

配电网快速网络拓扑分析算法

姚玉斌¹, 晋文转², 靳力¹

(1. 烟台东方电子信息产业股份有限公司, 山东 烟台 264001; 2 许昌继电器研究所, 河南 许昌 461000)

摘要: 缩小搜索范围是提高拓扑速度的关键, 输电网可采用厂站内搜索法来缩小搜索范围, 配电网则不适合。给数据排序是缩小搜索范围的有效措施, 但排序比较费时。为此, 提出了把全局拓扑分成静态拓扑和动态拓扑的想法。静态拓扑仅处理排序工作, 可预先计算; 每次全局拓扑只运行动态拓扑, 由于数据已经排序, 计算速度很快。同时提出了使用节点支路关联数据形成岛的方法, 由于此数据可以在静态拓扑中处理, 因而进一步提高了配电网网络拓扑的计算速度。实际算例验证了所提出的算法的有效性。

关键词: 配电网; 网络拓扑; 全局网络拓扑; 静态网络拓扑; 动态网络拓扑

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)19-0031-05

0 引言

近年来, 随着电力系统的发展和全国互联电网的实现, 电力网络的规模越来越大, 有的系统已经要求分析 15 000 个计算母线规模的网络。同时电力系统实时、超实时仿真系统要求电力系统分析速度越来越快, 甚至要求分析速度达到实时系统的 3 倍。这都给电力系统分析软件的快速性提出了更高的要求。作为电力系统分析的基础软件, 网络拓扑计算速度需要进一步提高, 因而迫切需要一个快速的网络拓扑算法。另外, 需要反复调用网络拓扑的软件, 如静态安全分析, 也需要一个快速网络拓扑算法。

提高网络拓扑的速度一直是电力系统分析的一个重要内容。仅一小部分开关状态改变时, 进行局部拓扑, 可以大大提高拓扑的速度^[1-3]。但许多情况下必须进行全局拓扑, 提高全局拓扑的速度是十分必要的。网络拓扑作为连通图分析方法, 主要有树搜索法^[1-4]和关联矩阵法^[5, 6]。关联矩阵法比较直观, 但内存和时间开销都很大, 大型网络的拓扑分析通常采用树搜索法。树搜索法既可以采用深度优先法^[1, 4], 也可以采用广度优先法^[3]。

无论哪种搜索方法, 搜索量都是很大的。缩小搜索范围是提高网络拓扑分析速度的有效手段。输电网形成母线时可以采用厂站内搜索的方法来缩小搜索范围, 但这种方法对由母线形成岛这一过程不适用。由于配电网一般没有厂站这个层次或厂站内节点很多, 厂站内搜索方法无法使用或效果较差。这一方法对于输配电一体化分析也不适用。

给数据排序可以有效地缩小搜索范围, 是提高网络拓扑速度的一个行之有效的途径。为此, 本文

提出把全局拓扑分成静态拓扑和动态拓扑两部分, 静态拓扑只处理数据排序和形成主母线的一类工作, 它与开关状态无关, 可以事先算好, 而不用每次网络拓扑时都进行这个工作, 因而可以大大提高全局拓扑的速度。同时提出了使用节点支路关联数据形成岛的方法, 由于节点支路关联数据也可以在静态拓扑中进行排序, 从而进一步提高了网络拓扑的计算速度。

1 网络拓扑模型

1.1 常规网络拓扑

网络拓扑是电力系统分析的基础软件, 它把通过开关等物理设备连接的物理模型, 转换成能够为其它网络分析软件使用的数学模型。根据网络拓扑分析的范围, 网络拓扑可分成全局拓扑和局部拓扑。对一个新的网络进行拓扑或当一个网络中有许多开关状态发生变化时, 需要进行全局拓扑。当网络中只有少数开关状态变化或少量设备开断时, 局部拓扑只分析变化的状态对拓扑结果的影响, 对原有母线模型进行局部修改形成新的拓扑结果, 因而可以极大地提高拓扑速度。

网络拓扑分析需要的数据一般主要包括两类: 节点开关关联表, 描述开关与节点的关联关系; 母线支路关联表, 描述支路与母线的关联关系。另外, 还有节点信息表、母线信息表等。

