

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221951

基于一致性的综合能源系统低碳经济调度

贺文¹, 陈珍萍^{1,2,3}, 胡伏原^{1,2,3}, 景苏川¹, 顾敏明^{1,2,3}

(1. 苏州科技大学, 江苏 苏州 215009; 2. 苏州市智能低碳技术及应用重点实验室, 江苏 苏州 215009;
3. 江苏省工业低碳技术工程研究中心, 江苏 苏州 215009)

摘要: 综合能源系统(integrated energy system, IES)是解决能源损耗和环境污染问题的有效途径。为提高 IES 的经济性和环保性, 提出了一种基于一致性的 IES 低碳经济调度策略。首先, 在 IES 中引入阶梯式碳交易机制, 在碳交易成本函数构造中, 提出一种随着碳排区间而递增的成本系数, 通过成本的非线性递进来限制碳排放量。其次, 综合考虑能量传输过程中的损耗问题, 构建一种结合用能需求和传输损耗的供需平衡约束条件。然后, 将电、热、气供能单元的增量成本作为一致性变量, 利用领导一致性算法对 IES 进行分布式调度, 进而实现各单元的供能最优输出。最后, 结合不同的实验案例验证了所提低碳经济调度策略的有效性。

关键词: 综合能源系统; 低碳经济调度; 一致性算法; 增量成本; 碳交易机制

Consensus-based low-carbon economic dispatching of integrated energy systems

HE Wen¹, CHEN Zhenping^{1,2,3}, HU Fuyuan^{1,2,3}, JING Suchuan¹, GU Minming^{1,2,3}

(1. Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Suzhou Key Laboratory of Intelligent Low Carbon Technology and Application, Suzhou 215009, China; 3. Jiangsu Province Industrial Low Carbon Technology Engineering Research Center, Suzhou 215009, China)

Abstract: Integrated energy system (IES) are an effective way to solve energy loss and environmental pollution problems. A consensus-based distributed dispatching method is studied to realize economical operation and the environmental protection of IES. First, a stepped carbon trading mechanism is studied, where a non-linear cost coefficient that increases with the carbon emission interval is designed to construct the carbon trading cost function. In this way, the amount of carbon emission is limited. Second, the power loss problem in the energy transmission process is considered, and a supply-demand balance constraint that combines energy demand and transmission loss is constructed. Third, the incremental costs of electricity, heat, and gas supply units are considered as the consensus variables. Then, a leader-following consensus algorithm is designed to perform the distributed scheduling of the IES, thus realizing the optimal output of energy supply for each unit. Finally, the effectiveness of the proposed low-carbon economic dispatching strategy is verified with some numerical experimental cases.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51874205).

Key words: integrated energy system (IES); low carbon economic dispatch; consistency algorithm; incremental cost; carbon trading mechanism

0 引言

随着碳达峰碳中和目标提出, 如何在提高系统整体能源效率的前提下综合多种类型能源是解决能源消耗和限制碳排放量增长的关键举措^[1]。综合能

源系统(integrated energy systems, IES)通过将电-热-气 3 种能源进行合理规划和运行, 为降低运营成本、提高综合能源效率提供了一条重要的解决途径^[2-6]。同时, 随着综合能源系统的发展, 各种形式能源之间的联系更加密切, 不同的调度策略对实现系统经济性和能效性方面具有更大的影响和意义^[7-10]。当前, 对 IES 的优化调度已经成为解决能源发展与环境矛盾的主要方法, IES 以其多能源低

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51874205); 江苏高校“青蓝工程”项目资助

碳经济性的潜力, 可进一步推进低碳电力和加速碳减排目标的实现^[11-13]。

如何实现经济性调度成为 IES 迫切需要解决的问题。传统的 IES 经济调度通常使用集中式的方法, 该方法需要有调度中心即中心处理器来统筹所有智能体的信息并进行处理, 对处理器的性能有很高的要求^[14]。一旦中心处理器发生故障, 则整个系统失去作用, 这种局限表现出集中式的灵活性低、可扩展性差, 并且现阶段难以满足对分布式能源接入电力系统的稳定性控制和经济调度的需求^[15]。因此, 利用通信负担小、隐私性和鲁棒性强、扩展性好的分布式方法更容易对系统中各个单元进行协作控制^[16]。随着一致性算法在多智能体系统中的广泛应用, 其在 IES 经济调度中也得到重点研究。文献[17-18]提出了一种以发电机组的增量成本作为一致性变量的分布式经济调度策略。文献[19]将事件触发机制加入到电热综合能源系统的分布式经济调度策略中。文献[20]提出了一种分布式一致性算法来处理完全分布式的电热耦合系统的经济调度问题。文献[21]通过 ADMM 算法实现综合能源系统的能源管理和优化运行。上述文献中的一致性算法收敛速度会随着综合能源系统的不断复杂而受到限制, 从而影响经济调度的性能优化。

需要指出的是, 以上研究大多数主要涉及综合能源系统的经济性, 并未考虑系统运行时对环境的影响。碳交易市场的出现极大地减少了系统运行时的碳排放, 其中碳交易机制主要通过碳交易市场来推动系统的节能减排。碳交易机制分为传统式碳交易和阶梯式碳交易两种^[22]。文献[23]在 IES 模型中加入了碳交易机制, 研究了碳排放配额和碳交易价格对系统运行的影响, 通过对比分析体现出碳交易机制的引入对系统减排的作用。文献[24-26]在 IES 调度中加入了传统式碳交易机制, 有效地减少了碳排放量和碳交易成本, 并在低碳背景下对模型进行了优化调度, 但以上研究只考虑了在调度中引入传统式碳交易机制。在对阶梯式碳交易机制的研究中, 文献[27]比较了传统式和阶梯式碳交易机制对 IES 运行和碳排放量的影响, 并指出阶梯式碳交易机制可以进一步减少碳排放量, 提高 IES 运行的经济性。然而, 文献[27]所设计阶梯式碳交易机制仅构建三级阶梯机制, 在减少碳排放量的优化上尚存在一定的改进空间。

基于上述研究, 本文将阶梯式碳交易机制应用于综合能源系统的分布式调度问题中, 研究考虑碳排放因素的分布式一致性经济调度算法, 达到在经济最优时碳排放量最少的效果, 使经济性和环保性

得到提升。本文的主要贡献如下:

1) 在综合能源系统模型中引入碳交易机制, 利用碳交易成本函数中所构建的非线性递增成本系数, 使碳排放量在不同区间内碳交易成本非线性增长, 从而抑制碳排放量的增加。

2) 提出一种基于一致性理论的 IES 分布式调度算法, 利用领导快速一致性算法分别对电、热、气供能单元增量成本进行迭代使其达到一致, 从而使功率输出达到最优, 并实现能源损耗、用户用能和 IES 供能的供需平衡。

1 综合能源架构与基础知识

1.1 综合能源系统架构

IES 综合能源调度中心通过耦合各种设备之间的能源转化, 在考虑用户负荷需求下对各个子系统进行控制和调度, IES 框架如图 1 所示。

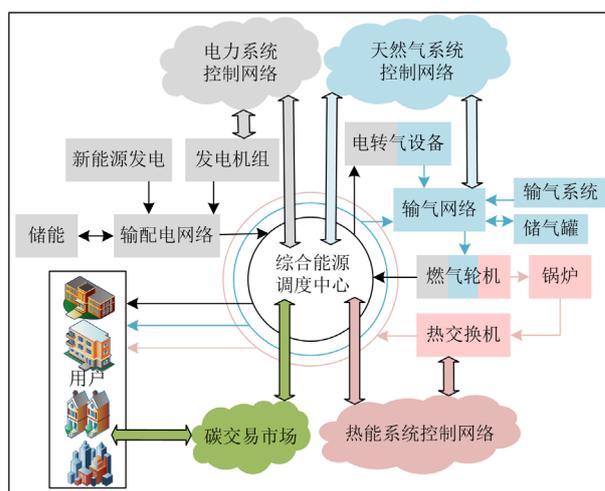


图 1 综合能源系统框架图

Fig. 1 Framework diagram of integrated energy system

从图 1 可以看出, 综合能源系统可以使电力、热能和天然气系统互联, 打破原有的独立模式^[28]。并且随着碳交易市场的引入, 考虑碳排放机制的能源调度可以减少碳排放量并提高能源利用率, 实现 IES 低碳经济发展^[29]。

