

# 考虑非严格凸成本建模的微电网分布式经济调度

王颂, 汪隆君, 王钢, 钟庆  
(华南理工大学电力学院, 广州 510640)

**摘要:** 分布式算法在通信、可靠性、灵活性等方面拥有显著的优势, 在电网经济调度方面显示出其竞争力。为此, 构建了含可转移负荷和向大电网购电的微电网多时段经济调度模型。针对于当前分布式一致性调度算法无法解决调度资源成本函数为非严格凸的情况, 基于卡罗需-库恩-塔克(Karush-Kuhn-Tucker, KKT)条件设计了一种动态功率约束生成策略, 该策略能动态修改局部优化过程中的功率约束, 避免了可转移负荷和购电功率集中参与响应, 消除了调度资源成本函数非严格凸导致结果无法收敛的影响。最后, 仿真算例验证了所提算法的正确性和有效性。

**关键词:** 微电网; 经济调度; 分布式算法; 非严格凸; 一致性算法

## Distributed Economic Dispatch of Microgrid Considering Non-Strictly-Convex Cost Modeling

WANG Song, WANG Longjun, WANG Gang, ZHONG Qing

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Distributed algorithms have significant advantages in communication, reliability, flexibility, and other aspects, demonstrating their competitiveness in the economic dispatch of power grids. For this purpose, a multi-period economic dispatch model for microgrids is constructed, which includes transferable loads and purchasing electricity from the large power grid. A dynamic power constraint generation strategy based on the Karush-Kuhn-Tucker (KKT) condition is designed to address the issue that current distributed consensus dispatch algorithms cannot solve the problem of dispatch resource cost functions being non strictly convex. This strategy can dynamically modify the power constraints in the local optimization process, avoiding the centralized participation of transferable loads and purchasing electricity in response, and eliminating the impact of non strictly convex scheduling resource cost functions that prevent convergence of results. Finally, simulation examples verify the correctness and effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words:** microgrid; economic dispatch; distributed algorithm; non-strictly-convex; consensus algorithm

## 0 引言

微电网是一种含分布式电源、储能和负荷的小规模电力系统<sup>[1-5]</sup>。与集中式资源相比, 分布式资源具有可靠性更高、供电更灵活、传输损耗更小等诸多优势<sup>[6]</sup>, 但也导致了系统中需协调控制的设备数量显著增加。如何通过有效手段对各分布式资源采取适当控制以保证微电网安全、稳定、经济运行, 是微电网调度运行的核心问题之一。其中, 微

电网经济调度是在满足系统功率平衡和各分布式资源功率约束条件的前提下对各分布式资源的功率进行调度, 并使微电网运行总成本达到最小。

微电网的经济调度算法主要分为集中式和分布式两种<sup>[7]</sup>。集中式调度方法通过集中控制器收集并处理全局信息, 如粒子群优化算法<sup>[8]</sup>、拉格朗日松弛法<sup>[9-10]</sup>、遗传算法<sup>[11]</sup>。上述方法普遍存在计算效率低、拓展性差、严重依赖集中控制器等缺点<sup>[12-13]</sup>。

针对上述缺点, 学者们提出计算效率高、可拓展性强、可靠性高的分布式经济调度算法<sup>[14-15]</sup>。其不依赖某个单一节点进行决策控制, 而是利用与邻

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51307063)。

**Foundation item:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (51307063).

居节点交互信息的协调机制,在各分布式资源节点之间迭代达到一致性变量一致,从而达到经济最优目标。分布式经济调度算法主要包括两种:一种是以Leader-Follower算法为代表的半集中式-半分布式算法<sup>[16-17]</sup>。该方法需要一个中央协调器收集功率信息,计算功率调整项以满足系统功率平衡,减少通信需求与计算负担的同时使得算法的可拓展性和可靠性受限,不能算是严格意义上的分布式算法。与之对应地,完全分布式算法的通信和计算不依赖于领导节点,仅通过邻居节点之间通信和本地计算实现,在隐私保护与可靠性上有较大优势<sup>[18-19]</sup>。研究者通过一致性项及创新项<sup>[20]</sup>、饱和机制<sup>[21]</sup>、分布式观测器<sup>[22]</sup>等方法实现了完全分布式的经济调度。以完全分布式算法为基础,研究者们先后研究了分布式电源<sup>[23-25]</sup>、储能<sup>[26-27]</sup>、负荷<sup>[28-29]</sup>参与下的经济调度。但这些研究一方面假设分布式资源调度成本函数均为严格凸函数,另一方面均是对单一时间段的经济调度进行研究。严格凸函数的假设并不适用于所有调度资源,如可转移负荷和向大电网购电,其经济调度成本函数是常数或者线性,即非严格凸函数<sup>[30]</sup>。可调度资源成本函数为非严格凸时其功率为边际成本的非连续响应,这将导致该资源在某一时间段集中响应,表现为功率数值随迭代反复跳变,最终使算法无法满足收敛条件<sup>[31]</sup>。同时,对于储能与可转移负荷等资源,应该置于一个多时间段尺度上进行调度,才更利于降低系统运行总成本,但相关研究较少。综上,现有分布式算法在解决微电网经济调度问题上仍存在挑战。

针对上述问题,本文提出了考虑非严格凸成本建模的微电网完全分布式经济调度算法,以系统运行成本最小为目标,构建了含储能、可转移负荷和向大电网购电的微电网多时间段经济调度模型。进一步地,为解决可调度资源成本函数非严格凸的问题,基于KKT条件分析设计了动态功率约束生成策略,保证了模型算法可靠收敛。

## 1 微电网经济调度模型

微电网含可再生能源发电、同步发电机、储能系统、大电网和负荷,其集合分别用 $I$ 、 $J$ 、 $K$ 、 $G$ 、 $L$ 表示。在时间序列集合 $T = \{1, 2, \dots, t, \dots, T\}$ 上微电网多时段经济调度模型可表达为式(1)~(17)。式(1)为经济调度的目标

函数,由同步发电机、储能和向大电网购电三部分运行成本组成。式(5)为功率平衡约束。式(6)~(7)分别为同步发电机的出力约束和爬坡约束。式(8)~(12)为与储能有关的约束。式(11)为储能系统容量上下限约束。式(12)为调度初期电池存储的电量应该等于调度结束后电池存储的电量,以方便下一调度周期的调度。式(13)~(14)为向大电网购电约束。式(15)~(17)为与负荷有关的约束,负荷由恒定功率负荷和可转移负荷共同组成,其中可转移负荷是指在一定时间内用电时段可变电电量总和一定的负荷。

$$\min \sum_{t \in T} \left( \sum_{j \in J} C_{j,t} + \sum_{k \in K} C_{k,t} + \sum_{g \in G} C_{g,t} \right) \quad (1)$$

$$C_{j,t}(p_{j,t}) = a_j p_{j,t}^2 + b_j p_{j,t} + c_j, j \in J \quad (2)$$

$$C_{k,t}(p_{k,t}) = a_k p_{k,t}^2, k \in K \quad (3)$$

$$C_{g,t}(p_{g,t}) = \pi_t^{\text{grid}} p_{g,t}, n \in G \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} p_{i,t} + \sum_{j \in J} p_{j,t} + \sum_{k \in K} p_{k,t} + \sum_{g \in G} p_{g,t} + \sum_{l \in L} p_{l,t} = 0, \forall t \in T \quad (5)$$

$$p_j^{\min} \leq p_{j,t} \leq p_j^{\max}, \forall j \in J \quad (6)$$

$$|p_{j,t} - p_{j,t-1}| \leq \Delta p_j, \forall j \in J \quad (7)$$

$$p_{k,t} = s_{k,t}^d - s_{k,t}^c, k \in K \quad (8)$$

$$0 \leq s_{k,t}^d \leq p_k^{\max}, 0 \leq s_{k,t}^c \leq p_k^{\max}, k \in K \quad (9)$$

$$E_{k,t} = E_{k,t-1} - (s_{k,t}^d / \eta_k^d - \eta_k^c s_{k,t}^c) \Delta t, k \in K \quad (10)$$

