

利用社区挖掘的快速无功电压分区方法

魏震波¹, 刘俊勇¹, 程飞², 宋秋池¹, 邓继宇¹, 程向辉¹

(1. 四川大学电气信息学院, 四川省 成都市 610065;

2. 四川省电力公司超(特)高压运行检修公司, 四川省 成都市 610041)

Fast Power Network Partitioning Method in Mvar Control Space Based on Community Mining

WEI Zhenbo¹, LIU Junyong¹, CHENG Fei², SONG Qiuchi¹, DENG Jiyu¹, CHENG Xianghui¹

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China;

2. EHV/UHV Operation and Maintenance Company, Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: According to the strongly area-decoupled characteristic of reactive power networks, using the community mining method of complex networks theory, that is discovering the assemble characteristics of complex networks, a fast power network partition method in reactive power control space based on complex networks theory was proposed. Firstly, through an analysis of the physical and operational characters of power networks, and combining with the correlative definitions in complex networks theory, a topological model of the reactive power networks was designed. Then, based on the community mining the reactive topological model was divided, and the comparative analysis was carried out. Results of a few numerical examples show that there are similar outcomes between the community mining which combining the physical and operational characters of power networks and the other reactive power partitioning methods. And meanwhile it is verified that the proposed model is reasonable. Besides, the algorithm is simple and fast, and can be applied to complex power networks and engineering calculations.

KEY WORDS: power grid; complex networks theory; reactive power networks partitioning; community networks mining

摘要: 针对电力系统无功网络具有强区域解耦性的特点, 利用复杂网络理论中的社区网络挖掘方法, 即发现复杂网络中的抱团特性, 提出了一种电网无功快速分区方法。首先, 分析了电力网络的物理特性与运行特性, 结合复杂网络理论的相关参数定义, 构建了符合电力网特点的拓扑模型; 然后,

利用社区网络挖掘法对无功拓扑进行了划分, 并将结果与其他分区方法进行了对比分析。算例结果表明: 兼顾了电网物理与运行特性的社区网络分析法与已有无功分区方法有着近似结果, 有一定的合理性, 且计算方法简单快速, 符合复杂电网分析和工程计算需求。

关键词: 电力网; 复杂网络理论; 无功分区; 社区网络挖掘

0 引言

无功电压控制作为电网安全稳定运行的重要内容, 一直都是关注焦点。其中, 由法国电力集团公司(Electricity De France, EDF)最早提出的分级电压控制思想与方案^[1]最为成功, 且已在意大利^[2]、比利时^[3]、西班牙^[4]等多国电网中得到了应用。在分级电压控制方案中, 中心思想就是要将电网分成彼此电气距离较远、相互近似解耦的控制区域, 其中电网分区是重点也是难点, 合理有效的分区是实现区域电压控制的根本。如: 文献[5-6]利用电气距离概念, 从电网网架结构出发, 对电网进行了分区; 文献[7]在上述基础上, 提出了向上分级归类算法和基于图论的阈值 α 嵌套分解算法。由于该类算法的电气距离是从电网的网架结构出发的, 忽略了电网中快速的一级调节装置的控制作用, 与实际二级电压控制过程有一定的出入。文献[8]提出了基于Tabu搜索的分区方法, 由于是一种启发式的方法, 对网络的物理特征考虑不足。近年来基于聚类分析的划分方法是研究主流。该类算法^[9-11]大都通过构造无功控制空间, 将无功源和负荷对应到 q 维空间中, 通过计算节点电气距离完成聚类分区。该类算法的缺陷有: 1) 节点坐标及其物理意义描述不清

基金项目: 国家自然科学基金项目(50977059); 四川大学青年教师科研启动基金(2010SCU11004)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50977059); Scientific Research Fund for Young Teachers of Sichuan University (2010SCU11004).

