

DOI: 10.7667/PSPC160178

## 分布式并行网络拓扑计算关键技术研究

王健<sup>1</sup>, 陈威<sup>2</sup>, 汤卫东<sup>1</sup>, 王昊<sup>2</sup>, 金芬兰<sup>2</sup>

(1. 华中电网有限公司, 湖北 武汉 430077; 2. 北京科东电力控制系统有限责任公司, 北京 100192)

**摘要:** 为解决由于不断扩大的电网规模和不断复杂的网络拓扑复杂程度, 导致传统拓扑着色分析方法速度慢、效率低, 无法适应电力系统应用软件高时效性要求的问题, 研究了分布式并行网络拓扑计算关键技术。通过研究合理的网络拓扑模型划分算法, 首先对拓扑计算程序改造成多线程并行处理的方式; 再充分利用集群和网络资源, 将整个网络拓扑进行划分, 由不同的服务器进行并行的分析与计算; 最后每台并行的服务器再采用高效率的网络拓扑分析算法。经过以上几个步骤, 分布式并行的网络拓扑计算可以提高可扩展性和可靠性, 并且可以充分提高拓扑计算和程序运行的效率。

**关键词:** 分布式; 并行; 网络拓扑计算; 邻接矩阵; 局部拓扑

### Research on the key technologies of distributed parallel network topology computing

WANG Jian<sup>1</sup>, CHEN Wei<sup>2</sup>, TANG Weidong<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>2</sup>, JIN Fenlan<sup>2</sup>

(1. Central China Grid Co., Ltd., Wuhan 430077, China; 2. Beijing Kedong Electric Power Control System Co., Ltd., Beijing 100192, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the traditional topological coloring analysis method is of slow speed and low efficiency, and cannot adapt to the high efficiency requirements of power system application software, the key technology of distributed parallel network topology is studied. Through the research of the reasonable network topology model, the method of the topology calculation program is transformed into a multi thread parallel processing. And then by making full use of the resources of the cluster and network, the whole network topology is divided by different servers to carry out the analysis and calculation. Finally each parallel server uses a high efficiency of network topology analysis algorithm. After the above steps, the network topology calculation can improve the efficiency of the computation and operation, and can be expanded reliably.

**Key words:** distributed; parallel; network topology calculation; adjacency matrix; local topology

## 0 引言

电力系统的网络拓扑着色计算分析为电力系统仿真、状态估计、动态潮流计算和故障诊断等模块提供基础的网络结构数据<sup>[1]</sup>, 帮助监控人员直观地了解电力系统的工作状态, 要求具备实时性、可靠性。并根据断路器和开关的遥信状态以及网络元件的连接关系来确定带电状态, 并以不同的颜色表示<sup>[2]</sup>。

由于控制规模以及网络技术应用的条件, 网络拓扑分析多采用集中式的处理方式, 即将所有的功能集中在一个节点上。这种模式结构比较简单, 维护方便, 但是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, 效率上很难满足不断扩大的电网规模和不断复杂的网络拓扑复杂程度, 而分

布式的应用成为必然, 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<sup>[3]</sup>。另外网络拓扑着色分析目前还采用线性树搜索法, 面对多结点电网时运行效率低, 影响调度员实时的电网监视, 不利于及时捕捉到电网中的突发事件。

如今, 国内外的学者已经在网络拓扑着色计算分析算法方面取得了很好的成绩, 主要包括图搜索法和矩阵方法两大类<sup>[4-7]</sup>。图搜索法主要以深度优先算法(DFS)和广度优先算法(BFS)为代表, 该类算法对于复杂程度较高的接线形式往往会出现对某些节点重复访问的情况<sup>[8]</sup>, 导致编程和维护较为复杂, 运行效率较低。而矩阵法更适合分布式网络拓扑计算的建模方式, 但是现有的矩阵法在处理遥信变位时, 需要修改初始的邻接矩阵, 然后需要重新进行

