

DOI: 10.7667/PSPC160052

基于谱聚类的无功电压分区和主导节点选择

徐毅非, 蒋文波, 程雪丽

(西华大学电气与电子信息学院, 四川 成都 610039)

摘要: 传统无功电压分区常采用基于潮流运算的聚类算法。该算法计算较复杂, 且难以体现出电网拓扑结构。针对这些问题, 提出一种基于复杂网络理论的谱聚类无功电压分区新算法。该算法首先基于电网的节点导纳矩阵构建无功电压分区模型, 其次利用谱聚类对模型进行分析得到低维度聚类样本, 再应用改进的 K-means 聚类算法获取分区方案。为了确保分区方案的可行性, 基于模块度、无功平衡与无功储备等三个指标建立了一个评价体系, 并对分区方案进行校验。为了提高主导节点选择的准确度, 引入了程度中心性评价指标。通过 IEEE-39 节点标准测试系统对算法进行仿真, 仿真结果验证了算法的可行性与优越性。

关键词: 无功电压分区; 复杂网络理论; 谱聚类; K-means 聚类; 主导节点选择

Partitioning for reactive voltage based on spectral clustering and pilot nodes selection

XU Yifei, JIANG Wenbo, CHENG Xueli

(School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: Traditional partitioning algorithms for reactive voltage are often using clustering algorithm of power flow calculation. These algorithms have some problems, such as complex computation and unable to reflect the network structure of power grid. To figure out those problems, a new algorithm for voltage control partitioning is proposed based on spectral clustering of complex network. First, the model of voltage control partitioning is established using the imaginary part of nodal admittance matrix; second, the algorithm adopts spectral clustering to analyze the model to get the low dimension clustering samples; then power system is partitioned by the improving K-means clustering algorithm. To ensure the credibility of partitioning result, evaluation system with three indexes is established to calibrate the partitioning result, such as modularity, reactive power balance and reactive power reserve, etc. To improve the accuracy of pilot nodes selection, the evaluation index of degree centrality is introduced. The simulation result of IEEE 39-bus testing system shows that the new algorithm is of effectiveness and superiority.

Key words: partitioning for reactive voltage; complex network theory; spectral clustering; K-means algorithm; pilot nodes selection

0 引言

随着电网规模日益增大, 需要进行电压监控的节点也随之增加。为了对电网中节点进行有效监控, 及时检测出局部节点电压失稳的现象, 法国提出了三级电压控制模式, 并已应用在多个国家的电网中^[1]。在三级电压控制模式中, 对电网进行合理的区域划分是其中的关键环节, 同时分区后在每个子区域中选择能够反映此区域电压水平的节点进行监控, 可

有效减小因电网局部电压失稳造成的损失。

目前常见的分区算法大多在得出电网节点的电气距离后, 通过相应的聚类算法进行分区计算^[2-6]。文献[2-4]在得到电气距离后, 将分裂算法和凝聚算法相结合, 以模块度作为评价指标确定最优分区数, 具有很好的实用性; 文献[5]利用无功/电压灵敏度来定义电气距离, 采用凝聚的层次聚类算法先对电源节点进行分区, 实现了分区内电源节点对负荷节点的强耦合控制; 文献[6]首先利用广义 Tellegen 定理求得无功电压灵敏度矩阵, 其次通过向量相似度数学方法定义了新的电气距离, 最后利用模糊聚类理论划分区域。但这些文献采用电网无功对电压变化

的灵敏度矩阵来反映节点之间的电气距离, 计算量较复杂, 且难以体现出电网拓扑结构。

电网可以抽象成一个复杂网络系统, 具有复杂网络的一般特征^[7], 可运用复杂网络理论来进行分析。因此, 文献[8]提出了基于复杂网络理论谱平分法快速电压控制分区新算法, 该算法能快速地解析出电网的社团结构, 降低了计算复杂度。但是, 谱平分法计算效率低, 当复杂网络不对称时, 不能保证得到正确的划分方案。为了解决这些问题, 本文提出基于复杂网络理论的谱聚类无功电压分区新算法, 并通过改进的主导节点选择算法计算出主导节点, 最后在 IEEE-39 节点系统上对此算法进行了仿真验证。