晰^[9-10]；2) 每多考虑一个无功源控制源(如可投切电容、SVC 等)，就需要增加相应聚类空间维数，从而增大计算量^[11]。

电网作为一类典型复杂网络系统，应用复杂网络理论解析电网问题是当前一热点^[12-14]。每类网络都有其自身的特殊性质，如紧密联系的独特现象、自身演化的特定机制等，这些都可以使用网络分析的方法进行研究，因为网络中存在着一些共性^[15]。其中，社区网络挖掘又叫作抱团特性挖掘，它是对复杂网络中广泛存在的抱团特性，通过对节点与边性质的分析，发现网络中的社区结构^[16]。社区网挖掘可以看作将一个复杂的网络划分成若干个子系统的过程。社区网之间相互连接稀疏，当某一社区网发生故障且可能引起网络发生连锁故障时，可通过切断社区间的关键连接来阻止事故蔓延，实现对关键社区的保护；而社区网内部连接非常紧密，可看做一个小的整体。因此，社区网络的研究对实现网络保护、区域控制划分及网络性质研究都有着十分重要的意义。此外，文献[17]将社区网挖掘看作是多个子系统恢复整合的逆过程，应用于电网子系统恢复的划分过程当中。

综上所述：电网中无功网络具有较强的区域解耦特性；而社区网挖掘是发现复杂网络中广泛存在的抱团特性。那么可否通过构建合理的无功拓扑模型，利用网络社区网挖掘方法对无功网络的区域解耦特性进行揭示？或进一步实现无功电压分区呢？本文做出了以下研究：1) 无功网络的物理与运行特性分析；2) 无功网络的有向加权拓扑建模；3) 社区网挖掘及有向加权拓扑模型下的挖掘策略制定；4) IEEE 标准节点系统算例分析及其与其他无功划分方法的对比分析。

1 电网无功网络拓扑建模

首先，借鉴一般拓扑建模方法^[13]对电网进行初始建模。

1) 电网中同时存在着有功网与无功网传输，但两者间仅存在较弱联系，因此，可对网络进行 P 、 Q 分解建模，而在本文中只考虑无功网络。

2) 电网运行状态中物理变量方向直接影响着分析结果，“边”方向的选定十分重要，根据无功潮流的选定参考方向(流出为“+”，流入为“-”)，对各“边”进行有向处理。

3) 无功功率与网络中的感抗、容抗直接相关，且除网络拓扑结构外，节点间的能量传输方式与系统运行方式密切联系，因此，令线路权重系数为

$$\alpha_{ij} = X_{ij} / Q_{ij}(t) \quad (1)$$

式中： X_{ij} 为线路电抗； $Q_{ij}(t)$ 为线路无功潮流。

4) 对于线路中存在的无功损耗问题，采用增加虚拟节点办法进行考虑。全网节点(包括虚拟节点)性质由实时无功传输方向决定。

经过上述处理，电网的有向加权无功拓扑模型构建完成。

2 基于社区网挖掘的电网分区法原理

2.1 社区网挖掘法

社区网挖掘以基于边“介数”的挖掘法最为常用。以一无权无向简单拓扑网络(如图 1 所示)为例进行社区网挖掘说明。选取线路介数 B_L 为挖掘参数，逐步剔除网络拓扑中介数最高的边，如图 1(b)、(c)、(d)所示。当剔除网络介数最高的 3 条边时，原网络被划分为 4 个不同社区，如图 1(b)所示；当剔除 5 条边时，网络被划分为 5 个社区，如图 1(c)所示；当剔除 7 条边时，被划分为 7 个社区，如图 1(d)所示。

