

基于标签传播的配电网动态分区方法

刘丽军, 吴桐, 翁涵迪, 郑文迪, 徐启峰
(福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要:为实现接入分布式可再生能源(RDG)的配电网分区在结构与能量层面上的区内强耦合、区间弱耦合以及分区内部功率储备充足的目标,除广泛应用于电力系统分区的模块度指标外,引入复杂网络理论中的标签传播算法和稳定度指标。为降低分区后各分区在能量与结构上的耦合程度,提高分区后各区内部电源的控制能力,定义了适用于配电网分区的标签传播算法;利用潮流追踪算法得出配电网电源供能和负荷吸能网络,基于此定义稳定度指标以量化节点与节点、节点与分区在能量上的紧密程度。并结合以灵敏度矩阵为基础的模块度指标,从结构和功能的角度推演出标签传播的判断依据:增益函数与损失函数。最后,考虑RDG接入配电网对分区的影响,将标签传播算法与RDG出力预测场景构建方法相结合,并以动态分区的形式提高分区应对RDG不确定性的能力,为分层分区调控方法提供理论支撑。

关键词:配电网;标签传播算法;模块度;稳定度;潮流追踪;动态分区

中图分类号:TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202111020

0 引言

为实现碳达峰、碳中和目标,构建以可再生能源为主体的新型电力系统,高比例分布式可再生能源(RDG)并网成为配电网的发展趋势^[1]。但接入电网的间歇性可再生能源的功率输出所表现出的不确定性给节点电压、线路载流、电能质量等多种安全运行约束带来了挑战,同时也提高了配电网运行成本。研究RDG接纳能力的提升手段如电压优化、经济调度等正受到越来越多的关注^[2-3]。

在节点数目多、分布式电源接入单机容量小、渗透率高且并网位置分散的配电网中,若全时间尺度对全网进行分析或调控,存在操作难度大、搜索范围广的问题,难以满足优化时间尺度的要求^[4]。为了解决该问题,提升配电网调控的有效性,基于全局优化和区域自治的分层分区优化调度方法^[5]应运而生。该类方法求解的前提是配电网具备合理的区域划分方案,分区的结果决定了最终调控的效果。目前关于配电网分区的研究较少,主要是因为配电网大多呈放射状或树状,可自然形成分区。但在大量RDG接入配电网的情况下,按照传统的自然分区方法难以对配电网各分区进行协调控制,故研究配电网的分区方法十分必要^[6]。输电网无功电压分区的目的在于生成的分区内部强耦合、分区间近似解耦,区域内部具备一定的功率储备^[7],分区的目的与配电网有功无功分区相似^[5-6],且输、配电网的结构存在一定的相似性,故输电网无功分区的方法在某些

情况下适用于配电网无功电压分区和有功分区,如最早用于输电网的基于灵敏度矩阵的分区方法已经广泛应用于配电网^[8]。间歇性可再生能源的出力特性对配电网有功和无功分区提出了更高的要求。实现配电网合理分区的目标是:解决当前电力系统分区方法存在的问题;应对间歇性可再生能源接入给分区带来的挑战。

目前,电力系统分区的主流方法可以分为聚类分区^[9]、优化分区^[10]以及基于复杂网络理论的分区方法^[8]等。多数文献在进行分区研究时,追求分区内部在结构上的紧密性和具备一定的功率储备。基于雅可比矩阵定义电气距离再使用聚类方法进行分区能有效提高分区内部结构的紧密性^[9],但常规聚类方法确定的分区数目常缺乏确切的物理含义,故文献^[8]引入由Girvan和Newman提出的基于模块度 Q 函数的GN算法^[11],其与电力网络结合的优势在于该方法的准确度较高,可自动确定分区数目。但基于模块度的分区方法存在分辨率限制,无法识别较小的分区,算法复杂程度大,仅适用于中小型网络。为了实现分区内部的功率平衡,针对现有电气距离定义仅片面地对节点电压、阻抗等变量进行分析考虑的情况,文献^[12]基于潮流追踪从功率传输的角度定义了节点间距离,并利用凝聚算法进行分区,但该方法无法适用于可再生能源接入的配电网,也无法满足电力系统对分区的结构与功率储备需求。为此,文献^[8]同时考虑了节点间电气耦合程度和分区控制对区域功率平衡能力的要求,提出了区域负荷功率裕度的概念,采用多目标自适应进化规划算法求解模型,但该方法需要人为选择分区结果,易陷入局部最优。综上,传统分区方法存在无法兼顾算法精度和复杂度,对电力系统分区在结构、能量层面以

收稿日期:2021-06-10;修回日期:2021-09-30

基金项目:福建省自然科学基金资助项目(2017J01480)

Project supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province(2017J01480)

及功率储备等方面考虑不够全面等问题。

上述分区方法出现功率不平衡、分区间耦合度高的原因主要在于忽略了能量传输的有向特性,导致分区后各区域存在较大的能量耦合,该现象说明分区联络线附近可能存在大量的分布式电源,或分区内部电源输出与负荷需求不匹配。故本文利用潮流追踪算法^[13]构建电源供能网络和负荷吸能网络,引入了复杂网络理论中的稳定度指标以量化节点与节点、节点与分区的能量联系。并基于模块度和稳定度指标定义适用于配电网分区的标签传播算法。接入间歇性 RDG 的配电网各时段负荷需求不断变化,固定分区方案无法保证在全时段满足分区内部功率平衡和功率储备的需求,配电网各分区的划分应随系统运行的改变而进行相应的调整^[6]。本文通过生成概率预测场景,与标签传播算法相结合,以动态分区的形式应对可再生能源的不确定性,最后通过算例分析验证了本文方法的合理性和有效性。

1 改进的标签传播算法

标签传播算法由 Raghavan 提出,其基本思想是利用样本间的关系构建关系完全图模型,在完全图中,节点包含已标注和未标注数据,其连边表示 2 个节点间的相似度,节点的标签按相似度传递给其他节点^[14]。标签传播模型如图 1 所示,节点 1、2 为标签 1,节点 3—5 为标签 2,此时节点 6 未被赋予标签,若节点 6 与标签 2 所包含的节点相似度最高,则将其标签设置为标签 2。

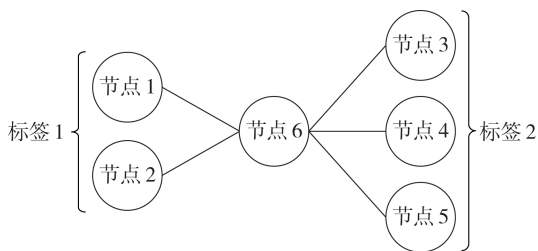


图1 标签传播模型

Fig.1 Model of label propagation

构建配电网节点样本的关系完全图除需要考虑结构信息外,还需要关注配电网节点自身属性和节点间互相耦合的程度^[15]。

为了降低算法的复杂度,本文首先定义配电网的标签传播起点,然后利用标签传播算法特性给出适用于配电网的标签传播更新规则。本文提出的方法适用于配电网有功分区和无功分区,限于篇幅,本文仅给出关于有功分区相关指标的定义。

1.1 标签传播起点选择

标签传播起点的标签会按照传播规则向其周边节点扩散,相同标签的节点最终形成一个分区。对于含多个分布式电源的配电网,将出力较大、供给负

荷数目较多的电源点设置为标签传播起点,能够保证电源点处于分区靠近中心的位置,为维持分区内功率平衡和分区间在能量层面上的近似解耦提供保障。标签传播起点的个数决定最终的分区间个数,将在 1.3 节予以说明。