$$E_k^{\min} \leq E_{k,t} \leq E_k^{\max}, k \in K \quad (11)$$

$$E_{k,0} = E_{k,T}, \forall k \in K, T \in T \quad (12)$$

$$0 \leq p_{g,t} \leq p_g^{\max}, \forall g \in G \quad (13)$$

$$0 \leq \sum_{t \in T} p_{g,t} \Delta t \leq E_g^{\max}, \forall g \in G \quad (14)$$

$$p_{l,t} = -l_{l,t} - d_{l,t}, l \in L \quad (15)$$

$$0 \leq d_{l,t} \leq d_l^{\max}, l \in L \quad (16)$$

$$\sum_{t \in T} d_{l,t} \Delta t = E_l^{\max}, l \in L \quad (17)$$

式中:  $C_{j,t}$ 、 $C_{k,t}$ 、 $C_{g,t}$  分别为同步发电机 $j$ 、储能系统 $k$ 和大电网 $g$ 在时间段 $t$ 的成本;  $p_{j,t}$ 、 $p_{k,t}$ 、 $p_{g,t}$  分别为同步发电机 $j$ 、储能系统 $k$ 和大电网 $g$ 在时间段 $t$ 的功率;  $a_j$ 、 $b_j$ 、 $c_j$  为同步发电机 $j$ 的成本系数;  $\pi_t^{\text{grid}}$  为时间段 $t$ 向大电网购电的价格;  $p_j^{\max}$ 、 $p_j^{\min}$  分别为同步发电机 $j$ 的上下限功率约束,  $p_g^{\max}$ 、 $p_g^{\min}$  分别为大电网 $g$ 的上下限功率约束;  $\Delta p_j$  为同步发电机爬坡功率上限;  $s_{k,t}^d$  和  $s_{k,t}^c$  分别为储能系统 $k$ 在时间段

$t$  的放电和充电功率。对于任何储能系统,不可能同时处于放电和充电状态,因此在任意时间段,有约束:  $s_{k,t}^d, s_{k,t}^c = 0$ 。文献[29]已经说明,上述模型求解中,该约束自然满足,不用单独考虑;  $\eta_k^d$ 、 $\eta_k^c$  分别为储能系统放电和充电的效率;  $\Delta t$  为时间段的长度。因此储能系统  $k$  在时间段  $t$  末的电量  $E_{k,t}$  可以由式(10)计算得出;  $E_k^{\min}$ 、 $E_k^{\max}$  分别为储能系统容量的上下限;  $E_{k,0}$ 、 $E_{k,T}$  分别为储能系统初始电量和调度末期电量;  $E_g^{\max}$  为向大电网购电的容量上限;  $l_{l,t} \geq 0$  和  $d_{l,t} \geq 0$  分别为负荷  $n$  在时间段  $t$  的恒定功率负荷和可转移负荷功率;  $d_l^{\max}$  为可转移负荷功率上限;  $E_l^{\max}$  为可转移负荷容量。

## 2 分布式经济调度算法

### 2.1 一致性原理

一致性原理是指通过相邻节点之间交换信息,逐步迭代,使系统中某状态变量最终收敛于共同的稳定值。这些状态变量也称为一致性变量,在经济调度算法中取边际成本为一致性变量,其迭代过程可表示为<sup>[30]</sup>:

$$x_i^{r+1} = \sum_{q \in Q} \varphi_{iq} x_q^r \quad (18)$$

式中:  $x_i^{r+1}$  为节点  $i$  在第  $r+1$  次迭代时的状态变量;  $x_q^r$  为节点  $q$  在第  $r$  次迭代时的状态变量;  $Q$  为能与节点  $i$  通信的节点  $q$  的集合;  $\varphi_{iq}$  为节点  $i$  与节点  $q$  之间的通信系数,可以按式(19)构建<sup>[16]</sup>。

$$\varphi_{iq} = \begin{cases} 2/(n_i + n_q + 1), & q \in Q \\ 1 - \sum_{q \in Q} 2/(n_i + n_q + 1), & i = q \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

式中  $n_i$  和  $n_q$  分别为节点  $i$  和节点  $q$  的邻居节点数量。由  $\varphi_{iq}$  构成的通信系数矩阵  $\Phi = [\varphi_{iq}]$  为非负双随机矩阵,即行列和均为 1。

### 2.2 算法框架

将各分布式资源  $s$  看作一致性原理中的节点,同时引入边际成本  $\lambda_{s,t}$  和功率调整项  $\varepsilon_{s,t}$ 。  $\lambda_{s,t}$  既是分布式资源  $s$  在时间段  $t$  的边际成本,也是对偶问题中与功率平衡有关的拉格朗日乘子;  $\varepsilon_{s,t}$  为分布式资源  $s$  在时间段  $t$  的功率调整项。由边际成本、功率、功率调整项可构建矩阵  $\Lambda = [\lambda_{s,t}]$ 、 $P = [p_{s,t}]$ 、 $E = [\varepsilon_{s,t}]$ 。

分布式算法过程<sup>[21]</sup>概述如下。

1) 变量初始化。在迭代前,对各分布式资源在各时间段的  $\lambda_{s,t}$ 、 $p_{s,t}$ 、 $\varepsilon_{s,t}$  进行初始化,记为:  $\Lambda^0$ 、 $P^0$ 、 $E^0$ 。每一个分布式资源仅根据自身信息将功率初始值和功率调整项初始值设置为相等。同时各分布式资源功率初始值应在约束允许范围之内。

$$p_{s,t}^0 = \varepsilon_{s,t}^0, \forall s \in S, \forall t \in T \quad (20)$$

式中:  $p_{s,t}^0$  和  $\varepsilon_{s,t}^0$  分别为功率和功率调整项的初始值;  $S$  为分布式资源  $s$  的集合;  $T$  为时间  $t$  的集合。变量右上角表示迭代次数,下同。

2) 边际成本更新。边际成本更新包括一致性原理和梯度策略 2 项<sup>[23]</sup>,其更新规则如下。

$$\Lambda^r = \Phi \Lambda^{r-1} - \zeta_1 \cdot E^{r-1} \quad (21)$$

式中:  $\Lambda^r$  为边际成本矩阵第  $r$  次迭代值;  $\Lambda^{r-1}$  和  $E^{r-1}$  分别为边际成本矩阵和功率调整项矩阵第  $r-1$  次迭代值;  $\zeta_1$  为边际成本更新步长参数,为一致性原理项,使得同一时间段边际成本收敛到同一值;  $r$  为迭代次数;  $\zeta_1 \cdot E^{r-1}$  为梯度策略项,用于保证功率平衡<sup>[29]</sup>。

3) 功率更新。在每一次迭代中各分布式资源根据自身信息独立更新功率,执行局部优化,其中可再生能源和恒定功率负荷属于不可调度资源,迭代过程中功率保持不变。更新规则如下。

$$p_{i,t}^r = p_{i,t}^0, \forall i \in I \quad (22)$$

$$d_{l,t}^r = \arg \min_{d_{l,t}} \sum_{t \in T} \lambda_{l,t}^r d_{l,t}, \quad l_{l,t}^r = l_{l,t}^0, \forall l \in L \quad (23)$$

$$p_{l,t}^r = -l_{l,t}^r - d_{l,t}^r, \forall l \in L \quad (24)$$

$$p_{s,t}^r = \arg \min_{p_{s,t}} \sum_{t \in T} [C_{s,t} - \lambda_{s,t}^r p_{s,t}], \forall s \in JUKUG \quad (25)$$

式中:  $p_{i,t}^r$  和  $p_{i,t}^0$  分别为可再生能源发电  $i$  在时间段  $t$  的第  $r$  次迭代值和初始值;  $I$  为可再生能源发电  $i$  的集合;  $d_{l,t}^r$  为负荷  $l$  在时间段  $t$  的可转移负荷功率的第  $r$  次迭代值;  $l_{l,t}^0$  和  $l_{l,t}^r$  分别为负荷  $l$  在时间段  $t$  的恒定功率负荷的初始值和第  $r$  次迭代值;  $s$  为分布式资源。

