

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211209

# 基于动态分区的配电网日前优化调度研究

吴桐, 刘丽军, 林钰芳, 郑文迪

(福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 为了提高对分布式可再生能源的就地消纳能力, 实现配电网分层分区调度, 提出了基于 MOEA/D 的多目标蚁群动态分区算法和基于动态分区的配电网日前优化调度模型。利用潮流追踪算法与复杂网络理论中的二分模块度, 提出了量化分区间能量耦合程度的能量二分模块度指标。基于电力系统潮流方程雅可比矩阵推导蚁群算法中的启发式信息, 结合预测场景集以分区的能量二分模块度与功率储备为目标函数, 利用多目标蚁群算法生成动态分区方案。建立以联络线功率、灵活性不足率以及成本最低为目标的基于动态分区日前优化调度模型, 并利用 NSGA-II 算法求解 Pareto 最优解集。最后基于 IEEE33 节点网络对所提模型与方法进行验证。结果表明, 采用该方法进行动态分区与日前调度可有效提高系统应对可再生能源不确定性的能力, 为就地平抑可再生能源波动奠定基础。

**关键词:** 多目标蚁群进化算法; 潮流追踪; 二分模块度; 动态分区; 日前优化调度

## Day-ahead optimal dispatch for a distribution network based on dynamic partitioning

WU Tong, LIU Lijun, LIN Yufang, ZHENG Wendi

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

**Abstract:** To improve the local accommodation of distributed renewable energy and realize hierarchical optimal scheduling model for a distribution network, this paper proposes a multi-objective ant colony dynamic partitioning algorithm based on MOEA/D and a day-ahead optimal dispatching model based on dynamic partitioning. Using a power flow tracing algorithm and bipartite modularity in complex network theory, an energy bipartite modularity index that quantifies the degree of energy coupling between partitions is proposed. Based on a Jacobian matrix of power flow calculation, heuristic information in the ant colony algorithm is derived. Combined with the prediction scenarios, the energy bipartite modularity and power reserve of the partitions are used as the objective function, and the multi-objective ant colony algorithm is used to generate dynamic partitions. A day-ahead optimal scheduling model based on dynamic partitions is established with the objectives of the partitions' communication line power, insufficient flexibility rate and lowest cost. The Pareto optimum is determined based on the NSGA-II algorithm. Finally, based on the IEEE33 bus distribution network, the proposed model and method are verified. The results show that the dynamic partitioning and day-ahead scheduling using this method can effectively improve the system's ability to deal with the uncertainty of renewable energy, and lay the foundation for suppressing the fluctuation of renewable energy locally.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province (No. 2017J01480).

**Key words:** multi-objective ant evolutionary; power tracing; bipartite modularity; dynamic partitioning; day-ahead optimal dispatch

## 0 引言

双碳背景下, 分布式可再生能源在配电网接入

基金项目: 福建省自然科学基金项目资助(2017J01480); 福建省财政厅财政资助专项(83022005)

的比例不断增加, 但其特有的不确定性给电网的安全运行带来了挑战<sup>[1-5]</sup>。利用全局优化与区域自治的分层分区优化调度方法可以对分布式可再生能源产生的波动进行就近平抑, 避免造成大规模的影响, 但该方法实现的前提是区域内的可控资源具备对可再生能源实时波动的平抑能力<sup>[6-9]</sup>。故利用该类方法

实现可再生能源就地消纳的关键在于：1) 如何对配电网进行合理分区；2) 如何保证各分区具备较强的自治能力。

配电网的阻抗特性不同于输电网，常规配电网分区方法分别对有功、无功分区进行解耦，生成相应的有功或无功分区方案<sup>[10]</sup>。配电网与输电网的结构与分区目的相似，两者的分区方法也互相适用，目前电网的主流分区方法主要有聚类分区<sup>[11]</sup>、优化分区<sup>[12]</sup>及基于复杂网络理论的分区方法<sup>[13]</sup>等。文献[14]基于潮流方程雅克比矩阵定义电气距离，利用聚类方法实现分区。分区的目的在于实现分区内部结构紧密且保证分区内部存在一定的功率储备<sup>[15]</sup>。但常规分区方法存在两个弊端，一是仅保证了分区间结构弱耦合，并未考虑各区能量间的耦合情况。若分区间能量耦合过大说明分区内电源输出功率和负荷需求差距过大，或大量分布式电源位于分区间的联络线附近，两者均反映了分区的不合理。二是由于常规分区方法通常对配电网进行固定分区，配电网接入可再生能源的不确定性会造成固定分区功率储备不足等情况。

为了提高配电网的调度灵活性，文献[16]提出了灵活性评价指标体系，构建了多目标优化调度模型。为了尽可能提高对可再生能源的承载能力，文献[17]对电网进行分区并用规划的手段保证各分区内部电源可以满足正常与紧急情况下的电力需求。合理利用各分布式电源快速响应波动相较于规划时接入大量的可控电源产生的成本更低。分区内部功率储备并不等同于灵活性资源，功率储备只能应对可再生能源出力突降、负荷突增，在净负荷向下波动的情况下功率储备并不能起到平抑的作用。故可对各分区内部的可控分布式电源进行出力优化以提高分区内部灵活性，从而提高配电网就近平抑可再生能源波动的能力。

本文考虑配电网中接入可再生能源的不确定性，提出了一种基于多目标蚁群算法的动态分区算法和基于配电网动态分区的日前优化调度模型。动态分区算法保证了配电网各分区功率平衡和电源对分区内部较强的控制能力。调度模型使得分区内可控电源具备实时就近平抑可再生能源波动的能力，为分层分区优化调度方法奠定理论基础。首先，利用潮流追踪算法定义了二分模块度以量化分区间的能量耦合度，并结合功率储备指标提出适用于配电网分区的多目标蚁群算法。其次，为了提高分区应对可再生能源不确定性的能力，提高分区方案的鲁棒性，将概率预测场景集与分区算法结合得到动态有功分区。最后，在动态分区的基础上，以配电网

综合运行费用、灵活性不足率以及分区间联络线功率为目标建立优化模型，并采用快速非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)求解，通过算例结果验证本文方法的合理性和有效性。

## 1 基于 MOEA/D 的多目标蚁群分区算法

为了实现有效分区，本文利用仿生算法——基于 MOEA/D 的多目标蚁群优化算法解决复杂网络的分区挖掘问题。

### 1.1 基本蚁群算法

蚁群系统由文献[18]提出，由于蚂蚁经过路径的时候会留下信息素以传递信息，在正反馈机制作用下，整个蚁群会沿着最短路径到达食物源，可利用该算法求解组合优化问题。蚁群算法的主要参数有启发式信息  $\eta_{i,j}$ 、信息素  $\tau_{i,j}$ ，种群规模  $N_a$ 。 $\eta_{i,j}$  在基本算法中与路径  $i-j$  长度成反比， $\tau_{i,j}$  为点  $i$ 、 $j$  间路径的信息素。蚂蚁的状态转移规则如式(1)所示。

$$p_{ij} = \begin{cases} \frac{\eta_{i,j}^\alpha \cdot \tau_{i,j}^\beta}{\sum_{k \in J(i)} \eta_{i,k}^\alpha \cdot \tau_{i,k}^\beta}, & j \in J(i) \\ 0, & j \notin J(i) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $p_{ij}$  为状态转移概率，该值为蚂蚁选择路径  $i-j$  的概率； $\alpha$  为信息启发式因子，决定蚂蚁选择走过路径的可能性； $\beta$  为启发式因子， $\beta$  越大，蚂蚁便越容易选择局部较短路径； $J(i)$  为与点  $i$  直接相连的点集。计算出蚂蚁在  $i$  点时走向各节点的状态转移概率后，便可利用轮盘赌法决定下一步的前进路径。在  $N_a$  只蚂蚁都完成路径更新后，更新信息素，更新规则如式(2)所示。

$$\tau_{i,j} \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{i,j} + \rho \cdot \Delta \tau_{i,j} \quad (2)$$