一系列的运算以获得全连通邻接矩阵<sup>[4]</sup>，重复的运算降低了网络拓扑分析的效率。

本文通过研究合理的网络拓扑模型划分算法，将拓扑分析对象进行合理拆分；研究合理的网络拓扑并行计算算法，实现网络拓扑的并行计算分析；研究分布式网络拓扑计算技术，提出网络拓扑分布式处理机制。通过研究分布式并行网络拓扑计算关键技术提升网络拓扑分析的效率、切实提升调度自动化系统处理大规模电网的实时性。

### 1 网络拓扑模型

为了实现分布式并行网络拓扑计算，通过研究合理的网络拓扑模型划分算法，将拓扑分析对象进行合理拆分。首先对拓扑计算程序进行单机并行的改造，把程序改造成多线程处理的方式，再充分利用集群和网络资源，将整个网络拓扑进行划分，由不同的服务器进行并行的分析与计算，最后每台并行的服务器再采用高效率的网络拓扑分析算法，经过这三个步骤，网络拓扑计算可以充分提高计算和运行的效率以及可扩展性。另外由于集群处理方式的存在，每台并行的服务器都具有独立计算的能力，如果某台服务器出现非正常运行的情况，其工作内容可以转移到其他并行的服务器上，并不会影响最终网络拓扑的实现，进一步提高网络拓扑的可靠性。

### 2 单机多线程

图 1 为网络拓扑程序的大体数据流程。

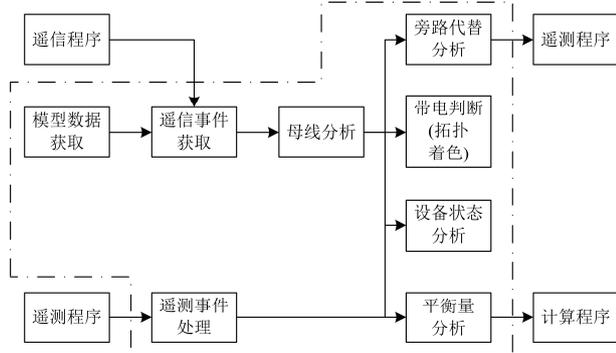


图 1 网络拓扑程序的大体数据流程

Fig. 1 General data flow of network topology program

网络拓扑程序运行在每一台服务器上，可以按照以下的各个线程把程序改造成多线程处理的方式。

#### (1) 主线程

主要负责初始化全局变量、注册消息总线、初始化参数、初始化并创建各应用处理线程。

#### (2) 模型更新线程

本线程周期性判断电网模型是否发生变化，如果发生变化，则重新读取电网模型，并启动其他线程重新计算。

#### (3) 报文接收线程

本线程负责接收遥信变位和画面操作发来的各种变化数据报文，将其推入共享队列中，供后续各线程读取处理。当各线程对每个消息处理结束后，将消息从共享队列中清除。

#### (4) 旁路代分析线程

当共享消息队列中有新的遥信变位时，本线程根据遥信变位的设备，重新分析该设备所在变电站的次母线，继而分析旁路代结果，将旁路代的设备写入实时库。

#### (5) 拓扑着色线程

当共享消息队列中有新的遥信变位时，本线程重新进行逻辑母线分析、电气岛分析、拓扑着色分析，判断有拓扑着色变化的设备，修改实时库。

#### (6) 设备状态分析线程

当共享消息队列中有新的遥信变位时，本线程根据遥信变位的设备，搜索状态可能被其影响的设备进行分析，将状态发生变化的设备写入实时库。

#### (7) 平衡量分析线程

本线程周期性重新读取电网遥测信息，进行平衡率计算，将平衡率计算结果写入实时库。

### 3 网络拓扑分析算法

对于网络拓扑分析算法，按照全局拓扑分析与局部拓扑分析两部分进行处理。因为矩阵法更适合分布式拓扑建模的方式<sup>[4,9]</sup>，本文采用改进的矩阵法来处理全局拓扑分析。但是现有的矩阵法在处理遥信变位时，需要重新修改初始的邻接矩阵，然后再次进行一系列的运算以获得最后的全连通邻接矩阵<sup>[4,9]</sup>，导致重复运算，降低了网络拓扑分析的效率，因此本文采用改进的图搜索法来处理局部拓扑分析。