4) 功率调整项更新。每个分布式资源与相邻节点交换功率和功率调整项信息更新其本次迭代功率调整项。

$$E^r = \Phi(E^{r-1} + P^r - P^{r-1}) \quad (26)$$

式中  $\Phi(\cdot)$  为矩阵乘积。

将式(26)两边同时乘以单位行向量  $\mathbf{1}$ , 为:

$$\mathbf{1}^T E^r = \mathbf{1}^T \Phi(E^{r-1} + P^r - P^{r-1}) \quad (27)$$



进而化简为:

$$\begin{aligned} \mathbf{1}^T(\mathbf{E}^r - \mathbf{P}^r) &= \mathbf{1}^T(\mathbf{E}^{r-1} - \mathbf{P}^{r-1}) \\ &= \mathbf{1}^T(\mathbf{E}^0 - \mathbf{P}^0) \end{aligned} \quad (28)$$

式中  $\mathbf{E}^0$ 、 $\mathbf{P}^0$  分别为功率调整项、功率矩阵的初始值。

当算法收敛时功率调整项矩阵  $\mathbf{E}$  为 0, 系统功率平衡<sup>[4]</sup>。因此等式左边等于 0, 即初始值要满足<sup>[23]</sup>:

$$\sum_{t \in T} p_{s,t}^0 = \sum_{t \in T} \varepsilon_{s,t}^0, \forall t \in T, s \in S \quad (29)$$

为了实现式(29), 一种最简单的方式如步骤1)所述。

5) 收敛判断。当不同分布式资源边际成本差值的最大绝对值小于指定的阈值  $\eta_1$  及功率调整项的最大绝对值小于指定的阈值  $\eta_2$ , 则满足收敛条件, 算法终止, 输出各分布式资源的功率。否则, 迭代次数加 1, 返回步骤2)再次开始迭代。

$$\begin{cases} \max |\lambda_{s1,t}^r - \lambda_{s2,t}^r| < \eta_1, \forall t \in T \\ \max |\varepsilon_{s,t}^r| < \eta_2, \forall t \in T, s \in S \end{cases} \quad (30)$$

式中:  $\lambda_{s1,t}^r$ 、 $\lambda_{s2,t}^r$  分别为分布式资源  $s1$  和  $s2$  经  $r$  次迭代后  $t$  时段的边际成本;  $\varepsilon_{s,t}^r$  为分布式资源  $s$  经  $r$  次迭代后的功率调整项。

### 3 动态功率约束生成策略

#### 3.1 算法局限性

在步骤3功率更新式(23)中, 可转移负荷的目标函数是功率和边际成本乘积之和的最小值, 其为线性而非严格凸的, 这将导致其最优可转移负荷功率为边际成本的非连续响应, 在算法迭代过程出现功率跳变或集中响应的情况, 最终无法收敛<sup>[28]</sup>。同理, 向大电网购电的功率更新式(25)为购电成本与边际成本之差与功率乘积和的最小值, 其亦为线性非严格凸的, 存在类似的问题导致算法难以收敛。

若能够在算法迭代过程中动态改变节点局部功率约束, 限制其可行域区间, 便可避免响应不连续的问题。值得说明的是, 本文研究的是带约束的非严格凸问题, 其目标函数是凸函数但不是严格凸函数, 其取得最小值的充分必要条件为 KKT 条件<sup>[27]</sup>。

#### 3.2 可转移负荷

对于可转移负荷, 设其经济调度最优解为  $d_{n,t}^*$ , 其必须要满足的 KKT 条件为:

$$\begin{cases} \lambda_t - \varepsilon_{l,t} + \varepsilon'_{l,t} - \mu_n = 0 \\ \varepsilon_{l,t} d_{l,t}^* = 0, \varepsilon_{l,t} \geq 0 \\ \varepsilon'_{l,t} (d_l^{\max} - d_{l,t}^*) = 0, \varepsilon'_{l,t} \geq 0, \forall l \in L, \forall t \in T \\ 0 \leq d_{l,t}^* \leq d_l^{\max} \\ \sum_{t \in T} d_{l,t}^* \Delta t = E_l^{\max} \end{cases} \quad (31)$$

式中:  $\varepsilon_{l,t}$ 、 $\varepsilon'_{l,t}$  为与不等式约束(16)相关的变量;  $\mu_l$  为与等式约束式(17)相关的变量;  $\lambda_t$  为与功率平衡约束式(5)相关的变量, 也是时间段  $t$  各分布式资源  $s$  的边际成本收敛后的结果, 即  $\lambda_t = \lim_{r \rightarrow \infty} \lambda_{1,t}^r = \dots = \lim_{r \rightarrow \infty} \lambda_{l,t}^r$ ;  $\Delta t$  为时间变化量。

求解方程式(31)可得到可转移负荷的可能最优功率取值, 如表1所示。首先将不同时间段  $\lambda_t$  按从大到小的顺序排列, 根据  $\lambda_t$  的大小及其对应的最优功率关系, 可将最优功率的可能取值分为3类。I类:  $\lambda_t$  相等, 其功率取值在功率上下限约束的开区间内; II类:  $\lambda_t$  大于或等于 I 类中对应的  $\lambda_t$ , 且其对应的可转移负荷功率值均为 0; III类:  $\lambda_t$  小于或等于 I 类中对应的  $\lambda_t$ , 且其对应的可转移负荷功率值均为功率约束的上限。

表1 可转移负荷功率满足 KKT 条件的可能最优取值

Tab. 1 Possible and optimal powers of shiftable loads that meet KKT conditions

| $\dots \geq \lambda_{t1} \geq (\lambda_{t2} = \dots = \lambda_{t3}) \geq \lambda_{t4} \geq \dots$ |                                             |                                                            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| I 类                                                                                               | II 类                                        | III 类                                                      |
| $t \in \{t   \lambda_t = \lambda_{t2}\}$                                                          | $t \in \{t   \lambda_t \geq \lambda_{t1}\}$ | $t \in \{t   \lambda_t \leq \lambda_{t4}\}$                |
| $d_{l,t}^* \in (0, d_l^{\max})$                                                                   | $d_{l,t}^* = 0$                             | $d_{l,t}^* = d_l^{\max}$                                   |
| $\varepsilon_{l,t} = 0, \varepsilon'_{l,t} = 0$                                                   | $\varepsilon'_{l,t} = 0$                    | $\varepsilon_{l,t} = 0$                                    |
| $\lambda_t = \mu_l$                                                                               | $\lambda_t = \mu_l + \varepsilon_{l,t}$     | $\lambda_t = \mu_l - \varepsilon_{l,t} \varepsilon'_{l,t}$ |
| $\sum_{t \in T} d_{l,t}^* \Delta t = E_l^{\max}$                                                  |                                             |                                                            |

注:  $\lambda_{t1}$ 、 $\lambda_{t2}$ 、 $\lambda_{t3}$ 、 $\lambda_{t4}$  分别为  $t1$ 、 $t2$ 、 $t3$ 、 $t4$  时段与功率平衡约束式(5)相关的变量, 也是这些时段各可转移负荷  $l$  的边际成本收敛后的结果。

$\Omega_l^r$  为第  $r$  次迭代时可转移负荷  $l$  满足一定条件的时段集合, 并计算这些时段对应的可转移负荷  $l$  的边际成本的平均值  $\sigma_l^r$  (如果  $\Omega_l^r$  为空集, 则平均值可以直接取 0)。

$$\Omega_l^r = \left\{ t \left( \begin{aligned} &(\exists t' \in T, \lambda_{l,t'}^r \leq \lambda_{l,t}^r \text{ 且 } d_{l,t'}^{r-1} > 0) \\ &\text{且 } (\exists t'' \in T, \lambda_{l,t''}^r \geq \lambda_{l,t}^r \text{ 且 } d_{l,t''}^{r-1} < d_l^{\max}) \end{aligned} \right) \right\} \quad (32)$$

式中:  $d_{l,t'}^{r-1}$ 、 $d_{l,t''}^{r-1}$  分别为可转移负荷  $l$  在时间段  $t'$ 、 $t''$  的可转移负荷功率第  $r-1$  次迭代值;  $\lambda_{l,t'}^r$ 、 $\lambda_{l,t''}^r$  分

别为可转移负荷  $l$  在时间段  $t'$ 、 $t''$  的边际成本第  $r$  次迭代值； $t'$ 、 $t''$  为集合  $T$  中某一时间段。