为获取电源与负荷间的关系,从而为标签传播起点的选择提供依据,基于文献[13]提出的一种基于潮流分配矩阵的潮流跟踪解析模型及求解算法对潮流进行追踪。以有功潮流追踪为例,算法定义如下:

$$\mathbf{X} = \mathbf{P}_{\text{CG}} \mathbf{P}_{\text{TT}}^{-1} \mathbf{R}^{-1} \quad (1)$$

$$P_{ij} = x_{ij} P_{Lj} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$P_{i \rightarrow s-t} = x_{is} P_{st} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中: $\mathbf{R}$ 为潮流分配矩阵; $\mathbf{P}_{\text{CG}}$ 、 $\mathbf{P}_{\text{TT}}$ 分别为发电机有功出力、节点总注入有功相关的矩阵; $\mathbf{X}$ 为发电机对负荷的分配系数矩阵, x 为矩阵中元素; n 为网络节点数; P_{ij} 为节点 i 上发电机对负荷节点 j 的功率分配, 当节点 i 、 j 同时为电源点或负荷点时 $P_{ij} = 0$; P_{Lj} 为接入节点 j 的负荷大小; $P_{i \rightarrow s-t}$ 为节点 i 上发电机对线路 $s-t$ 的功率分配; P_{st} 为线路 $s-t$ 传输的功率。通过潮流追踪算法,能够直接从潮流或状态估计结果出发,建立潮流追踪的解析模型。

利用潮流追踪量化电源供给负荷的功率,若某节点负荷所需功率全部由同一电源点提供,在满足分区内部功率储备需求的前提下,将该电源点与负荷点归于同一分区可提高分区内部节点的耦合程度。同样可利用潮流追踪确定各电源点间的关系。上文提及应将出力较大、供给负荷数目较多的电源点设置为标签传播起点,即并非所有电源点都为标签传播起点。下面为标签传播起点选择的算法。

1) 若电源 S_i^e 输出功率供给范围包含电源 S_j^e , 则生成电源集合 $S^E = \{S_i^e, S_j^e\}$; 若某电源输出功率供给范围不包含任何其他电源, 则电源集合便只含该电源。

2) 基于潮流追踪算法对配电网进行全网搜索, 得到 $\{S_1^E, S_2^E, \dots, S_{n_s}^E\}$, 其中 n_s 为电源集合的个数。若电源集合中的元素重复, 则用其并集代替原来的电源集合, 得到 $\{S_1^E, S_2^E, \dots, S_{m_s}^E\}$, 其中 m_s 为不存在重复元素的电源集合的个数。

3) 取 $\{S_1^E, S_2^E, \dots, S_{m_s}^E\}$ 中各电源集合供给功率高、范围大、影响力高的电源点作为标签传播起点 $O = \{o_1, o_2, \dots, o_{m_s}\}$ 。

基于链接分析的 PageRank 算法能够根据电源的出力和功率供给范围计算出电源的关键度^[16], 具体算法描述见 1.2 节。供给功率高、范围大的电源点将得到较高的关键度, 故选择电源集合中关键度最高的节点作为标签传播起点, 如图 2 所示。在全网

搜索后可以得到电源集合 $\{\{1, 2\}, \{2, 4\}, \{3\}\}$,合并处理后得到电源集合 $\{\{1, 2, 4\}, \{3\}\}$,若电源2的关键度在电源集合 $\{1, 2, 4\}$ 中最高,则 $O=\{2, 3\}$ 。本文采用的标签传播算法趋向于将供给功率高、范围大的电源点的标签扩散到能量、结构联系紧密的节点上,标签传播起点选择算法为标签传播奠定了基础。

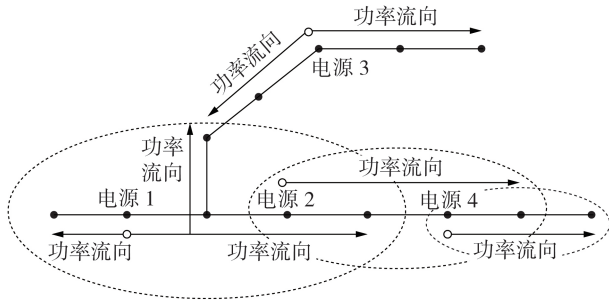


图2 标签传播起点选择

Fig.2 Selection of starting point for label propagation

1.2 标签传播更新顺序

在标签传播的过程中,根据节点影响力的大小进行更新,能够避免不必要的标签更新和标签“逆流”现象^[15],使用标签传播算法进行配电网分区时,首先应对配电网的节点影响力进行计算,优先对影响力较高的节点进行标签更新。

为了保证配电网分区的稳定性,应优先纳入“枢纽”节点即出力较高的电源点和需求较大的负荷点。基于链接分析的PageRank算法思路,先计算发电机对于系统线路的能量分配指定节点链接边权,再考虑电源对各个负荷的能量分配以确定负荷节点的重要程度,最终建立基于电网加权有向图链接强度的节点的重要度计算评价模型,完成配电网中各节点的关键度计算,其定义如下。

在具有 n 个节点的电力网络中,若节点 v 与节点 $v_1, v_2, \dots, v_l$ 存在链接,则使用 $\omega_{\text{line}}(v_i, v)$ 表示链接节点算法计算节点关键度的公式如式(4)所示。

$$P_T(v) = \frac{1-\sigma}{n} + \sigma \sum_{i=1}^l \omega'_{\text{load}}(v_i) \frac{\omega_{\text{line}}(v_i, v)}{S_{\text{out}}(v_i)} P_T(v_i) = \frac{1-\sigma}{n} + \sigma \sum_{i=1}^l \omega'_{\text{load}}(v_i) \frac{\omega_{\text{line}}(v_i, v)}{\sum_{j=1}^{m_i} \omega_{\text{line}}(v_i, z_j)} P_T(v_i) \quad (4)$$

式中: $P_T(v_i)$ 为指向节点 v 的节点源 v_i 自身的节点关键度; σ 为算法阻尼系数,用来保证算法的收敛性; $S_{\text{out}}(v_i)$ 为节点源 v_i 的出链强度; $\omega'_{\text{load}}(v_i)$ 为归一化后的节点负荷权重; m_i 为与 v_i 直接相连节点的数量,详细推导可参考文献[16],本文不再赘述。

根据上述算法,出力较高的电源点或需求较大的负荷点会得到较高的关键度,此类节点为分区的核心部分。为了避免不必要的标签更新,应尽早将

其纳入分区,故本文按照关键度大小确定标签传播顺序,优先将关键度较大的节点纳入分区。

1.3 标签传播更新规则

传统分区方法一般将电力系统视作一个有机的连接网络,但分区时未考虑网络能量流动的方向性。分区时从配电网物理结构特性、能量传输方向与大小及功率储备等角度判断节点是否可以加入分区。在标签传播更新规则中,将增益函数与损失函数作为标签传播的判断依据可提高标签传播的速度。

标签传播的更新规则流程图见附录A图A1。在进行标签传播更新前,首先应选择标签传播起点,确定标签传播顺序;在标签传播更新的过程中,将具备相同标签的节点设置为一个分区,仅对与现有分区直接相连的且未被赋予标签的节点进行标签传播以保证分区的内部连通性;在标签传播更新结束后,个别关键度低的节点虽然与某分区在结构与能量上的联系较为紧密,但加入该分区后会导致分区内部功率储备不足,最终导致节点无法纳入分区,为了实现有效调控,将其纳入与该节点直接相连且功率储备较高的分区即可。由于最终各节点只会纳入1个标签传播起点所在分区,所以标签传播起点的个数等于配电网分区个数。

将无法进行标签传播的节点纳入排除节点列表的原因主要是此时若该节点加入分区后功率储备不足或与该分区联系不够紧密。在下一轮标签更新后,分区内部的功率储备或结构紧密程度会发生改变,该节点加入此分区的增益值和损失值随之变化。

2 基于模块度与稳定度推演的增益函数与损失函数

本文选取复杂网络理论中的模块度与稳定度作为分区质量的评价指标,并将其与配电网结构与功能特征相结合,基于模块度和稳定度指标推演出增益函数与损失函数。基于雅可比矩阵的模块度指标在电力系统分区领域中应用较为广泛,该指标能够有效计算分区在结构上的紧密程度。但此类方法对于大规模分区具有倾向性,难以识别小规模分区,具有分辨率限制^[11]。