1 电网无功分区及主导节点选择

1.1 基于谱聚类的电网简化模型

在电力系统中, 节点阻抗矩阵中的物理信息能反映节点之间的电气耦合关系, 同时其虚部可以间接反映出无功与电压之间的关联程度, 电网的拓扑结构也可以由节点导纳矩阵很好地反映出来^[7,9]。

基于上述分析, 本文采用带权值的拓扑矩阵来构建电网简化模型, 其权值为节点之间电抗。拓扑矩阵定义为

$$W_{ij} = \begin{cases} w_{ij}, & i, j \text{ 节点相连} \\ 0, & i, j \text{ 节点不相连} \end{cases} \quad (1)$$

式中: w_{ij} 表示节点 i 与节点 j 之间的电抗。

谱聚类中的 Laplace 矩阵可表示为 $L = D - W$, 式中 W 即带权值的简化拓扑矩阵(1), D 为度矩阵, 其定义为

$$D_{ij} = \begin{cases} \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij}, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (2)$$

计算 Laplace 矩阵的特征值与特征向量, 求出除零外最小的 n 个特征值对应的特征向量 (e_1, \dots, e_n) , 得到低维度特征矩阵 $E = [e_1, \dots, e_n]$ 。通过快速的聚类算法对特征矩阵中不同的特征向量进行聚类, 以获取较合理的电压控制分区解。

1.2 改进的 K-means 聚类算法

目前最常用的聚类算法是 K-means 聚类算法^[10]。本文将通过 K-means 聚类算法来分析特征矩阵 E , 从而确定电网可行的分区方案。

K-means 聚类算法的优点是算法简单, 能对数据集进行高效的分类, 但同时该算法也显示出一些不足, 如需要预先确定分区数量 k 的值, 算法采用随机选取聚类中心, 也可能影响聚类的稳定性^[11]。

(1) 为了解决分区数量 k 值需要预先确定的问题, 在电网分区的整体流程中引入模块度作为衡量区域划分质量的指标^[12]。一般情况下, 模块度的值越大, 社团划分质量越高。因此根据模块度值的大小则可确定电力网络中分区数目 k 。

(2) 为了保证聚类的稳定性, 根据算法聚类的原理, 本文将特征矩阵 E 中的数据从大到小排列, 得到 $n \cdot k$ 矩阵 E' 。初始聚类 Nc_{il} 的定义为

$$\begin{cases} Nc_{il} = E'_{|V_i|} \\ V_i = (n/k - 1)/2 + n/k(i-1) \\ i = 1, 2, \dots, n; l = 1, \dots, k \end{cases} \quad (3)$$

式中, $|V_i|$ 表示对 V_i 四舍五入取整。

1.3 分区方案的校验流程

为了确保分区方案的可行性, 需对分区方案的每个区域进行校验。

1.3.1 各区域连通性校验

区域连通性是指同一区域中的两个节点必须直接相连, 即区域内部无孤立节点。如果校验过程中发现分区方案中某个区域内存在孤立节点, 则将此孤立节点划分到该区域。

1.3.2 各区域无功校验

每个区域必须满足静态无功平衡, 即每个区域中的无功电源最大无功出力之和必须大于区域内无功负荷之和。静态无功平衡的目标函数定义为

$$\sum_{n=1}^{K_{Gi}} Q_{gn}^{\max} \geq \sum_{m=1}^{K_{Di}} Q_{dm} \quad i=1, 2, \dots, k \quad (4)$$

式中: Q_{gn}^{\max} 为区域 i 内的第 n 个无功电源的最大无功出力; Q_{dm} 为区域 i 内的第 m 个负荷节点的无功功率。

在实际应用中, 每个区域至少拥有 10% 裕度的无功储备才能保证系统正常运行, 即在满足区域静态无功平衡的同时, 划分的每个区域内应具备足够的无功储备。无功储备量指标 λ_i 定义为

$$\lambda_i = (1 - Q_{Gi}/Q_{Li}) \times 100\% \quad (5)$$

式中: Q_{Gi} 为区域 i 的无功储备; Q_{Li} 为区域 i 的总无功负荷。

如果某个区域不能同时满足区域静态无功平衡和足够的无功储备这两个条件, 在满足分区模块度无较大变化的条件下, 可进行节点调整。

1.3.3 各分区可划分节点选取

进行节点调整时, 将节点随意划分到其他区域, 会影响分区之间的无功耦合, 致使分区模块度大幅下降。对此, 本文引入程度中心性指标对社团中节点在所属群体内的相对重要程度进行判别, 其定义

