

# 一种基于孤岛搜索的电力系统拓扑分层识别方法

唐 伦<sup>1</sup> 史华勃<sup>1</sup> 袁 川<sup>2</sup> 丁理杰<sup>1</sup> 周 波<sup>1</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司 四川 成都 610041)

**摘要:** 电力系统拓扑自动识别是电磁暂态自动建模的重要基础。针对现有拓扑识别方法大多局限于单层拓扑描述的不足,结合电磁暂态自动建模进行厂站模块化封装的实际需求,提出一种基于孤岛搜索的电力系统拓扑分层识别算法,实现了基于电网主流仿真数据的“站间拓扑+站内拓扑”自动分层识别。首先给出了算法原理及实现细节,然后利用 CEPRI 36 节点算例及某实际省级主网数据对算法进行测试,验证了算法的正确性及有效性。研究表明,该算法可直接应用于省级复杂电力系统的拓扑自动生成及可视化建模工作。

**关键词:** 电力系统拓扑; 分层识别; 孤岛搜索; 可视化建模

中图分类号: TM713 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)02-0018-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.02.005

## Hierarchical Identification Method for Power System Topology Based on Islanding Search

Tang Lun<sup>1</sup>, Shi Huabo<sup>1</sup>, Yuan Chuan<sup>2</sup>, Ding Lijie<sup>1</sup>, Zhou Bo<sup>1</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** Automatic identification of power system topology is an important foundation for automatic electromagnetic transient modeling. Traditional algorithms for power system topology identification are limited to single tier description, which cannot meet the demands of modular modeling. Therefore, a new hierarchical identification method for power system topology based on islanding search is proposed. This method provides an approach for automatic hierarchical identification of "inter-station topology + in-station topology" based on mainstream simulation data for power system analysis. The algorithm principle and details are given firstly, and then the algorithm is tested on CEPRI 36 nodes system using an actual grid simulation data of a certain province, which proves to be correct and effective. The proposed algorithm can be used directly in automatic topology generation and visual modeling of complex power system in province scale.

**Key words:** power system topology; hierarchical identification; islanding search; visual modeling

## 0 引 言

电力系统拓扑自动识别是电力系统拓扑自动布局、自动可视化建模等工作的重要基础,也是机电-电磁暂态仿真数据自动转换的关键技术之一。相关文献<sup>[1-6]</sup>从不同的应用层面与角度对电力系统拓扑识别方法进行了深入的研究,现有方法主要包括图论搜索法、邻接矩阵法与两者的结合算法。文献[1]提出一种新的 LU 矩阵分解算法。然而这些方法均是根据隐含电网全拓扑信息的邻接矩阵或节点-支路关联矩阵直接进行拓扑分析,并未区分站内

拓扑和站间拓扑,不能满足电磁暂态模块化建模的需求。而目前国内实际电网维护的主流仿真数据(如 PSASP、BPA、PSDB 数据等)中,为模拟变电站内部接线(如 3/2 接线、双母线接线、三绕组变压器等)往往存在数量庞大的短接线及站内节点,这使得数据节点规模急剧增大。一个中等规模的省级主网(220 kV 及以上)节点数可达 1 500~2 000 个。若直接进行拓扑识别,将使得拓扑结构复杂交织,难以清晰布局,且无法区分站间连接和站内连接。在进行机电-电磁暂态仿真数据自动转化时,也无法利用主流电磁暂态仿真软件(PSCAD/EMTDC、EMTP、HYPERSIM 等)的模块化建模功能,极大影响计算和

分析速度。

针对上述问题,提出一种电力系统拓扑分层识别的方法,基于电网潮流基础数据,自动进行数据文件的解构分析,并利用图论搜索的方法,将全网节点自动聚类为若干厂站站点,进而分层次给出厂站站点之间和站内元件之间的拓扑连接关系。下面首先给出一种基于图论的孤岛搜索方法,在此基础上提出基于孤岛搜索的电力系统拓扑分层识别方法,最后分别用36节点系统和某省实际电网数据对所提算法进行测试和分析。

