

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

王昊, 夏慧, 陈威, 李国光, 金芬兰

(北京科东电力控制系统有限责任公司, 北京 100192)

摘要: 电网拓扑分析是电网调度自动化系统的一项基础性工作, 是联通电网模型和电网分析的桥梁, 为电网调度员潮流计算、防误操作等等提供必要的基础数据。随着电网建设, 网架结构逐步扩大, 亟需一种方法在充分利用计算机资源的基础上实现高效率的网络拓扑分析。提出了一种基于分治思想的电网网络拓扑分析算法, 通过结合电网模型的特点以及成熟的图论算法予以实现。同时将面向高级应用服务和面向监控服务的拓扑功能解耦, 在不影响电力潮流计算等应用功能的基础上提高调度自动化系统集成效率, 最后应用该算法编写并行的分布式电网拓扑分析程序, 并展望了其应用前景。

关键词: 分治; 遍历; 面向对象; 稳态监控; 分布式

Analysis of distributed dispatching automation system stability monitoring of topology based on divide-and-conquer strategy

WANG Hao, XIA Hui, CHEN Wei, LI Guoguang, JIN Fenlan

(Beijing Kedong Electric Power Control System Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: Power network topology analysis is a basic task of power grid dispatching automation system and a bridge of connecting power grid model and analysis, providing the necessary basic data for power flow calculation and anti misoperation, etc. With the development of power grid construction and gradual expansion of the network structure, a new method, in full use of computer resources to achieve high efficient network topology analysis is needed. This paper presents a topology analysis algorithm based on divide-and-conquer algorithm, which can be realized by combining with the characteristics of grid model and mature graph algorithm. At the same time, topology functions of the high-level application service oriented and monitoring service oriented are decoupled, which can improve dispatching automation systems integration efficiency without affecting power flow calculation, finally the concurrent program for distributed power network topology analysis when applying the proposed algorithm is written and its application prospect is proposed.

Key words: divide-and-conquer; traversal; object-oriented; steady state monitoring; distributed

中图分类号: TM76

文章编号: 1674-3415(2015)18-0101-07

0 引言

电网拓扑分析是电网调度自动化系统一个非常重要的基本应用, 它是衔接电网模型和相关调度自动化软件的重要桥梁, 是状态估计、潮流计算稳定计算、继电保护整定等众多电力系统分析功能实现的基础^[1]。作为调度自动化系统中稳态监控模块的一部分, 快速、准确的网络拓扑分析不仅可以有效地满足调度自动化系统的基本需求, 更可以保证监

控系统的实时性、提高相关应用计算的准确性。“十二五”期间, 国家电网将建成华北、华东、华中(“三华”)特高压电网, 形成“三纵三横一环网”的特高压网架^[2]。这使得电网调度自动化系统监控的电网规模越来越大, 对网络拓扑分析的效率和稳定性是一项挑战。

目前先进的调度自动化系统监控功能基本都具备了对网络拓扑的着色, 辅助调度员、监控员对电网的整体掌握^[3]。文献[4]应用阻抗矩阵和导纳矩阵

的特性提出了一种厂站内的拓扑计算模型的分析算法。文献[5]提出运用节点合并的并行算法实现拓扑分析计算,但完全剥离了电网的电气属性,遍历存在盲目性。文献[6-15]提出了对应用拓扑分析的结果构建计算模型,同时普遍应用邻接矩阵的数据结构进行存储,对于实现实时监视帮助不大。文献[16]提出了间隔内的网络拓扑分析算法,但间隔的划分方式目前仍没有统一规范,间隔与间隔的边界较难界定,不利于进一步的进行并行计算。目前处于研究阶段和自动化系统中实现的网络拓扑分析功能存在以下问题:1、网络拓扑分析和高级应用,如潮流计算、状态估计等高度耦合。作为监控系统更关注设备的运行状态,潮流计算等是更进一步的要求。2、目前实际运行的服务于监视、控制的网络拓扑分析功能应用串行算法实现,并在单一服务器上运行,效率上较难满足逐步发展、容量日益增大的电网拓扑分析的实时性能。

