路的首末端均有可能接电源点或是其它线路的分歧, 因此在电源点和线路连接表中增加表示是否接线路首端的字段, 以表示接线位置。在 GIS 系统中, 可用该拓扑模型建立关联数据库表存储配电网的拓扑结构。

2 邻接矩阵生成

2.1 网络节点与支路的确定

由配电网生成节点邻接矩阵, 可以将分支点和配电变压器接入点看作节点, 但由于配电网分支点和配电变压器数量众多, 将会使矩阵规模庞大, 占用存储空间和处理工作量也非常大, 在不影响分析结果的基础上, 有必要对配电网进行变形简化。

在选定的配电网范围内, 任选其中一条线路, 将该线路上的开关看作连接电气节点的支路, 由开关分割的连通段及其上的配电变压器看作线路节点, 则开关的开合状态决定了两相邻节点之间的支路是否存在, 若线路上无开关, 可将整条线路看作节点, 处理方式如图 2 (a) 所示。将所有电源点均看作节点, 称为电源节点, 将电源节点与相应出线的相邻连通段(线路节点)的连接看成支路, 即二者始终有支路相连。线路(分支线)的首端和/或末端如是另一线路(主线)的分歧(T接), 则将分支线的首/末连通段与主线连通段的 T 接点看成支路, 同样二者始终有支路相连。采用此种简化方法可将图 1 所示的配电网转化成图 2 (b) 所示的网络模型,

进而可生成节点邻接矩阵。

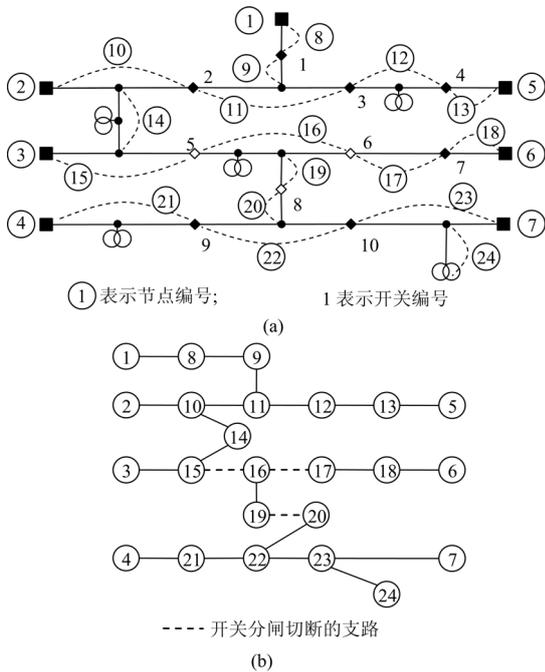


图 2 配电网网络模型

Fig.2 Network model of the distribution network

2.2 邻接矩阵提取

由于配电网结构变化较为频繁, 描述配电网连通关系的节点邻接矩阵经常需要变更。如配电网 GIS 系统的数据库能够与网架结构同步维护, 则可根据数据库中的拓扑数据实时生成电气连通图和邻接矩阵。分析可知, 图 2 (b) 所示的节点与支路信息隐藏在电源点、开关、线路连接等表中, 需要进行提取。

第一步, 将电源点转换为网络节点。

(1) 建立空内存表 PN, 用以存储电源节点, 结构为 PN (电源点编码, 节点序号, 出线编码, 接线路首端, 电源点状态); 将电源点表中的对应列复制到 PN 中; 设 $N = 1$ 。

(2) $PN(N)(2) = N; N = N + 1$; 其中 $PN(N)(2)$ 表示 PN 表中的第 N 行第 2 列。

(3) 如果 $N \leq PN$ 的行数, 返回到 (2)。

第二步, 提取线路节点和连接线路节点的支路

(1) 建立空内存表 LN 存储线路节点, 结构为 LN (线路编码, 节点序号, 起始杆顺序号, 终止杆顺序号); 建立空内存表 LE 存储连接线路节点的支路, 即由线路开关转化而来的支路, 结构为 LE (开关编码, 开关状态, 节点 1 序号, 节点 2 序号); 设 N 的初始值为第一步中 N 的结束值。

(2) 在选定的配电网范围内, 选择一条尚未处

理的线路, 设该线路编码为 lc 。

(3) 查询线路架设 LP 表中线路编码为 lc 的线路的首末杆塔的顺序号, 并顺序存储在表 A 中, 用查询语句描述: `Select top 1 pno from LP where lid = lc order by pno asc union select top 1 pno from LP where lid = lc order by pno desc`。

(4) 查询 Switch 表中所控线路编码为 lc 的全部开关, 并检索出开关所在杆塔在线路上的顺序号, 结果存储在表 B 中: `Select id, state, pno from switch join LP on switch.lid = LP.lid and switch.pid = LP.pid where switch.lid = lc`; 若 B 为空说明线路上无控制开关, 将整条线路转化为一个线路节点, 执行 (5), 否则将线路分割成多个线路节点和连接支路, 执行 (6)。