1.2 基础知识

1.2.1 图论

现在简要介绍本文用到的图论相关知识。用节点(智能体)表示综合能源系统的子系统, 记综合能源系统节点间的通信关系为无向加权图 $G = (V, E, W)$, 其中 $V = \{1, 2, \dots, N\}$ 为节点的集合, N 表示网络中节点数目; 边集 $E \subseteq V \times V$ 表示 N 个子节点间的通信关系, 若子系统 j 可接收到节点 i 的信息, 则 $\{i, j\} \in E$, 反之 $\{i, j\} \notin E$, 且假定网络中不存在

自连接, 即 $\forall i \in V, \{i, i\} \notin E$; $W = \{W_{ij}\}$ 为网络 G 的邻接权重矩阵^[30]。在无向图中, 节点间的通信没有方向, 即 $\forall i \neq j, \{i, j\} \in E$ 即意味着 $\{j, i\} \in E$ 。定义 $N_i = \{j | (j, i) \in E, i \neq j\}$ 表示节点 i 的输入邻居节点集。对连接权重矩阵 W , 若 $\{i, j\} \in E$, 则 $W_{ij} > 0$, 反之若 $\{i, j\} \notin E$, $W_{ij} = 0$ 。定义加权图 G 节点 i 的

入度为 $d_i^{\text{in}} = \sum_{j=1}^N W_{ji}$, 网络 G 的入度矩阵为

$D^{\text{in}} = \text{diag}\{d_i^{\text{in}}\}$, 网络 G 的拉普拉斯矩阵定义为

$L = D^{\text{in}} - W$, 且满足 $L^T = L, LL_N = \mathbf{0}_N$ 。

1.2.2 一致性算法

在多智能体协同控制中, 其本质问题就是设计一致性控制协议使智能体的状态变量趋于一致。在一个具有 n 个智能体的系统中, 用 $x_i(k)$ 表示该系统中第 i 个智能体的状态信息, 则多智能体离散一致性算法可以表示为

$$x_i(k+1) = x_i(k) + u_i(k) \quad (1)$$

$$u_i(k) = g \sum_{j \in N_i} W_{ij} [x_j(k) - x_i(k)] \quad (2)$$

式中: $u_i(k)$ 表示第 i 个节点第 k 个时刻的控制输入; $x_j(k)$ 表示邻居节点 j 第 k 个时刻的状态信息变量; g 表示待设计的一致性增益。

本文所设计的一致性算法控制属于同步控制, 具有领导智能体, 可实现智能体只和少部分邻居智能体进行信息交流, 并且与领导智能体保持同步的效果。

2 IES 低碳经济调度模型

本节首先建立综合能源系统成本函数, 包括供电、供热和供气系统的运行成本和碳交易成本两部分; 接着建立低碳经济调度模型, 对总成本函数进行经济调度优化, 使碳排放减少的同时经济最优。

2.1 目标函数的建立

2.1.1 综合能源系统运行成本函数

首先, 对于供电系统, 用 f_e 表示其运行成本, 其成本函数建模如式(3)和式(4)所示。

$$f_e = \sum_{i=1}^N (\alpha_{e,i} P_{e,i}^2 + \beta_{e,i} P_{e,i} + \gamma_{e,i}) \quad (3)$$

$$P_{e,i}^{\text{min}} \leq P_{e,i} \leq P_{e,i}^{\text{max}} \quad (4)$$

式中: $\alpha_{e,i}$ 、 $\beta_{e,i}$ 、 $\gamma_{e,i}$ 表示第 i 个节点的供电成本参数; $P_{e,i}$ 表示第 i 个节点的供电有效输出功率, 并且满足极限输出约束; $P_{e,i}^{\text{min}}$ 和 $P_{e,i}^{\text{max}}$ 分别表示节点 i 的最小和最大供电功率限幅。

其次, 对于供热系统, 用 f_h 表示其运行成本, 其成本函数为

$$f_h = \sum_{i=1}^N (\alpha_{h,i} H_{h,i}^2 + \beta_{h,i} H_{h,i} + \gamma_{h,i}) \quad (5)$$

$$H_{h,i}^{\text{min}} \leq H_{h,i} \leq H_{h,i}^{\text{max}} \quad (6)$$

式中: $\alpha_{h,i}$ 、 $\beta_{h,i}$ 、 $\gamma_{h,i}$ 表示第 i 个节点的供热成本参数; $H_{h,i}$ 表示第 i 个节点的供热有效输出功率, 并且满足极限输出约束; $H_{h,i}^{\text{min}}$ 和 $H_{h,i}^{\text{max}}$ 分别表示节点 i 的最小和最大供热功率限幅。

最后, 对于供气系统, 用 f_g 表示供气系统的运行成本, 可以用式(7)和式(8)所示函数表示。

$$f_g = \sum_{i=1}^N (\alpha_{g,i} G_{g,i}^2 + \beta_{g,i} G_{g,i} + \gamma_{g,i}) \quad (7)$$

$$G_{g,i}^{\text{min}} \leq G_{g,i} \leq G_{g,i}^{\text{max}} \quad (8)$$

式中: $\alpha_{g,i}$ 、 $\beta_{g,i}$ 、 $\gamma_{g,i}$ 表示第 i 个节点的供气成本参数; $G_{g,i}$ 表示第 i 个节点的供气系统的功率输出, 并且满足极限输出约束; $G_{g,i}^{\text{min}}$ 和 $G_{g,i}^{\text{max}}$ 分别表示节点 i 的最小和最大供气功率限幅。

2.1.2 碳交易成本函数

碳交易成本函数用 f_2 表示, 现阶段对碳交易机制的研究主要分为传统式和阶梯式。传统碳交易机制主要与系统的输出功率有关, 不会对碳减排有明显的作。对节点 i 而言, 其传统碳交易机制函数^[31]为

$$f_2 = \varepsilon (E_{d,i} - E_{q,i}) \quad (9)$$

$$E_{d,i} = \varphi_{e,i} P_{e,i} + \varphi_{h,i} H_{h,i} + \varphi_{g,i} G_{g,i} \quad (10)$$

$$E_{q,i} = \theta_{e,i} P_{e,i} + \theta_{h,i} H_{h,i} + \theta_{g,i} G_{g,i} \quad (11)$$

式中: ε 表示单位碳价; $E_{d,i}$ 表示节点 i 的碳排放量总量; $E_{q,i}$ 表示节点 i 的碳排放量配额; $\varphi_{e,i}$ 、 $\varphi_{h,i}$ 、 $\varphi_{g,i}$ 表示节点 i 的碳排放强度系数; $\theta_{e,i}$ 、 $\theta_{h,i}$ 、 $\theta_{g,i}$ 表示节点 i 的碳排放配额系数。

与传统碳交易机制不同的是, 阶梯式碳交易机制按照碳排放强度划分为多个区间, 为不同区间设计不同单位碳价 ε , 其主要目的是随着碳排放量的增加, 通过 ε 的增加使碳排放成本增加, 以此来限制系统碳排放量。

$$E_{q,i} + (r-1)E_0 < E_{d,i} \leq E_{q,i} + rE_0 \quad (12)$$

在文献[32]的基础上, 依据式(12)来确定划分碳排放区间 r , 按照 $\sum_{i=0}^{r-1} \mu^i$ 构造一随着 r 增加而增加的惩罚系数, 并建立阶梯式碳交易函数如式(13)所示。

$$f_2 = \begin{cases} \varepsilon(E_{d,i} - E_{q,i}), E_{d,i} \leq E_{q,i} + E_0 \\ \varepsilon(E_{d,i} - E_{q,i}) \left(\sum_{i=0}^{r-1} \mu^i \right) - \varepsilon E_0 \left(\sum_{i=0}^{r-1} i \mu^i \right), \\ E_{q,i} + (r-1)E_0 < E_{d,i} \leq E_{q,i} + rE_0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: r 为大于 1 的整数; E_0 表示每个碳排放区间所对应的碳排放量, 这里表示为一个固定的值; $\mu \in (0, 1)$ 表示随着碳排放量增加价格所对应的增长率。

式(13)中, 为表述简便起见, 定义变量 m : 当 $E_{d,i} \leq E_{q,i} + E_0$ 时, $m=1$; 当 $E_{q,i} + (r-1)E_0 < E_{d,i} \leq E_{q,i} + rE_0$ ($r \geq 2$ 且为整数)时, $m = \sum_{i=0}^{r-1} \mu^i$ 。