#### 3.1 全局拓扑

因为邻接矩阵的元素只有 0 和 1 两种情况，所以本文在存储邻接矩阵时，采用只记录元素为 1 的行号和列号的方法，不需要存储所有元素的值，这样可以大幅节省存储的空间。具体方法是使用两个数组来对邻接矩阵进行存储，分别如下：

- (1) X 存储每个元素为 1 的列号；
- (2) Y 存储每行第一个为 1 元素在数组 X 中的位置。

求全连通矩阵的最基本方法是邻接矩阵自乘法，如式(1)所示<sup>[10-11]</sup>。

$$\mathbf{T}^{k+1} = \mathbf{T}^k \wedge \mathbf{A} \quad (1)$$

式中: 上标  $k$  表示连通矩阵  $\mathbf{T}$  的级数;  $\wedge$  为逻辑乘; 邻接矩阵  $\mathbf{A}$  是一个一级的连通矩阵, 即  $\mathbf{A} = \mathbf{T}^1$ 。

利用式(1)求取连通矩阵的元素时, 计算公式为

$$t_{i,j}^{k+1} = \sum_{m=1}^n (t_{i,m}^k \wedge a_{m,j}) \quad (2)$$

式中,  $t_{i,m}^k$  为矩阵中第  $k$  级  $i$  行  $m$  列的元素。由于邻接矩阵是对称的, 矩阵的元素  $a_{m,j} = a_{j,m}$ 。因此式(2)可以改写为

$$t_{i,j}^{k+1} = \sum_{m=1}^n (t_{i,m}^k \wedge a_{i,m}) \quad (3)$$

由式(3)可知, 只有当  $t_{i,m}^k$  和  $a_{i,m}$  同时为 1 时,  $t_{i,m}^k \wedge a_{i,m}$  才会为 1, 当有任何一项  $t_{i,m}^k \wedge a_{j,m}$  为 1 时,  $t_{i,j}^{k+1}$  就为非零, 因此只要式中有一项  $t_{i,m}^k \wedge a_{j,m}$  为 1, 其余的各项就不用再继续计算。

当得到全连通矩阵后, 本文采用行扫描法来分析拓扑岛的分组情况<sup>[12-13]</sup>。基本步骤是: 定义一个存储节点所属组号的数组, 然后从第一行开始依次进行扫描, 每一行中值不为零的节点属于同一个连通块中。由于对称性, 元素值不为零的节点的列所对应的行也不用再进行扫描, 比如  $t_{1,3} = 1$ , 则第 3 行就不需再扫描。依次扫描行元素, 直到得到网络中每个节点的分组情况为止。

### 3.2 局部拓扑

当出现遥信变化时, 网络拓扑计算需要重新划分拓扑节点和拓扑岛。因为程序在初始化的时候, 已经形成了网络模型的全局拓扑, 因此本文只对遥信变位元件涉及的子网络进行一个局部的计算即可<sup>[14-15]</sup>。本文分两种情况进行讨论。

当设备由断开状态变成闭合状态时, 本文只需要比较设备两端的连接节点所属的拓扑岛, 如果是属于同一个拓扑岛, 则无需做任何处理; 否则, 将这两个拓扑岛合并为一个拓扑岛。

当设备由闭合状态变成断开状态时, 由于设备两端的连接节点在此之前属于同一个拓扑岛, 因此设备状态的变化有可能导致一个新的拓扑岛的出现, 因此还需要分两种情况进行处理。本文按照深度搜索法通过该设备一端的连接节点进行图的遍历, 若遍历到这个设备另一个连接节点, 说明设备两端仍存在电气联系, 则不需要做任何处理; 否则, 需要形成一个新的拓扑岛。

## 4 分布式并行处理

因为在电力系统拓扑着色分析计算中, 问题的复杂程度与电网的规模呈指数增长, 所以将网络分割为多个子网不仅可以有效降低问题的复杂性, 而

且也是实现电力系统分布式并行计算的前提条件。但是网络分割要满足以下两个原则: 一是分割后对各个子网络和对整个网络拓扑求解的结果两者应该相同; 二是为了提高并行计算的效率, 应该将大网络分解为计算负担基本平衡的子网络, 便于在多服务器多处理器计算机系统中提高并行计算的效率, 同时每个子网络的边界节点数目和新增加的元素应尽可能达到最小, 以减少新增的计算量<sup>[16-17]</sup>。因此, 对大电网进行合理分割为多个区域, 这些区域相互独立, 区域之间有少量的联络线连接。