为^[13]

$$Z_i(n) = \frac{d_i(n)}{g_i - 1} \quad i=1, 2, \dots, k \quad (6)$$

式中: $d_i(n)$ 为区域 i 内第 n 个节点与该区域内其他节点关系权重和; g_i 为区域 i 内所有节点之间权重和。

当分区方案中某区域无功校核不通过时, 则按上述方法寻找出该区域中可划分节点, 将可划分节点按无功负荷从大到小排列重新分区, 直到所有区域都静态无功平衡且区域内无功储备大于 10% 为止。

1.4 改进的主导节点选择方法与主导节点控制

主导节点不仅要易于进行电压调控, 同时应具有反映其所在区域内节点电压水平的能力。因此, 在已有文献中大都通过构建考虑可观性和可控性的目标函数来进行主导节点选择^[14-18]。节点 i 的目标函数定义为

$$S_i = \max \left\{ \sum_{m \in S_e} \alpha_{im} + \sum_{j \in S_g} \beta_{ij} \right\} \quad (7)$$

式中: m, j 分别为区域内负荷节点的编号和无功电源节点的编号; S_e 为分区内所有负荷节点合集, S_g 为分区内所有无功电源节点合集。

可观性指标 α_{im} 和可控性指标 β_{ij} 均由收敛后的雅克比矩阵求得, 表达式分别为

$$\alpha_{im} = (\partial V_i / \partial Q_m) / (\partial V_m / \partial Q_m) \quad (8)$$

$$\beta_{ij} = (\partial V_i / \partial Q_j) \quad (9)$$

按目标函数(8)计算出节点具有较大的灵敏度, 但在实际应用中求出的节点可能处于区域边缘位置, 该节点就不适合作为主导节点。对此本文提出基于程度中心性指标改进目标函数, 改进的目标函数表达式如下:

$$S_i = Z_i \times \max \left\{ \sum_{m \in S_e} \alpha_{im} + \sum_{j \in S_g} \beta_{ij} \right\} \quad (10)$$

式中, Z_i 为节点 i 在所属区域内的程度中心性。

当主导节点选定后, 若系统正常运行, 则主要监控这些主导节点的电压变化情况。一旦某区域内电压值偏离正常区间, 则将该区域内节点按灵敏度从大到小的顺序排列, 优先调节灵敏度大且具有无功调控能力的节点, 促使主导节点的电压恢复到正常水平。

分区算法的整体流程如图 1 所示。

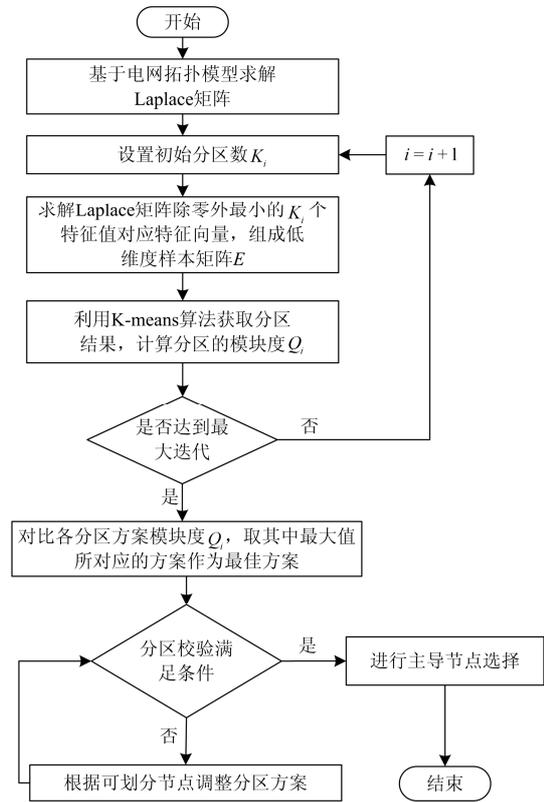


图 1 分区算法的整体流程

Fig. 1 Flow chart of the partitioning algorithm

2 算例分析

为了验证基于复杂网络理论的谱聚类无功电压分区新算法的可行性, 本文在 Matlab 仿真软件上利用 IEEE-39 节点标准测试系统进行仿真分析, 并将分区方案与其他文献中已有的分区方案进行比较。