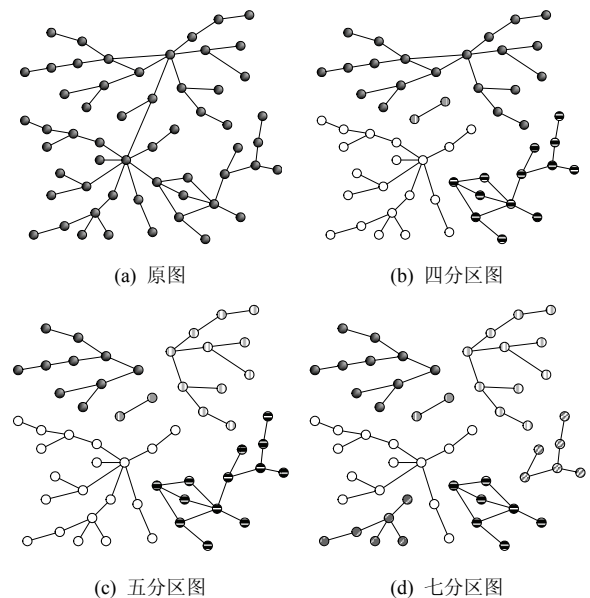


图 1 社区网挖掘示例图

Fig. 1 Graph of community network mining example

在介数法中最短电气路径的选取是关键。过去最短电气路径的选取有以下 2 种方式。

1) 连接 2 节点间边数和最小的路径(复杂网络理论直接应用)。该类方法采用线路归一化处理不符

合电网物理实际,即线路长短、材料等差异影响着输电线路承载能力。

2) 将线路电抗引入拓扑图之后,电能在加权电网拓扑模型中将沿线路电抗值之和最小的路径输送^[14]。该类方法考虑电网的物理特性,但忽略了电网运行方式的不同对线路的实际输电情况的影响。因此,结合复杂网络理论,本文定义最短无功电气路径为:由无功输出节点指向其他无功汲取节点,线路无功潮流方向与指向一致,所经线路权重之和最小的有向加权路径,即

$$\bar{L}_{\text{shortest}}^Q \in \min \sum_{i \in \bar{L}} \alpha_i \quad (2)$$

式中: α_i 为线路 \bar{l} 的权重; \bar{L} 为网络两点间的有向电气路径。

2.2 分区原理流程

挖掘策略的选取直接影响着分区数目。由于本文是探索无功拓扑网络社区挖掘与无功电压分区间的内在关系。在实际电网中存在着多种无功源,如同步发电机、调相机、可投切电容以及柔性交流输电系统(flexible AC transmission systems, FACTS)装置等,为了保证所划分区都具有无功调控能力,因而在划分过程中,当分区中出现孤立无功源或无无功源时,应停止划分。具体划分流程如图2所示。

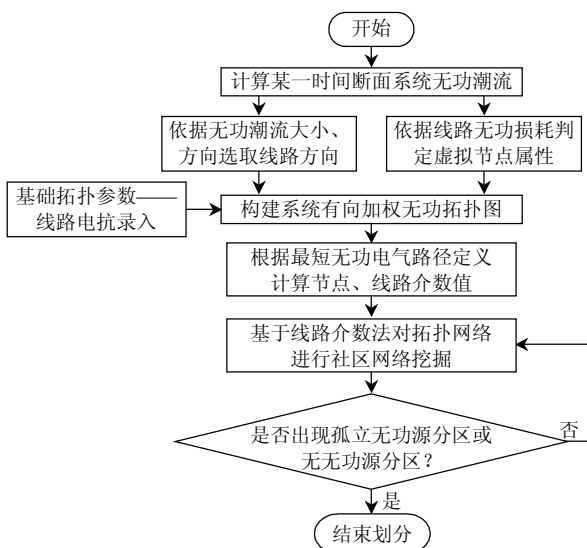


图2 分区原理流程图

Fig. 2 Basic flow chart of partitioning

3 算例分析

3.1 IEEE 43 节点系统算例

以 IEEE 43 标准节点系统为例,在 BPA 中计算

某一静态时间断面无功潮流,系统不含无功受控、可投切电容电抗器及自动发电控制单元节点、带负荷调压变压器与理想调相机支路。牛顿-拉夫逊法迭代次数为 5 次,计算结果收敛。除节点安排无功外,系统无功出力由发电机节点承担,即无功源为发电机节点,因此,根据前文中的分区原则,当出现孤立发电机节点或不含有发电机节点分区时,停止划分。