可转移负荷  $l$  的约束式 (16) 可以用式 (33) 代替。

$$\max \left( 0, d_{l,t}^{r-1} - \zeta_2 \left| \lambda_{l,t}^r - \sigma_l^r \right| \right) \leq d_{l,t}^r \leq \min \left( d_{l,t}^{r-1} + \zeta_2 \left| \lambda_{l,t}^r - \sigma_l^r \right|, d_{l,t}^{\max} \right) \quad (33)$$

式中  $\zeta_2$  为可转移负荷的步长参数。

可转移负荷约束在每步迭代都需要动态更新。利用上一次迭代值及本次迭代边际成本计算新的约束，约束将逐渐收缩可转移负荷的可行域空间。

可转移负荷  $l$  的边际成本的平均值  $\sigma_l^r$  如式 (34) 所示。

$$\sigma_l^r = \begin{cases} \text{average}(\lambda_{l,t}^r, \forall t \in \Omega_l^r), \Omega_l^r \neq \emptyset \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (34)$$

式中： $\Omega_l^r$  为时间段的集合； $\emptyset$  为空集。

集合  $\Omega_l^r$  实际上是去除了能够满足表 1 中 II 类和 III 类的时间段，随着迭代收敛，集合  $\Omega_l^r$  中时间段对应的边际成本将会越接近其对应的平均值  $\sigma_l^r$ ，功率约束上下限越来越逼近。当集合  $\Omega_l^r$  中时间段对应的边际成本收敛到同一值时，即满足表 1 中 I 类的情况，则对于集合  $\Omega_l^r$  中时间段，满足  $\lambda_{l,t}^r = \sigma_l^r$ ，对应约束更新为  $d_{l,t}^{r-1} \leq d_{l,t}^r \leq d_{l,t}^{r-1}$ ，将使得最优功率收敛保持不变。

### 3.3 向大电网购电

设向大电网购电在经济调度中最优解为  $p_{g,t}^*$ ，其必须要满足的 KKT 条件为：

$$\begin{cases} \pi_t^{\text{grid}} - \lambda_t - \varepsilon_{g,t} + \varepsilon'_{g,t} - \mu_g + \mu'_g = 0, \\ \varepsilon_{g,t} p_{g,t}^* = 0, \varepsilon_{g,t} \geq 0 \\ \varepsilon'_{g,t} (p_{g,t}^{\max} - p_{g,t}^*) = 0, \varepsilon'_{g,t} \geq 0 \\ \mu_g \sum_{t \in T} p_{g,t} = 0, \mu_g \geq 0, \forall g \in G, \forall t \in T \\ \mu'_g \left( E_g^{\max} - \sum_{t \in T} p_{g,t} \Delta t \right) = 0, \mu'_g \geq 0 \\ 0 \leq p_{g,t}^* \leq p_g^{\max} \\ 0 \leq \sum_{t \in T} p_{g,t} \Delta t \leq E_g^{\max} \end{cases} \quad (35)$$

式中： $\varepsilon_{g,t}$ 、 $\varepsilon'_{g,t}$  为与不等式约束 (13) 相关的变量； $\mu_g$ 、 $\mu'_g$  为与不等式约束式 (14) 相关的变量。

为方便描述，记  $\alpha_t = \pi_t^{\text{grid}} - \lambda_t$ 。求解方程式 (35)，可以得到向大电网购电的可能最优功率取值如表 2 所示。首先将不同时间段  $\alpha_t$  按从大到小的顺序排列，根据  $\alpha_t$  的大小及其对应的最优功率关系，

可以将最优功率的可能取值分为 3 类。I 类： $\alpha_t$  相等，其功率取值在功率上下限约束的开区间内；II 类： $\alpha_t$  大于或等于 I 类中对应的  $\alpha_t$ ，且其对应的购电功率值均为 0；III 类： $\alpha_t$  小于或等于 I 类中对应的  $\alpha_t$ ，且其对应的购电功率值均为功率约束的上限。

表 2 向大电网购电功率满足 KKT 条件的可能最优取值

Tab. 2 Possible and optimal powers of purchasing power from the main grid that meet KKT conditions

| $\dots \geq \alpha_{t1} > 0 \geq (\alpha_{t2} = \dots = \alpha_{t3}) \geq \alpha_{t4} \geq \dots$ |                                                 |                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| I 类                                                                                               | II 类                                            | III 类                                            |
| $t \in \{t   \alpha_t = \alpha_{t2}\}$                                                            | $t \in \{t   \alpha_t \geq \alpha_{t1}\}$       | $t \in \{t   \alpha_t \leq \alpha_{t4}\}$        |
| $p_{g,t}^* \in (0, p_g^{\max})$                                                                   | $p_{g,t}^* = 0$                                 | $p_{g,t}^* = p_g^{\max}$                         |
| $\varepsilon_{g,t} = 0$                                                                           | $\varepsilon'_{g,t} = 0$                        | $\varepsilon_{g,t} = 0$                          |
| $\varepsilon'_{g,t} = 0$                                                                          | $\alpha_t = \mu_g - \mu'_g + \varepsilon_{g,t}$ | $\alpha_t = \mu_g - \mu'_g - \varepsilon'_{g,t}$ |
| $\mu_g - \mu'_g = \alpha_t$                                                                       |                                                 |                                                  |
| $0 \leq \sum_{t \in T} p_{g,t} \Delta t \leq E_g^{\max}$                                          |                                                 |                                                  |

注： $\alpha_{t1}$ 、 $\alpha_{t2}$ 、 $\alpha_{t3}$ 、 $\alpha_{t4}$  为对应的不同购电时间段。

由表 2 可知，对于  $\alpha_t > 0$ ，其对应的购电功率值必为 0，且其不含等式约束。为了构造与可转移负荷相似的分析，对于购电资源  $g$  步骤如式 (36) 所示。

式 (36) 中： $\alpha_{g,t}^r = \pi_t^{\text{grid}} - \lambda_{g,t}^r$ ； $\zeta_3$  为向大电网购电的步长参数； $g_{g,t}^r$  为经过重新处理之后的联络点  $n$  在时间段  $t$  向大电网购电的功率。其基本原理是：在  $\alpha_t > 0$  的时间段，要减少购电功率；在  $\alpha_t < 0$  的时间段，要尽可能增加购电功率。进一步地，利用处理可转移负荷相似的方法动态修改节点局部功率约束。向大电网购电资源  $g$  的约束式 (13) — (14) 可以用式 (39) — (40) 代替。

$$\begin{cases} T' = \{t \in T | \alpha_{g,t}^r > 0 \text{ 且 } p_{g,t}^{r-1} > 0\} \\ T'' = \{t \in T | \alpha_{g,t}^r < 0 \text{ 且 } p_{g,t}^{r-1} < p_g^{\max}\} \\ g_{g,t}^r = p_{g,t}^{r-1}, \forall t \in T, T' \cup T'' \\ \delta_g^r = \min \left( \zeta_3; p_{g,t}^{r-1} / \alpha_{g,t}^r, \forall t \in T' \right) \\ g_{g,t}^r = p_{g,t}^{r-1} - \delta_g^r \alpha_{g,t}^r, \forall t \in T' \\ \gamma_g^r = \min \left( \zeta_3; (p_{g,t}^{r-1} - p_g^{\max}) / \alpha_{g,t}^r, \forall t \in T''; \left( \sum_{t \in T} g_{g,t}^r - E_g^{\max} \right) / \sum_{t \in T'} \alpha_{g,t}^r, \forall t \in T' \right) \\ g_{g,t}^r = p_{g,t}^{r-1} - \gamma_g^r \alpha_{g,t}^r, \forall t \in T'' \end{cases} \quad (36)$$