由于各文献使用的节点、母线的含义不一致, 特把本文使用的概念说明如下: 节点指设备之间的连接点, 母线指潮流计算等使用的数学模型的计算母线。

电网的网络拓扑分析主要分成两个步骤^[1]:

1) 搜索节点开关关联表,把通过闭合开关连在一起的节点组成母线。

2) 搜索母线支路关联表,把通过支路连在一起的母线组成电气岛。

传统算法^[1]就是按上述两个步骤进行网络拓扑分析的。为了提高速度,形成母线时,通常把搜索范围限制在厂站内甚至厂站中同一电压等级内。

1.2 输电网缩小网络拓扑范围的方法

网络拓扑是遍历连通图的搜索过程,分为形成母线和形成岛两个步骤,二者只是作用对象不同,方法是相同的。如由节点形成母线,搜索某个节点时,要查找与该节点通过开关相连的所有节点,必须从整个节点开关关联表中搜索这些数据。

输电网中一个母线包含的节点都在一个厂站的同一电压等级内。根据这一特点,可以把由节点形成母线的过程的搜索范围缩小到一个厂站内,或一个电压等级内(如果有这一层次的话),但这种方法对由母线形成岛这一过程不适用,因为线路一般不在一个厂站内,甚至不在一个区域内。

1.3 配电网网络层次的特点

配电网在网络层次结构上一般没有厂站这个层次,无法通过厂站内搜索法来缩小网络拓扑的搜索范围;有些系统虽然有厂站这一层次,但厂站内的节点很多,使用厂站内搜索法的效果较差。

另外,配电网的支路相对较多,形成岛所使用时间要比输电网形成岛的时间长,因此如何缩小形成岛的搜索范围来提高网络拓扑速度对配电网显得更为迫切。

1.4 配电网缩小网络拓扑范围的新思路

对节点开关关联表按节点排序,搜索范围可以只限定在该节点所连的开关数据范围内,缩小了搜索范围,可以有效地减少搜索时间,因此应该对这部分数据进行排序。在节点开关关联表中,虽然开关状态一直是变化的,但节点和开关的关联关系是不变的,不需要在每次网络拓扑时都对节点开关关联表重新排序,可以把节点开关关联表的排序工作独立出来作为静态拓扑,单独运行。因此,本文提出把全局拓扑分成静态拓扑和动态拓扑两部分。算例表明,对数据排序是非常耗费时间的,占全局拓扑的大部分时间,把数据排序作为静态拓扑单独运行,其结果储存起来,供以后网络拓扑使用,可以极大地提高网络拓扑的速度。

另外在由母线形成岛所使用的数据——母线支路关联表中,支路与母线的关系不是固定的。每当

开关状态发生变化,重新进行拓扑后,母线都要发生变化,因而支路两端所连接的母线是变化的。支路与母线的关系不固定就无法事先进行排序供以后使用。为了解决这个问题,本文提出使用节点支路关联表来代替母线支路关联表。

由于支路与节点的关系是固定的,可以把对节点支路关联表的排序放在静态拓扑中处理,从而进一步提高了网络拓扑的速度。

本文提出的网络拓扑方法不需要按厂站搜索,而是直接按相关节点搜索,对形成母线的过程和形成岛的过程均适用,可以大大缩小搜索范围,进而提高全局网络拓扑速度,对配电网的网络拓扑的效果尤为明显。

静态拓扑和动态拓扑合在一起相当于通常的全局拓扑,全局拓扑的时间主要花费在静态拓扑上。把全局拓扑分成静态拓扑和动态拓扑,且由于静态拓扑只需在应用软件启动时运行一次,甚至由 DMS(配电管理系统)或 EMS(能量管理系统)在网络结构变化后调用一次即可。其它情况下,只需调用动态拓扑就可以完成传统的全局拓扑功能,因而可以大大提高各应用软件的计算速度。例如静态安全分析这类需要多次进行网络拓扑的软件,可以在开始时调用一次静态拓扑,也可以直接使用 DMS(或 EMS)的静态拓扑结果,其它时间只需要进行速度很快的动态拓扑就可以完成全局拓扑的功能。