根据文中定义构建有向加权无功拓扑模型,如图3所示。由节点无功负荷的大小与节点无功补偿大小定义节点属性, G' 、 L' 分别表示重新定义后的无功源(无功注入节点)、负荷(无功汲取节点);虚拟节点属性按线路实际无功损耗大小定义。

根据文中对无功最短电气路径的定义计算各支路介数,结果如表1所示。

采用支路介数法对拓扑网络进行社区网挖掘。依次去掉最高介数线路 30-38、29-30、29-23、8-23。此时出现孤立节点 23,考虑到节点 23 位于 8-23-29 串联支路上,从而考虑不计 8-23,即跳过该线路继续划分。此刻最高介数线路为 15-28,当去掉该支路时,出现无源分区{14, 28, 39, 41, 43}。因此,划分路径为 28-30—29-30—23-29,分区图如图4所示。

与文献[18]中对 43 节点系统自动发电控制(automatic generation control, AGC)的控制区划分(3分区如图5所示)对比,可以看出分区结果具有一定的一致性。区别之处在于:文献[18]将区域{8, 9, 10, 11, 16, 17, 23}划入了分区2,将分区3与分区4进行了合并。造成上述差异的关键线路为 5-8、23-29、30-38。其中各自线路承载的无功潮流为-57.8、63.4、-3.1、3.1、-16.2、22.6Mvar。具体分析如下:区域{8, 9, 10, 11, 16, 17, 23}与本文分区1中的其他区域{1, 2, 5, 7, 6, 12, 20, 15, 28, 19, 22, 26, 39, 41, 43, 14}间的无功功率交换,即线路 5-8 中的无功潮流远大于其与分区2间的无功功率交换(即线路 23-29 中的无功潮流),在一定程度上能够表明其与两区域的紧密程度关系,因此,将其划入分区1中是合理的。而对于线路 30-38,分析节点 30。从节点 38 流入节点 30 的无功功率为 22.6Mvar,从节点 32(发电机)流入节点 30 的无功功率为 257Mvar,节点 30 向节点 40 流出 185.2Mvar,向节点 29 流出 21.8 Mvar。明显看出 32 节点的无功输出主要是平衡节点 40、