式中  $T'$ 、 $T''$  分别为满足一定条件的时间段集合。

$$\Omega_g^r = \left\{ t \left( \begin{aligned} &\exists t' \in T, \alpha_{g,t'}^r \geq \alpha_{n,t}^r \text{ 且 } g_{g,t'}^r > 0 \\ &\text{且 } (\exists t'' \in T, \alpha_{g,t''}^r \leq \alpha_{n,t}^r \text{ 且 } g_{g,t''}^r < p_g^{\max}) \end{aligned} \right) \right\} \quad (37)$$

$$\sigma_g^r = \begin{cases} \text{average}(\alpha_{g,t}^r, \forall t \in \Omega_g^r), & \Omega_g^r \neq \emptyset \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (38)$$

$$\max(0, g_{g,t}^r - \zeta_3 |\lambda_{g,t}^r - \sigma_g^r|) \leq p_{g,t}^r \leq \min(g_{g,t}^r + \zeta_3 |\lambda_{g,t}^r - \sigma_g^r|, p_g^{\max}) \quad (39)$$

$$\sum_{t \in T} p_{g,t}^r = \sum_{t \in T} g_{g,t}^r \quad (40)$$

式中:  $\zeta_3$  为步长参数;  $t'$ 、 $t''$  分别为集合  $T$  中某一时间段。

### 3.4 改进流程

考虑非严格凸成本建模的微电网完全分布式经济调度加入动态功率约束生成策略后, 其算法流程如图1所示。

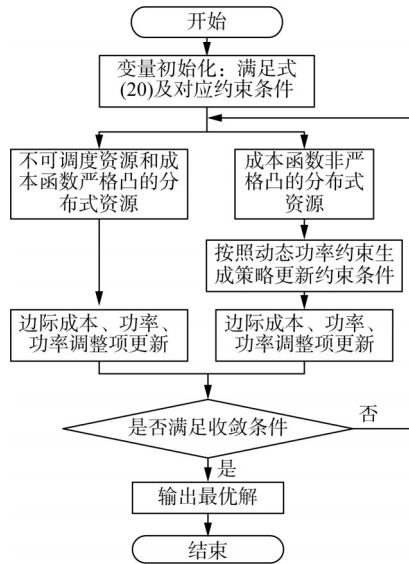


图1 流程图

Fig. 1 Flow chart

具体步骤如下。

- 1) 设置系统初始值, 系统初始值要满足式(20)以及各分布式资源的约束条件;
- 2) 对于可转移负荷以及向大电网购电这类成本函数非严格凸的资源, 根据本地信息计算新的节点局部功率约束;
- 3) 执行边际成本、功率、功率调整项更新;
- 4) 判断是否满足收敛条件, 满足收敛则输出微电网经济调度的最优解, 停止迭代。否则, 迭代次数加1, 再次执行步骤2)。

## 4 算例与仿真结果分析

构建了一个13节点的微电网系统作为算例, 系统包含13个分布式资源, 节点9、11分别连接风力发电和光伏发电, 属于可再生能源发电; 节点2、6、7和12与同步发电机相连; 节点3、10与储能系统相连; 节点4、5、8、13与负荷相连; 节点1与大电网相连。附录A图A1为系统通信拓扑, 虚线连接的两节点表示可以相互通信。经济调度在一天24 h内展开, 从00:00–23:59, 时间间隔为1 h。分布式资源的相关参数列于附表A1—A2; 向大电网购电按照附表A3分时电价进行; 风力发电和光伏发电预测出力如附录A图A2所示; 恒定功率负荷如附录A图A3所示。

基于MATLAB 2023 a与YALMIP工具包进行仿真分析, 集中式算法求解器为gurobi, 硬件环境为AMD Ryzen 7-5800 H CPU @ 3.20 GHz, 16 GB RAM。

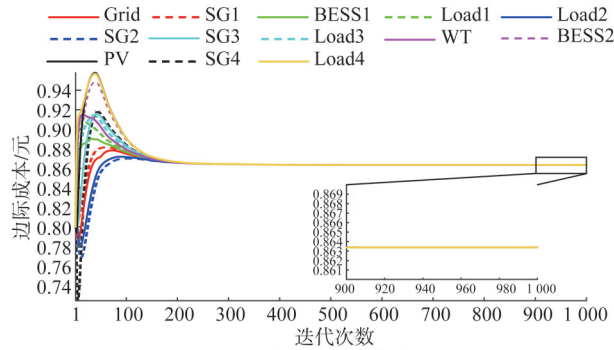
### 4.1 所提算法结果分析

为验证所提完全分布式经济调度算法的收敛性, 假设同步发电机以及向大电网购电的功率初始值为3kW, 可转移负荷初始值假设为可转移负荷容量均匀分配在各时间段, 边际成本初值均设置为0.8。迭代步长参数 $\zeta_1$ 、 $\zeta_2$ 、 $\zeta_3$ 分别取0.000 06, 30, 30, 允许误差被设置为 $\eta_1 = 0.001$ ,  $\eta_2 = 0.1$ 。

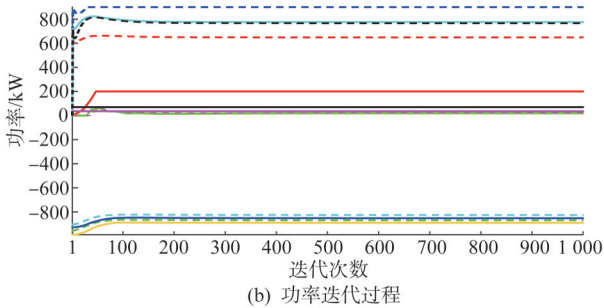
第11个时间段内边际成本、功率以及功率调整项的迭代收敛过程如图2所示。由图2(a)可知, 各分布式资源的边际成本随迭代次数逐步收敛, 经过999次迭代后, 最终收敛到0.863, 表明此时间段内微电网的单位功率的成本为0.863元。由图2(b)—(c)可知, 算法收敛时各分布式资源功率趋于稳定, 其中, 光伏发电和风力发电其功率值不随迭代次数变化, 负荷的功率值始终小于0, 负荷功率变化是可转移负荷在不同时间段上重新分配的结果。各分布式资源的功率调整项随算法迭代都收敛到0。

为进一步说明算法的收敛性, 图3展示了第11个时间段的各分布式资源边际成本与最终收敛值0.863的差值迭代情况。结果表明: 随着迭代进行, 各分布式资源边际成本均收敛到0.863, 误差绝对值均不超过 $\eta_1=0.001$ 。综上, 本文所提完全分布式经济调度算法在考虑非严格凸的成本建模时依然能

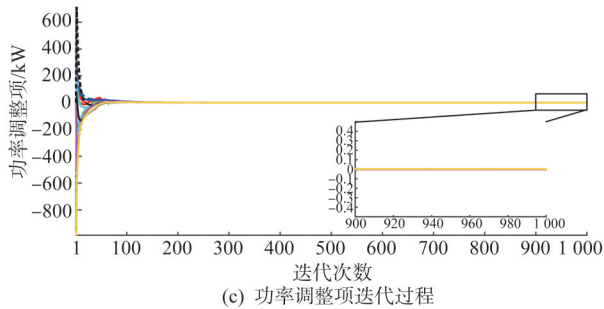




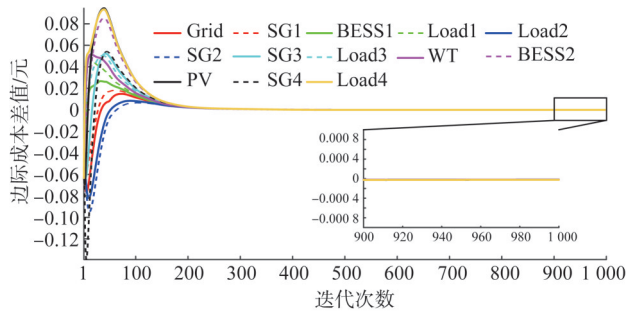
(a) 边际成本迭代过程



(b) 功率迭代过程

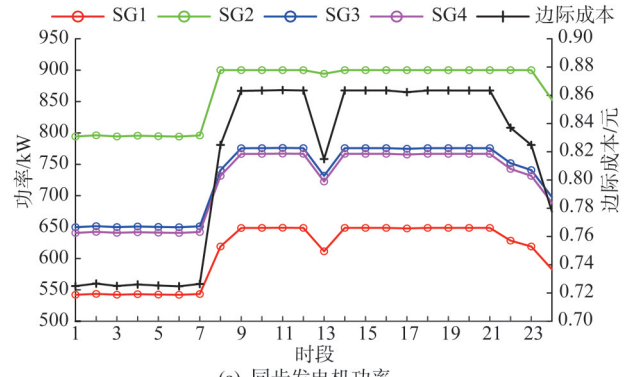


(c) 功率调整项迭代过程

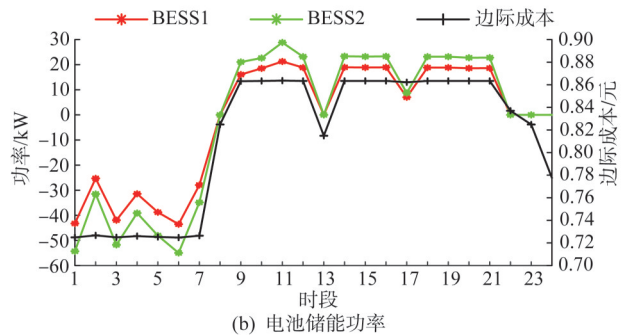
图2 本文所提算法下不同变量在 $t=11$ 的迭代过程Fig. 2 Iterative evolution of different variables at  $t=11$  under the algorithm proposed in this paper图3 本文所提算法下边际成本差值在 $t=11$ 的收敛过程Fig. 3 Convergence evolution of marginal cost difference at  $t=11$  under the algorithm proposed in this paper