电网在实际运行时其能量流动具备方向性,为有效利用能量传递特征,本文引入社区发现领域中的稳定度指标以量化分区与节点、节点与节点在能量上的联系紧密程度。

2.1 模块度函数

模块度 Q 函数的GN算法由Girvan和Newman提出^[11],并被广泛应用于复杂网络社区发现中。模块度函数定义如下:

$$\rho = \frac{1}{2m} \sum_i \sum_j \left(A_{ij} - \frac{k(i)k(j)}{2m} \right) \delta(i, j) \quad (5)$$

$$2m = \sum_i \sum_j A_{ij} \quad (6)$$

$$k(i) = \sum_j A_{ij} \quad (7)$$

式中: A_{ij} 为连接节点 i 和节点 j 的边的权重; $2m$ 为网络中所有边的权重之和; $k(i)$ 为节点 i 连接的所有边权重之和, 即点权重。若节点 i 和节点 j 被分为一个分区, 则 $\delta(i, j) = 1$, 否则 $\delta(i, j) = 0$ 。实现分区的前提是计算线路权重矩阵 A 。在电力系统分区领域中, 基于模块度的算法大多使用雅可比矩阵推导线路权重。基于雅可比矩阵的线路权重矩阵 A 推导如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial U} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial U} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{P\theta} & S_{Q\theta} \\ S_{PU} & S_{QU} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$A_{ij} = \frac{S_{PU, ij}}{\sum_g S_{PU, ig}} \quad (10)$$

式中: J 为雅可比矩阵; P 、 Q 、 θ 、 U 分别为有功功率、无功功率、节点相角和节点电压矩阵, “ Δ ” 表示相关变量的增量; $S_{P\theta}$ 、 S_{PU} 、 S_{QU} 、 $S_{Q\theta}$ 为灵敏度矩阵, 即潮流方程雅可比矩阵中对应有功-相角、有功-电压、无功-电压、无功-相角的参数。通过式 (10) 推导得到 A 。若是对配电网进行无功分区, 则可使用灵敏度矩阵 S_{QU} 进行 A 的推导。

基于雅可比矩阵的模块度指标仅是一个衡量分区结构上联系紧密程度的工具。为实现分区, 通常需与其他算法结合, 如利用排列组合、贪婪算法等将各节点组合成新的分区, 并计算相应的模块度指标, 通常以模块度最大作为分区完成条件^[8]。

2.2 稳定度函数

稳定度指标 $P_c^{\text{erm}}(i)$ 不仅要考虑节点在分区内的作用, 同时要考虑节点被其他分区吸引的程度, 是一种较理想的社区评价指标, 其定义如下:

$$P_c^{\text{erm}}(i) = \frac{I_c(i)}{E_{\max}^c(i) D(i)} - (1 - C_{\text{in}}^c(i)) \quad (11)$$

式中: c 为节点 i 所归属的分区; $I_c(i)$ 为内度, 指节点 i 与分区 c 各节点的连线条数, $C_{\text{in}}^c(i)$ 为社区内聚集系数, 量化了节点 i 与属于分区 c 的节点之间相互连接的程度, 以上两者体现了节点 i 在分区 c 内的作用; $E_{\max}^c(i)$ 为最大外度, 指节点 i 在其他分区的参与量, 即节点 i 与除分区 c 外的其他分区间的最大连接条数; $D(i)$ 为与节点 i 的连边数目。

稳定度示意图如图 3 所示, 图中 c 、 a 、 d 为区域标志, 节点 i 与分区 c 节点的连线条数为 3, 故 $I_c(i) = 3$ 。除分区 c 外, 节点 i 与分区 d 有 4 条连线, 与分区 a 有 2

条连线, 连线条数选取最大数 4 条, 故 $E_{\max}^c(i) = 4$, 连边总数 $D(i) = 9$ 。在社区内聚集系数 $C_{\text{in}}(i)$ 取值相同的情况下 $P_c^{\text{erm}}(i) < P_d^{\text{erm}}(i)$, 说明此时节点 i 与分区 d 联系更为紧密。

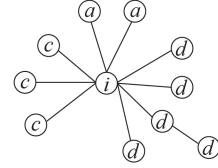


图 3 稳定度示意图

Fig.3 Schematic diagram of permanence

配电网的主要节点可分为源、荷 2 类, 对于单一节点, 其向外呈现为供能或吸能特性, 且节点之间的能量传递具备方向性, 该特性能够很好地与稳定度指标相结合。但配电网中各节点的交互功率大小存在差异使得支路自然具备权重属性, 故稳定度指标中仅考虑连边数目而未考虑边权重是不够的。

通过潮流追踪算法对配电网进行双向追踪, 能够得出电源供能网络和负荷吸能网络。将稳定度函数与全局能量流动特征相结合可以量化分区与分区、分区与节点间的紧密程度, 稳定度定义如下:

$$I_c(i) = \sum_{j \in S(c), i \neq j} |P_{ij}| \quad (12)$$

$$T(i) = |P_i| \quad (13)$$

$$E_{\max}^c(i) = \sum_{j \in S_{\max}(i)} |P_{ij}| \quad (14)$$

式中: $S(c)$ 为分区 c 的节点集; P_i 为节点 i 吸收或发出的功率; $S_{\max}(i)$ 为除分区 c 外, 与节点 i 直接相连且能使 $E_{\max}^c(i)$ 取得最大值的分区包含的节点集合, 如图 3 中分区 d 包含的节点集合, 若除分区 c 外无其他分区与节点 i 直接相连, 则设置 $S_{\max}(i)$ 为除分区 c 外所有节点的集合。

模块度函数已经考虑了分区内部的物理结构特性, 且单纯以潮流追踪算法量化节点与分区在能量联系上的紧密程度的缺陷在于无法判断分区内部是否有足够的功率储备应对区域内部负荷变化。为了更好地满足分区的功能需求, 对 $C_{\text{in}}^c(i)$ 从功率储备的角度进行相应的改进:

$$C^c(i) = 1 - C_{\text{in}}^c(i) = 1 - \frac{\sum_{l \in S_{\text{load}}(i)} P_l}{\sum_{k \in S_{\text{source}}(i)} P_{k, \max}} \quad (15)$$

式中: $S_{\text{source}}(i)$ 为节点 i 所在分区的内部电源点集合; $S_{\text{load}}(i)$ 为节点 i 所在分区内的负荷点集合; $P_{k, \max}$ 为电源节点 k 可输出的最大功率。 $C^c(i)$ 越大, 说明节点 i 加入分区后的功率储备越大。

2.3 增益函数与损失函数

配电网在进行标签传播分区时,节点传播策略由2种动作生成,分别是更新节点标签和无动作,需要加入判断条件以决定传播策略。本文在文献[17]的基础上,根据配电网结构、能量特征,并考虑功率储备,推演配电网中基于模块度和稳定度指标的增益函数 $G_c(i)$ 和损失函数 $L_c(i)$ 。同样以有功分区为例,定义如下:

$$G_c(i) = g_c^e(i) + \frac{1}{n_c} g_c^p(i) \quad (16)$$

$$g_c^e(i) = \min \left\{ \left| \frac{I_c(i)}{E_{\max}^c(i) T(i)} \right|, 1 \right\} \quad E_{\max}^c(i) \neq 0 \quad (17)$$

$$g_c^p(i) = \frac{1}{2m} \sum_{j \in S(c)} \left(A_{ij} - \frac{k(i)k(j)}{2m} \right) \quad (18)$$

$$L_c(i) = l_c^e(i) + \frac{1}{n_c} l_c^p(i) \quad (19)$$

$$l_c^e(i) = \alpha \frac{\sum_{l \in S_{\text{load}}(i)} P_l}{\sum_{k \in S_{\text{source}}(i)} P_{k, \max}} \quad (20)$$

$$l_c^p(i) = \frac{1}{2m} \sum_{j \in S_{\max}(i)} \left(A_{ij} - \frac{k(i)k(j)}{2m} \right) \quad (21)$$

式中: $g_c^e(i)$ 、 $l_c^e(i)$ 和 $g_c^p(i)$ 、 $l_c^p(i)$ 分别以稳定度指标和模块度指标为基础推演得到, $g_c^e(i)$ 和 $g_c^p(i)$ 分别为节点 i 与分区 c 在能量和结构上的联系紧密程度,与 $g_c^p(i)$ 相反, $l_c^e(i)$ 为节点 i 与除分区 c 外的区域在结构上的联系紧密程度, $l_c^e(i)$ 为分区 c 纳入节点 i 后的功率储备情况,其值越高说明分区内部功率储备越低; n_c 为分区 c 包含的节点数目; α 为可调整参数,其值越大表示对分区 c 的功率储备要求更高。 $G_c(i)$ 值越大,说明节点 i 与分区 c 在结构和能量上的联系越紧密; $L_c(i)$ 值越大,说明节点 i 在结构上与分区 c 联系越不紧密或者是加入分区 c 后会造成功率储备减小。