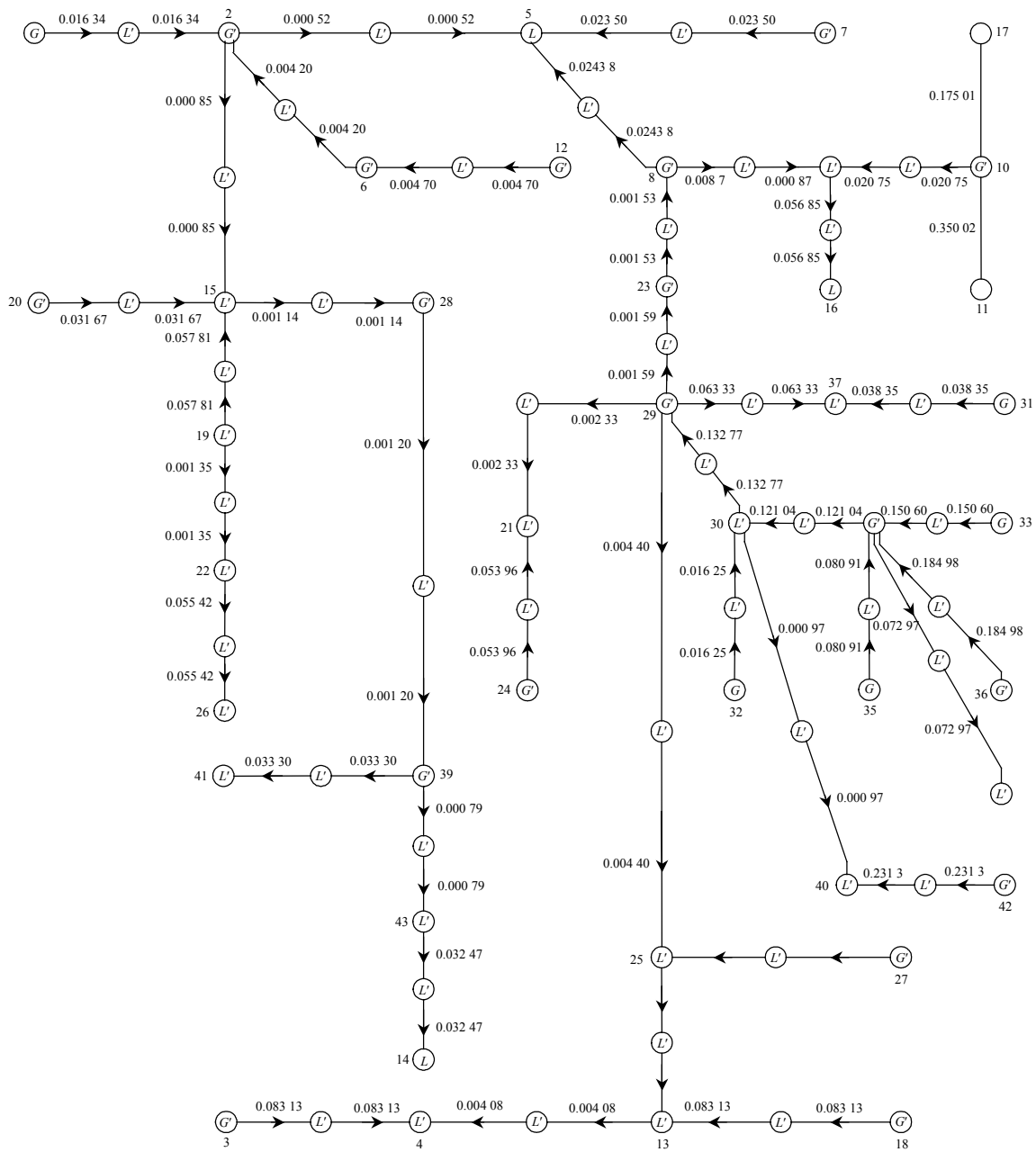


图 3 IEEE 43 节点系统无功加权拓扑图

Fig. 3 Reactive topological graph of IEEE-43 bus power system

表 1 无功拓扑节点、支路介数表

Tab. 1 Betweenness of the reactive networks nodes and lines

节点	B_i	节点	B_i	节点	B_i	节点	B_i	线路	B_{ij}	线路	B_{ij}	线路	B_{ij}	线路	B_{ij}
1	13.0	12	14.0	23	54.0	34	4.0	1-2	12.5	9-10	3.5	21-24	1.5	30-40	7.5
2	48.0	13	24.0	24	2.0	35	42.0	2-5	6.0	9-16	13.5	21-29	9.0	31-37	1.5
3	2.0	14	8.0	25	35.0	36	42.0	2-6	25.0	10-11	0.0	22-26	1.5	33-38	41.5
4	9.0	15	54.0	26	1.0	37	7.0	2-15	38.0	10-17	0.0	23-29	52.5	34-38	6.0
5	13.0	16	9.0	27	6.0	38	164.0	3-4	1.5	13-18	3.5	25-27	5.5	35-38	41.5
6	26.0	17	0.0	28	49.0	39	48.0	4-13	12.0	13-25	24.5	25-29	33.0	36-38	41.5
7	2.0	18	4.0	29	118.0	40	6.0	5-7	1.5	14-43	12.0	28-39	45.5	39-41	12.0
8	48.0	19	14.0	30	165.0	41	8.0	5-8	12.0	15-19	9.5	29-30	112.5	39-43	28.0
9	27.0	20	10.0	31	2.0	42	2.0	6-12	13.5	15-20	9.5	29-37	9.0	40-42	1.5
10	4.0	21	7.0	32	39.0	43	24.0	8-9	28.0	15-28	45.0	30-32	36.0		
11	0.0	22	3.0	33	42.0			8-23	48.0	19-22	3.5	30-38	142.0		