式中： $\rho$  为信息素挥发因子； $\Delta \tau_{i,j}$  为蚁群在路径  $i-j$  新增加的信息素。在完成信息素更新后蚁群进行路径更新，直到达到一定的更新次数或所有蚂蚁都选择同一条路径为止。

蚁群算法可以通过轨迹编码的方式实现分区，如式(3)所示，对于一个包含  $N$  节点的网络，由单个蚂蚁  $i$  行走路径得到的分区解  $x_i^{\text{sol}}$  可以用含  $N$  个数的数组表示。当  $x_1 = 2$ ，说明该分区解中节点 1、2 同属一个分区。

$$x_i^{\text{sol}} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \quad (3)$$

若蚂蚁走过的轨迹分别为第 2, 3, 2, 5, 6, 4 条，则对应的分区解为  $x^i = \{2, 3, 2, 5, 6, 4\}$ ，设置蚂蚁出发的点为  $i$ ，前进轨迹为第  $j$  条，蚁群算法将  $(i, j)$  节

点设置为一个分区。结合其出发节点编号, 将轨迹编码  $x^i$  解码为  $\{(1, 2), (2, 3), (3, 2), (4, 5), (5, 6), (6, 4)\}$ , 接着将存在同元素的子集合并, 得到的子集为  $\{(1, 2, 3), (4, 5, 6)\}$ 。即节点 1, 2, 3 和节点 4, 5, 6 分别为两个分区。

### 1.2 基于 MOEA/D 的多目标蚁群优化算法

与普通蚁群算法不同, 基于 MOEA/D 的多目标蚁群优化算法能够解决多目标优化问题<sup>[19]</sup>。一个多目标优化问题(Multiobjective Optimization Problems, MOPS)可以用式(4)表示, 其中  $x^{\text{sol}}$  为决策变量, 即蚂蚁行走路径得到的分区解,  $\Omega$  为决策空间。

$$\begin{cases} \text{minimize} & F(x^{\text{sol}}) = (f_1(x^{\text{sol}}), L, f_m(x^{\text{sol}})) \\ \text{subject to} & x \in \Omega \end{cases} \quad (4)$$

MOEA/D 算法原理是将 MOPS 分解为  $m$  个单目标优化子问题且单个子问题对应着不同权重, 各子问题由单个蚂蚁个体负责搜索解。基于 MOEA/D 的多目标蚁群优化算法步骤如下。

**Step1:** 蚂蚁个数为  $m$ , 生成  $m$  组服从均匀分布且不重复的权重向量  $(\lambda_1, \lambda_2, L, \lambda_m)$ , 根据  $m$  只蚂蚁的对应权重将蚁群分为  $K$  个组, 其中  $K$  为 MOPS 目标函数个数。

**Step2:** 初始化启发式信息与  $K$  个信息素矩阵, 同一组的蚂蚁共用一个信息素矩阵, 生成初始蚁群与外部档案, 计算各初始蚁群的多目标解集, 将其中的非支配解保存到外部档案。

**Step3:** 为了使算法达到更好的效果, 使解更接近 Pareto 前沿面, 采用 Tchebycheff 方法将 MOPS 分解为单目标最小化问题, 数学描述如式(5)所示, 其中  $z_i^*$  为参考点。利用新加入外部档案的非支配解更新对应的信息素矩阵。

$$\begin{cases} g^{\text{te}}(x | \lambda) = \max_{1 \leq i \leq m} \{ \lambda_i | f_i(x^{\text{sol}}) - z_i^* \} \\ z_i^* = \min_{x^{\text{sol}} \in \Omega} f_i(x) \quad (i = 1, 2, L, m) \end{cases} \quad (5)$$

**Step4:** 为了提高收敛速度, 在蚁群内部进行信息交换, 对于蚂蚁  $i$ , 选择与  $\lambda_i$  的欧式距离最近的  $b$  个权重向量对应的蚂蚁作为蚂蚁  $i$  的领域  $B(i)$ 。若  $y$  为  $B(i)$  中  $g^{\text{te}}(y | \lambda)$  最小的解, 满足式(6)条件且未替换过其他解, 则用  $y$  替换  $x_i^{\text{sol}}$ 。

$$g^{\text{te}}(y | \lambda_i) < g^{\text{te}}(x_i^{\text{sol}} | \lambda_i) \quad (6)$$

**Step5:** 利用信息素矩阵、启发式信息和当前解进行下一轮的更新, 重复 Step3—Step5 直到满足停止条件。

## 2 多目标蚁群算法在配电网分区的应用

本文利用雅克比矩阵定义启发式信息, 引导蚁

群将结构联系紧密的节点划为一个分区。为了实现分区间弱耦合, 避免大量分布式电源位于联络线附近, 除要求分区具备一定的储备功率外, 还要求状态估计下的分区能量交互尽可能低, 且分区具备一定应对接入的分布式可再生能源不确定性的能力。

### 2.1 基于潮流方程雅克比矩阵的启发式信息

潮流方程雅克比矩阵能够量化配电网节点的电气距离, 与蚁群算法启发式信息相结合能够引导蚁群进行路径更新时选择物理结构更为紧密的点作为同一个分区。利用雅克比矩阵推导线路权重矩阵  $A$ , 推导过程如式(7)一式(9)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial U} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial U} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{P0} & S_{Q0} \\ S_{PU} & S_{QU} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{cases} A_{ij} = \frac{S_{ij}}{\sum_{i,j} S_{ij}} \\ S = \frac{S_{pu} + S_{pu}^T}{2} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\Delta P$ 、 $\Delta Q$ 、 $\Delta \theta$ 、 $\Delta U$  分别为有功功率增量、无功功率增量、节点相角增量以及节点电压增量;  $J$  为雅克比矩阵;  $S_{P0}$ 、 $S_{Q0}$ 、 $S_{PU}$ 、 $S_{QU}$  为灵敏度矩阵;  $A_{ij}$  越大表示点  $i$ 、 $j$  间的结构联系越紧密。

为保证蚁群生成的分区内部具备连通性, 本文在线路权重矩阵  $A$  的基础上, 利用 Pearson 相似度定义启发式信息, 具体如式(10)一式(13)所示。

$$\eta_{i,j} = \frac{1}{1 + e^{-C(i,j)}} \quad (10)$$

$$C(i,j) = \frac{\sum_{s=1}^n (A_{is} - \mu_i)(A_{js} - \mu_j)}{n\sigma_i\sigma_j} \quad (11)$$

$$\mu_i = \sum_{k=1}^n \frac{A_{ki}}{n} \quad (12)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (A_{ki} - \mu_i)^2} \quad (13)$$

式中:  $\mu_i$  和  $\sigma_i$  分别为线路权重矩阵  $A$  第  $i$  行的平均值和标准差;  $n$  为矩阵  $A$  的列数;  $\eta_{i,j}$  值越大说明结构联系更紧密。若  $i$  点与  $j$  点不直接相连, 将  $\eta_{i,j}$  值设置为 0。此时蚁群算法不会把该两点划为同一分区, 此举有效保证了配电网分区的内部连通性。

## 2.2 基于潮流追踪算法的二分模块度

二分网络是复杂网络中重要的表现形式之一，该网络由两部分不同类型节点构成，同一类型节点不相连。现实生活中的很多网络都呈现二分特性，如科学家-论文网、疾病-基因网以及 P2P 等<sup>[20]</sup>。配电网中源-荷间的能量流动网络同样也属于二分网络。二分网络的分区挖掘指的是将二分网络中联系较为紧密的节点归于一个分区，对能量流动网络进行有效的划分能够降低配电网分区间在能量上的耦合程度。

在得到配电网潮流分布或状态估计信息后，可以利用潮流追踪解析算法对配电网的潮流进行追踪<sup>[21-22]</sup>，算法定义如式(14)、式(15)所示。

$$\mathbf{X} = \mathbf{P}_{\text{GG}} (\mathbf{P}_{\text{TT}})^{-1} \mathbf{H}^{-1} \quad (14)$$

$$P_{i \rightarrow j} = c_{ij} \cdot P_{\text{Lj}}(i, j=1, 2, \text{L}, n) \quad (15)$$

