

含分布式电源配电网的两阶段电压控制分区方法

杨爱纲¹, 杨森然², 谢立君³, 邵建伟²

(1. 云南电网有限责任公司丽江供电局, 云南 丽江 674100; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072; 3. 国网湖南省电力有限公司超高压变电公司, 湖南 长沙 410000)

摘要:针对含分布式电源配电网中数据量大,以及传统基于复杂网络理论的电网分区方法存在分区不合理、区域内部无功调节能力不足等问题,文中提出一种基于复杂网络理论的两阶段分区方法。第一阶段基于映射分区思想,依据“最小电气距离”原则对负荷节点进行初始分区,使得无功源能够更好地协调和控制区内负荷节点,同时减小第二阶段的初始社团规模。第二阶段利用 Louvain 社团发现算法进行分区凝聚,通过改进分区模块度函数对初始分区进行调整,保证分区的无功调节能力。以 IEEE 69 节点系统为例验证文中所提方法的有效性。采用该方法分区后的分区数量、区域间无功转移量相较传统方法均有所减小,结果表明文中所提分区方法的无功调节能力更强,更适用于配电网的区域电压无功自治控制。

关键词:分布式电源;复杂网络理论;无功电压分区;负荷节点;映射分区;Louvain 算法

中图分类号:TM727

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2025)03-0219-09

0 引言

随着风电、光伏等新能源的大量接入,电网结构日益复杂,在兼顾各方需求的同时对电网进行全局控制是目前亟待解决的问题。传统的电力系统电压控制区域划分大都基于运行人员经验和电网自然属地,未考虑电网自身的电气特性,因此所得分区结果难以反映电网实际分区的特征,不利于电力系统的运行与控制^[1-6]。而基于无功分区的控制能将全局的控制目标转化为局部的控制目标,具有便于实现、灵活度高及控制效果较好等优点^[7-11]。

电网无功电压控制的一个重要原则就是保证无功分区平衡,以避免无功功率的远距离传输。为实现有效的电压无功控制,电网电压无功分区应满足以下分区原则^[12]。

(1) 电压分区算法应将被控节点和对其灵敏度最高的无功源划分在同一分区内;

(2) 电压分区算法应合理分配无功源至不同的电压分区中,使得各个分区的无功功率负荷相对均衡,降低各分区产生无功缺额的概率;

(3) 电压分区算法需要保证分区中各节点之间相互连通。

为满足上述目标,近年来有学者提出基于 Dijkstra 算法^[13]、基于分形理论^[14]以及基于生物地理学优化算法^[15]的电网分区策略,有效增强了电网各子分区的可控性及鲁棒性,但均存在计算复杂度

较高、计算时间较长等问题。文献[16-17]基于复杂网络理论,用点和连边来描述电网中的各个基本元素,将电网的每个节点视为独立的初始区域,将线路无功潮流和电抗比值作为连边权重系数,再利用社团网络挖掘算法,得到最终分区结果。该分区结果可以自动满足分区内节点连通和区域内强耦合、区域间弱耦合的要求。但在含分布式电源(distributed generation, DG)的复杂配电网中,该方法将系统全体节点作为初始区域进行分区凝聚计算,算法规模较大,且由于传统社团模块度函数无法体现区域无功储备容量情况,分区结果中往往存在部分区域无功调节能力不足的问题。文献[18]基于电气距离矩阵特征根确定最佳分区数,再通过 Ward 距离的聚类算法对电气距离矩阵进行聚类分析得出分区结果,并将其应用到配电网电压分区控制中,但该方法计算复杂度高,不具有普遍适用性。文献[19]基于综合灵敏度实现负荷节点的分区,但该方法以区域电压稳定性为主、灵敏度为辅,耗时长、计算复杂。文献[20]考虑 DG 主动参与调压情况,提出了 DG 电压支撑能力的概念,并基于此提出主动配电网(active distribution network, AND)分区方法,该方法利用 DG 的电压支撑能力达到调压效果。

为满足含多类型 DG 接入的大数据量、复杂配电网快速分区需求,并提高各区域无功就地平衡能力,文中提出一种基于复杂网络理论的含 DG 配电网两阶段分区方法,第一阶段基于映射分区思想,以无功源节点为区域中心,将负荷节点划分到与其

电气距离最近的无功源节点所在区域,从而使得无功源能够更好协调和控制区内负荷节点,同时减小第二阶段初始社团规模。第二阶段基于社团结构进行分区凝聚,通过改进分区模块化函数保证分区无功调节能力。

1 基于负荷节点映射的初始区域划分原则

1.1 电气距离的定义及求解

通常利用电气距离来反映无功源及负荷节点之间的无功/电压灵敏度。参与电网动态电压控制的无功源可以分为两类,即电压控制型无功源和无功补偿型无功源。电压控制型无功源通常作为 PV 节点,其在无功调度过程中的作用主要通过改变励磁电压,调控并网点电压来实现。该类无功源主要包括通过逆变器并网的光伏、风电^[21-26]。无功补偿型无功源可被视为 PQ 节点,其在电网无功调度过程中的作用主要通过调节无功输出或者调整功率因数来实现。该类无功源主要包括电流控制型光伏、双馈型风力发电机、燃料电池等^[27-28]。分布式光伏和风电系统可以通过调节无功功率输出参与分区内的无功-电压控制。光伏发电系统可以减少有功出力,并控制其输出功率对区域内负荷进行无功补偿以抑制电压越上限。