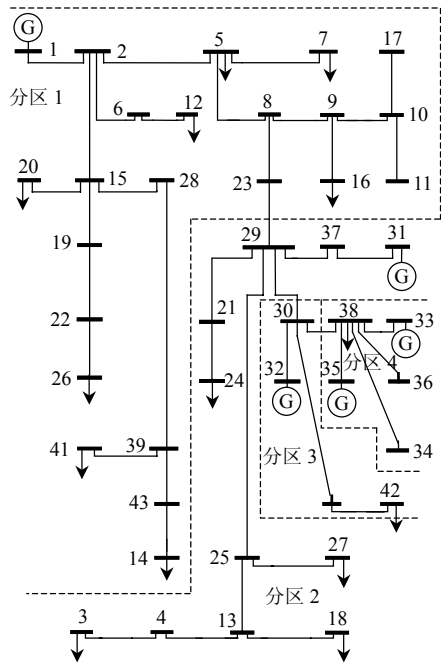


图4 IEEE 43 节点系统的无功分区图
Fig. 4 Sketch map of IEEE 43-bus system with 4-area decomposition in this paper

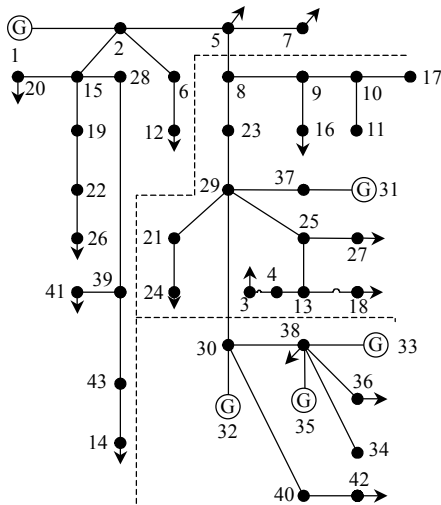


图5 文献[18]中对 IEEE 43 节点系统的无功分区图
Fig. 5 Sketch map of IEEE 43-bus system with 4-area decomposition is Reference [18]

42 的需要。区域 {30, 32, 40, 42} 与外部区域联系的紧密强度相对其内部联系较弱；且该区域含有发电机节点，即含有无功源。因此，将其从区域 {30, 32, 40, 42, 33, 34, 35, 36, 38} 划分出来是可行的，所以，本文形成了对 43 节点系统的 4 区域划分。

3.2 IEEE 39 节点系统算例

采用相同建模和分析方法对 IEEE 39 节点系统进行无功分区，其分区结果与文献[11]的分区结果分别如图 6、7 所示。

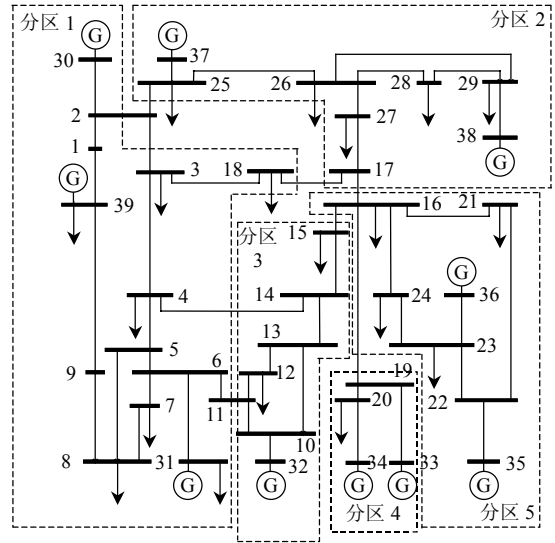


图6 较中对 IEEE 39 节点系统无功分区图
Fig. 6 Sketch map of IEEE 39-bus system with 5-area decomposition in this paper