本文结合电网 CIM 模型^[17],基于智能电网调度控制系统平台提出了结合分治策略,以面向设备建模的分布式网络拓扑分析方案解决了算法由面向计算到面向监控的转变,大大提高了地(县)级调度调度自动化系统的集成效率。根据文献[18-21]进一步地对网络拓扑进行调整,首先将串行计算转化为并行计算,进而讨论应用分布式计算的方法解决网络拓扑分析的实时效率和整体调度自动化监视软件的稳定性。

1 电网模型和分治策略的结合

1.1 分治策略

分治策略是计算机软件编程中的一个常用方法,应用递归的思想,在每一个层次的递归中应用如下三个步骤:

1) 分解步骤将问题划分为一些子问题,子问题的形式与原问题一样,只是规模更小。

2) 解决步骤递归地求解出子问题。如果子问题的规模足够小,则停止递归,直接求解。

3) 合并步骤将子问题的解组合成原问题的解。

其中,当子问题足够大,需要递归求解时,称之为递归情况。当子问题变得足够小,不再需要递归时,称之为递归“触底”,进入了基本情况^[18]。

电网拓扑分析,在将电网设备的物理属性剥离后,实质上是求解图形连通性的问题,但连通性问题的输出通常只有是与否。至于设备间是怎样连通,还需要应用遍历的手段来求得结果。通常来讲,遍历的速度取决于图形的规模。面对一个较大规模的图来说,无论采用什么样的算法,效率都会低于一

个规模较小的图。而影响电力系统网络的拓扑关系往往是一、两个断路器、刀闸的变化,这种细微的改变导致遍历一个庞大的电网其代价是十分不划算的,从分治策略的基本思想可以看出,一个规模为 N 的问题可以通过分解将规模难度降低。

1.2 CIM 中的电网模型

目前电网设备通常应用公用信息模型 CIM (Common Information Model)来进行描述,它包括公用类、属性、关系等,其类(Class)及对象(Object)是抽象的,可以用于许多电力系统应用,是逻辑数据结构的灵魂,可定义信息交换模型^[17]。CIM 模型的基类是电力系统资源 PSR(Power System Resource)类,表达一个电力系统一般的组件。在整个的 CIM 中,有两个内容层次:一个是以电力系统资源类为中心,关注这些资源的本身的参数(如电容的电导和电纳)、关联的参数(例如开关一端的电流)和所属的关系;另一个是以 Terminal(连接端)为中心,建立了传导设备的连接关系,从而形成了拓扑。本文重点关注后一层次。

从 PSR 抽象继承下来的子类分别代表不同的电力设备实体,如线路、断路器、变压器、母线、变电站等如图 1 所示。类和类之间的关联在图中表示。即一个公司可以包含多个变电站,一个变电站又包含多个设备。连接端(Terminal)类是一个重要的类,每个传导设备包含若干个连接端。这些连接端表示了这些传导设备空间上的联系。在拓扑包中需要 Terminal 把传导设备和其他对象联系到一起,形成拓扑关系。