(1) PQ 控制型无功源和负荷节点之间的灵敏度矩阵。

负荷节点通常被视为 PQ 节点,即可通过计算 PQ 型无功源节点单位无功随负荷节点电压幅值的变化量,反映该节点的无功/电压灵敏度。假设系统有 n 个节点,其中 PQ 节点有 m 个, PV 节点有 $n-m-1$ 个,则极坐标形式的牛顿拉夫逊潮流计算方程为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PU} \\ J_{Q\theta} & J_{QU} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: ΔP 、 ΔQ 分别为节点注入有功、无功功率变化量矩阵; $J_{P\theta}$ 、 J_{PU} 和 $J_{Q\theta}$ 、 J_{QU} 分别为有功和无功对电压相角、幅值的偏导矩阵; $\Delta \theta$ 、 ΔU 分别为节点电压相角、幅值变化量矩阵; J 为雅可比矩阵,由系统潮流方程求得。文中主要对系统网络中的无功功率进行定量分析,且无功与有功近似解耦,因此可令有功功率保持恒定,即 $\Delta P=0$,可得系统中无功/电压灵敏度关系为 $\Delta U = (J_{QU} - J_{P\theta}^{-1} J_{PU} J_{Q\theta})^{-1} \cdot \Delta Q$, 即其灵敏度矩阵为 $S_{QU} = (J_{QU} - J_{P\theta}^{-1} J_{PU} J_{Q\theta})^{-1}$ 。

(2) PV 控制型无功源和负荷节点之间的增广灵敏度矩阵。

假设该系统中包含 m 个 PQ 节点,由式(1)可求解 $m \times m$ 维的 S_{QU} 矩阵。该矩阵反映了 PQ 节点自

身及其他同类型节点随功率变化的关系。对于 PV 型无功源节点,须通过增广的方式对矩阵 S_{QU} 进行变形:首先,设置观察电源,即一个用 PV 型无功源表示的 PQ 节点,其他节点仍为原设置,计算结果为增广无功/电压灵敏度矩阵,其末尾行及末尾列表示该观察电源与其他 PQ 节点的无功/电压灵敏度;随后,依次将其余 PV 型无功源设为观察电源,解得 m 组行及列向量;最终,将上述行及列向量按求解顺序添加至灵敏度矩阵 S_{QU} 中,求得 $(n-1) \times (n-1)$ 维矩阵 S'_{QU} ,其包含了除平衡节点外所有节点的信息。

(3) 电气距离求解。

首先,利用式(2)对矩阵 S'_{QU} 进行标准化,从而使得该矩阵中的各元素均在 0~1 之间:

$$s_{ij}^* = |s_{ij}| / \max_j \{|s_{ij}|\} \quad (2)$$

式中: $\max_j \{|s_{ij}|\}$ 为矩阵 S'_{QU} 中第 j 列元素绝对值的最大值; s_{ij}^* 为标准化处理后矩阵 S'_{QU} 中的数据, $s_{ij}^* \in [0,1]$ 。

然后,将矩阵 S_{QU}^* 变换为对数形式,使得坐标表示范围更大。变换过程如式(3)所示。

$$x_{ij} = -\lg |s_{ij}^*| \quad (3)$$

之后,由式(4)计算得到各节点的电气距离,从而构成电气距离矩阵 D 。

$$d_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n-1} |x_{ik} - x_{jk}|^2 \quad (4)$$

式中: x_{ik} 、 x_{jk} 分别为节点 i 和节点 j 针对第 k 个节点进行标准化后的对数形式数据; d_{ij} 为节点 i 和节点 j 间的电气距离,其数值越大,节点 i 和节点 j 间的耦合关系越强,反之,则耦合关系越弱。

1.2 负荷节点映射分区原则

映射分区算法能将负荷节点合并至相应无功源所在区域,使得二者间的电气距离最小,从而确保负荷节点被相应无功调节能力最强的无功源分区所覆盖^[29-30]。负荷节点映射的具体步骤如下。

(1) 将各无功源划分至若干个分区中,并标出各无功源的节点号。

(2) 利用 1.1 节的算法,依次对各分区进行下列操作:计算任意负荷节点与所在分区中无功源节点间的电气距离,并取其中的最小值作为任意负荷节点到所在分区的距离。

(3) 取步骤(2)中求得的距离最小值所对应的分区作为该负荷节点从属的分区。

(4) 重复步骤(2)和步骤(3),直至所有负荷节点均完成上述操作。

通过上述负荷节点与无功源节点的一一映射关系, 得到电网区域的划分结果, 保证二者之间的电气距离数值最小。该分区结果使得划分后各区域内部的电气耦合关系较强, 各区域之间的电气耦合关系相对较弱, 且各区域之间不进行或更少进行无功支援。各初始分区内至少有一个无功源节点, 其中单一源节点也可以通过调节发电机的励磁或者控制无功补偿设备来提供所需的无功功率支撑。

2 基于复杂网络理论的两阶段电压控制分区方法

基于电气距离得到的分区结果主要与网络拓扑有关。但在实际电网中, 负荷需求和分布式发电会随着时间和天气的变化而发生较大改变, 因此, 需要动态调整分区结果。用于电压控制的分区方案应能反映不同源荷组合情况对分区结果的影响, 并满足多种工况下分区电压调节对区域无功储备容量的需求。

2.1 负荷节点映射分区原则

社团所表示的集合中, 节点之间联系较为紧密, 而与集合外的节点相似度较低。若干个社团以一定结构相互结合, 共同构成复杂网络。复杂网络模型是使用一种模块度函数定量地反映复杂网络的结构特性并求解优化分区的算法^[31-35]。其定义如下:

$$M = \frac{1}{2\rho} \sum_i \sum_j \left(W_{ij} - \frac{\lambda_i \lambda_j}{2n} \right) \omega(c_i, c_j) \quad (5)$$

式中: M 为模块度函数; W_{ij} 为对网络中的任意两节点连边赋予的权重, 当两节点直接相连时 W_{ij} 取 1, 不相连时 W_{ij} 取 0; $\lambda_i = \sum_j W_{ij}$ 为与节点 i 相连的全部边的权重和; $\lambda_j = \sum_i W_{ij}$ 为与节点 j 相连的全部边的权重和; $\rho = \sum_i \sum_j W_{ij}$ 为网络中全部边的权重和; c_i, c_j 分别为节点 i 和节点 j 所属的区域; $\omega(c_i, c_j)$ 为一个函数, 若节点 i 和节点 j 被划分在相同区域, 则 $\omega(c_i, c_j)=1$, 否则 $\omega(c_i, c_j)=0$ 。由定义可得, 模块度函数 M 取值严格小于 1, 且与社团内部紧密度呈正相关, 同时随着 M 值增大, 网络的社团结构越合理。因此, 可通过相应算法求解模块度的最大值, 该值所对应的区域划分结果即为最佳网络分区。

将配电网视为连通网络, 其中发电机和负荷作为节点, 节点间的支路作为边, 并在建模过程中涵盖支路导纳和无功传输的相似权。传统 Louvain 算

法通常将电气距离作为支路的边权值, 在分区凝聚过程中对不满足无功储备容量需求的区域进行归并处理。这种划分方式依赖于网络拓扑, 仅针对节点之间的耦合关系进行优化。考虑到无功源对电压的调节效果, 为定量描述分区后区内无功的平衡能力, 同时使得区域间的无功传输尽可能低, 文中提出一种考虑分区无功平衡能力的配电网复杂网络模型。模型以节点间的电气距离为支路边权值, 可得:

$$W_{ij} = d_{ij} \quad (6)$$

通过上述表示方法, 可以更好描述配电网结构, 同时能够避免由电气距离发生较大变化造成的分区结果差异的情况。

基于区域电压自治需求, 无功储备可以调节无功功率的流动量, 以维持区域电压稳定, 因此区域的无功储备应大于负荷需求。但是, 无功储备量难以准确衡量, 储备量过大会导致无功过剩且占用有限的资源, 储备量过小则可能导致发生紧急突发事件时无功支撑不足, 给电力系统的正常运行带来隐患, 因此, 需要严格且定量地考虑无功储备量。现定义区域 l 的无功储备指标 ε_l 如下:

$$\varepsilon_l = \begin{cases} |Q_{G,l}/Q_{L,l}| & Q_{G,l} < Q_{L,l} \\ 1 & Q_{G,l} \geq Q_{L,l} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $Q_{G,l}$ 为区域 l 中的动态无功裕度; $Q_{L,l}$ 为区域 l 的负荷无功需求。同时, 设置区域无功储备指标的阈值为 0.2。为确保区内存在足够的无功储备以应对紧急状况, 保障设备安全, 区域 l 无功储备指标 ε_l 必须大于该阈值。无功储备指标能够对分区内的无功平衡情况进行定量描述, 防止无功资源不足或无功过剩等情况发生, 指标的值越大代表分区具有更好的无功平衡度。根据指标的数值大小, 在分区内和分区间合理配置无功补偿设备, 并控制 DG, 以调节无功平衡。考虑动态无功储备后, 社团模块度函数 M' 的表达式为:

$$M' = M - \frac{1}{x} \sum_{l=1}^x \varepsilon_l \quad (8)$$

式中: x 为系统分区数目; $\frac{1}{x} \sum_{l=1}^x \varepsilon_l$ 为系统整体的无功平衡度。改进前的模块度函数基于计算得到的电气距离来描述各节点间的耦合关系, 将该函数与无功储备指标相加即可得到改进后的模块度函数。由于改进后的模块度函数兼具电气距离与无功平衡的信息, 因此在划分网络区域时, 既考量了网络拓扑, 又能很好地反映划分区域内的无功平衡效果, 从而尽可能降低区域之间的无功转移。

2.2 Louvain 分区凝聚算法

基于模块度的 Louvain 算法主要用于发现富有层次的社区结构,并使整个社区网络的模块度达到最优,同时算法所得结果较为准确且运算速度较快,较适用于大规模的网络分析。利用该算法优化模块度函数时,若将某节点加入某一社区能够显著提升该社区的模块度,则将该节点划分至该社区;若划分至其他社区后模块度变化不明显,则该节点仍保留在当前社区。Louvain 算法通过逐步将节点合并到更大的社团,以及在每一次迭代中只考虑节点与其相邻节点间的相似度等,调整初始分区。算法具体步骤^[36]如下。

(1) 用单独的社区代表网络中的各个节点,即网络中节点数等于社区数。

(2) 依次将每个节点归类至其相邻节点所属社区,计算该社区最大的模块度增益 ΔM 及 $|\Delta M|$ 最大值对应的节点。若 ΔM 大于 0,则将该节点划分至 $|\Delta M|$ 最大值所对应的相邻节点所属社区。

(3) 重复步骤(2),直至全部节点及其归属社区均不改变。

(4) 将所属相同社区的若干节点合并为一个新节点,社区原节点间边的权重转化为新节点的权重,社区间边的权重转化为新节点间边的权重。

(5) 重复步骤(1)—步骤(3),直至整个网络的模块度保持稳定。

2.3 电压控制分区流程

假设一定区域电网内负荷节点个数为 N ,目标划分区域个数为 g_0 ,光伏电站并网点个数为 g ,基于复杂网络理论的分区算法的主要步骤如下。

(1) 输入待分区电网数据,形成电气距离矩阵。输入无功源节点和负荷节点信息,计算增广无功/电压灵敏度矩阵。

(2) 按“最小电气距离”原则进行初始分区。将 N 个负荷节点并入 g 个光伏,使两者间的电气距离最小,从而确定初始区域的数目为 g 。对于初始区域中只含无功源节点、不含负荷节点的区域,将其与最近的相邻无功源节点区域合并。

(3) 以 g 个初始区域为虚拟节点,利用式(8)计算虚拟节点的改进社团模块度函数 M' 。

(4) 对虚拟节点实现分区凝聚过程。当 M' 有最大值时即可终止分区,获取最佳区域划分结果。

分区流程如图 1 所示。通常需要考虑交流节点负荷的有功和无功功率及其标幺值等,因此在初始化阶段完成这些网络参数的设置。该分区算法首先将负荷节点分配至无功源分区中,再进行初步

整合得到系统分区,从而能够极大降低分区凝聚算法的计算量,同时还能优化分区结果。Louvain 算法基于分区的连通性原则,对分区的整合操作仅针对邻近的分区,因此可确保较高的计算速度。对社区模块度函数叠加无功储备指标,使得区域划分方案更具适应性,有效降低无功不足或过剩等问题的发生概率。

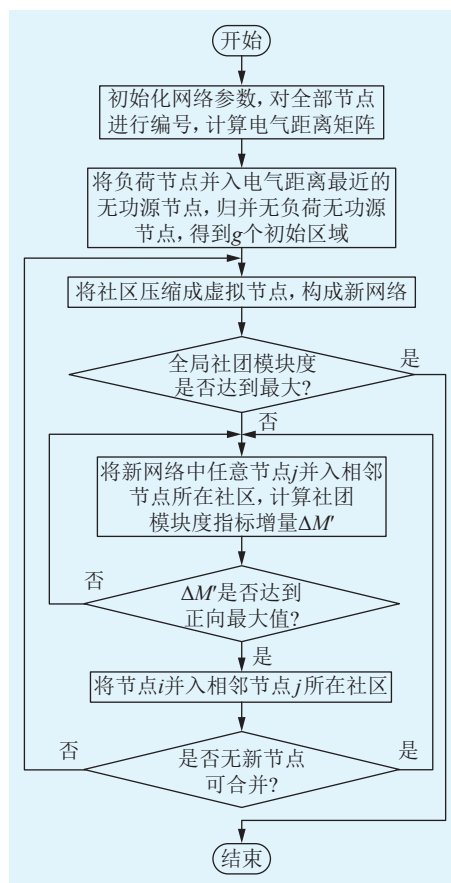


图 1 基于复杂网络理论的电压控制分区流程

Fig.1 Flow chart of voltage control partitioning based on complex network theory

3 算例分析

采用图 2 所示 IEEE 69 节点系统对文中所提分区方法的有效性进行验证。设置电压和功率的基准值分别为 12.7 kV、10 MW;系统总无功、总有功负荷分别为 2 694.7 kvar、3 802.1 kW;节点安全电压为 0.9~1.1 p.u.。结合相关资料,文中在节点 3、9、12、17、21、24、27、30、38、41、55、58、60、66、67 处接入 DG。依据工程经验,在节点 25、44、64 处分别并入 950、760、570 kvar 的离散无功并联补偿装置,即分组投切的电容器。该装置可以根据节点电压情况主动进行无功补偿,提高区域电压稳定性。此外,通过压缩 DG 的有功输出以提供无功,可以节省无功补偿设备的投资和运维成本,同

时减少能源损耗,具有一定经济价值。DG 的接入节点及相关参数如表 1 所示。

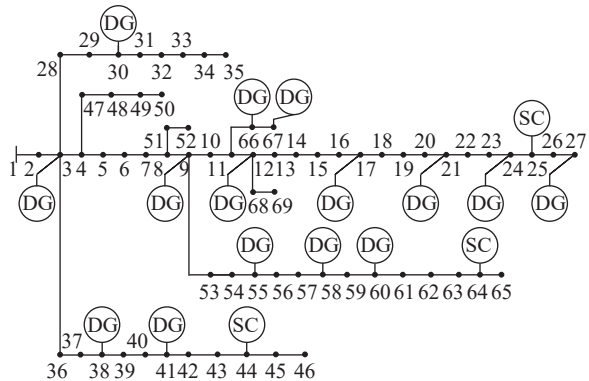


图 2 IEEE 69 节点系统结构
Fig.2 IEEE 69-node system structure

表 1 DG 接入位置及参数

接入节点编号	控制类型	容量/kW	DG类型
3、9、12	PV控制	600	光伏
17、21、30、38	PQ控制	400	风电
41、55、58	PQ控制	200	光伏
24、27、60、66、67	PQ控制	300	光伏

3.1 IEEE 69 节点系统分区结果

首先利用 1.1 节中的方法得到该节点网络下的电气距离矩阵,然后以无功源节点为区域中心对负荷节点进行分区,得到初始分区方案如图 3 所示。由图 3 可知,不是每个分区都要包含电压控制型无功源和无功补偿型无功源,这由分区内的负荷决定。

由图 3 可见,鉴于无功源节点 24、67 所在区域无负荷节点,将二者分别与其相邻且最近的无功源节点 27、66 合并,负荷节点则划分入离其最近的无功源节点所在区域,最终形成 13 个初始区域。在分区凝聚算法执行过程中,系统模块度函数 M' 与

划分区域数目的关系如图 4 所示。以模块度最大为目标,分区数目取 4 时,得到的最终划分方案如图 5 所示。经校验,图 5 中每个子区域中没有孤立的节点,符合分区联通性原则。

3.2 分区效果比较

为验证文中所提分区方法的有效性,采用 3 种方案分别对图 2 所示系统进行分区优化,并从计算耗时和无功平衡情况等方面对所得结果进行比较。3 种方案具体如下。

- 方案 1: 文中所提分区算法。
- 方案 2: 传统负荷节点映射算法,无功源节点按电气距离聚类实现区域划分。
- 方案 3: 传统 Louvain 算法,将系统各节点作为子分区进行区域划分。

文中使用 Win 10 系统 4 核处理器的 MATLAB R2017b 进行仿真,整个分区过程耗时 0.51 s。方案 2 耗时 0.49 s 完成分区,而方案 3 须耗时 1.46 s。方案 1 计算速度相对方案 3 更快,计算时间更短,这是因为 Louvain 算法在对最下层社区进行分区时计算量较大,而当节点按社区归并后,边和节点的数目将极大减小,从而加快了计算速度。

基于 3 种方案的最终分区结果如表 2—表 4 所示。表 2 和表 3 中,系统负荷节点均与其电气距离最近的无功源节点处于同一区域,而表 4 中,负荷节点 37、53、56 与距离最近的无功源节点 38、9、55 不在同一区域,无法保证无功源对上述节点的调节能力。在给定运行工况下,3 种分区方案均存在无功不足的情况,其中方案 3 分区结果中区域 7 的无功储备指标 ε_i 值为 0.213 1,分区内无功储备裕量不足,无法实现区内电压的自治控制。

基于表 2—表 4 的分区结果,用分区无功储备指标均值表示系统无功平衡度,分区无功缺额绝对

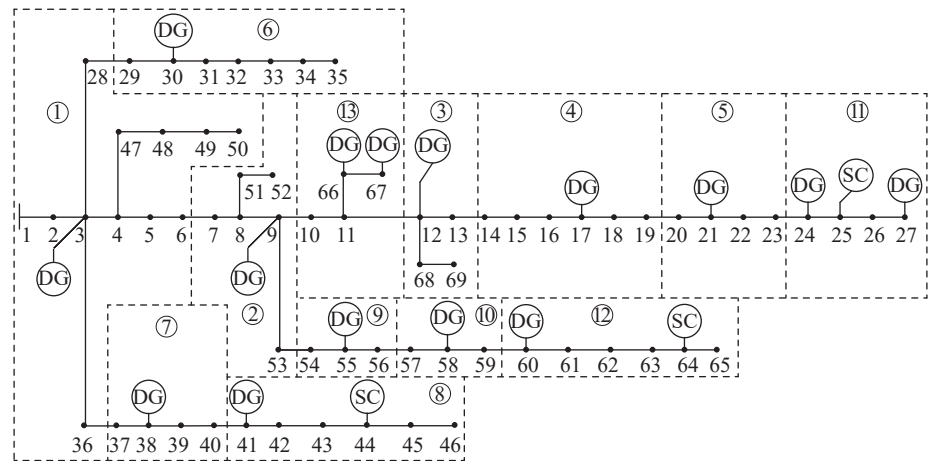


图 3 初始分区结果
Fig.3 Initial partition results

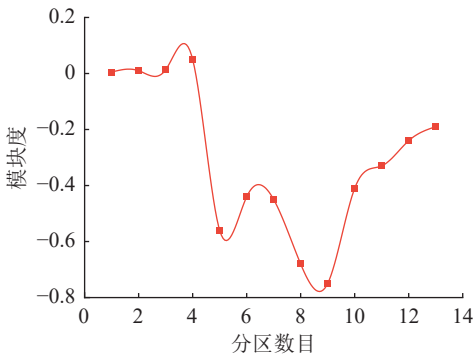


图4 系统模块度曲线

Fig.4 Curve of system modularity

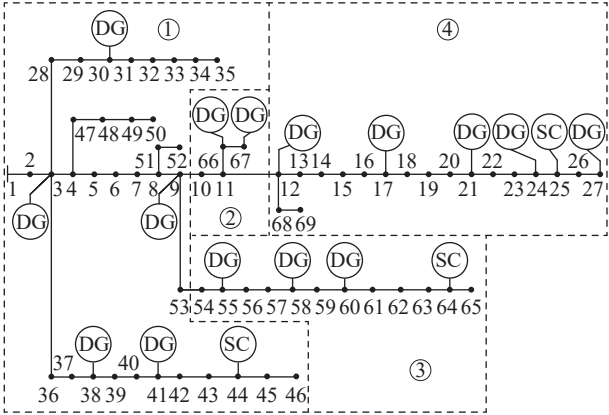


图5 最终分区方案

Fig.5 Final partition scheme

表2 方案1分区结果

Table 2 Partitioning results of scheme 1

分区编号	区内节点编号	无功源节点编号	ε_l	无功缺额/kvar
1	1~9、28~53	3、9、30、38、41	1	-449.719 2
2	10~11、66~67	66、67	1	-383.042 1
3	54~65	55、58、60	0.350 8	63.017 1
4	12~27、68~69	12、17、21、24、27	0.722 8	297.529 9

表3 方案2分区结果

Table 3 Partitioning results of scheme 2

分区编号	区内节点编号	无功源节点编号	ε_l	无功缺额/kvar
1	1~6、28~50	3、30、38、41	1	-682.860 4
2	7~13、51~56、66~69	9、12、55、66、67	0.358 9	443.266 4
3	57~65	58、60	0.472 3	549.663 1
4	14~27	17、21、24、27	1	-782.283 4

值之和表示系统区域间无功转移值,3种方案的无功指标对比如表5所示。

由表5可知,文中所提分区算法可以使系统无功平衡更优,区域间无功转移量更小,即文中所提方法的分区结果使得区内无功调节能力更强,更适用于配电网的区域电压无功自治控制。

表4 方案3分区结果

Table 4 Partitioning results of scheme 3

分区编号	区内节点编号	无功源节点编号	ε_l	无功缺额/kvar
1	1~9、28~37、47~52	3、9、30	0.571 0	308.222 1
2	12~23、68~69	12、17、21	1	-469.615 8
3	24~27	24、27	1	-383.042 1
4	38~40	38	0.388 5	28.446 7
5	41~46	41	0.316 2	34.570 4
6	53~55	55	1	-252.133 2
7	56~59	58	1	-219.611 1
8	60~65	60	0.213 1	769.274 2
9	10~11、66~67	66、67	1	-197.290 4

表5 各方案无功指标对比

Table 5 Comparison of reactive power indicators of each scheme

方案	分区数目	系统无功平衡度	区域间无功转移/Mvar
1	4	0.758 4	1.193 3
2	4	0.707 8	2.458 1
3	9	0.721 0	2.753 2

4 结语

文中提出一种基于复杂网络理论、映射分区思想、Louvain 社团发现算法的两阶段分区方法,并以 IEEE 69 节点系统为例验证了该方法的有效性。该方法最终的分区数目小于传统 Louvain 算法的分区数目,区域间无功转移量小于传统负荷节点映射算法及传统 Louvain 算法所得结果,并且所有子区域中无独立节点,与联通性原则相符。这表明文中所提方法的分区结果使得区内无功调节能力更强,更适用于配电网的区域电压无功自治控制,且计算简单高效,满足配电网电压无功控制的时限要求,为确定配电网分区数目提供一定的参考。

参考文献:

[1] 张波,高远,王磊,等. 考虑光伏电源可靠性的配电网无功电压调控策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2775-2784.
ZHANG Bo, GAO Yuan, WANG Lei, et al. Reactive voltage control strategy of distribution network considering the reliability of photovoltaic power supply[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2775-2784.

[2] 王玉婷,李鹏. 大规模风电并网无功电压协调控制策略研究[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(3): 47-55.
WANG Yuting, LI Peng. Study on reactive power and voltage coordinated control strategy for power system with large-scale wind power integration[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(3): 47-55.

[3] 嵇岩,杨丹丹,周政东,等. 考虑网络分区的含高比例分布式光

- 伏配电网电压协调控制[J]. [可再生能源](#), 2024, 42(10): 1399-1407.
- JI Yan, YANG Dandan, ZHOU Zhengdong, et al. Voltage coordinated control of distribution network with high proportion distribution photovoltaic considering network partition[J]. [Renewable Energy Resources](#), 2024, 42(10): 1399-1407.
- [4] 陈文进, 甘雯, 张俊, 等. 基于 HEM 灵敏度的配电网分层分区电压调节策略[J]. [电力建设](#), 2022, 43(11): 42-52.
- CHEN Wenjin, GAN Wen, ZHANG Jun, et al. Divisional and hierarchical voltage regulation strategy based on HEM sensitivity for distribution network[J]. [Electric Power Construction](#), 2022, 43(11): 42-52.
- [5] 杜婉琳, 王玲, 罗威, 等. 基于深度强化学习的有源配电网电压分层控制策略[J]. [发电技术](#), 2024, 45(4): 734-743.
- DU Wanlin, WANG Ling, LUO Wei, et al. Voltage hierarchical control strategy of active distribution network based on deep reinforcement learning[J]. [Power Generation Technology](#), 2024, 45(4): 734-743.
- [6] 郭小龙, 宋朋飞. 考虑邻域耦合程度的次区域主导节点优化辨识方法[J]. [电力电容器与无功补偿](#), 2024, 45(6): 83-91.
- GUO Xiaolong, SONG Pengfei. Optimal identification of sub-regional dominant node considering the neighbourhood coupling degree[J]. [Power Capacitor & Reactive Power Compensation](#), 2024, 45(6): 83-91.
- [7] 荣德生, 刘山林, 刘健辰, 等. 计及分布式电源精确特性的配电网动态无功优化[J]. [电源学报](#), 2021, 19(1): 82-89.
- RONG Desheng, LIU Shanlin, LIU Jianchen, et al. Dynamic reactive power optimization of distribution network considering accurate characteristics of distributed generation[J]. [Journal of Power Supply](#), 2021, 19(1): 82-89.
- [8] 孙汝羿, 袁至, 王维庆, 等. 源荷波动时含固态变压器的有源配电网动态无功优化方法[J]. [可再生能源](#), 2024, 42(7): 937-945.
- SUN Ruyi, YUAN Zhi, WANG Weiqing, et al. Dynamic reactive power optimization method of active distribution network with solid state transformer under source load fluctuation[J]. [Renewable Energy Resources](#), 2024, 42(7): 937-945.
- [9] 王文宾, 石磊磊, 贾清泉, 等. 低压光伏集群无功运行模式优化[J]. [电力科学与技术学报](#), 2021, 36(1): 117-126.
- WANG Wenbin, SHI Leilei, JIA Qingquan, et al. Study on reactive power operation mode optimization of low voltage photovoltaic cluster[J]. [Journal of Electric Power Science and Technology](#), 2021, 36(1): 117-126.
- [10] 段雪松, 张晋嘉, 李宏博, 等. 基于改进 Louvain 和 BAAM-ADMM 的配电网多目标集群划分和电压协调控制[J]. [智慧电力](#), 2024, 52(10): 32-39, 102.
- DUAN Xuesong, ZHANG Jinjia, LI Hongbo, et al. Multi objective cluster partitioning and voltage coordination control in distribution networks based on improved Louvain algorithm and BAAM-ADMM[J]. [Smart Power](#), 2024, 52(10): 32-39, 102.
- [11] 郑吉祥, 钟俊. 基于节点类型和分区耦合性的复杂网络无功电压快速分区方法[J]. [电网技术](#), 2020, 44(1): 223-230.
- ZHENG Jixiang, ZHONG Jun. A complex network theory fast partition algorithm of reactive voltage based on node type and coupling of partitions[J]. [Power System Technology](#), 2020, 44(1): 223-230.
- [12] 彭啸宇, 沈怡, 陆秋瑜, 等. 考虑风电出力不确定性的电网无功-电压控制鲁棒分区方法[J]. [电网技术](#), 2023, 47(10): 4102-4111.
- PENG Xiaoyu, SHEN Yi, LU Qiuyu, et al. Robust var-voltage control partitioning for power grid considering wind power uncertainty[J]. [Power System Technology](#), 2023, 47(10): 4102-4111.
- [13] BEHÚN M, KNEŽO D, CEHLÁR M, et al. Recent application of Dijkstra's algorithm in the process of production planning[J]. [Applied Sciences](#), 2022, 12(14): 7088.
- [14] LI H Z, ZHANG X Y, HAN W H, et al. A power grid partitioning optimization method based on fractal theory[J]. [International Transactions on Electrical Energy Systems](#), 2019, 29(3): e2741.
- [15] LIU F Y, GU B, QIN S W, et al. Power grid partition with improved biogeography-based optimization algorithm[J]. [Sustainable Energy Technologies and Assessments](#), 2021, 46: 101267.
- [16] 刘文通, 舒勤, 钟俊, 等. 基于局部电压稳定指标及复杂网络理论的无功电压分区方法[J]. [电网技术](#), 2018, 42(1): 269-278.
- LIU Wentong, SHU Qin, ZHONG Jun, et al. A new algorithm for partitioned regulation based on local voltage stability index and complex network theory[J]. [Power System Technology](#), 2018, 42(1): 269-278.
- [17] 武晓朦, 孙丰玉, 李飞. 基于电气距离分区的配电网动态无功优化[J]. [西安石油大学学报\(自然科学版\)](#), 2023, 38(3): 94-99, 128.
- WU Xiaomeng, SUN Fengyu, LI Fei. Dynamic reactive power optimization of distribution network based on electric distance partition[J]. [Journal of Xi'an Shiyou University \(Natural Science Edition\)](#), 2023, 38(3): 94-99, 128.
- [18] 陆晓芝, 耿光飞, 季玉琦, 等. 基于电气距离矩阵特征根分析的主动配电网电压控制分区方法[J]. [电力建设](#), 2018, 39(1): 83-89.
- LU Lingzhi, GENG Guangfei, JI Yuqi, et al. Voltage control partitioning method for active distribution network based on electrical distance matrix eigenvalue analysis[J]. [Electric Power Construction](#), 2018, 39(1): 83-89.
- [19] 李英量, 王康, 高兆迪, 等. 基于综合灵敏度的两阶段电压控制分区方法[J]. [科学技术与工程](#), 2022, 22(6): 2284-2290.
- LI Yingliang, WANG Kang, GAO Zhaodi, et al. Two-stage voltage control partition method based on comprehensive sensitivity[J]. [Science Technology and Engineering](#), 2022, 22(6): 2284-2290.
- [20] 吴晓蓉, 莫骏, 魏金萧. 基于分区协调控制的主动配电网电压支撑运行策略[J]. [现代电力](#), 2023, 40(6): 1032-1042.

- WU Xiaorong, MO Jun, WEI Jinxiao. Voltage support operation strategy of active distribution network based on zone-division control[J]. Modern Electric Power, 2023, 40(6): 1032-1042.
- [21] LUO C, WU H B, ZHOU Y Y, et al. Network partition-based hierarchical decentralised voltage control for distribution networks with distributed PV systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 130: 106929.
- [22] YANG Y, SUN Y C, WANG Q, et al. Fast power grid partition for voltage control with balanced-depth-based community detection algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(2): 1612-1622.
- [23] LI W X, TIAN A N, MA J, et al. Network partitioning approach for reactive power/voltage control using analytical nodes coupling expressions[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(7): 1337-1343.
- [24] 傅质馨, 王婧佳, 朱俊澎, 等. 分布式光伏接入对配电网凹陷域预估结果影响[J]. 电源技术, 2020, 44(10): 1518-1521, 1548.
- FU Zhixin, WANG Jingjia, ZHU Junpeng, et al. Impact of distributed photovoltaic access on forecast results of sag regions in distribution networks[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(10): 1518-1521, 1548.
- [25] 姚宏民, 杜欣慧, 李廷钧, 等. 光伏高渗透率下配网消纳能力模拟及电压控制策略研究[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 462-469.
- YAO Hongmin, DU Xinhui, LI Tingjun, et al. Simulation of consumption capacity and voltage control strategy of distribution network with high penetration of photovoltaics[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 462-469.
- [26] 谢立君, 汪超. 基于局部测量的含分布式光伏县域配电网分区电压控制[J]. 电测与仪表, 2023, 60(12): 153-158.
- XIE Lijun, WANG Chao. Voltage partition coordinated control of county distribution network with distributed PV based on partial measurement data[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(12): 153-158.
- [27] 蔡游明, 李征, 蔡旭. 计及控制时间窗内功率波动的风电场群无功电压分层优化控制[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1240-1250.
- CAI Youming, LI Zheng, CAI Xu. Voltage hierarchical optimal control of a wind farm cluster in account of voltage fluctuation in control time window[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1240-1250.
- [28] 苑开波, 罗萍萍, 范尊毅, 等. 混合潮流模型及算法分析[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(6): 124-130.
- YUAN Kaibo, LUO Pingping, FAN Zunyi, et al. Power flow model with hybrid single and three phase and algorithm analysis[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(6): 124-130.
- [29] BANNYKH P, PAZDERIN A. Distribution grid three-phase power flow algorithm based on flow model[C]//2020 IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). Riga, Latvia. IEEE, 2020: 1-6.
- [30] BANNYKH P, LOZHNIKIN S, MUKHLYNIN N, et al. Distribution grid power flow algorithm based on power-energy flow model[C]//2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). Riga, Latvia. IEEE, 2018: 1-6.
- [31] GUO D S, JIN H, GAO P, et al. Detecting spatial community structure in movements[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2018, 32(7): 1326-1347.
- [32] KUIKKA V. A general method for detecting community structures in complex networks[M]//Complex Networks and Their Applications VIII. Cham: Springer International Publishing, 2019: 223-237.
- [33] LIU F Z, WU J, XUE S, et al. Detecting the evolving community structure in dynamic social networks[J]. World Wide Web, 2020, 23(2): 715-733.
- [34] WAN Y, TAN X C, SHU H. Finding and evaluating community structures in spatial networks[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2023, 12(5): 187.
- [35] 曹敬, 金龙, 郑涛, 等. 计及分布式电源集群不确定性的配电网分散鲁棒电压控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 155-166.
- CAO Jing, JIN Yulong, ZHENG Tao, et al. A decentralized robust voltage control method for distribution networks considering the uncertainty of distributed generation clusters[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 155-166.
- [36] 周强. 复杂网络社区发现算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- ZHOU Qiang. Research on community discovery algorithms in complex networks[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.

作者简介:



杨爱纲

杨爱纲(1975),男,硕士,工程师,从事配电网调度管理技术工作(E-mail: 1281270423@qq.com);

杨淼然(2000),女,硕士在读,研究方向为综合能源与高效储能;

谢立君(1997),女,硕士,工程师,从事配电网运行控制技术工作。

Two-stage voltage control partitioning method for distribution network containing distributed generation

YANG Aigang¹, YANG Miaoran², XIE Lijun³, SHAO Jianwei²

(1. Lijiang Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Lijiang 674100, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd. Ultra High Voltage Substation Company, Changsha 410000, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of large-scale data in the distribution network with distributed generation, as well as the limitations of the traditional grid partitioning method based on complex network theory, such as irrational partitioning and insufficient reactive power regulation capability, a two-stage division method based on complex network theory is proposed in this paper. In the first stage, based on mapping partition, load nodes are initially partitioned according to the principle of "minimum electrical distance" so that the reactive power resources can better coordinate and control the load nodes in the region. At the same time, the initial association size in the second stage is reduced. In the second stage, the Louvain community discovery algorithm is used for partition aggregation, and the initial partition is adjusted by improving the partition modularity function to ensure the reactive power adjustment capability of the partition. The IEEE 69-node system is used as an example to verify the effectiveness of the proposed method in this paper. The number of partitions and the amount of inter-area reactive power transfer after partitioning are reduced compared with the traditional method. The results show that the proposed partitioning method has stronger reactive power regulation capability and is more suitable for autonomous control of regional voltage and reactive power in distribution networks.

Keywords: distributed generation; complex network theory; reactive voltage partition; load node; mapping partition; Louvain algorithm

(编辑 陆海霞)

(上接第 107 页)

Collaborative planning of distribution-grid and micro-grid considering bilateral transactions under wind-solar uncertain conditions

WANG Shuzheng¹, WU Shouhao¹, WU Zhi², SUN Yuzhu¹

(1. School of Electrical Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. School of Electrical Power Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In the emerging electricity market, bilateral transactions are conducted between distribution-grid operators and micro-grid operators. Under the uncertainty caused by the large-scale integration of wind and solar generation, the cooperation game between the distribution-grid and the micro-grid is analyzed at the planning level. The impact of multi-agent bilateral energy transactions is considered in this approach. To address the multiple non-convexities in traditional coordinated planning of distribution-grid and micro-grid, an alternating optimization-based strategy is proposed. Through the alternating optimization process, the discontinuous coordinated planning problem is transformed into a bi-level iterative solving process. In the upper level, Nash bargaining is applied to determine the traded electricity and payment strategies within a convex subset generated by the lower level. In the lower level, local individual planning problems are solved using trading variables obtained from the upper level. The market-clearing problem is decomposed into two subproblems, electricity transaction and payment settlement. The alternating direction method of multipliers is used sequentially to solve these subproblems. Case simulations on the IEEE 33-bus system demonstrate that the proposed model effectively enhances the operational benefits for both trading parties.

Keywords: bilateral transactions; collaborative planning; cooperative game; Nash bargaining; alternate optimization; two-layer solution

(编辑 方晶)