## 1 基于图论的孤岛搜索方法

基于图论的孤岛搜索方法是所提算法的核心模块,先以图1的简单图例说明该方法。

如图1(a)所示,图GA是1个具有8个节点、7条支路的连通图,若移走其中支路(2)和支路(3),如图1(b)所示,原图将解列成3个互不相通的独立部分,即形成3个孤岛,称其为图GB。

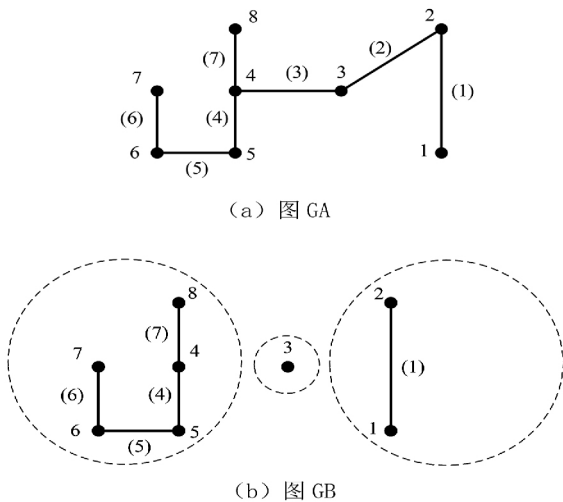


图1 简单图形成孤岛示意

对图GB中的节点进行遍历搜索,即可获得每个孤岛所包含的节点成员。图GB的邻接矩阵B如下所示:

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ 1 & 0 & 1 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 8 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

根据邻接矩阵B,从节点1开始,依次遍历搜索每一个节点至图中其他7个节点全部可能的连通路经。搜索步骤如下:

- 1) 初始待搜索节点表置为{1 2 3 4 5 6 7 8}。
- 2) 对节点1进行遍历搜索。搜索发现节点1仅通过路径“1-2”与图内其他节点连通,故路径中相异节点{1 2}构成孤岛1。
- 3) 待搜索节点表中删除孤岛1的成员节点,更新为{3 4 5 6 7 8}。
- 4) 对节点3进行遍历搜索。搜索发现节点3不与图内其他任意节点连通,为孤立节点,其本身{3}构成孤岛2。

5) 待搜索节点表中继续删除孤岛2的成员节点,更新为{4 5 6 7 8}。

6) 对节点4进行遍历搜索。搜索发现节点4与图内其他节点之间存在以下4条可能路径“4-5”、“4-5-6”、“4-5-6-7”、“4-8”,由于可能路径上的所有节点均相互连通,故取4条路径上所有相异节点{4 5 6 7 8}构成孤岛3。

7) 待搜索节点表中继续删除孤岛3的成员节点,待搜索节点清空,搜索结束。

可见,对于图1中的简单图GB,通过对节点1、节点3、节点4的遍历搜索,即可生成图中所有孤岛集合的成员信息。对于含任意多孤岛及环网的复杂网络图,节点路径的遍历搜索可用深度优先搜索(depth-first search, DFS)的方法完成,DFS的具体方法实现参见文献[7],此处不再赘述。根据实际电网搜索规模大且孤岛内节点数存在上限的特点,通过对常规DFS算法设置适当的路径长度上限值来限制路径搜索的长度,以避免搜索陷入深度无限,提高搜索效率。

## 2 基于孤岛搜索的拓扑分层识别方法

在第1节基础上,结合实际电网仿真数据特征,给出基于孤岛搜索的拓扑分层识别方法原理及实现细节。

一般地,电网潮流计算数据确定的拓扑本质上是包含了电网所有节点连接关系的单层拓扑结构,称其为全拓扑结构,表征全拓扑结构的支路表称为全拓扑支路表。若忽略潮流方向,全拓扑结构可抽象为一个仅含节点和支路的无向图,其中节点对应