够收敛。

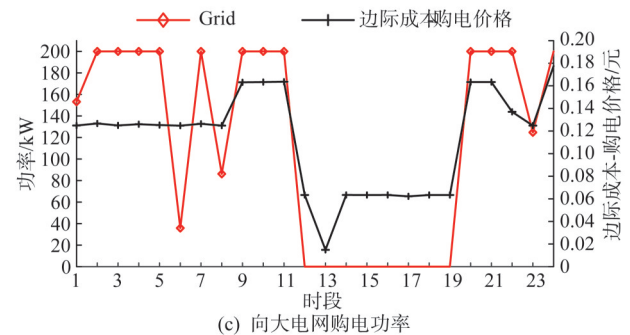
图4为微电网一天24个时间段同步发电机、储能系统、向大电网购电、可转移负荷的功率大小



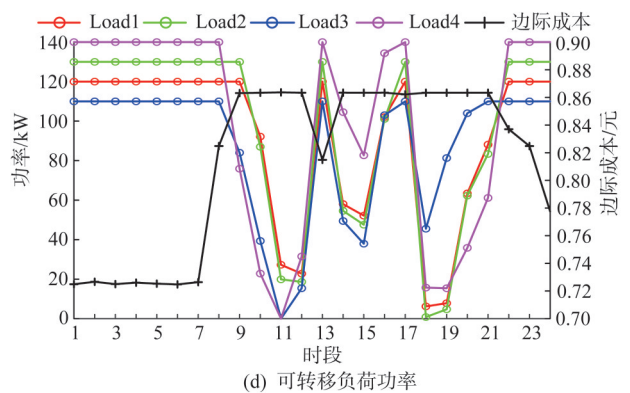
(a) 同步发电机功率



(b) 电池储能功率



(c) 向大电网购电功率



(d) 可转移负荷功率

图4 各分布式资源功率

Fig. 4 Power of each distributed energy resource

情况。

由图4(a)可知同步发电机的功率跟边际成本成正向关系，有着相似的曲线轮廓。边际成本越高，同步发电机功率越大。由图4(b)可知储能系统在边

际成本较低时进行充电,在边际成本较高时进行放电,能起到削峰填谷的作用。同时,由于充放电效率造成的能量损失,储能系统充电功率大于放电功率。由图4(c)可知购电功率与边际成本、购电价格有关,边际成本与购电价格的差值越大,购电功率越大。差值较小时,比如在第12~19时间段,购电功率为0。其他时间段购电功率也被合理分配,避免了购电功率在某些时间段集中响应。图4(d)为可转移负荷功率与边际成本的关系,功率优先分配在边际成本较小的时间段,尽可能降低微电网运行成本。

接下来以负荷1(Load1)中可转移负荷的功率分布为例说明本文所提动态功率约束生成策略是如何工作的。图5为时间段 $t=11$ 时负荷1中可转移负荷的功率分布及其约束的情况。可以发现,其上下限约束大幅收窄,随着迭代进行,上下限约束逐渐收敛到同一稳定值,这一稳定值也为最优可转移负荷功率。约束范围的收窄避免了局部优化过程中由于非连续响应导致的功率跳变。约束范围的改变不影响结果收敛,约束随着迭代进行动态更新,最后也达到收敛。

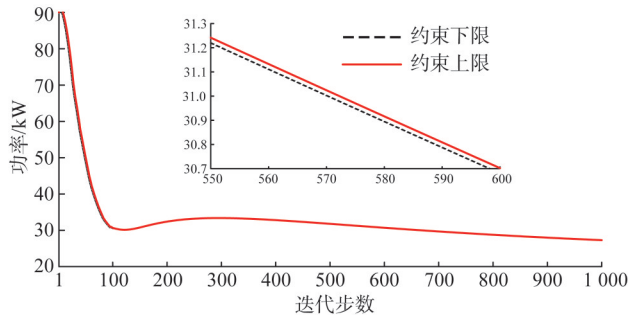


图5 负荷1中可转移负荷功率分布及约束

Fig. 5 Shiftable loads power distribution and constraints of Load 1

最后,为验证本文算法的最优性,图6为分布式方法和集中式方法下微电网最低总运行成本的变化情况。黑色虚线、红色实线分别表示本文所提分布式算法和集中式方法计算得出的最低总成本。经过一定的迭代次数,分布式算法计算出成本最终收敛为33 213元,与集中式方法结果相同,证明了结果的最优性。

在不考虑通信时间下,利用gurobi商用求解器作集中式调度耗时0.87 s。本文所提分布式方法

下,迭代1 000次求解时间为52 s;迭代500次时间为30 s,系统运行成本与最优解误差仅为0.012%;迭代300次求解时间为16.7 s,分布式资源个体平均耗时约为1.3 s,系统运行成本与最优解误差仅为0.13%。本文所提方法用于日前经济调度中,求解时间能够满足实际需求。

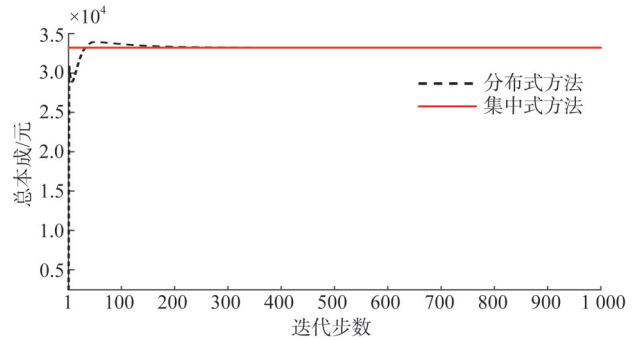


图6 总成本变化

Fig. 6 Iterative evolution of total costs

## 4.2 算法比较分析

为证明现有分布式经济调度算法在解决考虑非严格凸成本建模的微电网经济调度问题中存在的局限性,本节通过现有分布式算法求解上述模型,参数设置与4.1相同。图7展示了在第11个时间段内边际成本和功率调整项的迭代过程。

从图7(a)可以看到,边际成本有一定的收敛趋势,但经过多次迭代其误差都不能达到要求,从放大图可以看到,边际成本存在上下反复波动的情况。从图7(b)可以看到,功率调整项表现出了类似情况,存在震荡过程,始终无法满足收敛条件,达不到功率平衡的要求。

## 4.3 可靠性分析

### 4.3.1 节点故障

为验证所提算法在节点故障情况下的适用性,设大电网节点(节点1)在迭代50次后突然发生故障,该节点无法参与后续计算,被迫退出分布式优化。此时节点1向大电网购电功率、边际成本、功率调整项均不能再更新,其数值维持不变;其他节点正常参与计算。此时,通信拓扑移除节点1后依然是连通图,满足分布式算法运行条件<sup>[31]</sup>。按照图1所示流程更新通信系数矩阵 $\phi$ ,功率 $P$ 、功率调整项初始值 $D$ 后继续进行分布式优化。节点1迭代50次发生故障 $t=11$ 时各分布式资源的边际成本收敛情况如图8(a)所示,非故障节点边际成本收敛于



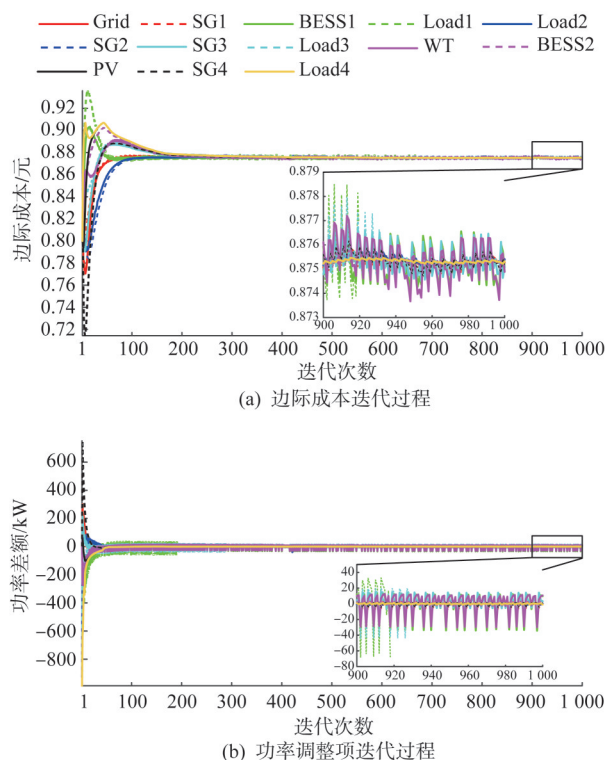


图7 现有分布式方法下不同变量在 $t=11$ 的迭代过程

Fig. 7 Iterative evolution of different variables at  $t=11$  under the existing distributed algorithm

0.866元,系统总运行成本为33 225元;相比于非故障情况下,系统运行成本略有上升。

#### 4.3.2 通信故障

进一步地,为说明通信故障条件下所提算法的适用性,设通信线路如附录图A1所示,虚线连接的两节点均表示可相互通信,迭代50次后红色虚线的通信线路突然发生故障。按照图1所示流程更新通信系数矩阵 $\phi$ ,其他参数维持不变,继续进行分布式优化。各分布式资源的边际成本如图8(b)所示,通信拓扑切换后算法收敛,系统运行总成本维持不变,为33 213元。

综上,分布式算法不依赖于计算中心,在节点故障和通信故障时只需通信拓扑满足连通条件,算法依然能够可靠工作,并表现出较好的收敛性能,即可靠性更强。而运行集中式算法的中心节点异常,系统将难以正常工作。

## 5 结语

本文提出了一种考虑非严格凸成本建模的微电网分布式经济调度算法,基于KKT条件分析推导

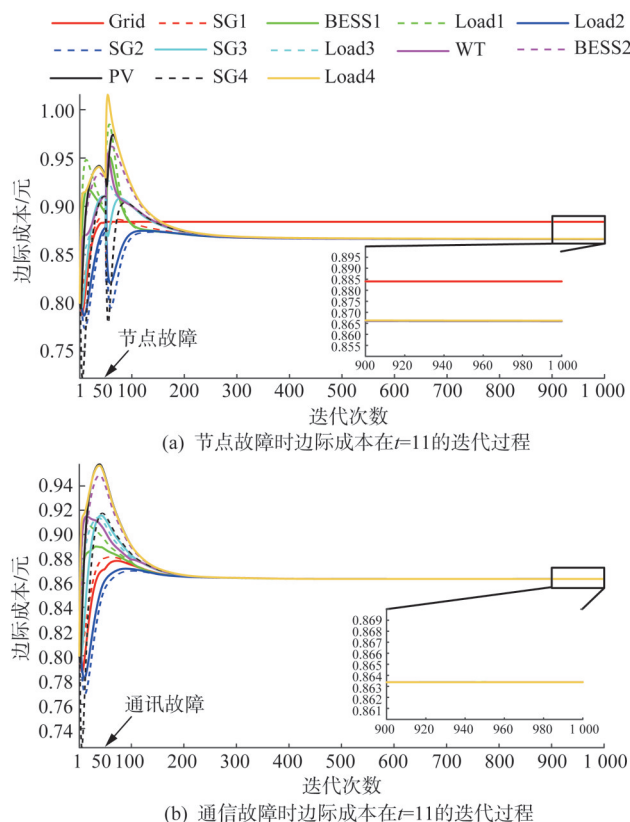


图8 故障下边际成本迭代过程

Fig. 8 Iterative evolution of marginal costs under failure

出动态功率约束生成策略,有效避免了调度资源功率跳变或集中响应。通过仿真实验,得出如下结论。

1) 所提动态功率约束生成策略能保证分布式算法收敛性和全局最优求解。

2) 所提方法为完全分布式算法,相比于集中式调度算法,不依赖于计算中心,可靠性更强。

## 参考文献

- [1] VANDOORN T L, RENDERS B, DEGROOTE L, et al. Active load control in islanded microgrids based on the grid voltage[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 139 - 151.
- [2] MORADI M H, ESKANDARI M, HOSSEINIAN S M. Cooperative control strategy of energy storage systems and micro sources for stabilizing microgrids in different operation modes[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016(78): 390 - 400.
- [3] 徐钰涵, 季天瑶, 李梦诗. 基于深度强化学习的微电网日前日内协调优化调度[J]. 南方电网技术, 2024, 18(9): 106 - 116.

XU Yuhan, JI Tianyao, LI Mengshi. Day-ahead and intra-day coordinated optimal scheduling of microgrid based on deep reinforcement learning[J]. Southern Power System Technology,

- 2024,18(9):106-116.
- [4] 郭国栋,徐倩雯,龚雁峰.考虑需求响应的互联交直流混合微电网的分布式经济调度模型[J].电测与仪表,2023,60(5):116-125,153.
- GUO Guodong, XU Qianwen, GONG Yanfeng. A distributed economic dispatching model for networked hybrid AC/DC microgrids considering demand response [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 116-125, 153.
- [5] 闫志彬,李立,阳鹏,等.考虑构网型储能支撑能力的微电网优化调度策略[J].中国电力,2025,58(2):103-110.
- YAN Zhibin, LI Li, YANG Peng, et al. Optimal scheduling strategy for microgrid considering the support capabilities of grid forming energy storage [J]. Electric Power, 2025, 58(2): 103-110.
- [6] O'CONNELL A, TAYLOR J, SMITH J, et al. Distributed energy resources takes center stage: a renewed spotlight on the distribution planning process [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2018, 16(6): 42-51.
- [7] 米阳,彭建伟,陈博洋,等.基于一致性原理和梯度下降法的微电网完全分布式优化调度[J].电力系统保护与控制,2022,50(15):1-10.
- MI Yang, PENG Jianwei, CHEN Boyang, et al. Fully distributed optimal dispatch of a microgrid based on consensus principle and gradient descent [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(15): 1-10.
- [8] JAIN N, SINGH S N, SRIVASTAVA S C. A Generalized approach for dg planning and viability analysis under market scenario [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(11): 5075-5085.
- [9] DING T, BIE Z. Parallel augmented lagrangian relaxation for multi-period economic dispatch using diagonal quadratic approximation method [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016(9): 1-10.
- [10] ZHU W, DONG Z, YU Y, et al. Lagrange dual method for sparsity constrained optimization [J]. IEEE Access, 2018(6): 28404-28416.
- [11] LIANG H, LIU Y, SHEN Y, et al. A Hybrid bat algorithm for economic dispatch with random wind power [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5052-5061.
- [12] KALLITSIS M G, MICHAELIDIS G, DEVETSIKIOTIS M. Optimal power allocation under communication network externalities [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 162-173.
- [13] XIN H, QU Z, SEUSS J, et al. A self-organizing strategy for power flow control of photovoltaic generators in a distribution network [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1462-1473.
- [14] 乐健,周谦,赵联港,等.基于一致性算法的电力系统分布式经济调度方法综述[J].电力自动化设备,2020,40(3):44-54.
- LE Jian, ZHOU Qian, ZHAO Liangang, et al. Overview of distributed economic dispatch methods for power system based on consensus algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 44-54.
- [15] 邓思成,陈来军,郑天文,等.考虑系统延时的微电网有功功率分布式控制策略[J].电网技术,2019,43(5):1536-1542.
- DENG Sicheng, CHEN Laijun, ZHENG Tianwen, et al. Active power distributed control of microgrids considering system time delays [J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1536-1542.
- [16] WEN G, YU X, LIU Z W, et al. Adaptive consensus-based robust strategy for economic dispatch of smart grids subject to communication uncertainties [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(6): 2484-2496.
- [17] ZHANG Z, CHOW M Y. Convergence analysis of the incremental cost consensus algorithm under different communication network topologies in a smart grid [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1761-1768.
- [18] YANG S, TAN S, XU J X. Consensus based approach for economic dispatch problem in a smart grid [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4416-4426.
- [19] XU Y, LI Z. Distributed optimal resource management based on the consensus algorithm in a microgrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4): 2584-2592.
- [20] HU G G, KAR S, WU C. Consensus innovations approach for distributed multiagent coordination in a microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1893-1903.
- [21] 杨振铨.多分布式电源的优化与协同控制策略[D].杭州:浙江大学,2019.
- [22] RAHBARI-ASR N, OJHA U, ZHANG Z, et al. Incremental welfare consensus algorithm for cooperative distributed generation/demand response in smart grid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(6): 2836-2845.
- [23] ZHANG Y, RAHBARI-ASR N, CHOW M Y. A robust distributed system incremental cost estimation algorithm for smart grid economic dispatch with communications information losses [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2016(59): 315-324.
- [24] WANG R, LI Q, ZHANG B, et al. Distributed consensus based algorithm for economic dispatch in a microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 3630-3640.
- [25] 李瑞,李占凯,张福民,等.基于共识算法的直流微电网群分布式优化调度策略[J].南方电网技术,2022,16(1):49-57.
- LI Rui, LI Zhankai, ZHANG Fumin, et al. Distributed optimal scheduling strategy of DC microgrid cluster based on consensus algorithm [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(1): 49-57.
- [26] XU Y, ZHANG W, HU G G, et al. Cooperative control of distributed energy storage systems in a microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 238-248.
- [27] 张步云,王晋宁,梁定康,等.采用一致性算法的自治微电网群分布式储能优化控制策略[J].电网技术,2020,44(5):1705-1713.
- ZHANG Buyun, WANG Jinning, LIANG Dingkang, et al. Optimization control strategy of distributed energy storage in autonomous microgrid cluster on consensus algorithm [J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1705-1713.
- [28] ZHAO C, HE J, CHENG P, et al. Consensus-based energy management in smart grid with transmission losses and directed communication [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2049-2061.
- [29] 谈竹奎,刘斌,王扬,等.潘廷哲.基于多智能体协调的柔性温控负荷分布式分层控制策略[J].南方电网技术,2023,17(7):45-54.
- TAN Zhukui, LIU Bin, WANG Yang, et al. Distributed hierarchical control strategy of flexible thermostatically controlled loads based on multi-agent coordination [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(7): 45-54.