为此, 综合能源系统经济调度问题的目标是优化系统运行成本和优化各单元的出力, 使得运行成本和碳交易成本最小。因此, 建立以下优化函数:

$$\min F = w_1 f_1 + w_2 f_2 \quad (14)$$

$$f_1 = f_e + f_h + f_g \quad (15)$$

式中, w_1 、 w_2 满足 $w_1 + w_2 = 1$ 和 $0 < w_1, w_2 < 1$ 。

2.2 综合能源调度模型

在 IES 系统运行中, 各个子系统的出力均为受限值。要解决上述优化调度问题(14), 必须满足相应的约束条件。节点 i 的供电、供热、供气子系统的供需约束条件分别为

$$\Delta P = \sum_{i=1}^N \Delta P_i = \sum_{i=1}^N (P_{D,i} + P_{\text{loss},i} - P_{e,i}) \quad (16)$$

$$\Delta H = \sum_{i=1}^N \Delta H_i = \sum_{i=1}^N (H_{D,i} + H_{\text{loss},i} - H_{h,i}) \quad (17)$$

$$\Delta G = \sum_{i=1}^N \Delta G_i = \sum_{i=1}^N (G_{D,i} + G_{\text{loss},i} - G_{g,i}) \quad (18)$$

$$\begin{cases} P_{e,i}^{\min} \leq P_{e,i} \leq P_{e,i}^{\max}, H_{h,i}^{\min} \leq H_{h,i} \leq H_{h,i}^{\max} \\ G_{g,i}^{\min} \leq G_{g,i} \leq G_{g,i}^{\max}, i \in V \end{cases} \quad (19)$$

式中: ΔP_i 、 ΔH_i 、 ΔG_i 分别表示节点 i 供电、供热、供气系统的能量供需偏差; $P_{D,i}$ 、 $H_{D,i}$ 、 $G_{D,i}$ 为第 i 个系统负载的负荷需求量; $P_{\text{loss},i}$ 、 $H_{\text{loss},i}$ 、 $G_{\text{loss},i}$ 为子系统 i 的能量传输损耗。传输能耗可分别定义为 $P_{\text{loss},i} = L_{e,i} P_{e,i}^2$ 、 $H_{\text{loss},i} = L_{h,i} H_{h,i}^2$ 、 $G_{\text{loss},i} = L_{g,i} G_{g,i}^2$, 其中 $L_{e,i}$ 、 $L_{h,i}$ 、 $L_{g,i}$ 表示不同能量单元的损耗系数, 且取值均大于 0^[33]。

综合考虑各种运行系统的多目标经济调度问题,

运用拉格朗日乘子法和 KKT(Karush-Kuhn-Tucker)条件对上述约束优化问题进行分析。拉格朗日函数如式(20)所示。

$$\begin{aligned} L = & w_1 f_1 + w_2 f_2 + \lambda_e \Delta P_i + \lambda_h \Delta H_i + \lambda_g \Delta G_i - \\ & \sum_{i=1}^N \underline{L}_{e,i} (P_{e,i} - P_{e,i}^{\min}) - \sum_{i=1}^N \bar{L}_{e,i} (P_{e,i}^{\max} - P_{e,i}) - \\ & \sum_{i=1}^N \underline{L}_{h,i} (H_{h,i} - H_{h,i}^{\min}) - \sum_{i=1}^N \bar{L}_{h,i} (H_{h,i}^{\max} - H_{h,i}) - \\ & \sum_{i=1}^N \underline{L}_{g,i} (G_{g,i} - G_{g,i}^{\min}) - \sum_{i=1}^N \bar{L}_{g,i} (G_{g,i}^{\max} - G_{g,i}) \end{aligned} \quad (20)$$

式中: λ_e 、 λ_h 、 λ_g 表示每个供能单元的等式约束拉格朗日系数; $\underline{L}_{e,i}$ 和 $\bar{L}_{e,i}$ 、 $\underline{L}_{h,i}$ 和 $\bar{L}_{h,i}$ 、 $\underline{L}_{g,i}$ 和 $\bar{L}_{g,i}$ 分别表示供电、供热、供气系统单元的不等式约束拉格朗日系数, 且取值均大于等于 0。

为解决以上经济调度优化问题, 可得系统经济最优时的 KKT 条件为

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial P_{e,i}} = w_1 (2\alpha_{e,i} P_{e,i} + \beta_{e,i}) + w_2 \varepsilon (\varphi_{e,i} - \theta_{e,i}) m + \\ \quad \lambda_{e,i} (2L_{e,i} P_{e,i} - 1) - \underline{L}_{e,i} + \bar{L}_{e,i} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial H_{h,i}} = w_1 (2\alpha_{h,i} H_{h,i} + \beta_{h,i}) + w_2 \varepsilon (\varphi_{h,i} - \theta_{h,i}) m + \\ \quad \lambda_{h,i} (2L_{h,i} H_{h,i} - 1) - \underline{L}_{h,i} + \bar{L}_{h,i} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial G_{g,i}} = w_1 (2\alpha_{g,i} G_{g,i} + \beta_{g,i}) + w_2 \varepsilon (\varphi_{g,i} - \theta_{g,i}) m + \\ \quad \lambda_{g,i} (2L_{g,i} G_{g,i} - 1) - \underline{L}_{g,i} + \bar{L}_{g,i} = 0 \\ \underline{L}_{e,i} (P_{e,i} - P_{e,i}^{\min}) = 0 \\ \bar{L}_{e,i} (P_{e,i}^{\max} - P_{e,i}) = 0 \\ \underline{L}_{h,i} (H_{h,i} - H_{h,i}^{\min}) = 0 \\ \bar{L}_{h,i} (H_{h,i}^{\max} - H_{h,i}) = 0 \\ \underline{L}_{g,i} (G_{g,i} - G_{g,i}^{\min}) = 0 \\ \bar{L}_{g,i} (G_{g,i}^{\max} - G_{g,i}) = 0 \\ \underline{L}_{e,i} \geq 0, \underline{L}_{h,i} \geq 0, \underline{L}_{g,i} \geq 0 \\ \bar{L}_{e,i} \geq 0, \bar{L}_{h,i} \geq 0, \bar{L}_{g,i} \geq 0 \end{cases} \quad (21)$$

通过求解式(20), 可得式(22)。其中 $\Omega_p = \{i | P_{e,i} = P_{e,i}^{\min} \text{ 且 } P_{e,i} = P_{e,i}^{\max}\}$, $\Omega_h = \{i | H_{h,i} = H_{h,i}^{\min} \text{ 且 } H_{h,i} = H_{h,i}^{\max}\}$ 和 $\Omega_g = \{i | G_{g,i} = G_{g,i}^{\min} \text{ 且 } G_{g,i} = G_{g,i}^{\max}\}$ 。

$$\lambda_{c,i} = \begin{cases} \frac{w_1(2\alpha_{c,i}P_{c,i} + \beta_{c,i}) + w_2\varepsilon(\varphi_{c,i} - \theta_{c,i})m}{1 - 2L_{c,i}P_{c,i}} & i \neq \Omega_p \\ \lambda_{c,0} & i = \Omega_p \end{cases}$$

$$\lambda_{h,i} = \begin{cases} \frac{w_1(2\alpha_{h,i}H_{h,i} + \beta_{h,i}) + w_2\varepsilon(\varphi_{h,i} - \theta_{h,i})m}{1 - 2L_{h,i}H_{h,i}} & i \neq \Omega_h \\ \lambda_{h,0} & i = \Omega_h \end{cases}$$

$$\lambda_{g,i} = \begin{cases} \frac{w_1(2\alpha_{g,i}G_{g,i} + \beta_{g,i}) + w_2\varepsilon(\varphi_{g,i} - \theta_{g,i})m}{1 - 2L_{g,i}G_{g,i}} & i \neq \Omega_g \\ \lambda_{g,0} & i = \Omega_g \end{cases} \quad (22)$$

当 $\lambda_{c,i} = \lambda_{c,j} = \lambda_c^*$ 、 $\lambda_{h,i} = \lambda_{h,j} = \lambda_h^*$ 和 $\lambda_{g,i} = \lambda_{g,j} = \lambda_g^*$ 时, 成本函数 F 取最小值, 其中 λ_c^* 、 λ_h^* 、 λ_g^* 分别表示为系统单元的供电、供热、供气调度增量成本最优解。