在对节点 i 进行标签传播前,先计算节点 i 加入分区 c 的增益函数 $G_c(i)$ 和损失函数 $L_c(i)$,若增益函数大于损失函数,则说明节点与分区 c 在功率与结构上联系紧密,此时节点 i 加入分区 c 是具备可行性的;否则说明两者在结构上联系不紧密或分区 c 纳入节点 i 后可能造成功率储备不足。

3 基于不确定预测场景集和标签传播算法的配电网动态分区方法

配电网固定分区无法适应可再生能源接入造成的配电网运行方式改变与负荷变化导致的潮流分布波动^[17],原因在于:①出力存在波动性的可再生能源导致固定分区方案无法时刻维持分区内部功率平衡;②可再生能源出力预测误差可能导致分区方案

不能满足实际需求。针对问题①,可以利用标签传播算法,通过预测风光出力在一定时间间隔内更新分区;针对问题②,分区时需考虑 RDG 的预测误差,降低其带来的影响。

为了应对 RDG 预测误差对分区造成的影响,可利用历史统计信息将 RDG 出力由确定性预测序列转化为出力场景集^[18]。预测场景集如图4所示,图中出力为标么值。以日前分区为例, $U = \{u^1, u^2, \dots, u^{n_u}\}$ 为预测概率场景集, $R = \{p^1, p^2, \dots, p^{n_u}\}$ 为预测场景的概率集,其中 n_u 为预测场景数,图4中预测场景数为4,基于标签传播算法可得到各预测场景下的分区结果,故本文将问题②转化为如何结合不同预测场景下的分区结果,生成有效应对 RDG 随机性的分区方案。

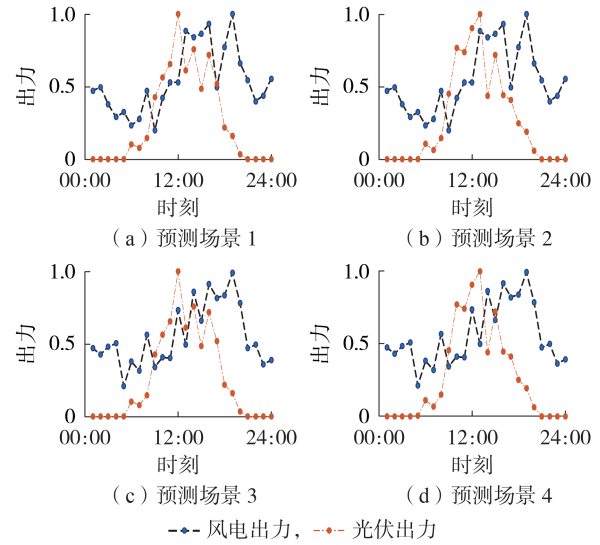


图4 预测场景集

Fig.4 Forecasting scenario set

为了对各预测场景下的分区方案进行有效整合,本文以概率预测场景集 S 中概率最大的预测场景 $s^{\max}$ 确定标签传播起点 $O = \{o_1, o_2, \dots, o_{m_s}\}$,各预测场景均使用 O 作为标签传播起点进行分区,所产生的分区数目相同,不同预测场景集分区的差异在于各节点归属的标签传播起点有所不同。获取各预测场景的分区方案,将其记录于矩阵 B_{c_j} 中。以预测场景概率为权重,加权求得各节点对标签传播起点的归属度矩阵 H ,相应的计算公式如下:

$$B_{c_j} = \begin{bmatrix} b_{11, c_j} & \dots & b_{1m_s, c_j} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{n1, c_j} & \dots & b_{nm_s, c_j} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$H = \sum_{c_j=1}^{n_u} p_{c_j} B_{c_j} = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{1m_s} \\ \vdots & & \vdots \\ h_{n1} & \dots & h_{nm_s} \end{bmatrix} \quad (23)$$

式中:矩阵 B_{c_j} 中元素 b_{ij, c_j} 取值为0或1,若 $b_{ij, c_j} = 1$,则

说明在场景 c_j 下,节点 i 归属于标签传播起点 o_j 所在分区,若 $b_{ij,c_j}=0$,则说明不归属于标签传播起点 j 所在分区;归属度矩阵 H 中元素 h_{ij} 为节点 i 归属标签传播起点 o_j 的概率,将各节点纳入其归属概率最高的标签传播起点便可得到最终分区,根据标签传播算法特性,此算法能够保证最终分区内部的连通性。

4 算例分析

4.1 配电网潮流追踪与各节点关键度计算结果

本文基于附录 A 图 A2 所示的 IEEE 33 节点系统对提出的模型和方法进行验证。选择预测场景 2 的 12:00 进行潮流追踪分析,结果如附录 A 图 A3 所示。为了便于观察,图中只标示出功率供给较高的电源点和需求较大的负荷点,中间条状线越粗,说明传输功率越大。

在配电网电源点众多的情况下,若将各电源点都设置为标签传播起点,则会使分区数目过多,各分区功率交互大,一方面增加了基于分区的分布式调控难度,另一方面可能使分区内部功率储备不足。利用潮流追踪选择标签传播起点的算法避免了功率供给范围互相覆盖的电源点同时成为标签传播起点,能够有效降低分区间的耦合程度。

附录 A 图 A3 中电源 1、16、32 提供了较高的功率输出,负荷 8、16、24、25 吸收了较高的功率,优先将此类节点加入分区中能够尽早使分区成型,避免不必要的标签更新。

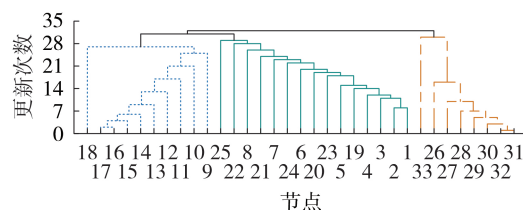
场景 2 下各节点关键度见附录 A 图 A4,电源节点 1、16、32 的关键度较高,主要是由于节点 1 直连主网,节点 16、31 及附近的分布式电源为配电网提供了较多的功率。结合图 A3、图 A4 可得出以下结论:电源的输出越大,供给范围越广,其关键度越高。位置靠近分区中心且具备较高出力的电源能够有效对分区进行调控,将关键度最高的电源点设置为标签传播起点可以有效实现该目的。

4.2 标签传播算法与预测概率场景集的应用

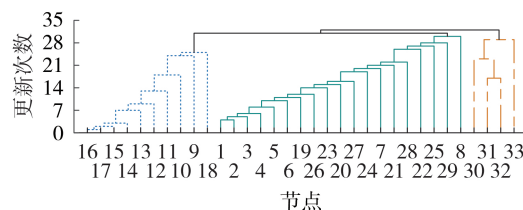
图 5 为预测场景 2 在 04:00、08:00、12:00 和 16:00 时的标签传播结果。结合附录 A 图 A4 可知,标签传播更新顺序大致是按照关键度从大到小的顺序来进行的。

各时刻风光出力存在差异、负荷需求的不断变化造成了分区结果的差异。如节点 28—33 的负荷在 04:00 时需求低,并且该处分区装设有风力发电机和柴油发电机,可以满足较多节点的负荷需求,故此该处分区所含节点数目较其他时刻多。

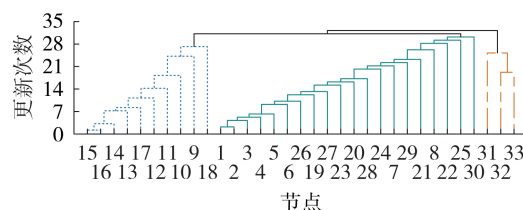
图 6 为节点 8 综合预测场景概率后的分区归属概率示意图。节点 8 归属分区 1 即连接主网所在分区的概率较高,主要是由于分区 2 内风力发电机出力存在波动性,不足以持续满足区域内部的负荷需求,且节点 8 的负荷需求较高,故预测场景下节点 8



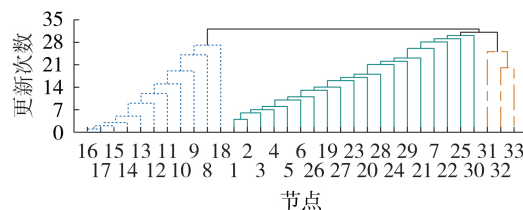
(a) 04:00 时标签传播结果



(b) 08:00 时标签传播结果



(c) 12:00 时标签传播结果



(d) 16:00 时标签传播结果

— 分区 1, 分区 2, — 分区 3

图 5 各分区的合并过程

Fig.5 Agglomeration process of areas

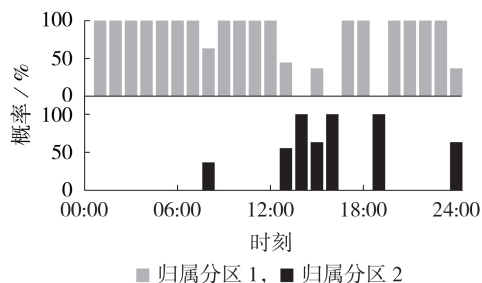


图 6 节点 8 分区归属概率

Fig.6 Partition attribution probability of Bus 8

在风力发电机出力较低时会分配到直连主网的分区 1,在风力发电机出力较高时会分配到分区 2。为了尽可能降低可再生能源接入预测误差对分区造成的影响,本文将其对应节点纳入归属概率高的分区。

4.3 基于标签传播算法的动态分区结果与对比

图 7 为 04:00、08:00、12:00 和 16:00 时的最终分区结果,可再生能源接入配电网后,配电网分区结果会随时间发生变化。图中,IL、PV、W、ESS、DE 分别表示可中断负荷、光伏发电、风力发电、储能系统和

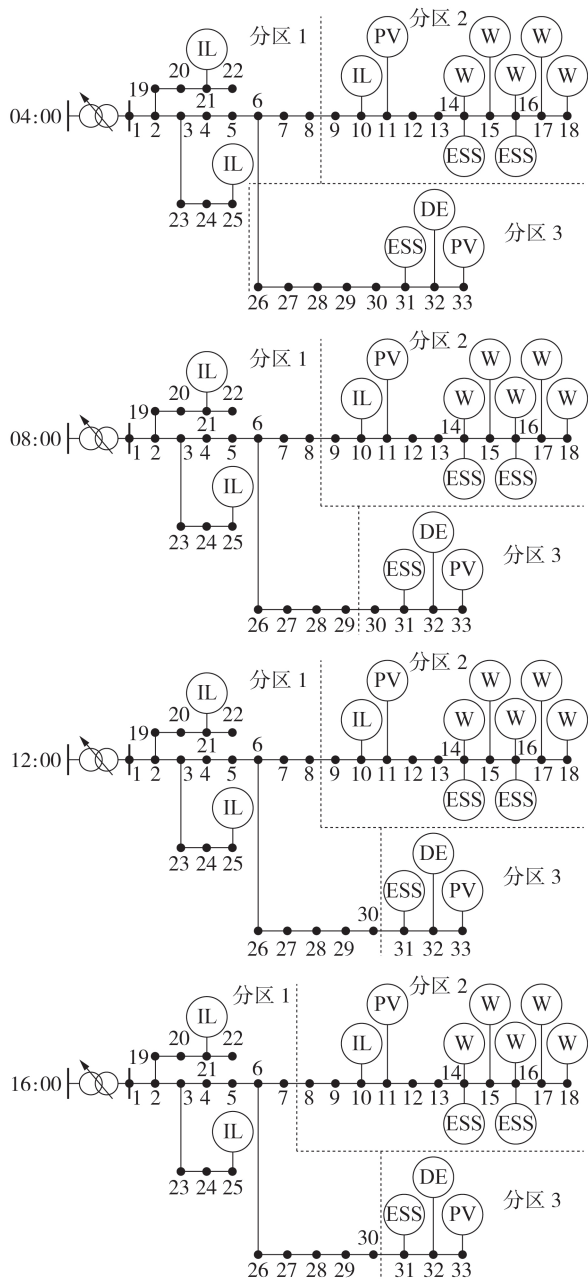


图7 部分时刻分区结果

Fig.7 Partition results for partial time

柴油发电机。

由于本文提出的方法与文献[12]所提方法(记为传统方法1)均基于潮流追踪算法来量化节点在能量上的紧密程度,故将本文方法与传统方法1的分区结果进行对比分析。传统方法1通过潮流追踪算法获得节点间功率联系的紧密程度,并以此为基础,定义节点之间的距离,进而应用分层凝聚对系统进行分区。该方法在实际应用中的缺点在于:①需要提前限定分区数目上限;②在配电网接入分布式电源容量小、数目多的情况下会产生较多的小分区;③并未考虑分区的物理结构特征和内部功率平衡情况。

传统方法1的分区结果如附录A图A5及表A1

所示。表中区域自供给功率为区域内部的电源供给内部负荷的功率,可由潮流追踪算法得出;区域自供给率为区域自供给功率与区域功率需求之间的比值。表中之所以会出现区域自供给功率略大于区域功率需求,是因为该区域内部电源为负荷提供了绝大部分功率,且在区域内部功率传输的过程中出现了网络损耗。由表A1可知,传统方法1得出的分区3内部电源最大可供给功率小于内部功率需求,分区2与分区3的区域自供给率相比本文方法得出的结果略低。

由于传统基于潮流追踪的算法以节点间能量联系紧密程度定义节点间距离,并未考虑分区内部功率的储备需求,可能导致在完成分区后区域内部的最大电源供给功率仅勉强满足负荷需求,在负荷出现向上波动或电源功率骤降时,以分区包含的节点所在范围实现就近平衡存在难度。

文献[8]提出的基于灵敏度矩阵的方法(记为传统方法2)采用改进的模块度函数分区方法,其优势是物理意义明确,但难以保证分区内部的功率储备。基于模块度的分区方法对大规模分区具有倾向性,即较大规模分区会产生较高的模块度,具有分辨率限制。传统方法2的分区结果如附录A图A6所示,分区结果出现了2个仅包含2个节点的小分区,其余29个节点归于1个分区。该类问题的改进方法主要有重新划分区域、合并部分分区及限制分区数目等^[6]。

对传统方法2进行改进后得出的分区结果如图8及表1所示,由表1可得改进的传统方法2得到的

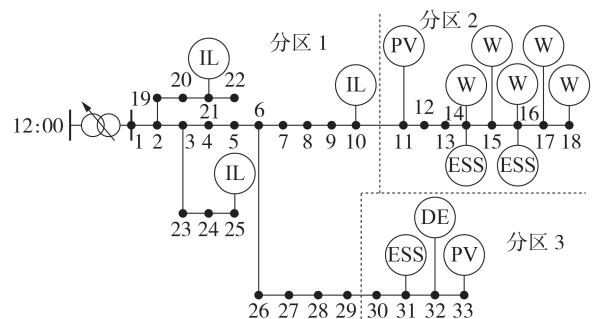


图8 改进的传统方法2的分区结果

Fig.8 Partition results of improved traditional Method 2

表1 分区方法对比

Table 1 Comparison between partition methods

指标	本文方法			改进的传统方法2		
	分区1	分区2	分区3	分区1	分区2	分区3
区域内部功率需求/kW	2620	675	420	3445	120	150
区域自供给功率/kW	2383	679.7	420.2	2869.2	120	102
区域自供给率/%	91.0	100.7	100.0	83.3	100.0	68.0
区域内部电源最大可供功率/kW	直连主网	886.4	539.8	直连主网	503	216.5

分区2的内部功率需求为120 kW,但区域内部电源最大可供给功率达到了503 kW,分区内部的资源可能得不到有效利用,且分区3的区域自供给率仅为68%,其余32%的功率由分区1提供,分区间耦合度较高。由图8可知,该分区方案下接入可中断负荷的节点10、接入光伏的节点11均处于分区边缘,在实际运行过程中,流经分区联络线的功率可能较大,无法较好地达到分区间弱耦合的要求。

4.4 实际10 kV配电网与PG&E 69节点系统分析

为了进一步证明本文所提方法的有效性,对某地区10 kV实际配电网进行分析,该网络包含43个节点、42条支路,给定的有功、无功负荷功率分别为6.38 MW和3.09 Mvar,实际配电系统结构如附录B图B1所示。

基于本文提出的分区方法对配电网进行分区后的部分结果如附录B图B2、表B1和表B2所示。值得注意的是,基于本文提出的分区方法,在20:00、21:00时将整个配电网设置成1个分区,这是由于此时RDG出力低,配电网功率来源以大电网直供方式为主,为了更好地消纳RDG,此时不宜对配电网进行分区。结果表明本文方法能够较好地适应RDG出力不同对配电网分区的要求。

为了进一步体现本文方法的优势,选取PG&E 69节点系统对基于标签传播的动态分区方法进行验证,限于篇幅,详见附录C。

5 结论

本文提出的分区方法为配电网区间协调和区内自治的分层分区调控算法奠定了基础。为了有效利用配电网的能量传输信息,本文引入了复杂网络理论中的稳定度指标和标签传播算法,结合配电网能量传输与结构特点完成了适用于配电网分区的标签传播算法的定义。为应对RDG的不确定性,将本文的标签传播分区算法与预测场景生成法相结合进行动态分区,结果表明:

1)利用潮流追踪算法实现源荷节点间的能量传递计算,将配电网转化为有权有向网络,并与稳定度指标结合,能够实现分区的高功率储备和高自供给率提供量化工具;

2)增益函数和损失函数能够有效量化节点与区域在结构和功能上的联系,与标签传播相结合可以有效降低分区方法的复杂度;

3)本文提出的动态分区方法能够较好地适应可再生能源出力波动造成的配电网供需平衡、供大于需等场景,且具备一定的应对配电网接入可再生能源不确定性的能力;

4)本文提出的分区方法适用于有功分区与无功分区,但由于配电网中有功电源与无功电源分布于

配电网的位置、容量和数量不同,在分区有功平衡的情况下无法保证无功平衡,故如何得到在有功、无功层面上同时满足结构、能量以及功能需求的分区,是本文下一步的研究内容。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 崔杨,周慧娟,仲悟之,等. 考虑源荷两侧不确定性的含风电电力系统低碳调度[J]. 电力自动化设备,2020,40(11):85-93.
CUI Yang, ZHOU Huijuan, ZHONG Wuzhi, et al. Low-carbon scheduling of power system with wind power considering uncertainty of both source and load sides[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 85-93.
- [2] 楼翼嗣,马光,郭创新,等. 电网运行全过程风险协调控制体系与架构设计[J]. 电力系统自动化,2020,44(5):161-170.
LOU Xiansi, MA Guang, GUO Chuangxin, et al. System and framework design of risk coordination control for whole operation process of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 161-170.
- [3] 卫志农,裴蕾,陈胜,等. 高比例新能源交直流混合配电网优化运行与安全分析研究综述[J]. 电力自动化设备,2021,41(9):85-94.
WEI Zhinong, PEI Lei, CHEN Sheng, et al. Review on optimal operation and safety analysis of AC/DC hybrid distribution network with high proportion of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 85-94.
- [4] 丁明,方慧,毕锐,等. 基于集群划分的配电网分布式光伏与储能选址定容规划[J]. 中国电机工程学报,2019,39(8):2187-2201.
DING Ming, FANG Hui, BI Rui, et al. Optimal siting and sizing of distributed PV-storage in distribution network based on cluster partition[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2187-2201.
- [5] 孟繁星,孙英云,蒲天骄,等. 考虑区域自治能力的主动配电网分层优化调度[J]. 电力系统自动化,2018,42(15):70-76.
MENG Fanxing, SUN Yingyun, PU Tianjiao, et al. Hierarchical optimal scheduling model for active distribution network considering regional autonomy ability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 70-76.
- [6] 林少华,吴杰康,莫超,等. 基于二阶锥规划的含分布式电源配电网动态无功分区与优化方法[J]. 电网技术,2018,42(1):238-246.
LIN Shaohua, WU Jiekang, MO Chao, et al. Dynamic partition and optimization method for reactive power of distribution networks with distributed generation based on second-order cone programming[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 238-246.
- [7] 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.
- [8] 肖传亮,赵波,周金辉,等. 配电网中基于网络分区的高比例分布式光伏集群电压控制[J]. 电力系统自动化,2017,41(21):147-155.
XIAO Chuanliang, ZHAO Bo, ZHOU Jinhui, et al. Network partition based cluster voltage control of high-penetration distributed photovoltaic systems in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 147-155.
- [9] 刘海涛,许伦,郝思鹏,等. 基于配电网分区的分布式混合储能

- 优化方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 137-145.
- LIU Haitao, XU Lun, HAO Sipeng, et al. Optimization method of distributed hybrid energy storage based on distribution network partition[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 137-145.
- [10] 杨彪, 颜伟, 莫静山. 考虑源荷功率随机性和相关性的主导节点选择与无功分区方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(11): 61-67.
- YANG Biao, YAN Wei, MO Jingshan. Pilot-bus selection and network partitioning method considering randomness and correlation of source-load power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 61-67.
- [11] GIRVAN M, NEWMAN M E J. Community structure in social and biological networks[EB/OL]. [2021-06-10]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12060727/>.
- [12] 宫一玉, 吴浩, 杨克难. 一种基于潮流追踪的电力系统无功控制分区方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(9): 29-33, 122.
- GONG Yiyu, WU Hao, YANG Kenan. A network partition method for power system reactive power control based on power flow tracing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9): 29-33, 122.
- [13] 谢开贵, 李春燕, 赵渊, 等. 电力系统功率分配的解析模型和算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 30-34.
- XIE Kaigui, LI Chunyan, ZHAO Yuan, et al. Efficient analytical model and algorithm for distributing power using the downstream distribution matrix[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 30-34.
- [14] 张俊丽, 常艳丽, 师文. 标签传播算法理论及其应用研究综述[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(1): 21-25.
- ZHANG Junli, CHANG Yanli, SHI Wen. Overview on label propagation algorithm and applications[J]. Application Research of Computers, 2013, 30(1): 21-25.
- [15] 刘世超, 朱福喜, 甘琳. 基于标签传播概率的重叠社区发现算法[J]. 计算机学报, 2016, 39(4): 717-729.
- LIU Shichao, ZHU Fuxi, GAN Lin. A label-propagation-probability-based algorithm for overlapping community detection[J]. Chinese Journal of Computers, 2016, 39(4): 717-729.
- [16] 王佳裕, 顾雪平, 王涛, 等. 一种综合潮流追踪和链接分析的电力系统关键节点识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 22-29.
- WANG Jiayu, GU Xueping, WANG Tao, et al. Power system critical node identification based on power tracing and link analysis method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 22-29.
- [17] 许宇光, 蒋飞, 朱恩强, 等. 基于个体稳定度博弈的动态社区发现算法研究[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(4): 763-769.
- XU Yuguang, JIANG Fei, ZHU Enqiang, et al. Research on dynamic community discovery algorithm based on individual stability game[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(4): 763-769.
- [18] 张俊涛, 程春田, 申建建, 等. 考虑风光不确定性的比例可再生能源电网短期联合优化调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5921-5932.
- ZHANG Juntao, CHENG Chuntian, SHEN Jianjian, et al. Short-term joint optimal operation method for high proportion renewable energy grid considering wind-solar uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5921-5932.

作者简介:



刘丽军

刘丽军(1982—),女,福建莆田人,副教授,博士研究生,主要研究方向为电力系统规划与运行、分布式发电技术、微电网的运行与控制(E-mail:liulijun0120@fzu.edu.cn);

吴桐(1997—),男,福建漳州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统规划、运行及优化等(E-mail:wuutoong@foxmail.com)。

(编辑 李玮)

Dynamic partitioning method of distribution network based on label propagation

LIU Lijun, WU Tong, WENG Handi, ZHENG Wendi, XU Qifeng

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In order to achieve the goals of strong coupling within partition, low coupling between partitions and sufficient power reserve inside partition in terms of structure and energy for partitioning of distribution network connected with RDG(Renewable Distributed Generation), in addition to the modularity index widely used in partitioning of power system, the label propagation algorithm and permanence index in complex network theory are introduced. In order to reduce the coupling degree of energy and structure between partitions and improve the control ability of the internal power supplies of partitions after partitioning, a label propagation algorithm suitable for distribution network partitioning is defined. The power supply and the load energy absorption networks of distribution network are obtained by using power flow tracking algorithm. Based on this, the permanence index is defined to quantify the tightness degree about energy of bus to bus and bus to partition. Combined with modularity index based on sensitivity matrix, the judgment basis of label propagation such as gain and loss function is deduced from the point of structure and function. Finally, considering the impact of RDG accessed to distribution network on partition, the label propagation algorithm is combined with prediction scenario construction method of RDG output, and the ability of the partition to deal with the uncertainty of RDG is improved in form of dynamic partitioning, which provides theoretical support for hierarchical partition regulation methods.