### 4.1 基于区域的数据并行处理

传统的实时监控服务器是以主备方式存在的, 将这种传统的方式扩展为实时监控服务器群。实时监控服务器群内主要由数据节点组成, 每个数据节点地位均等, 都装有各自的电网模型, 每个模型也可以配置多台、地位均等的服务器, 各自负责所辖的模型范围内的数据处理等功能<sup>[18-19]</sup>。对大电网进行合理分割, 分为多个相对独立的区域, 尽量使区域之间通过少数的联络线来连接, 区域内无需外部信息就可以获取大部分的设备的带电、接地情况, 只有少量设备需要外部区域的拓扑状态来确定。各个本地实时库都保留有部分其他区域的实时库信息, 如果某台服务器出现故障, 可以进行工作内容的切换。另外各个节点的数据库共同组成了一个公共数据库, 具备完整的电网模型, 并具有完整的实时数据, 每个节点都可以通过接口获取公共数据库中的信息。客户端和应用服务器通过负载均衡的分布式数据并行访问方式从数据节点或者通过公共数据库接口获取数据。

为了完成网络拓扑计算基于区域的数据并行处理, 需要在实时数据库添加两个表, 分别为服务器任务分配表和区域信息表。

服务器任务分配表的内容主要包括:

- (1) 服务器编号;
- (2) 服务器名称;
- (3) 服务器需要负责的区域;
- (4) 服务器正在负责的区域;
- (5) 服务器是否工作正常;
- (6) 如果服务器出现过故障, 服务器的状态由故障恢复为正常的具体时间。

区域信息表的内容主要包括:

- (1) 区域编号;
- (2) 区域名称;
- (3) 按照优先级顺序排列的适合处理该区域的服务器;
- (4) 该区域在实时数据库最后更新的时间。

按照数据库中服务器任务分配表中的信息, 分配各台服务器初始状态所应承担的工作内容。这些服务器中的本地数据库都按照服务器任务分配表下载了多个地区的数据, 虽然某些区域的数据暂时不会用到, 只有在其他同等地位的服务器出现故障, 工作任务转移时, 这些目前冗余的信息才会被利用, 接替出现故障服务器上的工作内容, 为此各台服务器都会从消息总线接收这些区域的前置消息。图 2 为基于区域的数据并行处理模型。

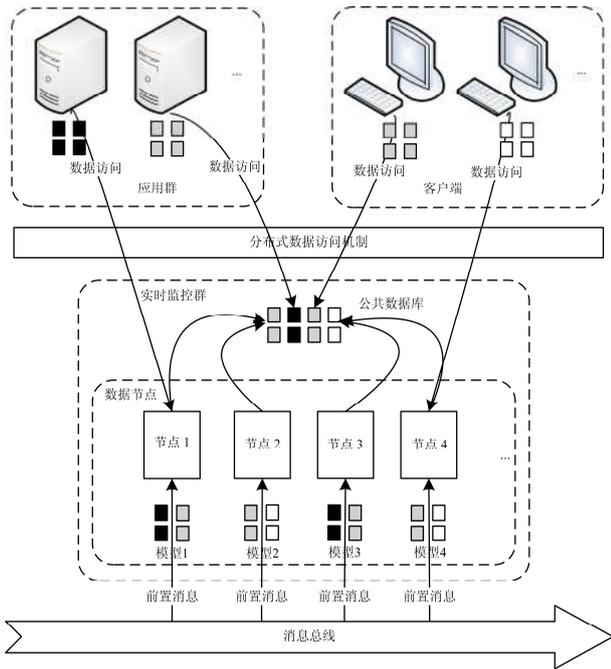


图 2 基于区域的数据并行处理模型

Fig. 2 Parallel processing model based on regional data

#### 4.2 基于区域的任务动态转移与恢复技术(图 3)

为了确保信息不丢失, 地位均等的服务器中都具备前置消息的缓存机制, 都缓存有足够时间的缓存信息。因为是通过心跳的方式判断服务器是否正常工作, 并且心跳间隔一般很短, 以秒为单位, 所以缓存机制设置缓存由许多缓存间隔组成, 缓存内存储的消息也以秒为单位, 即每个缓存间隔存有 1s 的信息。如果所有缓存间隔存满, 则最新 1s 的缓存信息存进最老的 1s 缓存间隔中, 依次循环, 最新的数据替换最老的数据, 保证有足够的缓存量。目前设定缓存间隔缓存有两段心跳间隔时间的信息量。