式(22)结合增量成本最优解可得到系统 i 的供电、供热和供气唯一全局最优功率为

$$P_{c,i} \triangleq \phi_c(\lambda_c^*) = \begin{cases} \frac{\lambda_c^* - w_1\beta_{c,i} - w_2\varepsilon(\varphi_{c,i} - \theta_{c,i})m}{2(\alpha_{c,i}w_1 + \lambda_c^*L_{c,i})}, & \text{if } P_{c,i}^{\min} \leq P_{c,i} \leq P_{c,i}^{\max} \\ P_{c,i}^{\min}, & \text{if } P_{c,i} < P_{c,i}^{\min} \\ P_{c,i}^{\max}, & \text{if } P_{c,i} > P_{c,i}^{\max} \end{cases} \quad (23)$$

$$H_{h,i} \triangleq \phi_h(\lambda_h^*) = \begin{cases} \frac{\lambda_h^* - w_1\beta_{h,i} - w_2\varepsilon(\varphi_{h,i} - \theta_{h,i})m}{2(\alpha_{h,i}w_1 + \lambda_h^*L_{h,i})}, & \text{if } H_{h,i}^{\min} \leq H_{h,i} \leq H_{h,i}^{\max} \\ H_{h,i}^{\min}, & \text{if } H_{h,i} < H_{h,i}^{\min} \\ H_{h,i}^{\max}, & \text{if } H_{h,i} > H_{h,i}^{\max} \end{cases} \quad (24)$$

$$G_{g,i} \triangleq \phi_g(\lambda_g^*) = \begin{cases} \frac{\lambda_g^* - w_1\beta_{g,i} - w_2\varepsilon(\varphi_{g,i} - \theta_{g,i})m}{2(\alpha_{g,i}w_1 + \lambda_g^*L_{g,i})}, & \text{if } G_{g,i}^{\min} \leq G_{g,i} \leq G_{g,i}^{\max} \\ G_{g,i}^{\min}, & \text{if } G_{g,i} < G_{g,i}^{\min} \\ G_{g,i}^{\max}, & \text{if } G_{g,i} > G_{g,i}^{\max} \end{cases} \quad (25)$$

本文的低碳经济调度目标是设计一种分布式经济调度算法来实现式(20)的全局最优解, 即每个供能系统根据自身参数 $\{\alpha_i, \beta_i, \varphi_i, \theta_i, L_i, P_i^{\min}(H_i^{\min}, G_i^{\min}), P_i^{\max}(H_i^{\max}, G_i^{\max})\}$ 、自身状态 $\{\lambda_i, P_i(H_i, G_i)\}$ 以及从相邻供能系统获得的信息, 进而求解最优经济调度问题。

2.3 基于一致性的综合能源调度方法

为了解决 2.2 节提出的综合能源调度模型, 本

节设计了一种分布式一致性算法。该算法设计以供电、供热、供气的增量成本 $\lambda_{c,i}$ 、 $\lambda_{h,i}$ 、 $\lambda_{g,i}$ 为目标的一致性迭代协议, 并用相应的输出估计不匹配作为迭代协议的反馈。

记 $\lambda_i = [\lambda_{c,i}, \lambda_{h,i}, \lambda_{g,i}]^T \in R^3$ 为子系统 i 的增量成本矢量, 基于上述多目标调度模型最优解的分析, 可选择 λ_i 为微电网多智能体的一致性矢量, 通过与邻居智能体交换信息来更新其一致性变量, 最终使得网络中所有智能体的一致性变量收敛于统一值, 也即 $\lambda_i = \lambda_j, \forall i, j \in V, i \neq j$, 实现了系统的最优调度目标。

假设综合能源系统中每个供能系统都已嵌入了一个本地智能体(也称为节点), 将其记为多智能体 i , 根据对式(1)的改进, 一致性矢量 λ_i 的快速一致性算法可写为

$$\lambda_i(k+1) = \lambda_i(k) + g \sum_{j \in N_i} W_{ij}(\lambda_j(k) - \lambda_i(k)) \quad (26)$$

式中: $\lambda_j(k)$ 表示智能体 j 在第 k 次迭代时的信息状态; $\lambda_i(k)$ 为增量成本; W_{ij} 为智能体 i 和 j 间的连接权重; g 为系统调度中的反馈增益 ($g > 0$), 通过调整增益 g 可改变算法的收敛速度。

在一致性迭代过程中, 需要选取领导节点通过系统的整体功率不匹配来不断地调节一致性变量, 从而对整个系统进行控制。记 $\Delta = [\Delta P, \Delta H, \Delta G]^T \in R^3$ 为系统功率偏差矢量。如此, 领导节点一致性算法表示为

$$\lambda_i(k+1) = \lambda_i(k) + g \sum_{j \in N_i} W_{ij}(\lambda_j(k) - \lambda_i(k)) + \zeta(k)\Delta(k) \quad (27)$$

式中: $\Delta(k)$ 为第 k 次迭代时的系统功率偏差矢量; $\zeta(k)$ 表示收敛系数, 其大小会影响收敛速度; 本文取 $\zeta(k) = \rho^k, \rho \in (0, 1)$, 为文献[34]的一种特殊形式。

根据增量成本 $\lambda_i(k)$, 根据式(23)一式(25)的形式, 每个系统 i 的有效功率输出可表示为

$$P_{c,i}(k) \triangleq \phi_c(\lambda_{c,i}(k)) \quad (28)$$

$$H_{h,i}(k) \triangleq \phi_h(\lambda_{h,i}(k)) \quad (29)$$

$$G_{g,i}(k) \triangleq \phi_g(\lambda_{g,i}(k)) \quad (30)$$

对具有 N 个子系统的综合能源系统而言, 记子系统 1 为领导节点, 其余节点为从节点; 记整个系统的状态为

$$\lambda = [\lambda_{c,1}, \dots, \lambda_{c,N}, \lambda_{h,1}, \dots, \lambda_{h,N}, \lambda_{g,1}, \dots, \lambda_{g,N}]^T \in R^{3N}$$

如此, 可将式(26)一式(30)改写成矩阵形式, 具体为

$$\lambda(k+1) = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_N - g\mathbf{L} & \mathbf{0}_{N \times N} & \mathbf{0}_{N \times N} \\ \mathbf{0}_{N \times N} & \mathbf{I}_N - g\mathbf{L} & \mathbf{0}_{N \times N} \\ \mathbf{0}_{N \times N} & \mathbf{0}_{N \times N} & \mathbf{I}_N - g\mathbf{L} \end{bmatrix} \lambda(k) + \zeta(k) \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 \\ \mathbf{B}_3 \end{bmatrix} \Delta(k) \triangleq \mathbf{A}\lambda(k) + \zeta(k)\mathbf{B}\Delta(k) \quad (31)$$

其中:

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{3N} \quad (32)$$

$$\begin{cases} P_{e,i}(k) = \phi_e(\lambda_{e,i}(k)) \\ H_{h,i}(k) = \phi_h(\lambda_{h,i}(k)) \\ G_{g,i}(k) = \phi_g(\lambda_{g,i}(k)) \end{cases} \quad (33)$$

$$\begin{cases} \Delta P(k) = \sum_{i=1}^N (P_{D,i} + L_{e,i} P_{e,i}^2(k) - P_{e,i}(k)) \\ \Delta H(k) = \sum_{i=1}^N (H_{D,i} + L_{h,i} H_{h,i}^2(k) - H_{h,i}(k)) \\ \Delta G(k) = \sum_{i=1}^N (G_{D,i} + L_{g,i} G_{g,i}^2(k) - G_{g,i}(k)) \end{cases} \quad (34)$$

下面对一致性调度算法式(31)的收敛性进行分析。在给出主要结论定理1之前, 给出通信拓扑、权重系数和反馈增益的设计条件。

条件1: 综合能源系统 G 为一连通图, 也即网络 G 中任意两个节点间都存在一条路径。

条件2: 节点 i 与 j 间邻接权重按照式(35)来构造。

$$W_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{\max\{d_i, d_j\}}, & \text{若 } (i, j) \in E, i \neq j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (35)$$

条件3: 控制增益 g 按照 $0 < g < 1$ 设计。

定理1 在条件1、2和3满足时, 一致性调度算法(31)收敛, 也即其可实现综合能源系统的增量成本一致性:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} |\lambda_i(k) - \lambda_j(k)| = 0, \forall i, j \in V, i \neq j \quad (36)$$