Key words: distribution network; label propagation algorithm; modularity; permanence; power flow tracing; dynamic partitioning

附录 A

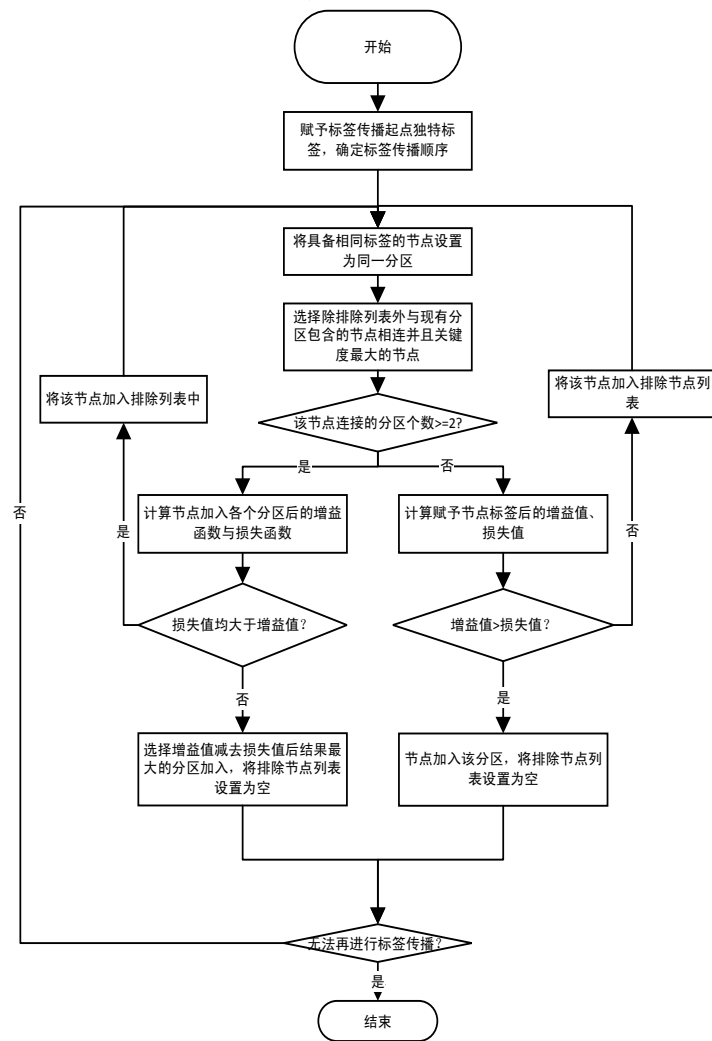


图 A1 标签传播方法流程图

Fig.A1 Flowchart of label propagation method

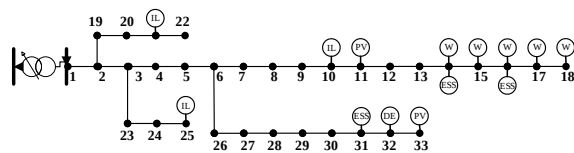


图 A2 IEEE 33 节点系统结构

Fig.A2 Structure of IEEE 33-bus system

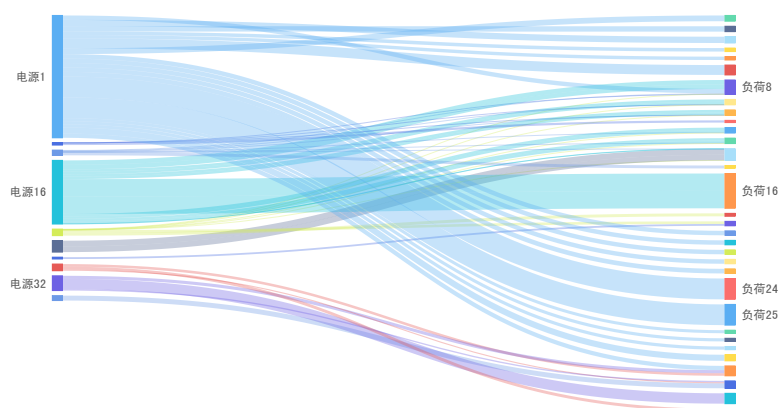


图 A3 潮流追踪结果

Fig.A3 Results of power flow tracing

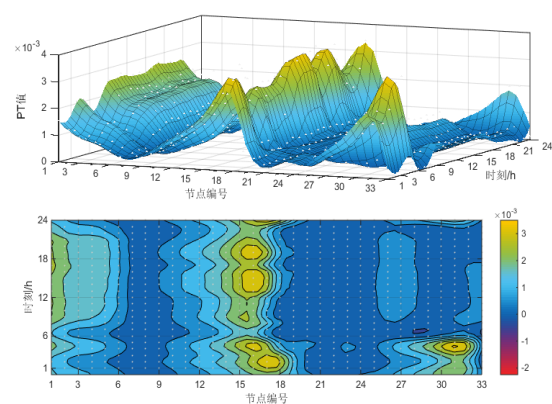


图 A4 关键度计算结果

Fig.A4 Criticality calculation result

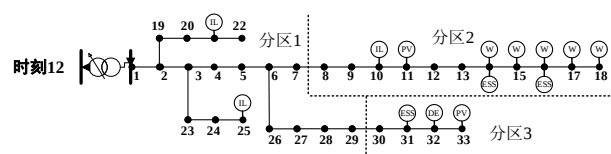


图 A5 方法 1 分区结果

Fig.A5 Partitions of method 1

表 A1 分区方法对比
Table A1 Comparison of partitions

指标	本文方法			传统方法 1		
	分区 1	分区 2	分区 3	分区 1	分区 2	分区 3
区域内部功率需求/kW	2620	675	420	2220	875	620
区域自供给功率/kW	2383	679.7	420.2	2301.3	713.3	439.8
区域自供给率/%	91.0	100.7	100.0	103.7	81.5	70.9
区域内部电源最大可供给	直连			直连		
功率/kW	主网	886.4	539.8	主网	886.4	539.8