2.1 IEEE-39 节点系统分区测试

IEEE-39 节点系统共包含 10 个无功电源节点, 14 个变压器节点以及 34 条线路。根据本文中提出的分区算法, 设置分区数目的最大值取 10。模块度 Q 值与分区数目关系如图 2 所示。分析发现, 当分区数目为 6 时, 模块度 Q 值最大。因此, 将 IEEE-39 节点系统划分为 6 个区域是合理的。

2.2 分区方案的校验

对分区方案进行区域静态无功平衡校验时, 发现区域 5 中负荷节点无功负荷之和为 444 Mvar, 大于区域中无功电源的最大出力之和 350 Mvar, 区域静态无功不平衡, 且无功储备不足, 需要重新划分。

经计算, 区域 5 中节点 4 与节点 8 为可划分节点。其中节点 4 的无功负荷为 184 Mvar, 可划分区域为区域 2; 节点 8 的无功负荷为 176 Mvar, 可划分区域为区域 1。但将节点 8 划分给区域 1 后, 该区域虽然静态无功平衡, 但无功储备不足。区域 2

中无功电源最大出力之和较高,即使加上节点4也满足区域静态无功平衡,同时又能保证无功储备有余,故将节点4划分到区域2。

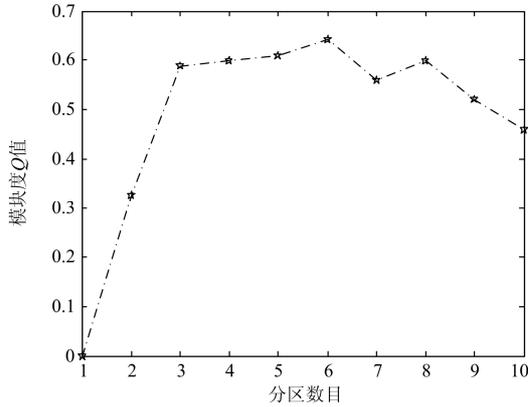


图2 IEEE-39节点系统分区模块度Q

Fig. 2 Modularity Q for IEEE 39-bus system partitioning

基于上述方案优化分区后的模块度相较初始分区模块度下降0.079。在区域耦合性变化较小的条件下保证了区域静态无功平衡,同时还保留一定的无功储备。

最终分区方案如表1所示,各区域的静态无功平衡校验与无功储备校验结果如表2、表3所示。

表1 IEEE-39节点系统分区方案

Table 1 Partitioning result for IEEE 39-bus system

分区编号	分区内节点编号
1	1, 9, 39
2	2, 3, 4, 17, 18, 25~27, 30, 37
3	28, 29, 38
4	15, 16, 19~24, 33~36
5	5, 6, 7, 8, 31
6	10, 11, 12, 13, 14, 32

表2 分区方案的区域静态无功平衡校验

Table 2 Static reactive power balance calibration of partitioning result

分区编号	分区内无功电源最大无功出力之和/Mvar	分区内负荷节点无功负荷之和/Mvar	区域静态无功平衡校验
1	300	44	平衡
2	650	356	平衡
3	300	55	平衡
4	957	354	平衡
5	350	260	平衡
6	300	88	平衡

2.3 分区方案的对比

为了体现本文分区方案的优越性,将分区方案的模块度与文献[8]Normal矩阵谱平分法(NP)、文献

[19]映射分区法(MP)、文献[20]层次聚类法(HC)得到分区方案的模块度进行比较,结果如表4所示。

表3 分区方案的无功储备

Table 3 Reactive power reserve of partitioning result (%)

分区编号	分区1	分区2	分区3	分区4	分区5	分区6
无功储备	85.3	27.1	80.8	13	20.7	60.2

表4 不同文献中模块度比较

Table 4 Modularity comparison by different methods

分区方法	谱聚类	NP[8]	MP[19]	HC[20]
分区数目	6	6	6	6
模块度Q	0.6256	0.6134	0.6318	0.6170

由于本文所采用的模块度算法与上述各文献不同,所得到的Q值也不同。但在同一模块度算法中进行Q值比较不影响最终结论。

根据模块度的定义,Q值越大,社团划分质量越高。从表4中可看出文献[19]基于映射分区法得到的模块度Q值最大,但它将负荷节点4、8划分到同一个区域,导致此区域中无功储备不足。而基于本文得到的分区具有较高的模块度,保证了区域静态无功平衡,同时还保留了一定的无功储备,提高了系统的整体稳定性,能更好地实现无功电压分区控制。