证明: 记矩阵 $\mathbf{\Pi}_1 = \mathbf{I}_N \mathbf{I}_N^T / N$, $\mathbf{\Pi} = \mathbf{I}_3 \otimes \mathbf{\Pi}_1$, 其中 \otimes 表示 Krocnecker 内积, $\mathbf{I}_3 \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 为单位阵; $\bar{\lambda}(k) = \mathbf{\Pi}\lambda(k)$ 为系统状态均值, $\tilde{\lambda}(k) = \lambda(k) - \bar{\lambda}(k)$ 为系统状态不一致向量。可得到状态不一致系统的状态方程为

$$\begin{aligned} \tilde{\lambda}(k) &= (\mathbf{I}_{3N} - \mathbf{\Pi})\tilde{\lambda}(k-1) = \\ &= (\mathbf{I}_{3N} - \mathbf{\Pi})(\mathbf{A}\tilde{\lambda}(k-1) + \mathbf{B}\zeta(k-1)\Delta(k-1)) = \\ &= (\mathbf{A} - \mathbf{A}\mathbf{\Pi})\tilde{\lambda}(k-1) + (\mathbf{I}_{3N} - \mathbf{\Pi})\mathbf{B}\zeta(k-1)\Delta(k-1) \end{aligned} \quad (37)$$

记 $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{A} - \mathbf{A}\mathbf{\Pi}$, 其谱半径为 $\rho(\tilde{\mathbf{A}})$ 。如此反复迭代, 可得到 $\tilde{\lambda}(k)$ 的解析式为

$$\tilde{\lambda}(k) = \tilde{\mathbf{A}}^k \tilde{\lambda}(0) + \sum_{j=0}^{k-1} \tilde{\mathbf{A}}^{k-1-j} (\mathbf{I}_{3N} - \mathbf{\Pi})\mathbf{B}\rho^j \Delta(j) \quad (38)$$

由范数的性质可知, 对于矩阵 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 和向量 \mathbf{p} , 有 $\|\mathbf{A} + \mathbf{B}\| \leq \|\mathbf{A}\| + \|\mathbf{B}\|$, $\|\mathbf{A}\mathbf{p}\| \leq \|\mathbf{A}\| + \|\mathbf{p}\|$ 和 $\|\mathbf{A}\mathbf{B}\| \leq \|\mathbf{A}\| \|\mathbf{B}\|$ 成立。对式(33)两边取范数, 有:

$$\|\tilde{\lambda}(k)\| \leq \|\tilde{\mathbf{A}}\|^k \|\tilde{\lambda}(0)\| + \sum_{j=0}^{k-1} \|\tilde{\mathbf{A}}\|^{k-1-j} \|(\mathbf{I}_{3N} - \mathbf{\Pi})\mathbf{B}\| \rho^j \|\Delta(j)\| \quad (39)$$

其中, $\|(\mathbf{I}_{3N} - \mathbf{\Pi})\mathbf{B}\| = (1 - \frac{1}{N})^2$ 。由文献[35]可知, 在条件1和条件2满足时, 网络 G 的 Laplacian 矩阵为一对称矩阵且满足 $\mathbf{L}\mathbf{1}_N = \mathbf{1}_N^T \mathbf{L} = \mathbf{0}_N$, 它的 N 个特征值满足 $0 = \lambda_1(L) < \lambda_2(L) \leq \dots \leq \lambda_N(L) \leq 2$; 由文献[36]可知, 在条件1、2和3均满足时, $\rho(\tilde{\mathbf{A}}) < 1$, 且有 $\|\tilde{\mathbf{A}}^k \mathbf{p}\| \leq C_v \rho^k(\tilde{\mathbf{A}}) \|\mathbf{p}\|$ 成立, 其中 C_v 为一正实数。为此, 可进一步得到:

$$\|\tilde{\lambda}(k)\| \leq C_v \rho^k(\tilde{\mathbf{A}}) \|\tilde{\lambda}(0)\| + C'_v \sum_{j=0}^{k-1} \rho^{k-1-j}(\tilde{\mathbf{A}}) \rho^j \|\Delta(j)\| \quad (40)$$

其中, $C'_v = C_v(1 - \frac{1}{N})^2$ 。式(40)中第二项表达式有:

$$\begin{aligned} &C'_v \sum_{j=0}^{k-1} \rho^{k-1-j}(\tilde{\mathbf{A}}) \rho^j \|\Delta(j)\| \leq \\ &\sup_{j \geq 0} \|\Delta(j)\| C'_v \sum_{j=0}^{k-1} \rho^{k-1-j}(\tilde{\mathbf{A}}) \rho^j \leq \\ &\sup_{j \geq 0} \|\Delta(j)\| C'_v \sum_{j=0}^{k-1} \rho_{\max}^{k-1} = \\ &\sup_{j \geq 0} \|\Delta(j)\| C'_v \frac{k}{(1/\rho_{\max})^{k-1}} \end{aligned} \quad (41)$$

其中 $\rho_{\max} = \max\{\rho(\tilde{\mathbf{A}}), \rho_1\} \in (0, 1)$ 。因此有:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \|\tilde{\lambda}(k)\| \leq \sup_{j \geq 0} \|\Delta(j)\| C'_v \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{k}{(1/\rho_{\max})^{k-1}} \quad (42)$$

由洛必达法则, 不等式(42)右边的极限满足:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{k}{(1/\rho_{\max})^{k-1}} = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{(1/\rho_{\max})^{k-1} \ln(1/\rho_{\max})} = 0 \quad (43)$$

为此, 在条件1、2和3满足时, 状态不一致性

系统(41)稳定,也即综合能源系统(42)可实现其增量成本一致性。得证。

3 数值仿真结果分析

本节将在 Matlab 仿真平台上验证所提低碳经济调度算法的有效性。首先验证所提低碳经济调度算法的收敛性,并比较分析收敛因子、反馈增益系数对系统收敛速度的影响;接着分析优化后的 IES 在不同碳排放约束下的运行特点,对传统式和阶梯式碳交易机制进行比较。

3.1 参数设置

本文通过考虑不同的实例来验证策略的可行性。如图 2 和图 3 所示分别为一个具有 N 个子系统 ($N=6$) 的电气网络结构图及通信拓扑图。图 3 中,数字 1~6 代表各个子系统对应的智能体节点。由图 2 可以看出,电能、热能和气能的传输是相互独立的。

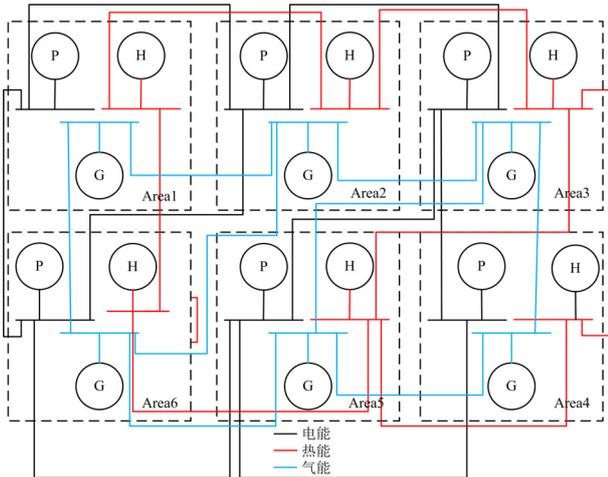


图 2 电气网络结构图

Fig. 2 Electrical network structure diagram

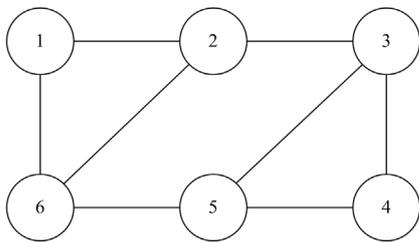


图 3 系统通信拓扑图

Fig. 3 System communication topology diagram

IES 中的电、热、气单元的初始功率及相关参数设置分别如表 1—表 3 所示,与碳排放有关的碳排放参数如表 4 所示。其余参数设置为: $\rho=0.7$, $E_0=50t$ (其中 t 为质量单位吨)和 $\mu=0.25$ 。

表 1 供电单元参数

Table 1 Power supply unit parameters

DG	$\alpha_{e,i}$	$\beta_{e,i}$	$L_{e,i}$	$P_{e,i}^{\min}/MW$	$P_{e,i}^{\max}/MW$
1	0.8971	60	0.0021	0	200
2	0.5794	65	0.0018	0	300
3	0.4782	62	0.0020	0	100
4	0.563	61	0.0021	0	150
5	0.681	50	0.0022	0	100
6	0.781	60	0.0019	0	100