2 算法描述及流程

2.1 算法描述

为了提高网络拓扑的速度,本文提出了把全局拓扑分成静态拓扑和动态拓扑的新思路。静态拓扑只是为拓扑分析做一些准备工作,动态拓扑则根据网络的实时状态对网络进行拓扑分析。这两部分的作用描述如下。

静态拓扑:为拓扑分析做一些准备工作,包括对节点开关关联表、节点支路关联表按首节点进行排序等工作。也可以形成主母线(所有开关都闭合时形成的母线)。因为此模块与开关状态无关,只需在程序启动时运行一次;也可以作为基本模块,由 DMS(或 EMS)在网络结构变化后调用一次即可。

动态拓扑:考虑开关状态的变化和设备的投退情况,形成母线和电气岛,由于静态拓扑已经做了很多基本准备工作,动态拓扑速度很快。

2.2 数据结构设计

2.2.1 网络拓扑的原始数据

网络拓扑需要的原始数据主要包括:

1) 描述开关与节点关系的数据,可以直接使用开关设备表,但本文为了提高网络拓扑的速度,同时实现算法与 DMS(或 EMS)库独立,专门设计了节点开关关联表。

为了提高数据排序速度,节省内存,节点开关关联表的设计力求简洁,去掉多余的信息,只包含与网络拓扑分析有关的域:开关号、首节点号、末节点号、开合状态。

2) 描述支路与节点关系的数据,支路包括线路、变压器绕组(双绕组变压器为一条支路、三绕组变压器为三条支路)、串联电容器与串联电抗器等,因而涉及几个设备表。为程序设计的方便,把所有类型的支路放在一个表内,设计了节点支路关联表。

节点支路关联表也只包含必要的域:支路号、首节点号、末节点号、投退状态。

为了数据搜索的方便,节点开关关联表中的每个开关、节点支路关联表的每条支路都存放两条记录,并把其中一条记录的首末节点号互换。这样通过首节点就能够找到与之相连的所有开关或支路。

为了提高排序速度,不需要把首、末节点号都排序,只需按首节点号排序即可。排序可以使用 C++ 中标准的 qsort 库函数,此函数排序速度快,使用方便。

2.2.2 网络拓扑的中间数组和结果数组

网络拓扑的中间数组和结果数组主要包括:

1) 母线节点关联表,按母线顺序存放各母线包含的节点,此表在节点形成母线时生成并使用,形成岛时也使用此表。

2) 岛母线关联表,按岛顺序存放各岛包含的母线,此表在母线形成岛时生成并使用。

3) 节点信息表,存放节点相关信息,主要域包括:每个节点所连开关在节点开关关联表的起始位置、每个节点所连支路在节点支路关联表的起始位置、节点所属母线、节点访问标志等。

4) 母线信息表,存放母线相关信息,主要域包括:每个母线所包含节点在母线节点关联表的起始位置、母线所在岛等。

节点信息表只需存每个节点所连开关在节点开关关联表的起始位置,结束位置可以通过下一个节点的起始位置算出来。其它类似问题也同样处理。

2.3 算法流程

2.3.1 网络拓扑分析新算法总体流程

图 1 给出了本文提出的网络拓扑分析算法总体

流程。包括静态拓扑和动态拓扑,每一部分的详细说明见后面叙述。

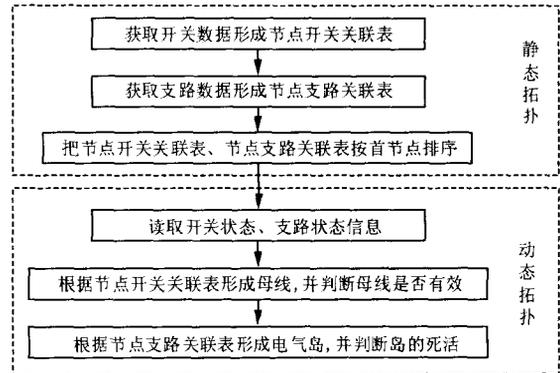


图 1 全局网络拓扑分析总体框图

Fig 1 Flow chart of overall network topology

2.3.2 静态拓扑分析流程

静态拓扑步骤如下:

1) 获取开关数据形成节点开关关联表,在节点开关关联表中,每个开关存两条记录,并把其中一条记录首末节点对换;