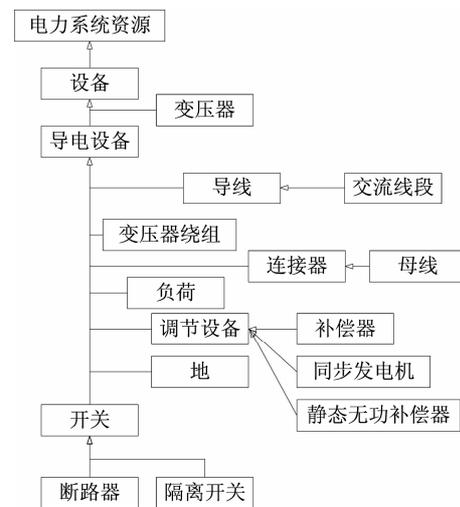


图 1 设备继承关系

Fig. 1 Inheritance hierarchy

连接关系模型采用 CIM 模型中定义的端点(Terminal)和连接点(Connectivity Node)模型来表示。

导电设备具有不同数量的端子, 端子为导电设备对外的电气接口。同时 CIM 还提出了设备容器的概念, 它描述了一种组织和命名设备的方法。如图 2 所示。

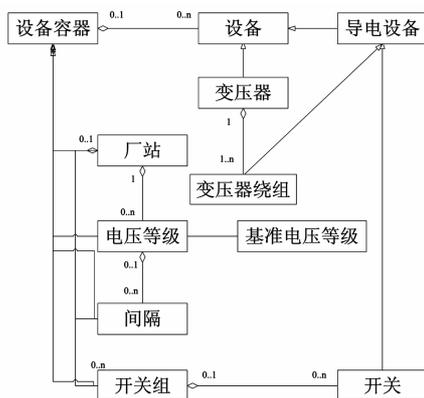


图 2 设备容器

Fig. 2 Equipment container

CIM 中定义, 拓扑分析建立节点与拓扑节点、拓扑节点与拓扑岛之间的聚集关系, 如图 3 所示。

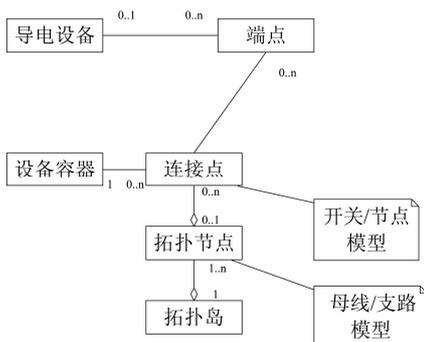


图 3 不同导电设备的连接关系

Fig. 3 Connection of different conducting equipment

这种建模方式和目前常用的计算母线分析的思路是完全一致的, 即将闭合开关两端连接节点合并后形成母线/支路模型, 该模型是基于拓扑节点类 (Topological-Node) 的模型, 主要用于网络分析应用。作为稳态监控则更关心开关状态对网络连通关系的影响, 应用开关/节点模型更为方便。至此, 应用 CIM 完成了对网络拓扑分析问题的抽象。

1.3 拓扑模型分治

1.3.1 数据分解

我国的输电网是按照“地区-公司-厂站-电压等级”这样的层级来划分管理的。国内的调度自动化系统是按照 CIM 规范进行的建模。借助 CIM 中“设备容器”的描述, 可以对电网模型同样按照管理的划分来进行分割, 即“厂站-电压等级-间隔”(如图 2), 所有的设备除去“变压器”和“线路”, 都可以关联到某一厂站的某一电压等级下, 在定义了间隔

的调度自动化系统中还可以将设备划分到间隔中, 变压器、线路和电压等级、厂站没有聚集关系。

可以将针对全网的拓扑分析作为总问题, 对厂站、电压等级乃至间隔的拓扑分析作为子问题。根据分治策略, 拓扑分析可以划分为针对厂站问题的求解、针对电压等级问题的求解、针对间隔的求解, 至此问题“触底”。本文将对同一电压等级下的拓扑分析作为分治的“触底”条件, 应用变压器作为不同电压等级之间的划分, 线路则作为不同厂站的划分。这样对数据的分解较为直观, 易于理解。

1.3.2 带电分析

基于监控的拓扑分析一个重要任务就是提供着色, 即分析设备的带电状态, 而带电状态的分析可以在完成连接分析后单独进行。因此将带电分析作为一项单独的任务提出。

1.3.3 并发模型

在完成上述对电网的划分后, 很容易得到: 上述的划分对于任何电网来说是普遍适应的, 每个子问题在去掉线路、变压器这两种设备的影响后都相互独立, 如图 4 所示。由于基于监视的分析不用考虑潮流方向, 电网模型转化到计算机数据结构中可以应用表(List)的数据结构进行存储, 而表属于可分解的数据结构, 意味着将整体计算分解为多个任务, 各个任务将并发执行, 并且每个任务都将更新与之相关的数据块, 每个数据块内的数据是安全的^[20]。事实上, 并发甚至可以在任何一个子问题中进行, 考虑到程序的复杂性和稳定性, 本文并发的层次只考虑到前文所述的子问题, 这也有利于后续分布式计算模型的建立。