表 2 供热单元参数

Table 2 Heating supply unit parameters

DG	$\alpha_{h,i}$	$\beta_{h,i}$	$L_{h,i}$	$H_{h,i}^{\min}/MW$	$H_{h,i}^{\max}/MW$
1	0.8375	30	0.0019	0	200
2	0.823	30	0.0020	0	100
3	0.812	30	0.0024	0	100
4	0.893	32	0.0022	0	150
5	0.911	31	0.0020	0	200
6	0.811	31	0.0021	0	200

表 3 供气单元参数

Table 3 Gas supply unit parameters

DG	$\alpha_{g,i}$	$\beta_{g,i}$	$L_{g,i}$	$G_{g,i}^{\min}/MW$	$G_{g,i}^{\max}/MW$
1	1.221	30	0.0020	0	200
2	1.232	40	0.0021	0	100
3	1.542	20	0.0022	0	100
4	1.6021	30	0.0023	0	150
5	1.401	30	0.0020	0	120
6	1.201	30	0.0019	0	120

表 4 碳排放参数

Table 4 Carbon emission parameters

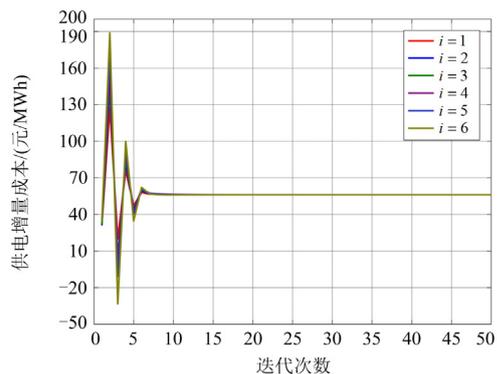
DG	$\varphi_{e,i}$	$\theta_{e,i}$	$\varphi_{h,i}$	$\theta_{h,i}$	$\varphi_{g,i}$	$\theta_{g,i}$
1	0.98	0.550	0.61	0.102	0.9	0.305
2	0.90	0.550	0.63	0.102	0.92	0.305
3	0.99	0.550	0.62	0.102	0.97	0.305
4	0.97	0.550	0.63	0.102	0.93	0.305
5	0.96	0.550	0.61	0.102	0.95	0.305
6	0.96	0.550	0.61	0.102	0.95	0.305

3.2 可行性分析

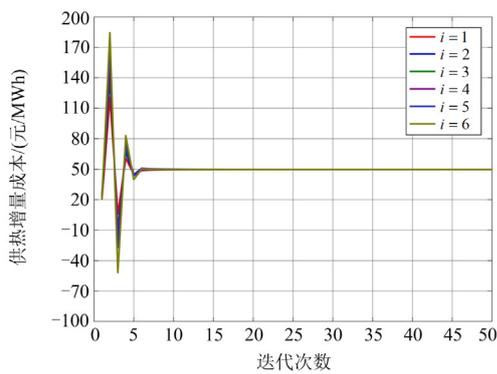
首先进行低碳经济调度算法可行性分析。在仿真系统中,反馈增益 g 在 $(0,1)$ 间取值取 0.7, 算法迭代 50 次。仿真结果如图 4—图 6 所示。其中图 4 表示供电、供热和供气单元的增量成本迭代过程,图 5 描述供电、供热和供气单元的功率输出迭代过程,图 6 表示系统的功率不匹配迭代曲线。

从图 4 可以看出,供电、供热和供气的增量成本最终趋于一致,分别为 56.0685、49.5497、

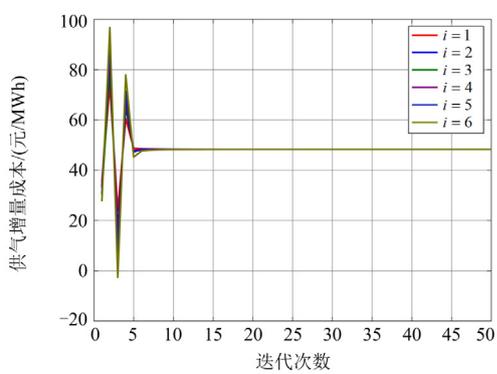
48.2687 元/MWh, 此时增量成本 $\lambda_{e,i} = \lambda_{e,j} = \lambda_e^*$ 、 $\lambda_{h,i} = \lambda_{h,j} = \lambda_h^*$ 、 $\lambda_{g,i} = \lambda_{g,j} = \lambda_g^*$, 即达到一致。从图 5 可以看出, 在增量成本达到一致的过程中, 功率输出也趋于稳定, 同时功率输出也达到最优值 $P_{e,i} = P_{e,i}^*$ 、 $H_{h,i} = H_{h,i}^*$ 、 $G_{g,i} = G_{g,i}^*$ 。由图 6 可知, 经过一致性迭代后, IES 系统的供电、供气 and 供热功率不匹配最终趋于 0, 也即综合能源系统最终实现供需平衡。



(a) 供电单元



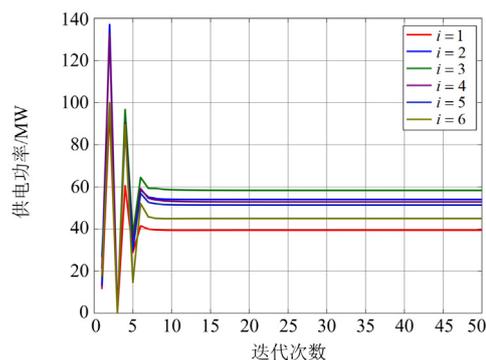
(b) 供热单元



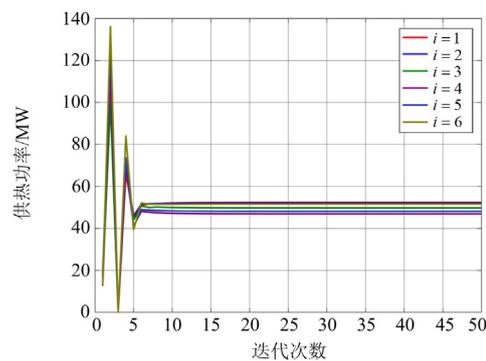
(c) 供气单元

图 4 IES 中各单元的增量成本迭代

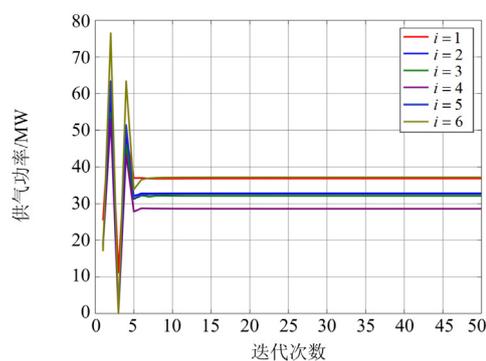
Fig. 4 Incremental cost iterations of each node in the IES



(a) 供电单元



(b) 供热单元



(c) 供气单元

图 5 IES 中各单元的功率输出迭代

Fig. 5 Power output iterations of each node in the IES

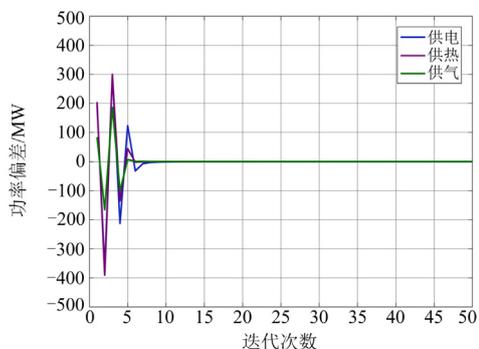


图 6 IES 功率不匹配迭代

Fig. 6 Iterations of the IES's power mismatch

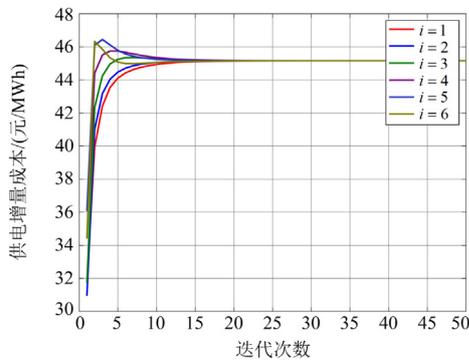
由以上结果可知，应用本文策略后各系统间的供电、供热、供气单元的增量成本最终趋于一致，输出功率趋于优化值；同时功率不平衡趋于零，实现了使系统达到最优运行的目标。实验结果验证了本文所提低碳经济调度策略的有效性。