2) 获取线路、变压器、串联电容器、串联电抗器等数据形成节点支路关联表,在节点支路关联表中,每个支路存两条记录,并把其中一条记录首末节点对换;

3) 把节点开关关联表、节点支路关联表按首节点排序,并在节点信息表中记录每个节点对应的开关数据、支路数据的起始号。

2.3.3 动态拓扑分析流程

动态拓扑步骤如下:

1) 读取开关状态、支路状态信息;

2) 根据节点开关关联表,考虑开关状态,由节点组合而形成母线,并把每个母线包含的节点号放到母线节点关联表,同时把每个母线在母线节点关联表中的起始位置记录在母线信息表中;

3) 判断母线是否有效,去掉无效母线。连接两条支路、或一条支路和一个并联设备、或一个电源和一个其它并联设备的母线称为有效母线;

4) 根据母线节点关联表和节点支路关联表,考虑支路的投退状态,形成电气岛,并把每个岛包含的母线号放到岛母线关联表;

5) 判断岛的死活。同时存在电源和负荷的系统称为活岛,外网进线既可以作为电源,也可以作为负荷。

2.3.4 形成母线的过程

形成母线和电气岛,都要用到搜索方法,为了程

序设计和实现的方便,本文采用广度搜索,但不需要层的概念。

形成母线的方法如下:从一个节点出发,搜索通过闭合开关与该节点相连的相关节点,如果此相关节点未被访问过,把它放到母线节点关联表中,并把它所属母线置为当前母线号。本节点搜索完毕,再搜索当前母线内的下一个节点,直到当前母线内所有节点搜索完为止,形成一条母线。再从节点信息表中任意一个未被访问的节点出发形成下一条母线。节点信息表的所有节点都已经访问,形成母线过程结束。

2.3.5 形成岛的过程

形成岛时,首先根据母线节点关联表,找到母线包含的所有节点,再根据节点支路关联表查找与这些节点相连支路,如果支路投运,且支路对端节点所属母线的岛未定,则把此对端母线放到岛母线关联表内,其岛号置为当前岛号。本岛内所有母线都已经访问,形成一个岛。再从母线信息表中任意一个未被访问的母线出发形成下一个岛。母线信息表的所有母线都已经访问,形成岛过程结束。因为节点支路关联表的数据已经排序,搜索速度很快。

3 算例分析

基于以上思想编制的网络拓扑程序,作为 DMS 和 EMS 的一个基本模块已经在许多实际系统使用。

采用 P 933PC 机,以汕头电网和杭州电网为例,通过与文献 [1] 介绍的传统网络拓扑算法进行比较,分别分析本算法在配电网和输电网的使用效果。为了提高速度,形成母线时,传统算法采用厂站内搜索的方法。

3.1 配电网网络拓扑分析算例分析

汕头电网的配电网是一大型配电网,其部分网络(整个网络数据未完成建立)的节点数 17 000 多个,开关数(包括开关和刀闸,不包括接地刀闸、PT 刀闸等)为 12 000 多个,支路数为 3 000 多个。

拓扑分析共形成 3 000 个计算母线。本文网络拓扑算法与传统网络拓扑算法的计算时间见表 1,由于配电网没有厂站这一层次,传统算法形成母线

表 1 配电网网络拓扑计算时间比较

Tab 1 Computing time comparison of distribution

network topology			
算法	静态拓扑时间 /ms	动态拓扑时间 /ms	总拓扑时间 /ms
本文算法	100	25	125
传统算法	-	-	15 450

时无法采用厂站内搜索方法,因而计算时间很长,本文方法计算速度则非常快。

3.2 输电网网络拓扑分析算例分析

杭州电网是一大型地区电网,分析的节点数 7 000 多个,开关数(包括开关和刀闸,不包括接地刀闸、PT 刀闸等)为 7 000 多个,支路数为 800 多个,母线段数为 700 多个。

拓扑分析共形成 1 044 个计算母线,其中有效母线 780 个。本文网络拓扑算法与传统网络拓扑算法的计算时间见表 2,传统算法形成母线时采用厂站内搜索方法。从表 2 可见,虽然输电网拓扑分析可以采用厂站内搜索方法,本文方法比传统方法的计算速度仍有很大提高。

表 2 输电网网络拓扑计算时间比较

Tab 2 Computing time comparison of transmission

network topology			
算法	静态拓扑时间 /ms	动态拓扑时间 /ms	总拓扑时间 /ms
本文算法	50	10	60
传统算法	-	-	490

从以上两个例子,还可以看出静态拓扑使用的时间很多,把静态拓扑独立出来是非常必要的。动态拓扑的时间则较短,由于拓扑分析一般只需要调用动态拓扑,拓扑分析的速度进一步加快。

4 结语

全局拓扑分成静态拓扑和动态拓扑,把数据排序等这一类不受开关状态变化影响的工作作为静态拓扑单独处理,为拓扑分析做一些准备工作。静态拓扑只需要在软件启动时调用一次,甚至仅仅在修改网络结构后调用一次,以后就可以调用动态拓扑来完成全局拓扑的任务,因而可以大大提高全局拓扑的速度。而动态拓扑由于静态拓扑做了许多准备工作,速度非常快。

用节点支路关联表代替母线支路关联表来形成岛,可以把节点支路关联表的排序工作放在静态拓扑中处理,从而进一步提高了全局网络拓扑的速度。

本文方法对配电网和输电网都适用,对配电网的效果尤其显著。

参考文献:

- [1] 于尔铿,刘广一,周京阳,等. 能量管理系统(EMS) [M]. 北京:科学出版社,1998
 YU Er-keng, LIU Guang-yi, ZHOU Jing-yang, et al. Energy Management System (EMS) [M]. Beijing: Science Press, 1998.

- [2] 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.
- [3] 陈星莺,孙恕坚,钱锋. 一种基于追踪技术的快速电力网拓扑分析方法 [J]. 电网技术, 2004, 28(5): 22-24, 34.
CHEN Xing-ying, SUN Shu-jian, QIAN Feng. A Fast Power System Network Topology Based on Tracking Technology [J]. Power System Technology, 2004, 28(5): 22-24, 34.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 张宏,郭宗仁. 配电网拓扑结构等效解耦的方法 [J]. 电网技术, 2004, 28(15): 88-91.
ZHANG Hong, GUO Zong-ren. Methods for Topology Equivalent Uncoupling of Distribution System [J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 88-91.

收稿日期: 2005-03-22; 修回日期: 2005-04-30

作者简介:

姚玉斌 (1965 -),男,博士,副教授,主要研究方向为电力系统分析和控制; E-mail: yaoyubin@mail.china.com

晋文转 (1968 -),女,工程师,主要研究方向为机电一体化;

靳力 (1976 -),男,硕士,工程师,主要从事电力系统自动化的研究和开发工作。

Fast network topology method for a distribution network

YAO Yu-bin¹, JIN Wen-zhuan², JIN Li¹

(1. Yantai Dongfang Electronic Information Industry Co., Ltd, Yantai 264001, China;

2. Xuchang Relay Research Institute, Xuchang 461000, China)

Abstract: The most effective way to speed up network topology is to reduce searching range. Topological analysis for a transmission network can reduce searching range by the method of searching within a station, but this method is not adaptive to a distribution network. Data sorting is another good method to reduce searching range, but data sorting is a time-consuming task. So it is proposed that overall network topology be divided into static network topology and dynamic network topology. Static network topology only deals with data sorting and works in advance, and dynamic network topology realizes topology actually. By using of sorted data, the speed of network topology is greatly increased. And it is also proposed to form islands by node-branch list which can be sorted in static network topology. This method can speed up network topology for further for a distribution network. The results of some practical examples prove the effectiveness of the two proposed method.

Key words: distribution network; network topology; overall network topology; static network topology; dynamic network topology

(上接第 30页 continued from page 30)

Research of the nonlinear excitation based on the direct feedback linearization

CHEN Tie¹, SHU Nai-qiu²

(1. College of Electric Engineering & Information Technology, China Three-Gorges University, Yichang 443002, China;

2. College of Electric Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Design plan is proposed in this paper for nonlinear excitation control. Simulation results show that both power station stability and the generator terminal voltage are better improved. The generator terminal voltage is not disturbed when the mechanical power of turbine is changed. The proposed controller is valuable for industrial application.

Key words: nonlinear; excitation control; stability; voltage regulation