(5) 向 LN 中添加一条线路节点记录 ($lc, N, A(1)(1), A(2)(1)$); 从 (9) 开始执行。

(6) 设 $ps = A(1)(1), I = 1$ 。

(7) 向 LN 中添加一条线路节点记录 ($lc, N, ps, B(I)(3)$); 向 LE 中添加一条支路记录 ($B(I)(1), B(I)(2), N, N+1$); $ps = B(I)(3); I = I + 1; N = N + 1$ 。

(8) 若 $I \leq B$ 的行数, 回到 (7), 否则向 LN 中添加一条节点记录 ($lc, N, ps, A(2)(1)$), 即当前线路的最后一个节点。

(9) $N = N + 1$; 若还有未处理的线路, 则回到 (2)。

第三步, 根据 PN 和 LN 提取电源节点和线路首/末节点的连接支路。

(1) 建立空内存表 PE 存储电源节点和线路首/末节点的连接支路, 结构为 PE (节点 1 序号, 节点 2 序号); 设 $I = 1$ 。

(2) 如果 $PN(I)(4) = \text{线路首端}$, 执行 (3), 否则直接执行 (4)。

(3) 在内存表 LN 中检索线路编码为 $PN(I)(3)$ 的线路首节点的节点序号, 并存储在表 A 中: `Select top 1 节点序号 from LN where 线路编码 = PN(I)(3) order By 节点序号 asc`; 向 PE 中添加记录电源节点和线路首节点的支路 ($PN(I)(2), A(1)(1)$); 跳转到 (5)。

(4) 在内存表 LN 中检索线路编码为 $PN(I)(3)$ 的线路末节点的节点序号, 并存储在表 B 中: `Select top 1 节点序号 from LN where 线路编码 = PN(I)(3) order by 节点序号 desc`; 向 PE 中添加记录电源节点和线路末节点的支路 ($PN(I)(2), B(1)(1)$)。

(5) $I = I + 1$; 如果 $I \leq PN$ 的行数, 回到 (2)

- [3] 吴文传, 张伯明. 基于图形数据库的网络拓扑及其应用[J]. 电网技术, 2002, 26 (2): 14-18.
WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming. A graphic database based network topology and its application[J]. Power System Technology, 2002, 26 (2): 14-18.
- [4] 宋少群, 朱永利, 于红. 基于图论与人工智能搜索技术的电网拓扑跟踪方法[J]. 电网技术, 2005, 29 (19): 45-49.
SONG Shao-qun, ZHU Yong-li, YU Hong. A power network topology tracking method based on graph theory and artificial intelligence search technique[J]. Power System Technology, 2005, 29 (9): 45-49.
- [5] 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.
DONG Zhang-zhuo, QIN Hong-xia, SUN Qi-hong, et al. Object-oriented to fast tracking of topology for power system part I[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(3): 178-181.
- [6] 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): 283-291.
DONG Zhang-zhuo, QIN Hong-xia, SUN Qi-hong, et al. Object-oriented to fast tracking of topology for power system part II[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18 (4): 283-291.
- [7] Vehsakul P D, Dabbaghchi I. A topology based Algorithm for tracking network connectivity[J]. IEEC Trans on Power Systems, 1995, 10 (2): 339-345.
- [8] 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): 13-33, 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): 13-33, 48.
- [9] 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): 10-16.
WANG Xiang-zhong, LI Xiao-lan. Topology identification of power network based on incidence matrix[J]. Power System Technology, 2001, 25 (2): 10-16.
- [10] 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): 436-438.
LU Ming-sheng, SHEN Cheng-kang. Speedy algorithm for connexity of graph[J]. Journal of Tongji University, 2001, 29 (4): 436-438.
- [11] 罗日成, 李卫国. 基于图论的配电网电气连通性分析算法[J]. 电工技术学报, 2005, 20 (10): 98-102.
LUO Ri-cheng, LI Wei-guo. Research on the algorithm of electric connectivity analyzing for distribution network based on graph theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20 (10): 98-102.
- [12] 朱永利, 盛四清, 雷少锋, 等. 一种新的电网自动接线分析方法[J]. 华北电力大学学报, 1998, 25 (3): 1-7.
ZHU Yong-li, SHENG Si-qing, LEI Shao-feng, et al. An artificial intelligence-based approach for electric network topology determination[J]. Journal of North China Electric Power University, 1998, 25 (3): 1-7.

收稿日期: 2009-06-18; 修回日期: 2009-09-25

作者简介:

周云成 (1979-), 男, 博士研究生, 助教, 从事信息技术在地方电力系统中的应用研究; E-mail: zhouyc2002@163.com

付立思 (1964-), 男, 博士, 教授, 从事智能控制系统检测技术研究;

许童羽 (1967-), 男, 博士, 副教授, 从事信息技术在地方电力系统中的应用研究。

(上接第 82 页 continued from page 82)

FENG Qi-kun, XU Jin-liang, CHEN De-shu. Study on the protection scheme for teed short line in electric power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 1998 (4): 15-18.

姚亮 (1979-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事高压线路继电保护领域的研究与开发工作; E-mail: yaoliang@sac-china.com

赖庆辉 (1977-), 男, 本科, 长期从事继电保护管理工作;

林俊 (1967-), 男, 本科, 长期从事继电保护设计工作。

收稿日期: 2009-06-19; 修回日期: 2009-08-24
作者简介: