

DOI: 10.7667/PSPC171060

基于图划分的大电网拓扑分析

郎燕生¹, 李静¹, 罗雅迪¹, 伍凌云², 李强¹, 赵军³, 王顺江³

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 国家电网公司西南分部, 四川 成都 610041;
3. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110006)

摘要: 为支撑大电网在线实时监控和分析, 提出了一种基于图划分的大电网拓扑分析方法。该方法首先根据智能电网调度控制系统电网建模特点, 给出了基于图论的电网层次结构、拓扑结构、厂站母线分析和系统网络分析模型。然后基于图划分建立了并行网络拓扑和局部拓扑修正的数学模型, 并根据该模型设计了大电网并行网络拓扑的实现方法。最后基于共享内存编程模型在智能电网调度控制系统中研发了快速网络拓扑分析服务功能。所提出的模型和方法实现了大电网并行网络拓扑分析的无锁计算, 避免了多线程数据竞争导致的阻塞耗时问题。对实际系统进行仿真测试, 结果表明了该方法的准确性、实时性和有效性。

关键词: 大电网; 网络拓扑分析; 并行计算; 二元关系; 图论

Large power grid topology analysis based on graph partitioning

LANG Yansheng¹, LI Jing¹, LUO Yadi¹, WU Lingyun², LI Qiang¹, ZHAO Jun³, WANG Shunjiang³

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. Southwest Subsection of State Grid Corporation of China, Chengdu 610041, China; 3. State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd., Shenyang 110006, China)

Abstract: In order to support the online real-time monitoring, control and analysis of large power grid, this paper proposes a new topology analysis method for large power grid based on graph partitioning. According to the model characteristics of the smart grid dispatching and control systems, this method first provides the power grid model of hierarchical structure, topology structure, the bus of substation analysis and system network topology. Then it establishes mathematical model for parallel network topology and local topology modification based on graph partitioning. According to this model, the realization method of the large power parallel topology analysis is designed. Finally using shared memory programming model, the function of the large power fast topology analysis services is developed in the smart grid dispatching and control systems. The models and method proposed realizes the no lock computing of large power grid parallel topology analysis, and avoids the blocking time-consuming problem caused by multithreaded data competition. Simulation is carried out by taking the actual power grid as an example, the veracity, feasibility and practicality of the proposed method are verified.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. KY-SG-2016-031-JLDKY).

Key words: large power grid; network topology analysis; parallel computing; binary relation; graph theory

0 引言

大规模间歇性新能源接入的特高压交直流混联大电网的实时准确调控, 需要对电网进行事前、事中和事后分析计算, 而事中实时分析对在线分析应

用计算的实时性提出了更高的要求, 同时调控系统电网建模规模日益扩大使得在线分析应用计算量大幅增加, 因此亟需采用有效方法提高在线分析应用的计算速度及实用化水平。

结合各高级应用的时效性要求以及其计算规模和计算方法的特点, 为提升在线分析计算速度, 在技术层面上一般采用分布式计算、集群系统并行处理和基于 GPU 的并行计算技术, 在算法层面上主要是研究计算量少和适于并行处理的算法。目前学者

基金项目: 国家电网公司科技项目 (KY-SG-2016-031-JLDKY)
“互联大电网一体化网络分析计算支撑服务及其关键技术研究”

对状态估计、潮流计算、静态安全分析和暂态实时仿真等在线应用的提速进行了大量研究, 但对这些应用的最基础功能(即电力系统网络拓扑分析功能)的提速研究较少。电力系统网络拓扑分析根据电网开关/刀闸状态和网络元件状态, 由电网的节点模型生成电网的母线—支路计算模型, 并给出设备投退状态, 为电力系统在线仿真和分析计算提供实时模型数据^[1], 是其基础功能。当前智能电网调度控制系统(简称 D5000 系统)中运行的网络拓扑分析一般采用传统串行方法计算, 以国调某时刻断面为例, 采用串行单线程方法其计算耗时约为 1.27 s, 而随着调控一体化运行的推进, 要求网络分析应用(含状态估计、调度员潮流和静态安全分析等)在 30 s 内、甚至 10 s 内完成全部计算, 可见网络拓扑分析应用的提速研究势在必行。

目前网络拓扑分析的基本方法包括搜索法和矩阵法两类, 这两种方法分别用邻接链表的组合和邻接矩阵表示图, 可延伸出不同的网络拓扑分析实现方法。搜索法包括广度优先和深度优先两种方法, 文献[2]提出了一种基于分治策略的网络拓扑分析方法, 该方法应用于系统监控服务, 但不能为高级应用提供计算模型。文献[3]利用 PMU 量测提高了厂站内网络拓扑分析速度, 但不适用于全网的网络拓扑分析。矩阵法一般采用高斯消元^[4]或邻接矩阵平方方法^[5]等。此外, 也可在前一次拓扑分析结果基础上采用快速跟踪和局部修正等技术^[6-7], 实现电网网络拓扑的快速修正。文献[8]提出了一种面向对象技术的节点融合和分级搜索相结合的网络拓扑分析的方法, 可由变化的开关信息重新确定网络拓扑结构。文献[9]对不同全网拓扑分析方法进行了比较, 在较小测试规模下, 计算耗时从十几毫秒到几百毫秒不等。而目前省级以上电网建模规模远大于该算例, 结点、断路器/刀闸、计算母线和支路数量为该算例的几十到几百倍不等, 上述方法的计算效率有待进一步提高。文献[10]通过网络拓扑模型划分, 形成多个相对独立区域, 从而实现分布式并行计算, 且主要应用于拓扑着色, 但在子网计算时仍沿用传统串行计算, 属于粗粒度并行。文献[11]提出的并行网络拓扑算法适用于机电暂态实时仿真, 且采用消息通信编程模型, 14 子网并行时通信时间为并行拓扑耗时的 46 倍, 且并行拓扑与通信耗时总时间是串行拓扑耗时的 2 倍以上, 其性能仍有提升空间。

本文基于图划分理论, 提出了大电网并行网络拓扑分析和局部拓扑修正的数学模型, 利用该模型可将大电网分解成若干子网, 适用于搜索法和矩阵

法。通过并行网络拓扑校验、并行厂站母线分析、分块系统网络分析、边界协调网络分析和拓扑局部修正功能完成大电网并行网络拓扑和局部拓扑修正, 并采用共享内存编程模型, 在智能电网调度控制系统中研发了相应功能。本文方法数据交互耗时为零, 且采用无锁免线程竞争设计, 提高了大电网网络拓扑分析的执行效率, 可为实时监控提供设备带电状态, 为在线分析提供实时节点支路计算模型。

1 图划分理论

图划分是经典的组合优化问题, 它的应用背景极其广泛, 包括软硬件协同设计、VLSI 设计和并行计算中的任务分配等众多领域。图划分是把一个图的顶点集分成 k 个不相交的子集, 且满足子集之间的某些限制。

令 V 为图 $G=(V, E)$ 的顶点集合, E 为边的集合, $n=|V|$ 为顶点个数。将顶点集合划分成 p 个子集 $V_1, V_2, V_3, \dots, V_p$, 且当 $i \neq j$ 时 $v_i \cap v_j = \emptyset$, $\bigcup_i v_i = V$, 其中 $i=1, 2, 3, \dots, p$, 称为一个 p 路划分, 记为 P , 每个子集 V_i 称为一个分区, P 用一个长度为 n 的向量表示, 因此对于每个顶点 $v \in V$, $P[v]$ 是 $1 \sim p$ 的一个整数, 表示顶点 v 的分区号。

图划分算法包括: 几何方法、组合方法、谱方法和多层划分法等。在并行计算和分布式计算中, 常利用图划分来确定并行任务和分解数据, 减少并行计算中的数据交互量, 均衡计算负载, 实现高效的并行计算^[12-19]。

大电网并行网络拓扑分析处理的对象是由结点和断路器/刀闸、计算母线和支路构成的无向图, 通过图划分, 不仅可以实现并行计算的任务分配, 平衡处理器负载, 同时也完成了数据的分块, 可以提高大电网网络拓扑分析执行效率。本文利用智能电网调度控制系统电网模型, 将电网抽象成无向图, 对图进行划分。

2 大电网网络拓扑模型

2.1 智能电网调度控制系统电网模型

我国电网的调度和控制具有分层分区的特点^[20-26], 智能电网调度控制系统采用分布式一体化建模方案^[27], 并按厂站进行电网模型的图库模一体化维护, 因此, 区域、厂站和元件之间均有对应的归属关联关系。“区域—厂站—元件”归属关系可以用图 1 表示。

D5000 系统电网模型包含区域、基准电压、厂站、电压等级、断路器、刀闸、物理母线、发电机、

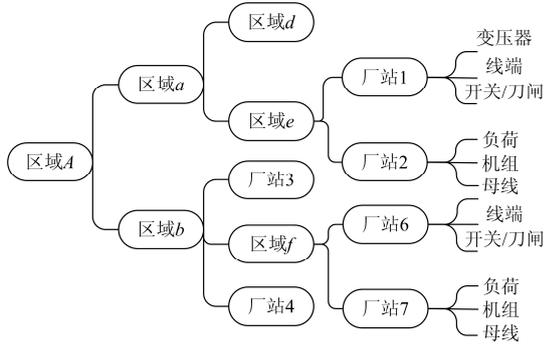


图1 “区域—厂站—元件”父子关系图

Fig. 1 Parent-child relationship graph of “area-substation-device”

交流线段、交流线端点、负荷、变压器、变压器绕组、变压器分接头类型、并联补偿器、串联补偿器、地刀、遥测、遥信、换流器、直流线段、直流线端点、直流平波电抗器、直流滤波器和直流接地端等模型对象。对象间的关系通过对象关键字相互关联，例如厂站1属于区域e，则厂站1的属性“区域id”为区域e的关键字。电气元件对象可以分为两类：单端元件(如机组、负荷等，仅有一个关联结点)和多端元件(线路、变压器等，有多个关联结点)，电气元件对象通过相互公共的结点联接成电网。

2.2 电网模型的层次结构和拓扑结构

错误的电网模型将导致拓扑分析和其他电力系统分析无法计算，因此，在进行拓扑分析之前，一般要进行电网模型检验。电网模型校验的主要功能是通过模型数据预处理，对大电网模型的层次结构和拓扑结构进行逻辑校验并剔除错误模型，其中电网模型的层次结构指区域和厂站、厂站和电压等级、厂站和设备、电压等级和设备等二元关系；电网模型的拓扑结构指结点和设备的二元关系。本文基于图论理论建立电网物理模型的层次结构和拓扑结构的数学模型。

电力系统电气元件集合 E 可以分为单端元件集合 S (包括负荷、发电机、并联电容器和电抗器、物理母线等) 和多端元件集合 M (包括变压器、交流线路、串联无功补偿装置、直流线路、换流器、直流滤波器和直流平波电抗器等)，通过结点 N 相连。其中

$$E = S \cup M \quad (1)$$

$$N = \{node_1, node_2, node_3, \dots, node_i, \dots, node_n\} \quad (2)$$

式中： $node_i$ 为连接设备的结点； n 为系统结点总数。

当且仅当厂站 a 属于区域 c 时，定义区域集合 C 和厂站的二元关系为

$$R_{CA} : \langle c, a \rangle \in R_{CA} \quad (3)$$

当且仅当元件 e 属于厂站 a 时，定义厂站集合

A 和 E 的二元关系为

$$R_{AE} : \langle a, e \rangle \in R_{AE} \quad (4)$$

当且仅当结点 n 属于厂站 a 时，定义厂站 A 和结点 N 的二元关系为

$$R_{AN} : \langle a, n \rangle \in R_{AN} \quad (5)$$

式(3)一式(5)即属于电网的层次结构模型。

当且仅当元件 e 和结点 $node$ 相连时，定义 N 和 E 的二元关系为

$$R_{NE} : \langle node, e \rangle \in R_{NE} \quad (6)$$

式(6)即属于电网的拓扑结构模型。

2.3 厂站母线分析和系统网络分析模型

电力系统网络拓扑分析分为两个基本步骤：厂站母线分析和系统网络分析。厂站母线分析根据开关的开/合状态和元件的退出/恢复状态，由节点模型形成母线模型，其功能是分析某一厂站的某一电压级内的节点由闭合开关联接成多少个母线，其结果是将厂站划分为若干个母线；系统网络分析是分析整个电网的母线由闭合支路联接成多少个子网，每个子电网是具有电气联系的母线集合^[28]。

厂站母线分析时，将所有断路器/刀闸和连接结点的关系 R_{ND} 表示为图

$$G(R_{ND}) = \langle N, D(s(t)) \rangle \quad (7)$$

式中： $s(t)$ 为断路器/刀闸状态，根据时间 t 变化； $D(s(t))$ 为所有断路器/刀闸集合。

系统网络分析时，将所有多端元件和计算母线的连接关系 R_{BM} 表示为图

$$G(R_{BM}) = \langle B, M \rangle \quad (8)$$

式中： B 为所有计算母线集合，且 $B = \{bus_1, bus_2, bus_3, \dots, bus_i, \dots, bus_k\}$ ； bus_k 为计算母线； k 为计算母线总数。

当且仅当多端元件 m 和计算母线 b 相连时，定义计算母线 b 和多端元件 m 的二元关系为

$$R_{BM} : \langle b, m \rangle \in R_{BM} \quad (9)$$

当且仅当单端元件 s 和计算母线 b 相连时，定义计算母线 b 和单端元件 s 的二元关系为

$$R_{BS} : \langle b, s \rangle \in R_{BS} \quad (10)$$

$s(t)$ 为合的断路器/刀闸和通过其相连接点组成的连通图 $G_i(R_{ND})$ 即为计算母线 bus_i ，多端元件和通过其相连计算母线组成的连通图 $G_i(R_{BM})$ 即为电气岛 $island_i$ ，记电气岛集合为 w 元集 I 。厂站母线分析所得计算母线总数 $k > 1$ ，可表述为

$$G_i(R_{ND}) \subset G(R_{ND}) \wedge \bigcup_1^k G_i(R_{ND}) = G(R_{ND}) \quad (11)$$

$$R_i(R_{ND}) = \langle N_i, D_i(s(t)) \rangle \quad (12)$$

式中, $N_i \in N, D_i(s(t)) \in D$, 且当 $i \neq j$ 时 $N_i \cap N_j = \emptyset, \bigcup_i N_i = N$ 。

系统网络分析所得电气岛总数 $w \geq 1$, 可表述为

$$G_i(R_{BM}) \subseteq G(R_{BM}) \wedge \bigcup_i G_i(R_{BM}) = G(R_{BM}) \quad (13)$$

$$G_i(R_{BM}) = \langle B_i, M_i \rangle, B_i \in B, M_i \in M \quad (14)$$

式中: 且当 $i \neq j$ 时 $B_i \cap B_j = \emptyset, \bigcup_i B_i = B$ 。

电气岛是否带电判据为: 若电气岛 $island_i$ 中 $\exists \langle b_j, s_z \rangle \wedge \exists \langle b_y, s_x \rangle$, 且 s_z 和 s_x 分别为投运状态的机组和负荷, 则电气岛 $island_i$ 带电即活岛, 否则电气岛不带电即死岛。

2.4 基于图划分的并行网络拓扑模型

要实现搜索法和矩阵法的并行网络拓扑分析计算, 首选需要对图 $G(R_{ND})$ 和 $G(R_{BM})$ 进行划分。由式(11)—式(14)可知: $G_i(R_{ND})$ 为 $G(R_{ND})$ 的真子图, $G_i(R_{BM})$ 为 $G(R_{BM})$ 的子图, $G_i(R_{ND})$ 和 $G_i(R_{BM})$ 均为连通图, $G(R_{ND})$ 为分离图, 若 $w=1$ 则 $G(R_{BM})$ 为连通图, 若 $w>1$ 则 $G(R_{BM})$ 为分离图。

1) 图 $G(R_{ND})$ 划分

由于 $G(R_{ND})$ 为分离图, 可并行处理 $G_i(R_{BM})$, 但在完成厂站母线分析之前, 无法得知集合 N_i 和 $D_i(s(t))$, 可利用厂站和节点的二元关系 R_{AN} 对图 $G(R_{ND})$ 进行分割, 具体分割方法如下。

将厂站集合 A 等分成 x 个真子集 A_i , 且当 $i \neq j$ 时:

$$A_i \cap A_j = \emptyset, \bigcup_i A_i = A \quad (15)$$

进而可形成厂站—节点二元关系 R_{AN} 的子集 R_{AN}^i :

$$R_{AN}^i = \{ \langle a, n \rangle \mid a \in A_i \wedge \langle a, n \rangle \in R_{AN} \} \quad (16)$$

式(16)表示的二元关系中所有 n 组成集合 N_i (即所有属于厂站 A_i 的结点), 且当 $i \neq j$ 时:

$$N_i \cap N_j = \emptyset, \bigcup_i N_i = N \quad (17)$$

图 $G(R_{ND})$ 分割后的导出子图可表示为

$$G_{ND}[N_i] = \langle N_i, D_i(s(t)) \rangle, N_i \subset N, N_i \neq \emptyset \quad (18)$$

2) 图 $G(R_{BM})$ 划分

将所有计算母线集合 B 等分成 q 个真子集 B_i , 且当 $i \neq j$ 时:

$$B_i \cap B_j = \emptyset, \bigcup_i B_i = B \quad (19)$$

进而可形成计算母线—多端元件二元关系 R_{BM} 的子集 R_{BM}^i :

$$R_{BM}^i = \{ \langle b, m \rangle \mid b \in B_i \wedge \langle b, m \rangle \in R_{BM} \} \quad (20)$$

式(20)表示的二元关系中所有多端元件 m 组成集合 M_i 。

由于不同 B_i 的元素之间仍可能存在投运的多端元件, 因此 $\bigcup_i M_i \subseteq M$, 设不同 B_i 的元素间投运的多端元件集合 M' 为

$$M' = M - \bigcup_i M_i \quad (21)$$

进而可形成

$$R'_{BM} = \{ \langle b, m \rangle \mid m \in M' \wedge \langle b, m \rangle \in R_{BM} \} \quad (22)$$

式(22)表示的二元关系中所有计算母线 b 组成集合 B' 。

图 $G(R_{BM})$ 分割后的导出子图可表示为

$$\begin{cases} G_{BM}[B_i] = \langle B_i, M_i \rangle, B_i \subset B \text{ 且 } B_i \neq \emptyset \\ G_{BM}[M'] = \langle B', M' \rangle, M' = M - \bigcup_i M_i \end{cases} \quad (23)$$

根据式(23)进行分析得到的连通图 $G'_i(R_{ND})$ 并非最终电气岛, 将其记为 $island'_i$, 所有 $island'_i$ 的集合记为 I' , I' 和 M' 的连接关系可表示为图

$$G(R_{I'M'}) = \langle I', M' \rangle \quad (24)$$

根据式(24)进行分析, 由连通的 $island'_i$ 组成 $island_i$ 。

可见通过式(18)、式(23)和式(24)可实现大电网网络拓扑分析的并行计算, 且该模型同时支持搜索法和矩阵法进行并行网络拓扑分析。

2.5 并行局部网络拓扑分析模型

在生成基础拓扑断面后, 当断路器/刀闸发生变化时, 可通过局部拓扑修正实现网络拓扑分析。记 $s(t)$ 发生变化的断路器/刀闸所属厂站为 a_i , 该厂站和其结点关系表示为 $R_{AN}^a = \{ \langle a, n \rangle \mid a = a_i \}$, 将该关系中所有的结点 n 组成集合 N_{a_i} , 对应 $G(R_{ND})$ 的导出子图表示为

$$G_{ND}[N_{a_i}] = \langle N_{a_i}, D_{a_i}(s(t)) \rangle \quad (25)$$

根据式(25)可实现大电网网络拓扑分析的并行局部拓扑分析。

3 并行网络拓扑分析实现方法

由式(18)、式(23)—式(25)可知, 本文提出的并行网络拓扑分析方法的基本思想是把大电网分解成若干规模较小的相对独立子网, 并采用多线程或多进程对子网进行并行处理, 然后再协调边界各子网间联络线两端变量, 最后得到全网网络拓扑分析结果。大电网并行网络拓扑分析方法包括三个步骤, 分别为: 并行电网模型校验、并行网络拓扑分析和拓扑局部修正, 其中并行网络拓扑分析包括并行厂

站母线分析、分块系统网络分析和边界协调网络分析。

3.1 并行电网模型校验

电网模型校验的主要目的是将以对象标识表示的二元关系 R_{id} 转化成以对象数组下标标识的二元关系 R_{index} ，实现网络拓扑分析和在线分析计算时电网模型对象的快速检索。电网模型校验首先生成“区域-厂站-元件”的逻辑关系，然后形成“厂站—结点”的逻辑关系及“结点—元件”的逻辑关系。上述过程可以按区域、厂站和元件分类进行并行数据处理。

在实际系统中电网模型的变化并不是时刻发生的，因此可以将电网模型及其数据校验结果保存到 D5000 系统的实时数据库中，供网络拓扑分析等在线分析功能模块使用，以提高网络拓扑分析执行效率。当电网模型发生变化时自动触发电网模型校验功能，为在线分析应用提供最新的电网逻辑关系模型。

3.2 并行网络拓扑分析

1) 并行厂站母线分析

厂站母线分析时，根据“区域—厂站—结点”关系对电网进行分块，即基于区域和厂站二元关系 R_{CA} 、厂站和节点二元关系 R_{AN} 生成其子集 R'_{AN} ，如式(16)，利用该子集、 R_{ND} 和式(18)生成 $G(R_{ND})$ 的导出子图 $G_{ND}[N_i]$ 。利用矩阵法或搜索法对导出子图进行并行分析，并为各子图中生成的计算母线分配临时编号，待所有子图完成分析后，统计总计算母线数，并统一分配全局计算母线编号，得到结点和计算母线的二元关系 R_{NB} ，并形成计算母线和多端元件的二元关系 R_{BM} 。

2) 分块系统网络分析

在并行厂站母线分析的基础上，由 R'_{AN} 、 R_{NB} 和 R_{BM} 生成 R'_{BM} ，如式(20)，并根据式(23)得到 G_{BM} 的导出子图 $G_{BM}[B_i]$ 和 $G_{BM}[M']$ 。可利用矩阵法或搜索法对子图 $G_{BM}[B_i]$ 进行并行分块系统网络分析，各子图单独分配临时电气岛号，待所有子图均完成分析后，统计临时电气岛总数，并分配统一编号。

3) 边界协调网络分析

在分块系统网络分析的基础上，利用矩阵法或搜索法对图 $G_{BM}[M']$ 进行边界协调，分配最终电气岛编号，最后根据边界相连的电气子岛是否带电来判断最终的电气岛是否带电，即若存在相连的电气子岛带电，则对应的电气岛带电，若所有相连的电气子岛不带电，则对应的电气岛不带电。

3.3 拓扑局部修正

当系统中部分断路器/刀闸发生状态变化时，将式(25)生成的计算母线视为 B_i ，厂站对应线路表示为 M' ，可根据二元关系 R'_{AN} 和 R_{ND} ，利用矩阵法或搜索法以及式(23)、(24)对拓扑进行局部修正。

由于每个子网规模较小，计算速度快，可利用目前服务器的多路多核 CPU 进行并行网络拓扑分析计算，可结合 WAMS 系统的毫秒级数据，在极短时间内完成网络拓扑分析结果，为拓扑着色和在线分析计算提供服务。

4 大电网并行网络拓扑分析程序设计

采用共享内存编程模型 OpenMP，并基于 fork/join 并行模式，对大电网网络拓扑分析进行并行程序设计。程序在执行过程中，根据需要派生出并行线程数对数据进行处理，待所有派生线程结束后，程序回到主线程。在设计程序时，需要预先判断系统支持线程数总和以及派生线程计算规模，合理分配派生线程，保证派生线程的负载均衡。

大电网并行网络拓扑分析服务进程常驻于应用服务器，软件整体流程如图 2 所示，具体流程如下所述。

(1) 模型获取：在启动服务时，首先读取 D5000 系统实时数据库获取电网关系模型。

(2) 并行模型校验：分厂站对象对电网模型进行并行校验，生成模型对象数组下标关系索引，并根据索引对电网模型进行切割分块。

(3) 并行厂站母线分析：读取断路器/刀闸状态，从主线程中派生出并行厂站母线分析线程，对子网络结点—断路器/刀闸进行并行拓扑搜索。

(4) 计算母线编号：所有派生线程结束后，统一分配计算母线编号。

(5) 分块系统网络分析：从主线程中派生出并行系统网络分析线程，对子网内计算母线和多端元件进行拓扑搜索，生成子网内电气岛，并判定电气岛带电状态。

(6) 边界协调网络分析：待所有派生线程结束后，回到主线程，开始进行边界协调。

(7) 局部拓扑修正：接收遥信变位信息，当遥信变位集中在某子网或数量较少时，进行局部拓扑修正。

(8) 拓扑着色：将设备带电状态发送给拓扑着色程序。

(9) 节点支路计算模型生成：根据在线分析应

用计算请求, 生成节点支路计算模型, 并发送给相应应用。

大电网并行网络拓扑分析服务程序利用并行网络拓扑模型对数据进行分块, 采用无锁计算模式, 避免数据竞争导致的阻塞耗时问题。

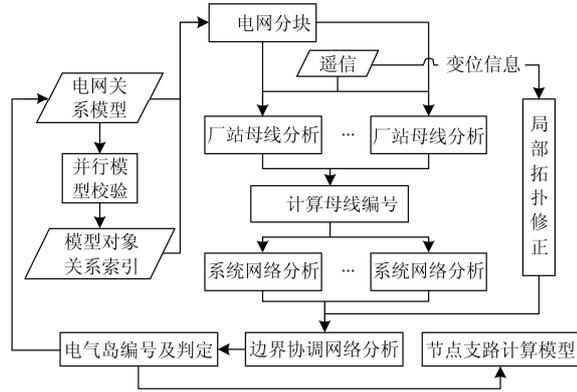


图 2 并行网络拓扑分析程序流程图

Fig. 2 Program flow chart of power grid parallel topology analysis

5 性能分析

在 D5000 系统中对实际电网进行仿真测试, 测试电网规模如下: 厂站 6978 个, 物理母线 20 485 条, 线路 13 387 条, 机组 4 653 个, 负荷 20 086 个, 变压器 9 030 个, 并联电容器电抗器 8647 个, 串联无功补偿器 124 个, 直流换流器 82 个, 直流线路 36 条, 断路器/刀闸共 268 589 个, 结点总数 268 728 个, 网络拓扑分析后计算母线总数为 64 730 条。软硬件测试环境分别如表 1、表 2 所示。

表 1 软件测试环境

Table 1 Software testing environment

序号	软件名称	软件版本
1	Linux 操作系统	凝思 4.2.32
2	商用数据库管理	达梦 6.0
3	智能电网调度控制系统基础平台	智能电网调度控制系统基础平台 V3.0

表 2 硬件测试环境

Table 2 Hardware testing environment

序号	名称	规格型号
1	服务器	ThinkServer RD650
2	CPU	2×E5-2680(2×12 核)
3	内存	16 GB×4
4	硬盘	3×500 GB SAS

表 3 中的“传统串行方法”为当前 D5000 系统网络拓扑分析软件的实测耗时, 该软件基于 D5000 系统物理模型实现电网网络拓扑分析。本文提出的

并行网络拓扑分析可有效避免进程间的数据交互, 同时充分利用了 D5000 系统电网建模的特点, 对电网物理模型进行抽象, 将模型二元关系用二维数组表示, 实现了电网关系模型的快速遍历和检索, 大大缩短了网络拓扑分析计算耗时, 进一步提升了并行网络拓扑分析方法的实用性。本文方法计算性能的提升源自两部分的方法改进: 一是在厂站母线分析和系统网络分析时采用了并行计算方法; 二是在程序实现时采用了更加快速的数据结构和算法。对程序进行性能测试, 如图 3 所示, 最大加速比为 6.53。

表 3 20 次计算平均耗时比较

Table 3 Average time consuming of computing twenty times

方法	拓扑分析耗时/s
传统串行方法	1.274 586
本文方法单线程	0.189 547
本文方法 12 线程	0.029 006

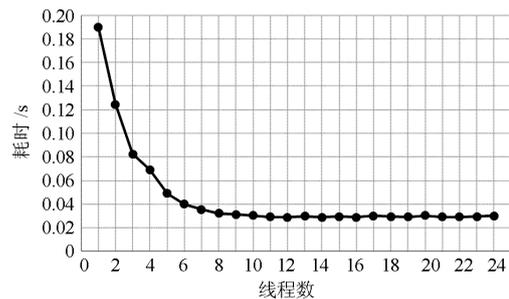


图 3 计算耗时和并行进程数关系图

Fig. 3 Relation graph between time consuming and the number of parallel processes

6 结语

本文基于智能电网调度控制系统的电网物理模型, 给出了电网模型的层次结构和拓扑结构、厂站母线分析和系统网络分析、并行网络拓扑、局部拓扑修正的详细数学模型, 并根据该模型设计并实现了大电网并行网络拓扑分析功能。在实际 D5000 系统中的测试结果表明, 本文提出的模型和方法, 有效地提升了大电网网络拓扑分析效率, 为系统拓扑着色和在线分析计算提供了毫秒级分析结果, 结合 WAMS 系统的毫秒级实时数据量测, 可为电网实时分析和事中分析提供强有力的支撑。

本文提出方法已应用于 D5000 系统中, 有效提升了系统网络拓扑分析的执行效率。

参考文献

- [1] SUN Qiming, SHI Libao, NI Yixin, et al. An enhanced cascading failure model integrating data mining

- technique[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2: 10pp.
DOI 10.1186/s41601-017-0035-3
- [2] 王昊, 夏慧, 陈威, 等. 基于分治策略的分布式调度自动化系统稳态监控网络拓扑分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 101-107.
WANG Hao, XIA Hui, CHEN Wei, et al. Analysis of distributed dispatching automation system stability monitoring of topology based on divide-and-conquer strategy[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 101-107.
- [3] 钱诚, 王增平, 张晋芳. 基于同步向量测量的厂站内网络拓扑分析新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 80-86.
QIAN Cheng, WANG Zengping, ZHANG Jinfang. A novel substation topology analysis algorithm based on synchronized phasor measurement[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 80-86.
- [4] 华健, 韩学山, 王锦旗, 等. 改进高斯消元算法在电力系统拓扑结构分析中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(23): 57-61.
HUA Jian, HAN Xueshan, WANG Jinqi, et al. Application of improved Gaussian elimination algorithm in power system topology analysis[J]. Power System Technology, 2007, 31(23): 57-61.
- [5] 姚玉斌. 基于邻接矩阵准平方法网络拓扑分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 17-29.
YAO Yubin. Determination of network topology by fast quasi-square of the adjacency matrix[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 17-29.
- [6] 梅念, 石东源, 段献忠. 基于图论的电网拓扑快速形成与局部修正新方法[J]. 电网技术, 2008, 32(13): 35-39.
MEI Nian, SHI Dongyuan, DUAN Xianzhong. A novel method for fast power network topology formation and partial revision based on graph theory[J]. Power System Technology, 2008, 32(13): 35-39.
- [7] 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 Zhanghuo, QIN Hongxia, SUN Qihong, et al. Object-oriented to fast tracking of topology for power systems (part 1)[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(3): 178-181.
- [8] 龙启峰, 陈岗, 丁晓群, 等. 基于面向对象技术的电力网络拓扑分析新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(1): 73-77.
LONG Qifeng, CHEN Gang, DING Xiaoqun, et al. New method of power network topology analysis based on object-oriented technology[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2005, 17(1): 73-77.
- [9] 宋少群, 朱永利, 于红. 基于图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): 296-302.
SONG Shaoqun, ZHU Yongli, YU Hong. A power network topology tracking method based on graph theory and artificial intelligence search technique[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 296-302.
- [10] 王健, 陈威, 汤卫东, 等. 分布式并行网络拓扑计算关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 117-122.
WANG Jian, CHEN Wei, TANG Weidong, et al. Research on the key technologies of distributed parallel network topology computing[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 117-122.
- [11] 徐得超, 赵敏, 江涵, 等. 用于大规模电力系统机电暂态实时仿真的并行网络拓扑算法[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 296-302.
XU Dechao, ZHAO Min, JIANG Han, et al. Power system parallel network topology algorithm applied to electromechanical transient real-time simulation of large-scale power system[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 296-302.
- [12] KARYPIS G, KUMAR V. A fast and high quality multilevel scheme for partitioning irregular graphs[J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 1998, 20(1): 359-392.
- [13] KARYPIS G, KUMAR V. Multilevel k-way partitioning scheme for irregular graphs[J]. Parallel and Distributed Computing, 1998, 48(1): 96-129.
- [14] KERNIGHAN B W, LIN S. An efficient heuristic procedure for partitioning graphs[J]. The Bell System Technical Journal, 1970, 49(2): 291-307.
- [15] 马永刚. 图划分方法及其在分布式网络环境下的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
MA Yonggang. Graph partitioning algorithms and its applications in distributed network environment[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [16] 江德. 并行计算系统中任务分配问题算法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
JIANG De. Research on task allocation problem in parallel computing system[D]. Dalian: Dalian University of