电气母线,支路对应交流线、短接线、变压器、串(并)联电容(抗)器等电气元件。正常情况下,由于潮流在全网中按物理特征自然分布,全拓扑结构的图是连通的。电网拓扑结构的分层识别,即是从全拓扑结构中挖掘信息,实现厂站站点的自动辨识,并在此基础上同时完成厂站站点之间和厂站内部接线两个层次的拓扑识别。

由于实际厂站站点之间一般均通过输电线路相连,故可将输电线路视为站间设备,而短接线及其他电气元件均视为站内设备。若能从全拓扑支路表中筛选出站间支路(输电线路)并将其移除(移除支路、保留节点),则原来连通的拓扑图就变成了若干孤立的子图,这些子图是由单节点或由若干节点-支路构成的孤岛,称其为孤岛结构图。显然,一个孤岛就对应一个厂站站点,其中单节点孤岛对应单母线站点,这类站点是因原始数据未对站内拓扑详细建模而存在;而多节点-支路孤岛对应多母线站点,站点内存在短接线、变压器、低压电抗(容)器等元件连接形成的站内拓扑。

利用第 1 节给出的图论搜索方法对孤岛结构图进行遍历搜索,可搜索出图中所有的孤岛(站点)及每个孤岛(站点)内的成员节点,从而将全拓扑中的所有节点映射到特定的厂站站点,形成节点-站点对应表,实现厂站站点搜索及全拓扑节点聚类;在此基础上,根据节点聚类结果,将全拓扑支路表中的所有节点名替换为站点名并删除两侧站点名相同的支路,即可形成表示站点之间连接关系的邻接矩阵<sup>ex</sup>A,从而完成站间拓扑识别。

对于站内拓扑,由于站内元件种类较多,要完整描述站内接线,除需给出节点之间的连接关系以外,还需判别每条支路代表的元件类型,故需要利用拓扑搜索及支路类型解析形成含支路类型的邻接矩阵<sup>in</sup>A,以此对站内拓扑进行完整描述。

以上是算法的核心思想,下面从潮流数据解构分析、厂站站点搜索及站间拓扑识别、厂站站内拓扑识别与描述 3 个方面给出算法的具体实现步骤。

### 2.1 潮流数据的解构分析

潮流数据的解构分析是所提算法的基础,其目的是从仿真数据中得到全拓扑支路表,并根据支路特征信息(如支路阻抗)判别每条支路的元件属性。实际仿真数据中,为方便数据管理,全拓扑信息往往

分散在不同的数据表中。以电力系统仿真综合程序(PSASP Version 7.21)为例,要构造基于潮流的全拓扑支路表,需拼合潮流数据中的“交流线数据表”“变压器数据表”“直流线数据表”等数据表的节点-支路关联信息。如图 2 所示,取上述 3 个数据表中支路的有效标志(Valid)、i 侧节点名(iNode)、j 侧节点名(jNode)、支路编号(brnNum),即可构造完整的全拓扑支路表,若在支路表中增加关键词“支路类型(Type)”,即形成带类型标记的全拓扑支路表。

	Type	Valid	iNode	jNode	brnNum
交流线数据表	Acline				
	Cmp				
	.....				
变压器数据表	Tw2				
	Tw3				
	.....				
直流线数据表	Dcline				
	.....				

图 2 带类型标记的全拓扑支路表结构

标记全拓扑支路表中每条支路的类型可通过对原始数据表的解构来实现。直流线数据表中仅含直流输电线路,其中的支路可全部标记为直流线(Dcline);变压器数据表中含有两绕组变压器支路和三绕组变压器支路两类,可根据同一变压器的支路数来标记两绕组变压器支路(Tw2)和三绕组变压器支路(Tw3);而交流线数据表则可能含交流输电线、短接线、高压并联电抗器、高压并联电容器(换流站交流滤波器)、低压并联电容器、低压并联电抗器、高压串联电容器(串补)、高压串联电抗器(串抗)等多种元件,需充分利用基础数据不同元件的建模特点及支路特征信息,对数据表进行解构。仍以 PSASP 数据为例,给出一组交流线数据表解构原则:

- 1) 若  $iNode = jNode$ , 则初步判定为并联补偿装置,可进一步根据阻抗值的正负及关联母线电压等级来判定其是容性还是感性,是高压还是低压;
- 2) 若  $iNode \neq jNode$ , 则初步判定为交流输电线路或串联电容、串联电抗器,可通过线路阻抗参数的大小和正负来做进一步判断。

通过潮流数据的解构分析获得的带类型标记的全拓扑支路表,是后续站点搜索及拓扑识别的重要结构。根据该表,易得描述全拓扑结构的邻接矩阵<sup>all</sup>A。

### 2.2 厂站站点搜索及站间拓扑识别

如图 3 所示,从带类型标记的全拓扑支路表中删除所有交流输电线路及直流输电线路支路(站间设备),即得到孤岛支路表。

	Type	Valid	iNode	jNode	brnNum
交流线 数据表	AcLine				
	Cmp				
	.....				
变压器 数据表	Tw2				
	Tw3				
	.....				
直流线 数据表	DcLine				
	.....				

图 3 由全拓扑支路表构造孤岛支路表

孤岛支路表去除了拓扑中的站间联系,仅保留多母线站点的站内节点和支路,可根据孤岛支路表形成邻接矩阵,利用图论搜索算法求取图中孤岛,从而获得多母线站点内部节点。如站点内部存在发电机节点,则站点判定为发电厂,否则为变电站。而由于删除站间支路的同时也删除了支路两端的节点,孤岛结构图中的孤立节点也随之删除,因此单母线站点需另行给出。显然,在全拓扑支路表中存在而在孤岛支路表中不存在的节点,即为单母线站点。

Station	baseV	Type	sNum	NodesContained
SA500 kV站	525	变电站	1	SA500-1, SA500-1B, SA66-1
GenA 电厂	230	发电厂	2	GenA1#, GenA2#, GenA230
.....	.....	.....	.....	.....

(a) 站点信息表

原始节点名	对应站点名
Node	Station
SA500-1	SA 500kV站
SA500-1B	SA 500kV站
SA66-1	SA 500kV站
.....	.....

(b) 节点 - 站点对应表

图 4 站点信息表及节点 - 站点对应表

完成所有站点信息的搜索后,根据特定规则对站点进行自动命名,即可形成如图 4(a) 所示的站点信息表和图 4(b) 所示的节点 - 站点对应表。其中,站点信息表给出了所有站点的站点名、最高电压等级、站点类型、站点编号及站内节点;节点 - 站点对应表给出了每一个原始节点与站点的映射关系。

查询节点 - 站点对应表,将全拓扑支路表中所有节点名替换为站点名,并删除两侧站点名相同的支路,即可形成站间拓扑支路表,根据站间拓扑支路表可直接获得表示站点之间连接关系的邻接矩阵<sup>ex</sup>A。

$${}^{ex}\alpha_{ij} = \begin{cases} n & i \in j \\ 0 & i \notin j \end{cases} \quad (1)$$

式中: $n$  为节点  $i$  与节点  $j$  相连线路的回数; $i \in j$  表示节点  $i$  与节点  $j$  相连; $i \notin j$  表示节点  $i$  与节点  $j$  不相连。

### 2.3 厂站站内拓扑识别与描述

厂站站点搜索可给出每个站点内部的成员节点,而站内元件类型及其连接拓扑需要通过站内拓扑识别获得。带标记的全拓扑支路表中已经给出每条支路的元件类型,对于多母线站点,直接从全拓扑支路表中筛选出两侧节点均为站内节点的支路,即可形成带标记的站内拓扑支路表。若需简化短接线,则将需简化的短接线删除,同时支路表中出现的短接线节点用与其相连的主母线节点替换。

另外,发电机和负荷也是站内拓扑的一部分,由于其均挂接在节点上,故站内拓扑识别还需遍历查询站内节点是否在发电机数据表和负荷数据表中存在,以判断站内是否存在发电机和负荷元件。