如果某一台服务器停止运行或是出现网络中断等状况时, 首先更新数据库服务器任务分配表, 将这台服务器的状态变为故障状态, 同时其他地位均等的服务器都会收到该服务器出现故障的消息。当

收到消息后, 根据数据库中服务器任务分配表, 查找该服务器所负责的区域, 然后在区域信息表中获取按照优先级顺序排列的适合处理这些区域的服务器。比如优先级顺序如表 1 所示。

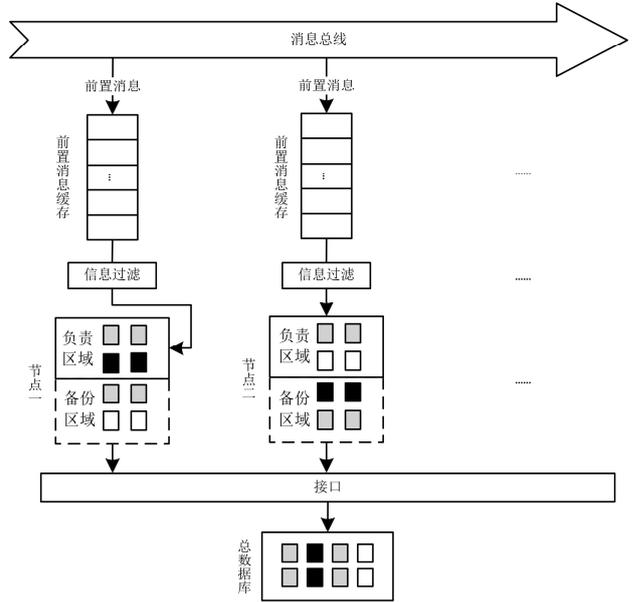


图 3 基于区域的任务动态转移与恢复技术模型

Fig. 3 Model of dynamic transfer and recovery technology based on regional data

表 1 优先级顺序举例

Table 1 Example of priority order

地区名称	1 级服务器	2 级服务器	3 级服务器	...	N 级服务器
$q_1$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	...	$f_N$
$q_2$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	...	$f_1$
$q_3$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	...	$f_2$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$q_n$	$f_{i+1}$	$f_{i+2}$	$f_{i+3}$	...	$f_i$

如果故障服务器负责的工作区域多于一个, 比如数量为  $n$ , 其余还有  $N$  台同等地位正常运行的服务器, 即每一台服务器至少要平均分担  $n/N$  个区域的新的工作内容。具体的分法是这样的, 如果故障服务器负责的第一个区域为  $q_1$ , 在区域信息表中找到  $q_1$  优先级最高的正常运行的服务器  $f_1$ , 则由  $f_1$  负责接管  $q_1$ , 然后第二个区域为  $q_2$ , 找到优先级最高的正常运行的服务器  $f_2$  (除去  $f_1$ ), 由  $f_2$  负责接管  $q_2$ , 直到安排  $f_N$  负责  $q_N$ 。当所有正常服务器都分配过新的区域后, 仍有区域未分配的话, 所有正常的服务器则继续重新分配剩余的区域, 直到  $q_n$  分配完成。在区域任务分配好后, 从数据库中区域信息表, 获取故障服务器负责的每个区域在数据库最后的更

新时间,比如某区域最后更新时间为  $T_1$ ,新的负责该区域的服务器会从其前置消息的缓存中过滤,得到  $T_1$  后面的该区域的信息,对这些内容重新进行利用,完成服务器出现故障后没有完成的各种动作。