- Technology, 2010.
- [17] 张百达. 基于图划分的复杂网络并行计算技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
ZHANG Baida. Graph partition based parallel computing for complex network[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [18] 姚路. 图分割算法及其在大规模数值并行计算中的应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
YAO Lu. Research on graph partitioning algorithms and the applications in the large-scale numerical parallel computation[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.
- [19] 刘旭. 基于图剖分和图排序的负载均衡算法研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2008.
LIU Xu. Research on load balancing algorithms based on graph partitioning and graph layout[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2008.
- [20] 黄道春, 魏远航, 钟连宏, 等. 我国发展特高压直流输电中一些问题的探讨[J]. 电网技术, 2007, 31(8): 6-12.
HUANG Daochun, WEI Yuanhang, ZHONG Lianhong, et al. Discussion on several problems of developing UHVDC transmission in China[J]. Power System Technology, 2007, 31(8): 6-12.
- [21] 程延远, 杨选怀, 苏晓, 等. 基于拓扑分析的二次回路仿真算法研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(11): 57-61.
CHENG Yanyuan, YANG Xuanhuai, SU Xiao, et al. Study of secondary circuit simulation algorithm based on topology analysis[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(11): 57-61.
- [22] 林鸿基, 林振智, 林冠强, 等. 基于信息熵权和层次分析法的电网关键节点识别[J]. 广东电力, 2016, 29(12): 50-56.
LIN Hongji, LIN Zhenzhi, LIN Guanqiang, et al. Identification for critical nodes of power grid based on information entropy weight and analytic hierarchy process[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(12): 50-56.
- [23] 王凯, 胡晓波. 直流电网发展历程、典型拓扑及潮流控制策略综述[J]. 陕西电力, 2015, 43(1): 39-45.
WANG Kai, HU Xiaobo. A review of development, typical topologies and power flow control strategies of DC grid[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(1): 39-45.
- [24] 苏菲, 梁昊, 王养浩. 大规模光伏并网发电系统拓扑结构的对比研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(3): 16-20.
SU Fei, LIANG Hao, WANG Yanghao. Comparative analysis on large-scale grid-connected PV system topology[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(3): 16-20.
- [25] 王紫雷. 基于复杂网络理论的受端电网分层分区[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(6): 69-74.
WANG Zilei. Fast voltage control partitioning using spectral bisection method based on complex network theory[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(6): 69-74.
- [26] 白云霄. 基于网络拓扑结构的大电网可靠性评估[J]. 广东电力, 2015, 28(9): 72-78.
BAI Yunlei. Evaluation on reliability of large power grid based on network topology structure[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(9): 72-78.
- [27] 齐林海, 柳超, 任旭. 基于IEC61970的电网拓扑分析结果共享技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 146-150.
QI Linhai, LIU Chao, REN Xu. Research on sharing technology of power grid topology analysis result based on IEC 61970[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 146-150.
- [28] 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.

收稿日期: 2017-07-17; 修回日期: 2017-09-04

作者简介:

郎燕生(1978—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力调度自动化高级应用; E-mail: langys@epri.sgcc.com.cn

李静(1983—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力调度自动化高级应用; E-mail: lijing2010@epri.sgcc.com.cn

罗雅迪(1986—), 男, 学士, 工程师, 研究方向为电力调度自动化高级应用。E-mail: luoyadi@epri.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)