根据带标记的站内支路子表及发电机和负荷查询结果,可形成包含元件类别和回数的站内节点间的邻接矩阵<sup>in</sup>A,矩阵的非对角元素表征节点间支路回数及支路类别:

$${}^{in}\alpha_{ij} = \begin{cases} n \times 10^3 + k & i \in j \\ 0 & i \notin j \end{cases} \quad (2)$$

式中  $k = 1 \sim 10$ , 分别对应短接线支路、两绕组变压器支路、三绕组变压器支路、交流输电线支路、串联电容器支路、串联电抗器支路、并联高压电抗器支路、并联高压电容器支路、并联低压电抗器支路、并联高压电抗器支路。

矩阵的对角元素表征发电机或等效负荷挂接情况及个数。

$${}^{in}\alpha_{ii} = \begin{cases} -m & i \in \text{Gen} \\ m & i \in \text{Load} \\ 0 & i \notin \text{Gen} \ \& \ i \notin \text{Load} \end{cases} \quad (3)$$

式中  $m$  为挂接在节点  $i$  上的发电机或等效负荷个数。若母线挂接发电机,则相应对角元素为负,若挂接负荷,则反之。

### 2.4 算法流程图

所提算法的总体流程如图 5 所示。

## 3 算例分析

### 3.1 36 节点测试系统算例

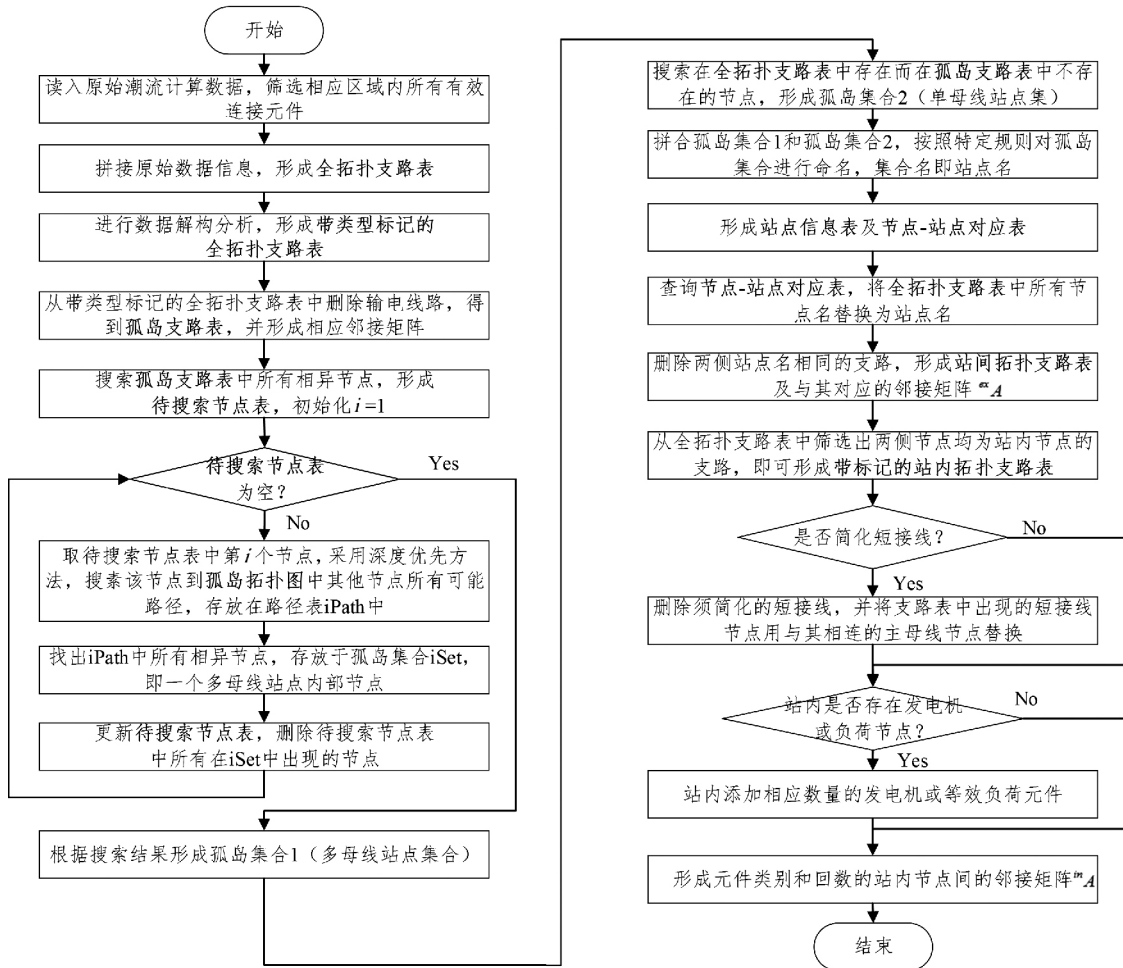


图 5 基于孤岛搜索的电力系统分层识别算法流程

采用中国电科院 CEPRI 36 节点系统对所提算法进行测试。算例单线图(即单层拓扑结构)如图 6 所示。