如果某台故障服务器恢复正常后,恢复的服务器开始接收总线内的各种消息,而其他同等地位的服务器会收到该服务器恢复正常的通知,当新的 1 s 到来时,接管故障服务器负责区域的服务器会停止这些区域的工作,同时这 1 s 恢复的服务器也开始进行工作,即这些区域的工作内容会恢复到原有的服务器上。恢复正常的服务器从数据库中的区域信息表获取自己负责区域的各个最后更新的时间,比如某区域最后更新时间为  $T_2$ ,从前置消息缓存中过滤,得到  $T_2$  后面的该区域的信息,对这些内容重新进行利用,完成服务器恢复后工作内容切换时没有完成的各种动作。

## 5 仿真验证

本文采用某地区设备信息进行网络拓扑着色计算的仿真,根据设备元件数量分为三组进行仿真。第一组设备元件总数为 3 169 个,其中断路器 564 个,刀闸 995 个,母线 74 条;第二组设备元件总数为 13 459 个,其中断路器 2 166 个,刀闸 3 992 个,母线 302 条;第三组设备元件总数为 25 762 个,其中断路器 4 594 个,刀闸 8 028 个,母线 610 条。如表 2 和表 3 所示,表 2 为三组都分成两块进行并行计算仿真的结果,表 3 为第三组数据分成不同数量的块数进行并行计算仿真的结果。

表 2 不同的设备元件数量之间进行比较

组号	原来周期计算	原来开关变化	改进周期计算	改进开关变化
	耗时/ms	计算耗时/ms	耗时/ms	计算耗时/ms
1	902	328	742	166
2	4 286	1 418	3 170	388
3	9 036	3 378	6 478	612

表 3 不同的分块数量之间进行比较

分块数量	原来周期计算耗时/ms	改进周期计算耗时/ms
2	9 036	6 478
3	9 036	5 078

通过仿真结果可以看到,当电网设备元件数越多,无论是周期计算,还是开关变化计算,改进后减少的耗时时间都越多;当分块数量在一定范围内越多,改进后耗时的时间越少。证明了研究成果提高了拓扑计算和程序运行的效率。

## 6 结论

本文对分布式并行网络拓扑计算关键技术进行了研究。首先改造原有的网络拓扑计算程序,使其变成多线程并行处理的结构,提高单机运行的效率;其次进行基于区域的数据并行处理,将大规模的电网模型分割成多个小规模局部区域模型;然后研究基于区域的任务动态转移与恢复技术;最后研究网络拓扑分析的算法,采用改进的邻接矩阵法解决全局拓扑,采用改进的树状搜索法解决局部拓扑开关的变化。采用分布式并行的网络拓扑计算,可以进一步地提高网络拓扑计算的可扩展性、运行可靠性和处理效率。

## 参考文献

- [1] 张百舸,姚学武,田丽华. 网络拓扑着色的矩阵方法及其在电力系统中的应用[J]. 供用电, 2005, 22(4): 23-25.  
ZHANG Baige, YAO Xuewu, TIAN Lihua. Matrix transform method of network topology coloring and its application in power system[J]. Distribution & Utilization, 2005, 22(4): 23-25.
- [2] WANG Jian, WANG Wei. SVG/Ajax based power network topology dynamic coloring system[C] // China's Ministry of education, the 2009 National Symposium on Doctoral Students in China: the Power Station Automation, November 1, 2009, Beijing, China.
- [3] 童开蒙,杨镜非. 电力系统分块网络拓扑法的建模分析[J]. 电气自动化, 2014(3): 67-70.  
TONG Kaimeng, YANG Jingfei. An analysis on the modeling of partitioned network topology in a power system[J]. Electrical Automation, 2014(3): 67-70.
- [4] 张晋芳,王增平,张亚刚,等. 基于虚拟阻抗的厂站内拓扑分析新方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(2): 187-194.  
ZHANG Jinfang, WANG Zengping, ZHANG Yagang, et al. A novel method of substation configuration based on virtual impedance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(2): 187-194.
- [5] 王增平,张晋芳,张亚刚. 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): 137-145.  
WANG Zengping, ZHANG Jinfang, ZHANG Yagang. A novel substation configuration identification algorithm based on the set of breaker-path functions[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 137-145.
- [6] 高元生,陈强,熊小伏,等. 基于相邻线路拓扑关系的距离保护测量回路隐藏故障诊断方法[J]. 电力系统保