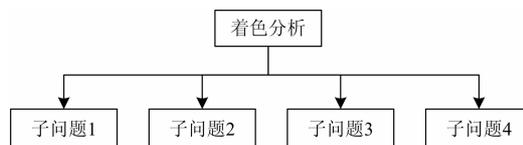


图 4 并发拓扑分析模型

Fig. 4 Parallelized topological analysis model

2 网络拓扑子问题的求解

2.1 数据结构选择

描述图的数据结构通常有邻接表和邻接矩阵两种, 对于图 $G=\{v,e\}$, 邻接矩阵存储空间复杂度为 $O(v^2)$, 邻接表存储空间复杂度为 $O(v+e)$ 。采用邻接表的方式存储电网元件具有良好的性质: 第一, 由于邻接表是占用的连续空间, 邻接表中不存在零元素, 节省了内存空间。第二, 应用邻接表来描述电网设备关系, 不仅易于理解, 还有利于后续的分析查找, 同时对其他应用提供服务时更为直观。

如图 5 所示，此图可看作我们采取分治策略后电网的一个最小拓扑问题，而且这个小型的电网几乎完整地包含了输电网中所有的要素。表 1 所列的是图 5 中表示的电网设备。

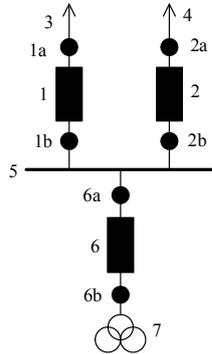


图 5 一个简单的电网

Fig. 5 A simple grid

表 1 电网络图信息

Table 1 Grid information

设备编号	设备类型
1	断路器
2	断路器
3	线路
4	线路
5	母线
6	断路器
7	变压器
1a 1b	隔离开关(刀闸)
2a 2b	隔离开关(刀闸)
6a 6b	隔离开关(刀闸)

结合 CIM 模型，可以将元件划分成三类：普通设备元件，开关类设备元件和连枝型设备元件。其中普通设备元件中，多数设备均为只有一个连接节点的设备如母线，互感器等，其中电源类元件，如发电机，负荷又较为特殊；开关类元件、连枝型设备，主要是指可以联络不同厂站、不同电压等级的设备，包括线路、变压器。

按照前文所述的分治思想，对电网设备进行三类划分的基础上，再按照不同厂站、电压等级再进行划分，并以此作为后续创建邻接表的基本素材。

这样针对图 5 所示的电网，整理拓拓扑素材后，分类为

普通设备元件：母线(5)；

开关类元件：断路器(1、2、6)，隔离开关(1a、1b、2a、2b、6a、6b)；

连枝类设备：线路(3、4)，变压器(7)。

至此，我们可以在保留其设备属性的基础上，按照它们的连接点信息进一步抽象成图论中关于点、边的形式，应用连通算法完成合并，同时创建出与图 5 对应的邻接表如表 2 所示。邻接表仍旧保留了相应设备的电力元件信息，以便后续执行进一步的分析工作。

表 2 邻接表描述

Table 2 Adjacency list

邻接表序号	设备原始编号	关联设备 (邻接表序号)
1	5	2,3,4
2	1b	1
3	2b	1
4	6a	1,5
5	6	4,6
6	6b	5,7
7	7	6
8	1	2,9
9	1a	8,10
10	3	9
11	2	3,12
12	2a	11,13
13	4	12

2.2 设备块对象

每一个邻接表都是一个对象，不妨称之为一个“设备块”结合 CIM 模型中的设备容器概念，“设备块”表示多个具有关联设备的集合。应用面向对象的思想，令一个“设备块”为一个对象，邻接链表仅作为它包含了内部连接关系数据的一个属性。为了后续的分析工作，还应当增加：电源信息属性，连枝关系属性。这样一个基本的“设备块”对象可以描述如图 6^[4]。