由图 6 可知,该系统共有 36 个节点,其中发电机节点 8 个,负荷节点 10 个,联络节点 18 个;节点间支路 43 条,其中交流输电线 18 条,短接线 8 条,变压器支路 16 条,直流输电线 1 条。此外,系统中配置有 6 个并联补偿装置。

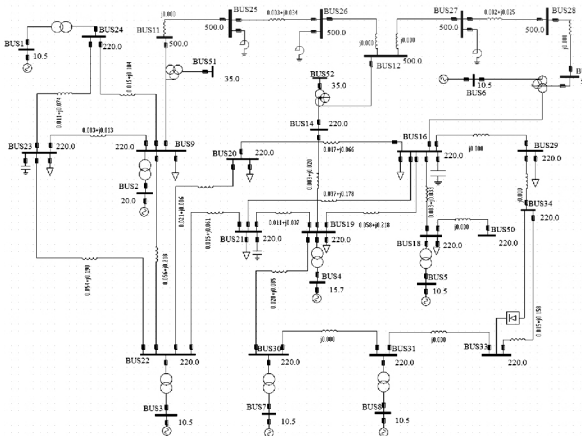


图 6 CEPRI 36 节点测试系统单线图

利用所提分算法对源数据进行搜索分析,可将 36 节点聚类到 11 个厂站站点,搜索出的站间拓扑结构如图 7 所示。

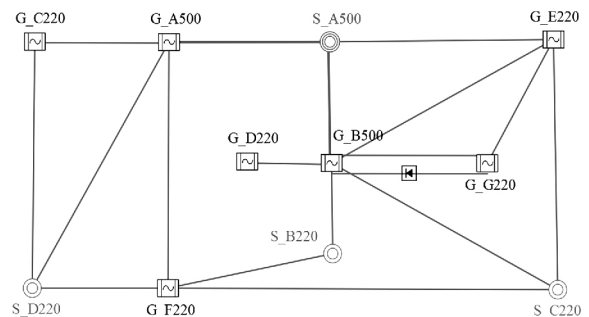


图 7 所提算法得出的厂站站间拓扑图

由站点信息表可知,该测试系统含 3 个单母线站点,其余 8 个均为多母线站点,其中站内母线最多的为站点 G\_B500。根据搜索结果可知,该站点为 1 个发电厂,站内含有的 7 个节点,其内部接线如图 8 所示。将分层拓扑图 7、图 8 与原始拓扑图 6 进行对比,容易验证算法结果的正确性。

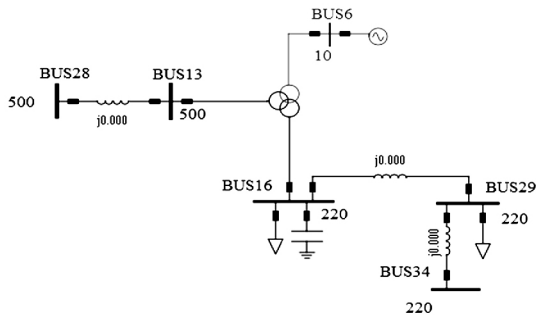


图 8 所提算法得出的站点 G\_B500 站点站内拓扑图

### 3.2 某实际省级主网算例

为测试算法的通用性,将所提算法应用于某实际省级电网。该省级电网数据为 PASAP 格式,涵盖全省 220 kV 及以上电压等级的电网模型。取丰大典型潮流方式,原始数据共有 2 867 个有效节点,其中含发电机节点 529 个,等效负荷节点 322 个;全拓扑支路 4 342 条,其中交流线支路(含交流输电线、短接线等) 2 105 条,变压器支路 2 237 条。