[30] 袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997.

[31] PAPADASKALOPOULOS D, PUDJANTO D, STRBAC G. Decentralized coordination of microgrids with flexible demand and energy storage [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(4): 1406 – 1414.

[32] WU D, YANG T, STOORVOGEL A A, et al. Distributed optimal coordination for distributed energy resources in power systems [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2017, 14(2): 414 – 424.

[33] OLFATI-SABER R, FAX J A, MURRAY R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 215 – 233.

[34] NEDICH A, OLSHEVSKY A, SHI W. Achieving geometric convergence for distributed optimization over time-varying graphs [J]. SIAM Journal on Optimization. 2016, 27(4): 2597 – 2633.

收稿日期: 2023-10-29; 网络首发日期: 2024-06-24

作者简介:

王颂(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网经济调度与运行控制, wangsong024@163.com;

汪隆君(1982), 男, 讲师, 博士, 研究方向为电力系统规划与可靠性, epwlj@scut.edu.cn;

王钢(1966), 男, 通信作者, 教授, 博士, 研究方向为电力系统保护、控制与自动化, wangg@scut.edu.cn。

附录 A

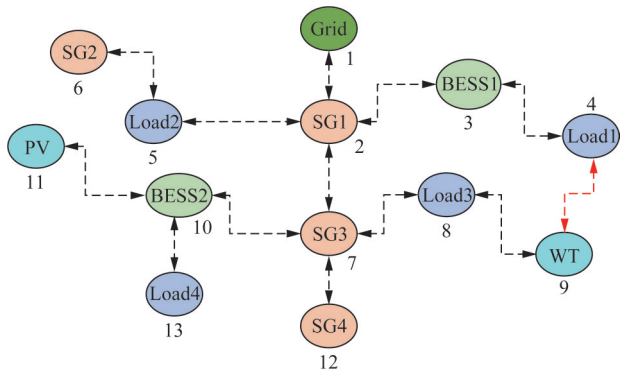


图 A1 13 节点微电网通信拓扑

Fig. A1 Communication network topology of 13-bus system

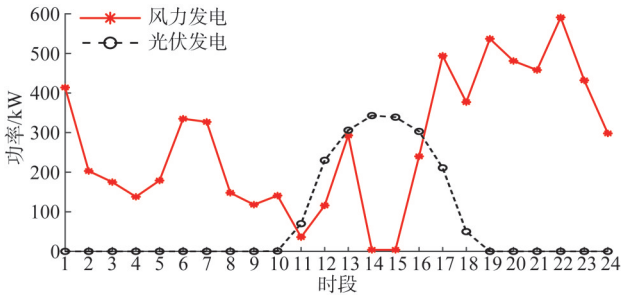


图 A2 风力发电与光伏发电预测出力

Fig. A2 Forecasted outputs of wind and photovoltaic power generations

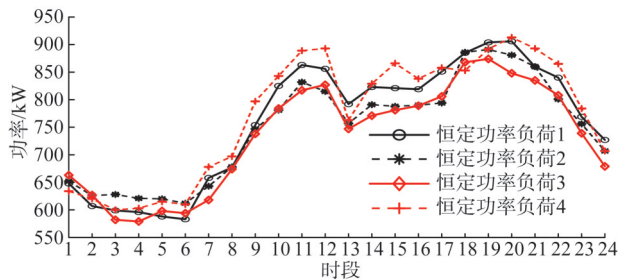


图 A3 恒定功率负荷

Fig. A3 Constant power loads

表 A2 可转移负荷参数

Tab. A2 Parameters of shiftable loads

| 可转移负荷 | $d_n^{\max}/\text{kW}$ | $E_n^{\max}/\text{kWh}$ |
|-------|------------------------|-------------------------|
| Load1 | 120                    | 2 200                   |
| Load2 | 130                    | 2 300                   |
| Load3 | 110                    | 2 100                   |
| Load4 | 140                    | 2 400                   |

表 A3 向大电网购电价格

Tab. A3 Prices of purchasing powers from the main grid

| 价格/元 | 时间段                     |
|------|-------------------------|
| 0.6  | 00:00—07:00/23:00—00:00 |
| 0.7  | 07:00—11:00/19:00—23:00 |
| 0.8  | 11:00—19:00             |

表 A1 各分布式资源参数

Tab. A1 Parameters of distributed energy resources

| 分布式资源 | $a_n$    | $b_n$ | $c_n$ | $[p_n^{\min}, p_n^{\max}]/\text{kW}$ | $\Delta p_n/\text{kW}$ | $[E_n^{\min}, E_n^{\max}]/\text{kWh}$ | $[\eta_n^d, \eta_n^c]$ |
|-------|----------|-------|-------|--------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|------------------------|
| SG1   | 0.000 65 | 0.02  | 10    | [100, 1 000]                         | 200                    |                                       |                        |
| SG2   | 0.000 45 | 0.01  | 30    | [150, 900]                           | 200                    |                                       |                        |
| SG3   | 0.000 55 | 0.01  | 20    | [100, 850]                           | 100                    |                                       |                        |
| SG4   | 0.000 55 | 0.02  | 40    | [120, 1 100]                         | 200                    |                                       |                        |
| BESS1 | 0.000 05 |       |       | [0, 60]                              |                        | [0, 500]                              | [0.92, 0.92]           |
| BESS2 | 0.000 04 |       |       | [0, 70]                              |                        | [0, 580]                              | [0.92, 0.92]           |
| 电网    |          |       |       | [0, 200]                             |                        | [0, 2 800]                            |                        |