式中： $\mathbf{H}$  为顺流分配矩阵； $\mathbf{P}_{\text{GG}}$ 、 $\mathbf{P}_{\text{TT}}$ 、 $\mathbf{P}_{\text{Lj}}$  为功率注入相关量； $\mathbf{X}$  为分配系数矩阵， $c_{ij}$  为该矩阵元素。 $P_{i \rightarrow j}$  为节点  $i$  上发电机对负荷节点  $j$  的功率分配。二分模块度  $Q_{\text{B}}$  定义如式(16)一式(20)所示。

$$M = \frac{\sum_{i,j} T(i, j)}{2} \quad (16)$$

$$e_{lm} = \frac{1}{2M} \sum_{i \in V_l, j \in V_m} T(i, j) \quad (17)$$

$$a_l = \sum_m e_{lm} = \frac{1}{2M} \sum_{i \in V_l} \sum_{j \in V_y} T(i, j) \quad (18)$$

$$a_m = \frac{1}{2M} \sum_{i \in V_x} \sum_{j \in V_m} T(i, j) \quad (19)$$

$$Q_{\text{B}} = \sum_{z=1}^{Z_n} Q_{\text{B}}^{\text{part},z} = \sum_{z=1}^{Z_n} (e_{lm} - a_l a_m) \quad (20)$$

式中： $\mathbf{T}$  为潮流追踪矩阵， $\mathbf{T}$  中  $i$  行  $j$  列元素为  $P_{i \rightarrow j}$ ； $V_x$ 、 $V_y$  分别为全网的电源、负荷集； $z$  为分区编号； $V_l$ 、 $V_m$  分别为分区  $z$  中电源点集、负荷点集； $Z_n$  为分区数； $Q_{\text{B}}^{\text{part},z}$  指的是分区  $z$  的二分模块度，计算全网所有分区的  $Q_{\text{B}}^{\text{part}}$  并求和，得到的二分模块度  $Q_{\text{B}}$  值越大，说明分区之间的耦合程度越低。

为了提高分区方案应对可再生能源不确定性的能力，本文生成预测场景集  $\mathbf{S}^{\text{E}} = \{S_1^{\text{e}}, S_2^{\text{e}}, \text{L}, S_n^{\text{e}}\}$  并给出预测场景对应的概率  $\mathbf{R} = \{p^1, p^2, \text{L}, p^n\}$ 。在得出预测场景  $S_i^{\text{e}}$  的潮流分布或状态估计结果后，基于式(16)一式(20)得到场景  $S_i^{\text{e}}$  对应的二分模块度  $Q_{\text{B}}^{\text{S}_i^{\text{e}}}$ ，最后结合概率信息，根据式(21)得到  $Q_{\text{B}}^{\text{final}}$ 。

$$Q_{\text{B}}^{\text{final}} = \sum_{i=1}^h Q_{\text{B}}^{\text{S}_i^{\text{e}}} \cdot p_{\text{se}}^{\text{S}_i^{\text{e}}} \quad (21)$$

分区方案对应的能量二分模块度  $Q_{\text{B}}^{\text{final}}$  值越高，说明各预测场景下分区间能量耦合程度越低，分区内可再生能源位置分布较为合理，且能够应对可再生能源不确定性带来的影响。

## 2.3 基于预测场景集的功率储备计算

分区内实现有效调控的前提是分区内部具备足够的功率储备，分区功率储备计算方法如式(22)所示。

$$P_{\text{store}}^i = P_{\text{supply}}^i - (1 + \gamma) \cdot P_{\text{need}}^i \quad (22)$$

式中： $P_{\text{store}}^i$  为分区  $i$  的储备功率； $P_{\text{supply}}^i$  为分区  $i$  内部电源可提供的最大功率； $P_{\text{need}}^i$  为分区  $i$  的负荷大小； $\gamma$  为储备系数，其值越大说明对功率储备的要求更高。为了保证各分区存在一定的功率储备，可利用式(23)，计算全网所有分区的功率储备，并选择其中的最小值作为全网的功率储备  $P_{\text{store}}$ ，并以  $P_{\text{store}}$  值最大为分区优化目标。

$$P_{\text{store}} = \min(P_{\text{store}}^1, P_{\text{store}}^2, \text{L}, P_{\text{store}}^{Z_n}) \quad (23)$$

同样，为了提高算法鲁棒性，计算预测场景集  $\mathbf{S}^{\text{E}} = \{S_1^{\text{e}}, S_2^{\text{e}}, \text{L}, S_n^{\text{e}}\}$  各预测场景下的功率储备，如式(24)所示。

$$P_{\text{store}}^{\text{final}} = \min(P_{\text{store}}^{\text{S}_1^{\text{e}}}, P_{\text{store}}^{\text{S}_2^{\text{e}}}, \text{L}, P_{\text{store}}^{\text{S}_n^{\text{e}}}) \quad (24)$$

式中， $P_{\text{store}}^{\text{S}_i^{\text{e}}}$  指的是预测场景  $S_i^{\text{e}}$  的功率储备值  $P_{\text{store}}$ 。利用式(24)计算  $P_{\text{store}}^{\text{final}}$  即各场景  $P_{\text{store}}$  的最小值，该值越大说明配电网各分区储备功率值整体较大，且具备一定应对可再生能源不确定性的能力。

## 2.4 多目标蚁群分区算法

基于 MOEA/D 的多目标蚁群优化算法以各目标函数最低为目标，如式(25)、式(26)所示，本文选择  $G_1$ 、 $G_2$  作为目标函数。

$$G_1 = \min \frac{1}{Q_{\text{B}}^{\text{final}}} \quad (25)$$

$$G_2 = \min(-P_{\text{store}}^{\text{final}}) \quad (26)$$

通过多目标蚁群算法得出帕累托解后，如图 1 所示，制定相应的典型解选择策略以提升效率、降低人工选择主观性带来的影响，删除  $G_2 > 0$  的解是为了避免分区方案功率储备小于 0。其中， $N_{\text{min}}$  为分区最低节点个数， $G$  值计算公式如式(27)所示。

$$G = \frac{G_1 - G_{1\text{min}}}{G_{1\text{max}} - G_{1\text{min}}} + \frac{G_2 - G_{2\text{min}}}{G_{2\text{max}} - G_{2\text{min}}} \quad (27)$$

式中,  $G_{1\min}$ 、 $G_{1\max}$ 、 $G_{2\min}$ 、 $G_{2\max}$  分别为  $G_1$ 、 $G_2$  在得到的帕累托解集中的最小、最大值。由于选择功率储备最大的解可能导致各分区能量的强耦合, 故  $G_1$ 、 $G_2$  值存在矛盾性, 在保证各分区功率储备的前提下, 本文利用图 1 所示折中方法选择分区方案。

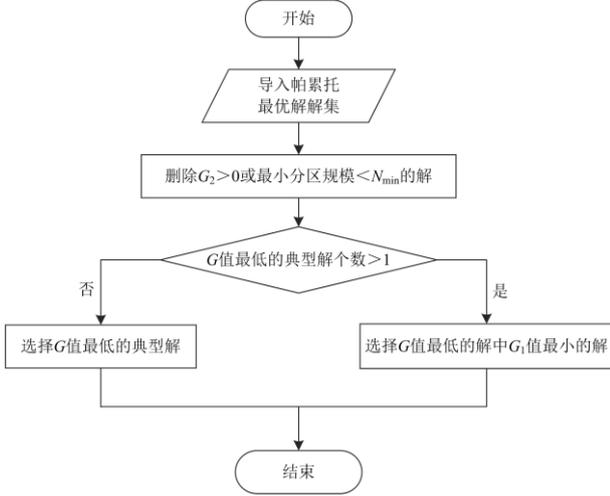


图 1 分区典型解选择策略

Fig. 1 Partition typical solution selection strategy

由于分布式可再生能源功率不断变化, 配电网各分区的划分应随系统运行的改变而进行相应调整以满足区内强耦合、区间弱耦合和功率储备的需求<sup>[19]</sup>, 故本文利用多目标蚁群分区算法对配电网进行多时段动态分区, 为下一章的日前调度奠定基础。

### 3 基于动态分区的多目标日前优化调度模型

在进行日前优化调度之前, 需要先预测风光等分布式可再生能源的出力。但由于可再生能源出力随机性会导致预测误差, 故本文生成多个概率预测场景表征风光出力不确定性, 并基于以上场景定义分区算法的 2 个目标函数: 功率储备与能量二分模块度。该思想指导下生成的分区方案具备一定应对可再生能源不确定性的能力。

为了平抑可再生能源接入带来的波动, 各分区内部需保留一定的灵活性资源<sup>[23]</sup>, 故本文选择灵活性不足率作为分区平抑波动能力的评价指标。然而, 以降低灵活性不足率为目标可能会造成分区内可控分布式电源功率跨区域传输, 为了实现就地平抑可再生能源波动的同时降低分区间的相互影响, 本文选择将动态分区的联络线功率最小作为另一个目标函数。

#### 3.1 目标函数与约束条件

##### 1) 灵活性不足率

本文以柴油发电机、储能系统以及可中断负荷作为灵活性资源, 考虑负荷、可再生能源预测误差

带来的净负荷波动, 如式(28)所示, 计算各分区灵活性不足率  $F^i(t)$  后得到全网灵活性不足率  $F_1$ 。

$$\begin{aligned}
 F_1 &= \min \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{Z_n} \sigma^i F^i(t) \\
 F^i(t) &= \frac{(F^{\text{up},i}(t) + F^{\text{down},i}(t))}{24 \times 2} \\
 F^{\text{up},i}(t) &= \sum_{t=1}^{24} \frac{\max\{\Delta P_{\text{netload}}^{\text{up},i}(t) - f^{\text{up},i}(t), 0\}}{\Delta P_{\text{netload}}^{\text{up},i}(t)} \times 100\% \\
 F^{\text{down},i}(t) &= \sum_{t=1}^{24} \frac{\max\{\Delta P_{\text{netload}}^{\text{down},i}(t) - f^{\text{down},i}(t), 0\}}{\Delta P_{\text{netload}}^{\text{down},i}(t)} \times 100\% \\
 f^{\text{up},i}(t) &= \sum_{g \in \Omega_{\text{DE},i}} \min(P_{\text{DE},g,\text{max}} - P_{\text{DE},g}(t), \Delta t \cdot v_{\text{DE}}^{\text{up},g}) + \\
 &\quad \sum_{g \in \Omega_{\text{ESS},i}} \min(S_{\text{SOC},g}(t) - S_{\text{SOC},g,\text{min}}, \Delta t \cdot v_{\text{ESS},g}^{\text{down}}) \\
 f^{\text{down},i}(t) &= \sum_{g \in \Omega_{\text{DE},i}} \min(P_{\text{DE},g}(t) - P_{\text{DE},g,\text{min}}, \Delta t \cdot v_{\text{DE}}^{\text{down},g}) + \\
 &\quad \sum_{g \in \Omega_{\text{ESS},i}} \min(S_{\text{SOC},g,\text{max}} - S_{\text{SOC},g}(t), \Delta t \cdot v_{\text{ESS},g}^{\text{up}}) + \sum_{g \in \Omega_{\text{IL},i}} P_{\text{IL},g}(t) \\
 \Delta P_{\text{netload}}^{\text{up},i}(t) &= \sum_{g \in \Omega_{\text{w},i}} e_{\text{w},g,\text{up}} P_{\text{w},g}(t) + \sum_{g \in \Omega_{\text{pv},i}} e_{\text{pv},g,\text{up}} P_{\text{pv},g}(t) + \\
 &\quad \sum_{g \in \Omega_{\text{load},i}} e_{\text{load},g,\text{down}} P_{\text{load},g}(t) \\
 \Delta P_{\text{netload}}^{\text{down},i}(t) &= \sum_{g \in \Omega_{\text{w},i}} e_{\text{w},g,\text{down}} P_{\text{w},g}(t) + \sum_{g \in \Omega_{\text{pv},i}} e_{\text{pv},g,\text{down}} P_{\text{pv},g}(t) + \\
 &\quad \sum_{g \in \Omega_{\text{load},i}} e_{\text{load},g,\text{up}} P_{\text{load},g}(t)
 \end{aligned} \tag{28}$$

式中:  $F^i(t)$ 、 $F^{\text{up},i}(t)$ 、 $F^{\text{down},i}(t)$  分别为分区  $i$  在  $t$  时刻的灵活性不足率、向上灵活性不足率和向下灵活性不足率;  $f^{\text{up},i}(t)$ 、 $f^{\text{down},i}(t)$  分别为分区  $i$  在  $t$  时刻的向上、向下调度灵活性;  $\Omega_{\text{DE},i}$ 、 $\Omega_{\text{ESS},i}$ 、 $\Omega_{\text{IL},i}$ 、 $\Omega_{\text{w},i}$ 、 $\Omega_{\text{pv},i}$ 、 $\Omega_{\text{load},i}$  分别为分区  $i$  中柴油机、储能系统、可中断负荷、风力发电机、光伏发电机、负荷的节点集合;  $P_{\text{DE},g}(t)$ 、 $S_{\text{SOC},g}(t)$ 、 $P_{\text{IL},g}(t)$  分别为  $g$  节点安装的柴油机、储能系统、可中断负荷在  $t$  时刻的出力;  $v_{\text{DE}}^{\text{up},g}$ 、 $v_{\text{DE}}^{\text{down},g}$ 、 $v_{\text{ESS},g}^{\text{up}}$ 、 $v_{\text{ESS},g}^{\text{down}}$  分别为  $g$  节点安装的柴油机、储能系统的向上、向下爬坡约束;  $S_{\text{SOC},g,\text{max}}$  和  $S_{\text{SOC},g,\text{min}}$  分别为  $g$  节点安装的储能系统的最大、最小储能量;  $P_{\text{DE},g,\text{max}}$  和  $P_{\text{DE},g,\text{min}}$  分别为  $g$  节点安装的柴油机的最大、最小出力;  $\Delta P_{\text{netload}}^{\text{up},i}(t)$ 、 $\Delta P_{\text{netload}}^{\text{down},i}(t)$  分别为分区  $i$  在  $t$  时刻的净负荷波动量;  $P_{\text{w},g}(t)$ 、 $P_{\text{pv},g}(t)$ 、 $P_{\text{load},g}(t)$  分别为  $g$  节点安装的风力发电机、光伏发电机预测发电量和负荷预测需求量;  $e_{\text{w},g,\text{up}}$ 、 $e_{\text{w},g,\text{down}}$ 、 $e_{\text{pv},g,\text{up}}$ 、 $e_{\text{pv},g,\text{down}}$ 、 $e_{\text{load},g,\text{up}}$ 、 $e_{\text{load},g,\text{down}}$  分别为对应风力发电机、光伏发电机预测

发电量和负荷预测需求量的向上、向下预测误差量。

由于配电网各分区对灵活性不足率的需求不同,如与主网直连的分区由于可以通过实时调整向主网购买的电量以平抑内部波动,故无需过多的灵活性资源;若某分区内部接入了类似医院、化工厂控制室的重要负荷,则需提高其供电可靠性<sup>[24]</sup>,设置各分区具备不同权重 $\sigma$ ,接入重要负荷的分区权重较高。

## 2) 联络线功率

在动态分区的基础上,为降低分区间能量的耦合程度,设置第二个目标函数 $F_2$ 为分区间联络线功率之和最低,如式(29)所示。

$$F_2 = \min \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{Z_{\text{line}}(t)} |P_i^{\text{link}}(t)| \quad (29)$$

式中: $Z_{\text{line}}(t)$ 为 $t$ 时刻的分区间联络线条数; $P_i^{\text{link}}(t)$ 为 $t$ 时刻联络线 $i$ 的功率。

## 3) 运行成本

本文选择的调度模型的运行成本 $F_3$ 由4部分组成,如式(30)所示,分别为柴油机运行成本 $C_{\text{DE}}$ 、储能系统运行成本 $C_{\text{ESS}}$ 、可中断负荷补偿成本 $C_{\text{IL}}(t)$ 和购电成本 $C_{\text{grid}}(t)$ 。

$$\begin{cases} F_3 = \min \sum_{t=1}^{24} \{C_{\text{DE}}(t) + C_{\text{ESS}}(t) + C_{\text{IL}}(t) + C_{\text{grid}}(t)\} \\ C_{\text{DE}}(t) = (\chi_1 P_{\text{DE}}^2 + \chi_2 P_{\text{DE}} + \chi_3) \cdot \Delta t \\ C_{\text{ESS}}(t) = \frac{C_{\text{IN}} C_{\text{RF}}}{8760} |P_{\text{ESS}}| \cdot \Delta t \\ C_{\text{IL}}(t) = c_{\text{IL}} P_{\text{IL}} \cdot \Delta t \\ C_{\text{grid}}(t) = c_{\text{grid}}(t) P_{\text{grid}} \cdot \Delta t \\ C_{\text{IN}} = K_b P_{\text{BD}} + K_c E_{\text{BD}} \\ C_{\text{RF}} = \frac{r(r+1)^l}{(1+r)^l - 1} \end{cases} \quad (30)$$

式中: $\chi_1$ 、 $\chi_2$ 、 $\chi_3$ 为柴油发电机的燃料成本系数; $C_{\text{IN}}$ 为初始投资成本; $C_{\text{RF}}$ 为资本回收系数; $P_{\text{BD}}$ 为储能系统额定功率; $E_{\text{BD}}$ 为储能系统额定容量; $K_b$ 为功率成本系数; $K_c$ 为能量成本系数; $r$ 为利率; $l$ 为储能系统使用年限; $c_{\text{IL}}$ 为可中断负荷补偿系数; $c_{\text{grid}}(t)$ 为 $t$ 时刻从主网购电成本。

## 4) 约束条件

本文模型的约束条件包含潮流等式约束和电压约束、柴油机机组约束、储能系统荷电状态方程、可中断负荷容量约束。限于篇幅,约束详细公式见文献[16]。

## 3.2 优化算法

本文采用基于快速非支配排序的多目标优化

算法对模型进行求解,具体流程如图2所示,该算法与多目标蚁群算法都是启发式搜索优化算法,在实际运行中若多次运行可以将各解集进行合并,在合并解集的基础上进行方案选取。

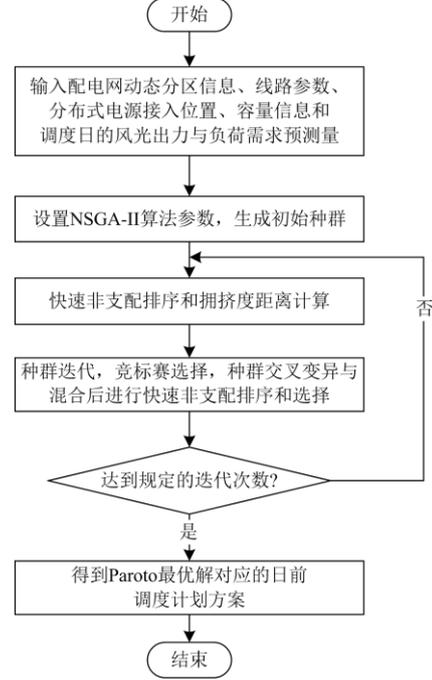


图2 多目标优化模型求解流程图

Fig. 2 Solution flow chart of multi-objective optimization model

## 4 结果分析

### 4.1 基于分解的多目标蚁群分区结果及分析

在图3所示的IEEE33节点算例上对提出的模型与方法进行验证,各分布式电源的接入位置已在图上进行标识,图中标识的PV和W分别为光伏发电机和风力发电机。

本文在CPU型号为Intel i5-10400F、主频为2.9 GHz、核心数为6、内存为16 GB的计算机上基于Matlab 2014b平台进行仿真。在基于分解的多目标蚁群分区算法框架中,信息素保留率 $\rho$ 为0.9,信息素因子 $\alpha$ 与启发式因子 $\beta$ 取值均为1, $\gamma$ 取0.1,即最少留有10%的功率储备,蚁群种群数目设置为100,最大迭代次数为500,由于蚁群可能会出现所有蚂蚁选择同一路径,此时触发停止条件,故实际迭代次数可能小于500,计算中平均0.66 s可完成一次迭代,在实际使用时可利用服务器进行并行加速处理。算法在22:00得到的Pareto最优解集及拟合曲线如图4所示。由图4可知,由于二分模块度与功率储备的两个目标函数间的矛盾性,优化过程中优化一个目标必然以劣化其他目标为代价。

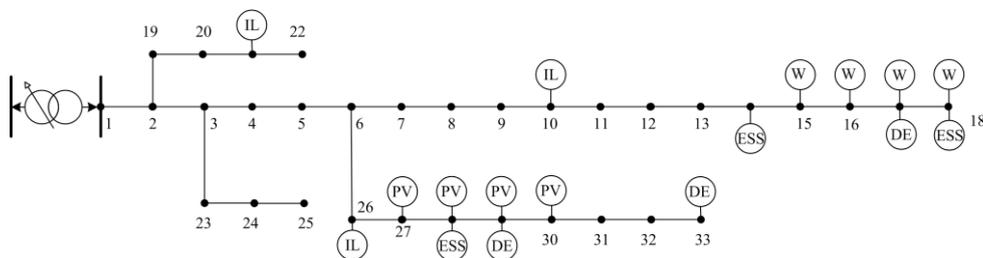


图3 IEEE33节点配电系统

Fig. 3 IEEE33 bus distribution network

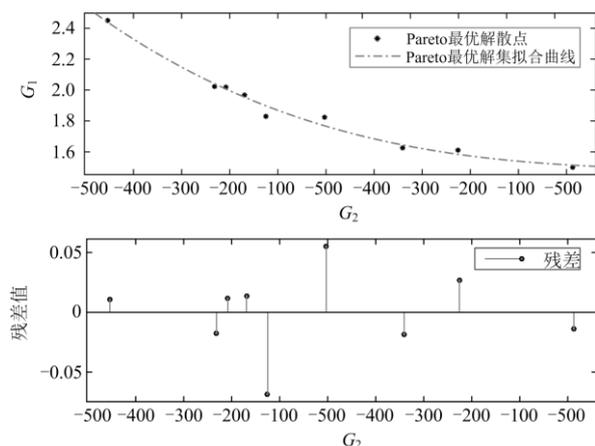


图4 Pareto 最优解集拟合曲线

Fig. 4 Pareto optimal solution set fitting curve

通过本文提出的动态分区算法得到的部分时刻分区结果如表 1、图 5 所示，配电网的源荷不确定性导致分区数量和规模不断变化，分区内部具备连通性，且不存在独立节点，各分区自供给率较高、功率储备充足。

表 1 配电网分区部分结果

Table 1 Partial results of distribution network partitioning

指标	时刻 1			时刻 8	
	分区 1	分区 2	分区 3	分区 1	分区 2
区域功率需求/kW	400	375	153.7	992	1311.3
区域自供给功率/kW	387.3	309.8	154.2	1007.7	1232.5
区域自供给率/%	96.8	82.6	100	100	94
区域电源最大	直连			直连	
可供给功率/kW	主网	2612.6	748.9	主网	1869.7