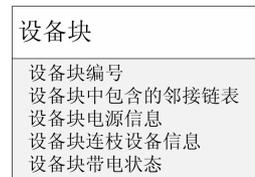


图 6 设备块类

Fig. 6 Equipment chunk class

其中设备块编号为索引，按照层次模型，考虑到“设备块”对象，修改层次模型得到：

地区-公司-厂站-“设备块”-设备

在上述模型结构中，对各层次的信息均创建索引，即可实现在不同层次中进行查询，如已知某一设备可定位其所属厂站，已知某一厂站可得到厂站

所属设备块信息。

2.3 拓扑分析求解

2.3.1 静态拓扑分析

如图 7 所示, 从实时库中获取数据, 通过问题分解, 将全网的拓扑问题按照“设备块”进行划分, 通过遍历算法(如深度优先搜索)等将数据维护到设备块对象中。至此完成电网模型到开关/节点模型的创建^[17]。此时可以暂时不考虑开关状态, 为后续的动态拓扑分析做准备。

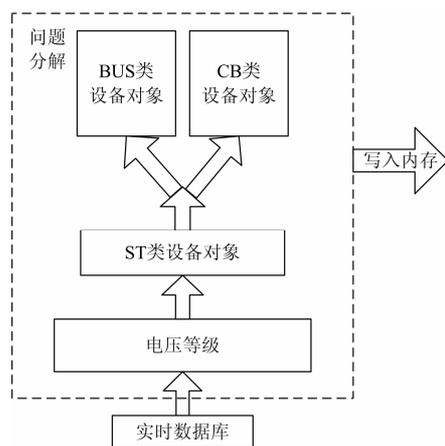


图 7 程序处理流程

Fig. 7 Program procedure

2.3.2 实时开关状态及动态拓扑分析

为实现对电网监视, 电网拓扑分析主要通过跟踪开关的开合状态得出电力网络的电气岛信息, 并综合得到设备带电情况的判断。

第一轮筛选, 根据开关开合情况在“设备块”中进行遍历, 由于开关的开合将修改原始“设备块”的连枝型设备的属性。对设备块中连枝型设备进行计数, 保留具有连枝型设备、电源型设备的“设备块”, 对应的其他“设备块”则不再参与后续的带电分析。

第二轮筛选, 从电源开始, 遍历所有的连枝型设备, 这些设备块为带电设备, 没有遍历到的设备块则为失电。

两轮筛选后, 设备的带电情况就被唯一确定了。

最坏的情况是所有的设备块中的断路器均有动作, 这时需要对所有的设备块进行重新的构建, 但不同的设备块的构建可以并行进行。通常来讲, 在整个电网中只会有少数几个设备块需要重新构建, 拓扑分析的空间复杂度得到大大的降低。

3 对象化模型信息共享与分布式计算的实现

Google 的 MapReduce 是一个简单的编程模型, 它通过隐藏并行计算、故障监控与恢复、数据管理以及负载均衡相关的细节支持应用程序的开发。MapReduce 的基本原则是基于一种对计算的认识, 即并行计算所共享的同一模式^[21]:

- 1) 将输入数据分成若干块;
- 2) 对这些数据块进行初步处理来生成中间结果;
- 3) 综合这些中间结果来产生最终的输出。

从算法条件上, 通过前文的分析, 可以认为网络拓扑分析同样适用于该思想; 调度自动化系统本身是一套庞大的系统, 先天具备大量高性能服务器。然而从实际情况来看, 并不是所有服务器在任何时刻都满负荷运行, 大负荷的服务器总是集中在几台重要的应用服务器上, 如稳态监控, 数据交换, 数据存储等。闲置的或是负载较轻的服务器为进行分布式计算提供了客观的硬件条件。为实现分布式计算, 对前文的划分进行适当的调整, 拓扑分析的步骤可以总结如下:

1) 初始化。将全局电网按照不同电压等级进行划分, 从而整个电网被划分成了 N 个子电网, 并按照设备块对象的方式进行构建生成<关键字, 设备信息>的键-值对结构。该结构将脱离实时数据库独立存在。

2) 构建阶段。根据遥信情况对设备块进行处理, 构造设备块内的连通情况, 并修建连枝型设备。

3) 合并步骤。将修建完毕的设备块进行遍历。统计设备块的电源个数。

4) 带电状态更新。将设备块更新设备的带电情况。

拓扑分析的基本素材信息在主工作机上存储, 中间结果则在工作机完成计算后上传至主工作机。

考虑有 N 台服务器, 这些服务器可以是本调度自动化系统的也可以是不同调度自动化系统的服务器甚至是厂站端的自动化系统服务器, 将它们作为机器池, 首先启动一些工作机, 其中一台作为主的工作机, 其他的工作机完成构建和合并的工作。主工作机负责监视其他工作机的状态, 通过接收遥信变化事件启动对应的工作机启动构建运算, 并负责划分和最后的带电状态更新任务。如图 8 所示。

针对具体的调度自动化系统, 对整体问题的划分可以考虑更多的人工干预, 如对一些待改造的, 新建的变电站可以放置在一起, 这样在进行模型维护时对监视造成的影响可以降低到最小。

容错性的实现: 由于拓扑分析终归是一个整体性的问题, 因此必须由所有的工作机完成运算后才

可能得到唯一正确的答案,因此,主工作机定期地

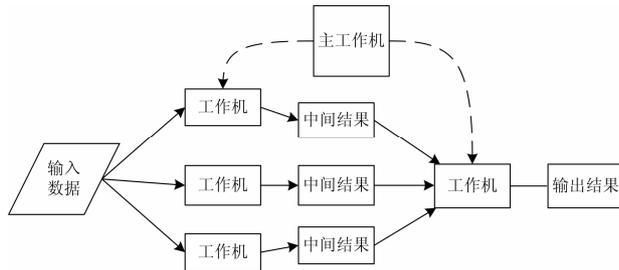


图8 整体执行过程

Fig. 8 Parallel procedure

通过心跳的方式判断工作机是否正常,如果某一个工作机已经停止运算或是出现网络中断等问题,主工作机再判断是否有中间结果,如果有中间结果将该工作机对应的任务复制到另一工作机上由新的工作机来完成任务。

上述方法支持在缺少服务器时同样提供拓扑分析的功能。

4 应用实践与展望

随着特高压互联大电网的快速建设,电网一体化安全稳定运行的要求也越来越高,确保调度自动化领域的建设速度能够跟上特高压互联大电网的建设速度,为大电网的监视、控制提供有力保障。分布式的网络拓扑分析有着十分重要的意义。

分布式的网络拓扑分析功能从效率上可以满足大电网“一体化”运行的需要。目前,在国/网/省一体化、省/地一体化、地/县一体化等系统的建设中,一体化应用已经体现出巨大的优势,作为监控、计算等应用提供基础信息的拓扑分析模块应用分布式的计算模型可以更为有效地解决因规模增大单节点负荷过高的问题,充分利用调度自动化系统资源,应用集群的优势快捷高效地处理问题。相较于单节点的网络拓扑分析效率可提升50%以上。

基于本文提出的应用分治策略开发的稳态监控网络拓扑分析模块,目前已经广泛应用于我国多个调控一体系统,包括省、地县级的调度。分布式拓扑功能仍处于实验室环境还没有具体实装,相信在不久的将来可以应用到调度自动化系统中。

5 结论

本文从计算机分治策略出发,结合CIM模型的相关规范,将大规模的电网分割成为多个小规模局部模型,并且在分割时保证了子问题具有递归性。该方法从理论上避免了进行大规模计算造成庞大运算量的问题。同时,通过应用邻接表的数据结构来

存储CIM模型,实现了从实时数据库数据到分析模型的抽象,和基础数据相互独立,对实现分布式计算打下了良好的基础。本文提出的在应用分治策略的基础上实现分布式的网络拓扑计算可以有效提高各级电网调度自动化系统的稳定性,从而提高调度大电网的能力,保证电网安全稳定运行。