3.3 收敛速度分析

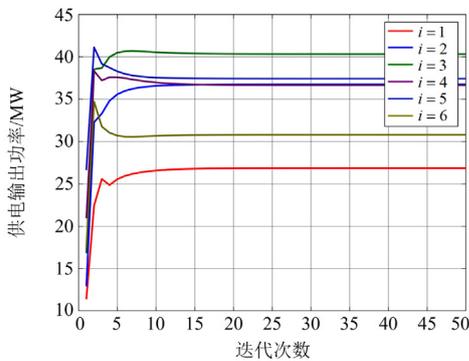
本节主要对收敛因子和反馈增益系数进行更改，观察各单元的增量成本和输出功率的收敛速度，进而对比分析收敛因子和反馈增益系数对算法收敛速度的影响。其中，仿真结果选取供电单元增量成本和功率输出为代表进行对比分析。

1) 调节收敛因子 ρ

当 $g = 0.7$ 、 $\rho = 0.2$ 时的供电增量成本和供电输出功率仿真结果如图 7 所示。



(a) 供电单元增量成本迭代



(b) 供电单元输出功率迭代

图 7 $\rho = 0.2$ 、 $g = 0.7$ 时供电单元仿真结果图

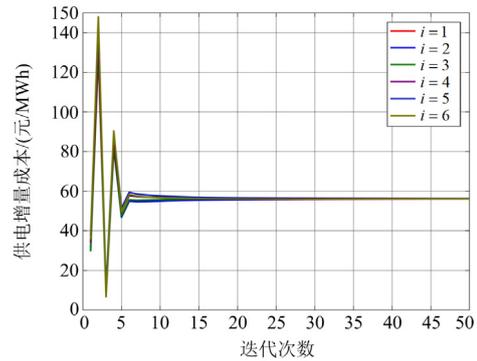
Fig. 7 Simulation result diagram of the power supply unit with $\rho = 0.2$ and $g = 0.7$

将图 7 与图 4(a)和图 5(a)进行对比分析可知，收敛因子 ρ 在(0,1)区间取值时，随着 ρ 的增加，调度算法的收敛速度越快。

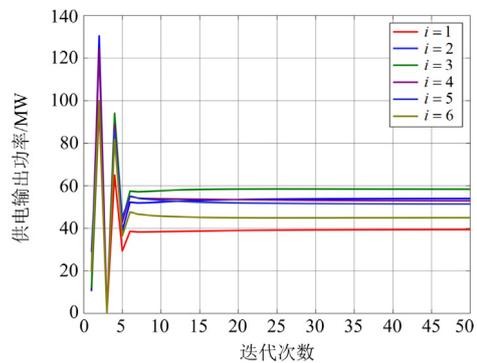
2) 调节反馈增益系数 g

下面接着分析反馈增益系数对调度算法收敛性的影响。利用控制变量法，在图 4(a)和图 5(a)的基

础上，将 g 值设置为 0.2，结果如图 8 所示。



(a) 供电单元增量成本迭代



(b) 供电单元输出功率迭代

图 8 $\rho = 0.7$ 、 $g = 0.2$ 时供电单元仿真结果图

Fig. 8 Simulation result diagram of the power supply unit with $\rho = 0.7$ and $g = 0.2$

对图 4(a)、图 5(a)和图 8 进行对比分析可知，在(0,1)区间里，反馈增益系数 g 越大，则调度算法收敛速度越快。

3.4 不同碳交易机制下 IES 运行特征及经济分析

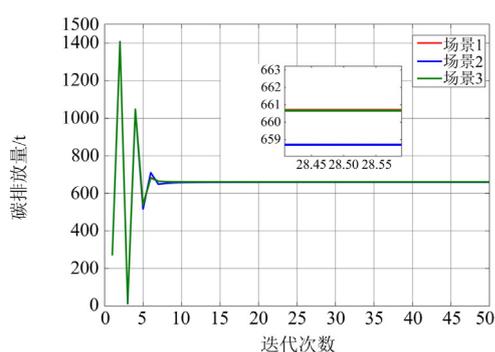
为了说明引入碳交易机制对 IES 碳交易成本的影响，设计 3 种不同机制在 IES 间的运行场景，运行本文所提低碳经济调度算法，从碳排放量和碳交易成本两个方面进行对比分析。

场景 1：在 IES 调度中，考虑传统式的碳交易机制。

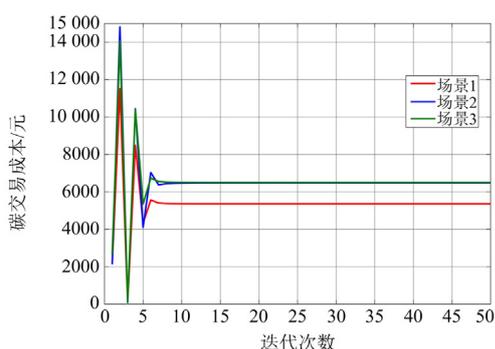
场景 2：在 IES 调度中，考虑改进的阶梯式碳交易机制。

场景 3：在 IES 调度中，考虑一般的阶梯式碳交易机制。

考虑不同碳交易机制的 3 种场景下，其余 IES 调度算法的运行参数设置相同，具体见表 1—表 4。3 种场景下的 IES 间调度的碳排放量、碳交易成本迭代分别如图 9(a)和图 9(b)所示。



(a) 3种场景下的碳排放量迭代



(b) 3种场景下的碳交易成本迭代

图9 3种场景下的碳交易机制对比

Fig. 9 Comparison among three carbon trading mechanisms

从图 9(a)中的稳态数据可知, 传统式碳交易下的碳排放量要比阶梯式的多; 而从图 9(b)中可以看出, 传统式碳交易机制下的交易成本要比阶梯式机制的低。仿真结果说明, 阶梯式碳交易机制可实现随着碳排放量的增加而提高碳价, 促使碳交易成本增加, 从而达到减少碳排放量的目的。

同时, 对图 9 稳态数据分析可知, 本文所提改进阶梯式碳交易机制较一般的阶梯式机制成本增幅几乎相同, 但是在碳排放量的降低效果方面, 改进阶梯式碳交易机制更加明显有效。仿真结果表明, 本文所提阶梯式碳交易机制能够在保持碳交易成本下有效降低综合能源系统的碳排放量。

4 结论

针对综合能源系统的经济调度问题, 本文建立了 IES 的低碳经济调度模型, 并引入阶梯式碳交易机制和领导一致性算法。所提出的碳交易机制可以在不同碳排放区间内使碳交易成本非线性增长, 从而抑制碳排放量。此外, 基于快速一致性算法, 将系统中的供电、供热、供气单元的增量成本快速迭代达到一致, 实现系统供电、供热与供气功率的最优调度, 并在考虑传输能耗的前提下保持系统供需

平衡。同时, 对所提调度算法的收敛性以及参数设计方法进行理论分析和仿真验证。实验结果表明, 本文所提分布式调度方法, 对降低系统总运行成本和减少碳排放量均有积极作用。

作为一个初步研究, 本文尚未考虑 IES 中用户的需求响应对调度算法的影响。如何在综合能源系统的低碳经济调度中加入需求响应模型, 并且进一步分析碳交易机制对于综合能源系统经济调度的影响, 将成为未来的主要研究方向。

参考文献

- [1] NIZAMI M S H, HOSSAIN M J, FERNANDEZ E. Multiagent-based transactive energy management systems for residential buildings with distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 16(3): 1836-1847.
- [2] 闫梦阳, 李华强, 王俊翔, 等. 计及综合需求响应不确定性的园区综合能源系统优化运行模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 163-175.
YAN Mengyang, LI Huaqiang, WANG Junxiang, et al. Optimal operation model of a park integrated energy system considering uncertainty of integrated demand response[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 163-175.
- [3] 李政洁, 撤奥洋, 周生奇, 等. 计及综合需求响应的综合能源系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 36-42.
LI Zhengjie, HAN Aoyang, ZHOU Shengqi, et al. Optimization of an integrated energy system considering integrated demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 36-42.
- [4] LU XiaoJun, WANG Jun, LIU Gang, et al. Station-and-network-coordinated planning of integrated energy system considering integrated demand response[J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 39-47.
- [5] 杨毅, 易文飞, 王晨清, 等. 基于碳排放流理论的园区综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力建设, 2022, 43(11): 33-41.
YANG Yi, YI Wenfei, WANG Chenqing, et al. Low-carbon economic dispatching of park integrated energy system applying carbon emission flow theory[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(11): 33-41.
- [6] 丁斌, 邢志坤, 王帆, 等. 考虑多元负荷需求响应的综合智慧能源系统协同优化调度[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(6): 583-592.
DING Bin, XING Zhikun, WANG Fan, et al. Collaborative optimal scheduling of integrated smart energy system considering multi-load demand response[J]. Journal of