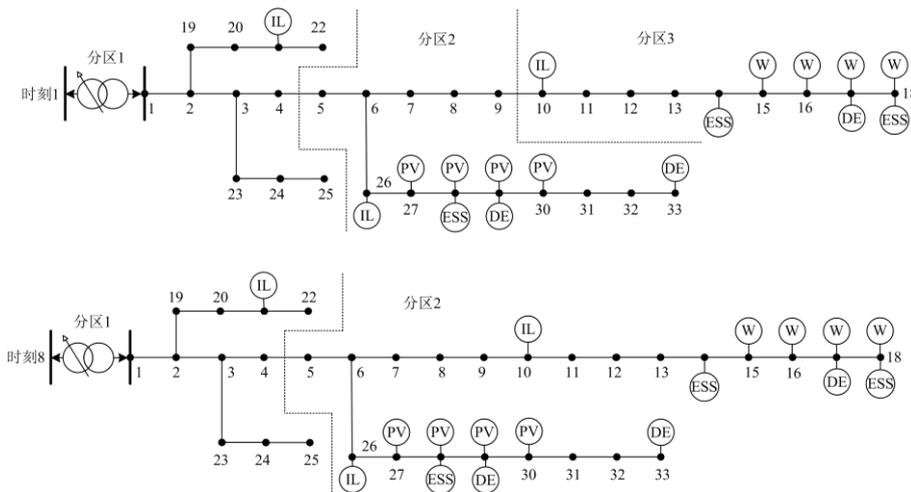


图5 配电网分区部分结果

Fig. 5 Partial results of distribution network partitioning

配电网接入的分布式可再生能源预测随机性会对配电网的分区造成影响，图 6 为最终分区方案各预测场景下的功率储备结果，针对同一个分区方案，各预测场景下功率储备差异明显，此时考虑最坏情况，将各预测场景的最低  $P_{store}$  赋值给  $P_{store}^{final}$ ，该方法能够提高分区结果的鲁棒性。

为了进一步说明基于潮流追踪算法的二分模块度指标的有效性，选择 12:00 的两个典型解对应分区结果进行分析。各典型解的目标函数如表 2 所示，典型解 2 的二分模块度大于典型解 1。通过风光预测进行配电网状态估计后利用潮流追踪得出的结果如图 7 所示，典型解 2 的对应分区功率交互小于典

型解 1, 说明该指标具备明确的物理意义, 能够有效反映各分区内部能量联系的紧密程度。

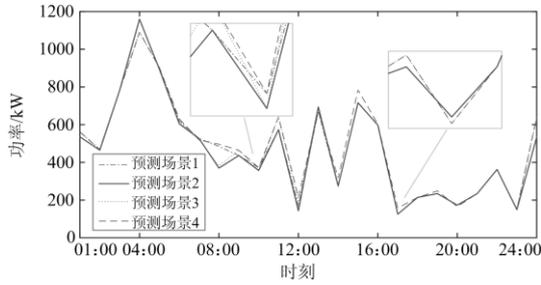


图 6 各预测场景下的分区方案功率储备  
Fig. 6 Partition scheme power reserve under each prediction scenario

表 2 各典型解目标函数

Table 2 Objective function of each typical solution

	$G_1$	$G_2$
典型解 1	2.319	-435.5
典型解 2	1.6171	-143.2

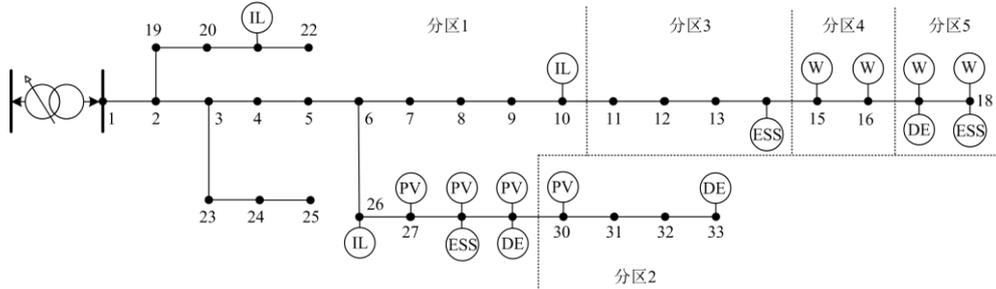


图 8 传统方法分区结果

Fig. 8 Partition results of traditional method

利用本文分区算法和改进后的传统算法分别对 12:00 的配电网进行分区, 结果如图 9、表 3 所示, 其中传统算法下的分区 3 的电源不能满足区域负荷的需求, 而本文算法可以确保各分区内部具备足够的功率储备。

为了对比固定分区与动态分区应对接入可再生能源不确定性的能力, 本文计算了两种方案各时刻的  $P_{store}$  作对比, 结果如图 10 所示, 与动态分区不同, 固定分区无法在所有时段满足功率储备要求。

#### 4.3 基于动态分区的配电网日前调度优化

采用 NSGA-II 算法优化计算, 参数设置: 种群规模为 100, 进化代数设置为 1000, 交叉概率为 0.9, 变异概率为 0.1。  $\chi_1$  取  $8.5 \times 10^{-4}$ ,  $\chi_2$  取 0.012,  $\chi_3$  取 6,  $K_p$  取值为 1000~1500 元/kW,  $K_e$  为 1190~1500 元/kWh, 利率  $r$  取 5%, 使用年限  $l$  取 10 年<sup>[25-28]</sup>。基于仿真平台进行计算, 本文算法平均单次进化时间

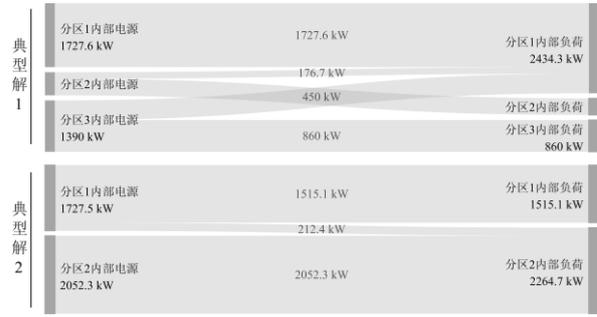


图 7 典型解对应分区结果功率交互情况

Fig. 7 Power interaction of partition results corresponding to typical solutions

#### 4.2 分区结果对比

为进一步体现本文分区算法的有效性, 使用传统分区算法<sup>[10]</sup>对图 3 的配电系统进行区域划分, 结果如图 8 所示, 图中分区 4、5 为仅包含两个节点的小分区, 且分区内部电源提供的功率远大于负荷。改进方法有限制分区数目、合并部分分区等。

为 4.4 s, 在实际应用中也可利用并行计算方法进行加速。

由于本文日前优化调度模型的目标函数: 联络线功率、灵活性不足率以及成本间同样存在相互矛盾性, 无法同时达到最优。选择 Pareto 解集中 3 个典型解进行对比, 典型解对应目标函数见表 4。

表 3 分区结果对比

Table 3 Comparison of partitions

指标	本文方案		传统算法		
	分区 1	分区 2	分区 1	分区 2	分区 3
区域功率需求/kW	1480	2350	2540	555	620
区域自供给功率/kW	1515.1	2052.3	2530.6	556.5	467.7
区域自供给率/%	100	87.3	100	100	75.4
区域电源最大可供功率/kW	直连	2612.6	直连	941.3	467.8
	主网		主网		

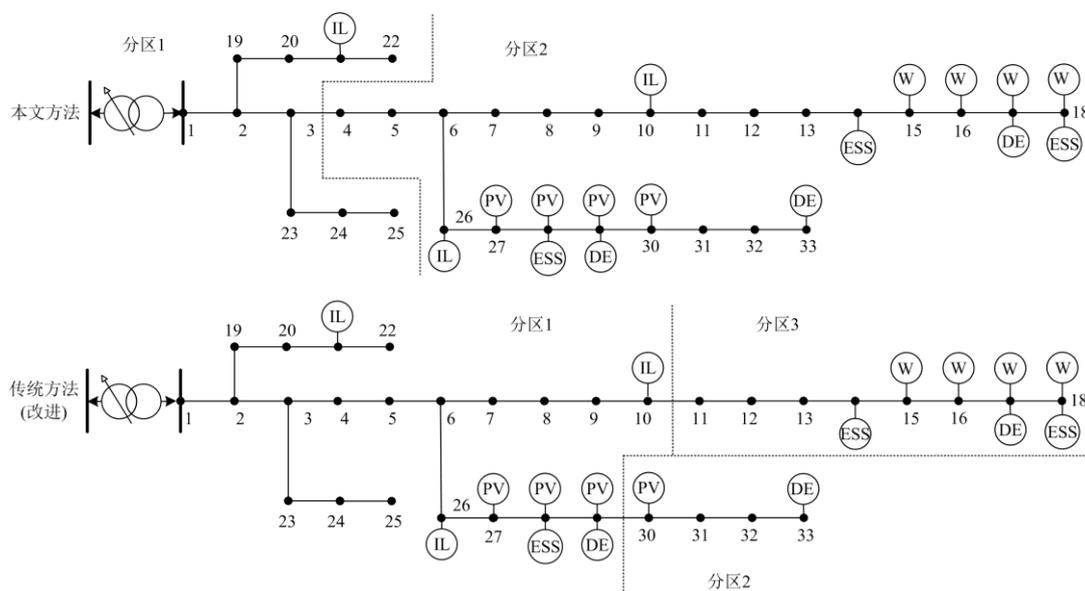


图9 分区结果对比

Fig. 9 Comparison of partitions

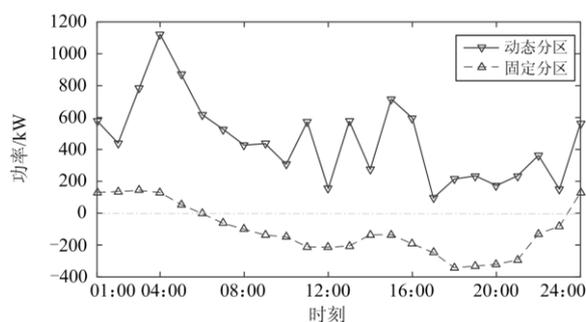


图10 固定分区与动态分区的  $P_{store}$

Fig. 10  $P_{store}$  of fixed partition and dynamic partition

表4 典型解对应目标函数

Table 4 Objective function corresponding to the typical solutions

解	成本/元	联络线功率/kW	灵活性不足率/%
典型解1	26 613	4675	5.76
典型解2	24 424	7416	11.24
典型解3	26 628	3139	6.95

图11为重要负荷所在分区内部电源出力情况,外部电源若出力大于0,则表示外部电源向分区内部传输功率,反之同理。图12体现了重要负荷所在分区的灵活性裕度与净负荷波动量,以下将典型解1、2、3对应的优化方案简称方案1、2、3。由图11、图12可知,由于方案1在12:00存在外部电源供给,此刻方案1分区内部的柴油机、储能提供的功率小于方案2,使系统具备较大的向上灵活性裕度。

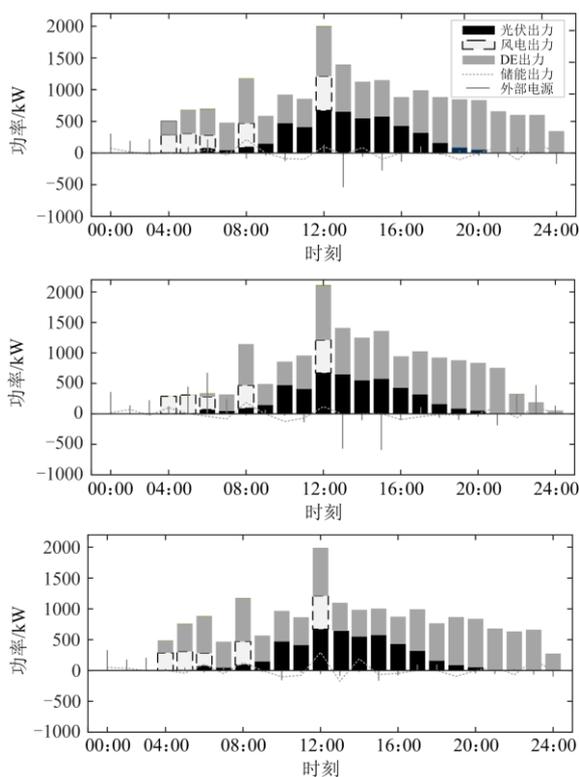


图11 分区内部电源出力方案

Fig. 11 Partition internal power output scheme

相比较方案1和3,方案2在04:00—06:00时段分区内部所需功率大部分由外部提供,这是由于此时向主网购电价格较低,为了降低成本,柴油机出力较低,使分区内部的向下灵活性裕度降低,进而

导致了灵活性不足率指标的上升。

相较方案 3，方案 1 为了在 13:00 时提供足够的向下灵活性裕度，提高了柴油机出力，导致分区内部电源供给大于负荷需求，故此时分区会向外传输功率。

本文在进行分区时，保证了各分区内部具备一定的功率储备，为了降低成本，各分区内部价格较低的电源输出功率将会增加以满足负荷需求，此时会造成联络线功率与灵活性不足率同时上升。

分区内部的功率储备确保了一定的向上灵活性裕度，为了提高所在分区的向下灵活性裕度，分区内部的电源(如柴油机)会提高出力，此时若分区内部电源提供的功率大于负荷所需的功率，便需要向外部输送功率，将导致联络线功率的上升。

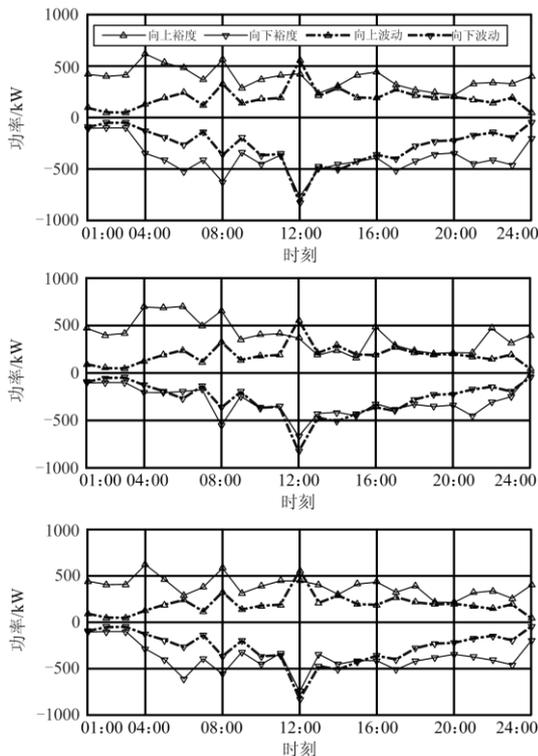


图 12 分区内部的灵活性裕度与净负荷波动量  
Fig. 12 Flexibility margin and net load wave momentum within the partition

若分区内部电源难以实现功率平衡，为了维持分区内部的功率平衡，各分布式电源出力将会提高，或由外部电源提供部分功率，导致向上灵活性裕度降低或联络线功率的上升。

故合适的分区方案能够为模型的优化奠定基础，且本文提出的优化模型中 3 个目标函数无法同时达到最优，在实际应用中，应综合考虑可靠性与经济性，选择合适的方案以优化系统运行。

## 5 结论

接入配电网的分布式可再生能源由于其不确定性产生较大的波动，为了就地平抑波动，实现分层分区优化调度，本文通过生成动态分区，建立日前优化调度模型在各分区内部预留灵活性资源，为日内实时调度奠定基础。主要结论如下：

1) 概率预测场景集与分区功率储备、能量二分模块度指标相结合能够提高分区方案的鲁棒性；以基于潮流追踪的二分模块度指标为目标函数保证了分区联络线不会位于大量分布式电源之间；由雅克比矩阵推导的启发式信息可引导蚁群将结构紧密的节点归为同一分区；基于 MOEA/D 的多目标蚁群分区算法能够有效实现配电网的动态分区。

2) 以灵活性不足率、联络线功率和成本最低为目标函数的日前优化调度模型能够有效提高系统灵活性，所得方案可以更好地应对系统功率波动，各分区间的弱耦合能够降低分区内部实时平抑波动时对其他分区造成的影响。

3) 本文提出的分区算法可对供大于求、供需功率平衡的配电网进行有功、无功分区，调度模型适用于同时接入分布式可再生能源和可控电源的配电网。在实际应用中，若配电网分区内部不具备可控电源或整体功率供小于需，配电网即使完成分区也无法进行区内自治，在优化调度的过程中甚至会出现弃风弃光、电压越限等情况。

4) 由于配电网有功电源与无功电源分布的位置可能差别较大，若对配电网进行有功分区，则难以保证分区内部的无功平衡。这也是大多数文献将有功、无功分区解耦的原因。若实现配电网的有功无功分区，各分区内部有功无功均平衡，则可以更有效地对配电网进行调控，这也是本文下一步研究的重点。

## 参考文献

[1] 陈文彬, 徐大勇, 郭瑞鹏. 负荷预测对新能源电网多目标优化调度的影响规律研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 46-51.  
CHEN Wenbin, XU Dayong, GUO Ruipeng. A study on the influence rule of load forecasting on multi-objective optimal dispatching of a new-energy grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 46-51.

[2] 陈厚合, 茅文玲, 张儒峰, 等. 基于碳排放流理论的电力系统源-荷协调低碳优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 1-11.  
CHEN Houhe, MAO Wenling, ZHANG Rufeng, et al. Low-carbon optimal scheduling of a power system

- source-load considering coordination based on carbon emission flow theory[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(10): 1-11.
- [3] YAN Cheng, TANG Yi, DAI Jianfeng, et al. Uncertainty modeling of wind power frequency regulation potential considering distributed characteristics of forecast errors[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2021, 6(3): 276-288.
- [4] 黄龙, 陈皓勇, 钟佳宇, 等. 促进可再生能源消纳的电力市场体系[J]. *广东电力*, 2020, 33(2): 10-17.  
HUANG Long, CHEN Haoyong, ZHONG Jiayu, et al. Power market system to promote renewable energy consumption[J]. *Guangdong Electric Power*, 2020, 33(2): 10-17.
- [5] 王海洋, 荣健. 碳达峰、碳中和目标下中国核能发展路径分析[J]. *中国电力*, 2021, 54(6): 86-94.  
WANG Haiyang, RONG Jian. Analysis on China's nuclear energy development path under the goal of peaking carbon emissions and achieving carbon neutrality[J]. *Electric Power*, 2021, 54(6): 86-94.
- [6] 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.
- [7] 张新民, 郭铭海, 林亚培, 等. 考虑灵活性的含分布式光伏配电网双层优化调度方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(3): 56-66.  
ZHANG Xinmin, GUO Minghai, LIN Yapei, et al. A bi-layer optimal dispatch approach for distribution networks with distributed photovoltaic considering the flexibility[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(3): 56-66.
- [8] 张颖, 寇凌峰, 季宇, 等. 计及储能与分布式电源协同的配电网分层分区优化控制[J]. *中国电力*, 2021, 54(2): 104-112.  
ZHANG Ying, KOU Lingfeng, JI Yu, et al. Hierarchical and partitioned optimal control of distribution networks considering the coordination between energy storage and distributed generation systems[J]. *Electric Power*, 2021, 54(2): 104-112.
- [9] 邓靖微, 李华强, 温丰瑞, 等. 计及虚拟电厂市场交易的主动配电网两阶段优化调度[J]. *电力建设*, 2021, 42(9): 22-31.  
DENG Jingwei, LI Huaqiang, WEN Fengrui, et al. Two-stage optimal dispatching of active distribution network considering virtual power plant market transaction[J]. *Electric Power Construction*, 2021, 42(9): 22-31.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 颜伟, 高峰, 王芳, 等. 考虑区域负荷无功裕度的无功电压优化分区方法[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(2): 61-66.  
YAN Wei, GAO Feng, WANG Fang, et al. An optimal network partitioning algorithm for reactive power and voltage control considering regional reactive power margin[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(2): 61-66.
- [13] 郑晓莹, 陈政轩, 曾琮. 含分布式电源的配电网双层分区调压策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(6): 90-97.  
ZHENG Xiaoying, CHEN Zhengxuan, ZENG Cong. Double-layer partition voltage regulation strategy of a distribution network with distributed generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(6): 90-97.
- [14] SUN Xianzhuo, QIU Jing, ZHAO Junhua. Real-time volt/var control in active distribution networks with data-driven partition method[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(3): 2448-2461.
- [15] RUAN Hebin, LIU Youbo, GAO Hongjun, et al. Distributed voltage control in active distribution network considering renewable energy: a novel network partitioning method[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(6): 4220-4231.
- [16] 王洪坤, 王守相, 潘志新, 等. 含高渗透分布式电源配电网灵活性提升优化调度方法[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(15): 86-93.  
WANG Hongkun, WANG Shouxiang, PAN Zhixin, et al. Optimized dispatching method for flexibility improvement of distribution network with high-penetration distributed generation[J]. *Automation of Electric Power Systems*,

- 2018, 42(15): 86-93.
- [17] OSKOU EI M Z, MOHAMMADI-IVATLOO B, ERDINÇ O, et al. Optimal allocation of renewable sources and energy storage systems in partitioned power networks to create supply-sufficient areas[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(2): 999-1008.
- [18] DORIGO M. Optimization, learning and natural algorithms[D]. Italy: Politecnico di Milano, 1992.
- [19] KE L, ZHANG Q, BATTITI R. MOEA/D-ACO: a multiobjective evolutionary algorithm using decomposition and ant colony[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2013, 43(6): 1845-1859.
- [20] 张媵媵, 黄廷磊, 张银明. 基于聚类分析的二分网络社区挖掘[J]. 计算机应用, 2015, 35(12): 3511-3514.  
ZHANG Qiangqiang, HUANG Tinglei, ZHANG Yinming. Detecting community in bipartite network based on cluster analysis[J]. Journal of Computer Applications 2015, 35(12): 3511-3514.
- [21] 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.
- [22] 李佳伦, 薛安成. 基于停运连续潮流和双向潮流追踪的潮流解恢复控制方法[J]. 智慧电力, 2020, 48(8): 70-75.  
LI Jialun, XUE Ancheng. Power flow solvability recovery control method based on outage-continuation power flow and bi-directional power flow tracing[J]. Smart Power, 2020, 48(8): 70-75.
- [23] 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.
- [24] 李滨, 祝靖, 李佩杰, 等. 含非可靠分布式电源的配电网孤岛划分[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 59-65.  
LI Bin, ZHU Jing, LI Peijie, et al. Island partition of distribution network with unreliable distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 59-65.
- [25] 赵晶晶, 徐传琳, 吕雪, 等. 微电网一次调频备用容量与储能优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15): 4324-4332.  
ZHAO Jingjing, XU Chuanlin, LÜ Xue, et al. Optimization of micro-grid primary frequency regulation reserve capacity and energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15): 4324-4332.
- [26] 朱兰, 周雪莹, 唐陇军, 等. 计及可中断负荷的微电网多目标优化运行[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 151-158.  
ZHU Lan, ZHOU Xueying, TANG Longjun, et al. Multi-objective optimal operation for microgrid considering interruptible loads[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 151-158.
- [27] 韦立坤, 赵波, 吴红斌, 等. 虚拟电厂下计及大规模分布式光伏的储能系统配置优化模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 66-74.  
WEI Likun, ZHAO Bo, WU Hongbin, et al. Optimal allocation model of energy storage system in virtual power plant environment with a high penetration of distributed photovoltaic generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 66-74.
- [28] 李秀磊, 耿光飞, 季玉琦, 等. 主动配电网中储能和需求侧响应的联合优化规划[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3803-3810.  
LI Xiulei, GENG Guangfei, JI Yuqi, et al. Integrated optimal planning of energy storage and demand side response in active power distribution network[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3803-3810.

收稿日期: 2021-07-01; 修回日期: 2021-10-17

吴桐(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行及优化等; E-mail: wuutoong@foxmail.com

刘丽军(1982—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为含新能源发电的电力系统规划与运行。E-mail: liulijun0120@fzu.edu.cn

(编辑 周金梅)