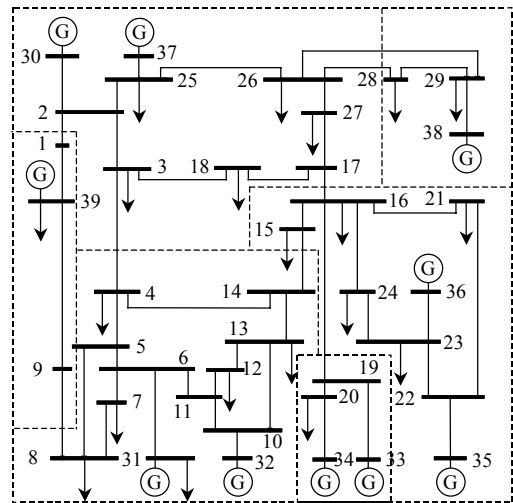


图7 文献[11]中对 IEEE 39 节点系统的无功分区图
Fig. 7 Sketch map of IEEE 39-bus system with 6-area decomposition in Reference [11]

分区结果具有大似相近性，而区别主要集中在由于节点属性差异造成的分区不同。如节点 39 虽为发电机节点，但由于自身负荷大于其出力，对于系统来说其节点性质表现为能量汲取节点(负荷节点)，因而造成文献[11]中出现的分区 {1, 39, 9} 未被独立划分出来。这是为了符合“每个分区内应有足够的电压无功源维持本区域的电压水平”准则。这样的划分也影响了相邻区域的划分，如在文献[11]中出现的分区 {37, 25, 26, 27, 30, 2, 3, 18, 17} 与分区 {4, 14, 5, 13, 6, 12, 7, 11, 10, 8, 31, 32}。从功率交换角度和结构独立性上考虑，未被划分区 {28, 29, 38}

与新划分区 1—3 在满足准则的基础上, 凸显了区域间弱联系及区域内部联系紧密的网络特性。

4 结论

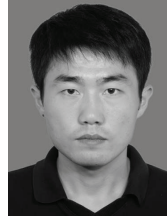
电网无功分区是为了实现对电网无功电压控制的子系统划分, 从无功产生的物理机制上讲, 与系统中各电气元件包括输电线路的自身物理属性及拓扑结构紧密联系, 而社区网络挖掘是为了发现网络中存在抱团属性的网络子区域。两者同是对网络自身物理及结构属性的子系统划分。因此, 本文将两者联系起来, 通过构建符合电网物理及运行特性的拓扑模型, 进行无功拓扑的社区网络挖掘, 并与已有电力系统无功分区方法进行了对比分析。研究表明: 1) 基于社区网络挖掘的电网分区方法与其他无功分区方法有着近似结果, 在一定程度上表明了无功网络的区域解耦性与网络社区抱团特性间的内在联系; 2) 考虑线路材料、长短对线路无功的影响, 构建加权拓扑模型更符合建模需要, 算例结果验证了模型的合理性; 3) 本文所提出的基于复杂网络理论的无功分区方法更符合工程实践的简单、快速和有效的需要, 为电网无功电压分区提供了新思路与参考。