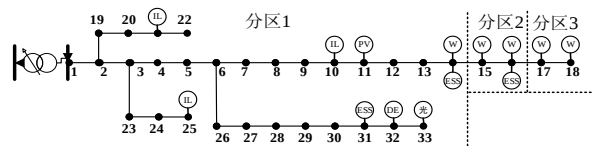


图 A6 传统方法 2 的分区结果
 Fig.A6 Partitions of method 2

附录 B

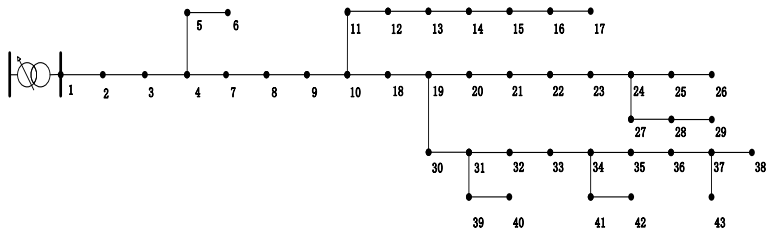


图 B1 实际算例配电系统结构

Fig.B1 Structure of the practical distribution system

注：实际算例风力发电机接入点为 20、23、27，光伏发电接入点为 19、36、37、38、39、40。

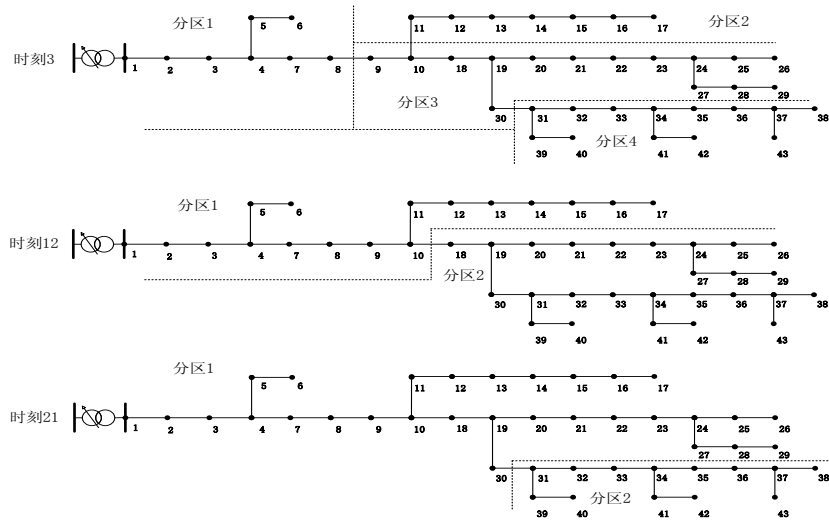


图 B2 部分时段分区结果

Fig.B2 Partition results for partial periods

表 B1 分区结果（03:00）

Table B1 Partition results（03:00）

指标	分区结果			
	分区 1	分区 2	分区 3	分区 4
区域内部功率需求/kW	281	327.1	429	431. 6
区域功率自我供给/kW	255.9	327.1	398.1	413.6
区域内部电源最大可供给功率/kW	连接主网	400	1866	1000

表 B2 分区结果

Table B2 Partition results

指标	12: 00 分区结果		22: 00 分区结果	
	分区 1	分区 2	分区 1	分区 2
区域内部功率需求/kW	2785.5	3600	2840.7	979. 5
区域功率自我供给/kW	2255.2	3603.3	2848.9	786.5
区域内部电源最大可供给功率/kW	连接主网	4672.6	连接主网	1000

附录 C

基于美国 PG&E69 节点系统对本文提出方法作进一步验证，该系统共有 69 个节点、68 条支路，其结构如附录 C 图 C1 所示。风力发电机配置于节点 23、24、25、47、48、49、50，光伏发电配置于节点 33、34。

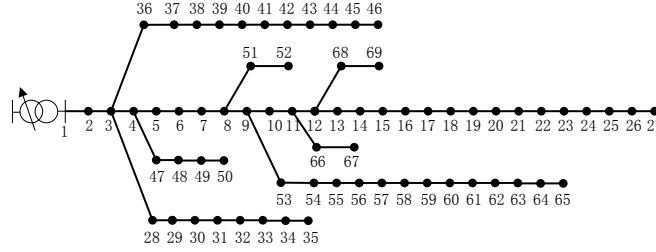


图 C1 PG&E 69 节点系统

Fig.C1 PG&E 69-bus distribution network

基于本文的标签传播方法得到的部分分区结果如附录 C 图 C2 所示，图中相同分区的节点颜色统一，各分区间的联络线已标红。通过图中结果可知由于配电网接入的可再生能源出力具备波动性，且负荷的需求也在变化，在保证分区内部具备足够功率储备、分区内部结构较为紧密的前提下，配电网的分区所包含的节点和分区数目会随时间产生变化。分区结果中并未出现独立节点，也未出现分辨率问题，说明本文方法能够克服传统配电网分区方法存在的弊端。

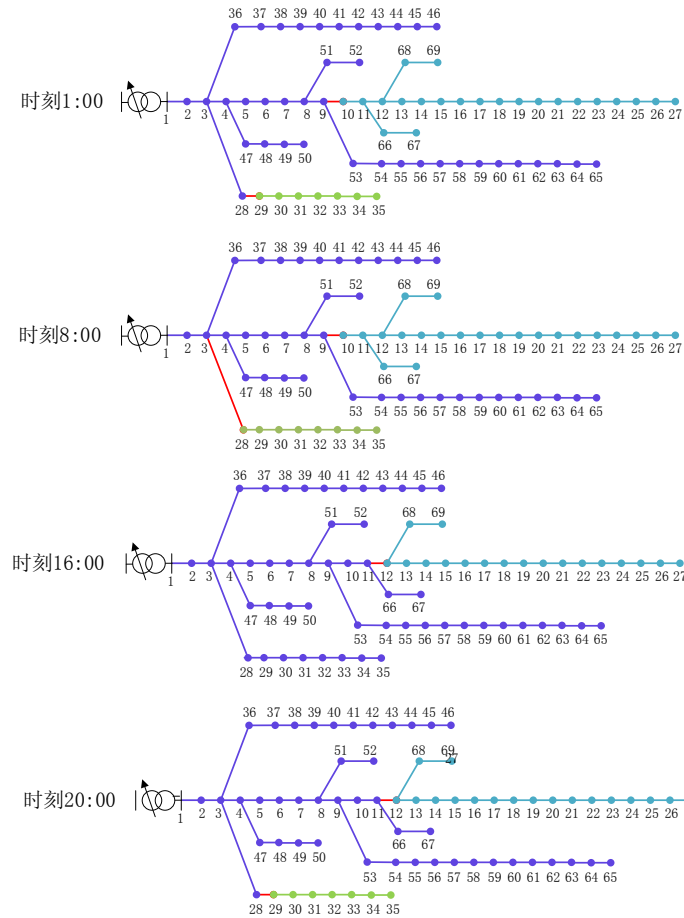


图 C2 部分时段分区结果

Fig.C2 Partition results for partial periods

本文利用传统方法 1、2 对 PG&E69 节点系统在 08:00 时的配电网做相应的分区处理，由于传统方

法 1 得到的结果出现了过多的小分区和独立节点，分区结果比较差，这里不作对比。基于传统方法 2 得到的分区结果如附录 C 图 C3 所示，分区的数目为 6，其中有 2 个仅包含 2 个节点的小分区(51,52)、(49,50)，出现了一个独立节点（67）。

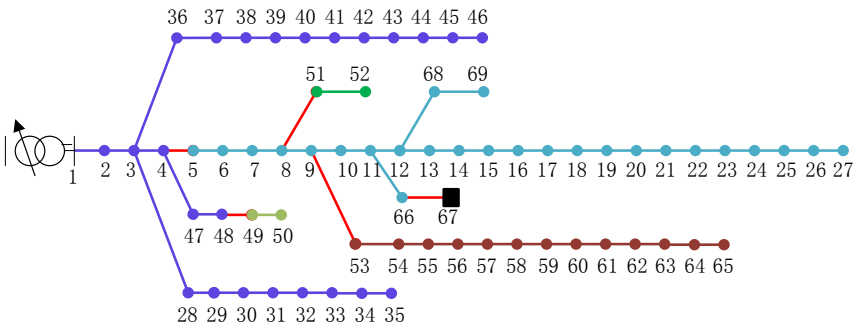


图 C3 传统方法 2 分区结果
Fig.C3 Partitions of method 2

基于传统方法 2 与本文方法进行分区后分区内部对比结果如附录 C 表 C1 和表 C2 所示，由于传统方法 2 的小分区较多，且出现了独立节点,该类分区大部分内部都不包含电源，分区后无法实现分区内部调控。而本文的分区方法得到的区域自供给率总体较高，分区间低耦合、分区内强耦合，分区内部储备充足，分区结果能够满足工程实际需求。

表 C1 传统方法 2 分区结果
Table C1 partitions of method 2

指标	分区 1 (含节点 1)	分区 2 (含节点 27)	分区 3 (含节点 65)	分区 4 (含节点 50)	分区 5 (含节点 52)	分区 6 (独立节点 67)
区域内部功率需求/kW	220.8	556.6	1064.4	477.0	27.3	11.1
区域自供给功率/kW	221.1	400.0	397.8	192.3	0	0
区域自供给率/%	100.1	71.9	37.4	40.3	0	0
区域内部电源最大可供给功率/kW	直连主网	651.3	400	194.8	0	0

表 C2 基于标签传播方法的分区结果
Table C2 partition of method based on label propagation

指标	分区 1（包含节点 1）	分区 2（包含节点 27）	分区 3（包含节点 35）
区域内部功率需求/kW	1824.5	476	56.7
区域自供给功率/kW	1864.5	405.7	44
区域自供给率/%	102.2	85.2	77.6
区域内部电源最大可供给功率/kW	直连主网	651.3	100