最终分区结果如图3所示。

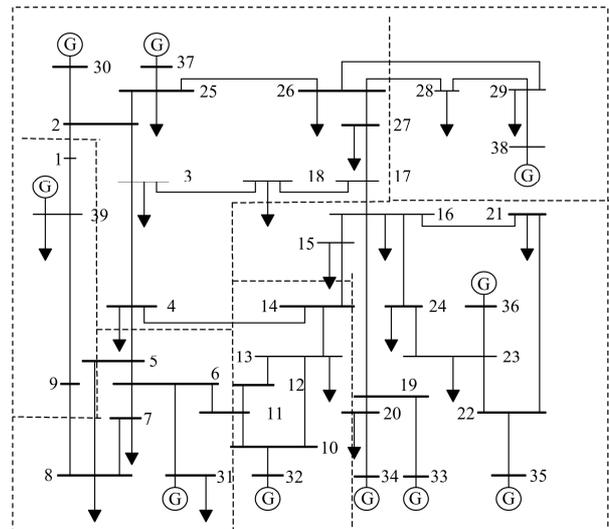


图3 IEEE-39节点系统分区

Fig. 3 Partitioning result of IEEE 39-bus system

2.4 IEEE-39分区主导节点选择

根据收敛后的雅克比矩阵求出的 α_{im} 矩阵和 β_{ij} 矩阵数值不在同一个数量级上。为了保证主导节点选取的准确性,需将 α_{im} 矩阵和 β_{ij} 矩阵进行标准化计算。根据式(10)求出节点的目标函数值,各分

区中的主导节点如表 5 所示。

表 5 主导节点选择
Table 5 Pilot nodes selection

分区编号	主导节点编号	目标函数 S_k
1	1	{0.061 1}
2	17	{0.104 7}
	25	{0.057 7}
3	29	{0.177 3}
4	23	{0.054 6}
	15	{0.060 5}
5	6	{0.028 1}
6	12	{0.036 8}

由表 5 可以看出, 所选主导节点在区域内部大致处于中心位置, 不同主导区域目标函数值差距较大。因为区域 2、区域 3 包含节点较多, 在这两个区域中选取两个负荷节点作为主导节点, 有利于对区域中边缘节点电压水平进行调控, 能更好地实现区域之间电压无功控制。

3 结论

本文基于复杂网络理论提出了一种新的分区算法。在 IEEE-39 节点标准测试系统上仿真验证了算法的可行性, 得出如下结论:

(1) 本文利用谱聚类算法对构建的电压分区控制模型进行分析获取了低维度的聚类样本, 降低了算法的复杂度, 同时算法中考虑了电网的网络拓扑结构, 获得了模块度更高的分区方案。

(2) 引入区域静态无功平衡与无功储备的校验方法, 保证了所分区域的稳定性。

(3) 结合程度中心性评价指标的主导节点选择方案, 综合考虑了电网的拓扑结构与灵敏度矩阵, 从而提高了主导节点选择的准确度。

综上所述, 相比现有分区算法, 本文提出的分区算法能获得更好的无功电压控制分区效果。

参考文献

[1] SANCHA J L, FERNANDEZ J L, CORTES A, et al. Secondary voltage control analysis solutions and simulation results for the Spanish transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(2): 630-638.

[2] 倪向萍, 阮前途, 梅生伟, 等. 基于复杂网络理论的无功分区算法及其在上海电网中的应用[J]. 电网技术, 2005, 31(9): 6-12.

NI Xiangping, RUAN Qiantu, MEI Shengwei, et al. A new network partitioning algorithm based on complex network theory and its application in Shanghai power grid[J]. Power System Technology, 2005, 31(9): 6-12.

[3] 周静, 边海峰, 贾晨, 等. 基于分区的含 DG 配电网实时无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 117-124.

ZHOU Jing, BIAN Haifeng, JIA Chen, et al. Real-time reactive power optimization in distribution network with DG based on partitions[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 117-124.

[4] 唐小波, 刘笠, 张娟, 等. 基于自适应权重 Voronoi 图的配电网供电分区方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 83-88.