参考文献

- [1] Paul J P, Leost J Y, Tesseron J M. Survey of the secondary voltage control in France: present realization and investigations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1987, 2(2): 505-511.
- [2] Arcidiacono V, Corsi S, Natale A, et al. New developments in the applications of ENEL transmission system automatic voltage and reactive power control[C]// CIGRE, Session, August 1990. Paris, France: CIGRE, 1990: 38/39-06.
- [3] Piret J P, Antoine J P, Stubbe M, et al. The study of a centralized voltage control method application to the belgian system[C]//CIGRE, Session, September 1992. Paris, France: CIGRE, 1992: 39-201.
- [4] Sancha J L, Fernandez J L, Cortes A, et al. Secondary voltage control: analysis, solution and simulation results for the spanish transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(2): 630-638.
- [5] Lagonotte P, Sabonnadiere J C, Leost J C, et al. Structural analysis of the electrical system: application to secondary voltage control in France[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(2): 479-486.
- [6] Lagonotte P. Probabilistic approach of voltage control based on structural aspect of power systems[C]// Proceedings of Third International Conference on Probabilistic Methods Applied to Electric Power Systems. London, UK: Institution of Electrical Engineers, 1991: 208-214.
- [7] 王耀瑜, 张伯明, 孙宏斌, 等. 一种基于专家知识的电力系统电压分级分布式优化控制分区算法[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(3): 221-224.
Wang Yaoyu, Zhang Boming, Sun Hongbin, et al. A expert knowledge based subarea division method for hierarchical and distributed electric power system voltage/VAR optimization and control[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(3): 221-224(in Chinese).
- [8] Mori H, Hayashim T. New parallel tabu search for voltage and reactive power control in power systems[C]// Proceedings of 1998 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Monterey (California), USA: IEEE, 1998: 431-434.
- [9] Han Jiawei, M Kamber. 数据挖掘概念与技术[M]. 范明, 孟小峰. 译. 北京: 机械工业出版社, 2001: 196-220.
Han Jiawei, Kamber M. Data mining concepts and techniques[M]. Fan Ming, Meng Xiaofeng, Translated. Beijing: China Machine Press, 2001: 196-220(in Chinese).
- [10] Quintana V H, Muller N. Partitioning of power networks and applications to security control[J]. IEE Proceedings-C, 1991, 138(6): 535-545.
- [11] 郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 基于无功源控制空间聚类分析的无功电压分区[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 36-40.
Guo Qinglai, Sun Hongbin, Zhang Boming, et al. Power network partitioning based on clustering analysis in mvar control space[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 36-40(in Chinese).
- [12] 柏文洁, 汪秉宏, 周涛. 从复杂网络的观点看大停电事故[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2005, 2(3): 29-37.
Bai Wenjie, Wang Binghong, Zhou Tao. Brief review of blackouts on electric power grids in viewpoint of complex networks[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2005, 2(3): 29-37(in Chinese).
- [13] 曹一家, 王光增, 包哲静, 等. 一种复杂电力网络的时空演化模型[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(1): 1-5.
Cao Yijia, Wang Guangzeng, Bao Zhejing, et al. Temporal and spatial evolvement model of power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(1): 1-5(in Chinese).
- [14] 丁明, 韩平平. 加权拓扑模型下的小世界电网脆弱性评

- 估[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 20-25.
Ding Ming, Han Pingping. Vulnerability assessment to small-world power grid based on weighted topological model[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 20-25(in Chinese).
- [15] 王翼. 复杂网络社区网络结构挖掘及演化分析[D]. 北京: 北京邮电大学, 2009.
Wang Yi. Community spatial and evolution analysis in complex networks[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009(in Chinese).
- [16] Newman M E J. Fast algorithm for detecting community structure in networks[J]. Physic Review E, 2004, 69(6): 1-5.
- [17] 林震智, 文福拴, 周浩. 基于复杂网络社团结构的恢复子系统划分算法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12): 12-16.
Lin Zhenzhi, Wen Fushuan, Zhou Hao. A new algorithm for restoration subsystem division based on community structure of complex network theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 12-16(in Chinese).
- [18] 张永. 含间歇性电源电网中基于分布式模型预测的自动发电控制研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.
Zhang Yong. Studies on distributed model predictive

based AGC in power system with intermittent power generation[D]. Jinan: Shandong University, 2010(in Chinese).



魏震波

收稿日期: 2011-04-22。

作者简介:

魏震波(1978), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统分析及电力市场, weizhenbo1978@yahoo.com.cn;

刘俊勇(1963), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析及电力市场研究;

程飞(1984), 男, 硕士, 助理工程师, 从事电网运行和控制工作;

宋秋池(1980), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析;

邓继宇(1986), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析;

程向辉(1986), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析。

(责任编辑 刘浩芳)