- 护与控制, 2015, 43(14): 22-29.  
GAO Yuansheng, CHEN Qiang, XIONG Xiaofu, et al. The adjacent line topological distance protection measurement circuit hidden fault diagnosis method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 22-29.
- [7] 郝文斌, 夏春, 王彪, 等. 一种基于图论搜索的限制短路电流分区方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 38-44.  
HAO Wenbin, XIA Chun, WANG Biao, et al. A short-circuit current limiting partitioning method based on graph theory search[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 38-44.
- [8] 欧阳圣, 胡望宇. 几种经典搜索算法研究与应用[J]. 计算机系统应用, 2011, 20(5): 243-247.  
OUYANG Sheng, HU Wangyu. Research and application of several classical search algorithms[J]. Computer Systems & Applications, 2011, 20(5): 243-247.
- [9] 王惠中, 朱宏毅, 张荧, 等. 稀疏矩阵在电网网络拓扑分析中的应用与研究[J]. 电网与清洁能源, 2014, 29(12): 1-4.  
WANG Huizhong, ZHU Hongyi, ZHANG Ying, et al. Application and research in sparse matrix grid network topology analysis[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 29(12): 1-4.
- [10] 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. Topological analysis of the network based on the adjacency matrix quasi flat method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 17-21.
- [11] 姚玉斌, 宣俭, 于娜, 等. 连通矩阵准平方法网络拓扑分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 31-34.  
YAO Yubin, XUAN Jian, YU Na, et al. Determination of network topology by quasi-square of the connectivity matrix[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 31-34.
- [12] 于娜. 矩阵法网络拓扑分析的实用化研究和设计[D]. 大连: 大连海事大学, 2011.
- [13] 杨冬锋, 周苏荃, 刘隽, 等. 基于关联矩阵化简的电网拓扑辨识新方法[J]. 华东电力, 2014, 42(11): 2254-2259.  
YANG Dongfeng, ZHOU Suquan, LIU Jun, et al. A novel method for power grid topology identification based on incidence matrix simplification[J]. East China Electric Power, 2014, 42(11): 2254-2259.
- [14] 李盟, 秦立军, 郭庆, 等. 基于CIM模型的电网拓扑分析[J]. 电力科学与工程, 2011, 27(9): 18-22.  
LI Meng, QIN Lijun, GUO Qing, et al. Analysis of power network topology based on CIM model[J]. Electric Power Science and Engineering, 2011, 27(9): 18-22.
- [15] 王明鸣, 孟相如, 李纪真, 等. 基于着色树优化的网络并发链路故障快速恢复方法[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(6): 1822-1825.  
WANG Mingming, MENG Xiangru, LI Jizhen, et al. Fast recovery method for network concurrent link failures based on optimization of colored trees[J]. Application Research of Computers, 2015, 32(6): 1822-1825.
- [16] 毕天姝, 焦连伟, 严正, 等. 用于分布式故障诊断系统的新型网络分割法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(16): 16-21.  
BI Tianshu, JIAO Lianwei, YAN Zheng, et al. Graph partitioning method for distributed fault section estimation system in power networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(16): 16-21.
- [17] 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 stable network topology monitoring distributed dispatching automation system based on divide and conquer[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 101-107.
- [18] 孙名扬, 高原, 严亚勤, 等. 智能电网调度控制系统集群化技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 31-35.  
SUN Mingyang, GAO Yuan, YAN Yaqin, et al. Clustering technology for smart grid dispatching and control systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 31-35.
- [19] 曹智平, 周力行, 张艳萍, 等. 基于供电可靠性的微电网规划[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 10-15.  
CAO Zhiping, ZHOU Lihang, ZHANG Yanping, et al. The reliability of micro grid planning[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 10-15.

收稿日期: 2016-02-02; 修回日期: 2016-04-15

作者简介:

王健(1966-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化; E-mail: wangj@cc.sgcc.com.cn

陈威(1988-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 初级工程师, 主要研究方向为电网调度自动化系统研发; E-mail: chenweitommy@126.com

汤卫东(1972-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化。E-mail: tangwd@cc.sgcc.com.cn

(编辑 姜新丽)