TANG Xiaobo, LIU Li, ZHANG Juan, et al. Method of power distribution network partition based on adaptive weighted Voronoi diagram[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 83-88.

[5] 陈厚合, 运奕竹, 邢文洋, 等. 基于聚类分析方法的电力系统负荷节点分区策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 47-53.

CHEN Houhe, YUN Yizhu, XING Wenyang, et al. A novel strategy of network partitioning for load node in power systems using spectral clustering[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 47-53.

[6] 李昌超, 鲁宝春, 陈凤英, 等. 基于向量相似度的无功电压分区方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 14-18.

LI Changchao, LU Baochun, CHEN Fengying, et al. Reactive power voltage control partitioning based on vector similarity[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 14-18.

[7] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

[8] 许刚, 王紫雷. 基于 Normal 矩阵谱平分法的快速电压控制分区[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 199-204.

XU Gang, WANG Zilei. Fast voltage control partitioning based on Normal matrix spectral bisection method[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 199-204.

[9] 谭玉东, 李欣然, 蔡晔, 等. 基于电气距离的复杂电网关键节点识别[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 146-152.

TAN Yudong, LI Xinran, CAI Ye, et al. Critical node identification for complex power grid based on electrical distance[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 146-152.

[10] MAC Q J. Some methods for classification and analysis of mul-tivariate observations[C] // Proceedings of the 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. Berkeley, University of California Press, 1967: 281-297.

[11] 吴夙慧, 成颖, 郑彦宁, 等. K-means 算法研究综述[J].

现代图书情况技术, 2011, 205(5): 28-35.

WU Suhui, CHENG Ying, ZHENG Yanning, et al. Survey on K-means algorithm[J]. New Technology of Library and Information Service, 2011, 205(5): 28-35.

[12] NEWMAN M E J, GIRVAN M. Finding and evaluating community structure in networks[J]. Phys Rev E, 2004, 69(2): 1-16.

[13] 武澎, 王恒山. 一种网络社团划分的评价及改进方法[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(3): 744-747.

WU Peng, WANG Hengshan. Evaluation and improvement method on division of community structure in network[J]. Application Research of Computers, 2014, 31(3): 744-747.

[14] 潘高峰, 王星华, 彭显刚, 等. 基于社团结构理论的电网无功分区及主导节点选择方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 32-37.

PAN Gaofeng, WANG Xinghua, PENG Xiangang, et al. Study of power grid partition identification method based on community structure detection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 32-37.

[15] 龙启峰, 丁晓群, 刘小波, 等. 基于可控主导节点的电压分区及电压校正研究[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 59-62.

LONG Qifeng, DING Xiaoqun, LIU Xiaobo, et al. Study of voltage partition based on controllable pilot nodes and voltage correction[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 59-62.

[16] 代飞, 黄磊, 徐箭, 等. 基于二级电压控制的河南电网分区和主导节点选择[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 101-105.

DAI Fei, HUANG Lei, XU Jian, et al. Voltage partitioning and pilot nodes electing of Henan power grid based on secondary voltage control[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 101-105.

[17] 武艳, 杨数强, 蒋志勋, 等. 基于节点灵敏度分析的大电网等值研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 68-73.

WU Yan, YANG Shuqiang, JIANG Zhixun, et al. Research on the equivalence of large-scale power system using node sensitivity analysis approach[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 68-73.

[18] 胡晓松, 张殷, 谢光彬, 等. 含 PV 节点的配电网合环潮流算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 8-13.

HU Xiaosong, ZHANG Yin, XIE Guangbin, et al. A loop closing power flow calculation algorithm of distribution network with PV nodes[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 8-13.

[19] 赵晋泉, 刘傅成, 邓勇, 等. 基于映射分区的无功电压控制分区算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 36-39.

ZHAO Jinqun, LIU Fucheng, DENG Yong, et al. Network partition for reactive power/voltage control based on a mapping division algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 36-39.

[20] 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, 54.

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, 54.

收稿日期: 2016-01-08; 修回日期: 2016-03-21

作者简介:

徐毅非(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护; E-mail: 8923774992@qq.com

蒋文波(1981-), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力设备在线监测与故障诊断技术; E-mail: jiangwenbo@mail.xhu.edu.cn

程雪丽(1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向为智能化高压电器。E-mail: 497219980@qq.com

(编辑 葛艳娜)