利用所提算法可快速搜索出站点信息表,经过拓扑分层识别,可将原 2 867 个节点聚类至 533 个站点,其中 500 kV 变电站 52 座、上网电厂 27 座,220 kV 变电站 286 座、上网电厂 168 座,如表 1 所示。

表 1 某实际省级电网数据站点搜索结果

	变电站数量	发电厂数量
500 kV	52	27
220 kV	286	168

同样,由搜索出的站点信息表可获知每个站点内部的成员节点,统计每个站点内的成员节点数,可做出如图 9 所示的站内节点数分布图。

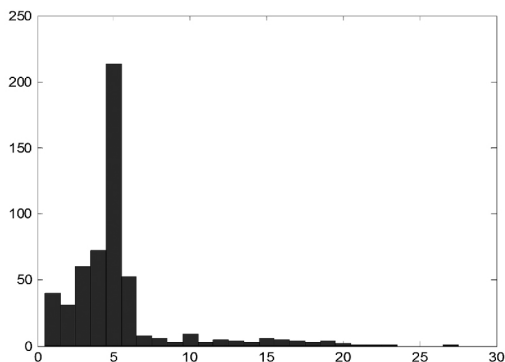


图 9 某实际省级主网仿真数据中站内节点数分布

由图 9 可知,该省电网仿真数据中,站内节点数大多分布在 5~20 之间,节点数最多的站点内部节点数多达 27 个。在基于该仿真数据进行电磁暂态自动建模时,采取所提分层拓扑识别方法可将上层

拓扑极大简化,从而避免传统单层拓扑识别造成布局错综交织的弊端。测试说明,所提算法处理实际省级规模电网数据可取得较好效果。

## 4 结 语

从电力系统自动拓扑生成及可视化建模等实际需求出发,针对现有拓扑识别方法不能区分站内拓扑和站间拓扑的不足,提出一种基于孤岛搜索的电力系统拓扑分层识别算法,实现了基于现有仿真数据自动进行“站间拓扑+站内拓扑”的分层识别工作。利用 CEPRI 36 节点算例及某实际省级主网数据对算法进行了测试,结果验证了所提算法的正确性及有效性。所提算法可直接应用于省级复杂电力系统的拓扑自动生成及可视化建模工作。

### 参考文献

- [1] 刘鲁锋,付立军. 电力系统拓扑分析的 LU 矩阵分解算法[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2869-2874.
- [2] 沈伟,吴文传,张伯明,等. 能量管理系统中电网潮流单线图自动生成算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(6): 48-52.
- [3] 章坚民,王云,谷炜,等. 调度大屏输电电网潮流图自动生成(一)自动布局[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24): 43-48.
- [4] 廖凡钦,刘东,闫红漫,等. 基于拓扑分层的配电网电气接线图自动生成算法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 174-180.
- [5] 章坚民,叶义,陈立跃. 基于新型力导算法的省级输电电网均匀接线图自动布局[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 107-112.
- [6] 赵冬梅,龚群,张旭. 基于组合图元的输电电网单线图自动布局方法[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2979-2984.
- [7] 陶华,杨震,张民,等. 基于深度优先搜索算法的电力系统生成树的实现方法[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 120-124.

### 作者简介:

唐 伦(1988), 硕士,主要从事电力系统分析研究;

史华勃(1987), 硕士、工程师,主要从事电力系统仿真分析研究;

袁 川(1980), 高级工程师,从事电网规划工作。

(收稿日期: 2017-11-15)