参考文献

- [1] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京: 水利水电出版社, 1985: 166-188.
- [2] 特高压“十二五”规划上报电力“高速公路”启动[EB/OL].[2012-04-28]. http://www.sp.com.cn/dlyw/gndlyw/201204/t20120428_188278.htm.
- [3] 辛耀中. 新世纪电网调度自动化技术发展趋势[J]. 电网技术, 2001, 25(12): 1-10.
XIN Yaozhong. Development trend of power system dispatching automation technique in 21st century[J]. Power System Technology, 2001, 25(12): 1-10.
- [4] 王增平, 张晋芳, 张亚刚, 等. 基于开关路径函数集的新型厂站内网络拓扑方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 137-143.
WANG Zengping, ZHANG Jinfang, ZHANG Yagang, et al. A novel substation configuration identification algorithm based on the set of breaker-path functions[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 137-143.
- [5] 张焯, 周苏荃. 基于节点连通岛合并法网络动态拓扑分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 72-75.
ZHANG Ye, ZHOU Suquan. Network dynamic topology analysis based on node connective island combined method[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 72-75.
- [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 Xiangzhong, LI Xiaolan. Topology identification of power network based on incident matrix[J]. Power System Technology, 2001, 25(2): 10-12, 16.
- [7] 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(6): 17-21.
YAO Yubin. Determination of network topology by fast quasi-square of the adjacency matrix[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 17-21.
- [8] 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 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): 45-49.
- [9] GODERYA F, METWALLY A A, MANSOUR O. Fast detection and identification of islands in power networks[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, 99(1): 217-221.
- [10] 于雨, 陈云山, 王大为. 电网连通性检测方法的探讨[J]. 电力学报, 1999, 14(3): 183-188.
YU Yu, CHEN Yunshan, WANG Dawei. The study of testing method of electric network connection[J]. Journal of Electric Power, 1999, 14(3): 183-188.
- [11] 马昭彦. 高斯消元法在图计算中的应用[J]. 辽宁电机工程学报, 1984, 4(3): 46-52, 31.
MA Zhaoyan. Application of Gaussian elimination algorithm in graph calculation[J]. Proceeding of the LSEE, 1984, 4(3): 46-52, 31.
- [12] 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.
- [13] 姚玉斌, 王丹, 吴志良, 等. 方程求解法网络拓扑分析[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(1): 79-83.
YAO Yubin, WANG Dan, WU Zhiliang, et al. Network topology analysis by solving equation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(1): 79-83.
- [14] 于琨. 网络拓扑分析算法的研究与设计[D]. 大连: 大连海事大学, 2008.
YU Kun. The study and design of network topology algorithms[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2008.
- [15] 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.
- [16] 高海洋, 张水涛, 张焰. IEC61970 间隔拓扑模型在地区电网综合调令票开票系统中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(16): 57-60.
GAO Haiyang, ZHANG Yongtao, ZHANG Yan. Research of application of IEC61970 bay model in region power grid comprehensive operation system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(16): 57-60.
- [17] IEC 61970-301 energy management system application program interface (EMS-API) common information model (CIM) base, FDIS 2003-08-15[S].
- [18] CORMEN T H, LEISERSON C E, RIVEST R L, et al. 算法导论[M]. 殷建平, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [19] 刘莉, 赵璇, 姜新丽. 基于层次矩阵的配电网拓扑分析与潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 91-94.
LIU Li, ZHAO Xuan, JIANG Xinli. Distribution network topology analysis and flow calculation based on layer matrix[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 91-94.
- [20] BRESHEARS C. 并发的艺术[M]. 聂雪军, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [21] COLULOURIS G, DOLLIMORE J, KINDBERG T, et al. 分布式系统概念与设计[M]. 金蓓弘, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2013: 571-573.

收稿日期: 2014-12-08; 修回日期: 2015-04-03

作者简介:

王 昊(1985-), 男, 学士, 副高级工程师, 从事电网调度自动化系统 SCADA 的研究; E-mail:wanghao5@sgepri.sgcc.com.cn

夏 慧(1980-), 女, 硕士, 副高级工程师, 从事电网调度自动化系统, 调控一体化的研究;

陈 威(1988-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事电网调度自动化系统研发。

(编辑 葛艳娜)