- Global Energy Interconnection, 2022, 5(6): 583-592.
- [7] 屈小云, 吴鸣, 李奇, 等. 多能互补综合能源系统综合评价研究进展综述[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 153-163.
QU Xiaoyun, WU Ming, LI Qi, et al. Review on comprehensive evaluation of multi-energy complementary integrated energy systems[J]. Electric Power, 2021, 54(11): 153-163.
- [8] 严思韵, 王晨, 周登极. 含氢能气网掺混运输的综合能源系统优化研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 10-16.
YAN Siyun, WANG Chen, ZHOU Dengji. Optimization of integrated electricity and gas system considering hydrogen-natural-gas mixture transportation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 10-16.
- [9] 朱浩昊, 朱继忠, 李盛林, 等. 电-热综合能源系统优化调度综述[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(4): 383-397.
ZHU Haohao, ZHU Jizhong, LI Shenglin, et al. Overview of optimal scheduling of integrated electrical-thermal energy systems[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(4): 383-397.
- [10] 张明光, 王文婷, 陈大为. 基于合作博弈的多区域综合能源系统优化调度[J]. 智慧电力, 2022, 50(10): 102-108.
ZHANG Mingguang, WANG Wenting, CHEN Dawei. Optimal dispatching of multi-regional integrated energy system based on cooperative game[J]. Smart Power, 2022, 50(10): 102-108.
- [11] LIU Lining, YANG Guanghong. Distributed optimal energy management for integrated energy systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(10): 6569-6580.
- [12] 秦婷, 刘怀东, 王锦桥, 等. 基于碳交易的电—热—气综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 8-13.
QIN Ting, LIU Huaidong, WANG Jinqiao, et al. Carbon trading based low-carbon economic dispatch for integrated electricity-heat-gas energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 8-13.
- [13] 张涛, 郭玥彤, 李逸鸿, 等. 计及电气热综合需求响应的区域综合能源系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 52-61.
ZHANG Tao, GUO Yuetong, LI Yihong, et al. Optimization scheduling of regional integrated energy systems based on electric-thermal-gas integrated demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 52-61.
- [14] YANG Jun, WANG Haitao. Distributed collaborative optimal economic dispatch of integrated energy system based on edge computing[J]. Available at SSRN 4098501.
- [15] 杨珺, 侯俊浩, 刘亚威, 等. 分布式协同控制方法及在电力系统中的应用综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(19): 4035-4049.
YANG Jun, HOU Junhao, LIU Yawei, et al. Distributed cooperative control method and application in power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(19): 4035-4049.
- [16] TANG Zhiyuan, HILL D, LIU Tao. A novel consensus-based economic dispatch for microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3920-3922.
- [17] 马瑞, 郝晓光, 李剑锋, 等. 基于一致性的综合能源微电网分布式优化调度[J]. 河北电力技术, 2022, 41(3): 15-21.
MA Rui, HAO Xiaoguang, LI Jianfeng, et al. Distributed optimal scheduling of integrated energy microgrid based on consistency[J]. Hebei Electric Power Technology, 2022, 41(3): 15-21.
- [18] 谢俊, 陈凯旋, 岳东, 等. 基于多智能体系统一致性算法的电力系统分布式经济调度策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 112-117.
XIE Jun, CHEN Kaixuan, YUE Dong, et al. Distributed economic dispatch based on consensus algorithm of multi agent system for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 112-117.
- [19] LI Yushuai, ZHANG Huaguang, LIANG Xiaodong, et al. Event-triggered-based distributed cooperative energy management for multienergy systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 15(4): 2008-2022.
- [20] SUN Qiuye, FAN Ruyi, LI Yushuai, et al. A distributed double-consensus algorithm for residential we-energy[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(8): 4830-4842.
- [21] ZHANG Huaguang, LI Yushuai, GAO Wenzhong, et al. Distributed optimal energy management for energy internet[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(6): 3081-3097.
- [22] 贡保记, 张恩硕, 张国, 等. 考虑综合需求响应与“双碳”机制的综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 11-19.
YUN Baoji, ZHANG Enshuo, ZHANG Guo, et al. Optimal operation of an integrated energy system considering integrated demand response and a “dual carbon” mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 11-19.
- [23] SUN Peiran, HAO Xuejun, WANG Jun, et al. Low-carbon economic operation for integrated energy system considering carbon trading mechanism[J]. Energy Science & Engineering, 2021, 9(11): 2064-2078.
- [24] XUE Lei, WU Jianbin, MENG Changhong, et al. Study on the economic optimization of park integrated energy system with electricity-heat-cooling-gas under carbon

- trading[C] // 2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), October 22-24, 2021, Taiyuan, China: 3918-3923.
- [25] 马燕峰, 范振亚, 刘伟东, 等. 考虑碳权交易和风荷预测误差随机性的环境经济调度[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 412-418.
MA Yanfeng, FAN Zhenya, LIU Weidong, et al. Environmental and economic dispatch considering carbon trading credit and randomness of wind power and load forecast error[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 412-418.
- [26] 娄素华, 胡斌, 吴耀武, 等. 碳交易环境下含大规模光伏电源的电力系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 91-97.
LOU Suhua, HU Bin, WU Yaowu, et al. Optimal dispatch of power system integrated with large scale photovoltaic generation under carbon trading environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 91-97.
- [27] 瞿凯平, 黄琳妮, 余涛, 等. 碳交易机制下多区域综合能源系统的分散调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 697-707.
QU Kaiping, HUANG Linni, YU Tao, et al. Decentralized dispatch of multi-area integrated energy systems with carbon trading[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 697-707.
- [28] 李晓露, 单福州, 宋燕敏, 等. 考虑热网约束和碳交易的多区域综合能源系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 52-59.
LI Xiaolu, SHAN Fuzhou, SONG Yanmin, et al. Optimal dispatch of multi-region integrated energy systems considering heating network constraints and carbon trading[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 52-59.
- [29] 王明军, 穆云飞, 孟宪君, 等. 考虑热能输运动态特性的电-热综合能源系统优化调度方法[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 132-142.
WANG Mingjun, MU Yunfei, MENG Xianjun, et al. Optimal scheduling method for integrated electro-thermal energy system considering heat transmission dynamic characteristics[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 132-142.
- [30] WANG Jun, WANG Taohong. A microgrid control strategy based on consistency protocol[C] // 2022 IEEE 5th International Conference on Electronics Technology (ICET), May 13-16, 2022, Chengdu, China: 453-458.
- [31] 卫志农, 张思德, 孙国强, 等. 基于碳交易机制的电-气互联综合能源系统低碳经济运行[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 9-16.
WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, et al. Carbon trading based low-carbon economic operation for integrated electricity and natural gas energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 9-16.
- [32] CHEN Jiming, NING Ke, ZHANG Qing, et al. Low-carbon optimization operation of integrated energy system considering ladder-type carbon trading and carbon capture[C] // 2022 7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), April 15-17, 2022, Hangzhou, China: 1916-1921.
- [33] LI Qiao, GAO Wenzhong, ZHANG Huaguang, et al. Consensus-based distributed economic dispatch control method in power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 10(1): 941-954.
- [34] CHEN Wushun, LI Tao. Distributed economic dispatch for energy internet based on multiagent consensus control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2020, 66(1): 137-152.
- [35] CARLI R, LOVISARI E. Robust synchronization of networks of heterogeneous double-integrators[C] // 2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC), December 10-13, 2012, Maui, HI, USA: 260-265.
- [36] CHEN Zhenping, LI Dequan, HUANG Yourui, et al. Event-triggered communication for time synchronization in WSNs[J]. Neurocomputing, 2016, 177: 416-426.

收稿日期: 2022-12-14; 修回日期: 2023-04-02

作者简介:

贺文(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统分布式经济调度优化; E-mail: 1005623396@qq.com

陈珍萍(1981—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为网络控制、隐私保护和分布式优化等; E-mail: zhpchen10@163.com

胡伏原(1978—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为智能低碳技术、智能运维等。

(编辑 魏小丽)